

**UNIVERSIDAD PRIVADA ANTONOR ORREGO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

---

**“PROPUESTA DE MODELAMIENTO BIDIMENSIONAL PARA LA ESTIMACIÓN DEL TAMAÑO DE MALLA Y EL TIEMPO COMPUTACIONAL EN CANALES ANCHOS DE 100 METROS USANDO IBER 2.5.2. Y HEC-RAS 5.0.7.”**

---

**Línea de Investigación:**

Hidráulica

**Autor (es):**

Br. CASTRO MALCA, PAULO CÉSAR  
Br. GARCÍA ALVARADO, CARLA DEL PILAR

**Asesor:**

ING. GARCÍA RIVERA, JUAN PABLO  
**TRUJILLO – PERÚ**

**2021**

**Fecha de Sustentación**

**“PROPUESTA DE MODELAMIENTO BIDIMENSIONAL PARA LA ESTIMACIÓN  
DEL TAMAÑO DE MALLA Y EL TIEMPO COMPUTACIONAL EN CANALES  
ANCHOS DE 100 METROS USANDO IBER 2.5.2. Y HEC-RAS 5.0.7.”**

**AUTOR (ES):**

Br. CASTRO MALCA, PAULO CÉSAR

Br. GARCÍA ALVARADO, CARLA DEL PILAR

**APROBADO POR:**

---

ING. RICARDO NARVAEZ ARANDA  
PRESIDENTE  
CIP: 58776

---

ING. TITO BURGOS SARMIENTO  
SECRETARIO  
CIP: 82596

---

ING. VICTOR MORAN GERRERO  
VOCAL  
CIP: 50648

---

ING. JUAN PABLO GARCÍA RIVERA  
ASESOR  
CIP: 68614

## **DEDICATORIA**

### **A DIOS**

Por darme vida, salud y ser mi guía en el camino correcto para cumplir este anhelado sueño

### **A MIS PADRES**

César y María, por su inmenso amor, su paciencia y su comprensión a lo largo de todos estos años, y por sus enseñanzas que son la luz en mi camino ahora y siempre.

### **A MI ABUELA**

Liduvina, por estar presente en cada etapa de mi vida, y por sus sabios consejos que están y estarán presentes en cada día de mi vida.

### **A MIS HERMANAS**

Por su constante apoyo durante la realización de este trabajo, y por la motivación que me brindan para hacer realidad todas mis metas.

**Br. CASTRO MALCA, PAULO CÉSAR**

## **DEDICATORIA**

A Dios Todopoderoso, que me brindo sabiduría y constancia para culminar este paso tan importante en mi vida profesional. Por acompañarme y no soltarme hasta cumplir este anhelo.

A mis padres, Carlos y Maivi por criarme con valores y un inmenso amor, apoyarme desde el primer día que decidí estudiar esta hermosa carrera, por creer en mí y darme siempre esa seguridad para seguir adelante.

A mi hermana, Milagros porque con su ejemplo de valentía y grandeza, pude lograr las metas que una vez me propuse.

A mis tíos, por las enseñanzas y buenos consejos que me alentaban para seguir creciendo.

**Br. GARCÍA ALVARADO, CARLA DEL PILAR**

## **AGRADECIMIENTO**

A nuestros maestros de la universidad, quienes fueron nuestros guías y formadores de conocimientos y sabiduría en todo el camino de nuestra carrera profesional, además de la enseñanza de valores brindados como el respeto, la perseverancia y la honestidad.

Agradecemos en particular al Ing. Juan Pablo García Rivera, asesor del presente trabajo, porque nos brindó su apoyo total e incondicional en la realización de esta Tesis desde el inicio hasta su culminación.

**Br. CASTRO MALCA, PAULO CÉSAR**  
**Br. GARCÍA ALVARADO, CARLA DEL PILAR**

## RESUMEN

Esta investigación se basa en el análisis hidrodinámico de 20 escenarios de un canal ancho de 100 metros mediante la modelación numérica con la finalidad de estimar un tamaño de malla y un tiempo computacional adecuado para cada uno, además evaluar el comportamiento de los diferentes métodos de los modelos hidrodinámicos los cuales han sido previamente identificados como objetos de estudio. Los estudios hidrológicos y la modelación en diferentes dimensiones (1D y 2D), contribuyen a resultados más veraces y a una evaluación de hipótesis más real ante el comportamiento de un flujo.

La geometría para los escenarios del canal fue elaborada en el programa AutoCAD Civil 3D. Éstos se crearon asignando características de caudal, pendiente y rugosidad, según parámetros similares a los ríos que encontramos en la costa del Perú. Los cuales fueron el caudal: 500 m<sup>3</sup>/s, 1000 m<sup>3</sup>/s, 1500 m<sup>3</sup>/s, 2000 m<sup>3</sup>/s; la pendiente: 0.003m/m, 0.005m/m, 0.007m/m, 0.009m/m; y la rugosidad: 0.023, 0.030, 0.035.

Cuando nos referimos a un canal se puede trabajar con un esquema unidimensional, sin embargo, cuando se emplean características de un río, el esquema a utilizar es el bidimensional. Para esto, las ecuaciones empleadas para la ejecución y evaluación del modelo son las siguientes, la ecuación de la energía, las ecuaciones de Saint-Venant (2D) y la Onda Difusa, donde la primera es para el modelamiento unidimensional y los dos siguientes es para el modelamiento bidimensional. En esta investigación se ejecutó el modelo numérico aplicado para las simulaciones en Iber 2.5.2. (2D) y HEC-RAS 5.0.7 (1D y 2D).

Como resultado final, se obtienen datos de tamaño de malla y tiempo computacional para cada uno de los 20 escenarios en ambos softwares, así como el análisis de cada modelo hidrodinámico en estudio donde se contrasta ambas simulaciones, de esta manera se evalúan las posibles aplicaciones que tienen, que sustentan diferentes capacidades como método de mallado, condiciones de contorno e importación de datos.

## ABSTRACT

This research is based on the hydrodynamic analysis of 20 scenarios of a channel with a width of 100 meters through numerical modeling in order to estimate a mesh size and an adequate computational time for each one, and also evaluate the behavior of the different hydrodynamic model methods which have been previously identified as objects of study. Hydrological studies and modeling in different dimensions (1D and 2D) contribute to more truthful results and a more realistic hypothesis evaluation of the behavior of a flow.

The geometry for the channel scenes was developed in the AutoCAD Civil 3D program. These were created by assigning characteristics of flow, slope and roughness, according to parameters similar to the rivers that we find on the coast of Peru. Which were the flow: 500 m<sup>3</sup>/s, 1000 m<sup>3</sup>/s, 1500 m<sup>3</sup>/s, 2000 m<sup>3</sup>/s; the slope: 0.003m/m, 0.005m/m, 0.007m/m, 0.009m/m; and roughness: 0.023, 0.030, 0.035.

When we refer to a canal, it is possible to work with a one-dimensional scheme, however, when characteristics of a river are used, the scheme to use is the two-dimensional one. For this, the equations used for the execution and evaluation of the model are the following, the energy equation, the Saint-Venant equations (2D) and the Diffuse Wave, where the first one is for one-dimensional modeling and the next two are for two-dimensional modeling. In this research, the numerical model applied for the simulations in Iber 2.5.2 was executed. (2D) and HEC-RAS 5.0.7 (1D and 2D).

As a final result, mesh size and computational time data are obtained for each of the 20 scenarios in both software, as well as the analysis of each hydrodynamic model under study where both simulations are contrasted, in this way the possible applications that they have, which support different capabilities such as meshing method, boundary conditions and data import.

## **PRESENTACIÓN**

Señores miembros del jurado:

De conformidad y en cumplimiento de los requisitos estipulados en el reglamento de Grados y títulos de la Universidad Privada Antenor Orrego y el reglamento interno de la Escuela profesional de Ing. Civil, ponemos a vuestra disposición el presente trabajo de suficiencia profesional titulado PROPUESTA DE MODELAMIENTO BIDIMENSIONAL PARA LA ESTIMACIÓN DEL TAMAÑO DE MALLA Y EL TIEMPO COMPUTACIONAL EN CANALES ANCHOS DE 100 METROS USANDO IBER 2.5.2. Y HEC-RAS 5.0.7.

