



UNIVERSIDAD  
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL  
PIRHUA

# ANÁLISIS NUMÉRICO DEL COMPORTAMIENTO DE ENROCADOS COMO PROTECCIÓN EN ALIVIADEROS DE COMPUERTAS

Manuel Chinga-Rosillo

Piura, setiembre de 2016

FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Civil

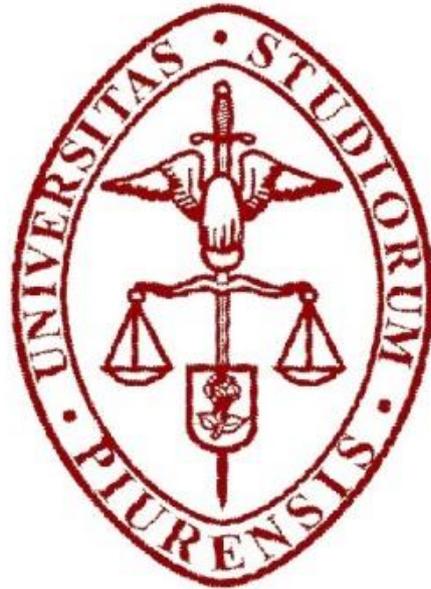
Chinga, M. (2016). *Análisis numérico del comportamiento de enrocados como protección en aliviaderos de compuertas* (Tesis de pregrado en Ingeniería Civil). Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.



Esta obra está bajo una [licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](#)

[Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura](#)

**UNIVERSIDAD DE PIURA**  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**ANÁLISIS NUMÉRICO DEL COMPORTAMIENTO DE ENROCADOS COMO  
PROTECCIÓN EN ALIVIADEROS DE COMPUERTAS**

Tesis para optar el Título de  
Ingeniero Civil

**Manuel Alejandro Chinga Rosillo**

**Asesor: Ing. Leo R. Guerrero Asmad**

Piura, Setiembre 2016



A Dios, a mi familia y amigos que siempre se sentirán orgullosos de mis logros y de mi crecimiento profesional.



## Prólogo

Uno de los elementos más importantes dentro de las estructuras hidráulicas que conforman una central hidroeléctrica es la obra de excedencia, dicha obra está conformada por un aliviadero fijo y un aliviadero de compuertas. La operación normal y en épocas de avenidas genera altas velocidades aguas abajo del aliviadero de compuertas, por lo tanto, se diseñan estructuras de disipación que permitan restituir el flujo sin afectar la estructura principal y las condiciones naturales. El material que constituye, generalmente, estas estructuras pueden ser roca natural, enrocado o concreto.

El estudio del comportamiento del flujo, agua y sedimentos, en el aliviadero de compuertas y las estructuras de disipación, se vienen realizando utilizando fórmulas teóricas y experimentales y modelos físicos. Sin embargo, el avance que ha tenido la modelación numérica, con respecto a la representación de fenómenos de erosión y sedimentación, se vuelve una herramienta complementaria en el diseño.

En base a este motivo, la presente tesis, en modalidad de artículo de Congreso Internacional, se enfocará en representar el comportamiento de los enrocados utilizando la modelación numérica.

Por otro lado, es importante mencionar que en el año 2013 me involucre al Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria (IHHS) de la Universidad de Piura, para el estudio en modelación física de una estructura hidráulica. Esto me permitió observar fenómenos relacionados al transporte de sedimentos.

Quisiera agradecer a quienes de una u otra forma contribuyeron en el avance de dicha investigación, especialmente al Ing. Leo R. Guerrero Asmad, por su constante empeño en aumentar la calidad en la investigación, por la motivación en aprender importantes software, brindar la información necesaria y requerida; y por último, por tener el tiempo necesario para la mínima duda presentada.

También se agradece a los co-autores del artículo Dr. Jorge Reyes Salazar y Dr. Alejandro Mendoza, por su apoyo incondicional y su aporte intelectual en el artículo, sin amplia experiencia no se hubiera logrado una óptima tesis.

## **Resumen**

El desarrollo de la investigación consistió principalmente en representar el comportamiento del enrocado mediante la modelación numérica, para lo cual se utilizaron datos de un modelo físico adecuado para la investigación con el fin de lograr una buena calibración entre estas dos herramientas. Las fases de estudio se dividieron en dos: el río sin estructuras y el río con estructuras.

El modelo numérico logró representar las condiciones hidráulicas y sedimentológicas aguas abajo del aliviadero de compuertas que se presentaron en el modelo físico, por lo que resulta factible decir que los modelos numéricos son una herramienta confiable para el diseño de las estructuras hidráulicas.

Adicionalmente esta herramienta beneficia económicamente al diseño de estructuras, ya que pueden ir analizando varias opciones para llegar al diseño definitivo y correcto.



# Índice

Prólogo .....	vii
Resumen .....	ix
Índice.....	xi
Introducción.....	1
Capítulo 1: Motivación y justificación.....	3
Capítulo 2: Antecedentes .....	5
2.1    Introducción.....	5
2.2    Modelación física.....	6
2.3    Modelo físico.....	6
2.3.1    Características hidráulicas y sedimentológicas .....	7
2.3.2    Ensayos en el modelo físico .....	8
2.3.3    Diseño modificado.....	14
2.4    Modelación numérica.....	16
2.5    Protecciones en enrocados .....	17
Capítulo 3: Marco Teórico .....	19
3.1    Telemac Mascaret .....	19
3.2    Sisyphe .....	20
3.2.1    Ejecución de un cálculo sedimentológico .....	21
3.2.1.3.1.    Método de encadenamiento.....	22
3.2.1.3.2.    Acoplamiento interno .....	23
3.2.2    Parámetros hidrodinámicos.....	25
3.2.3    Parámetros de sedimentos.....	27
3.2.4    Transporte de carga sólida .....	28
3.2.5    Efecto de la pendiente de fondo .....	29
3.2.6    Deslizamiento de sedimento.....	31
3.2.7    Transporte de carga de fondo en canales curvos .....	31
3.3    Enrocados.....	32
3.3.1    Ventaja del enrocado .....	32
3.3.2    Características del enrocado.....	32
3.3.3    Diseño de enrocado.....	33
3.4    Erosión .....	34
3.4.1    Tipos de erosión.....	34

Capítulo 4: Metodología .....	35
4.1 Hipótesis .....	35
4.2 Objetivo .....	35
4.3 Desarrollo del proceso .....	35
4.3.1 Búsqueda de información de modelación hidráulica de enrocados como medio de protección de las estructuras de disipación .....	36
4.3.2 Elaboración de la superficie del río sin y con estructuras en AutoCAD Civil 3D .....	36
4.3.3 Creación de la malla del río sin y con estructuras .....	36
4.3.4 Calibración del modelo numérico .....	36
4.3.5 Diseño del río con las estructuras .....	36
4.3.6 Análisis de resultados entre el modelo físico y el modelo numérico .....	37
4.3.7 Redacción de artículo final .....	37
4.4 Desarrollo de la modelación numérica .....	37
4.4.1 Pre-procesamiento .....	37
4.4.2 Post-procesamiento .....	46
Capítulo 5: Tesis Modalidad Artículo .....	49
Análisis numérico del comportamiento de enrocados como protección en aliviaderos de compuertas .....	50
RESUMEN .....	50
ABSTRACT .....	50
PALABRAS CLAVES .....	51
1. INTRODUCCIÓN .....	51
2. OBJETIVO .....	52
3. MODELACIÓN FÍSICA .....	52
4. MODELACIÓN NUMÉRICA .....	54
4.1 PRIMER ESCENARIO: CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO .....	55
4.2 SEGUNDO ESCENARIO: MODELACIÓN CON ESTRUCTURAS .....	57
5. CONCLUSIONES .....	62
6. AGRADECIMIENTO .....	63
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	63
Capítulo 6: Conclusiones .....	64
Bibliografía .....	65
Nomenclatura .....	67

ANEXOS.....	69
ANEXO A: Resultados y validación del primer escenario del modelo numérico .....	70
ANEXO B: Resultados y validación del segundo escenario del modelo numérico .....	88
ANEXO C: “Script” del Matlab .....	106
ANEXO D: Aceptación de Resumen y Artículo .....	110



## **Introducción**

En los últimos años, el avance de la tecnología en la ingeniería ha ayudado a mejorar diseños y proyectos de estructuras hidráulicas, a través de la modelación numérica. Esto ha llevado a desarrollarla para apreciar y analizar los comportamientos hidrodinámicos, permitiendo evaluar y predecir el diseño definitivo de las estructuras. Por lo tanto, el fin de esta tesis es la representación del comportamiento hidráulico y sedimentológico que se observó en el enrocado ubicado aguas abajo y en el cauce del río del modelo físico.

En el primer capítulo, se explica la motivación y justificación que llevó a cabo la realización de la presente tesis, es decir, la razón que motivó, al tesista, para la realización de dicho modelo numérico bidimensional.

En el segundo capítulo, se explica los antecedentes, que comprende los estudios o proyectos previos relacionados con la tesis, como, protecciones en enrocados e investigaciones de estructuras hidráulicas en modelos físicos.

En el tercer capítulo, se ha creído conveniente elaborar un marco teórico, en donde se explica acerca de las aplicaciones y fórmulas usadas en modelo numérico Telemac Mascaret y su herramienta Sisyphé. También se menciona acerca de los diseños y ventajas de los enrocados, y por último los tipos de erosiones.

En el cuarto capítulo, se expone la metodología del desarrollo de la tesis que describa el pre-procesamiento y el post-procesamiento del análisis del modelo numérico bidimensional, tanto para los ensayos sin estructuras como con estructuras.

En el quinto capítulo, se presenta el formato oficial del artículo científico presentado al XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica 2016.

En el sexto capítulo se presentan las conclusiones de la presente tesis.



# Capítulo 1

## Motivación y justificación

La Ingeniería es una disciplina que pone en práctica no sólo conceptos y fundamentos teóricos, sino que se encuentra en constante actualización con las nuevas tecnologías en computadoras y los estudios que se puedan generar en diversos campos. De la misma manera, la hidráulica tiene como base tanto la física como la matemática, en donde éstas se relacionan, a través del comportamiento físico que se da en la naturaleza y buscan encontrar fórmulas matemáticas que puedan describir los fenómenos.

En la hidráulica, la modelación numérica, como se sabe, permite representar e idealizar los fenómenos hidráulicos y sedimentológicos observados en la naturaleza. Hoy en día, esto es muy aplicable de forma muy potente, debido a la mayor capacidad computacional existente y al avance en los algoritmos que resuelven ecuaciones que gobiernan un flujo.

Los modelos numéricos emplean, principalmente, ecuaciones diferenciales y condiciones iniciales de borde, que son resueltos utilizando técnicas de análisis numérico, es decir, los programas o software emplean métodos numéricos que les permiten calcular los diversos parámetros a conocer dentro del modelo discretizado. Los modelos numéricos y su simulación son una herramienta relativamente nueva y de gran utilidad en el campo de la hidráulica.

Las herramientas de estudio se complementan y se espera que en un futuro se desarrolle la simulación híbrida (físico-numérica) dentro del campo de la ingeniería hidráulica. Esto facilita que los resultados ofrezcan la optimización entre la relación beneficio-costos y tiempo-eficiencia de diseño.

La motivación por realizar esta tesis parte del deseo por investigar, conocer y poner en práctica los métodos numéricos en el área de la hidráulica, con la finalidad de estudiar y analizar el comportamiento del flujo del agua y de los sedimentos, los cuales permiten

observar dicho comportamiento en diversos escenarios, que incluyen por ejemplo, caudales extraordinarios, de operación normal, de limpieza, y sobre todo la operación de captación.

En la Universidad de Piura, el Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria (IHHS) ha realizado diversos estudios de proyectos hidroenergéticos, entre los cuales existe un estudio de la protección del enrocado aguas abajo de un aliviadero de compuertas. En este estudio se probaron varias granulometrías de enrocado y estructuras de disipación, lo cual motivó de sobremanera, desarrollar una investigación del comportamiento del enrocado mediante un análisis numérico.

La importancia del desarrollo de la tesis radica en el fortalecimiento de competencias necesarias para el actual ingeniero civil, profesional exigido en el manejo de herramientas tecnológicas aplicadas en un contexto determinado, donde además se requiere el pensamiento crítico para responder de manera óptima a los nuevos y crecientes desafíos profesionales en un entorno global enfocado en la gestión de la información y del conocimiento.

El aporte profesional por este autor se concreta con la presentación del artículo “Análisis numérico del comportamiento de enrocados como protección en aliviaderos de compuertas”, al XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica 2016, el cual tiene como sede Lima. En esta oportunidad, el Congreso pone especial énfasis en el tema de la sabiduría hidráulica ancestral a la tecnología de punta a los servicios del desarrollo sostenible, debido al actual crecimiento histórico de las economías latinoamericanas y, en especial, de nuestro país. También cubrirá una amplia gama de campos de interés relacionados con las ciencias de hidro-ambientales y la ingeniería, poniendo especial interés en los posibles efectos del cambio climático sobre el recurso hídrico y el medioambiente, incluyendo la evaluación y el planteamiento de medidas de mitigación.

## Capítulo 2

### Antecedentes

#### 2.1 Introducción

El Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria (IHHS) de la Universidad de Piura, creado bajo el auspicio de la Cooperación Alemana, se inauguró en diciembre de 1984. Su objetivo es buscar soluciones sostenibles a problemas concretos de la sociedad enfocando todas sus actividades, a través de la investigación multidisciplinario de los recursos hídricos, se interesa por desarrollar conocimientos y habilidades en el campo de la hidráulica, hidrología e ingeniería sanitaria y ambiental, y promover su aplicación directa. El IHHS posee una gran experiencia en investigaciones basadas en la modelación física de proyectos hidráulicos, entre los cuales podemos nombrar las siguientes investigaciones:

- Investigación en el Modelo Hidráulico de la Presa Tablachaca, Río Mantaro.2007
- Investigación en el Modelo Hidráulico de la Presa Limón del Proyecto Olmos, 2009
- Investigación en el Modelo Hidráulico de la Presa Capillucas, 2009.
- Investigación en el Modelo Hidráulico del vertedero Sabana Yegua, 2011.
- Investigación en el Modelo Hidráulico del Proyecto Especial de Irrigación e Hidroenergético del Alto Piura, 2013.
- Investigación en el Modelo Hidráulico del Proyecto de Chaglla, 2013.

Adicionalmente se cuenta con el aporte valioso de las tesis publicadas anteriormente en la Universidad de Piura, como:

- Investigación de la disipación de energía en el modelo hidráulico del Proyecto Alto Piura. (Ríos Varillas, Diego Ignacio; Universidad de Piura, Programa Académico de Ingeniería Civil, Piura Mayo 2013).

- Optimización del diseño hidráulico del proyecto Miraflores utilizando el modelo numérico Telemac-2D. (Willis Samamé, Eduardo Daniel; Universidad de Piura, Programa Académico de Ingeniería Civil, Piura Diciembre 2015).
- Investigación hidráulica utilizando un modelo numérico 3D de la Presa Tablones Alto – Chinecas. (Barreto Escobar, David; Universidad de Piura, Programa Académico de Ingeniería Civil, Piura 2014).

## 2.2 Modelación física

En definitiva, la modelación implica simular un fenómeno real, conceptualizándolo y simplificándolo en mayor o menor medida, para luego, por último describirlo y cuantificarlo.

La modelación se ha desarrollado notablemente en el campo de la ingeniería hidráulica. Existen evidencias de estudios de diseños hidráulicos realizados desde tiempos antiguos, mediante pequeños modelos de estructuras y máquinas. Esto resulta claro a partir del siglo XVII con la introducción del método científico (Rocha, 2003); sin embargo hasta hace poco tiempo la experimentación hidráulica se llevaba a cabo habitualmente a escala real ya sea en vertederos, canales, tuberías y presas construidas sobre el terreno.

También se tiene estudios basados en la modelación física de proyectos hidráulicos realizados por el IHHS aproximadamente a partir del año 1994.

Es durante el último medio siglo, que se han desarrollado métodos por los cuales se es posible predecir la conducta de una estructura o prototipo, estos son, la modelación física y numérica, que en conjunto se complementan. Estos métodos se basan en las teorías de similitud hidráulica, tanto geométrica, cinemática y dinámica, que en conjunto relacionan magnitudes físicas homólogas definidas entre ambos sistemas.

## 2.3 Modelo físico<sup>1</sup>

De todos los proyectos realizados por el IHHS se ha optado por elegir un modelo físico donde se estudió la disipación de energía y variación del enrocado como medio de protección. Dicho proyecto tuvo como objetivo captar y trasvasar el agua de una cuenca a otra, para fines de riego y generación de energía. La investigación fue realizada en un modelo a escala 1/20 y el objetivo principal fue garantizar el diseño y el buen funcionamiento de las estructuras.

El modelo estuvo ubicado en la parte externa del IHHS, compuesto principalmente por un sistema de alimentación, regulación, tanque de aquietamiento de entrada y control de caudal, canal de alimentación, poza de entrada, plataforma del cauce, cauce propiamente, poza de salida y canal de retorno (Ver Figura 1). La instalación experimental contó con diversos dispositivos e instrumentos que permitieron la medición de los niveles de agua, las velocidades de flujo y las pendientes energéticas. La instrumentación estuvo

---

<sup>1</sup> Informe Final del Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura, elaborado por el IHHS de la Universidad de Piura.

formada principalmente por limnómetro, correntómetro, nivel topográfico, mira milimétrica, tamices y balanzas.



**Figura 1.** Esquema general de la ubicación del modelo.

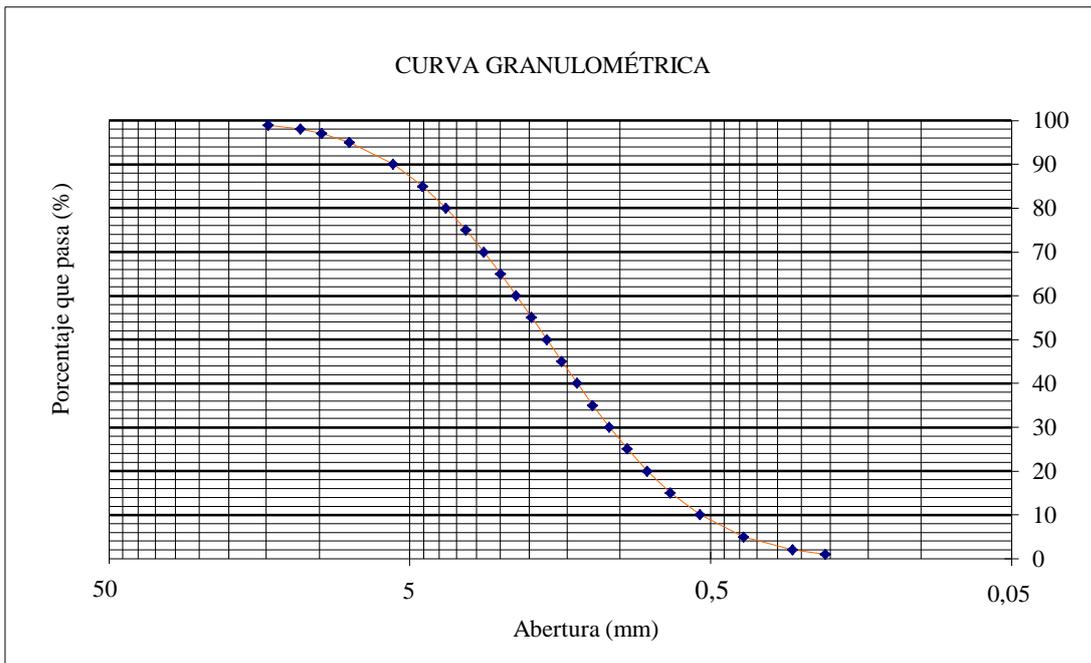
*Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria, 2013.*

### 2.3.1 Características hidráulicas y sedimentológicas

Las características principales del modelo físico son las siguientes:

- a) Para una mejor representación de niveles se trabajó con un BM local:
  - Plataforma de ingreso al aliviadero (76,645 m).
  - Nivel inicial de enrocado (76,55 m)
  - Nivel máximo correspondiente al nivel normal de caudal máximo (76,89 m).
  - Nivel normal de captación frente de la bocatoma (76,85 m).
  
- b) Caudales ensayados:
  - $Q = 0,33 \text{ m}^3/\text{s}$
  - $Q = 0,29 \text{ m}^3/\text{s}$
  - $Q = 0,26 \text{ m}^3/\text{s}$
  - $Q = 0,23 \text{ m}^3/\text{s}$
  - $Q = 0,17 \text{ m}^3/\text{s}$
  
- c) Caudales de diseño para el dimensionamiento de las estructuras hidráulicas:
  - Capacidad máxima (regular) de control de avenidas.....  $Q = 0,26 \text{ m}^3/\text{s}$
  - Capacidad de bocatoma .....  $Q = 0,015 \text{ m}^3/\text{s}$

d) Curva granulométrica, ver Figura 2.



**Figura 2.** Curva granulométrica teórica del río.

*Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria, 2013.*

*Elaboración: Manuel Chinga.*

## 2.3.2 Ensayos en el modelo físico

### 2.3.2.1 Primer escenario – Ensayo sin estructuras

Este primer escenario, llamado también calibración, consiste en verificar que el modelo físico sea capaz de reproducir y reflejar el comportamiento hidráulico y sedimentológico y los diferentes parámetros hidráulicos del prototipo. Es decir, consiste en adecuar las condiciones y características físicas e hidráulicas, tales como la rugosidad del lecho, la descarga, niveles de agua (Ver Figura 3).

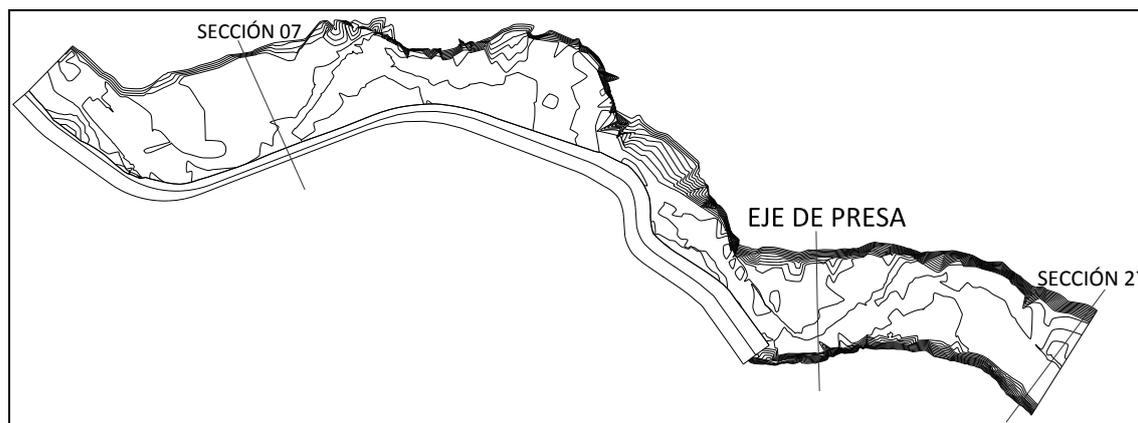
Se eligieron 3 secciones de control para tomar las mediciones correspondientes, donde la primera sección se encuentra ubicada aguas arriba del río, la segunda sección se ubica al eje de las estructuras y la tercera sección se ubica aguas abajo del río (Ver Figura 4).



**Figura 3.** Secciones de control.

*Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria, 2013.*

*Elaboración: Manuel Chinga.*



**Figura 4.** Vista en planta de las secciones de control.

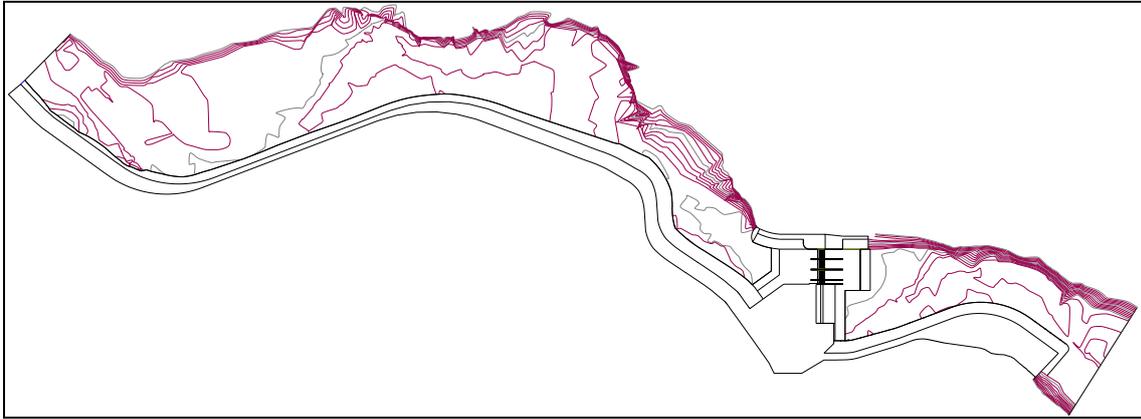
*Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria, 2013. Elaboración: Manuel Chinga.*

### 2.3.2.2 Segundo Escenario - Ensayo con estructuras

Una vez culminada la etapa de los ensayos del primer escenario, se procedió a la construcción de las estructuras de la presa correspondientes al segundo escenario, las cuales son:

- a) Aliviadero móvil.
- b) Canal de limpia.
- c) Umbral de captación.
- d) Canal de aproximación de bocatoma.
- e) Túnel de descarga ecológica.
- f) Vertedero de excedencias.
- g) Bocatoma.

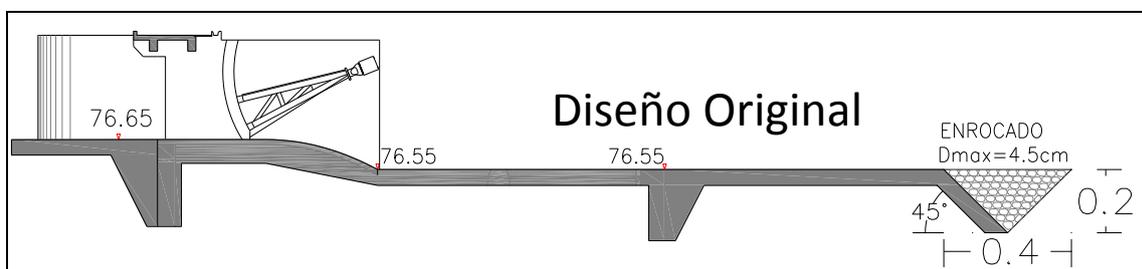
Se procede a realizar los ensayos en condiciones críticas, para poder determinar la máxima profundidad de erosión ocasionada por las altas velocidades aguas abajo del aliviadero de compuertas, que se podría presentar con los diferentes caudales. Estos se ensayaron con las tres compuertas del aliviadero móvil completamente abiertas en simultáneamente. Se presenta una vista en planta del cauce del río con las estructuras de la presa (Ver Figura 5).



**Figura 5.** Vista en planta del aliviadero de compuertas.

*Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria, 2013. Elaboración: Manuel Chinga.*

A la construcción de todas las estructuras de la presa se le designó como diseño original, en donde se realizaron los ensayos del segundo escenario. Adicionalmente de las estructuras, el diseño consistió en tener una zona de enrocado como protección de forma triangular y con un  $D_{\max} = 4,5$  cm (Ver Figura 6).



**Figura 6.** Perfil del aliviadero de compuertas.

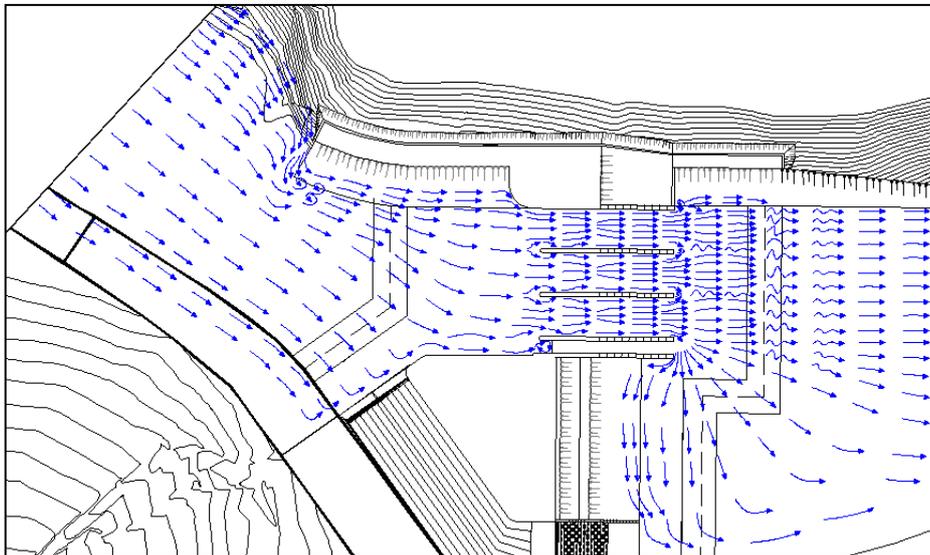
*Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria, 2013. Elaboración: Manuel Chinga.*

En este diseño se ensayaron los siguientes caudales:  $0,015 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $0,065 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $0,17 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $0,26 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $0,33 \text{ m}^3/\text{s}$ . Para la presente tesis se tomarán los resultados para caudales de  $0,17 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $0,26 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $0,33 \text{ m}^3/\text{s}$ , que se detallarán a continuación.

### 2.3.2.2.1 Caudal de $0,17 \text{ m}^3/\text{s}$

#### a) Distribución de Flujo

Se presenta la distribución de flujo, ver Figura 7.

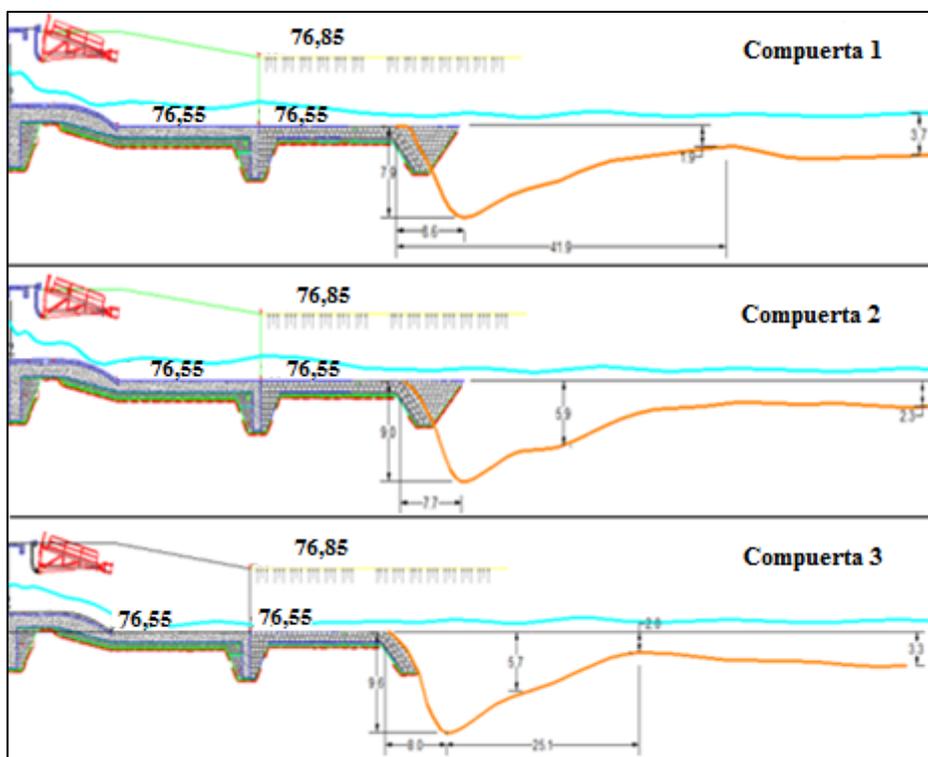


**Figura 7.** Distribución de flujo.

*Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria, 2013.*

#### b) Niveles de agua y erosión

Se presenta los niveles de agua y erosión, ver Figura 8.



**Figura 8.** Niveles de Agua y Erosión.

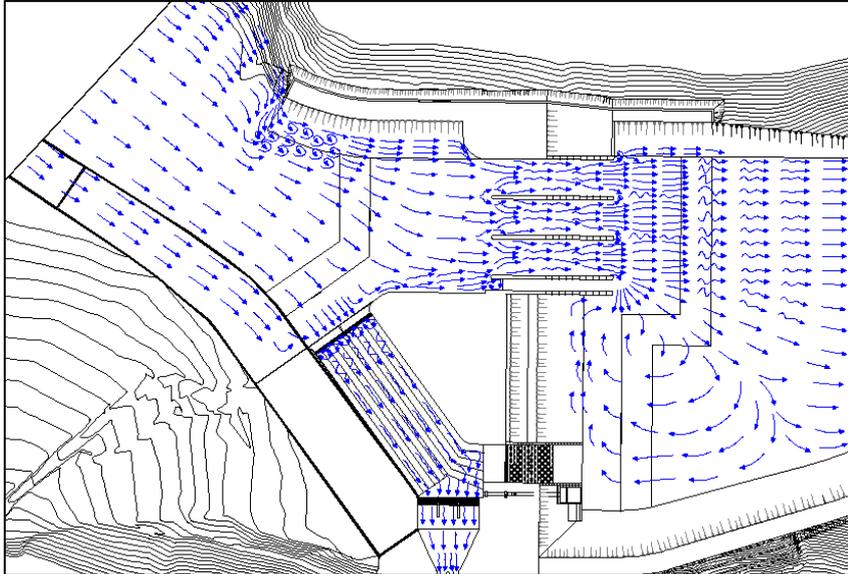
*Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria, 2013.*

*Elaboración: Manuel Chinga.*

### 2.3.2.2.2 Caudal de $0,26 \text{ m}^3/\text{s}$

#### a) Distribución de Flujo

Se presenta la distribución de flujo, ver Figura 9.