Para obtener el título profesional de ingeniero civil, así como algunas experiencias para el desarrollo de la ingeniería.

Consideramos señores miembros del jurado que con vuestras sugerencias y recomendaciones este trabajo pueda mejorarse y contribuir a la difusión de la investigación de nuestra Universidad.



## ÍNDICE

DEDICATORIA.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
RESUMEN .....	v
ABSTRACT .....	vi
PRESENTACIÓN .....	vii
ÍNDICE .....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xi
ÍNDICE DE TABLAS .....	xiv
ÍNDICE DE GRÁFICOS .....	xv
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Problema.....	1
1.1.1. Descripción del Problema.....	1
1.1.2. Enunciado del Problema.....	2
1.1.3. Formulación del Problema.....	2
1.2. Objetivos .....	2
1.2.1. Objetivo General.....	2
1.2.2. Objetivos Específicos .....	2
1.3. Justificación de Estudio.....	3
II. MARCO DE REFERENCIA .....	3
2.1. Antecedentes del estudio .....	3
2.1.1. A nivel Internacional .....	3
2.1.2. A nivel Nacional.....	6
2.2. Marco Teórico .....	9
2.2.1. Hidráulica Fluvial .....	9
2.2.1.1. Morfología de un río.....	9
2.2.1.2. Perfil longitudinal de un río.....	9
2.2.2. Hidráulica de canales .....	11
2.2.2.1. Elementos Geométricos de un canal .....	11
2.2.3. Secciones de los canales .....	16
2.2.3.1. Criterio tiempo.....	17
2.2.3.2. Criterio comportamiento en el espacio.....	17
2.2.4. Rugosidad .....	20

2.2.4.1. Selección del Coeficiente de Rugosidad de Manning .....	20
2.2.4.2. Tabla de Coeficiente de Rugosidad de Manning.....	20
2.2.4.3. Factores que Afectan el Coeficiente de Rugosidad de Manning	21
2.2.5. Modelación Hidráulica .....	22
2.2.5.1. Tipos de Modelación .....	22
2.2.5.2. Modelación Bidimensional .....	24
2.2.5.3. Softwares para modelación.....	25
2.2.5.4. Malla computacional .....	27
2.2.5.5. Tiempo computacional .....	28
2.2.5.6. Condiciones de Contorno.....	29
2.3. Marco Conceptual .....	30
2.4. Hipótesis .....	31
2.4.1. General.....	31
2.5. Variables .....	31
2.5.1. Variable .....	31
2.6. Operacionalización de Variable.....	32
III. METODOLOGIA EMPLEADA.....	33
3.1. Tipo y Nivel de Investigación.....	33
3.1.1. Tipo de Investigación.....	33
3.1.2. Nivel de Investigación.....	33
3.2. Población y Muestra de Estudio.....	33
3.2.1. Población.....	33
3.2.2. Muestra.....	33
3.3. Diseño de Investigación .....	34
3.4. Técnicas e instrumentos de Recolección de Datos.....	34
3.5. Procesamiento y Análisis de datos.....	34
3.5.1. Datos de la Geometría.....	34
3.5.2. Modelamiento Hidráulico Unidimensional con Hec-ras 5.0.7.....	35
3.5.3. Número de Courant .....	42
3.5.4. Modelamiento Hidráulico Bidimensional con Hec-ras 5.0.7 .....	44
3.5.5. Modelamiento Bidimensional en Iber.....	55
IV. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	63
4.1. Particularidades de cada modelo .....	63
4.1.1. Modelo unidimensional HEC-RAS.....	63
4.1.2. Modelamiento Bidimensional HEC-RAS.....	66

4.1.3. Modelamiento Bidimensional IBER.....	70
4.2. Resultados de los 3 Modelos .....	85
4.2.1. Modelo N° 1 .....	85
4.2.2. Modelo 2.....	86
4.2.3. Modelo 3.....	88
4.2.4. Modelo 4.....	90
4.2.5. Modelo 5.....	92
4.2.6. Modelo 6.....	94
4.2.7. Modelo 7.....	95
4.2.8. Modelo 8.....	97
4.2.9. Modelo 9.....	99
4.2.10. Modelo 10.....	100
4.2.11. Modelo 11.....	102
4.2.12. Modelo 12.....	103
4.2.13. Modelo 13.....	105
4.2.14. Modelo 14.....	107
4.2.15. Modelo 15.....	108
4.2.16. Modelo 16.....	110
4.2.17. Modelo 17.....	112
4.2.18. Modelo 18.....	113
4.2.19. Modelo 19.....	115
4.2.20. Modelo 20.....	117
4.3. Resumen.....	119
CONCLUSIONES.....	120
RECOMENDACIONES .....	124
BIBLIOGRAFÍA .....	126

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura N° 1:</b> Esquematación del perfil longitudinal y secciones transversales típicas de un río, a lo largo de su recorrido. ....	10
<b>Figura N° 2:</b> Diferentes tipos de flujos en canales abiertos .....	18
<b>Figura N° 3:</b> Malla computacional estructurada (celdas simétricas) .....	27
<b>Figura N° 4:</b> Malla computacional no estructurada (celdas irregulares) .....	28
<b>Figura N° 5:</b> Sección transversal del canal de 100m de ancho .....	34
<b>Figura N° 6:</b> Vista en 3D del canal de 100m de ancho y 1 km de longitud.....	35
<b>Figura N° 7:</b> Interfaz del Hec-ras 5.0.7 .....	36
<b>Figura N° 8:</b> Ventana de Geometría del canal de 1 km .....	36
<b>Figura N° 9:</b> Sección Transversal del canal .....	37
<b>Figura N° 10:</b> Modelamiento respecto a la pendiente $s_1=0.003$ .....	37
<b>Figura N° 11:</b> Geometría de canal por secciones.....	38
<b>Figura N° 12:</b> Parámetros de la sección transversal de la progresiva +0.000.00	39
<b>Figura N° 13:</b> Asignación de la rugosidad .....	39
<b>Figura N° 14:</b> Datos del flujo.....	40
<b>Figura N° 15:</b> Condiciones de contorno.....	40
<b>Figura N° 16:</b> Tolerancias para los modelos unidimensionales .....	41
<b>Figura N° 17:</b> Elección del tipo del flujo .....	42
<b>Figura N° 18:</b> Creación de la superficie del canal.....	45
<b>Figura N° 19 :</b> Exportación de la superficie .....	45
<b>Figura N° 20:</b> Creación de elementos del canal .....	46
<b>Figura N° 21:</b> Creación de elementos del canal .....	46
<b>Figura N° 22:</b> Convertir elementos en shapefile .....	47
<b>Figura N° 23:</b> Convertir elementos en shapefile .....	47
<b>Figura N° 24:</b> Interfaz del software Hec-ras 5.0.7.....	48
<b>Figura N° 25:</b> Interfaz del Ras Mapper .....	48
<b>Figura N° 26:</b> Abrir el archivo “.tif” .....	49
<b>Figura N° 27:</b> Opción Terrain.....	49
<b>Figura N° 28:</b> Herramienta “Add Existing Layer” .....	50
<b>Figura N° 29:</b> Opción crear y copiar .....	50
<b>Figura N° 30:</b> Opción Paste features from clipboard .....	51
<b>Figura N° 31:</b> Edición de la geometría.....	51
<b>Figura N° 32:</b> Opción Unsteady Flow data .....	52
<b>Figura N° 33:</b> Opción Boundary conditions .....	52
<b>Figura N° 34:</b> Corrida del modelo .....	54
<b>Figura N° 35:</b> Computar el modelo .....	54
<b>Figura N° 36:</b> Creación de la superficie del canal.....	56
<b>Figura N° 37:</b> Importar el archivo DXF .....	56
<b>Figura N° 38:</b> Colapsar el modelo .....	57
<b>Figura N° 39:</b> Superficie creada del canal .....	57
<b>Figura N° 40:</b> Vista o perspectiva del canal de 1km .....	58
<b>Figura N° 41:</b> Asignación de la rugosidad .....	58
<b>Figura N° 42:</b> Asignación de las condiciones de contorno .....	59
<b>Figura N° 43:</b> Condiciones de contorno aguas arriba y aguas abajo.....	59
<b>Figura N° 44:</b> Asignar el tiempo de simulación.....	60