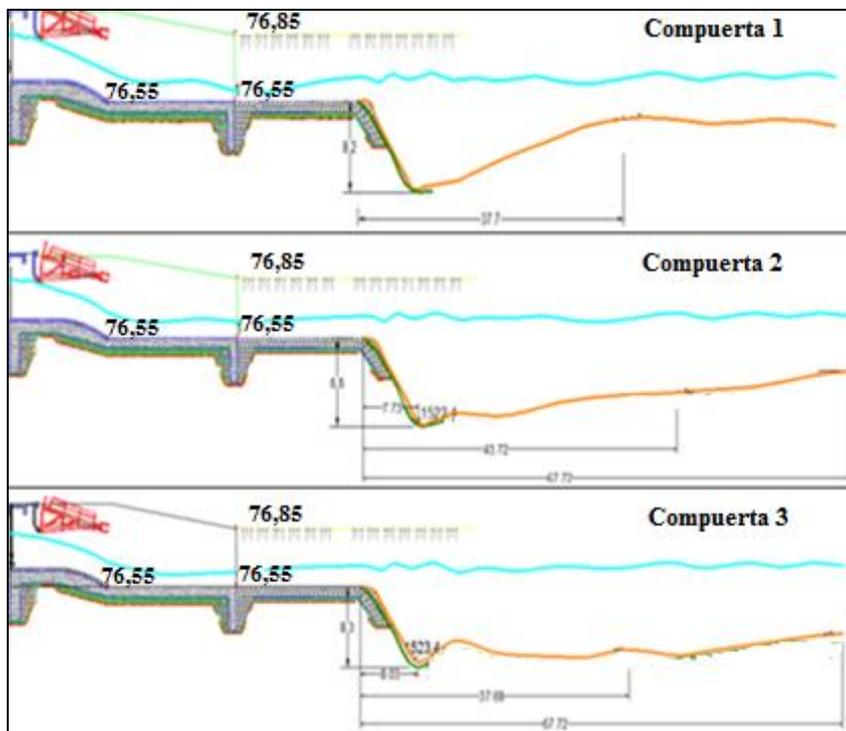


**Figura 9.** Distribución de flujo.

*Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria, 2013.*

#### b) Niveles de agua y erosión

Se presenta los niveles de agua y erosión, ver Figura 10.



**Figura 10.** Niveles de Agua y Erosión.

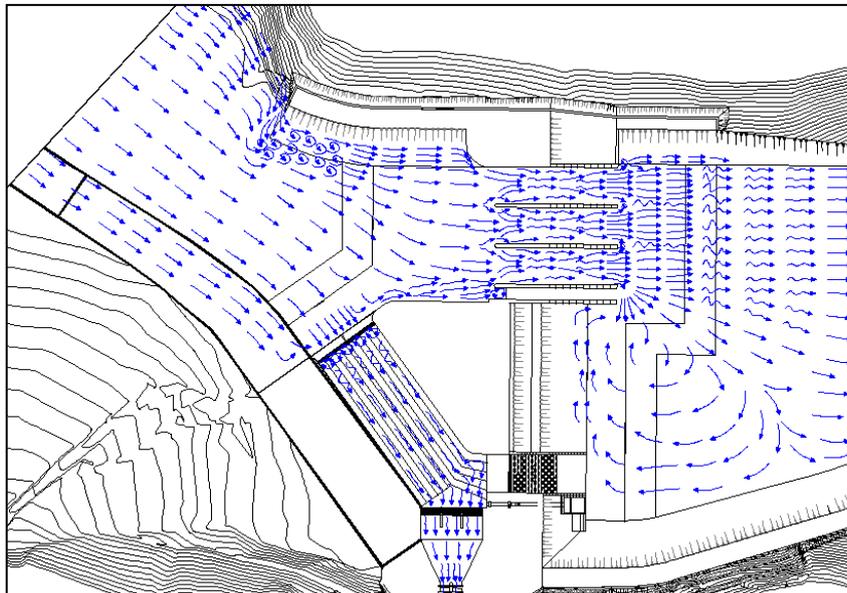
*Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria, 2013.*

*Elaboración: Manuel Chinga.*

### 2.3.2.2.3 Caudal de 0,33 m<sup>3</sup>/s

#### a) Distribución de Flujo

Se presenta la distribución de flujo, ver Figura 11.

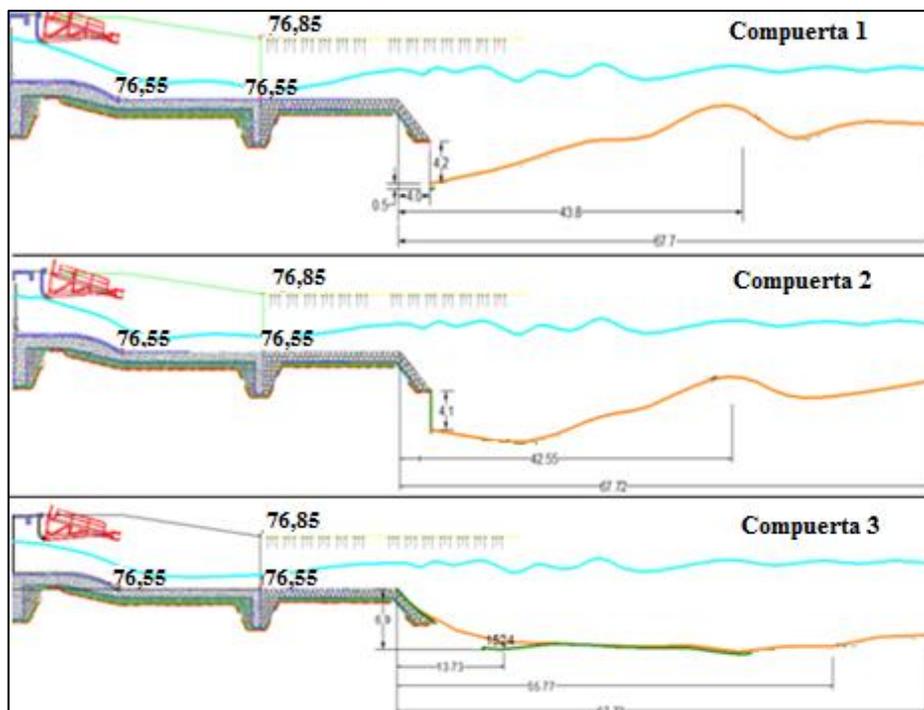


**Figura 11.** Distribución de flujo.

*Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria, 2013.*

#### b) Niveles de agua y erosión

Se presenta los niveles de agua y erosión, ver Figura 12.



**Figura 12.** Niveles de Agua y Erosión.

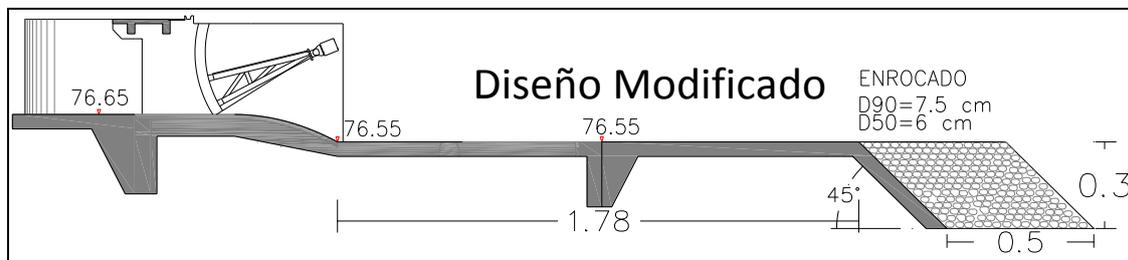
*Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria, 2013.  
Elaboración: Manuel Chinga.*

Según los resultados obtenidos en el modelo físico se resume en lo siguiente:

- Los valores de velocidad en las losas llegan hasta alrededor de 2,24 m/s.
- Para los caudales mayores, se llega a profundidades de 0,35 m aproximadamente, por tanto es un gran riesgo para la presa.
- Se recomendó una modificación en la zona de enrocado como protección aguas abajo del aliviadero de compuertas con el fin de disminuir dicha erosión, y por ende disminuye la disipación de energía, este será llamado diseño modificado.

### 2.3.3 Diseño modificado

Debido a las grandes erosiones presentadas en el diseño original, se realizaron varias modificaciones en la zona de enrocado como protección ubicado aguas abajo del aliviadero de compuertas, tanto en su forma como en su granulometría. La tesis presente la mejor opción, consistente en la construcción de plataforma horizontal y cambio en la solera de enrocado (Ver Figura 13).



**Figura 13.** Perfil del aliviadero de compuertas.

*Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria, 2013. Elaboración: Manuel Chinga.*

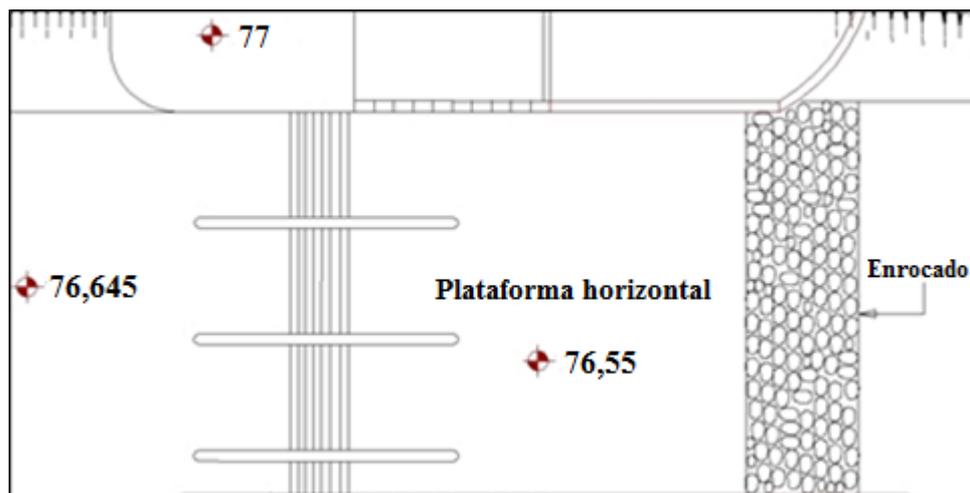
A continuación se explicará detalladamente los cambios que se realizaron para poder llegar a la modificación definitiva.

#### 2.3.3.1 Conservación de la plataforma horizontal

Esta plataforma se encuentra en la cota 76,55 m y con una longitud total de 1,78 m en la zona aguas abajo del aliviadero de compuertas (Ver Figura 14).

#### 2.3.3.2 Proyección del muro divisorio

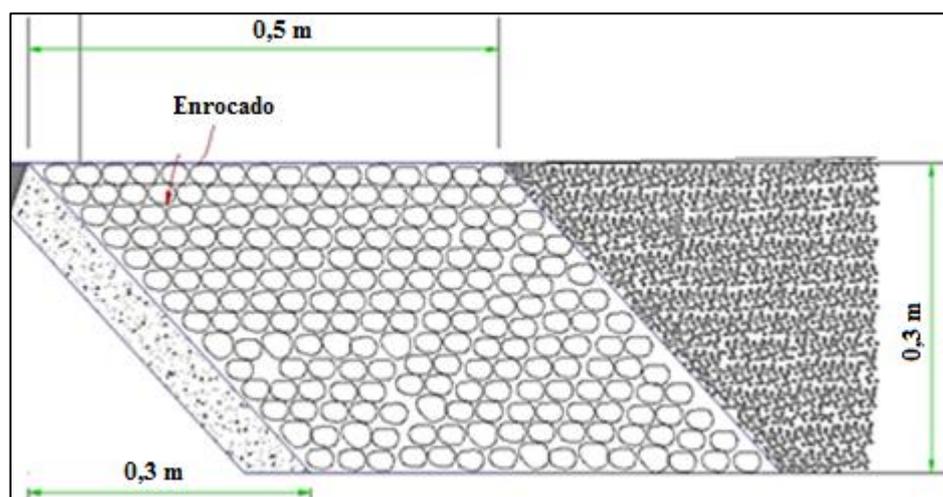
Este muro se encuentra entre el aliviadero fijo y el aliviadero móvil, con longitud de 0.73 m después del término de la plataforma horizontal (Ver Figura 14).



**Figura 14.** Planta del diseño definitivo del aliviadero de compuertas.  
 Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria, 2013.  
 Elaboración: Manuel Chinga.

### 2.3.3.3 Modificación de solera

Modificación en las dimensiones y forma de la solera de enrocado ubicado aguas abajo del aliviadero de compuertas. Esta tendrá un ancho de 0,5 m, altura de 0,3 m y una disposición en forma romboidal, las especificaciones de enrocado son de  $D_{90} = 0,075$  m y  $D_{50} = 0,06$  m (Ver Figura 15).

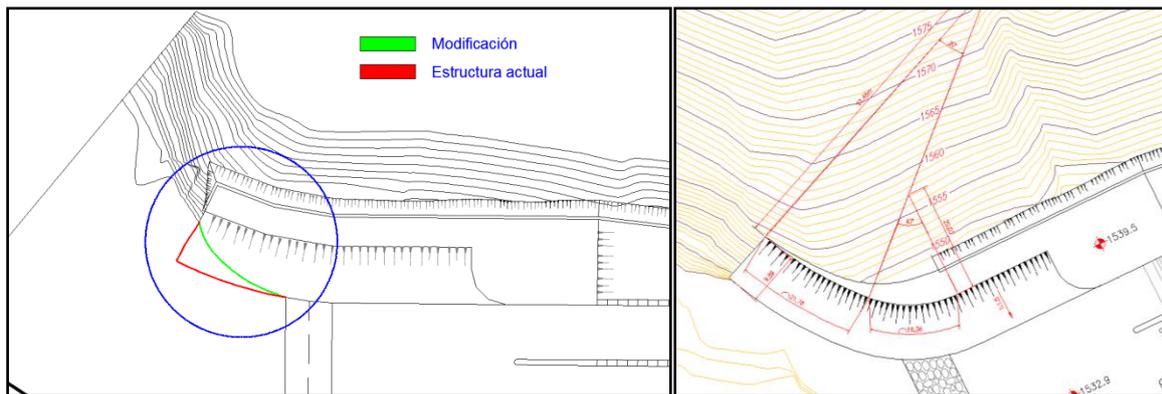


**Figura 15.** Perfil del enrocado en forma romboidal.  
 Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria, 2013.  
 Elaboración: Manuel Chinga.

### 2.3.3.4 Estructuras complementarias

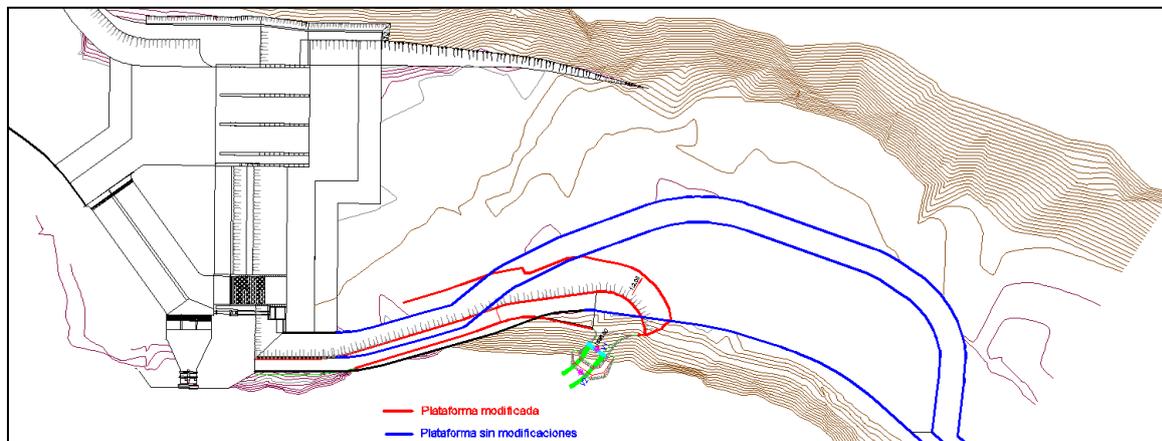
Un aliviadero de compuertas cuenta con estructuras de aproximación y de salida que permiten la uniformidad y gradualidad del flujo de agua.

En el aliviadero de estudio, en la margen izquierda se observó una protuberancia bien marcada que causa separación del flujo de la frontera sólida, generando un vórtice y erosión local, por lo tanto se realizó una modificación en dicho margen (Ver Figura 16).



**Figura 16.** Modificación en margen izquierda aguas arriba.  
*Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria, 2013.*

Aguas abajo del aliviadero se realizaron cambios en la plataforma del dique con la finalidad de conservar unas condiciones de entrega favorable al río (Ver Figura 17).



**Figura 17.** Modificación de plataforma del dique aguas abajo del aliviadero móvil.  
*Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria, 2013.*

## 2.4 Modelación numérica

La modelación numérica se ha convertido en una herramienta complementaria a la modelación física, en donde los resultados que ofrezcan cada tipo de modelo maximicen el diseño de las estructuras hidráulicas. Por lo tanto, se tiene dos tesis de vital importancia, en la cual han desarrollado modelación numérica.

- a) Optimización del diseño hidráulico del proyecto Miraflores utilizando el modelo numérico Telemac-2D. (Willis Samamé, Eduardo Daniel; Universidad de Piura, Programa Académico de Ingeniería Civil, Piura Diciembre 2015).

Consistió en emplear un modelo numérico bidimensional para simular el comportamiento hidráulico de una bocatoma, presentando resultados a detalle de diferentes parámetros que ayudarán a conocer el comportamiento hidráulico y sedimentológico del flujo. Se hizo uso del Telemac Mascaret como programa para las simulaciones numéricas.

- b) Investigación hidráulica utilizando un modelo numérico 3D de la Presa Tablones Alto – Chincas. (Barreto Escobar, David; Universidad de Piura, Programa Académico de Ingeniería Civil, Piura 2014).

Esta investigación radicó en simular una estructura hidráulica, utilizando la modelación numérica tridimensional, en donde el objetivo principal fue estudiar el comportamiento hidráulico de una presa derivadora, durante la operación de las compuertas. Se hizo uso del SSIIM como programa para las simulaciones numéricas.

## **2.5 Protecciones en enrocados**

Actualmente existen muchas investigaciones y estudios realizados en la estabilidad de enrocados como protección, tanto los lechos de ríos como las estructuras hidráulicas pueden estar comprometidas negativamente.

Se ha optado por elegir el artículo “*Estabilidad de enrocados aguas debajo de disipadores a resalto*” de Lopardo y Casado (2005), en donde se estudia la estabilidad de enrocados de protección aguas abajo de disipadores de resalto. Los resultados de diámetros estables resultan en función del número de Froude de ingreso al resalto y la sumergencia del mismo.

Así mismo la investigación contempla un estudio comparativo de los diámetros representativos estables estimados para canales con turbulencia normal y los obtenidos para resistir los valores instantáneos que se presentan en flujos macroturbulentos. Se demuestra que para un determinado número de Froude incidente y diferentes velocidades, los valores de diámetros estables obtenidos a partir de los manuales de diseño convencionales están claramente del lado de la inseguridad.



## Capítulo 3

### Marco Teórico

La mayoría de la información utilizada para la elaboración de este capítulo fue obtenida del manual del software Telemac Mascaret y del Sisyphe, incluyendo el aporte del tesista.

#### 3.1 Telemac Mascaret

Es un programa de elementos finitos hecho para flujos 2D y cuasi 3D en ingeniería hidráulica. Este programa fue desarrollado por el Laboratorio Nacional de Hidráulica y Medio Ambiente (Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement - LNHE) de la Dirección de Investigación y Desarrollo de la Junta de Electricidad de Francia (EDF-I + D), en colaboración con otros institutos de investigación.

Telemac es un conjunto de códigos que resuelve la ecuación de flujo a superficie libre considerando un tirante promedio, la cual fue derivada por Barré de Saint-Venant (1871). Los principales resultados de cada nodo de la malla computacional son el tirante o profundidad del agua y el promedio de la velocidad en la vertical. La principal aplicación del Telemac es en superficies de aguas marinas o ríos; además el modelo es capaz de resolver fenómenos como:

- Propagación de ondas largas, incluidos los efectos no lineales.
- La fricción en el lecho.
- El efecto de la fuerza de Coriolis.
- Los efectos de los fenómenos meteorológicos, como la presión atmosférica y el viento.
- Turbulencia.
- Flujo supercrítico y subcrítico.
- Influencia de la temperatura y gradientes de salinidad horizontales sobre la densidad.
- Coordenadas cartesianas o esféricas de grandes dominios.
- Zonas secas en el campo computacional: planos de marea y llanuras de inundación.

- Arrastre y difusión de un trazador por las corrientes, incluidos términos de creación y desintegración.
- Seguimiento de partículas y el cálculo de las derivas de Lagrange.
- El tratamiento de singularidades: presas, diques, alcantarillas, etc.
- Saltos fuera del dique.
- La inclusión de las fuerzas de arrastre creadas por estructuras verticales.
- La inclusión de los fenómenos de porosidad.
- La inclusión de las corrientes inducidas por las olas (por vínculos transversales con los módulos de Artemis y Tomawac).
- Acoplamiento con el transporte de sedimentos.
- Acoplamiento con herramientas de calidad del agua.

El software tiene muchos campos de aplicación: En el ámbito marítimo, se puede hacer mención del dimensionamiento de las estructuras portuarias, el estudio de los efectos de la construcción de diques sumergibles o dragado, el impacto de los residuos de alta de un emisario de la costa o el estudio de los penachos térmicos. En ríos, puede estudiar el impacto del río respecto a las estructuras, rompimientos de presas, inundaciones y transporte de sedimentos.

Telemac tiene la ventaja de procesamiento numérico: el uso de los resultados básicos, es posible calcular muchas otras magnitudes, como los cambios en el nivel del agua en cualquier punto del modelo o descarga que fluyen a lo largo de un río, a través de una estructura o en una llanura de inundación, los cambios en los volúmenes almacenados en un lecho de agua de alta, o una evaluación de las trayectorias, etc.

A pesar de su aparente complejidad, produce un soporte de muy alta calidad para las evaluaciones hidráulicas en términos de análisis de los resultados y la comprensión de los fenómenos hidráulicos en la presencia de áreas de flujo complejas.

### **3.2 Sisyphé**

Sisyphé es un modelo morfodinámico y de transporte de sedimentos el cual forma parte de la hidroinformática de elementos finitos y del sistema de volúmenes infinitos de Telemac Mascaret. La velocidad de transporte de sedimentos, divididos en carga de fondo y carga suspendida, son calculados en cada punto de la cuadrícula como una función de varios parámetros de flujos (velocidad, profundidad del agua, altura de las olas, etc.) y de sedimentos (diámetro del sedimento, densidad relativa, velocidad de sedimentación, etc.). La carga de fondo es calculada usando una de las fórmulas clásicas para el transporte de sedimentos, disponibles en la literatura. La carga suspendida está determinada por la solución de una ecuación de transporte adicional para el promedio de la concentración suspendida de sedimentos. La ecuación de la evolución del fondo (la ecuación de Exner) puede ser resuelta, mediante el uso de cualquiera de los métodos de elementos finitos o volumen finito.

Sisyphe es aplicable para sedimentos no cohesivos (uniforme o graduado), sedimentos cohesivos, así como mezclas arena-lodo. La composición de los sedimentos está representada por un número finito de clases, cada una caracterizada por su diámetro principal, densidad del grano y velocidad de sedimentación. El proceso de transporte de sedimentos puede incluir el efecto de la pendiente de fondo, lechos rígidos y corrientes secundarios. Para sedimentos cohesivos o mezclados, el efecto de la consolidación del lecho puede ser explicado.

Sisyphe puede ser aplicado para una gran variedad de condiciones hidrodinámicas incluyendo ríos, estuarios y aplicaciones costeras. Para después, los efectos de las ondas superpuestas a una corriente de marea pueden ser incluidos. Los esfuerzos de corte del lecho, descompuesto en fricción superficial y la forma de arrastre, pueden ser calculados ya sea imponiendo un coeficiente de fricción (Strickler, Nikuradse, Manning, Chézy o definido por el usuario) o por un predictor lecho-rugosidad.

Las variables hidrodinámicas pertinentes pueden ser impuestas ya sea en el modelo (método de encadenamiento) o calculados por un cálculo hidrodinámico (acoplamiento interno) mediante el uso de uno de los módulos hidrodinámicas del sistema Telemac (módulos Telemac 2D, Telemac 3D o Tomawac) o un modelo hidrodinámico externo.

### **3.2.1 Ejecución de un cálculo sedimentológico**

#### **3.2.1.1 Archivos de entrada**

El conjunto mínimo de archivos de entrada para ejecutar una simulación Sisyphe incluye el archivo de dirección (formato de archivo, *.txt*), el archivo de la geometría (formato selafin, *.slf*), y el archivo de las condiciones de contorno (formato de archivo, *.cli*). Para archivos adicionales u opcionales de entrada incluyen el archivo fortran, el archivo de referencia, el archivo de los resultados, etc.

#### **3.2.1.2 Archivo de dirección**

El archivo de dirección debe contener la información necesaria para el funcionamiento de un cálculo, incluyendo los parámetros físicos y numéricos que son diferentes de los valores predeterminados. Los parámetros del modelo se pueden especificar en el archivo de dirección Sisyphe (obligatorio). La siguiente información esencial se debe especificar en el archivo de dirección:

- Los archivos de entrada y de salida.
- Los parámetros físicos como el diámetro de arena, sedimento cohesivo o no cohesivo, la velocidad de sedimentación, etc.
- Los principales procesos de transporte de sedimentos, como su mecanismo y fórmulas de transporte, etc.
- Los procesos de transporte adicional de sedimentos, como corrientes secundarias, efecto de pendiente, etc.

- Las opciones numéricas y los parámetros, como esquema numérico, las opciones para resolver, etc.

### **3.2.1.3 Acoplamiento de la hidrodinámica y la morfodinámica**

Existen dos métodos para la vinculación del modelo hidrodinámico y el modelo morfodinámico: el primero es por encadenamiento, consiste en que el flujo se obtiene a partir de una simulación hidrodinámica anterior asumiendo un lecho fijo; y el segundo es por acoplamiento interno, en donde tanto el flujo y la evolución de fondo se actualizan en cada paso de tiempo.

#### **3.2.1.3.1. Método de encadenamiento**

##### **a) Principio**

Para este método, ambos modelos, hidrodinámicos y morfodinámicos, se ejecutan de forma independiente. Durante la primera simulación hidrodinámica, se asume el lecho fijo. Luego, en la etapa morfodinámica, el flujo de agua y la superficie libre se leen desde el archivo de resultados hidrodinámicos anteriormente simulados. El método de encadenamiento sólo se justifica para flujos relativamente simples, debido a la diferencia de escalas de tiempo entre la hidrodinámica y la evolución del lecho o fondo. Para flujos inestables, Sisyphé puede utilizar una función inestable, es decir el campo de flujo se interpola linealmente entre dos pasos de tiempo del archivo hidrodinámico. Para los caudales constantes, se utiliza el último paso de tiempo del archivo hidrodinámico y se asume que la velocidad de flujo y la superficie libre sean constantes, mientras que el lecho evoluciona.

##### **b) Actualización de flujo**

En cada paso de tiempo, la velocidad de flujo se actualiza suponiendo que tanto el flujo de agua y la elevación de la superficie libre se conservan. En el caso de la deposición, la velocidad de flujo se incrementa, mientras que en el caso de la erosión, la velocidad de flujo disminuye.

Esta actualización esquemática no tiene en cuenta alguna desviación del flujo. Es sólo apto para los flujos simples y asumiendo relativamente pequeñas evoluciones del lecho. El cálculo morfodinámico se detiene cuando la evolución del lecho alcanza un cierto porcentaje de la profundidad inicial del agua, es decir ya no es válido cuando la evolución del lecho se hace mayor que un porcentaje significativo de la profundidad del agua, especificada por el usuario. En este punto, se recomienda detener el cálculo morfodinámico y volver a calcular las variables hidrodinámicas.

##### **c) Continuidad de masa**

Con este simple método, puede que la continuidad de la masa de sedimentos no sea satisfecha producto de las pérdidas potenciales, debido a cambios en la profundidad de

flujo a medida que el lecho evoluciona. Además, también puede ser responsable de las inestabilidades numéricas.

#### **d) Archivos de dirección y Fortran**

Para el modo desacoplado, el archivo de dirección Sisyphé debe especificar lo siguiente:

- Los pasos de tiempo, gráfica o listado de salida y tiempo final.
- Un reinicio de una previa ejecución del modelo Sisyphé, estableciendo la palabra clave *COMPUTATION CONTINUED = YES*, y la especificación de los resultados sedimentológicos en un anterior cálculo sedimentológico.
- Las opciones de flujo: opciones estables o inestables y el período de flujo.
- Las opciones de fricción: el tipo de formulación utilizada para la fricción del fondo.

Las palabras claves para el método de encadenamiento son las siguientes:

- Para “*time step*” y “*output*”:
  - *TIME STEP, NUMBER OF TIME STEPS.*
  - *GRAPHIC PRINTOUT PERIOD.*
  - *LISTING VARIABLES FOR GRAPHIC PRINTOUTS.*
- Para la hidrodinámica (flujo impuesto y actualizado):
  - *LAW OF BOTTOM FRICTION = 3*, valor por defecto.
  - *FRICTION COEFFICIENT = 50*, valor por defecto.

### **3.2.1.3.2. Acoplamiento interno**

#### **a) Principio**

Para este método, Sisyphé se puede acoplar internamente al modelo hidrodinámico, Telemac 2D, es decir se acopla internamente con el modelo hidrodinámico sin ningún intercambio de archivos de datos. Los datos que se intercambian entre los dos programas son ahora compartidos directamente en la memoria, en lugar de ser escrita y leída en un archivo.

#### **b) Paso del tiempo y período de acoplamiento**

El método de acoplamiento interno es más lento que el método de encadenamiento. Diversas técnicas se pueden configurar para reducir el tiempo de procesamiento (por ejemplo, procesadores en paralelos). En algunos casos, el uso de un período de acoplamiento  $> 1$  permite que el transporte de flujo de carga del lecho y el resultado de la evolución del lecho que no sean calculados en cada paso de tiempo. Para carga suspendida, una ecuación de convección-difusión necesita ser resuelta. Esta ecuación de transporte obedece a los mismos criterios del Número de Courant (parámetro que controla el avance

del modelo, es decir los pasos de tiempo) para los pasos de tiempo hidrodinámicos y por lo tanto necesitan ser resuelto en cada paso de tiempo (*COUPLING PERIOD* = 1).

El paso de tiempo del Sisyphé es igual al tiempo de paso del Telemac 2D multiplicado por el “*COUPLING PERIOD*”. Los períodos de impresión gráfica y el listado son los mismos que el Telemac Mascaret.

Los archivos de dirección Telemac 2D deben especificar el tipo de acoplamiento, el nombre del archivo de dirección Sisyphé y el período de acoplamiento. Además, el archivo Fortran de Sisyphé debe estar algunas veces especificado en el archivo de dirección Telemac (si por ejemplo no hay ningún archivo Fortran para el archivo de dirección Telemac 2D).

Para el acoplamiento interno, se tiene las siguientes palabras claves que deben ser especificadas en los archivos de dirección Telemac 2D:

- *COUPLING WITH* = SISYPHE.
- *COUPLING PERIOD FOR SISYPHE* = 1, valor por defecto.

Todos los parámetros de cálculo (*time step*, *duration*, *printout*, *option for friction*) necesitan ser especificados en el archivo de dirección Telemac 2D, pero ya no son utilizados por Sisyphé. Los valores de *time step*, *bottom shear stress*, etc. se transfieren directamente al Sisyphé.

Para la presente tesis se ha utilizado ambos métodos en conjunto. En la primera simulación hidrodinámica, asumiendo un fondo fijo, se crea un “*hotStart*” para definir las condiciones hidrodinámicas y morfodinámicas de entrada y salida del modelo, una vez obtenido los resultados de dicha simulación, en el archivo “*cas.txt*” se indica el acoplamiento con el Sisyphé con su respectivo tiempo de periodo.

#### **3.2.1.4 Archivo de condiciones de contorno**

El formato del archivo de condición de frontera o borde es el mismo para Telemac 2D. Este archivo “*slf*” puede ser creado por un generador de malla, por ejemplo, con el programa BlueKenue, y ser modificado usando un editor de texto, como el Notepad ++. Cada línea está relacionada con un punto a lo largo del borde de la malla. Los puntos de frontera se enumeran en el archivo de la siguiente manera: En primer lugar los puntos de contorno del dominio, procediendo en sentido contrario desde la esquina inferior izquierda, a continuación, las islas siguiendo hacia la derecha, también desde la esquina inferior izquierda.

Los puntos de borde están numerados como las líneas de archivos; la numeración describe primero el contorno de dominio en la dirección hacia la izquierda desde el punto inferior izquierdo ( $X + Y$  mínima), luego las islas en el sentido horario.

### 3.2.1.5 Archivo Fortran

La programación puede ser necesaria para aplicaciones particulares mediante la modificación de subrutina de un usuario de las fuentes. Cuando una subrutina es necesario para un caso en particular, un archivo de Fortran (palabra clave: *FORTRAN FILE*) necesita ser especificado en el archivo de dirección Telemac 2D. Algunas subrutinas típicamente utilizadas se describen a continuación:

- Variable de tiempo o variable de espacio fricción: *strche.f* es usada para definir una variable en el espacio o un coeficiente de fricción variable en el tiempo. Por defecto, el valor dado para la palabra clave *FRICITION COEFFICIENT* en el archivo de dirección es impuesta en todo el dominio. La subrutina *corstr* es para imponer el coeficiente de fricción variable en el tiempo, que puede ser calculado como una función flujo de líquido, profundidad de agua, etc.
- Nueva fórmula de transporte de arena: *qsform.f* puede ser usada para programar una fórmula de transporte de sedimentos que son diferentes a las implementadas en Sisyphé. La palabra clave *BED-LOAD TRANSPORT FORMULA* se debe establecer igual a 0.