<b>Figura N° 45:</b> Seleccionamos la malla estructurada y el tamaño de malla de 10 m debido a que obtuvimos resultados con mayor precisión.....	61
<b>Figura N° 46:</b> Iniciamos el cálculo .....	62
<b>Figura N° 47:</b> Post proceso .....	62
<b>Figura N° 48:</b> Canal elaborado con un DEM con poca resolución .....	63
<b>Figura N° 49:</b> Canal elaborado con las herramientas de dibujo de Hec Ras.....	64
<b>Figura N° 50:</b> Tirante del flujo = 3.84 m, Altura de diques = 4.00m .....	64
<b>Figura N° 51:</b> Tirante del flujo = 3.84 m, Altura de diques = 5.50 m .....	65
<b>Figura N° 52:</b> Tolerancias de Calculo por defecto.....	65
<b>Figura N° 53:</b> Tolerancias de cálculo modificadas.....	66
<b>Figura N° 54:</b> Imagen del perfil del terreno en Ras Mapper .....	67
<b>Figura N° 55:</b> Imagen del perfil del terreno a una escala mayor.....	67
<b>Figura N° 56:</b> Gráfico de resultados obtenidos a partir del ráster con un intervalo en el eje Y de 1.5-1.6 .....	68
<b>Figura N° 57:</b> Gráficos de resultados obtenidos a partir del ráster con un intervalo en el eje Y de 0 a 5 .....	68
<b>Figura N° 58:</b> Imagen de malla generada.....	69
<b>Figura N° 59:</b> Imagen de malla corregida con el editor de Geometric Data en Hec Ras.....	69
<b>Figura N° 60:</b> Condiciones de contorno Subcrítico – Supercrítico.....	70
<b>Figura N° 61:</b> Condiciones de contorno Subcrítico – Subcrítico (Vertedero +0.19) .....	71
<b>Figura N° 62:</b> Condiciones de contorno Subcrítico – Supercrítico.....	72
<b>Figura N° 63:</b> Condiciones de contorno Supercrítico (velocidad +4.92 m/s) – Supercrítico .....	72
<b>Figura N° 64:</b> Comparación de velocidad entre el modelo de Hec-ras 1D e Iber 73	
<b>Figura N° 65:</b> Comparación entre malla estructurada y no estructurada.....	74
<b>Figura N° 66:</b> Tamaño de malla y tiempo computacional .....	75
<b>Figura N° 67:</b> Tamaño de malla y tiempo computacional .....	75
<b>Figura N° 68:</b> Tamaño de malla y tiempo computacional .....	76
<b>Figura N° 69:</b> Tamaño de malla y tiempo computacional .....	76
<b>Figura N° 70:</b> Tamaño de malla y tiempo computacional .....	77
<b>Figura N° 71:</b> Tamaño de malla y tiempo computacional .....	77
<b>Figura N° 72:</b> Tamaño de malla y tiempo computacional .....	78
<b>Figura N° 73:</b> Tamaño de malla y tiempo computacional .....	78
<b>Figura N° 74:</b> Tamaño de malla y tiempo computacional .....	79
<b>Figura N° 75:</b> Tamaño de malla y tiempo computacional .....	79
<b>Figura N° 76:</b> Tamaño de malla y tiempo computacional .....	80
<b>Figura N° 77:</b> Tamaño de malla y tiempo computacional .....	80
<b>Figura N° 78:</b> Tamaño de malla y tiempo computacional .....	81
<b>Figura N° 79:</b> Tamaño de malla y tiempo computacional .....	81
<b>Figura N° 80:</b> Tamaño de malla y tiempo computacional .....	82
<b>Figura N° 81:</b> Tamaño de malla y tiempo computacional .....	82
<b>Figura N° 82:</b> Tamaño de malla y tiempo computacional .....	83
<b>Figura N° 83:</b> Tamaño de malla y tiempo computacional .....	83
<b>Figura N° 84:</b> Tamaño de malla y tiempo computacional .....	84
<b>Figura N° 85:</b> Tamaño de malla y tiempo computacional .....	84

<b>Figura N° 86:</b> Cuadro de resultados del modelo unidimensional UNI_3X1000XQ1 (n=0.023).....	127
<b>Figura N° 87:</b> Perfil de flujo de modelo unidimensional UNI_3X1000XQ1 (n=0.023), que presenta un flujo de régimen subcrítico. ....	127
<b>Figura N° 88:</b> Perfil de flujo del modelo unidimensional UNI_5X1000_Q1 (n=0.023), que presenta a un flujo de régimen mixto. ....	128
<b>Figura N° 89:</b> Perfil de flujo del modelo unidimensional UNI_7X1000_Q3 (n=0.035), que presenta a un flujo de régimen subcrítico. ....	128
<b>Figura N° 90:</b> Perfil de flujo del modelo unidimensional UNI_9X1000_Q4 (n=0.030), que presenta a un flujo de régimen supercrítico .....	129
<b>Figura N° 91:</b> Perfil de flujo del modelo bidimensional 3X1000_Q2 (n=0.030) en el programa HEC RAS 5.0.7, que presenta a un flujo de régimen subcrítico.....	129
<b>Figura N° 92:</b> Perfil de flujo del modelo bidimensional 5X1000_Q3 (n=0.035) en el programa HEC RAS 5.0.7, que presenta a un flujo de régimen subcrítico.....	130
<b>Figura N° 93:</b> Perfil de flujo del modelo bidimensional 7X1000_Q2 (n=0.030) en el programa HEC RAS 5.0.7, que presenta a un flujo de régimen subcrítico.....	130
<b>Figura N° 94:</b> Perfil de flujo del modelo bidimensional 3X1000_Q3 (n=0.023) en el programa IBER 2.5.2., que presenta a un flujo de régimen subcrítico. ....	131
<b>Figura N° 95:</b> Perfil de flujo del modelo bidimensional 5X1000_Q4 (n=0.030) en el programa IBER 2.5.2., que presenta a un flujo de régimen subcrítico. ....	131

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla N° 1:</b> Coeficiente de rugosidad que depende del lecho natural del canal..	11
<b>Tabla N° 2:</b> Borde en función del caudal .....	14
<b>Tabla N° 3:</b> Borde Libre en función del ancho de solera.....	14
<b>Tabla N° 4:</b> Taludes apropiados para distintos tipos de material .....	15
<b>Tabla N° 5:</b> Secciones de canales.....	16
<b>Tabla N° 6:</b> Tabla de Coeficiente de Rugosidad de Manning .....	20
<b>Tabla N° 7:</b> Criterio de Cowan para determinar la influencia de diversos factores sobre el coeficiente n .....	22
<b>Tabla N° 8:</b> Datos Iniciales .....	35
<b>Tabla N° 9:</b> Escenario: Caudal 1500 m <sup>3</sup> /s, S = 0.005 m/m, n = 0.023.....	43
<b>Tabla N° 10:</b> Datos Iniciales .....	44
<b>Tabla N° 11:</b> Datos Iniciales .....	55
<b>Tabla N° 12:</b> Altura de vertedero usados para los modelos en régimen subcrítico .....	71
<b>Tabla N° 13:</b> Tabla de la velocidad usada para los modelos en régimen supercrítico.....	73
<b>Tabla N° 14:</b> Cuadro resumen .....	119

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico N° 1:</b> Resultado del Calado .....	85
<b>Gráfico N° 2:</b> Resultado del Calado .....	87
<b>Gráfico N° 3:</b> Resultado del Calado .....	89
<b>Gráfico N° 4:</b> Resultado del Calado .....	91
<b>Gráfico N° 5:</b> Resultado del Calado .....	93
<b>Gráfico N° 6:</b> Resultado del Calado .....	94
<b>Gráfico N° 7:</b> Resultado del Calado .....	96
<b>Gráfico N° 8:</b> Resultado del Calado .....	97
<b>Gráfico N° 9:</b> Resultado del Calado .....	99
<b>Gráfico N° 10:</b> Resultado del Calado .....	101
<b>Gráfico N° 11:</b> Resultado del Calado .....	102
<b>Gráfico N° 12:</b> Resultado del Calado .....	104
<b>Gráfico N° 13:</b> Resultado del Calado .....	105
<b>Gráfico N° 14:</b> Resultado del Calado .....	107
<b>Gráfico N° 15:</b> Resultado del Calado .....	109
<b>Gráfico N° 16:</b> Resultado del Calado .....	110
<b>Gráfico N° 17:</b> Resultado del Calado .....	112
<b>Gráfico N° 18:</b> Resultado del Calado .....	114
<b>Gráfico N° 19:</b> Resultado del Calado .....	115
<b>Gráfico N° 20:</b> Resultado del Calado .....	117



## **I. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Problema**

#### **1.1.1. Descripción del Problema**

En la actualidad nos encontramos con un mundo globalizado, donde cada día hay nuevas tecnologías y no podemos ser ajenos a estas. Por lo que los programas y software cada vez son mejores y tienen resultados más veraces ante un proyecto de investigación.