## 3.2.2 Parámetros hidrodinámicos

### 3.2.2.1 Esfuerzos cortantes del lecho inducidos por la corriente

#### 3.2.2.1.1 Modo acoplado

El esfuerzo cortante del lecho es uno de los parámetros hidrodinámicos más importantes sobre las solicitudes de transporte de sedimentos. La intensidad del esfuerzo de corte generado en el lecho se utiliza en 2D en la ecuación de momento de aguas poco profundas. Cuando Sisyphé se acopla internamente con Telemac 2D, el esfuerzo de corte del lecho  $\tau_o = (\tau_x, \tau_y)$  es calculado en cada paso de tiempo desde la dependencia cuadrática clásica en la velocidad de profundidad promedio.

$$\tau_{x,y} = \frac{1}{2} \rho C_d(u, v) |u| \quad [1]$$

Donde  $(u, v)$  son las componentes de la velocidad promedio de profundidad a lo largo de las direcciones cartesianas “x” e “y”, respectivamente; el módulo de velocidad es  $|u| = |(u, v)| = \sqrt{u^2 + v^2}$ ; y el coeficiente de fricción  $C_d$ . La magnitud del esfuerzo de corte del lecho  $\tau_o$  puede estar relacionado con la velocidad de fricción  $u_*$ , definido por:

$$\tau_o = \rho u_*^2 \quad [2]$$

#### a) Sisyphé acoplado con Telemac 2D

Cuando el modelo se acopla con Telemac 2D, las variables de flujo y los valores de los coeficientes de fricción (y por lo tanto, los esfuerzos de corte del lecho) son proporcionados por Telemac 2D. El esfuerzo de corte del lecho y la resultante de la velocidad de transporte de la carga de fondo son asumidas a estar en la dirección de la

velocidad media del flujo, excepto cuando la formulación de transporte de sedimentos representa:

- Corrección de la desviación (efecto de la pendiente del lecho).
- Corrientes secundarias.

### 3.2.2.1.2 Modo desacoplado

El coeficiente cuadrático de fricción  $C_d$ , que se utiliza para calcular el esfuerzo de corte total del lecho, se puede calcular después de la ley de fricción seleccionada. Existen diferentes opciones que son consistentes con el Telemac 2D y están disponibles en Sisyphe y dependen de la palabra clave "*LAW FOR BOTTOM FRICTION*" y el valor de "*FRICTION COEFICIENT*". Palabras claves similares están disponibles con el fin de tener en cuenta el efecto de la fricción para Telemac 2D y Sisyphe. Para la presente tesis se ha seleccionado el siguiente coeficiente de Manning  $M_a$  (KFROT = 4):

$$C_d = \frac{2g}{h^{1/3}} M_a^2 \quad [3]$$

### 3.2.2.2 Rugosidad del lecho

Para poder determinar la rugosidad del lecho o fondo natural, hay dos opciones disponibles en el Sisyphe. La más simple es imponer el coeficiente de fricción sobre la base de las leyes de fricción. Como en la mayoría de las aplicaciones la rugosidad del lecho es desconocida, por lo tanto, una alternativa es predecir el valor de la rugosidad del lecho como una función de los parámetros de flujo y de sedimentos utilizando un predictor de rugosidad del lecho.

La presente tesis, optó por la primera opción de imponer un coeficiente de fricción o rugosidad que es calculado en la etapa de calibración del modelo numérico bidimensional.

### 3.2.2.3 Fricción superficial

En presencia de sedimentación, el esfuerzo de corte total del lecho puede ser expresado como la suma de dos componentes:

$$\tau_o = \tau'_o + \tau''_o \quad [4]$$

Donde  $\tau_o$  es el esfuerzo cortante total del lecho,  $\tau'_o$  es el esfuerzo cortante del sedimento (o superficie), y  $\tau''_o$  es el esfuerzo cortante de la forma. La componente local de la fricción superficial determina la velocidad de transporte de carga de fondo y de la concentración de equilibrio de la suspensión.

La velocidad de transporte de carga de fondo se calcula en función del componente la fricción superficial local  $\tau'_o$ . El esfuerzo cortante total del lecho emitido a partir del modelo hidrodinámico necesita ser corregido en el modelo morfodinámico de la siguiente manera:

$$\tau_o = \mu\tau_0 \quad [5]$$

Donde  $\mu$  es un factor de corrección para la fricción superficial.

Físicamente, la rugosidad superficial del lecho debe ser menor que la rugosidad total del lecho (es decir  $\mu < 1$ ). Sin embargo, en la mayoría de los casos la fricción hidrodinámica no representa la fricción física de fondo, es decir, el coeficiente  $\mu$  se usa generalmente como un coeficiente de calibración en modelos hidrodinámicos. Este coeficiente se ajusta para comparar los resultados de la simulación con las observaciones de la superficie libre y el campo de velocidad que son variables en el tiempo. Por lo tanto, la importancia del modelo integra varios procesos olvidados como la fricción de la pared lateral, los posibles errores en los datos de batimetría y de entrada. Bajo estas condiciones, un factor de corrección  $\mu > 1$  puede ser admitido.

### 3.2.3 Parámetros de sedimentos

#### 3.2.3.1 Propiedades de sedimentos

Las partículas de sedimentos finos de tamaño de grano  $d_{50} < 60 \mu\text{m}$  presenta propiedades cohesivas complejas que afectan el proceso de transporte de sedimentos. Para sedimentos no cohesivos (diámetro medio  $d_{50} > 60 \mu\text{m}$ ), el diámetro del grano y la densidad del grano  $\rho_s$ , son los parámetros clave que determinan su resistencia a la erosión y a la velocidad del transporte de sedimento. Las palabras claves son:

- *COHESIVE SEDIMENTS* = NO, opción por defecto.
- *NUMBER OF SIZE-CLASSES OF BED MATERIAL* = 1, opción por defecto.
- *SEDIMENT DIAMETERS* ( $d_{50} < 60 \mu\text{m}$  para sedimentos no cohesivos).
- *SEDIMENT DENSITY* ( $\rho_s = 2650 \text{ kgm}^{-3}$ , valor por defecto).

#### 3.2.3.2 Esfuerzo cortante crítico

El número crítico de protección o el esfuerzo cortante crítico adimensional  $\Theta_c$  es usado para calcular el inicio del movimiento de los sedimentos en el flujo del fluido y se define por:

$$\theta_c = \frac{\tau_c}{g(\rho_s - \rho)d_{50}} \quad [6]$$

Donde  $\tau_c$  es el esfuerzo cortante crítico para sedimentos de movimiento incipiente. Los valores de  $\Theta_c$  pueden ser especificados en el archivo de dirección de Sisyphé por el uso de la palabra clave *SHIELDS PARAMETERS* o calculados por el modelo como una función del diámetro adimensional del grano  $D_*$ :

$$D_* = d[(\rho_s/\rho - 1)g/v^2]^{1/3} \quad [7]$$

El número crítico de protección es implementado en la subrutina “*init\_sediment.f*” como sigue:

$$\theta_c = \begin{cases} 0.24D_*^{-1}, & D_* < 4 \\ 0.14D_*^{-0.64}, & 4 < D_* \leq 10 \\ 0.04D_*^{-0.10}, & 10 < D_* \leq 20 \\ 0.013D_*^{-0.29}, & 20 < D_* \leq 150 \\ 0.045, & 150 \leq D_* \end{cases}$$

Donde  $\tau_c$  y  $d_{50}$  están en  $\text{Nm}^{-2}$  y en m, respectivamente. Si el valor del número de protección no está especificado en el archivo de dirección, Sisyphé calcula el valor según la ecuación como una función del diámetro de grano no dimensional  $D_*$ . Para los tamaños de varios granos, el parámetro de protección necesita ser especificado para cada clase.

### 3.2.4 Transporte de carga sólida

#### 3.2.4.1 Fórmula de transporte de carga

Para las corrientes de flujo, un gran número de fórmulas semiempíricas se puede encontrar en la literatura para calcular la velocidad de transporte de carga de fondo. Sisyphé ofrece la elección entre las diferentes fórmulas de carga de fondo, incluyendo las fórmulas de Meyer-Peter y Müller, Engelund-Hansen y Einstein-Brown.

La mayoría de las fórmulas de transporte de sedimentos asumen condiciones de entrada para el inicio de la erosión (por ejemplo, Meyer-Peter y Müller, van Rijn y Hunziker). Otras fórmulas se basan en el concepto de energía similar (por ejemplo Engelund-Hansen) o se pueden derivar de un enfoque estadístico (por ejemplo Einstein-Brown, Bijker, etc.). El adimensionamiento de las corrientes inducidas por la velocidad de transporte de la arena  $\phi_s$  es expresada como:

$$\phi = \frac{Q_b}{\sqrt{g(s-1)d_{ch}^3}} \quad [8]$$

Donde  $\rho_s$  es la densidad del sedimento;  $s = \rho_s / \rho$  es la densidad relativa; “d” es la característica del diámetro del grano de arena (para granos uniformes =  $d_{ch}$ ); “g” es la gravedad. La característica del diámetro del grano de arena se puede elegir como  $d_{50}$  inicialmente. Como se presenta a continuación, el adimensionamiento de la velocidad del transporte de arena  $\phi_s$  es, en general, expresado como una función del adimensionamiento de la fricción superficial o el parámetro *Shields*  $\Theta'$ , definido por:

$$\theta' = \frac{\mu\tau_o}{(\rho_s - \rho)gd_{ch}} \quad [9]$$

#### 3.2.4.2 Fórmula de transporte de sedimentos

Para la elección de una fórmula de transporte depende del valor seleccionado del parámetro de modelo ICF, tal como se define en el archivo de dirección por la palabra clave *BED-LOAD TRANSPORT FORMULA*. Al establecer  $ICF = 0$ , el usuario puede programar una fórmula específica de transporte, a través de la subrutina *qsform.f*.

Para el presente estudio se estableció un  $ICF = 1$ , que corresponde a la fórmula de Meyer-Peter-Müller. Esta clásica fórmula de carga de fondo ha sido validada para sedimentos gruesos en el rango de  $0.4 \text{ mm} < d_{50} < 29 \text{ mm}$ . Esto está basado en el concepto de arrastre inicial.

$$\Phi = \begin{cases} 0 & \text{si } \theta' < \theta_c \\ \alpha_{mpm} (\theta' - \theta_c)^{3/2} & \text{de otra manera} \end{cases}$$

Donde  $\alpha_{mpm}$  es un coeficiente (por defecto = 8),  $\Theta_c$  es el parámetro crítico *Shields* (por defecto = 0.047).

### 3.2.5 Efecto de la pendiente de fondo

El efecto de un fondo inclinado es para aumentar la velocidad de transporte de carga de fondo en la dirección de la pendiente abajo, y para reducir en la dirección pendiente ascendente de carga de fondo. En Sisyphé, se tiene un factor de corrección que se puede aplicar tanto a la magnitud y dirección de la velocidad de transporte de sólido, antes de resolver la ecuación de evolución de fondo. El efecto de la pendiente de fondo se activa si la palabra clave *SLOPE EFFECT* está presente en el archivo de dirección del Sisyphé.

Se tiene dos formulaciones diferentes para ambos efectos que se encuentran disponibles dependiendo de la elección de la palabra clave *FORMULA FOR SLOPE EFFECT*, el cual es elegida para la corrección de la magnitud y *FORMULA FOR DEVIATION*, es elegida para la corrección de dirección. En los bordes abiertos, el efecto de la pendiente es desarmado por razones de estabilidad.

#### 3.2.5.1 Corrección de la magnitud de la velocidad de transporte de carga de fondo, fórmula para el efecto de pendiente

Esta corrección se utiliza para aumentar la magnitud de la velocidad de transporte de carga de fondo, en donde existen dos métodos de corrección, que son los siguientes:

- $SLOPEFF = 1$ : este método de corrección está basado en la fórmula de Koch y Flokstra's. La intensidad de la velocidad de transporte de sólido  $Q_{bo}$  es:

$$Q_b = Q_{bo} \left( 1 - \beta \frac{\partial z_f}{\partial s} \right) \quad [10]$$

Donde "s" es la coordenada en la dirección actual y  $\beta$  es un factor empírico, que puede especificarse con la palabra clave *BETA* (valor por defecto = 1,3). Este efecto de la pendiente de fondo es similar a la adición de un término de difusión en la ecuación de la evolución de fondo. Se tiende a suavizar los resultados y, a menudo se usa para reducir inestabilidades.

- $SLOPEFF = 2$ : esta corrección está basada en el método de Soulsby (1997), en el cual el esfuerzo de corte de fondo de entrada  $\Theta_{co}$  es modificado como una función que depende de la pendiente de fondo  $\chi$ , del ángulo de reposo de sedimento  $\phi_s$ ,

modificado en el archivo de dirección de Sisyphé donde la palabra clave es *FRICTION ANGLE OF THE SEDIMENT* (por defecto = 40°), y el ángulo de la corriente a la dirección de la pendiente ascendente  $\psi$ :

$$\frac{\theta_c}{\theta_{co}} = \frac{\cos \psi \sin \chi + (\cos^2 \chi \tan^2 \phi_s - \sin^2 \psi \sin^2 \chi)^{0.5}}{\tan \phi_s} \quad [11]$$

Donde “ $\Theta_c$ ” el esfuerzo de corte de fondo de entrada. Esta fórmula afecta solamente a los resultados con el método de entrada de carga de fondo, como las de Meyer-Peter y Müller.

### 3.2.5.2 Corrección de la dirección de la velocidad de transporte de carga de fondo, fórmula para desviación

En esta corrección, el cambio que existe en la dirección del transporte de sólido se toma en cuenta por la siguiente fórmula:

$$\tan \alpha = \tan \delta - T \frac{\partial Z_f}{\partial \eta} \quad [12]$$

Donde “ $\alpha$ ” es la dirección del transporte de sólido en relación con la dirección del flujo, “ $\delta$ ” es la dirección del esfuerzo de fondo en relación con la dirección de flujo, y “ $\eta$ ” es la coordenada a lo largo del eje perpendicular del flujo.

En esta corrección de dirección se tiene en cuenta dos diferentes desviaciones:

- DEVIA = 1: conforme a Koch y Flochstra, el coeficiente “T” depende exclusivamente del parámetro *SHIELDS*.

$$T = \frac{4}{6\theta} \quad [13]$$

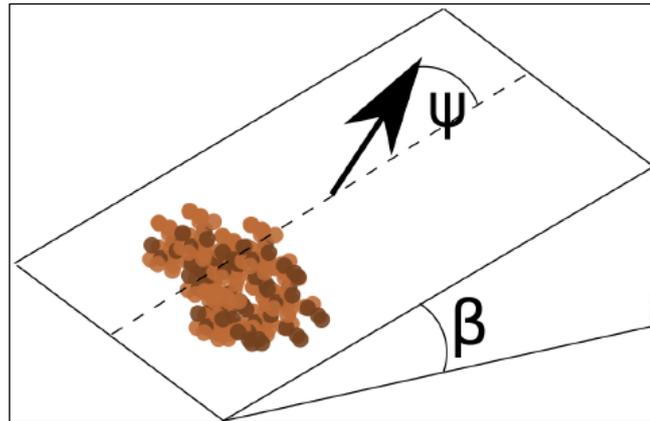
- DEVIA = 2: la desviación es calculada basada en Talmon, y también depende del parámetro *SHIELDS* y un coeficiente empírico  $\beta_2$ .

$$T = \frac{1}{\beta_2 \sqrt{\theta}} \quad [14]$$

El coeficiente empírico  $\beta_2$  puede ser modificado por la palabra clave *PARAMETER FOR DEVIATION* (por defecto = 0,85). Para los ríos podría lograrse resultados satisfactorios mediante el uso de un valor más alto de  $\beta_2 = 1,5$ .

Para dicha corrección se toma en cuenta las siguientes palabras claves:

- *SLOPE EFFECT* (Opción por defecto=NO).
- *FORMULA FOR SLOPE EFFECT* (Opción por defecto, *SLOPEFF*=1).
- *FORMULA FOR DEVIATION* (Opción por defecto, *DEVIA*=1).
- *FRICTION ANGLE OF THE SEDIMENT* (Valor por defecto,  $\phi_s=40^\circ$ ).
- *BETA* (Valor por defecto,  $\beta=1.3$ ).
- *PARAMETER FOR DEVIATION* (Valor por defecto,  $\beta_2=0.85$ ).



**Figura 18.** Pendiente de Fondo.

Fuente: Tassi & Villaret, 2014.

### 3.2.6 Deslizamiento de sedimento

Un algoritmo iterativo evita que la pendiente de fondo llegue a ser mayor que el ángulo de fricción máxima ( $\Theta_s \approx 32^\circ - 40^\circ$ ). Esta opción se activa mediante el uso de la palabra clave *SEDIMENT SLIDE*. Para deslizamiento de sedimento se tiene en cuenta las siguientes palabras claves:

- *SEDIMENT SLIDE* = NO, valor por defecto.
- *FRICTION ANGLE OF SEDIMENT* =  $40^\circ$ , valor por defecto.

### 3.2.7 Transporte de carga de fondo en canales curvos

La dirección del movimiento de carga de fondo se desvía desde la dirección de flujo principal debido al efecto de flujo helicoidal. Diferentes autores han propuesto fórmulas empíricas para evaluar dicha desviación. La fórmula Engelund, está basada en la suposición de que la tensión de corte inferior, la rugosidad de fondo y la profundidad media del agua son constantes en la sección transversal:

$$\tan \delta = 7 \frac{h}{r} \quad [15]$$

Donde “ $\delta$ ” es el ángulo entre el movimiento de carga de fondo y la dirección principal del flujo, “ $h$ ” es la profundidad media del agua y “ $r$ ” es el radio local de la curvatura. Yalin y Ferrera Da Silva han demostrado que “ $\delta$ ” es proporcional a  $h/r$ . El radio local “ $r$ ” se puede calcular en base a la variación de la sección transversal de la superficie libre:

$$r = -\rho \alpha' \frac{U^2}{g \frac{\partial z_s}{\partial y}} \quad [16]$$

Donde  $\alpha'$  es un coeficiente ( $\alpha' \approx 0,75$  para fondo muy rugosos y  $\alpha' \approx 1$  para fondo liso).

Para el transporte de carga de fondo se tiene en cuenta las siguientes palabras claves:

- *SECONDARY CURRENTS* = NO, opción por defecto.
- *SECONDARY CURRENTS ALPHA COEFFICIENT* = 1, opción por defecto.

### 3.3 Enrocados<sup>2</sup>

Los enrocados son los materiales más utilizados en la ingeniería fluvial, estos se componen en una unidad formada por agrupación de elementos pétreos naturales, generalmente procedentes de cantera. Los elementos del enrocado se colocan sin ligante, de manera que la unidad no es monolítica. Su estabilidad se debe al peso propio de las rocas y a su relación entre ellas.

Los enrocados se pueden formar estructuras independientes cuyo funcionamiento es por gravedad, lógicamente son estructuras permeables y de poca resistencia ya que no existe monolitismo. Por esta última razón, el mayor uso del enrocado no es como estructura independiente sino como protección o defensa de otra estructura, es decir que el papel del enrocado es impedir su propia destrucción y la de la estructura, por la acción de la corriente, para lo que pone en juego su resistencia al arrastre (gracias al peso, y de modo secundario, a la relación entre rocas). El enrocado se utiliza también mucho como protección local ante un riesgo especial de erosión.

Su diseño se realiza en función de la velocidad del flujo y de la profundidad de las socavaciones o erosiones esperadas.

#### 3.3.1 Ventaja del enrocado

Una de las ventajas del enrocado más importante es su flexibilidad como conjunto o agrupación. Esta virtud se manifiesta por ejemplo ante un descenso del fondo del cauce por erosión o ante el asiento en un dique.

Estas acciones no llevan a una falla en la protección del enrocado, debido a que sus elementos se reacomodan, se desplazan un poco, y el conjunto oscila para adaptarse a las nuevas condiciones. El gran inconveniente del enrocado es que su superficie macrorugosa engendra turbulencia.

Por su origen, en cantera la granulometría del enrocado no es uniforme, pero para la su relación y su funcionamiento en conjunto es conveniente una cierta variedad de tamaños.

#### 3.3.2 Características del enrocado

La roca del enrocado debe cumplir ciertas características intrínsecas susceptibles de un plan de ensayos de control de calidad. Las propiedades más importantes son:

---

<sup>2</sup> Martín Vide, J. P. (1997). *Ingeniería de ríos*. Barcelona: Ediciones UPC, S.L.

- La densidad de la roca, pues la cualidad esencial de cada elemento es su peso, se puede determinar por un ensayo hidrostático, el peso específico más común es  $2,65 \text{ T/m}^3$ .
- La fragilidad o susceptibilidad a la rotura por lugares débiles, pues durante la puesta en obra sufrirá golpes, se puede realizar un ensayo de caída.
- La resistencia a la meteorización, muy importante para la integridad y durabilidad del enrocado, que incluye acciones hielo-deshielo, cristalización salina, solubilidad y otras acciones químicas.

### 3.3.3 Diseño de enrocado<sup>3</sup>

La estabilidad de un enrocado depende, de la magnitud de la velocidad del flujo tangencial, de la dirección de la corriente principal en relación con el plano del enrocado, el ángulo del talud del enrocado y de las características sedimentológicas de la roca. Existen varias fórmulas para la determinación del diámetro del enrocado, se puede asumir que la protección de enrocado de diámetro uniforme  $d_s$  sobre un lecho plano a la acción de una corriente normal a superficie libre puede ser calculada a partir de ecuaciones convencionales, del tipo de la expresión de Ramette aplicada a ese fondo (Ver Ecuación 17).

$$d_s = \frac{\tau_t}{g(s-1)Af(\alpha)} \quad [17]$$

Donde  $\tau_t$  es la tensión de corte en contacto con el enrocado, “s” la relación entre pesos específicos del enrocado y el agua,  $f(\alpha)$  una función de talud que resulta unitaria si el fondo es plano y “A” una constante numérica que de acuerdo con Ramette puede resumirse  $A = 0,02$ . Por lo tanto, para fondo plano (Ver Ecuación 18).

$$[g(s-1)A]d_s = \tau_t = \rho U_*^2 \quad [18]$$

Siendo  $\rho$  la masa específica del agua y  $U_*$  la velocidad de corte, ligada a la velocidad de escurrimiento  $V$  a través de la expresión de Kármán-Prandtl.

Se define el número de Froude del enrocado como (Ver Ecuación 19).

$$F_G = \frac{V}{[g(s-1)d_s]^{1/2}} \quad [19]$$

Si se incluye la velocidad ( $V$ ) en lugar de la velocidad de corte  $U_*$  en la Ecuación 18, resulta:

$$F_G = \left[ 8,48 + 5,75 \log \left( \frac{2y}{d_s} \right) \right] \sqrt{0,02} \quad [20]$$

Donde la velocidad  $V$ , que se integra en el Número de Froude del grano debe ser medida a la distancia “y” al pie del talud, tal que  $y = 0,8h$ .

<sup>3</sup> Lopardo, R. A., & Casado, J. M. (2005). *Estabilidad de enrocados aguas debajo de disipadores a resalto*. Ezeiza: H.D. Farías, J.D. Brea y R. Cazeneuve.

Se tiene un análisis simplificado (Lopardo, 1976) que permite llevar la Ecuación 20 a una que tenga como variable la velocidad media del escurrimiento en lugar de la velocidad  $V$  puntual, en ese caso se llega a una ecuación igual a:

$$F_G = B \left( \frac{h}{d_s} \right)^{1/6} \quad [21]$$

Y de la Ecuación 5, se puede despejarse el diámetro estable:

$$d_s = 0,28V^3 h^{-1/2} [g(s - 1)]^{3/2} \quad [22]$$

La relación entre  $F_G$  y  $h/d_s$  fue presentada hace casi treinta años y no se pretende que sea la más ajustada a valores de la realidad, pero ha cumplido su función razonablemente, salvo en regiones donde la intensidad de turbulencia supera los rangos normales.

### 3.4 Erosión<sup>4</sup>

La erosión en un cauce es el descenso del fondo (o el retroceso de las orillas) como consecuencia de fenómenos de la dinámica fluvial naturales o suscitados por obras del hombre. Como indica la balanza de Lane, la erosión es también una respuesta del cauce a la falta de equilibrio entre las variables principales. Ya que una de estas variables, el caudal sólido, es de tan incierta cuantificación, es lógico que la erosión sea extraordinariamente difícil de prever.

#### 3.4.1 Tipos de erosión

Cabe distinguir dos tipos de erosión: erosión general y local.

- Erosión general: se ocasiona por la acción de un flujo de agua caracterizado simplemente por una velocidad media. Esta erosión afecta a tramos largos del cauce y sería la única en un cauce recto, prismático y sin ninguna singularidad.
- Erosión local: se produce por la acción de un flujo más complejo, que en una sección de corriente (vertical u horizontal) requeriría una descripción bidimensional de las velocidades. Esta erosión afecta a una pequeña extensión y el flujo local tiene una fuerte turbulencia y desarrolla vórtices.

Puede hacerse una clasificación temporal de la erosión, dentro de las cuales están: erosión transitoria y permanente.

- Erosión transitoria: es el descenso del fondo durante la fase ascendente de una avenida, cuando crece la avenida y la superficie libre sube, desciende por su parte el fondo del cauce aluvial.
- Erosión permanente: es la erosión a largo plazo, ocasionada de modo natural por un desequilibrio geomorfológico o causada por el hombre, es decir, es la diferencia entre el estado inicial y final del cauce.

---

<sup>4</sup> Martín Vide, J. P. (1997). *Ingeniería de ríos*. Barcelona: Ediciones UPC, S.L

# Capítulo 4

## Metodología

En este capítulo se describe la hipótesis, los objetivos planteados, el desarrollo del proceso, el pre-procesamiento y el post-procesamiento del modelo numérico estudiado, entre otros.

### 4.1 Hipótesis

Se realiza el modelo numérico para poder verificar y comprobar si realmente logra representar lo observado en el modelo físico, y de esta manera poder minimizar costos y tiempo, para poder cumplir con los requerimientos de disipación de energía necesarios para asegurar las estructuras hidráulicas.

### 4.2 Objetivo

El presente artículo tiene como objetivo principal caracterizar la representación del comportamiento de la hidrodinámica y la dinámica de las capas de diferente diámetro del enrocado en las estructuras de disipación utilizando el modelo numérico Telemac Mascaret, y de esta manera, lograr validar la modelación numérica de tal forma que pueda ser utilizada en otros proyectos para evitar los daños o problemas como erosión, alta turbulencia, cavitación, entre otros, y en consecuencia optimizar el diseño.

### 4.3 Desarrollo del proceso

El conjunto de fases que se determinaron para lograr la modelación numérica de esta investigación, fueron siete. A continuación se detalla cada una de ellas.

#### **4.3.1 Búsqueda de información de modelación hidráulica de enrocados como medio de protección de las estructuras de disipación**

Esta fase se dividió en modelación física y numérica. Con respecto a la modelación física, se utilizaron los proyectos de modelación estudiados en la Universidad de Piura. Entre ellos, se eligió un proyecto, el cual tenía como finalidad el estudio del comportamiento del enrocado. En dicho proyecto se estudió la modificación de la forma de la estructura de disipación, distribución del enrocado en la estructura de disipación y evaluación de diferentes diámetros. Fue fundamental haber recopilado la información necesaria y precisa, en la cual nos permitió conocer y entender a profundidad los fenómenos hidráulicos durante los ensayos en el Modelo Físico.

En lo que respecta a la modelación numérica, se buscó artículos semejantes indexados, los cuales sirvieron como base para el inicio de la investigación. Además tutoriales para el manejo de los programas utilizados. Así mismo la información de tesis de pregrado y proyectos de investigación que realizó el IHHS.

#### **4.3.2 Elaboración de la superficie del río sin y con estructuras en AutoCAD Civil 3D**

Se basó con los planos topográficos de las estructuras del modelo físico, tanto para río sin y con estructura, y de esta manera ayudó a la creación de una superficie TIN en el AutoCAD Civil 3D, y obtener las coordenadas para el diseño de la geometría. Dicha superficie fue utilizada en el modelo numérico para asignarle a cada nodo de la malla su respectiva la variable de elevación.

#### **4.3.3 Creación de la malla del río sin y con estructuras**

Se exportará las coordenadas del borde de la superficie TIN del río sin y con estructuras a un formato “.csv”, de esta manera se copiaron las coordenadas a un formato “.i2s” creado en el BlueKenue, este último archivo sirvió para creación de las mallas computacionales directamente en el BlueKenue.

#### **4.3.4 Calibración del modelo numérico**

Fue necesario realizar la etapa de calibración del modelo numérico para comprobar la similitud existente con el modelo físico. Consiste en simular el río sin las estructuras hidráulicas, en donde se evaluó los niveles de agua, velocidades, cotas de fondo, niveles de erosión y el comportamiento de flujo de agua. Una vez definida la similitud, se procedió a las simulaciones del río con las estructuras.

#### **4.3.5 Diseño del río con las estructuras**

Una vez calibrado el modelo numérico, se procedió a simular con las estructuras para poder evaluar las estructuras del diseño original, con el mismo procedimiento que se utilizó en la etapa de calibración. Es en este punto, donde se desarrolló el objetivo de la tesis porque se evaluó los niveles de erosión para la configuración del enrocado definitivo.

### **4.3.6 Análisis de resultados entre el modelo físico y el modelo numérico**

Tener toda la información ordenada como los resultados, planos, tablas, gráficos de los modelos físico y numérico, permitió establecer una concordancia entre los resultados del comportamiento hidráulico y sedimentológico observado en el modelo físico.

Con esto se llegó a determinar que el comportamiento del modelo numérico se aproxima al del modelo físico, para que de esa manera se logre el funcionamiento óptimo, evitando posibles problemas, reduciendo costos y tiempo.

### **4.3.7 Redacción de artículo final**

La tesis modalidad artículo es aceptada según las normas de la Universidad de Piura, cuando el trabajo es presentado a un congreso internacional o a una revista indexada. La presente tesis se presentó al XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica 2016 que se desarrollará en Setiembre de 2016.

Según el cronograma del congreso se presentó un resumen del artículo en el mes de Diciembre de 2015. Una vez aceptado el resumen, se comenzó a redactar el artículo final, siendo entregado en el mes de Marzo de 2016. La aceptación del artículo extendido fue anunciada en el mes de Junio (Ver Anexo D).

Una de las conclusiones principales del artículo fue que el modelo numérico sería una gran herramienta para el diseño de estructuras hidráulicas, ya que se logró representar el comportamiento del enrocado como protección en aliviaderos de compuertas. Esto permite recomendarlo para futuros diseños hidráulicos.

## **4.4 Desarrollo de la modelación numérica**

Para el desarrollo de la presente tesis, se utilizaron como herramientas de trabajo varios softwares como el AutoCAD Civil 3D, Matlab, Notepad ++, BlueKenue y el Telemac Mascaret para el pre-procesamiento y post-procesamiento de las simulaciones del comportamiento hidráulico y sedimentológico, obteniendo valores de niveles de erosión, velocidades, niveles de agua y cota de fondo.

### **4.4.1 Pre-procesamiento**

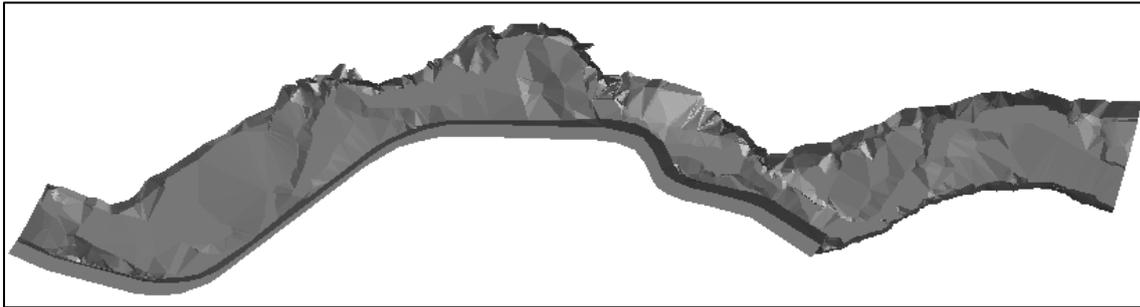
#### **4.4.1.1 AutoCAD Civil 3D**

Se tiene como base los planos topográficos, con ellos se ha logrado representar la superficie TIN<sup>5</sup> para el cauce del río sin y con estructuras, esto permite exportar las coordenadas de la geometría de ambos modelos numéricos, con la finalidad de disminuir así el error que se podría cometer al pasar manualmente las coordenadas de un programa a un modelo numérico.

---

<sup>5</sup> Red de triángulos irregulares. Archivo que es creado a partir de la interpolación de puntos de las curvas de nivel con su respectiva elevación.

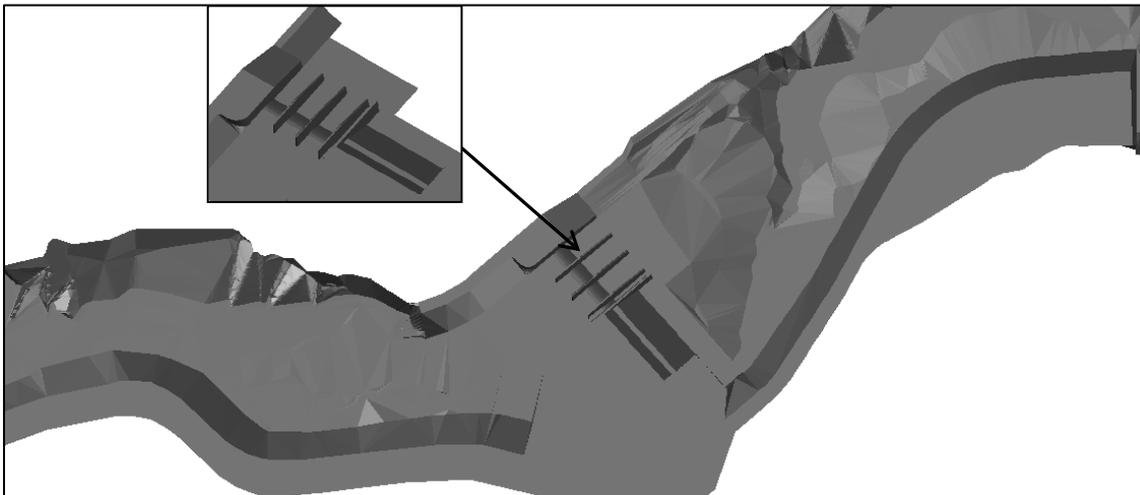
Primero se elaboró la superficie tridimensional del río sin estructuras para la simulación de la etapa de calibración (Ver Figura 19).



**Figura 19.** Representación tridimensional del río sin estructuras.

*Fuente: Elaboración propia.*

Posteriormente, culminada la etapa de calibración, se procedió a crear la superficie tridimensional del río con estructuras para poder analizar el comportamiento hidráulico y sedimentológico y cumplir el objetivo de la presente tesis (Ver Figura 20).