En el Perú se ha iniciado con proyectos donde se utilizan software que nos ayudan a resolver casos de hidráulica (CONCYTEC, 2005), para esto se debe estudiar y tener en cuenta las bases teóricas y cálculos (fórmulas) que realiza el programa, con la intención de interpretar y conocer los resultados en evaluación.

Si bien se ha realizado mayores estudios en la modelización unidimensional, donde el flujo del agua va en un solo sentido, aún hay escasez de experiencia en la modelización bidimensional, que nos permite analizar el flujo de agua en dos dimensiones, en el estudio de ríos o canales. Estas dos se complementan al hacer un estudio hidráulico, pero existen algunos parámetros delicados que deben ser debidamente estudiados para que el modelo sea estable y confiable.

El estudio de investigación de un canal se tornará más eficiente y con resultados de mayor precisión a través de la modelización 1D Y 2D en diferentes programas como IBER y HEC-RAS, que nos permiten conocer los parámetros específicos del estudio hidráulico de un canal ancho, con variables dependientes e independientes tomando en cuenta que se analiza el movimiento del agua primero en una dimensión y luego en dos dimensiones.

En el presente estudio se planteó desarrollar 20 escenarios de un canal de 100m de ancho donde se determinó el mallado adecuado para cada uno de los escenarios y de esta manera el cálculo de canales se hará más provechoso en futuras investigaciones.

### **1.1.2. Enunciado del Problema**

Evaluar cada uno de los escenarios (geometría) en canales anchos para estimar los valores del tamaño de malla y el tiempo computacional mediante un proceso que garantice la modelación bidimensional en Iber y Hec-Ras.

### **1.1.3. Formulación del Problema**

¿Cuál es la propuesta de modelamiento bidimensional para la estimación del tamaño de malla y el tiempo computacional en canales anchos de 100 metros usando los programas Iber y Hec-Ras?

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

Determinar el modelamiento bidimensional para la estimación de tamaño de malla y el tiempo computacional en canales anchos de 100 metros usando los programas Iber y Hec-Ras.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Determinar los parámetros para la creación de los escenarios que se utilizarán para el modelo unidimensional y bidimensional.
- Determinar las geometrías, el seccionamiento y las condiciones de contorno.
- Generar los modelos unidimensionales y bidimensionales en Hec-Ras.
- Generar los modelos bidimensionales en Iber.
- Evaluar y comparar los resultados del perfil de flujo obtenidos de la modelación de los escenarios propuestos.

### **1.3. Justificación de Estudio**

El presente estudio se justifica académicamente porque permite aplicar los conocimientos estudiados en la rama de hidráulica en el diseño hidráulico de canales.

Está orientado técnicamente a realizar el modelamiento hidráulico de un canal de 100 m de ancho utilizando los softwares Iber 2.5.2 y Hec-ras 5.0.7 con el fin de estimar el tamaño de malla y el tiempo computacional que mejor se adapte al modelo.

Socialmente orientada como un estudio base para ser tomado como referencia para posibles investigaciones acerca de modelamientos hidráulicos de canales con los softwares Iber 2.5.2 y Hec-ras 5.0.7.

## **II. MARCO DE REFERENCIA**

### **2.1. Antecedentes del estudio**

#### **2.1.1. A nivel Internacional**

**TÍTULO:** Evaluación de modelos hidrodinámicos para representar flujos en cauces naturales. aplicación en un tramo del río suquía que incluye la confluencia con el arroyo la cañada, provincia de córdoba

**AUTOR:** Br. Cristhian Contero Mayacela

**UNIVERSIDAD:** Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

**AÑO:** 2014

En el siguiente trabajo se va a desarrollar modelos matemáticos y físicos en los flujos de superficie libre mediante la formulación, métodos y metodologías de la mecánica de fluidos. Se aplicarán esta metodología sobre la confluencia del arroyo La Cañada y el Río Suquío, que se encuentra en el centro de la ciudad de Córdoba siendo esta una ciudad con una concentración de personas bastante grande en la Republica de Argentina. Para este caso de estudio se utilizó un u modelo físico de la confluencia que se construyó en el Laboratorio de Hidráulica de la universidad de Córdoba. El modelo se presentó en una escala de longitudes no distorsionada 1:40; el cual es bastante fiable para experimentar el flujo por diferentes metodologías.

Se calibraron los datos y se validaron mediante 3 programas los cuales son el Hec- Ras, Iber y DELFT3D.

En el presente estudio se ha llegado a la conclusión que el modelo con mejor representación del flujo contrastando los resultados observados es el modelo numérico bidimensional Iber, pero esta conclusión se llega porque explica con mayor claridad las características de esta confluencia que son las propiedades de aguas poco profundas o flujos de superficie libre en aguas someras, con la relación de ancho-profundidad pequeña donde predominan los procesos bidimensionales entonces los resultados que se obtienen promediando las variables respecto a la profundidad son buenas. Como segunda conclusión se puede decir que los resultados del modelo unidimensional en HEC-RAS según los valores estadísticos representa de manera aceptable dicha confluencia, aunque su deficiencia está en que subestima los valores de máximos y mínimos. Como conclusión final, de acuerdo al modelado tridimensional los resultados fueron prometedores en el programa DELFT porque tomo en cuenta de manera adecuada los valores máximos y mínimos de la velocidad, aunque en este programa se subestima los valores de la profundidad y además tiene una deficiencia en los datos medidos para distancias más largas en el rio Suquía.

**TÍTULO:** Modelización 1d, 1d/2d y 2d de la inundabilidad en el meandro de Sant boi de Llobregat mediante la nueva aplicación Hec-Ras 5.0

**AUTOR:** Br. Alejandro Delgado Parra

**UNIVERSIDAD:** Universidad politécnica de Cataluña, España

**AÑO:** 2016

El proyecto evalúa y analiza el estado del arte de la modelación hidráulica con la ayuda de la nueva herramienta informática llamada Hec- Ras.

Posteriormente, se ha realizado una aplicación práctica con este software. Se ha desarrollado un estudio de inundaciones en el rio Llobregat. Con la aplicación práctica se ha podido entender cómo funciona el programa. A través de sus ventajas e inconvenientes, de esta manera obtener unos resultados de calados de agua y de velocidades para el área de estudio. También ha permitido analizar la peligrosidad para toda esta zona.

Finalmente, se han evaluado en profundidad diversos puntos con el objetivo de estudiar cómo se comporta cada modelo según la zona donde se encuentra ubicado el punto de estudio.

El modelo bidimensional (2D) es el más preciso, pero tiene el gran problema que es necesario mucho tiempo de cálculo cuando se tienen mallas grandes que contengan muchas celdas. Después de analizar los diferentes resultados de este modelo respecto a los otros modelos, se puede establecer que para zonas planas es más recomendable desarrollar un modelo bidimensional, a pesar de que el tiempo de ejecución es mayor, ya que los resultados se ajustaran más a la realidad.

El modelo unidimensional es más sencillo de desarrollar y es muy fácil conseguir unos resultados estables. Además, sus bajos tiempos de ejecución del cálculo, agilizan el estudio y la obtención de resultados. Esta metodología, tiene un buen comportamiento en las zonas del cauce del río, pero falla más a medida que nos alejamos del centro del río.