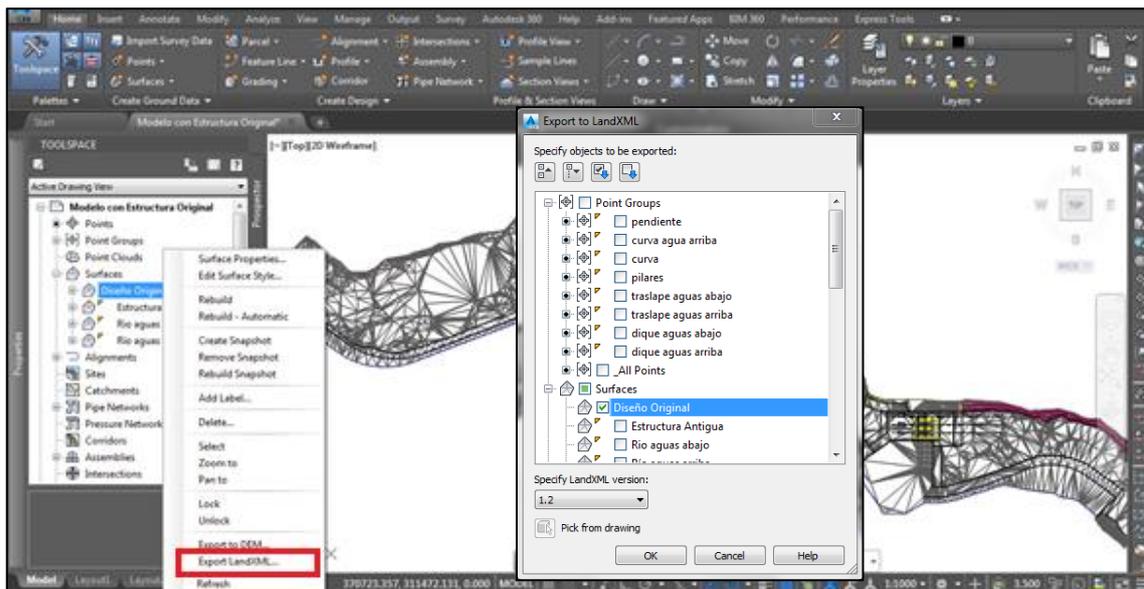
**Figura 20.** Representación tridimensional del río con estructuras.

*Fuente: Elaboración propia.*

#### 4.4.1.2 Matlab

Matlab es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio. Este lenguaje es interpretado, y puede ejecutarse tanto en el entorno interactivo, como a través de un archivo de “script” (archivos “.m”). Este lenguaje permite operaciones de vectores y matrices, funciones, cálculo lambda, y programación orientada a objetos.

Para el desarrollo de la tesis, primero se extrajo la superficie TIN del AutoCAD Civil 3D en archivo “.xml”. Se selecciona y se presiona anticlick en la superficie a exportar, luego click en “*Export LandXML*”. Luego aparece un cuadro de diálogo, donde se verificará que sólo se encuentre seleccionada la superficie elegida, y después click en “Ok” para guardarla (Ver Figura 21).

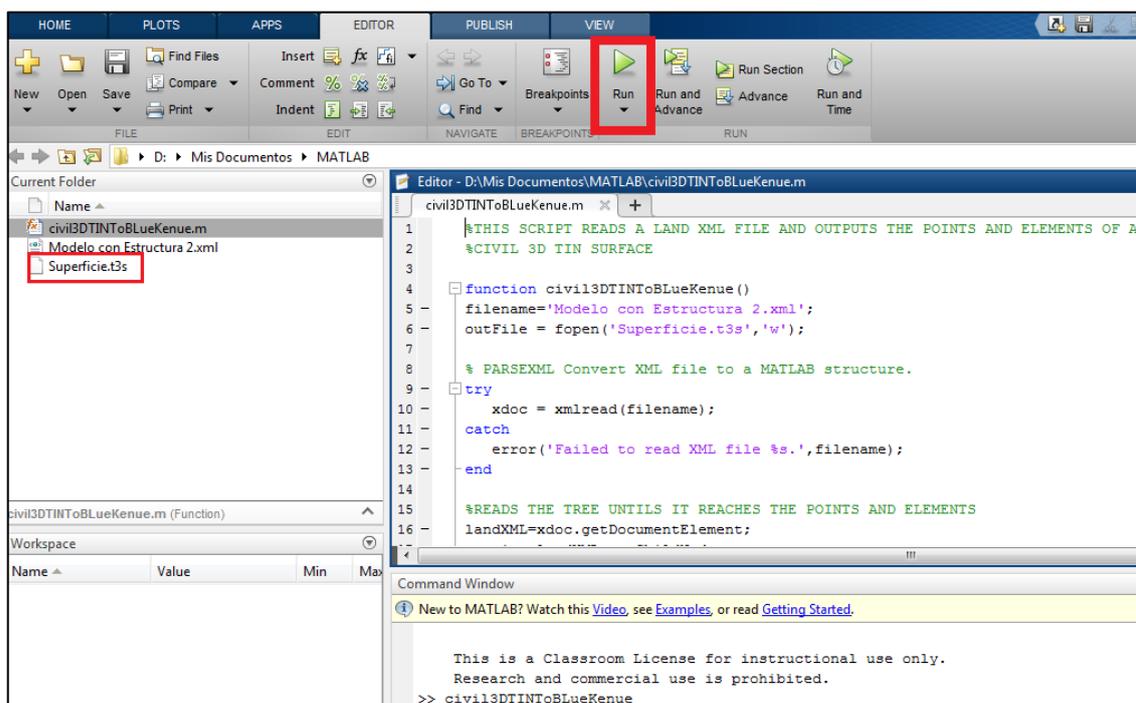


**Figura 21.** Exportación de la superficie TIN.

*Fuente: Elaboración propia.*

Con ayuda de un “*script*” del Matlab con nombre **civil3DTINToBLueKenue**, la superficie exportada se pasará de un formato “.xml” a un formato “.t3s”. El archivo de la superficie exportada y el archivo “*script*” (Ver Anexo C) se copian en la carpeta Matlab y al abrir el Matlab automáticamente aparecerán en el lado izquierdo de la pantalla.

Doble click en **civil3DTINToBLueKenue**, en la barra superior aparecerá el comando “*Run*”, en donde se dará click y finalmente el archivo resultado aparecerá en lado izquierdo de la pantalla en formato “.t3s”. En caso de no aparecer, el error se indicará en la parte inferior (Ver Figura 22).



**Figura 22.** Modificación de formato en Matlab.

*Fuente: Elaboración propia.*

#### 4.4.1.3 BlueKenue

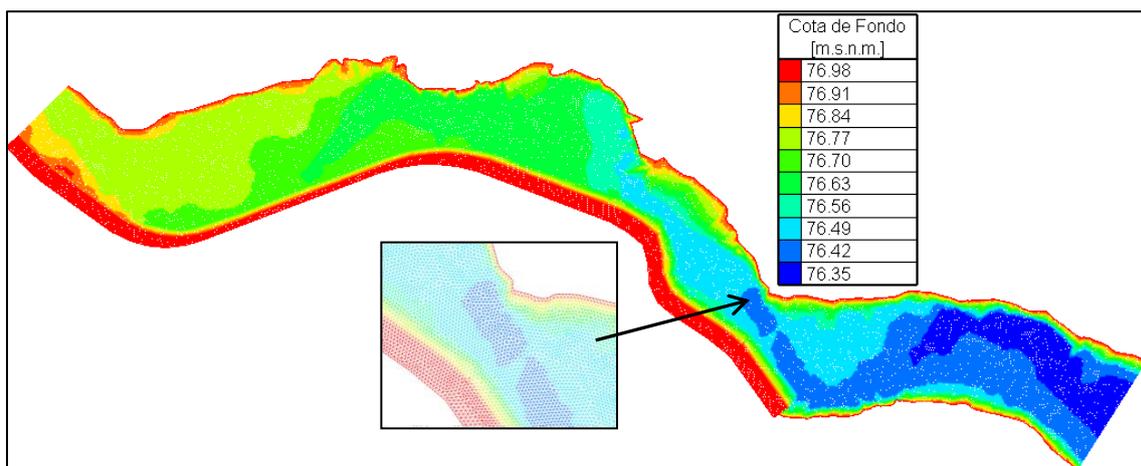
Es una herramienta avanzada de preparación, análisis y visualización de datos para los modelistas hidráulicos. Ofrece la importación directa de los resultados al modelo Telemac Mascaret. BlueKenue ofrece una grilla rectangular y una generación de la malla triangular. Los datos de entrada a los generadores de la malla pueden incluir puntos, líneas o incluso otras redes regulares y triangulares.

Para esta investigación, BlueKenue es utilizado para la construcción del mallado del río sin y con estructuras, además permite crear los diferentes archivos de entrada necesarios para el Telemac Mascaret, como el GEO.slf, cli.cli y el cli.bc2.

Las condiciones de frontera son definidas por el programador, según las condiciones de entrada y salida que se obtuvieron en el modelo físico. En este caso específico, la condición de entrada será el caudal y la de salida será el nivel de agua aguas abajo.

##### 4.4.1.3.1 Río sin estructuras

Para el mallado de dicho modelo, la zona de densificación será constante en toda la longitud del cauce del río, es decir la separación de nodos será de 0,10 m (Ver Figura 23).



**Figura 23.** Mallado del río sin estructuras.

*Fuente: Elaboración propia.*

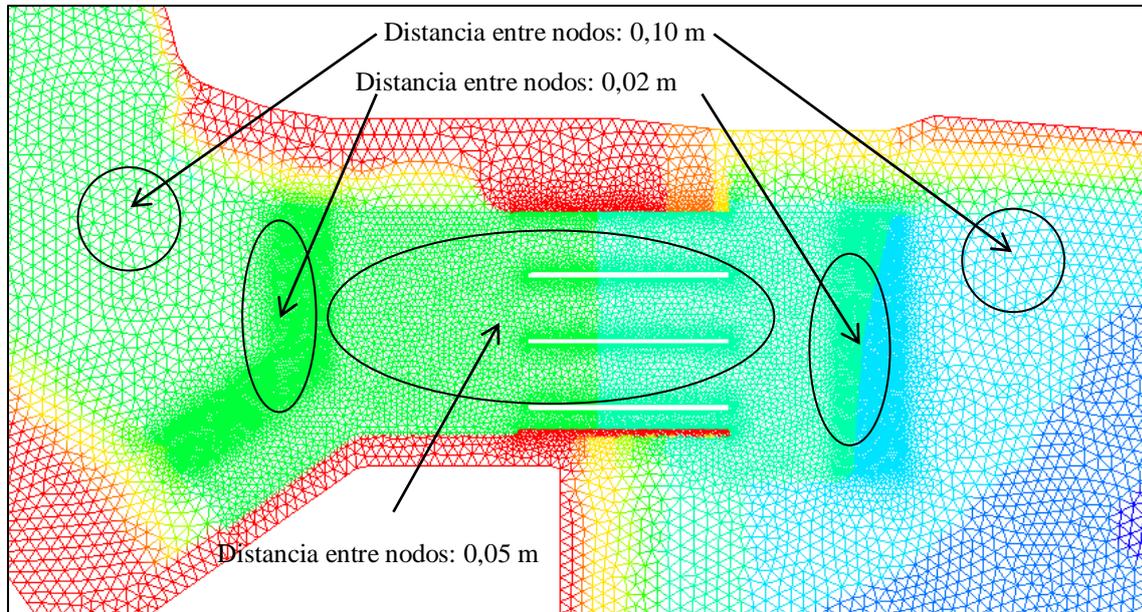
Se simuló con diferentes coeficientes de fricción en la etapa de calibración para cada caudal, con la finalidad de verificar que éste sea capaz de reproducir y reflejar las características del modelo físico, es decir, adecuar las condiciones y características físicas e hidráulicas. Es por eso, que el coeficiente de fricción de Manning será distinto para cada caudal, es decir la rugosidad estará en función del caudal a simular (Ver Figura 24).



**Tabla 1.** Densificación del río con estructuras.

Zona de densificación	Distancia entre nodos [m]
Río aguas arriba y abajo	0,10
Enrocado aguas arriba y abajo	0,02
Aliviadero de compuertas	0,05

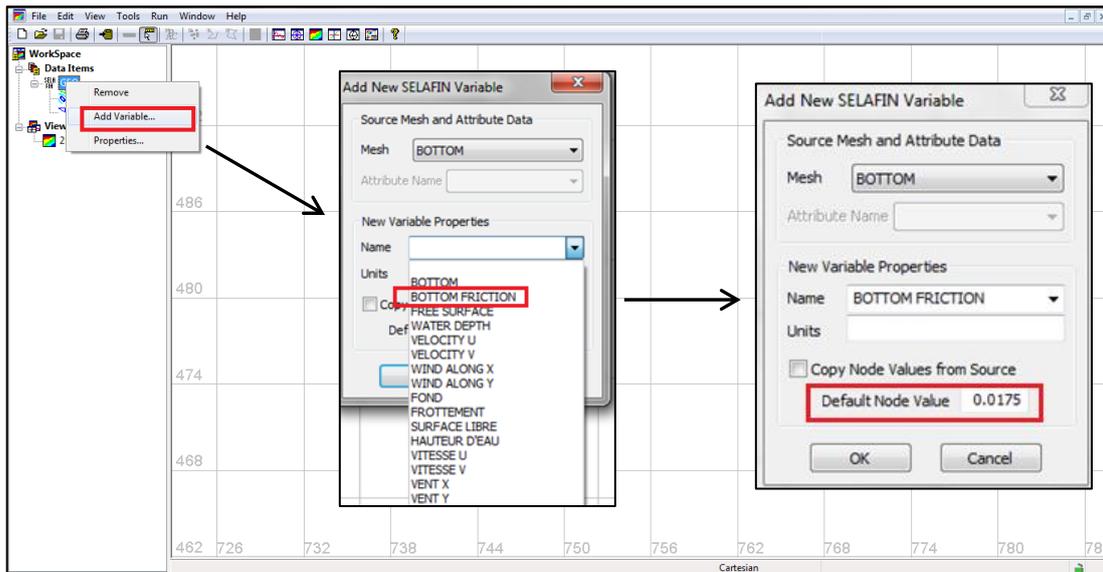
*Fuente: Elaboración propia.*

**Figura 26.** Densificación del mallado del río con estructuras.

*Fuente: Elaboración propia.*

La rugosidad o coeficiente de fricción que se asignará al cauce del río está en función del material con el que fue construido. Dado que se trata de un modelo numérico, éste será definido por la calibración respectiva para cada caudal. Para definir la rugosidad en el BlueKenue, en el archivo GEO.slf se agregará una variable llamada “*BOTTOM FRICTION*”. De esta manera se tendrán diferentes archivos de entrada “GEO.slf” para los distintos caudales a simular.

Abrir el archivo GEO.slf, dar anticlick y elegir la opción “*Add variable*”. Se abrirá un cuadro diálogo, en la opción “*name*” se elegirá “*BOTTOM FRICTION*”. En la opción “*Default Node Value*” se ingresará el valor de la rugosidad correspondiente al caudal a simular y presionar “*Ok*” (Ver Figura 27).



**Figura 27.** Creación del coeficiente de fricción en BlueKenue.

*Fuente: Elaboración propia.*

Para el caso de las estructuras de concreto púlido el coeficiente de fricción que será asignado es  $\eta = 0,016$ , en las zonas de enrocados será  $\eta = 0,030$  y con respecto al cauce del río será el elegido en la etapa de calibración realizada para cada caudal. En AutoCAD, se exportará las polilíneas que representan las zonas de estructuras de concreto y de enrocado para poder asignarle su respectiva rugosidad, y luego se pasarán a formato “i2s” a través del Notepad. El valor de rugosidad es indicado al lado derecho del número total de coordenadas (Ver Figura 28).

```

densityCentral.i2s
1 #####
2 :FileType i2s ASCII EnSim 1.0
3 # Canadian Hydraulics Centre/National Research Council
4 # DataType          2D Line Set
5 #
6 :Application        BlueKenue
7 :Version            3.3.4
8 :WrittenBy          Manuel Alejandro
9 :CreationDate       Mon, Dec 14, 2015 10:40 PM
10 #
11 #-----
12 :Name densityCentral
13 #
14 #:AttributeUnits 1 M
15 :EndHeader
16 102 0.016
17 762.0036228 475.6093376
18 762.0488671 475.6093155
19 762.0488427 475.55931
20 762.0488427 475.2588145
21 762.5588377 475.2588144
22 762.7475877 475.2588144

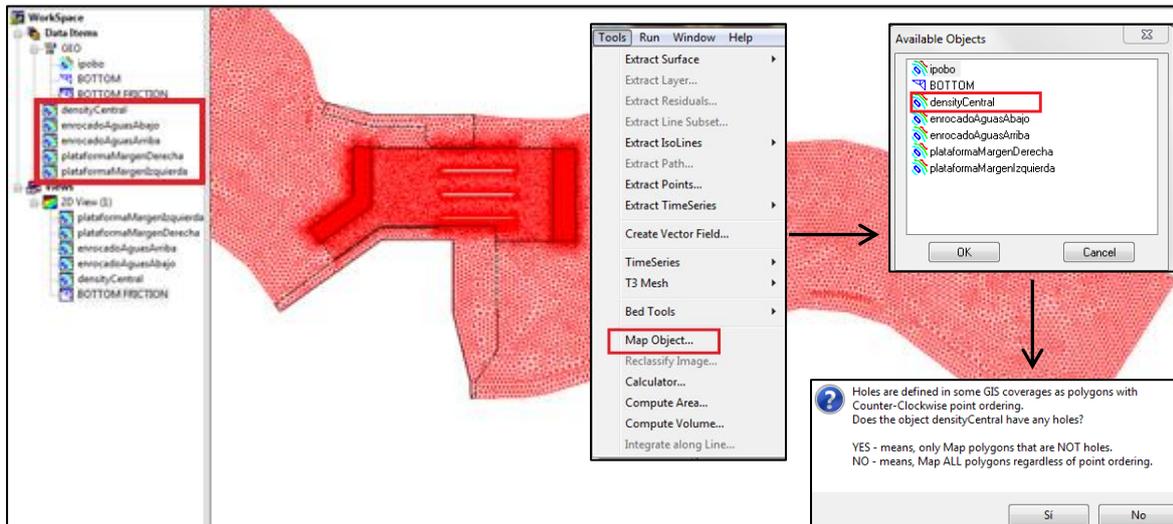
```

**Figura 28.** Coeficiente de fricción de las estructuras de concreto en Notepad.

*Fuente: Elaboración propia.*

Se abren los archivos en el BlueKenue y se pasan a la vista 2D junto con el “*BOTTOM FRICTION*”.

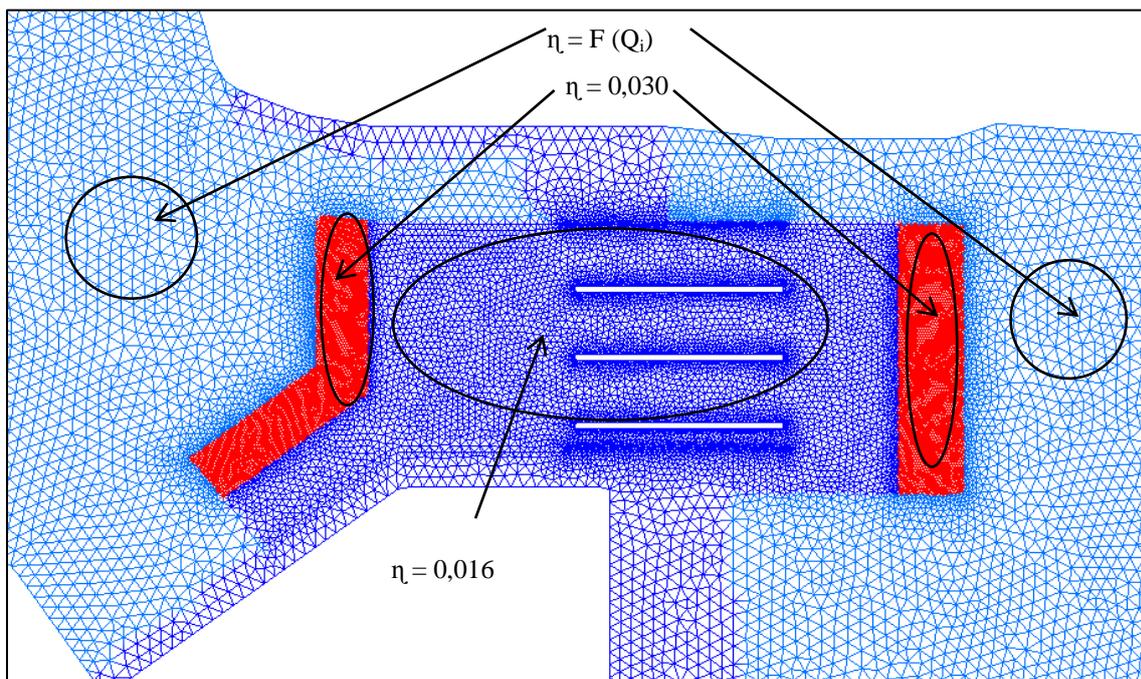
Se selecciona “*BOTTOM FRICTION*” y en la parte superior se da click en “*Tools*” seleccionando “*Map Object*”, en donde se abrirá un cuadro de diálogo y aparecerán los archivos. Se selecciona uno por uno, luego aparecerá una ventana en donde se presionará “*No*” y así sucesivamente con todos los archivos asignados (Ver Figura 29).



**Figura 29.** Implementación del coeficiente de fricción de las estructuras en BlueKenue.

*Fuente: Elaboración propia.*

Finalmente la distribución de la rugosidad queda definida para la simulación hidrodinámica de un sólo caudal, y para los demás caudales se repetirá el mismo procedimiento con su respectivo coeficiente de fricción (Ver Figura 30).



**Figura 30.** Coeficiente de fricción.

*Fuente: Elaboración propia.*

Posteriormente, culminada la simulación hidrodinámica, se procede a la simulación morfodinámica, en donde se midieron los niveles de erosión, por lo tanto se debe indicar las zonas erosionables y no erosionables, para eso, se hará uso de la *VARIABLE 23*.

Abrir el archivo GEO.slf, dar anticlick y elegir la opción “*Add variable*”. Se abrirá un cuadro diálogo, donde no aparece la *VARIABLE 23* en la opción “*name*”, por lo tanto se escribirá *VARIABLE 23*. En la opción “*Default Node Value*” se ingresará el valor igual a 1 y presionar “*Ok*”. El Telemac Mascaret lee el valor igual a uno (1) las zonas no erosionables y un valor igual a cero (0) las zonas erosionables.

En AutoCAD, se exportará las polilíneas que representan las zonas erosionables, y luego se pasarán a formato “*i2s*” a través del Notepad. El valor igual a cero (0) es indicado al lado derecho del número total de coordenadas (Ver Figura 31).

```

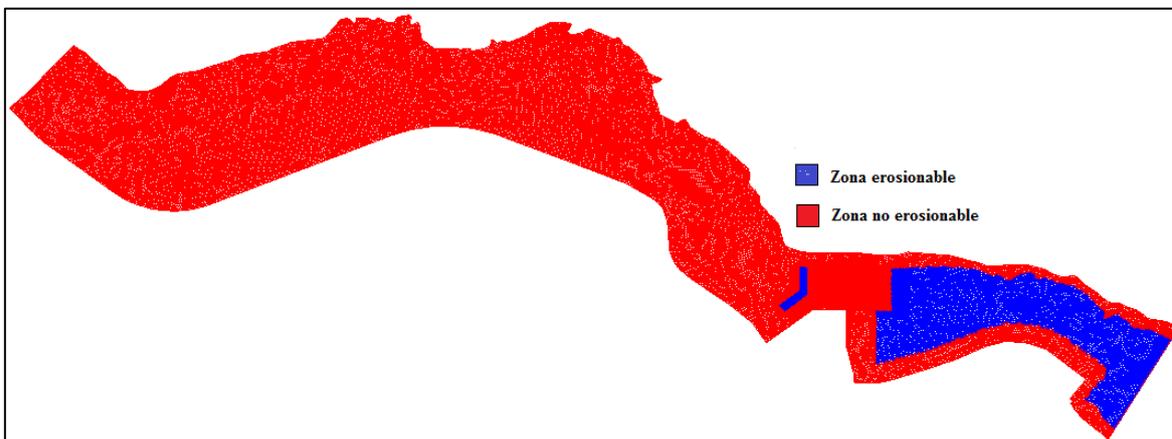
enrocadoAguasAbajo.i2s
1 #####
2 :FileType i2s ASCII EnSim 1.0
3 # Canadian Hydraulics Centre/National Research Council (c) 1998-2012
4 # DataType 2D Line Set
5 #
6 :Application BlueKenue
7 :Version 3.3.4
8 :WrittenBy Manuel Alejandro
9 :CreationDate Mon, Dec 14, 2015 10:48 PM
10 #
11 #-----
12 :Name enrocadoAguasAbajo
13 #
14 #:AttributeUnits 1 M
15 :EndHeader
16 17 0
17 763.3138377 477.3327414

```

**Figura 31.** Valor de erosión en Notepad.

*Fuente: Elaboración propia*

Finalmente la distribución de las ambas zonas queda definida para todos los caudales a simular (Ver Figura 32).



**Figura 32.** Zona erosionable y no erosionable.

*Fuente: Elaboración propia.*

También se necesita un archivo adicional que será llamado “*sisCli*”. Este archivo se forma, creando una copia del archivo “*cli.cli*”, y se cambia el nombre a *sisCli*. El archivo *cli.cli* tiene 13 variables, que son las siguientes (Ver Tabla 2).

**Tabla 2.** Variables del archivo “*cli.cli*”.

X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	G	L
LIHBOR	LIUBOR	LIVBOR	HBOR	UBOR	VBOR	AUBOR	LITBOR				# de nodo	

*Fuente: Elaboración propia.*

- LIHBOR = Condición de borde (tirante de agua).
- LIUBOR = Condición de borde (velocidad en el eje X).
- LIVBOR = Condición de borde (velocidad en el eje Y).
- HBOR = Valor de tirante de agua.
- UBOR = Valor de velocidad en el eje X.
- VBOR = Valor de velocidad en el eje Y.

El archivo *sisCli* de la herramienta Sisyphé sólo tendrá en cuenta las siguientes variables: X2, X4 X8 y X9 (Ver Tabla 3).

**Tabla 3.** Variables del archivo “*sisCli*”.

X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	G	L
	LIQBOR		QBOR				LIEBOR LICBOR	EBOR CBOR			# de nodo	

*Fuente: Elaboración propia.*

- QBOR = Concentración de sedimentos ( $m^2/s$ ).

Dependiendo de las condiciones de contorno de los sedimentos, se define una configuración de códigos para las variables. En la presente tesis, no hay carga de transporte de sedimentos, sólo se evalúa la erosión (Ver Tabla 4).

**Tabla 4.** Configuración de códigos para las variables.

4	<b>4</b>	5	<b>0</b>	0	0	0	<b>5</b>	<b>0</b>	0	0	45384	735	#	ouLet
4	<b>4</b>	5	<b>0</b>	0	0	0	<b>5</b>	<b>0</b>	0	0	957	1414	#	inLet
2	<b>2</b>	2	<b>0</b>	0	0	0	<b>2</b>	<b>0</b>	0	0	43834	665	#	

*Fuente: Elaboración propia.*

Esta configuración significa que en la entrada y de salida son en condiciones de equilibrio de sedimentos.

#### 4.4.2 Post-procesamiento

Una vez que ya se cuenta con los resultados finales, se da la última etapa, la cual incluye el análisis de los resultados y la representación gráfica de los mismos, para contar con una lectura clara que permita expresar las conclusiones.

En primer lugar, se analiza los resultados de calibración obtenidos en el modelo numérico, de tal forma, para poder compararlos y analizar la concordancia existente, a través de los métodos estadísticos (Ver Anexo A).

En segundo lugar, se analiza los resultados del río con las estructuras. En esta etapa se dividió en dos partes, debido a que el Telemac Mascaret no contiene los algoritmos para poder representar dos granulometrías diferentes, por lo tanto, se tiene dos resultados obtenidos en el modelo numérico, en la cual, la primera todo el material tenga la granulometría del enrocado y la segunda la granulometría de las condiciones naturales del río (Ver Anexo B).



## **Capítulo 5**

### **Tesis Modalidad Artículo**

En el siguiente capítulo se presenta el artículo científico aceptado en el XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. El artículo es incluido en el formato solicitado por el comité organizador.

**XXVII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA****LIMA, PERÚ, 28 AL 30 DE SETIEMBRE DE 2016****Análisis numérico del comportamiento de enrocados  
como protección en aliviaderos de compuertas*****Manuel Chinga-Rosillo<sup>1</sup>, Leo Guerrero<sup>1</sup>, Alejandro Mendoza<sup>2</sup> y Jorge Reyes-Salazar<sup>1</sup>***<sup>1</sup>Universidad de Piura, Perú; <sup>2</sup>Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Lerma, México[manuel.chinga24@gmail.com](mailto:manuel.chinga24@gmail.com); [leo.guerrero@udep.pe](mailto:leo.guerrero@udep.pe); [a.mendoza@correo.ler.uam.mx](mailto:a.mendoza@correo.ler.uam.mx); [jorge.reyes@udep.pe](mailto:jorge.reyes@udep.pe)**RESUMEN**

El presente artículo tiene como finalidad lograr representar, a través de simulación numérica, el comportamiento sedimentológico e hidráulico del enrocado ubicado aguas abajo del aliviadero de compuertas de un modelo físico. Para esto se utilizará el modelo numérico Telemac Mascaret en conjunto con su herramienta Sisyphé. El desarrollo se dividió en dos fases: río sin estructuras hidráulicas, que comprende la etapa de calibración; y el río con estructuras hidráulicas, que consiste en analizar la erosión en el enrocado como protección. Se efectúa un estudio de los resultados de forma cuantitativamente y cualitativamente, definiendo la concordancia existente y de esa manera dar mayor validez a los resultados obtenidos. Telemac Mascaret no puede representar dos o más granulometrías diferentes, por este motivo, se evalúan dos condiciones: primero con la granulometría del enrocado y segundo con la granulometría del estado original del río, con la finalidad de obtener un rango de erosión. Se demuestra con los resultados de ambos ensayos que la modelación numérica es una gran herramienta confiable.

**ABSTRACT**

This article aims to achieve represent, through numerical simulation, sedimentological and hydraulic behavior of riprap located downstream of the spillway gates of a physical model. For this Telemac Mascaret the numerical model together with its Sisyphé tool will be used. The development was divided into two phases: river without hydraulic structures, comprising the calibration step; and river with hydraulic structures, which involves analyzing the riprap erosion protection. a study of the results quantitatively and qualitatively form is done by defining the existing agreement and thus give more validity to the results. Telemac Mascaret can't represent two or more different particle sizes, for this reason, two conditions are evaluated: first with the grain size of riprap and second with the fineness of the original state of the river, in order to obtain a range of erosion. It is demonstrated with the results of both trials numerical modeling is a reliable tool.

**PALABRAS CLAVES:** Erosión de enrocados, Aliviadero de compuertas, modelación numérica.

## 1. INTRODUCCIÓN

Se planea construir un proyecto hidroeléctrico, parte fundamental de su diseño es la obra de excedencias, ella está conformada por un aliviadero fijo y un aliviadero de compuertas. La operación normal y en épocas de avenidas genera altas velocidades aguas abajo del aliviadero de compuertas, por lo tanto, se diseñan estructuras que permitan restituir las aguas sin afectar las condiciones naturales. La Universidad de Piura, con el fin de investigar el tema a fondo, construyó un modelo físico para evaluar la geometría y distribución del enrocado, el cual se utiliza por su resistencia a la abrasión, con la finalidad de disminuir la erosión aguas abajo del aliviadero de compuertas. El enrocado puede llegar a ser 20 a 30% más económica con respecto al uso de concreto de alta resistencia, además de ser fácil de reparar.

Entendiendo que el ingeniero debe dar soluciones factibles, con base a ciertos requerimientos, a problemas, debe decidir a priori el enfoque, técnicas o métodos más convenientes para cada caso en particular. Por lo tanto, los proyectos requieren una fase de estudio, tanto teórica como experimental, para asegurar que el diseño sea el óptimo. Es así como en la fase de estudio se realiza una etapa de modelación, ya sea física o numérica, esta última es la que se presenta y propone en el actual artículo. La ventaja de este tipo de modelación, es el ahorro de tiempo y dinero en analizar los diferentes fenómenos de erosión y sedimentación para los distintos casos y diseños propuestos, sin embargo, existen limitaciones como la resolución de espacio-tiempo, la estabilidad numérica, entre otros.

Los modelos numéricos se desarrollan a partir de los métodos numéricos, es decir, para llevar a cabo una modelación numérica los programas o softwares emplean métodos numéricos que les permiten resolver las ecuaciones de gobierno (ecs. de Navier-Stokes o sus derivaciones para estimar el flujo, por ejemplo) dentro del dominio discretizado. Los modelos numéricos y su simulación son una herramienta relativamente nueva y de gran utilidad, que complementan a la modelación física.

La finalidad de este estudio es reproducir con un modelo computacional los valores de velocidades y los niveles de erosión en el enrocado, ubicado aguas abajo del aliviadero de compuertas, que se presentaron en el modelo físico, y de esta manera encontrar una concordancia entre ambos modelos.

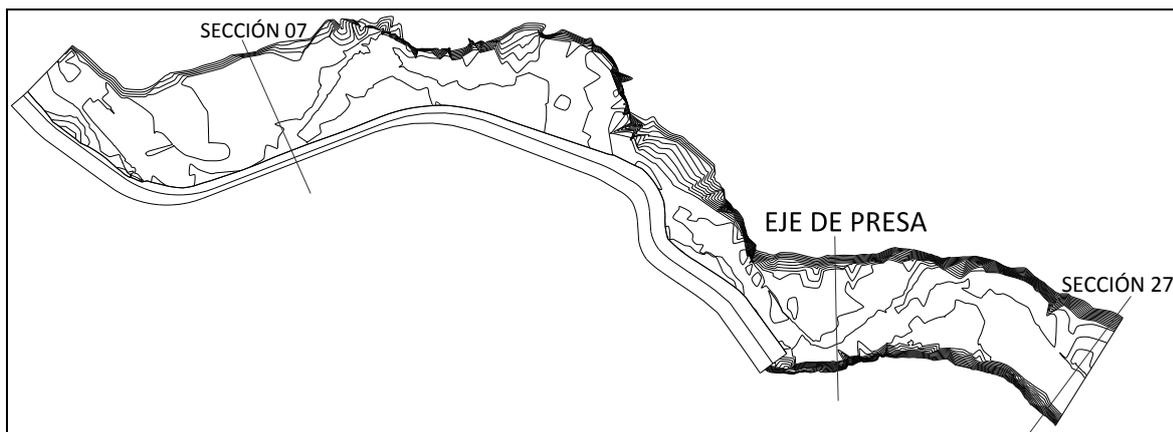
El contenido de este artículo se dividirá en dos temas diferentes: Modelación Física y Modelación Numérica. La primera presentará alcances de resultados obtenidos en el modelo físico, mostrando los datos necesarios para la realización del modelo numérico. La segunda, se enfocará en los ensayos para representar el comportamiento del enrocado.