La determinación de un patrón de comportamiento entre los modelos (1D, 1D/2D y 2D), es decir, establecer si siempre los valores del modelo 1D son mayores o menores que los del modelo 2D es algo muy complejo. Para los 4 puntos que se han analizado en este trabajo, se ha comprobado que cuanto más alejado se está del cauce del río, la diferencias entre modelos son mayores. En los puntos más alejados las diferencias han sido de aproximadamente un 20% y a medida que nos acercábamos a la zona central del río, las diferencias se han reducido hasta el 10%.

### **2.1.2. A nivel Nacional**

**TITULO:** Zonificación de áreas inundables de la localidad de Santa Bárbara ocasionado por avenidas extraordinarias de la quebrada Sambarbamba – Baños del inca

**AUTOR:** Br. Jean Franco Alexander Hernández Regalado

**UNIVERSIDAD:** UNiversidad nacional de Cajamarca

**AÑO:** 2018

El presente estudio tiene como objetivo principal identificar y cuantificar las áreas inundables en la localidad de Santa Bárbara por avenidas extraordinarias de la quebrada Sambarbamba, comprendiendo una longitud evaluada de 927 m. y un área semiurbana de 54.81 ha. ubicadas en el distrito de Baños del Inca, en la cual se llevó a cabo el modelamiento hidrológico e hidráulico, para lo cual se empleó información satelital, meteorológica (intensidades estación Augusto Weberbauer del periodo 1973 – 2015) y topográfica de la zona de estudio. Para ello se determinó los diferentes parámetros geomorfológicos de la cuenca de la quebrada Sambarbamba, así como los caudales máximos, considerando un riesgo de 25% valido para 3, 15, 30 y 60 años, generando periodos de retorno de 10, 50, 100 y 200 años respectivamente, para dicho análisis se empleó las intensidades máximas de la estación Augusto Weberbauer para posteriormente realizar la transferencia de información hidrometeorológica a la cuenca de estudio, obteniendo las respectivas curvas IDF, luego aplicando el método racional

determinar los caudales de 53.41 , 66.06, 72.39 y 79.33 m<sup>3</sup>/s para los diferentes escenarios analizados. Posteriormente empleando el modelo bidimensional IBER, en conjunto con las herramientas del sistema de información geográfica (SIG), se identificó y cuantificó las áreas inundables, afectando a la localidad de Santa Bárbara en 3.07, 4.01, 4.89 y 6.39 ha.

Según el factor de forma nos encontramos con una cuenca muy alargada, con un orden del río igual a 2 y con un tiempo de concentración según Kirpich de 72.7 minutos.

Se llevó a cabo la recopilación, tratamiento y análisis de la información hidrológica dentro del contexto de la cuenca de la quebrada Sambarbamba, a partir de la cual se determinó los caudales de 53.41, 66.06, 72.39 y 79.33 m<sup>3</sup>/s para los periodos de retorno de 10, 50, 100 y 200 años respectivamente, asociados a un riesgo de falla en la predicción de un 25%.

Al concluir el modelamiento hidráulico se determinó que las áreas totales afectadas por el desbordamiento del cauce de la quebrada Sambarbamba son de 3.07, 4.01, 4.89 y 6.39 ha. para los periodos de retorno de 10, 50, 100 y 200 años respectivamente, calculadas con el software IBER, siendo el margen derecho el más perjudicado, afectando a la localidad de Santa Bárbara.

**TÍTULO:** Modelamiento hidráulico bidimensional de un tramo del río Pativilca, en flujo no permanente

**AUTOR:** Br. Hans Wilbert Sierra Lopinta

**UNIVERSIDAD:** Universidad nacional de agraria La Molina

**AÑO:** 2018

En la presente investigación se ha desarrollado el modelamiento hidráulico bidimensional en flujo no permanente de un tramo del Río Pativilca entre los centros poblados Simón Bolívar y el sector denominado Estación en la provincia de Barranca-Lima-Perú, para la generación de mapas de riesgo por inundación. Se realizó la modelación hidrológica de máximas avenidas mediante el método del número curva (SCS, 1964) con el modelo HEC-HMS para la obtención del hidrograma de escurrimiento directo para diferentes periodos de retorno haciendo uso de herramientas SIG. Seguidamente, se realizó el análisis de la modelación hidráulica unidimensional y bidimensional con el software HEC-ras 5.0.3, considerando las condiciones de borde (hidrogramas) para tiempo de retorno de 100 años, así como el análisis de usos de suelos. La configuración del terreno, se determina en base al levantamiento topográfico del tramo de estudio. Y con esto se puede determinar la configuración del curso fluvial en estudios y el resultado con mapas de lecho inundable. Se revisan criterios para establecer el peligro de las inundaciones usadas en varios países, consideran como base para sus cálculos el tirante y la velocidad del agua.

De acuerdo a la modelización 1D y 2D se ha concluido para el caso del río Pativilca que el modelo 2D representa de manera apropiada el proceso físico de avenidas en el cauce y las llanuras de inundación a diferencia del modelo 1D que no logra representar los flujos laterales en llanuras de inundación.

Se determinó que para un caudal circulante asociado a TR=100 años el área de afectación de 93.84 hectáreas que son predios agrícolas en su mayoría que ocupan el lecho inundable en ambos márgenes del río



Pativilca, en el tramo de estudio existe afectación urbana parcial cercanas al centro poblado Simón Bolívar (margen derecha) y el asentamiento humano Nueva Esperanza (margen izquierda), sin embargo en ambos casos los valores de tirantes y velocidades no sobrepasan las condiciones hidráulicas para considerarlas como zonas de peligro según la normativa española recogida del Real Decreto 09/2008 “Reglamento del Dominio Público Hidráulico”

## **2.2. Marco Teórico**

### **2.2.1. Hidráulica Fluvial**

Estudia el comportamiento hidráulico de los ríos en lo que se refiere a los caudales, así como otros parámetros como las velocidades de flujo, las variaciones del fondo por socavación y sedimentación, también la capacidad de transporte de sedimentos y los ataques contra los márgenes.

#### **2.2.1.1. Morfología de un río**

La morfología de un río implica el estudio de los cambios que experimenta un río, tanto en su recorrido, como en su sección transversal (lecho y márgenes). Su comportamiento depende mucho de la topografía, asociada a las condiciones geológicas. Además, el desarrollo de un río y las formas que adopta son diferentes en una zona plana y en una zona de fuerte pendiente. (ROCHA, 1998)

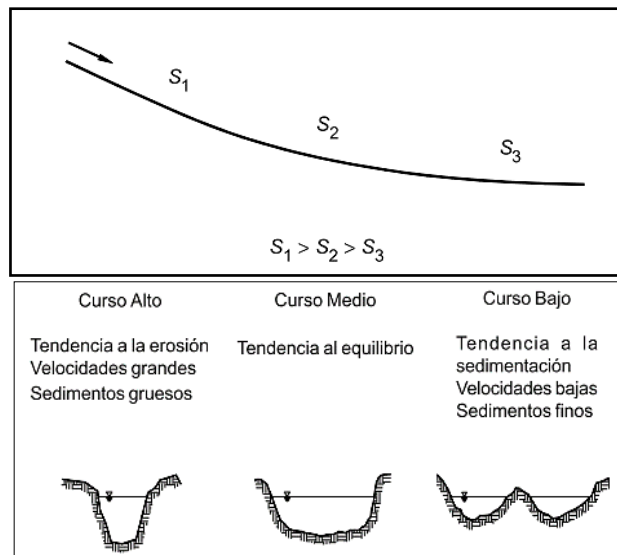
#### **2.2.1.2. Perfil longitudinal de un río**

- El eje hidráulico de los ríos no es una línea recta. El recorrido fluvial tiene una tendencia natural a la sinuosidad. (ROCHA, 1998)
- Los ríos tienden naturalmente a la sinuosidad, a que su recorrido esté formado por una sucesión de curvas. (ROCHA, 1998)
- La pendiente fluvial es variable a lo largo del recorrido que el río hace desde sus nacientes hasta la desembocadura. En general en las partes altas están las mayores pendientes. En

las partes bajas de los cauces fluviales la pendiente disminuye notablemente. (ROCHA, 1998)

- En la Figura N° 1 se aprecia, muy esquematizado, el perfil longitudinal representativo de un río. Como se ve, el perfil típico es cóncavo hacia arriba y resulta así del balance que se establece entre la capacidad de transporte de la corriente y el tamaño y cantidad de los sólidos aportados por la cuenca. En la mencionada figura se aprecia tres tramos principales y las secciones transversales típicas para cada uno de ellos. (ROCHA, 1998)

**Figura N° 1:** Esquematización del perfil longitudinal y secciones transversales típicas de un río, a lo largo de su recorrido.