## 2. OBJETIVO

El presente artículo tiene como objetivo caracterizar la representación del comportamiento de la hidrodinámica y la dinámica de las capas de diferente diámetro del enrocado en las estructuras de disipación utilizando el modelo numérico Telemac Mascaret, en el cual se tuvieron que modificar algunos algoritmos para lograr la representación adecuada. De este modo se podría evitar posibles daños o problemas como erosión, alta turbulencia, cavitación, entre otros, y en consecuencia optimizar el diseño.

## 3. MODELACIÓN FÍSICA

Los ensayos se organizaron en dos escenarios: el primero fue etapa de calibración, donde se definieron los caudales y niveles de agua para determinar las condiciones de borde; y el segundo consistió en la construcción de las estructuras de la presa, para evaluar y verificar su comportamiento hidráulico y sedimentológico. Para el primer escenario se eligieron 3 secciones de control a lo largo del cauce y se tomaron datos (velocidades, tirantes de agua, cotas de fondo) en la margen izquierda, derecha y eje del cauce (Ver Figura 1). Se muestra los resultados del modelo físico (Ver Tabla 1).



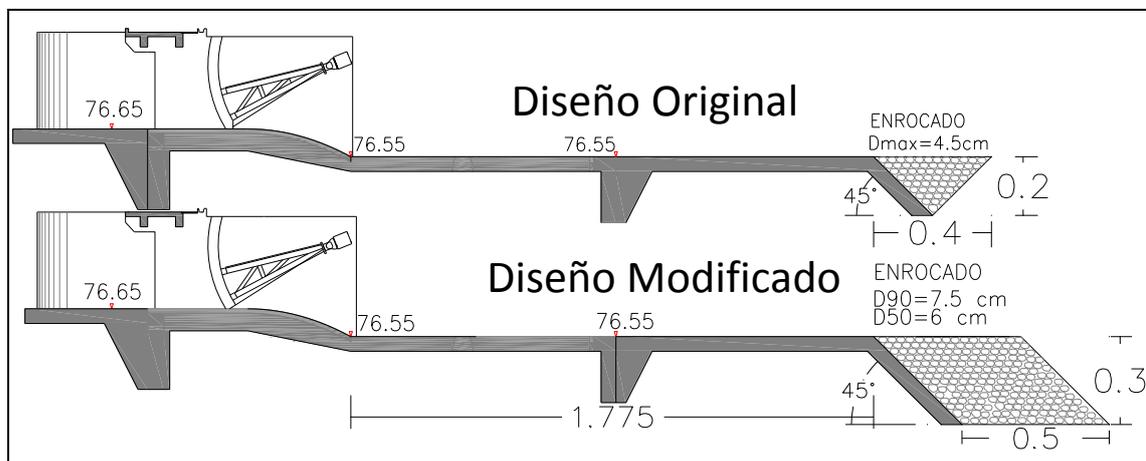
**Figura 1.-** Secciones de control. (Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria, 2013).

**Tabla 1.-** Resultados de calibración (Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria, 2013).

Q [m <sup>3</sup> /s]	Sección	Cota de Fondo [m.s.n.m.]			Nivel de agua [m]			Tirante de Agua [m]			Velocidad [m/s]		
		MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD
0,17	7	76,77	76,76	76,72	76,79	76,77	76,81	0,02	0,01	0,09	0,00	0,00	0,78
	Eje de Presa	76,52	76,51	76,50	76,61	76,60	76,62	0,09	0,09	0,12	0,06	0,72	0,19
	27	76,41	76,42	76,47	76,60	76,60	76,61	0,19	0,18	0,15	0,40	0,07	0,08
0,26	7	76,77	76,76	76,72	76,81	76,79	76,83	0,05	0,03	0,11	0,00	0,00	0,82
	Eje de Presa	76,52	76,51	76,50	76,66	76,66	76,69	0,14	0,15	0,19	0,06	0,76	0,13
	27	76,41	76,42	76,47	76,66	76,66	76,66	0,25	0,24	0,19	0,39	0,08	0,10
0,29	7	76,77	76,76	76,72	76,82	76,83	76,84	0,06	0,07	0,12	0,00	0,76	0,86
	Eje de Presa	76,52	76,51	76,50	76,68	76,68	76,69	0,16	0,17	0,19	0,06	0,76	0,15
	27	76,41	76,42	76,47	76,68	76,68	76,67	0,27	0,26	0,21	0,40	0,13	0,10
0,33	7	76,77	76,76	76,72	76,83	76,84	76,85	0,06	0,08	0,13	0,00	0,83	0,92
	Eje de Presa	76,52	76,51	76,50	76,70	76,70	76,72	0,19	0,19	0,22	0,07	0,77	0,10
	27	76,41	76,42	76,47	76,70	76,70	76,69	0,29	0,28	0,23	0,36	0,07	0,11

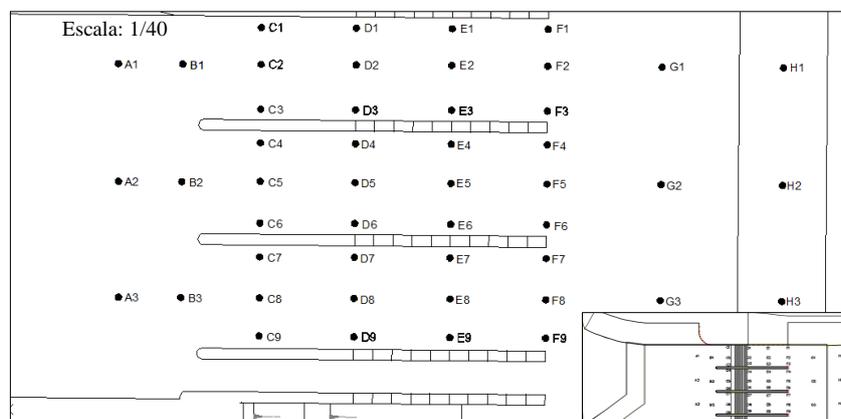
El segundo escenario, consistió en la construcción de las estructuras de excedencia, donde se estudió el comportamiento hidráulico y su interacción con los sedimentos, esto implicó, analizar el comportamiento del enrocado ubicado aguas debajo de dichas estructuras. El mayor problema que se observó fue la erosión en el enrocado por las altas velocidades del flujo de agua, este enrocado consistió en un tamaño de  $D_{max}=0,045$  m. Se realizaron modificaciones en la granulometría del enrocado, teniendo un  $D_{90}=0,075$  m y  $D_{50}=0,06$  m (Ver Figura 2). Los ensayos seleccionados presentan las 3 compuertas totalmente abiertas para poder tener un flujo a superficie libre y se ve bien representado por un modelo bidimensional, y para la comparación de datos se eligieron 48 puntos ubicados en la zona del aliviadero de compuertas (Ver Figura 3).

Se observó que para los caudales  $0,26$  m<sup>3</sup>/s y  $0,33$  m<sup>3</sup>/s, se llegó a la cota  $76,86$  m.s.n.m. y  $76,89$  m.s.n.m. respectivamente, por lo que supera la cresta del vertedero de la bocatoma y se deriva agua. Se muestra los resultados de velocidades del diseño original en el modelo físico (Ver Tabla 2).



**Figura 2.-**Detalle del enrocado aguas abajo (Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria, 2013).

El presente artículo se enfocará sólo en el modelo numérico del diseño original, debido a la presencia de altos niveles de erosiones, la simulación de ambas condiciones formará de un trabajo de investigación mucho más amplio con la finalidad de estudiar mejor el comportamiento del enrocado.



**Figura 3.-**Puntos de medición (Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria, 2013).

**Tabla 2.-**Velocidades en el aliviadero (Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria, 2013).

Q [m <sup>3</sup> /s]	Compuerta 1			Compuerta 2			Compuerta 3		
	Sección	Punto	Velocidad [m/s]	Sección	Punto	Velocidad [m/s]	Sección	Punto	Velocidad [m/s]
0,17	A	A3	0,68	A	A2	0,76	A	A1	0,64
	B	B3	0,73	B	B2	0,80	B	B1	0,82
	C	C7	0,89	C	C4	0,91	C	C1	0,90
		C8	1,03		C5	0,94		C2	0,97
		C9	1,31		C6	0,95		C3	0,99
	D	D7	1,93	D	D4	1,95	D	D1	1,86
		D8	1,86		D5	1,82		D2	1,85
		D9	1,88		D6	1,84		D3	1,71
	E	E7	2,02	E	E4	2,13	E	E1	2,22
		E8	2,13		E5	2,14		E2	2,12
E9		2,19	E6		2,09	E3		1,95	
G	G3	2,15	G	G2	2,28	G	G1	2,21	
0,26	A	A3	0,74	A	A2	0,83	A	A1	0,80
	B	B3	0,81	B	B2	0,92	B	B1	0,96
	C	C7	1,00	C	C4	1,02	C	C1	1,06
		C8	1,03		C5	1,05		C2	1,11
		C9	1,23		C6	1,17		C3	1,14
	D	D7	1,91	D	D4	2,20	D	D1	1,81
		D8	2,02		D5	2,20		D2	2,00
		D9	1,81		D6	2,02		D3	1,97
	E	E7	2,35	E	E4	2,31	E	E1	2,16
		E8	2,13		E5	2,28		E2	2,24
		E9	2,00		E6	2,14		E3	2,25
	F	F7	2,29	F	F4	2,35	F	F1	2,21
		F8	2,28		F5	2,31		F2	2,25
F9		2,23	F6		2,29	F3		2,26	
G	G3	2,28	G	G2	2,35	G	G1	2,28	
H	H3	2,22	H	H2	2,34	H	H1	2,25	
0,33	A	A3	0,78	A	A2	0,85	A	A1	0,76
	B	B3	0,77	B	B2	0,93	B	B1	0,87
	C	C7	0,89	C	C4	0,97	C	C1	0,99
		C8	1,00		C5	1,06		C2	1,08
		C9	1,03		C6	1,12		C3	1,12
	D	D7	1,95	D	D4	2,00	D	D1	1,59
		D8	2,10		D5	2,00		D2	2,10
		D9	1,82		D6	1,79		D3	2,12
	E	E7	2,42	E	E4	2,39	E	E1	2,10
		E8	2,25		E5	2,31		E2	2,34
		E9	2,06		E6	2,25		E3	2,30
	F	F7	2,25	F	F4	2,37	F	F1	2,22
		F8	2,28		F5	2,33		F2	2,35
F9		2,09	F6		2,31	F3		2,26	
G	G3	2,16	G	G2	2,37	G	G1	2,34	
H	H3	2,06	H	H2	2,43	H	H1	2,42	

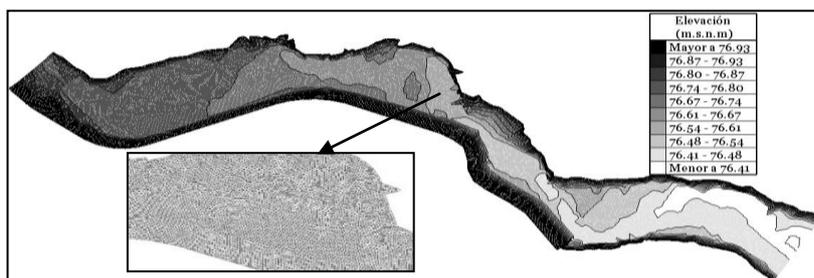
#### 4. MODELACIÓN NUMÉRICA

Telemac resuelve tres ecuaciones hidrodinámicas simultáneamente: la Ecuación de la Continuidad, Momento en los dos ejes X e Y, adicionalmente resuelve una ecuación de trazadores para transporte de escalares. Estas se dan en coordenadas cartesianas, pero también pueden procesarse en coordenadas esféricas. La dinámica de sedimentos y evolución del fondo es determinada el módulo Sisyphe, en él la carga de fondo es calculada usando una de las fórmulas clásicas para el transporte de sedimentos y la carga suspendida está determinada por la solución de una ecuación de transporte adicional para

el promedio de la concentración suspendida de sedimentos. La ecuación de la evolución del fondo (la ecuación de Exner) puede ser resuelta, mediante el uso de cualquiera de los métodos de elementos finitos o volumen finito. Se realizaron modelaciones con caudal constante. Y se utilizaron modelos de turbulencia dado que las ecuaciones de flujo resueltas utilizan los promedios de Reynolds. El desarrollo del artículo, implica la simulación de los dos escenarios ensayados en el modelo físico: sin estructuras, que corresponde al estado original del río y con estructuras, que corresponde al caso con las estructuras hidráulicas del proyecto hidroeléctrico. El primero servirá para poder calibrar el modelo numérico y el segundo permitirá la evaluación de la dinámica de las capas del enrocado.

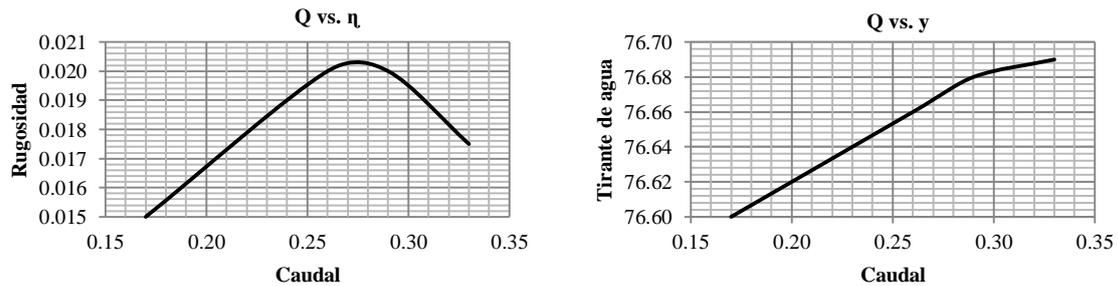
#### 4.1 PRIMER ESCENARIO: CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

La calibración consistió en adecuar las condiciones y características físicas e hidráulicas. Se trabajó con datos de velocidades y tirantes de agua obtenidos en el modelo físico. Estos datos fueron medidos en 3 secciones definidas en el modelo físico (Ver Figura 1). En el pre-procesamiento se discretizó una zona de estudio, que cuenta con una cantidad de 35 159 nodos y 68 752 elementos. Se verifica si la malla es la adecuada, por lo tanto, se comprueba que el número de conexión de nodos internos sea menor o igual a 9 y el número de conexión de nodos externos, menor o igual a 9. Se definió la zona de refinación constante a lo largo del cauce, donde la separación de nodos es de 0,10 m (Ver Figura 4).



**Figura 4.-** Distribución de la malla computacional.

Esta etapa se definió como un proceso iterativo, en donde, se ejecutaron varias simulaciones con diferentes coeficientes de fricción para cada caudal, con la finalidad de verificar que éste sea capaz de reproducir y reflejar lo observado en el modelo físico. La rugosidad es un valor importante ya que genera inicialmente la superficie de agua, velocidades y determinan los esfuerzos de corte. Es por eso, que el coeficiente de fricción es diferente para cada caudal ( $\eta$ ). Se llegó a definir los coeficientes de fricción que demostraban gran similitud y semejanza con el modelo físico. Para el  $Q=0,17 \text{ m}^3/\text{s}$  la rugosidad es  $\eta=0,015$ ,  $Q=0,26 \text{ m}^3/\text{s}$  es  $\eta=0,020$ ,  $Q=0,29 \text{ m}^3/\text{s}$  es  $\eta=0,020$  y para  $Q=0,33 \text{ m}^3/\text{s}$  es  $\eta=0,0175$ . Estos coeficientes de fricción son definidos en todo el cauce. Finalmente se estableció una relación entre Caudal vs. Rugosidad y Caudal vs. Tirante de agua del borde aguas abajo (Ver Figura 5).



**Figura 5.-** Caudal vs. Rugosidad / Caudal vs. Tirante de agua.

Se utilizó el modelo de turbulencia K-Epsilon, para una adecuada representación de la física del movimiento del flujo. No tiene parámetros para ajustar, el mismo modelo calcula los coeficientes de difusión y advección. En este caso, el régimen es un flujo subcrítico, debido a que el Número de Froude ( $Fr$ ) es menor a 1, por lo tanto las condiciones de frontera, tanto de entrada como de salida, deben ser indicadas. La condición de entrada será el caudal y la de salida el nivel de agua aguas abajo. Para estabilizar la distribución de flujo de agua por el cauce se llevó a cabo muchas simulaciones para cada caudal, en la cual se fue modificando la duración total del cálculo, utilizando como criterio el número de Courant. Se muestran los resultados del modelo numérico en el primer escenario (Ver Tabla 3).

**Tabla 3.-** Resultados de calibración del Modelo Numérico.

Q [m <sup>3</sup> /s]	Sección	Cota de Fondo [m.s.n.m.]			Nivel de agua [m]			Tirante de Agua [m]			Velocidad [m/s]		
		MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD
0,17	7	76,80	76,75	76,73	76,82	76,82	76,80	0,02	0,07	0,06	0,02	0,63	0,96
	Eje de Presa	76,53	76,51	76,50	76,61	76,61	76,62	0,07	0,10	0,12	0,03	0,36	0,01
	27	76,41	76,41	76,47	76,60	76,60	76,60	0,20	0,20	0,14	0,56	0,17	0,07
0,26	7	76,80	76,75	76,73	76,85	76,85	76,85	0,06	0,10	0,12	0,01	0,68	0,62
	Eje de Presa	76,53	76,51	76,50	76,67	76,67	76,68	0,13	0,16	0,18	0,03	0,49	0,05
	27	76,41	76,41	76,47	76,66	76,66	76,66	0,25	0,26	0,20	0,39	0,12	0,12
0,29	7	76,80	76,75	76,73	76,86	76,86	76,86	0,06	0,11	0,13	0,04	0,73	0,66
	Eje de Presa	76,53	76,51	76,50	76,68	76,68	76,69	0,14	0,17	0,19	0,01	0,66	0,02
	27	76,41	76,41	76,47	76,68	76,68	76,68	0,27	0,27	0,21	0,27	0,26	0,07
0,33	7	76,80	76,75	76,73	76,86	76,86	76,86	0,06	0,11	0,13	0,03	0,88	0,70
	Eje de Presa	76,53	76,51	76,50	76,68	76,69	76,70	0,15	0,18	0,20	0,09	0,71	0,02
	27	76,41	76,41	76,47	76,69	76,69	76,69	0,28	0,28	0,22	0,33	0,25	0,05

Se evaluó la concordancia entre los valores cuantitativos y la discrepancia a través de los métodos estadísticos, que ayudaron a dar validez a los resultados y brindar una óptima calibración. La concordancia puede expresarse en función de las medias y varianzas de los resultados obtenidos con cada modelo y la correlación entre ambos. Está será perfecta cuando la Desviación Cuadrática Media (DCM) = 0, esto implica que haya igualdad de medias  $\mu_x = \mu_y$ , de desviaciones  $\sigma_x = \sigma_y$ , y que el coeficiente de correlación de Pearson sea  $\rho_{xy} = 1$ . Se observa que la comparación de medias o el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson son insuficientes, debido a que la igualdad de medias sólo garantiza que los 2 modelos se centran en el mismo valor, pero en ningún caso que todos sus valores sean iguales. Del mismo modo, un coeficiente de correlación de 1 indica una relación lineal perfecta, es decir, la relación entre los 2 modelos es una recta carente de error

aleatorio, pero esta recta no necesariamente tiene por qué ser la bisectriz. Por lo tanto, se calcula el Coeficiente de Concordancia de Lin y el Método Bland-Altman, el primero evalúa la concordancia globalmente con un único valor y el segundo tiene como objetivo determinar si los 2 modelos concuerdan lo suficiente y con poco rango de dispersión. A continuación se muestran los gráficos de concordancia de tirantes de agua y velocidades para los caudales ensayados (Ver Figura 6).

#### **4.2 SEGUNDO ESCENARIO: MODELACIÓN CON ESTRUCTURAS**

Se construyó la malla del río con las estructuras de excedencia (aliviadero fijo y móvil), para la evaluación del comportamiento hidráulico y sedimentológico que se observó en la zona del enrocado ubicado aguas abajo del aliviadero de compuertas del modelo físico. En el pre-procesamiento, la malla cuenta con 45 384 nodos y 88 647 elementos. También se verificó la malla, como en el primer escenario (Ver Figura 7). La separación de nodos no será uniforme a lo largo del cauce con las estructuras, debido a que se necesitará tener una zona más detallada y especificada para obtener una mayor exactitud y, además tener una mejor comparación de los resultados con el modelo físico. Por este motivo, la malla tiene una separación de nodos de 0,10 m con 2 zonas de densificación, la primera la zona de enrocados y la segunda el área de aliviadero de compuertas. Esta malla será utilizada para ensayar todos los caudales (Ver Figura 8).

El coeficiente de fricción que se le asignará al cauce del río ya fue definido en la etapa de calibración. Para el caso de las estructuras de concreto su coeficiente de fricción será  $\eta=0,016$  y en las zona de enrocado  $\eta=0,030$  (Ver Figura 9).

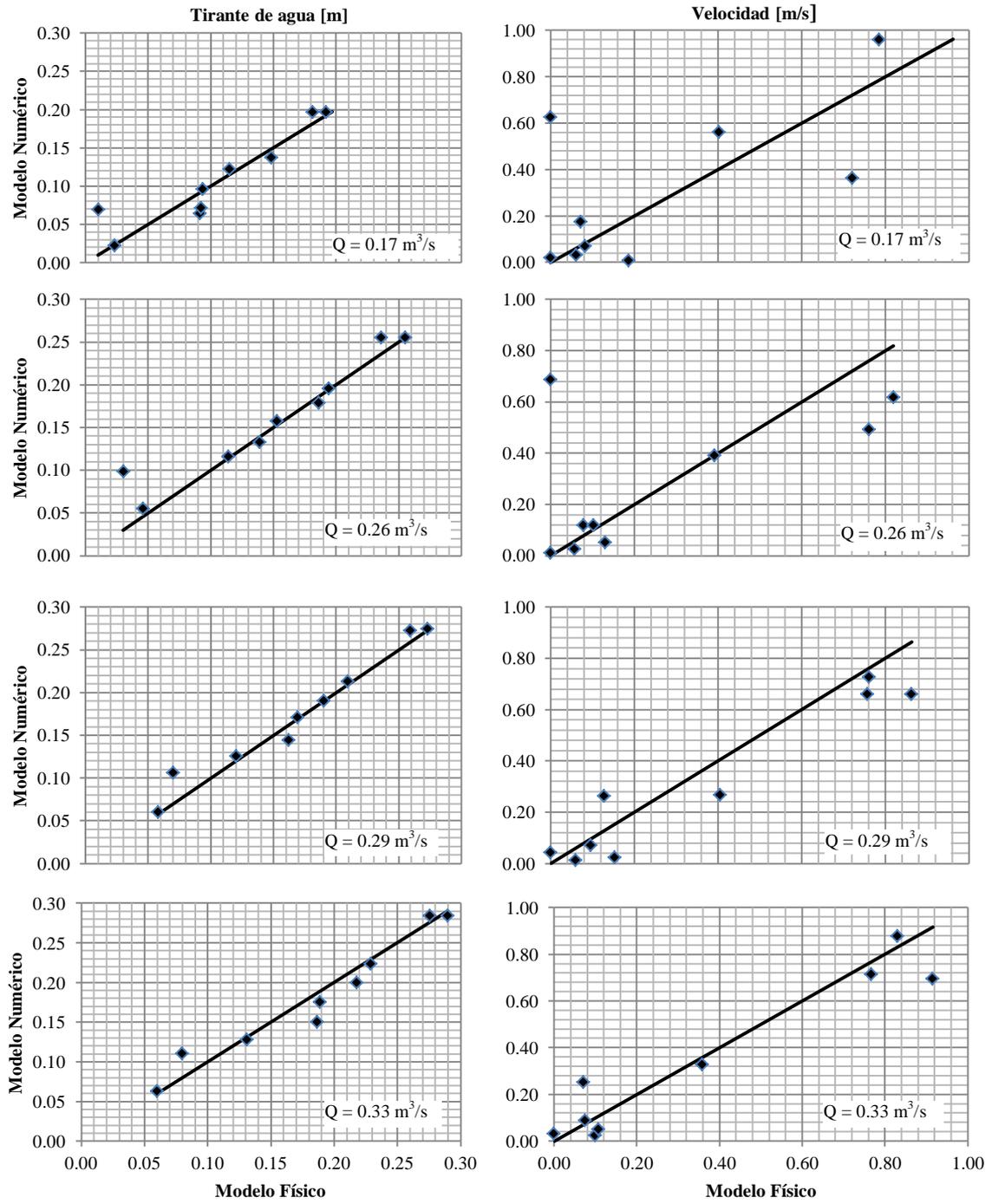
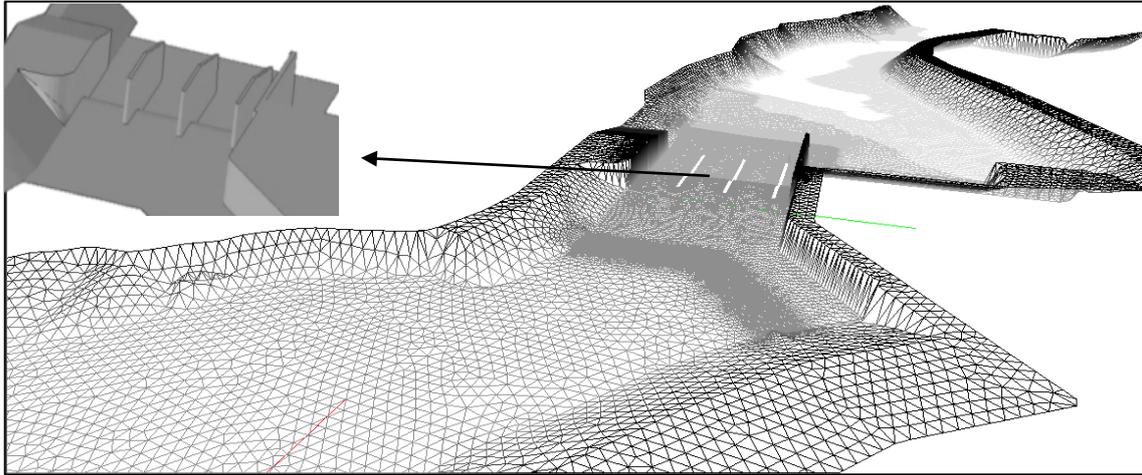
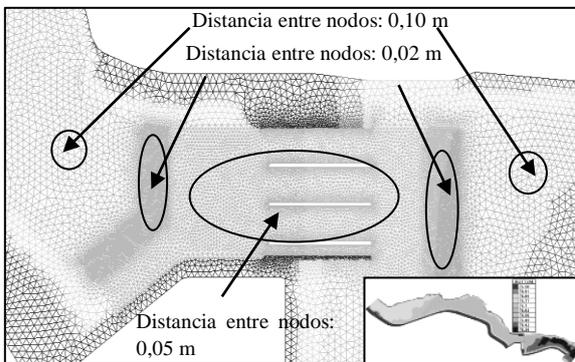


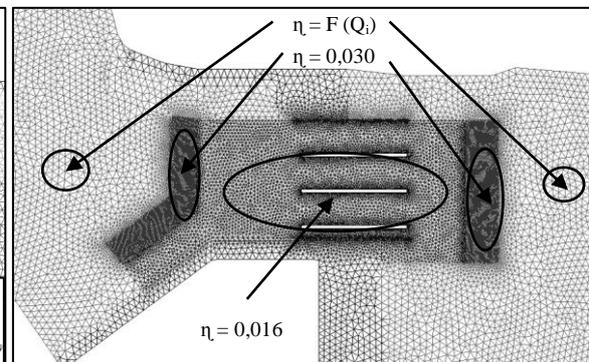
Figura 6.- Concordancia de tirante de agua y velocidad de los caudales entre los modelos.



**Figura 7.-** Construcción de la malla del río con estructuras.



**Figura 8.** Densificación del mallado.



**Figura 9.** Coeficiente de fricción.

El modelo numérico no toma en cuenta el caudal que ingresa a la bocatoma, es decir existe un pequeño caudal que no transcurre por el aliviadero de compuertas, para los caudales  $0,26 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $0,33 \text{ m}^3/\text{s}$ , y por esa razón, con la fórmula de vertederos rectangulares de Bazin, ampliada por Hégly, se calculará el caudal de entrada a la bocatoma. El ancho del vertedero es igual al ancho del canal de entrada a la bocatoma, y se considera que es un vertedero sin contracciones laterales que está definido por la ecuación (Ver Ecuación 1).

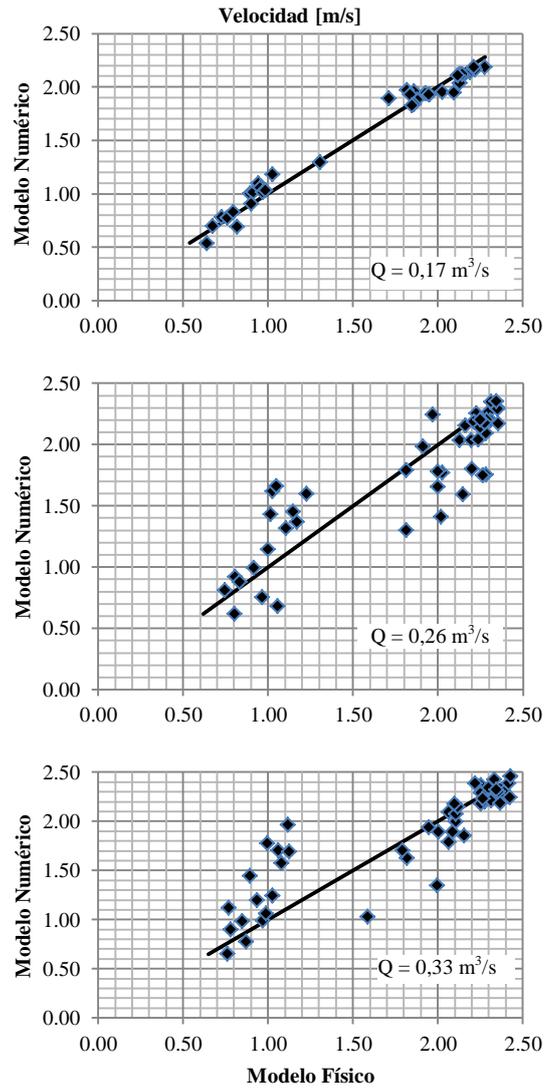
$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2gc} LH^{\frac{2}{3}} \quad ; \quad c = \left( 0,6075 + \frac{0,00405}{H} \right) \left( 1 + 0,55 \left( \frac{H}{H+P} \right)^2 \right) \quad [1]$$

Se calculó el caudal de entrada en el canal de la bocatoma, y el porcentaje, con respecto al caudal total de entrada al cauce del río, no llega al 10% para ambos caudales, por lo tanto se considera que es un caudal mínimo que no afectará los resultados de velocidades en el aliviadero de compuertas, y podría ser despreciable (Ver Tabla 4).

**Tabla 4.-** Caudales en la entrada del canal de la bocatoma.

Caudal [m <sup>3</sup> /s]	C	Caudal del vertedero [m <sup>3</sup> /s]	Caudal Final [m <sup>3</sup> /s]	%
0.26	1.418	0.002	0.258	0.893
0.33	0.719	0.027	0.303	8.075

Se muestran los gráficos comparativos de velocidades de los dos modelos (Ver Figura 10).



**Figura 10.-** Concordancia de velocidades de los caudales entre los modelos.

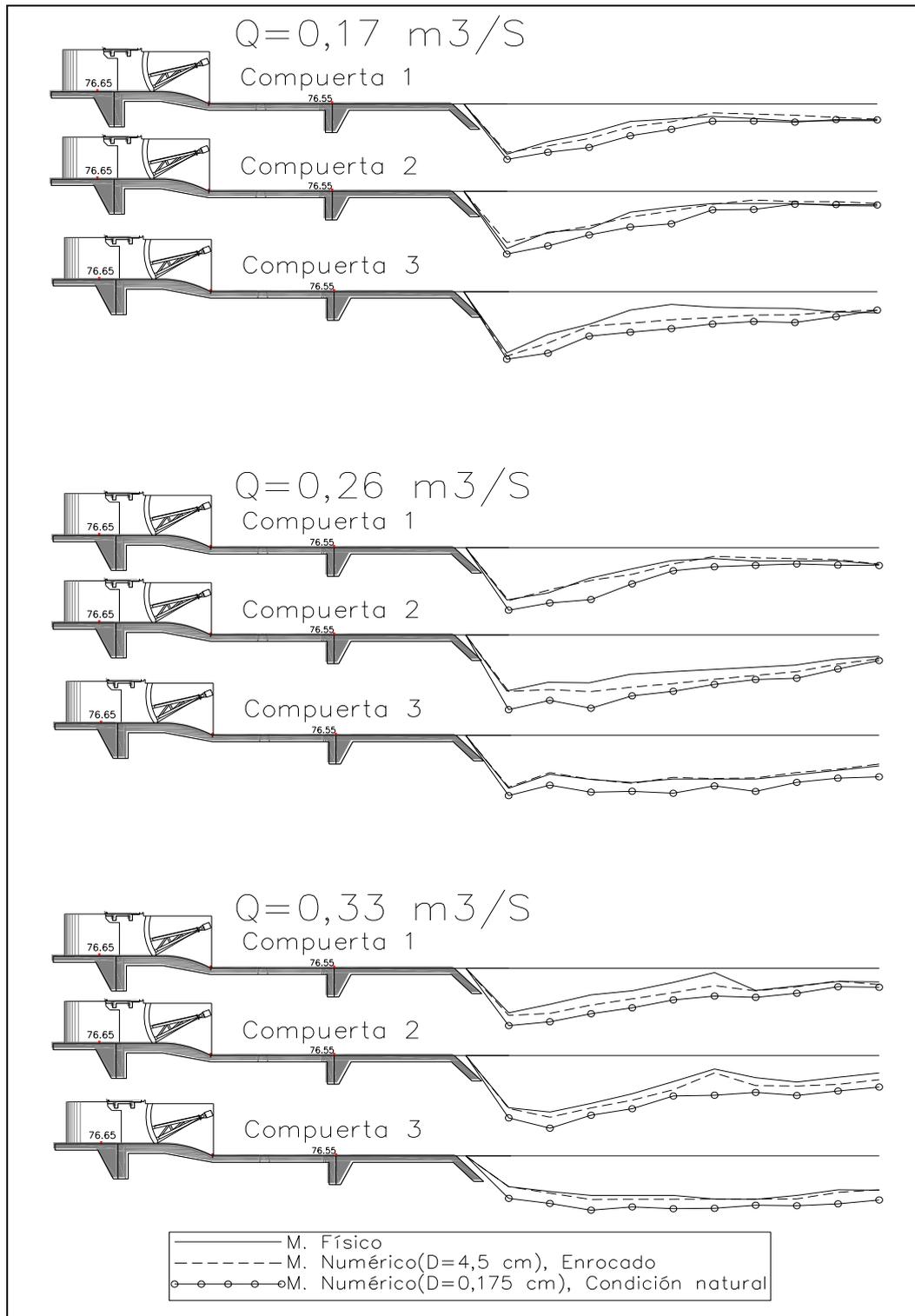
Los resultados de velocidades del diseño original del modelo numérico se muestran en la Tabla 5.

**Tabla 5.-** Velocidades en el aliviadero de compuertas del Modelo Numérico.

Q [m <sup>3</sup> /s]	Compuerta 1			Compuerta 2			Compuerta 3		
	Sección	Punto	Velocidad [m/s]	Sección	Punto	Velocidad [m/s]	Sección	Punto	Velocidad [m/s]
0,17	A	A3	0,70	A	A2	0,78	A	A1	0,54
	B	B3	0,78	B	B2	0,83	B	B1	0,69
	C	C7	1,00	C	C4	1,02	C	C1	0,91
		C8	1,18		C5	1,10		C2	1,02
		C9	1,29		C6	1,06		C3	1,03
	D	D7	1,94	D	D4	1,93	D	D1	1,84
		D8	1,96		D5	1,97		D2	1,83
		D9	1,88		D6	1,93		D3	1,89
	E	E7	1,95	E	E4	2,04	E	E1	2,16
		E8	2,12		E5	2,12		E2	2,11
E9		2,14	E6		1,95	E3		1,93	
G	G3	2,11	G	G2	2,19	G	G1	2,19	
0,26	A	A3	0,81	A	A2	0,87	A	A1	0,62
	B	B3	0,92	B	B2	0,99	B	B1	0,75
	C	C7	1,14	C	C4	1,43	C	C1	0,68
		C8	1,61		C5	1,66		C2	1,31
		C9	1,59		C6	1,37		C3	1,45
	D	D7	1,98	D	D4	2,03	D	D1	1,79
		D8	1,77		D5	1,80		D2	1,78
		D9	1,30		D6	1,41		D3	2,24
	E	E7	2,30	E	E4	2,34	E	E1	2,15
		E8	2,03		E5	1,75		E2	2,04
		E9	1,65		E6	1,59		E3	2,17
	F	F7	2,26	F	F4	2,29	F	F1	2,19
		F8	2,09		F5	2,20		F2	2,14
		F9	2,25		F6	2,20		F3	1,74
G	G3	2,18	G	G2	2,17	G	G1	2,17	
H	H3	2,18	H	H2	2,35	H	H1	2,20	
0,33	A	A3	0,90	A	A2	0,98	A	A1	0,65
	B	B3	1,12	B	B2	1,20	B	B1	0,78
	C	C7	1,45	C	C4	0,99	C	C1	1,06
		C8	1,77		C5	1,70		C2	1,57
		C9	1,24		C6	1,96		C3	1,69
	D	D7	1,94	D	D4	1,89	D	D1	1,03
		D8	2,00		D5	1,34		D2	2,07
		D9	1,62		D6	1,70		D3	2,15
	E	E7	2,39	E	E4	2,29	E	E1	2,18
		E8	2,37		E5	2,35		E2	2,30
		E9	2,09		E6	2,18		E3	2,34
	F	F7	2,29	F	F4	2,25	F	F1	2,39
		F8	2,20		F5	2,42		F2	2,30
		F9	1,89		F6	2,21		F3	2,23
G	G3	1,86	G	G2	2,19	G	G1	2,32	
H	H3	1,79	H	H2	2,46	H	H1	2,24	

El Telemac Mascaret no logra representar dos granulometrías diferentes, por lo tanto, se optó por simular dos opciones: la primera que todo el material tenga la granulometría del enrocado y la segunda la granulometría de las condiciones naturales, y de esta manera obtener un rango entre dichos parámetros.

Los niveles de erosión, tanto para los dos diámetros ensayados en el modelo numérico (diámetro de enrocado y diámetro en condición natural), son comparados con los niveles de erosión observados en el modelo físico (Ver Figura 11).



**Figura 11.- Niveles de erosión.**

## 5. CONCLUSIONES

El modelo numérico representó de forma aceptable, reproduciendo los lugares de erosión y su magnitud comparado con los resultados del modelo físico, el fenómeno de erosión tanto para el ensayo con enrocado como con la granulometría del río. Por lo tanto, la utilización de la modelación numérica muestra en este caso ser una herramienta confiable para el diseño de estructuras hidráulicas.

El modelo numérico es útil para reproducir experimentos a escala debido a que las fórmulas de Meyer-Peter son formuladas para un diámetro pequeño, si se desea realizar un modelo numérico del prototipo, deberá realizarse un análisis detallado de cuáles son las ecuaciones de transporte que pueden utilizarse para sedimentos de mayor tamaño, como es el caso de este estudio.

Se entiende que los modelos numéricos son una herramienta de gran utilidad, pues permiten no sólo obtener gran cantidad de información que implicaría mucho esfuerzo medir en los modelos físicos, sino que muestran resultados con buena estimación y de forma gráfica. A su vez los modelos numéricos presentan un gran campo de aplicación, y pueden ser utilizados para diversos problemas y diseños en la ingeniería hidráulica, siempre por supuesto complementándose de los modelos físicos, que por su parte reproducen un ensayo de la realidad en escala.

## 6. AGRADECIMIENTO

Se agradece al Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria (IHHS) de la Universidad de Piura por facilitar el trabajo de investigación dentro de sus instalaciones y por el acceso a la información brindada para realizar la investigación.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barreto, D.** (2014). - *Investigación hidráulica utilizando un modelo numérico 3D de la Presa Tablonos Alto-Chinecas*. Piura: Universidad de Piura.
- Carrasco, J. L., & Jover, L.** (2004). *Métodos estadísticos para evaluar la concordancia*. Barcelona, España: Bioestadística. Departamento de Salud Pública.
- Chow, V. t.** (2003). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Bogotá.
- EDF-R&D.** (2014). *Telemac 2D Software - User Manual*. EDF-R&D.
- Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria.** (2013). *Modelo Hidráulico de las Obras de Represamiento y captación del Proyecto Especial de Irrigación e Hidroenergético del Alto Piura*. Piura: Univeridad de Piura.
- Peterka, A. J.** (1984). *Hydraulic Desing of Stilling Basins and Energy Dissipators*. United States Department of the Interior: Bureau of reclamation., Denver, Colorado.
- Ríos, D.** (2013). *Investigación de la Disipación de Energía en el Modelo Hidráulico del Proyecto Alto Piura*. Piura: Universidad de Piura.
- Rocha, A.** (2007). *Hidráulica de Tubería y Canales*. (Primera ed.). Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Tassi, P., & Villaret, C.** (2014). *Sisyphé v6.3 User's Manual*. EDF R&D.
- Vásquez, J.** (2003). *Modelación Numérica en Hidráulica*.
- Willis, E.** (2015). *Optimización del diseño hidráulico del proyecto Miraflores utilizando el modelo numérico Telemac-2D*. Piura: Universidad de Piura.

## Capítulo 6

### Conclusiones

- El modelo numérico representó de forma aceptable, el fenómeno de erosión tanto para el ensayo con enrocado como con la granulometría del río. Esto se validó en base a los métodos estadísticos que buscan medir la concordancia entre los resultados de los modelos. El coeficiente de concordancia se encuentra en un promedio de 90%. Por lo tanto, la utilización de la modelación numérica resulta ser una herramienta confiable para el diseño de estructuras hidráulicas.
- En función de las fórmulas de transporte de sedimentos (Meyer – Peter) que fueron desarrolladas para diámetros en un rango de 0,4 mm – 29 mm<sup>6</sup>, la modelación numérica de enrocados que están dentro de este rango, logran una mayor representación de la realidad, por lo tanto se debe tener especial cuidado cuando se utilice modelos numérico de estructuras reales, ya que los diámetros exceden los rangos.
- Los modelos numéricos son una herramienta de gran utilidad, permiten obtener información que implicaría mucho esfuerzo, tiempo y costo en los modelos físicos. A su vez los modelos numéricos presentan un gran campo de aplicación, y pueden ser utilizados para diversos problemas y diseños en la ingeniería hidráulica, complementándose de los modelos físicos, que por su parte reproducen un ensayo de la realidad a escala.
- El modelo numérico Telemac Mascaret no logra simular dos granulometrías diferentes, por ese motivo se optó por simular dos opciones: con la granulometría del enrocado y la segunda con la granulometría de las condiciones naturales, y de esta manera obtener un rango entre dichos parámetros. Por lo tanto se recomienda seguir investigando a fondo el tema.

---

<sup>6</sup> Numerical analysis of sediment transport processes in a reservoir. G. Harb, C. Dorfmann & J. Schneider. S. Haun. H. Badura.

## Bibliografía

- Barreto, D.** (2014). - *Investigación hidráulica utilizando un modelo numérico 3D de la Presa Tablonos Alto-Chinecas*. Piura: Universidad de Piura.
- Carrasco, J. L., & Jover, L.** (2004). *Métodos estadísticos para evaluar la concordancia*. Barcelona, España: Bioestadística. Departamento de Salud Pública.
- Chow, V. t.** (2003). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Bogotá.
- EDF-R&D.** (2014). *Telemac 2D Software - User Manual*. EDF-R&D.
- Harb, G., Dorfmann, C., Schneider, J., Haun, S., & Badura, H.** (2012). *Numerical Analysis of Sediment Transport Processes in a Reservoir*. London: Taylor & Francis Group.
- Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria.** (2013). *Modelo Hidráulico de las Obras de Represamiento y captación del Proyecto Especial de Irrigación e Hidroenergético del Alto Piura*. Piura: Univeridad de Piura.
- Lopardo, R. A.** (1976). *Cálculo práctico de enrocados para protección de márgenes*. Santiago.
- Lopardo, R. A., & Casado, J. M.** (2005). *Estabilidad de enrocados aguas abajo de disipadores a resalto*. Ezeiza: H. D. Farias, J. D. Brea y R. Cazeneuve.
- Lopardo, R. A., Casado, J. M., & Lopardo, M. C.** (2003). *Erosión local aguas abajo de un disipador a resalto con insuficiente nivel de restitución*. Ezeiza: J.D. Brea y H.D. Farías.
- Martín Vide, J. P.** (1997). *Ingeniería de ríos*. Barcelona: Edicions UPC, S.L.
- Maynard, S. T.** (1991). Flow Resistance of Riprap. *Journal of Hydraulic Engineering*, 687-696.
- Maynard, S. T., Ruff, J. F., & Abt, S. R.** (1989). Riprap Design. *Journal of Hydraulic Engineering*, 937-949.

**Peterka, A. J.** (1984). *Hydraulic Desing of Stilling Basins and Energy Dissipators*. United States Department of the Interior: Bureau of reclamation., Denver, Colorado.

**Ríos, D.** (2013). *Investigación de la Disipación de Energía en el Modelo Hidráulico del Proyecto Alto Piura*. Piura: Universidad de Piura.

**Rocha, A.** (2003). Los Modelos como Herramienta valiosa para el Diseño Hidráulico. *Investigación en Modelos Físicos y Matemáticos de Obras Hidráulicas* (pág. 18). Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.

**Rocha, A.** (2007). *Hidráulica de Tubería y Canales* (Primera ed.). Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.

**Tassi, P., & Villaret, C.** (2014). *Sisyphé v6.3 User's Manual*. EDF R&D.

**Willis, E.** (2015). *Optimización del diseño hidráulico del proyecto Miraflores utilizando el modelo numérico Telemac-2D*. Piura: Universidad de Piura.

## Nomenclatura

### a) Variables del Telemac Mascaret.

- U: Velocidad en el eje X (m/s).
- V: Velocidad en el eje Y (m/s).
- C: Velocidad de la onda de agua (m/s).
- H: Tirante de agua (m).
- S: Elevación de la superficie libre (m).
- B: Elevación de fondo (m).
- F: Número de Froude.
- Q: Flujo de agua de un fluido ( $m^2/s$ ).
- T\*: Número de Tracer.
- K: Energía turbulenta del modelo k-e (J/kg).
- E: Disipación de energía turbulenta (W/kg).
- D: Viscosidad turbulenta del modelo k-e ( $m^2/s$ ).
- I: Flujo de agua en el eje X ( $m^2/s$ ).
- J: Flujo de agua en el eje Y ( $m^2/s$ ).
- M: Velocidad escalar (m/s).
- X: Viento en el eje X (m/s).
- Y: Viento en el eje Y (m/s).
- P: Presión de aire (Pa).
- W: Coeficiente de fricción del fondo.
- A: Giro en el eje X (m).
- G: Giro en el eje Y (m).
- L: Número de Courant.
- N: Variable de usuario.
- O: Variable de usuario.
- R: Variable de usuario.
- Z: Variable de usuario.
- US: Velocidad de fricción.

**b) Variables del Sisyphé.**

- V: Velocidad en el eje Y (m/s).
- C: Velocidad de onda (m/s).
- H: Tirante de agua (m).
- S: Elevación de superficie libre (m).
- B: Elevación de fondo (m).
- Q: Flujo de agua de un fluido ( $m^2/s$ ).
- I: Flujo de agua en el eje X ( $m^2/s$ ).
- J: Flujo de agua en el eje Y ( $m^2/s$ ).
- M: Descarga de la carga de fondo ( $m^2/s$ ).
- N: Descarga de la carga de fondo en el eje X ( $m^2/s$ ).
- P: Descarga de la carga de fondo en el eje Y ( $m^2/s$ ).
- E: Evolución de fondo (m).
- R: Fondo no erosionable.
- KS: Rugosidad total de fondo.
- TOB: Esfuerzo cortante de fondo ( $N/m^2$ ).
- MU: Factor de corrección de la fricción superficial.
- D50: El promedio del diámetro del grano.
- THETAW: Ángulo de onda
- QSSUSP: Velocidad de transporte de carga de fondo suspendida.
- QSBL: Velocidad de carga de fondo.
- W: Altura de onda.
- X: Periodo de onda.
- UWB: Velocidad de onda orbital.
- 1Ai: Fracción de sedimento de la categoría de la primera capa.
- 2Ai: Fracción de sedimento de la categoría de la segunda capa.
- kAi: Fracción de sedimento de la categoría de la capa k.
- kES: Espesor de la capa k.
- kCONC: Concentración de la capa k de fondo.
- QSi: Velocidad de transporte de carga de fondo del sedimento de categoría i.
- CSAT: Concentración saturada ( $kg/m^3$ ).
- A: Variable complementaria.
- G: Variable complementaria.
- L: Variable complementaria.
- O: Variable complementaria.

## **ANEXOS**

## **ANEXO A**

### **Resultados y validación del primer escenario del modelo numérico**

A.1 Caudal 0,17 m<sup>3</sup>/s.

## A.1.1 Archivo de Control (cas.txt).

```

/EQUATIONS
/-----
FRICTION COEFFICIENT =0.015
LAW OF BOTTOM FRICTION =4
//TURBULENCE MODEL FOR SOLID BOUNDARIES = 2
TURBULENCE MODEL =3
/-----
/EQUATIONS, BOUNDARY CONDITIONS
/-----
VELOCITY PROFILES =1;1
PRESCRIBED FLOWRATES =0.0;0.17
PRESCRIBED ELEVATIONS =76.60;0.0
OPTION FOR LIQUID BOUNDARIES =1;1
/-----
/EQUATIONS, INITIAL CONDITIONS
/-----
/INITIAL DEPTH =0.5
/INITIAL CONDITIONS ='CONSTANT DEPTH'
/-----
/ INPUT-OUTPUT, FILES
/-----
STEERING FILE = 'cas.txt'
BOUNDARY CONDITIONS FILE ='cli.cli'
GEOMETRY FILE = 'GEO.slf'
PREVIOUS COMPUTATION FILE = 'hotStart.slf'
RESULTS FILE = 'res'
/-----
/ INPUT-OUTPUT, GRAPHICS AND LISTING
/-----
LISTING PRINTOUT PERIOD =1000
VARIABLES FOR GRAPHIC PRINTOUTS =U,V,H,B,US,S,M,K,E,F,C,L
MASS-BALANCE =YES
INFORMATION ABOUT K-EPSILON MODEL = YES
GRAPHIC PRINTOUT PERIOD =5000
COMPUTATION CONTINUED = YES
INITIAL TIME SET TO ZERO = YES
/-----
/ NUMERICAL PARAMETERS
/-----

```

NUMBER OF TIME STEPS =100000

PARALLEL PROCESSORS =0

/STOP IF A STEADY STATE IS REACHED = YES

STOP CRITERIA =0.000001;0.000001;0.000001;0.000001

TIME STEP =0.01

### A.1.2 Resultados de la calibración.

Q [m <sup>3</sup> /s]	Sección	Cota de Fondo [m.s.n.m.]			Nivel del agua [m]			Tirantes de Agua [m]			Velocidad [m/s]		
		MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD
0,17	7	76,80	76,75	76,73	76,82	76,82	76,80	0,02	0,07	0,06	0,02	0,63	0,96
	Eje de Presa	76,53	76,51	76,50	76,61	76,61	76,62	0,07	0,10	0,12	0,03	0,36	0,01
	27	76,41	76,41	76,47	76,60	76,60	76,60	0,20	0,20	0,14	0,56	0,17	0,07

### A.1.3 Validación de tirante de agua.

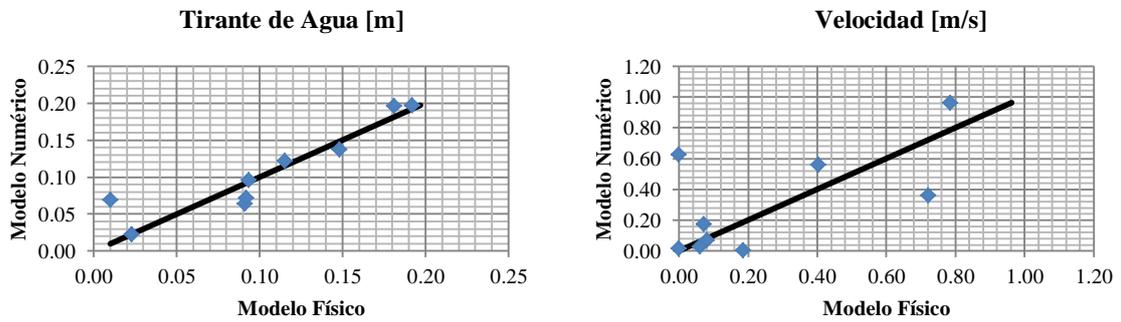
Δ Tirante de Agua [m]																	
(x-y) <sup>2</sup>			(x)*(y)			x <sup>2</sup>			y <sup>2</sup>			x-y			(x+y)/2		
MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,06	0,03	0,02	0,04	0,08
0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,00	-0,01	0,08	0,09	0,12
0,00	0,00	0,00	0,04	0,04	0,02	0,04	0,03	0,02	0,04	0,04	0,02	-0,01	-0,02	0,01	0,19	0,19	0,14
0,00			0,00			0,92			0,92			0,00			0,00		
DCM			DCM			Coef. Pearson			Coef. Concor.LIN			Promedio (x-y)			Varianza		
OK=0//MAL=1			OK=0//MAL=1			OK=1//MAL=0			OK=1//MAL=0			MÉTODO DE BLAND-ALTMAN					

### A.1.4 Validación de velocidad.

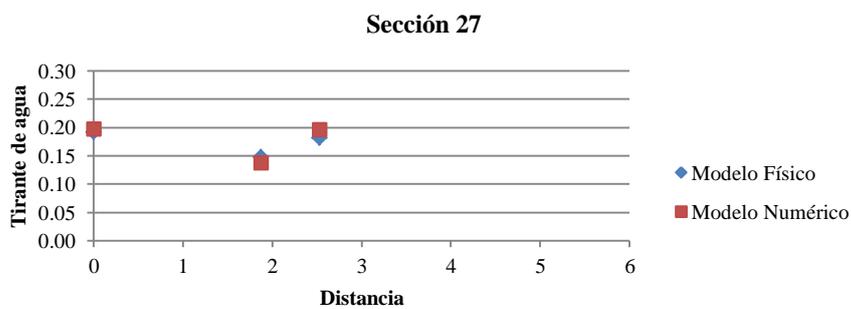
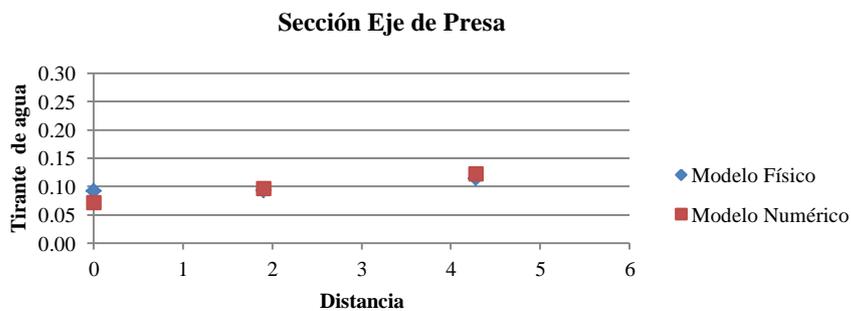
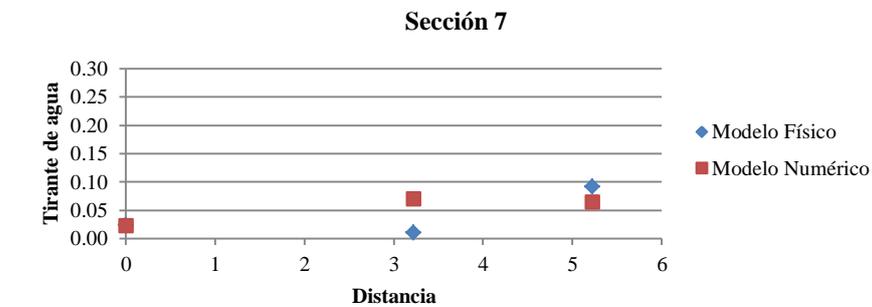
Δ Velocidad [m/s]																	
(x-y) <sup>2</sup>			(x)*(y)			x <sup>2</sup>			y <sup>2</sup>			x-y			(x+y)/2		
MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD
0,00	0,39	0,03	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00	0,62	0,00	0,39	0,92	-0,02	-0,63	-0,18	0,00	0,39	3,05
0,00	0,13	0,03	0,00	0,26	0,00	0,00	0,52	0,03	0,00	0,13	0,00	0,03	0,36	0,18	0,01	1,18	0,04
0,03	0,01	0,00	0,23	0,01	0,01	0,16	0,01	0,01	0,32	0,03	0,01	-0,16	-0,10	0,01	0,93	0,06	0,02
0,07			0,08			0,65			0,64			0,06			0,07		
DCM			DCM			Coef. Pearson			Coef. Concor.LIN			Promedio (x-y)			Varianza		
OK=0//MAL=1			OK=0//MAL=1			OK=1//MAL=0			OK=1//MAL=0			MÉTODO DE BLAND-ALTMAN					

## A.1.5 Gráficos.

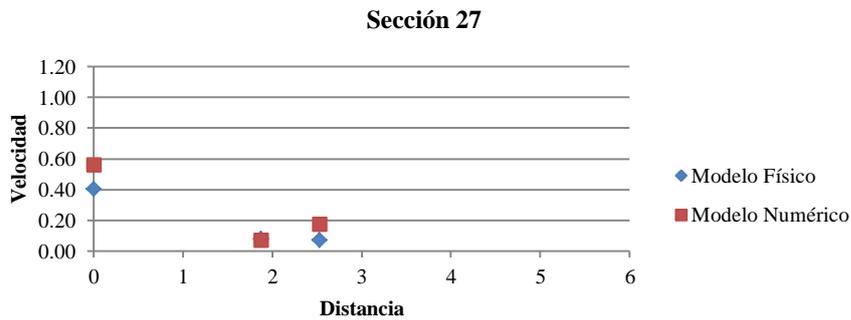
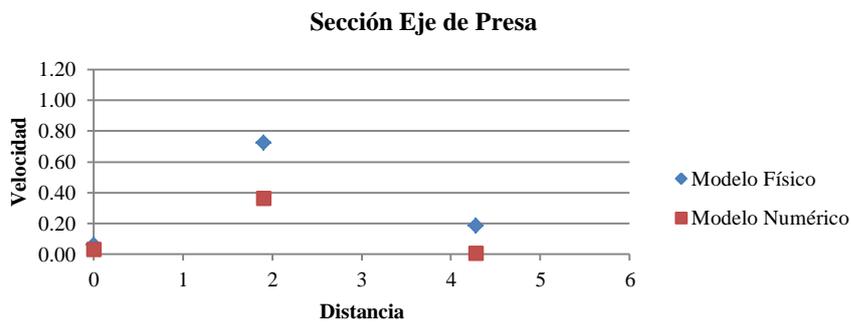
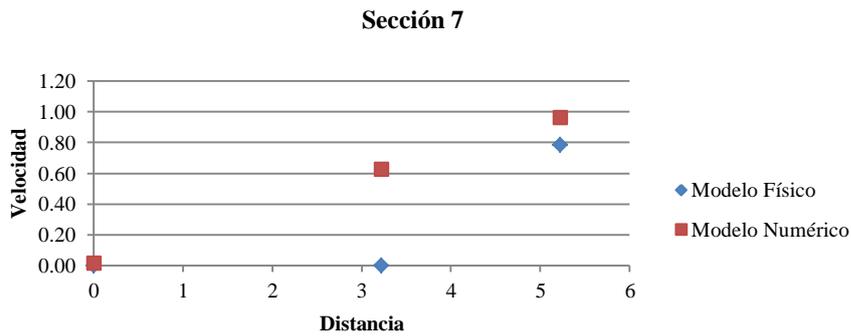
- Comparación entre ambos modelos.



- Tirante de agua en cada sección.



- Velocidad en cada sección.



A.2 Caudal 0,26 m<sup>3</sup>/s.

A.2.1 Archivo de control (cas.txt).

```

/ EQUATIONS
/-----
FRICITION COEFFICIENT =0.020
LAW OF BOTTOM FRICTION =4
//TURBULENCE MODEL FOR SOLID BOUNDARIES = 2
TURBULENCE MODEL =3
/-----
/ EQUATIONS, BOUNDARY CONDITIONS
/-----

```

```

VELOCITY PROFILES      =1;1
PRESCRIBED FLOWRATES  =0.0;0.26
PRESCRIBED ELEVATIONS =76.66;0.0
OPTION FOR LIQUID BOUNDARIES =1;1
/-----
/ EQUATIONS, INITIAL CONDITIONS
/-----
/INITIAL DEPTH      =0.5
/INITIAL CONDITIONS ='CONSTANT DEPTH'
/-----
/ INPUT-OUTPUT, FILES
/-----
STEERING FILE      ='cas.txt'
BOUNDARY CONDITIONS FILE ='cli.cli'
GEOMETRY FILE      ='GEO.slf'
PREVIOUS COMPUTATION FILE      ='hotStart.slf'
RESULTS FILE       ='res'
/-----
/ INPUT-OUTPUT, GRAPHICS AND LISTING
/-----
LISTING PRINTOUT PERIOD      =1000
VARIABLES FOR GRAPHIC PRINTOUTS =U,V,H,B,US,S,M,K,E,F,C,L
MASS-BALANCE                =YES
INFORMATION ABOUT K-EPSILON MODEL = YES
GRAPHIC PRINTOUT PERIOD     =5000
COMPUTATION CONTINUED = YES
INITIAL TIME SET TO ZERO = YES
/-----
/ NUMERICAL PARAMETERS
/-----
NUMBER OF TIME STEPS =100000
PARALLEL PROCESSORS =0
/STOP IF A STEADY STATE IS REACHED = YES
STOP CRITERIA      =0.000001;0.000001;0.000001;0.000001
TIME STEP          =0.01

```

### A.2.2 Resultados de calibración.

Q [m <sup>3</sup> /s]	Sección	Cota de Fondo [m.s.n.m.]			Nivel del agua [m]			Tirantes de Agua [m]			Velocidad [m/s]		
		MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD
0,26	7	76,80	76,75	76,73	76,85	76,85	76,85	0,06	0,10	0,12	0,01	0,68	0,62
	Eje de Presa	76,53	76,51	76,50	76,67	76,67	76,68	0,13	0,16	0,18	0,03	0,49	0,05
	27	76,41	76,41	76,47	76,66	76,66	76,66	0,25	0,26	0,20	0,39	0,12	0,12

## A.2.2 Validación de tirante de agua.

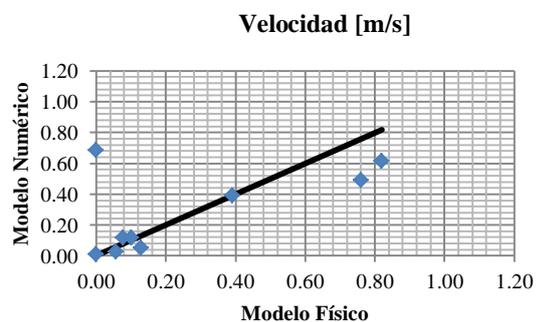
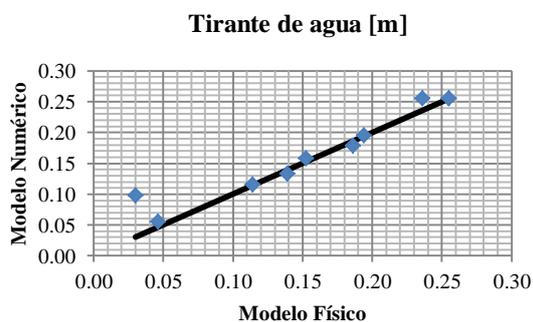
Δ Tirante de Agua [m]																	
(x-y) <sup>2</sup>			(x)*(y)			x <sup>2</sup>			y <sup>2</sup>			x-y			(x+y)/2		
MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	-0,01	-0,07	0,00	0,05	0,06	0,11
0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,01	0,00	0,01	0,14	0,15	0,18
0,00	0,00	0,00	0,06	0,06	0,04	0,07	0,06	0,04	0,06	0,07	0,04	0,00	-0,02	0,00	0,25	0,25	0,19
0,00			0,00			0,96			0,94			0,01			0,00		
DCM			DCM			Coef. Pearson			Coef. Concor.LIN			Promedio (x-y)			Varianza		
OK=0//MAL=1			OK=0//MAL=1			OK=1//MAL=0			OK=1//MAL=0			MÉTODO DE BLAND-ALTMAN					

## A.2.3 Validación de velocidad.

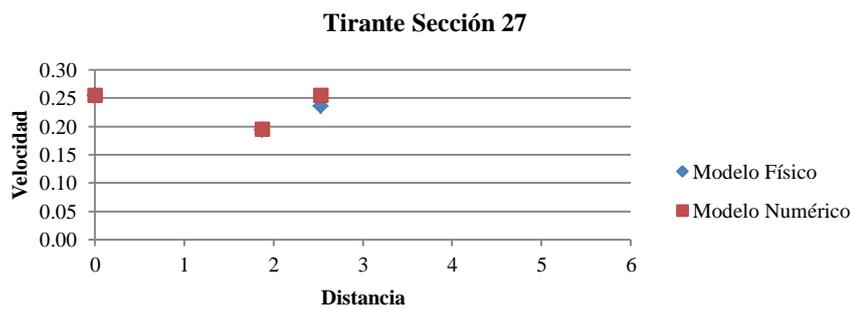
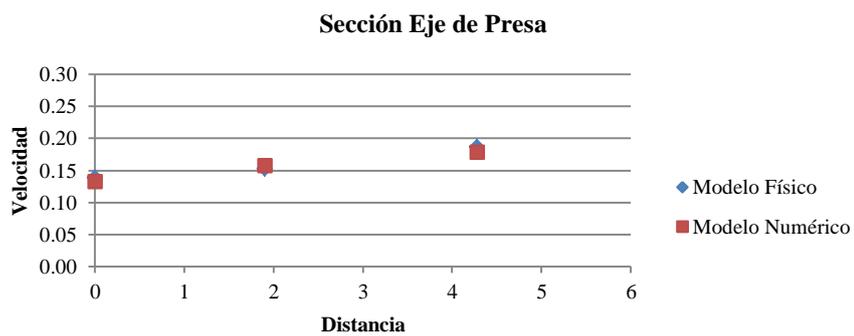
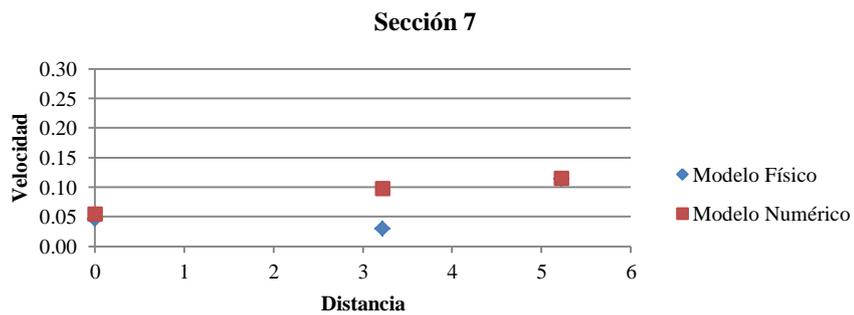
Δ Velocidad [m/s]																	
(x-y) <sup>2</sup>			(x)*(y)			x <sup>2</sup>			y <sup>2</sup>			x-y			(x+y)/2		
MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD
0,00	0,47	0,04	0,00	0,00	0,50	0,00	0,00	0,67	0,00	0,47	0,38	-0,01	-0,68	0,20	0,00	0,47	2,06
0,00	0,07	0,01	0,00	0,37	0,01	0,00	0,58	0,02	0,00	0,24	0,00	0,03	0,27	0,08	0,01	1,57	0,03
0,00	0,00	0,00	0,15	0,01	0,01	0,15	0,01	0,01	0,15	0,01	0,01	0,00	-0,04	-0,02	0,61	0,04	0,05
0,07			0,07			0,59			0,58			0,02			0,07		
DCM			DCM			Coef. Pearson			Coef. Concor.LIN			Promedio (x-y)			Varianza		
OK=0//MAL=1			OK=0//MAL=1			OK=1//MAL=0			OK=1//MAL=0			MÉTODO DE BLAND-ALTMAN					

## A.2.4 Gráficos.

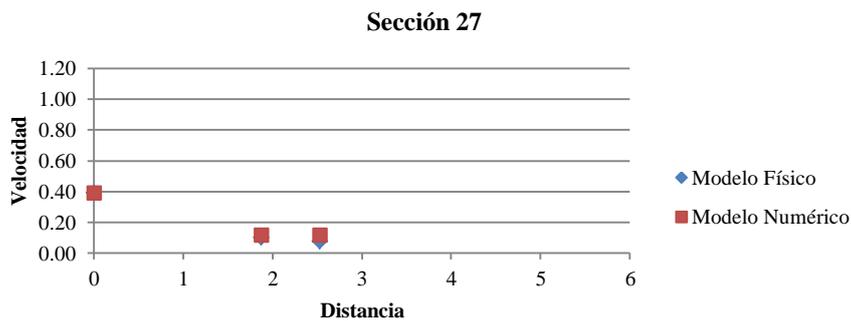
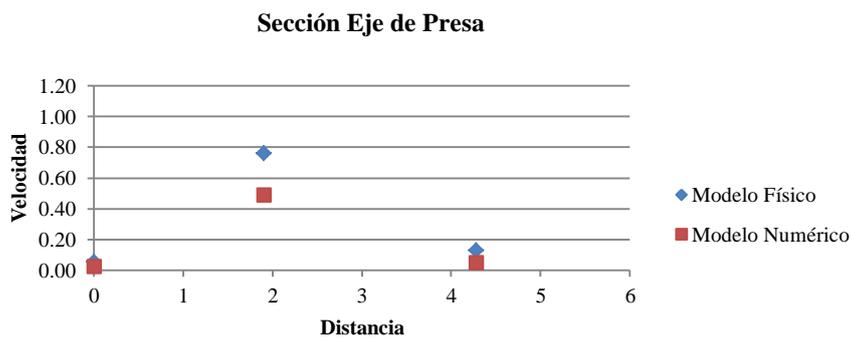
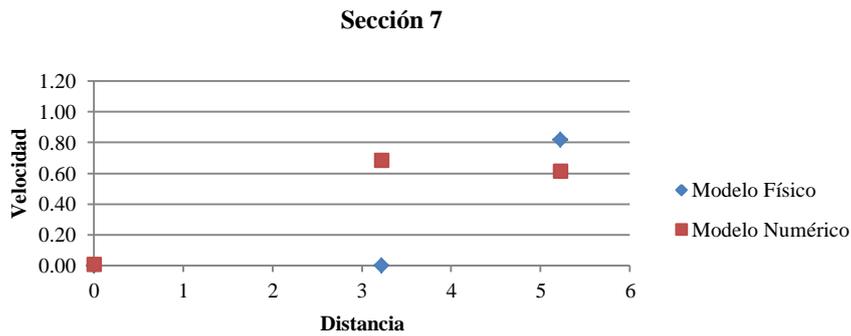
- Comparación entre ambos modelos.