**Fuente :** Rocha ,1998

## 2.2.2. Hidráulica de canales

### 2.2.2.1. Elementos Geométricos de un canal

**A) Tirante.-** Es la distancia vertical desde el punto más bajo de una sección del canal hasta la superficie libre.(Chow, 1994)

$$y = \left( \frac{Q}{K_s \cdot B \cdot S^{1/2}} \right)^{3/5}$$

**Donde:**

**y:** Tirante (m)

**Ks:** Coeficiente de rugosidad que depende del lecho del canal

**Q:** Caudal de diseño (m<sup>3</sup>/s).

**B:** Ancho estable. (m)

**S:** Pendiente.

**Tabla N° 1:** Coeficiente de rugosidad que depende del lecho natural del canal

<b>Tipos de Cauces Naturales</b>	<b>Ks</b>
Cauces con fondo sólido sin irregularidades.	40
Cauces de ríos con acarreo irregular.	33
Cauces de ríos con vegetación.	35
Cauces naturales con derrubio e irregularidades.	30
Cauces de ríos con fuerte transporte de acarreo.	28
Torrentes con piedras de tamaño de una cabeza.	25
Torrentes con derrubio grueso y acarreo móvil.	20

**Fuente:** Nuovo Colombo, Manuale dell'Ingegnere (1990)

**B) Área Hidráulica.-** Es el área de la sección transversal del flujo, perpendicular a la dirección de flujo.(Chow, 1994)

$$A=(B+Zy)y$$

**Donde:**

**A:** Área Hidráulica (m<sup>2</sup>).

**B:** Ancho Estable (m).

**Z:** Talud.

**y:** Tirante (m).

**C) Perímetro Mojado. -** Es la longitud de la línea de intersección de la superficie de canal mojada y de un plano transversal perpendicular a la dirección de flujo. (Chow, 1994)

$$P=B+2y*(1+Z^2)^{1/2}$$

**Donde:**

**P:** Perímetro mojado (m).

**B:** Ancho estable (m).

**Z:** Talud.

**y:** Tirante (m).

**D) Radio Hidráulico.-** Es la relación del área mojada con respecto a su perímetro mojado. (Chow, 1994)

$$R= A/P$$

**Donde:**

**R:** Radio Hidráulico (m)

**A:** Área Hidráulica (m<sup>2</sup>).

**P:** Perímetro mojado (m).

### E) Velocidad Media

$$V = (R^{2/3} * S^{1/2})/n$$

**Donde:**

**V:** Velocidad media (m/s)

**R:** Radio Hidráulico (m)

**S:** Pendiente.

**n:** Rugosidad de Manning.

**F) Profundidad Hidráulica Media.-** Es la relación entre el área mojada y el ancho en la superficie.(Chow, 1994)

$$Y_m = A/B$$

**Donde:**

**Y<sub>m</sub>:** Profundidad hidráulica media (m).

**A:** Área hidráulica (m<sup>2</sup>).

**B:** Ancho estable (m).

**H) Borde Libre.-** Es la distancia de la superficie del agua a la parte más alta de las paredes del canal. Se diseña de tal manera que el agua no desborde por efecto de ondas o fluctuaciones del nivel de la superficie libre. (MAZA ALVAREZ, 1998b)

Una práctica corriente para canales en tierra, es dejar un borde libre o resguardo o igual a un tercio del tirante, es decir:

$$BL = \frac{y}{3}$$

Mientras que para canales revestidos, el borde libre puede ser la quinta parte del tirante, es decir:

$$BL = \frac{y}{5}$$

Existen también otros criterios prácticos para designar el valor del borde libre.

En relación con el caudal se tiene:

**Tabla N° 2:** Borde en función del caudal

Caudal Q (m <sup>3</sup> /s)	Bordo libre (m)
Menores que 0,5	0,30
Mayores que 0,5	0,40

**Fuente:** Hidráulica de canales, Villon (2007)

En relación con el ancho de solera se tiene :

**Tabla N° 3:** Borde Libre en función del ancho de solera

Ancho de solera (m)	Bordo libre (m)
Hasta 0,80	0,40
de 0,80 a 1,50	0,50
de 1,50 a 3,00	0,60
de 3,00 a 20,00	1,00

**Fuente:** Hidráulica de canales, Villon (2007)

### G) Número de Froude

$$F = V/(g \cdot Y_m)^{1/2}$$

**Donde:**

**F:** Número de Froude.

**V:** Velocidad media (m/s).

**g:** Aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>).

**Y<sub>m</sub>:** Profundidad hidráulica media (m).

**F > 1** —————> Flujo Supercrítico

**F = 1** —————> Flujo Crítico

**F < 1** —————> Flujo Subcrítico

## H) Taludes en canales

El U.S.B.R. (1978), recomienda un talud único de 1.5:1 (Horizontal: Vertical) para los canales usuales en sus diseños.

**Tabla N° 4:** Taludes apropiados para distintos tipos de material

<b>Material</b>	<b>Talud (Horizontal: Vertical)</b>
Roca	Prácticamente vertical
Suelo de turba y detritos	0.25:1
Arcilla Compacta o tierra	
Con recubrimiento de concreto	0.5: hasta 1:1
Tierra con recubrimiento de piedra o tierra en grandes canales	1:1
Arcilla firme o tierra en canales pequeños	1.5:1
Tierra arenosa suelta	2:1
Greda arenosa o arcilla porosa	3:1

**Fuente:** Hidráulica de canales, UNAM (1998)

## I) Ecuación de la energía

Representa la energía total del flujo. Esta se compone de energía interna, potencial y cinética.

$$ET = z + y + \frac{v^2}{2g}$$

**Donde:**

ET : carga de energía total, en m-kg / kg

z : carga de posición, en m-kg / kg

v<sup>2</sup>/2g: carga de velocidad, en m-kg / kg

## J) Energía específica

Es la cantidad de energía por unidad de peso, que fluye a través de una sección del canal con respecto al fondo de este. (Chow, 1994)

$$E = y + \frac{v^2}{2g}$$

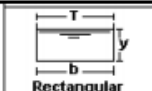

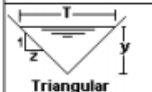
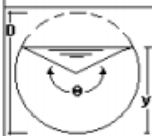
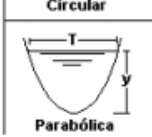
**Dónde:**

E = energía específica.

### 2.2.3. Secciones de los canales

En los canales abiertos las secciones más usadas para el diseño se presentan en la Tabla N°5.

**Tabla N° 5:** Secciones de canales

Sección	Area Hidraulica A	Perimetro mojado P	radio hidraulico R	Espejo de agua T
 Rectangular	by	b+2y	$\frac{by}{b+2y}$	b
 Trapezoidal	(b+zy)y	b+2y√(1+Z <sup>2</sup> )	$\frac{(b+zy)y}{b+2y\sqrt{1+Z^2}}$	b+2zy
 Triangular	zy <sup>2</sup>	2y√(1+Z <sup>2</sup> )	$\frac{zy}{2\sqrt{1+Z^2}}$	2zy
 Circular	$\frac{(\theta - \text{sen}\theta)D^2}{8}$	$\frac{\theta D}{2}$	$\frac{(1 - \text{sen}\theta) D}{\theta 4}$	$\frac{(\text{sen}\theta)D}{2}$
 Parabólica	$\frac{2}{3}Ty$	$\frac{T+8y^2}{3T}$	$\frac{2YT^2}{3T+8y^2}$	$\frac{3A}{2y}$

**Fuente:** Hidráulica de canales, Villon (2007)



### **2.2.3.1. Criterio tiempo**

#### **A.- Flujo Permanente**

- Si la profundidad de flujo, el área mojada, la velocidad y el caudal no cambian o pueden suponerse constante durante el intervalo de tiempo en consideración. (Chow, 1994) En la mayor parte de los problemas de flujo permanente, el caudal es constante.

#### **B.- Flujo No Permanente**

- Si la profundidad del flujo, el área mojada, la velocidad, y el caudal cambian con el tiempo.