- Tirantes de agua en cada sección.



- Velocidad en cada sección.



A.3 Caudal 0,29 m<sup>3</sup>/s.

A.3.1 Archivo de control (cas.txt).

/ EQUATIONS

/-----

FRICITION COEFFICIENT =0.020

LAW OF BOTTOM FRICTION =4

//TURBULENCE MODEL FOR SOLID BOUNDARIES = 2

TURBULENCE MODEL =3

/-----

/ EQUATIONS, BOUNDARY CONDITIONS

/-----

VELOCITY PROFILES =1;1

PRESCRIBED FLOWRATES =0.0;0.29

```

PRESCRIBED ELEVATIONS      =76.68;0.0
OPTION FOR LIQUID BOUNDARIES =1;1
/-----
/ EQUATIONS, INITIAL CONDITIONS
/-----
/INITIAL DEPTH      =0.5
/INITIAL CONDITIONS ='CONSTANT DEPTH'
/-----
/ INPUT-OUTPUT, FILES
/-----
STEERING FILE          ='cas.txt'
BOUNDARY CONDITIONS FILE ='cli.cli'
GEOMETRY FILE          ='GEO.slf'
PREVIOUS COMPUTATION FILE      ='hotStart.slf'
RESULTS FILE           ='res'
/-----
/ INPUT-OUTPUT, GRAPHICS AND LISTING
/-----
LISTING PRINTOUT PERIOD      =1000
VARIABLES FOR GRAPHIC PRINTOUTS =U,V,H,B,US,S,M,K,E,F,C,L
MASS-BALANCE                =YES
INFORMATION ABOUT K-EPSILON MODEL = YES
GRAPHIC PRINTOUT PERIOD      =5000
COMPUTATION CONTINUED = YES
INITIAL TIME SET TO ZERO = YES
/-----
/ NUMERICAL PARAMETERS
/-----
NUMBER OF TIME STEPS =100000
PARALLEL PROCESSORS =0
/STOP IF A STEADY STATE IS REACHED = YES
STOP CRITERIA      =0.000001;0.000001;0.000001;0.000001
TIME STEP          =0.01

```

### A.3.2 Resultados de la calibración.

Q [m <sup>3</sup> /s]	Sección	Cota de Fondo [m.s.n.m.]			Nivel del agua [m]			Tirantes de Agua [m]			Velocidad [m/s]		
		MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD
0,29	7	76,80	76,75	76,73	76,86	76,86	76,86	0,06	0,11	0,13	0,04	0,73	0,66
	Eje de Presa	76,53	76,51	76,50	76,68	76,68	76,69	0,14	0,17	0,19	0,01	0,66	0,02
	27	76,41	76,41	76,47	76,68	76,68	76,68	0,27	0,27	0,21	0,27	0,26	0,07

### A.3.3 Validación de tirante de agua.

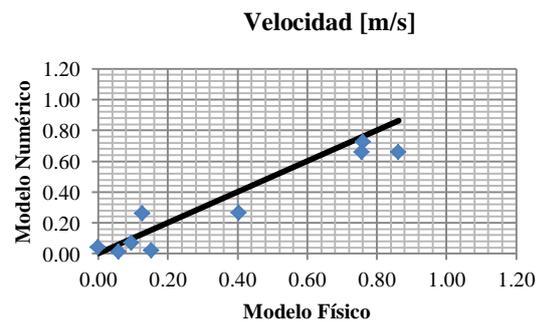
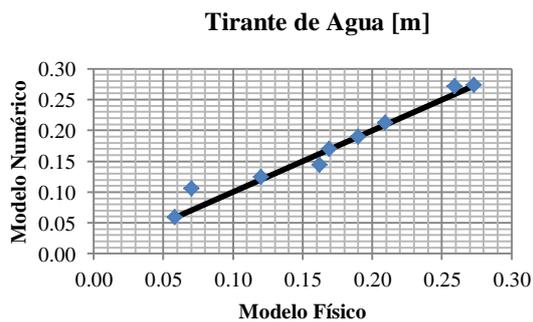
Δ Tirante de Agua [m]																	
(x-y) <sup>2</sup>			(x)*(y)			x <sup>2</sup>			y <sup>2</sup>			x-y			(x+y)/2		
MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD
0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,02	0,00	-0,04	-0,01	0,06	0,09	0,12
0,00	0,00	0,00	0,02	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,02	0,03	0,04	0,02	0,00	0,00	0,15	0,17	0,19
0,00	0,00	0,00	0,07	0,07	0,04	0,07	0,07	0,04	0,08	0,07	0,05	0,00	-0,01	0,00	0,27	0,27	0,21
0,00			0,00			0,98			0,98			0,01			0,00		
DCM			DCM			Coef. Pearson			Coef. Concor.LIN			Promedio (x-y)			Varianza		
OK=0//MAL=1			OK=0//MAL=1			OK=1//MAL=0			OK=1//MAL=0			MÉTODO DE BLAND-ALTMAN					

### A.3.4 Validación de velocidad.

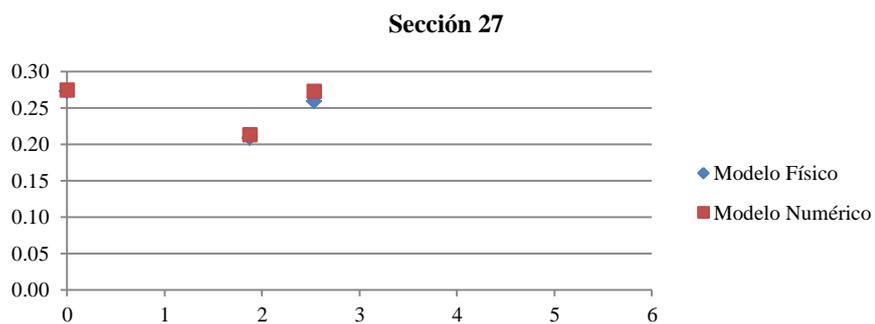
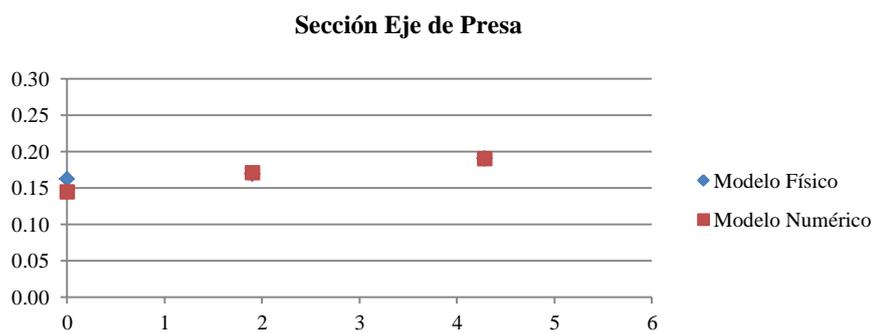
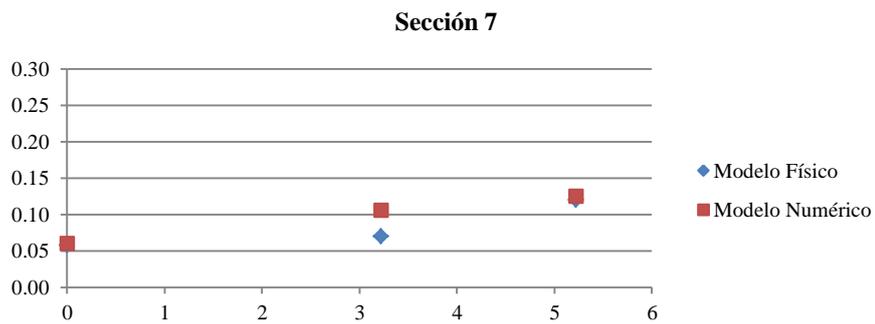
Δ Velocidad [m/s]																	
(x-y) <sup>2</sup>			(x)*(y)			x <sup>2</sup>			y <sup>2</sup>			x-y			(x+y)/2		
MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD
0,00	0,00	0,04	0,00	0,55	0,57	0,00	0,58	0,75	0,00	0,53	0,44	-0,04	0,03	0,20	0,00	2,21	2,32
0,00	0,01	0,02	0,00	0,50	0,00	0,00	0,57	0,02	0,00	0,43	0,00	0,05	0,10	0,13	0,01	2,01	0,03
0,02	0,02	0,00	0,11	0,03	0,01	0,16	0,02	0,01	0,07	0,07	0,00	0,14	-0,14	0,03	0,45	0,15	0,03
0,01			0,01			0,96			0,94			0,06			0,01		
DCM			DCM			Coef. Pearson			Coef. Concor.LIN			Promedio (x-y)			Varianza		
OK=0//MAL=1			OK=0//MAL=1			OK=1//MAL=0			OK=1//MAL=0			MÉTODO DE BLAND-ALTMAN					

### A.3.5 Gráficos.

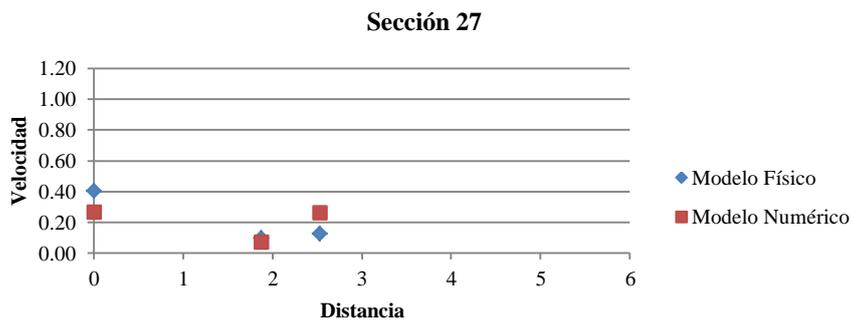
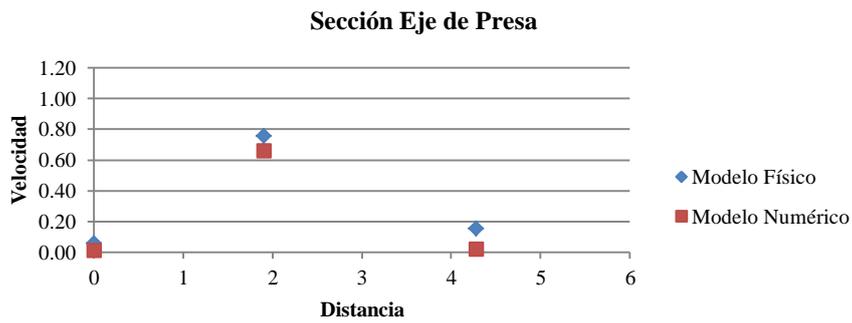
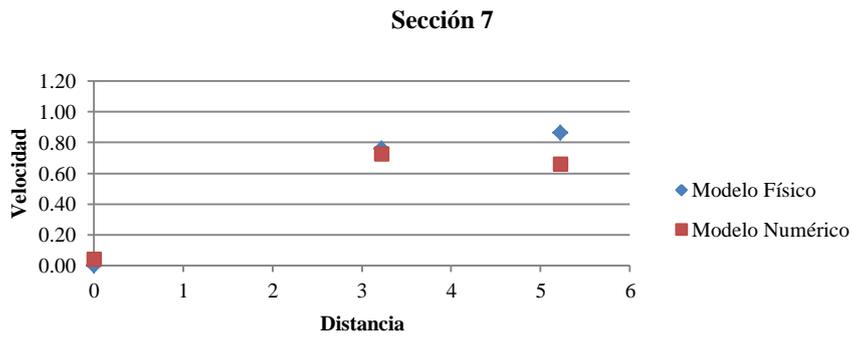
- Comparación entre ambos modelos.



- Tirantes de agua en cada sección.



- Velocidad en cada sección.



A.4 Caudal 0,33 m<sup>3</sup>/s.

A.4.1 Archivo de control (cas.txt).

/ EQUATIONS

/-----

FRICITION COEFFICIENT =0.0175

LAW OF BOTTOM FRICTION =4

//TURBULENCE MODEL FOR SOLID BOUNDARIES = 2

TURBULENCE MODEL =3

/-----  
 / EQUATIONS, BOUNDARY CONDITIONS  
 /-----

VELOCITY PROFILES =1;1

PRESCRIBED FLOWRATES =0.0;0.33

PRESCRIBED ELEVATIONS =76.69;0.0

OPTION FOR LIQUID BOUNDARIES =1;1

/-----  
 / EQUATIONS, INITIAL CONDITIONS  
 /-----

/INITIAL DEPTH =0.5

/INITIAL CONDITIONS ='CONSTANT DEPTH'

/-----  
 / INPUT-OUTPUT, FILES  
 /-----

STEERING FILE ='cas.txt'

BOUNDARY CONDITIONS FILE ='cli.cli'

GEOMETRY FILE ='GEO.slf'

PREVIOUS COMPUTATION FILE ='hotStart.slf'

RESULTS FILE ='res'

/-----  
 / INPUT-OUTPUT, GRAPHICS AND LISTING  
 /-----

LISTING PRINTOUT PERIOD =1000

VARIABLES FOR GRAPHIC PRINTOUTS =U,V,H,B,US,S,M,K,E,F,C,L

MASS-BALANCE =YES

INFORMATION ABOUT K-EPSILON MODEL = YES

GRAPHIC PRINTOUT PERIOD =5000

COMPUTATION CONTINUED = YES

INITIAL TIME SET TO ZERO = YES

/-----  
 / NUMERICAL PARAMETERS  
 /-----

NUMBER OF TIME STEPS =100000

PARALLEL PROCESSORS =6

/STOP IF A STEADY STATE IS REACHED = YES

STOP CRITERIA =0.000001;0.000001;0.000001;0.000001

TIME STEP =0.01

#### A.4.2 Resultados de calibración.

Q [m <sup>3</sup> /s]	Sección	Cota de Fondo [m.s.n.m.]			Nivel del agua [m]			Tirantes de Agua [m]			Velocidad [m/s]		
		MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD
0,33	7	76,80	76,75	76,73	76,86	76,86	76,86	0,06	0,11	0,13	0,03	0,88	0,70
	Eje de Presa	76,53	76,51	76,50	76,68	76,69	76,70	0,15	0,18	0,20	0,09	0,71	0,02
	27	76,41	76,41	76,47	76,69	76,69	76,69	0,28	0,28	0,22	0,33	0,25	0,05

#### A.4.3 Validación de tirante de agua.

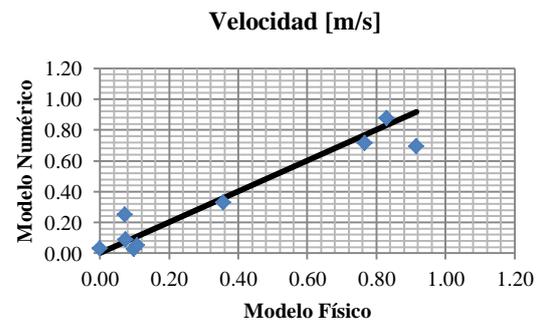
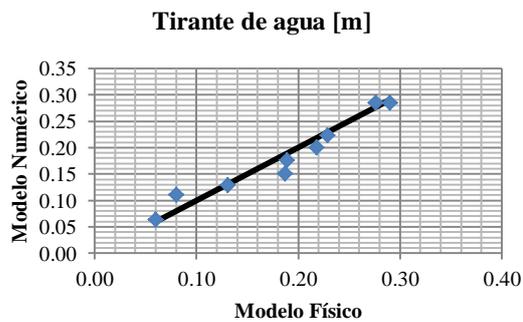
Δ Tirante de Agua [m]																	
(x-y) <sup>2</sup>			(x)*(y)			x <sup>2</sup>			y <sup>2</sup>			x-y			(x+y)/2		
MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD
0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	0,01	0,02	0,00	0,01	0,02	0,00	-0,03	0,00	0,06	0,10	0,13
0,00	0,00	0,00	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,04	0,01	0,02	0,17	0,18	0,21
0,00	0,00	0,00	0,08	0,08	0,05	0,08	0,08	0,05	0,08	0,08	0,05	0,01	-0,01	0,01	0,29	0,28	0,23
0,00			0,00			0,97			0,97			0,00			0,00		
DCM			DCM			Coef. Pearson			Coef. Concor.LIN			Promedio (x-y)			Varianza		
OK=0//MAL=1			OK=0//MAL=1			OK=1//MAL=0			OK=1//MAL=0			MÉTODO DE BLAND-ALTMAN					

## A.4.4 Validación de velocidad.

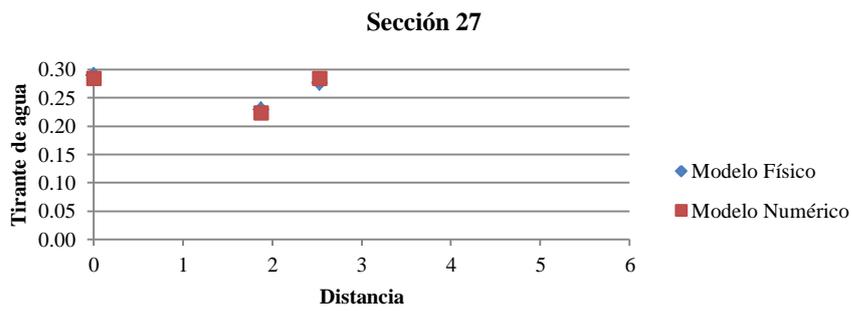
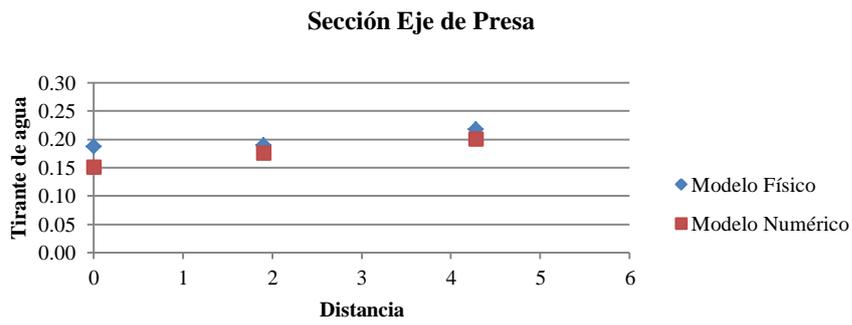
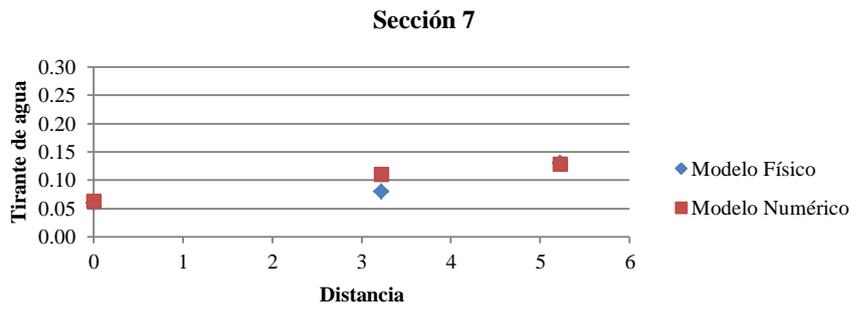
$\Delta$ Velocidad [m/s]																	
$(x-y)^2$			$(x)*(y)$			$x^2$			$y^2$			$x-y$			$(x+y)/2$		
MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD
0,00	0,00	0,05	0,00	0,73	0,64	0,00	0,69	0,84	0,00	0,77	0,48	-0,03	-0,05	0,22	0,00	2,91	2,60
0,00	0,00	0,01	0,01	0,55	0,00	0,01	0,59	0,01	0,01	0,51	0,00	-0,01	0,05	0,07	0,03	2,20	0,02
0,00	0,03	0,00	0,12	0,02	0,01	0,13	0,01	0,01	0,11	0,06	0,00	0,03	-0,18	0,06	0,47	0,10	0,03
0,01			0,01			0,96			0,95			0,02			0,01		
DCM			DCM			Coef. Pearson			Coef. Concor.LIN			Promedio (x-y)			Varianza		
OK=0//MAL=1			OK=0//MAL=1			OK=1//MAL=0			OK=1//MAL=0			MÉTODO DE BLAND-ALTMAN					

## A.4.4 Gráficos.

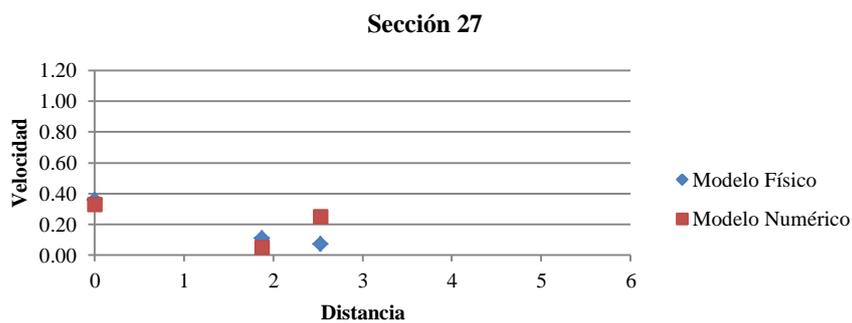
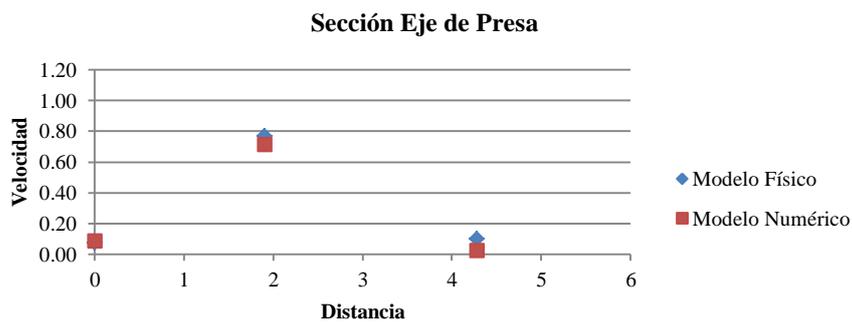
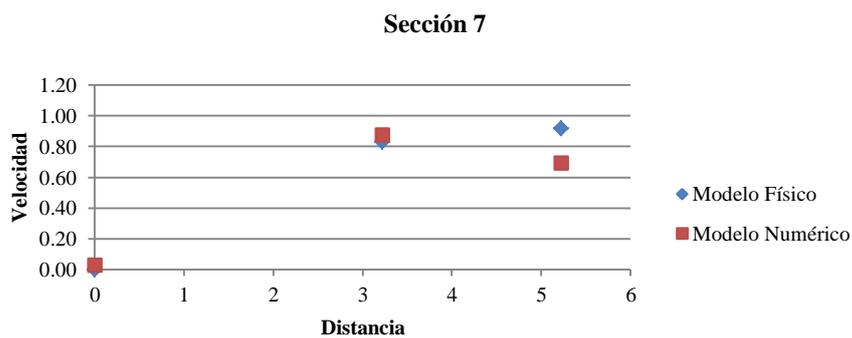
- Comparación entre ambos modelos.



- Tirantes de agua en cada sección.



- Velocidad en cada sección.



## **ANEXO B**

### **Resultados y validación del segundo escenario del modelo numérico**

B.1. Caudal 0,17 m<sup>3</sup>/s.

B.1.1. Archivo de control (cas.txt).

```

/EQUATIONS
/-----
FRICTION COEFFICIENT =0.015
LAW OF BOTTOM FRICTION =4
//TURBULENCE MODEL FOR SOLID BOUNDARIES = 2
TURBULENCE MODEL =3
/-----
/ COUPLING WITH SISYPHE
/-----
COUPLING WITH = 'SISYPHE'
SISYPHE STEERING FILE = 'sisCas.txt'
COUPLING PERIOD FOR SISYPHE = 200
/-----
/ EQUATIONS, BOUNDARY CONDITIONS
/-----
VELOCITY PROFILES = 1;1
PRESCRIBED FLOWRATES = 0.0;0.17
PRESCRIBED ELEVATIONS = 76.60;0.0
OPTION FOR LIQUID BOUNDARIES = 1;1
/-----
/ EQUATIONS, INITIAL CONDITIONS
/-----
/INITIAL DEPTH =0.5
/INITIAL CONDITIONS ='CONSTANT DEPTH'
/-----
/ INPUT-OUTPUT, FILES
/-----
STEERING FILE = 'cas.txt'
BOUNDARY CONDITIONS FILE ='cli.cli'
GEOMETRY FILE = 'GEO.slf'
PREVIOUS COMPUTATION FILE = 'q0.17'
RESULTS FILE = 'res'
/-----
/ INPUT-OUTPUT, GRAPHICS AND LISTING
/-----
LISTING PRINTOUT PERIOD =10000
VARIABLES FOR GRAPHIC PRINTOUTS =U,V,H,B,US,S,M,K,E,F,C,L
MASS-BALANCE =YES
INFORMATION ABOUT K-EPSILON MODEL = YES

```

```

GRAPHIC PRINTOUT PERIOD      =25000
COMPUTATION CONTINUED = YES
INITIAL TIME SET TO ZERO = YES
/-----
/ NUMERICAL PARAMETERS
/-----
NUMBER OF TIME STEPS =500000
PARALLEL PROCESSORS =6
/STOP IF A STEADY STATE IS REACHED = YES
STOP CRITERIA      =0.000001;0.000001;0.000001;0.000001
TIME STEP          =0.001

```

B.1.2. Archivo de control del Sisyphé (sisCas.txt)

```

/ SISYPHE - MF ALTO PIURA /
/-----/
GEOMETRY FILE              = 'GEO.slf'
BOUNDARY CONDITIONS FILE   = 'sisCli.cli'
RESULTS FILE               = 'resSedQ0.17'
/-----
/ GENERAL INFORMATIONS - OUTPUTS
/-----
VARIABLES FOR GRAPHIC PRINTOUTS      ='B,M,QSBL'
TIME STEP                          = 0.001
NUMBER OF TIME STEPS                = 500000
/-----
/ BOUNDARY CONDITIONS
/-----
MASS-BALANCE = YES
/-----
/ PHYSICAL PARAMETERS
/-----
NUMBER OF SIZE-CLASSES OF BED MATERIAL = 1
SEDIMENT DENSITY                    = 2650
NON COHESIVE BED POROSITY           = 0.4
SEDIMENT DIAMETERS                  = 0.045
INITIAL FRACTION FOR PARTICULAR SIZE CLASS = 1
COHESIVE SEDIMENTS                  = NO
/SETTLING VELOCITIES                = 0.0173;0.0064;0.0024
SHIELDS PARAMETERS                  = 0.045
/-----
/ MODELING PARAMETERS
/-----
BED-LOAD TRANSPORT FORMULA          = 1

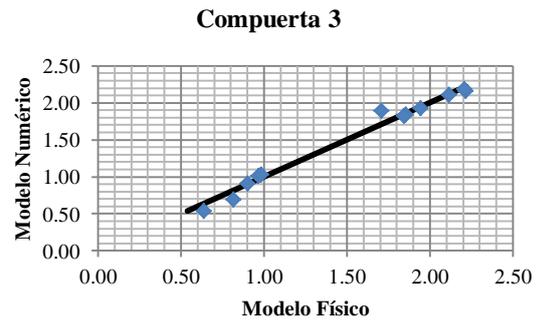
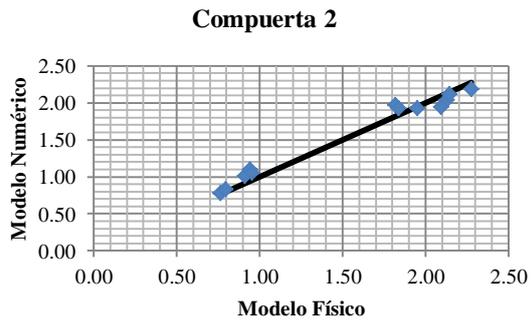
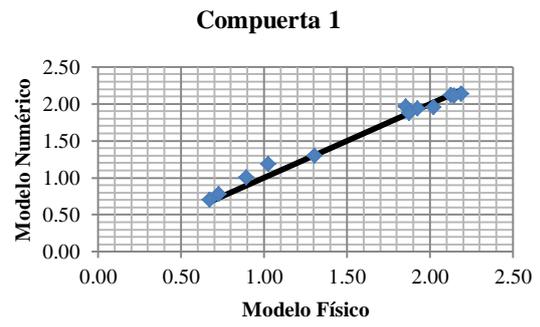
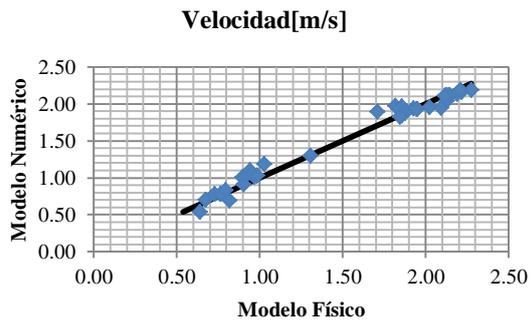
```

BED LOAD = YES  
 FORMULA FOR SLOPE EFFECT = 1  
 FORMULA FOR DEVIATION = 1  
 SLOPE EFFECT = YES  
 FRICTION ANGLE OF THE SEDIMENT = 40  
 BETA = 1.3  
 PARAMETER FOR DEVIATION = 0.85  
 SEDIMENT SLIDE = YES  
 SECONDARY CURRENTS = YES  
 SECONDARY CURRENTS ALPHA COEFFICIENT = 1  
 CORRECTION ON CONVECTION VELOCITY = NO  
 MASS CONCENTRATION = NO  
 /----- SUSPENDED SEDIMENT -----  
 SUSPENSION = NO  
 TYPE OF ADVECTION = 1  
 &ETA  
 &FIN

### B.1.3. Resultados de velocidades.

Q [m <sup>3</sup> /s]	Compuerta 1			Compuerta 2			Compuerta 3		
	Sección	Punto	Velocidad [m/s]	Sección	Punto	Velocidad [m/s]	Sección	Punto	Velocidad [m/s]
0,17	A	A3	0,70	A	A2	0,78	A	A1	0,54
	B	B3	0,78	B	B2	0,83	B	B1	0,69
	C	C7	1,00	C	C4	1,02	C	C1	0,91
		C8	1,18		C5	1,10		C2	1,02
		C9	1,29		C6	1,06		C3	1,03
	D	D7	1,94	D	D4	1,93	D	D1	1,84
		D8	1,96		D5	1,97		D2	1,83
		D9	1,88		D6	1,93		D3	1,89
	E	E7	1,95	E	E4	2,04	E	E1	2,16
		E8	2,12		E5	2,12		E2	2,11
		E9	2,14		E6	1,95		E3	1,93
	G	G3	2,11	G	G2	2,19	G	G1	2,19

## B.1.4. Gráficos



B.1.5. Validación de velocidad.

Δ Velocidad [m/s]																		
Q [m <sup>3</sup> /s]	(x-y) <sup>2</sup>			(x)*(y)			x <sup>2</sup>			y <sup>2</sup>			x-y			(x+y)/2		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
0,17	0,00	0,00	0,01	0,47	0,59	0,34	0,46	0,58	0,41	0,49	0,60	0,29	-0,03	-0,01	0,10	1,89	2,37	1,39
	0,00	0,00	0,02	0,57	0,66	0,57	0,53	0,63	0,67	0,61	0,69	0,48	-0,05	-0,04	0,12	2,27	2,65	2,29
	0,01	0,01	0,00	0,90	0,93	0,82	0,80	0,83	0,81	1,00	1,04	0,82	-0,11	-0,11	0,00	3,60	3,73	3,27
	0,03	0,02	0,00	1,22	1,03	0,98	1,05	0,89	0,94	1,40	1,20	1,03	-0,16	-0,16	-0,05	4,89	4,15	3,93
	0,00	0,01	0,00	1,69	1,01	1,02	1,71	0,91	0,97	1,68	1,12	1,07	0,01	-0,11	-0,05	6,76	4,04	4,08
	0,00	0,00	0,00	3,74	3,76	3,42	3,72	3,80	3,45	3,76	3,72	3,39	-0,01	0,02	0,02	14,95	15,04	13,68
	0,01	0,02	0,00	3,64	3,59	3,38	3,45	3,30	3,41	3,84	3,89	3,34	-0,10	-0,15	0,02	14,58	14,36	13,50
	0,00	0,01	0,03	3,53	3,55	3,24	3,52	3,37	2,93	3,53	3,73	3,59	0,00	-0,10	-0,18	14,10	14,19	13,00
	0,00	0,01	0,00	3,95	4,34	4,79	4,10	4,52	4,92	3,82	4,16	4,67	0,07	0,09	0,06	15,82	17,35	19,17
	0,00	0,00	0,00	4,51	4,55	4,46	4,52	4,60	4,47	4,49	4,51	4,44	0,01	0,02	0,01	18,03	18,21	17,84
	0,00	0,02	0,00	4,68	4,07	3,76	4,79	4,38	3,78	4,57	3,79	3,73	0,05	0,15	0,02	18,72	16,31	15,02
	0,00	0,01	0,00	4,54	4,98	4,84	4,62	5,18	4,89	4,46	4,79	4,78	0,04	0,09	0,03	18,15	19,94	19,34
0,01			0,01			0,99			0,99			0,01			0,01			
DCM			DCM			Coef. Pearson			Coef. Concor.LIN			Promedio (x-y)			Varianza			
OK=0//MAL=1			OK=0//MAL=1			OK=1//MAL=0			OK=1//MAL=0			BLAND-ALTMAN METHOD						

B.2. Caudal 0,26 m<sup>3</sup>/s.

B.2.1. Archivo de control (cas.txt).

```

/ EQUATIONS
/-----

FRICTION COEFFICIENT =0.020

LAW OF BOTTOM FRICTION =4

//TURBULENCE MODEL FOR SOLID BOUNDARIES = 2
TURBULENCE MODEL =3

/-----
/ COUPLING WITH SISYPHE
/-----

COUPLING WITH = 'SISYPHE'

SISYPHE STEERING FILE = 'sisCas.txt'

COUPLING PERIOD FOR SISYPHE = 200

/-----
/ EQUATIONS, BOUNDARY CONDITIONS
/-----

VELOCITY PROFILES = 1;1

PRESCRIBED FLOWRATES = 0.0;0.26

PRESCRIBED ELEVATIONS = 76.66;0.0

OPTION FOR LIQUID BOUNDARIES = 1;1

/-----
/ EQUATIONS, INITIAL CONDITIONS
/-----

/INITIAL DEPTH =0.5

/INITIAL CONDITIONS ='CONSTANT DEPTH'

```

```
/-----  
/ INPUT-OUTPUT, FILES  
/-----
```

STEERING FILE = 'cas.txt'

BOUNDARY CONDITIONS FILE = 'cli.cli'

GEOMETRY FILE = 'GEO.slf'

PREVIOUS COMPUTATION FILE = 'q0.26'

RESULTS FILE = 'res'

```
/-----  
/ INPUT-OUTPUT, GRAPHICS AND LISTING  
/-----
```

LISTING PRINTOUT PERIOD = 8000

VARIABLES FOR GRAPHIC PRINTOUTS = U, V, H, B, US, S, M, K, E, F, C, L

MASS-BALANCE = YES

INFORMATION ABOUT K-EPSILON MODEL = YES

GRAPHIC PRINTOUT PERIOD = 20000

COMPUTATION CONTINUED = YES

INITIAL TIME SET TO ZERO = YES

```
/-----  
/ NUMERICAL PARAMETERS  
/-----
```

NUMBER OF TIME STEPS = 400000

PARALLEL PROCESSORS = 6

/STOP IF A STEADY STATE IS REACHED = YES

STOP CRITERIA = 0.000001;0.000001;0.000001;0.000001

TIME STEP = 0.001

## B.2.2. Archivo de control del Sisyphé (sisCas.txt).

```

/ SISYPHE - MF ALTO PIURA /
/-----/

GEOMETRY FILE = 'GEO.slf'

BOUNDARY CONDITIONS FILE = 'sisCli.cli'

RESULTS FILE = 'resSedQ0.26'

/-----
/ GENERAL INFORMATIONS - OUTPUTS
/-----

VARIABLES FOR GRAPHIC PRINTOUTS = 'B,M,QSBL'

TIME STEP = 0.001

NUMBER OF TIME STEPS = 400000

/-----
/ BOUNDARY CONDITIONS
/-----

MASS-BALANCE = YES

/-----
/ PHYSICAL PARAMETERS
/-----

NUMBER OF SIZE-CLASSES OF BED MATERIAL = 1

SEDIMENT DENSITY = 2650

NON COHESIVE BED POROSITY = 0.4

SEDIMENT DIAMETERS = 0.045

INITIAL FRACTION FOR PARTICULAR SIZE CLASS = 1

COHESIVE SEDIMENTS = NO

/SETTLING VELOCITIES = 0.0173;0.0064;0.0024

```

SHIELDS PARAMETERS = 0.045

/-----

/ MODELING PARAMETERS

/-----

BED-LOAD TRANSPORT FORMULA = 1

BED LOAD = YES

FORMULA FOR SLOPE EFFECT = 1

FORMULA FOR DEVIATION = 1

SLOPE EFFECT = YES

FRICITION ANGLE OF THE SEDIMENT = 40

BETA = 1.3

PARAMETER FOR DEVIATION = 0.85

SEDIMENT SLIDE = YES

SECONDARY CURRENTS = YES

SECONDARY CURRENTS ALPHA COEFFICIENT = 1

CORRECTION ON CONVECTION VELOCITY = NO

MASS CONCENTRATION = NO

/----- SUSPENDED SEDIMENT -----

SUSPENSION = NO

TYPE OF ADVECTION = 1

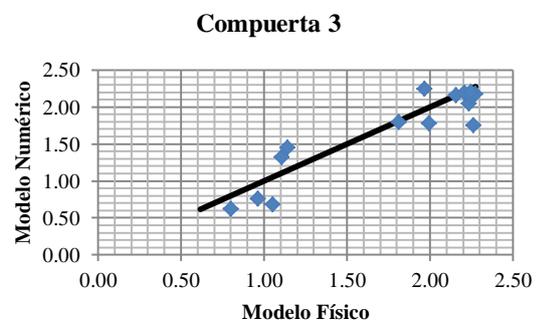
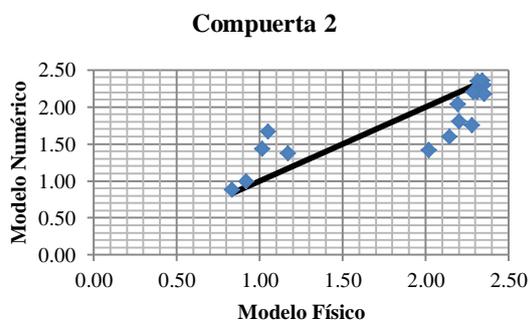
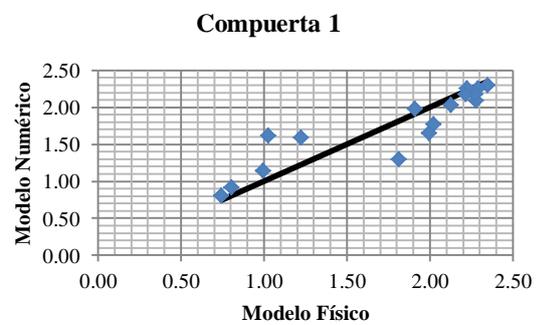
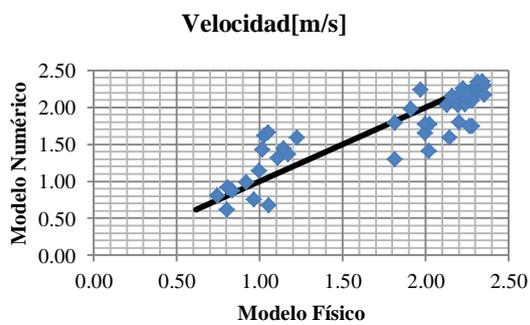
&ETA

&FIN

## B.2.3. Resultados de velocidades.

Q [m <sup>3</sup> /s]	Compuerta 1			Compuerta 2			Compuerta 3		
	Sección	Punto	Velocidad [m/s]	Sección	Punto	Velocidad [m/s]	Sección	Punto	Velocidad [m/s]
0,26	A	A3	0,81	A	A2	0,87	A	A1	0,62
	B	B3	0,92	B	B2	0,99	B	B1	0,75
	C	C7	1,14	C	C4	1,43	C	C1	0,68
		C8	1,61		C5	1,66		C2	1,31
		C9	1,59		C6	1,37		C3	1,45
	D	D7	1,98	D	D4	2,03	D	D1	1,79
		D8	1,77		D5	1,80		D2	1,78
		D9	1,30		D6	1,41		D3	2,24
	E	E7	2,30	E	E4	2,34	E	E1	2,15
		E8	2,03		E5	1,75		E2	2,04
		E9	1,65		E6	1,59		E3	2,17
	F	F7	2,26	F	F4	2,29	F	F1	2,19
		F8	2,09		F5	2,20		F2	2,14
		F9	2,25		F6	2,20		F3	1,74
	G	G3	2,18	G	G2	2,17	G	G1	2,17
	H	H3	2,18	H	H2	2,35	H	H1	2,20

## B.2.4. Gráficos.



B.2.5. Validación de velocidad.

Δ Velocidad [m/s]																		
Q [m <sup>3</sup> /s]	(x-y) <sup>2</sup>			(x)*(y)			x <sup>2</sup>			y <sup>2</sup>			x-y			(x+y)/2		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
0,26	0,00	0,00	0,03	0,60	0,73	0,50	0,55	0,69	0,64	0,65	0,76	0,38	-0,06	-0,04	0,18	2,40	2,91	2,02
	0,01	0,01	0,05	0,74	0,91	0,72	0,65	0,84	0,93	0,84	0,98	0,56	-0,11	-0,07	0,21	2,97	3,64	2,94
	0,02	0,17	0,14	1,14	1,45	0,71	0,99	1,03	1,11	1,31	2,04	0,46	-0,15	-0,41	0,38	4,58	5,98	3,00
	0,35	0,37	0,04	1,66	1,74	1,45	1,05	1,10	1,23	2,61	2,75	1,73	-0,59	-0,61	-0,21	6,97	7,33	5,86
	0,13	0,04	0,09	1,95	1,60	1,66	1,50	1,37	1,31	2,54	1,86	2,10	-0,37	-0,20	-0,30	7,94	6,43	6,72
	0,01	0,03	0,00	3,79	4,46	3,25	3,65	4,82	3,29	3,93	4,13	3,20	-0,07	0,16	0,02	15,15	17,88	12,99
	0,06	0,16	0,05	3,58	3,96	3,55	4,10	4,84	3,99	3,13	3,23	3,16	0,25	0,40	0,22	14,39	15,99	14,24
	0,27	0,37	0,07	2,35	2,85	4,41	3,29	4,08	3,87	1,68	1,99	5,02	0,52	0,61	-0,27	9,68	11,75	17,71
	0,00	0,00	0,00	5,40	5,42	4,64	5,52	5,36	4,67	5,28	5,49	4,62	0,05	-0,03	0,01	21,61	21,69	18,58
	0,01	0,28	0,04	4,32	4,00	4,56	4,52	5,20	5,00	4,13	3,07	4,15	0,09	0,53	0,20	17,29	16,26	18,26
	0,12	0,31	0,01	3,30	3,41	4,88	3,99	4,60	5,07	2,73	2,53	4,69	0,34	0,55	0,09	13,31	13,95	19,52
	0,00	0,00	0,00	5,17	5,38	4,83	5,25	5,52	4,89	5,10	5,24	4,78	0,03	0,06	0,03	20,70	21,53	19,34
	0,04	0,01	0,01	4,76	5,07	4,80	5,20	5,34	5,05	4,36	4,83	4,56	0,19	0,11	0,11	19,10	20,31	19,21
	0,00	0,01	0,27	5,02	5,03	3,95	4,96	5,23	5,12	5,07	4,84	3,04	-0,03	0,09	0,52	20,07	20,14	16,06
	0,01	0,04	0,01	4,96	5,10	4,94	5,18	5,54	5,18	4,74	4,69	4,72	0,10	0,19	0,10	19,84	20,44	19,78
	0,00	0,00	0,00	4,83	5,51	4,94	4,92	5,49	5,05	4,74	5,52	4,83	0,04	-0,01	0,05	19,32	22,03	19,76
0,08			0,08			0,88			0,87			0,06			0,07			
DCM			DCM			Coef. Pearson			coef. Concor.LIN			Promedio (x-y)			Varianza			
OK=0//BAD=1			OK=0//BAD=1			OK=1//BAD=0			OK=1//BAD=0			BLAND-ALTMAN METHOD						

B.3. Caudal 0,33 m<sup>3</sup>/s.

B.3.1. Archivo de control (cas.txt).

/ EQUATIONS

/-----

FRICITION COEFFICIENT =0.0175

LAW OF BOTTOM FRICTION =4

//TURBULENCE MODEL FOR SOLID BOUNDARIES = 2

TURBULENCE MODEL =3

/-----

/ COUPLING WITH SISYPHE

/-----

COUPLING WITH = 'SISYPHE'

SISYPHE STEERING FILE = 'sisCas.txt'

COUPLING PERIOD FOR SISYPHE = 200

/-----

/ EQUATIONS, BOUNDARY CONDITIONS

/-----

VELOCITY PROFILES = 1;1

PRESCRIBED FLOWRATES = 0.0;0.33

PRESCRIBED ELEVATIONS = 76.69;0.0

OPTION FOR LIQUID BOUNDARIES = 1;1

/-----

/ EQUATIONS, INITIAL CONDITIONS

/-----

/INITIAL DEPTH =0.5

/INITIAL CONDITIONS ='CONSTANT DEPTH'

/-----  
/ INPUT-OUTPUT, FILES  
/-----

STEERING FILE = 'cas.txt'

BOUNDARY CONDITIONS FILE = 'cli.cli'

GEOMETRY FILE = 'GEO.slf'

PREVIOUS COMPUTATION FILE = 'q0.33'

RESULTS FILE = 'res'

/-----  
/ INPUT-OUTPUT, GRAPHICS AND LISTING  
/-----

LISTING PRINTOUT PERIOD = 8000

VARIABLES FOR GRAPHIC PRINTOUTS = U, V, H, B, US, S, M, K, E, F, C, L

MASS-BALANCE = YES

INFORMATION ABOUT K-EPSILON MODEL = YES

GRAPHIC PRINTOUT PERIOD = 20000

COMPUTATION CONTINUED = YES

INITIAL TIME SET TO ZERO = YES

/-----  
/ NUMERICAL PARAMETERS  
/-----

NUMBER OF TIME STEPS = 400000

PARALLEL PROCESSORS = 6

/STOP IF A STEADY STATE IS REACHED = YES

STOP CRITERIA = 0.000001;0.000001;0.000001;0.000001

TIME STEP = 0.001

## B.3.2. Archivo de control del Sisyphe (siscas.txt).

```

/ SISYPHE - MF ALTO PIURA /
/-----/

GEOMETRY FILE = 'GEO.slf'

BOUNDARY CONDITIONS FILE = 'sisCli.cli'

RESULTS FILE = 'resSedQ0.33'

/-----
/ GENERAL INFORMATIONS - OUTPUTS
/-----

VARIABLES FOR GRAPHIC PRINTOUTS = 'B,M,QSBL'

TIME STEP = 0.001

NUMBER OF TIME STEPS = 400000

/-----
/ BOUNDARY CONDITIONS
/-----

MASS-BALANCE = YES

/-----
/ PHYSICAL PARAMETERS
/-----

NUMBER OF SIZE-CLASSES OF BED MATERIAL = 1

SEDIMENT DENSITY = 2650

NON COHESIVE BED POROSITY = 0.4

SEDIMENT DIAMETERS = 0.045

INITIAL FRACTION FOR PARTICULAR SIZE CLASS = 1

COHESIVE SEDIMENTS = NO

/SETTLING VELOCITIES = 0.0173;0.0064;0.0024

```

SHIELDS PARAMETERS = 0.045

/-----

/ MODELING PARAMETERS

/-----

BED-LOAD TRANSPORT FORMULA = 1

BED LOAD = YES

FORMULA FOR SLOPE EFFECT = 1

FORMULA FOR DEVIATION = 1

SLOPE EFFECT = YES

FRICION ANGLE OF THE SEDIMENT = 40

BETA = 1.3

PARAMETER FOR DEVIATION = 0.85

SEDIMENT SLIDE = YES

SECONDARY CURRENTS = YES

SECONDARY CURRENTS ALPHA COEFFICIENT = 1

CORRECTION ON CONVECTION VELOCITY = NO

MASS CONCENTRATION = NO

/----- SUSPENDED SEDIMENT -----

SUSPENSION = NO

TYPE OF ADVECTION = 1

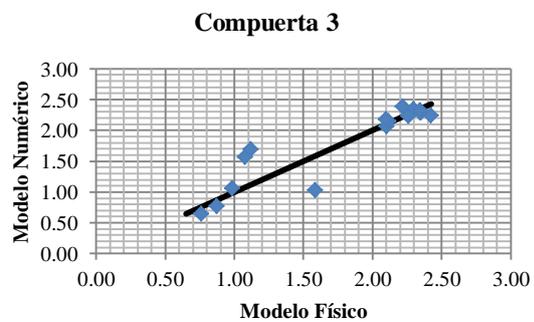
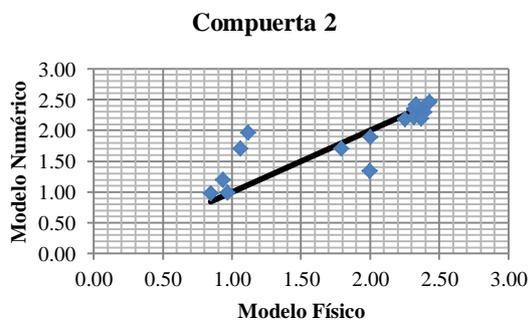
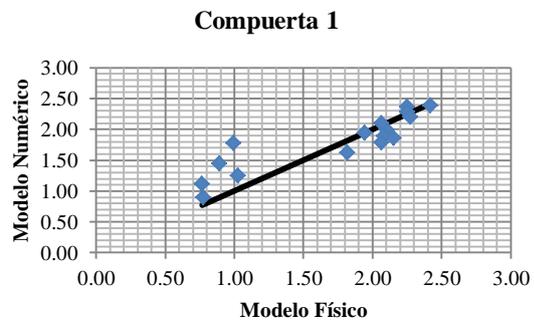
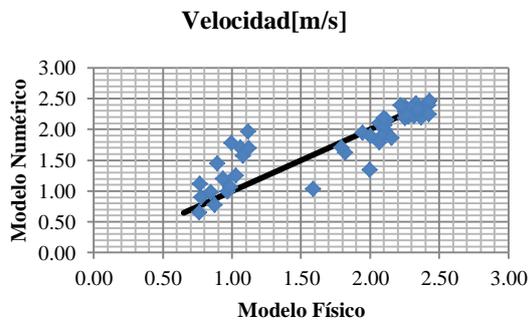
&ETA

&FIN

B.3.3. Resultados de velocidades.

Q [m <sup>3</sup> /s]	Compuerta 1			Compuerta 2			Compuerta 3		
	Sección	Punto	Velocidad [m/s]	Sección	Punto	Velocidad [m/s]	Sección	Punto	Velocidad [m/s]
0,33	A	A3	0,90	A	A2	0,98	A	A1	0,65
	B	B3	1,12	B	B2	1,20	B	B1	0,78
	C	C7	1,45	C	C4	0,99	C	C1	1,06
		C8	1,77		C5	1,70		C2	1,57
		C9	1,24		C6	1,96		C3	1,69
	D	D7	1,94	D	D4	1,89	D	D1	1,03
		D8	2,00		D5	1,34		D2	2,07
		D9	1,62		D6	1,70		D3	2,15
	E	E7	2,39	E	E4	2,29	E	E1	2,18
		E8	2,37		E5	2,35		E2	2,30
		E9	2,09		E6	2,18		E3	2,34
	F	F7	2,29	F	F4	2,25	F	F1	2,39
		F8	2,20		F5	2,42		F2	2,30
		F9	1,89		F6	2,21		F3	2,23
	G	G3	1,86	G	G2	2,19	G	G1	2,32
	H	H3	1,79	H	H2	2,46	H	H1	2,24

B.3.4. Gráficos.



B.3.5. Validación de velocidad.

Δ Velocidad [m/s]																		
Q [m <sup>3</sup> /s]	(x-y) <sup>2</sup>			(x)*(y)			x <sup>2</sup>			y <sup>2</sup>			x-y			(x+y)/2		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
0,33	0,01	0,02	0,01	0,70	0,83	0,50	0,61	0,72	0,58	0,81	0,96	0,42	-0,12	-0,13	0,11	2,82	3,34	2,00
	0,12	0,07	0,01	0,86	1,12	0,68	0,59	0,87	0,76	1,25	1,44	0,60	-0,35	-0,26	0,10	3,55	4,55	2,71
	0,30	0,00	0,01	1,29	0,96	1,05	0,80	0,94	0,97	2,09	0,98	1,13	-0,55	-0,02	-0,08	5,48	3,84	4,20
	0,60	0,41	0,24	1,77	1,81	1,69	0,99	1,12	1,16	3,14	2,90	2,47	-0,77	-0,64	-0,49	7,67	7,64	7,01
	0,05	0,71	0,32	1,28	2,19	1,90	1,05	1,25	1,26	1,55	3,84	2,85	-0,22	-0,84	-0,57	5,16	9,48	7,90
	0,00	0,01	0,31	3,77	3,78	1,63	3,78	4,01	2,51	3,75	3,57	1,06	0,01	0,11	0,56	15,08	15,14	6,83
	0,01	0,43	0,00	4,20	2,68	4,36	4,43	3,99	4,43	3,99	1,81	4,29	0,11	0,65	0,03	16,83	11,16	17,43
	0,04	0,01	0,00	2,95	3,05	4,54	3,30	3,21	4,47	2,63	2,90	4,60	0,20	0,09	-0,03	11,84	12,20	18,16
	0,00	0,01	0,01	5,77	5,48	4,57	5,84	5,71	4,40	5,70	5,25	4,75	0,03	0,10	-0,08	23,08	21,92	18,29
	0,01	0,00	0,00	5,33	5,43	5,38	5,07	5,36	5,49	5,60	5,50	5,27	-0,11	-0,03	0,05	21,33	21,71	21,53
	0,00	0,01	0,00	4,32	4,90	5,38	4,26	5,07	5,28	4,38	4,74	5,48	-0,03	0,08	-0,04	17,27	19,61	21,53
	0,00	0,01	0,03	5,15	5,32	5,30	5,07	5,60	4,92	5,23	5,06	5,70	-0,03	0,12	-0,17	20,59	21,29	21,22
	0,01	0,01	0,00	5,01	5,65	5,41	5,18	5,44	5,54	4,84	5,86	5,28	0,08	-0,09	0,06	20,04	22,60	21,64
	0,04	0,01	0,00	3,94	5,11	5,04	4,35	5,36	5,12	3,57	4,88	4,97	0,20	0,11	0,03	15,81	20,46	20,18
	0,09	0,03	0,00	4,00	5,17	5,44	4,65	5,60	5,49	3,44	4,78	5,38	0,30	0,18	0,02	16,09	20,72	21,75
	0,08	0,00	0,03	3,69	5,97	5,44	4,26	5,90	5,88	3,20	6,04	5,03	0,27	-0,03	0,18	14,85	23,87	21,77
0,09			0,09			0,88			0,86			0,04			0,09			
DCM			DCM			Coef. Pearson			coef. Concor.LIN			Promedio (x-y)			Varianza			
OK=0//BAD=1			OK=0//BAD=1			OK=1//BAD=0			OK=1//BAD=0			BLAND-ALTMAN METHOD						

## **ANEXO C**

**“Script” del Matlab**

```

%THIS SCRIPT READS A LAND XML FILE AND OUTPUTS THE POINTS
AND ELEMENTS OF A
% CIVIL 3D TIN SURFACE
function civil3DTINToBLueKenue()
filename='Modelo con Estructura 2.xml';
outFile = fopen('Superficie.t3s','w');
% PARSEXML Convert XML file to a MATLAB structure.
try
    xdoc = xmlread(filename);
catch
    error('Failed to read XML file %s.',filename);
end
%READS THE TREE UNTILS IT REACHES THE POINTS AND ELEMENTS
landXML=xdoc.getDocumentElement;
entries=landXML.getChildNodes;
surfaces=entries.item(9).getChildNodes;
surface=surfaces.item(1).getChildNodes;
definition=surface.item(3).getChildNodes;
points=definition.item(1).getChildNodes;
faces=definition.item(3).getChildNodes;
%READS THE POINTS
i=0;
nPoints=1;
%pointArray=zeros;
while ~isempty(points.item(i))
    if strcmpi(points.item(i).getNodeName, 'P')
        temp=char(points.item(i).getTextContent);
        tempNum=str2num(temp);
        temp=char(points.item(i).getAttribute('id'));
        cadPNum=str2num(temp);
        pointArray(nPoints,1)=cadPNum(1,1);
        pointArray(nPoints,2)=tempNum(1,1)-311000; %this was temporary because
of the ICA translation change on the future
        pointArray(nPoints,3)=tempNum(1,2)-370000; %this was temporary because
of the ICA translation change on the future
        pointArray(nPoints,4)=tempNum(1,3);
        nPoints=nPoints+1;
        %fprintf(outFile,'%s\n',temp);
    end
    i=i+1;
end
%READS THE ELEMENTS
i=0;
nElem=1;

```

```

while ~isempty(faces.item(i))
    if strcmpi(faces.item(i).getNodeName, 'F')
        temp=char(faces.item(i).getTextContent);
        tempNum=str2num(temp);
        node1=find(pointArray(:,1)==tempNum(1,1));
        elemArray(nElem,1)=node1;
        node2=find(pointArray(:,1)==tempNum(1,2));
        elemArray(nElem,2)=node2;
        node3=find(pointArray(:,1)==tempNum(1,3));
        elemArray(nElem,3)=node3;

        %     elemArray(nElem,1)=tempNum(1,1);
        %     elemArray(nElem,2)=tempNum(1,2);
        %     elemArray(nElem,3)=tempNum(1,3);
        nElem=nElem+1;
        % fprintf(outFile,'%s\n',temp);
    end
    i=i+1;
end
%OUTPUT THE HEADER
fprintf(outFile,'#####\n');
fprintf(outFile,':FileType t3s ASCII EnSim 1.0\n');
fprintf(outFile,'# Canadian Hydraulics Centre/National Research Council (c) 1998-
2012\n');
fprintf(outFile,'# DataType          2D T3 Scalar Mesh\n');
fprintf(outFile,'#\n');
fprintf(outFile,':Application      BlueKenue\n');
fprintf(outFile,':Version          3.3.4\n');
fprintf(outFile,':WrittenBy        christian\n');
fprintf(outFile,':CreationDate     --\n');
fprintf(outFile,'#\n');
fprintf(outFile,'#-----\n');
fprintf(outFile,'#\n');
fprintf(outFile,':NodeCount %d\n',nPoints-1);
fprintf(outFile,':ElementCount %d\n',nElem-1);
fprintf(outFile,':ElementType T3\n');
fprintf(outFile,'#\n');
fprintf(outFile,':EndHeader\n');
%OUTPUT THE POINTS
for j=1:nPoints-1
    fprintf(outFile,'%f %f %f\n',pointArray(j,3),pointArray(j,2),pointArray(j,4));
end
%OUTPUT THE ELEMENTS

```

```
for j=1:nElem-1
    fprintf(outFile,'%d %d %d\n',elemArray(j,1),elemArray(j,2),elemArray(j,3));
end
fclose(outFile);
```

## **ANEXO D**

### **Aceptación de Resumen y Artículo**

D.1. Correo electrónico de aceptación del resumen “Análisis numérico de la erosión de enrocados como protección en aliviaderos de compuertas”.

4/4/2016 LADHI-2016-PERU - OpenConf Revisión por pares & Sistema de Administración de Conferencias



Supported by  
Spain Water  
and IWHH, China

XXVII Congreso Latinoamericano de  
**HIDRÁULICA**

**Perú 2016**  
Lima, 26 al 30 setiembre 2016



---

OpenConf Revisión por pares & Sistema de Administración de Conferencias

[OpenConf Inicio](#) [Email del Coordinador](#)

---

**Revisar estado**

**ID del trabajo:** 367

**Título:** Análisis numérico de la erosión de enrocados como protección en aliviaderos de compuertas

**Estado:** Accept

---

Patrocinado por OpenConf®  
Derechos de autor ©2002-2015 Zakon Group LLC

D.2. Correo electrónico de entrega del resumen “Análisis numérico de la erosión de enrocados como protección en aliviaderos de compuertas”.

-----Mensaje original-----

De: LADHI-2016-PERU [mailto:[resumenes@ladhi2016.org](mailto:resumenes@ladhi2016.org)]  
 Enviado el: lunes, 14 de diciembre de 2015 3:45 p. m.  
 Para: Leo Guerrero Asmad <[leo.guerrero@udep.pe](mailto:leo.guerrero@udep.pe)>; [resumenes@ladhi2016.org](mailto:resumenes@ladhi2016.org)  
 Asunto: [LADHI-2016-PERU] ID del trabajo 367

Gracias por el envío de su trabajo a LADHI-2016-PERU. Abajo se encuentra una copia de la información enviada para su registro.

ID del trabajo: 367

Título: Análisis numérico de la erosión de enrocados como protección en aliviaderos de compuertas

Autor 1:  
 Nombre: Manuel  
 Apellido: Chinga-Rosillo  
 Organización: Universidad de Piura  
 País: Perú  
 Email: [manuel.chinga24@gmail.com](mailto:manuel.chinga24@gmail.com)

Autor 2:  
 Nombre: Leo  
 Apellido: Guerrero  
 Organización: Universidad de Piura  
 País: Perú  
 Email: [leo.guerrero@udep.pe](mailto:leo.guerrero@udep.pe)

Autor 3:  
 Nombre: Alejandro  
 Apellido: Mendoza  
 Organización: Universidad Autónoma Metropolitana  
 País: México  
 Email: [a.mendoza@correo.ler.uam.mx](mailto:a.mendoza@correo.ler.uam.mx)

Autor 4:  
 Nombre: Jorge D.  
 Apellido: Reyes  
 Organización: Universidad de Piura  
 País: Perú  
 Email: [jorge.reyes@udep.pe](mailto:jorge.reyes@udep.pe)

- D.3. Correo electrónico de aceptación de artículo completo “Análisis Numérico del Comportamiento de Enrocados como Protección en Aliviaderos de Compuertas”.

 <p>ASOCIACIÓN PERUANA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL</p>	 <p>IAHR AIRH</p>	<p>XXVII Congreso Latinoamericano de <b>HIDRÁULICA</b></p>  <p>Perú 2016</p>
<p><b>ACEPTACION DE PRESENTACION ORAL</b></p>		
<p>Estimado autor (a):</p> <p>Leo Guerrero</p> <p>De nuestra especial consideración,</p> <p>En representación de la Comisión organizadora del XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica con sede en la ciudad de Lima del 26 al 30 de Setiembre del 2016, es nuestro placer informarle que su artículo:</p> <p><b>ANÁLISIS NUMÉRICO del comportamiento de enrocados como protección en aliviaderos de compuertas</b></p> <p>Con ID de Registro 367,</p> <p>Ha sido aceptado para presentación ORAL. En algunas semanas estaremos remitiéndole los detalles y formato de las presentaciones ORALES. Agradecemos mucho su interés y participación.</p> <p>A fin de mantener la buena organización del evento, por favor, considerar los siguientes ítems:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Si Ud. prefiere una presentación como POSTER, háganos saber cuánto antes, no más del 15 de Junio.</li> <li>2) Por cierre de edición, es requerimiento que los autores (con presentaciones ORALES y POSTERS) se registren antes del 30 de Junio para ser incluidos en el libro de ponencias del Congreso. Se requiere que al menos un autor este registrado por cada presentación. <a href="http://www.stimulus.com.pe/events/hidraulica/">http://www.stimulus.com.pe/events/hidraulica/</a></li> <li>3) Un autor registrado podrá presentar máximo dos (02) artículos (como ORAL y/o POSTER)</li> </ol> <p>Si Ud. tiene preguntas y/o comentarios por favor dirigirse a: Registros: <a href="mailto:inscripciones@ladhi2016.org">inscripciones@ladhi2016.org</a> Generalidades: <a href="mailto:secretaria@ladhi2016.org">secretaria@ladhi2016.org</a></p> <p>Lo esperamos muy pronto en Lima, Perú y que tenga un excelente viaje</p> <p>Su Comité de Organización, LADHI 2016</p>		