### **2.2.3.2. Criterio comportamiento en el espacio**

#### **A.- Flujo Uniforme**

- Se dice que el flujo en canales abiertos es uniforme si la profundidad del flujo, el área mojada, la velocidad y caudal no varían en cada sección del canal. (ven te Chow, 1994)

#### **B.- Flujo Variado**

- Si la profundidad de flujo, el área mojada, la velocidad y el caudal varían en cada sección del canal.

- Este flujo se divide a su vez en:

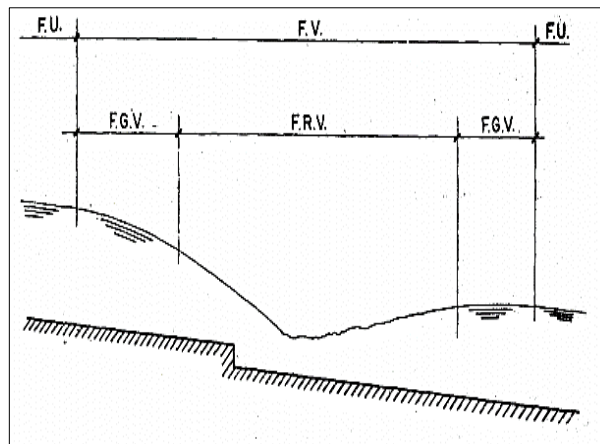
##### **Flujo Rápidamente Variado**

- El flujo es rápidamente variado si la profundidad del agua, el área mojada, la velocidad y el caudal cambian de manera abrupta en distancias comparativamente cortas. (Chow, 1994)

##### **Flujo Gradualmente Variado**

- El flujo es gradualmente variado si la profundidad del agua, el área mojada, la velocidad y el caudal no cambian de manera abrupta en distancias comparativamente cortas. (ven te Chow, 1994)

**Figura N° 2:** Diferentes tipos de flujos en canales abiertos



**Fuente :** (Ven te Chow, 1994)

### **2.2.3.2.1. Criterio de Viscosidad**

#### **A.- Flujo Laminar**

- Si las fuerzas viscosas predominan sobre las de inercia, se dice que el flujo es laminar, en este caso las partículas del líquido avanzan en trayectorias más o menos paralelas sin mezclarse o entrelazarse entre sí, esto ocurre a velocidades bajas o para líquidos muy viscosos. (MAZA ALVAREZ, 1998)

#### **B.- Flujo Turbulento**

- Si las fuerzas inerciales predominan sobre las fuerzas viscosas. Se caracteriza porque las trayectorias de las partículas fluidas se mezclan entre sí. (MAZA ALVAREZ, 1998)

#### 2.2.3.2.2. Criterio de N° Froude (Fr)

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}}$$

$$D(\text{Profundidad hidráulica}) = \frac{\text{Área mojada}}{\text{ancho superficial}}$$

##### a.- Flujo Subcrítico

- El valor de  $Fr < 1$ .

##### b.- Flujo Crítico

- El valor de  $Fr = 1$ .

##### c.- Flujo Supercrítico

- El valor de  $Fr > 1$ .

#### 2.2.3.2.3. Criterio movimiento en el espacio

##### A.- Flujo Unidimensional

- Si las características del flujo (velocidad, presión o tirante, etc) varían como en función de una sola coordenada en espacio. (MAZA ALVAREZ, 1998)

##### B.- Flujo Bidimensional

- Cuando las características del flujo dependen de dos coordenadas espaciales. (MAZA ALVAREZ, 1998)

##### C.- Flujo Tridimensional

- Cuando las características del flujo dependen de tres coordenadas espaciales. (MAZA ALVAREZ, 1998)

## 2.2.4. Rugosidad

### 2.2.4.1. Selección del Coeficiente de Rugosidad de Manning

- Al aplicar la ecuación de Manning la mayor dificultad está en la determinación del coeficiente de rugosidad  $n$ , ya que no existe un método exacto para la selección del valor  $n$ . (Chow, 1994)

### 2.2.4.2. Tabla de Coeficiente de Rugosidad de Manning

- La tabla de coeficientes de rugosidad de Manning presenta una lista de valores de  $n$  para canales de diferentes clases.

**Tabla N° 6:** Tabla de Coeficiente de Rugosidad de Manning

Tipo de cauce y descripción	Valor de $n$		
	Mínimo	Normal	Máximo
<b>D. Cauces naturales menores</b> (ancho superior a nivel de crecida menor que 30 m)			
D1) Cauces en planicie			
1) Limpio, recto, nivel lleno, sin fallas o pozos profundos	0.025	<b>0.030</b>	0.033
2) Igual que arriba pero más piedras y pastos	0.030	0.035	0.040
3) Limpio, curvado, algunos pozos y bancos	0.033	0.040	0.045
4) Igual que arriba pero algunos pastos y piedras	0.035	0.045	0.050
5) Igual que arriba, niveles más bajos, pendiente y secciones más inefectivas	0.040	0.048	0.055
6) Igual que 4, pero más piedras	0.045	0.050	0.060
7) Tramos sucios, con pastos y pozos profundos	0.050	0.070	0.080
8) Tramos con muchos pastos, pozos profundos o recorridos de la crecida con mucha madera o arbustos bajos	0.075	0.100	0.150
D2) Cauces de montaña, sin vegetación en el canal, laderas con pendientes usualmente pronunciadas, árboles y arbustos a lo largo de las laderas y sumergidos para niveles altos			
1) Fondo: grava, canto rodado y algunas rocas	0.030	0.040	0.050
2) Fondo: canto rodado y algunas rocas	0.040	0.050	0.070
<b>E) Cauces con planicie crecida</b>			
1) Pastos, sin arbustos			
· Pastos cortos	0.025	0.030	0.035
· Pastos altos	0.030	0.035	0.050
2) Áreas cultivadas			
· Sin cultivo	0.020	0.030	0.040
· Cultivos maduros alineados	0.025	0.035	0.045
· Campo de cultivos maduros	0.030	0.040	0.050
3) Arbustos			
· Arbustos escasos, muchos pastos	0.035	0.050	0.070
· Pequeños arbustos y árboles, en invierno	0.035	0.050	0.060
· Pequeños arbustos y árboles, en verano	0.040	0.060	0.080
· Arbustos medianos a densos, en invierno	0.045	0.070	0.110
· Arbustos medianos a densos, en verano	0.070	0.100	0.160
4) Árboles			
· Sauces densos, en verano, y rectos	0.110	0.150	0.200
· Tierra clara con ramas, sin brotes	0.030	0.040	0.050
· Igual que arriba pero con gran crecimiento de brotes	0.050	0.060	0.080
· Grupos grandes de madera, algunos árboles caídos, poco crecimiento inferior y nivel de la inundación por debajo de las ramas	0.080	0.100	0.120
· Igual que arriba, pero con el nivel de inundación alcanzando las ramas	0.100	0.120	0.160
<b>F) Cursos de agua importantes</b> (ancho superior a nivel de inundación mayor que 30 m). Los valores de $n$ son menores que los de los cursos menores de descripción similar, ya que las bancas ofrecen menor resistencia efectiva.			
1) Sección regular sin rocas y arbustos	0.025	-	0.060
2) Sección irregular y áspera	0.035	-	0.100

Fuente: Vent te Chow (1959)

### 2.2.4.3. Factores que Afectan el Coeficiente de Rugosidad de Manning

- A partir de varios factores que afectan el coeficiente de rugosidad, Cowan desarrollo un procedimiento para estimar el valor de n. Mediante este procedimiento, el valor de n puede calcularse:

$$n=(n_0+n_1+n_2+n_3+n_4)n_5$$

**Donde:**

**n0** : Rugosidad base para un canal recto, uniforme, prismático y con rugosidad homogénea.

**n1** : Rugosidad adicional debida a irregularidades superficiales del perímetro mojado a lo largo del tramo en estudio.

**n2**: Rugosidad adicional equivalente debida a variación de forma y de dimensiones de las secciones a lo largo del tramo en estudio.

**n3**: Rugosidad equivalente debida a obstrucciones existentes en el cauce.

**n4**: Rugosidad adicional equivalente debida a la presencia de vegetación.

**n5**: Factor de corrección para incorporar efecto de sinuosidad del cauce o presencia de meandros.

**Tabla N° 7:** Criterio de Cowan para determinar la influencia de diversos factores sobre el coeficiente n

CONDICIONES DEL CANAL		VALORES	
<b>MATERIAL INVOLUCRADO</b>	Tierra	no	0.020
	Corte en Roca		0.025
	Grava Fina		0.024
	Grava Gruesa		0.028
<b>GRADO DE IRREGULARIDAD</b>	Suave	n1	0.000
	Menor		0.005
	Moderada		0.010
	Severo		0.020
<b>VARIACIONES DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL</b>	Gradual	n2	0.000
	Ocasionalmente Alternante		0.005
	Frecuentemente Alternante		0.010-0.015
<b>EFFECTO RELATIVO DE LAS OBSTRUCCIONES</b>	Insignificante	n3	0.000
	Menor		0.010-0.015
	Apreciable		0.020-0.030
	Severo		0.040-0.060
<b>VEGETACIÓN</b>	Baja	n4	0.005-0.010
	Media		0.010-0.025
	Alta		0.025-0.050
	Muy Alta		0.050-0.100
<b>GRADO DE LOS EFECTIVOS POR MEANDRO</b>	Menor	m5	1.000
	Apreciable		1.150
	Severo		1.300

Fuente: Vent te Chow (1959)

## 2.2.5. Modelación Hidráulica

### 2.2.5.1. Tipos de Modelación

#### 2.2.5.1.1. Modelación Unidimensional

Este tipo de modelación es la que analiza el movimiento del agua en una sola dirección donde el flujo puede ser permanente o no permanente, sin embargo, tiene ciertas recomendaciones. Sería recomendable utilizar este tipo de modelación en algunos escenarios y estos serían los siguientes:

- Cuando el flujo de agua no se expande de manera significativa.
- Canales bien definidos o ríos muy encauzados.
- Cuando los datos de elevación son de baja calidad o de poca cuantía.

De esta manera este tipo de modelo nos permitirá observar la forma en la que el agua actúa dentro del cauce que hemos propuesto.

### **A) Ecuaciones de Modelación Unidimensional**

Las ecuaciones que describen el régimen variable en lámina libre en una dimensión son las ecuaciones escritas por Barré de Saint Venant en 1871, estas ecuaciones muchas veces son suficientes para representar correctamente el movimiento tanto permanente y no permanente en lámina libre en cauces, naturales o artificiales, debido a la marcada unidimensionalidad de éstos. (Bladé, 2009)

El sistema de ecuaciones de Saint Venant está compuesto por las ecuaciones de continuidad y las ecuaciones de cantidad de movimiento. (Bladé, 2009)

**a.- Ecuación de continuidad.** - La ecuación de continuidad en forma conservativa puede escribirse en términos de caudal (Q) y del área (A) de la siguiente manera:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

**b.- Ecuación de momentum.**- La ecuación de momentum en forma conservativa puede escribirse en términos del caudal (Q), área (A), profundidad

(y), pendiente del canal ( $S_0$ ), pendiente de fricción ( $S_f$ ) y de la gravedad ( $g$ ) de la siguiente manera:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gA(S_0 - S_f)$$

### 2.2.5.2. Modelación Bidimensional

A diferencia de los modelos unidimensionales los modelos bidimensionales ya no consideran al canal o río como una línea con una secuencia de sección transversales, sino como una malla creada por celdas poligonales que se forman a partir de triángulos y/o cuadrados con el objetivo de representar el movimiento del agua en dos direcciones dentro del cauce principal del río y/o de la llanura de inundación.

#### A) Ecuaciones de Modelación Bidimensional

##### a.- Ecuación de Saint Venant

$$\frac{dh}{dt} + \frac{dq_x}{dx} + \frac{dq_y}{dy} = 0$$

$$\frac{dq_x}{dt} + \frac{d}{dx} \left( \frac{q_x}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{d}{dy} \left( \frac{q_x q_y}{h} \right) = -gh \frac{dz_b}{dx} - \frac{\tau_{hx}}{\rho} - \frac{d}{dx} (h u_x' u_x') - \frac{d}{dy} (h u_y' u_y')$$

$$\frac{dq_y}{dt} + \frac{d}{dx} \left( \frac{q_x q_y}{h} \right) + \frac{d}{dy} \left( \frac{q_y^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) = -gh \frac{dz_b}{dy} - \frac{\tau_{hy}}{\rho} - \frac{d}{dx} (h u_x' u_y') - \frac{d}{dy} (h u_y' u_y')$$

**Donde:**

**h:** Profundidad de la lámina de agua.

**qx:** Caudal específico en dirección X.

**qy:** Caudal específico en dirección Y.

**zb:** Cota del fondo g: gravedad.

**ρ:** Densidad del agua.

**τ<sub>b,x</sub> :** Componente en x de la tensión tangencial que ejerce el fondo.



### **2.2.5.3. Softwares para modelación**

#### **2.2.5.3.1. HEC – RAS**

HEC-RAS (Hydrological Engineering Center–River Analysis System), es un software, programa para modelamiento hidráulico que ha sido desarrollado por el Hydrologic Engineering Center del US Army Corps of Engineers. (US Army Corps of Engineers, 2020)

Brinda mejoras para la modelación unidimensional y bidimensional a través de la entrada de datos, así como geometría y características que cuenta el cauce, además se puede trabajar con estructuras hidráulicas dentro del flujo. Permite visualizar de manera gráfica los resultados.(US Army Corps of Engineers, 2020)

Este software se encuentra en constante desarrollo para actualizar las nuevas funciones y mejoras a cada nueva versión. (US Army Corps of Engineers, 2020)

El software de Hec – Ras, está compuesto por cuatro tipos de módulos diferentes, los cuales permiten el análisis de los ríos en los siguientes escenarios:

- a. Modelización de flujo en régimen permanente.
- b. Modelización de flujo en régimen no permanente.
- c. Modelización del transporte de sedimentos.
- d. Análisis de calidad de aguas.

Hec-Ras permite simular los flujos de agua en canales artificiales o bien en cauces naturales de ríos. Este programa utiliza como manera de resolver las ecuaciones de Onda Difusa y las ecuaciones de Saint Venant descritas en los

apartados anteriores. Además de esto el programa utiliza el esquema numérico de los volúmenes finitos implícitos como manera de resolver los problemas de flujo no permanente. (US Army Corps of Engineers, 2020)

#### **2.2.5.3.2. IBER**

Este software ha sido desarrollado por el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (Universidad de A Coruña) y el Instituto FLUMEN (Universidad Politécnica de Catalunya y Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería). (Flumen, 2013)

Este programa, llamado Iber, se desarrolló a partir de dos herramientas de modelación numérica bidimensional ya existentes, Turbillon y CARPA; ambas con el método de volúmenes finitos fueron integradas en un único código ampliado con nuevas capacidades. (Flumen, 2013)

Es un modelo matemático bidimensional que representa un módulo hidrodinámico que resuelve ecuaciones del flujo en lámina libre para aguas poco profundas, mediante las ecuaciones de Saint Venant en dos dimensiones. (Flumen, 2013)

El modelo Iber consta de diferentes módulos de cálculo acoplados entre sí. De los cuales son:

- Módulo hidrodinámico.
- Módulo de turbulencia.
- Módulo de transporte de sedimentos, de granulometría uniforme, por carga de fondo y por carga en suspensión.

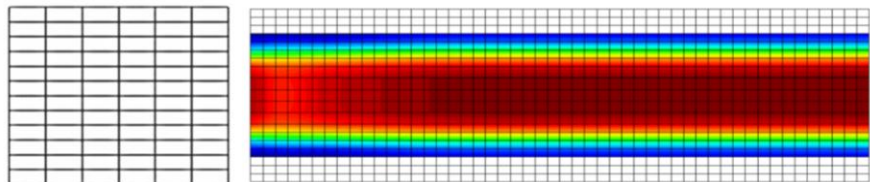
#### 2.2.5.4. Malla computacional

Para resolver una las ecuaciones que gobiernan el flujo variable en ríos es necesario realizar previamente una discretización espacial del dominio a estudiar. Discretizando las ecuaciones en una malla de cálculo bidimensional que representa la batimetría de la zona. (Robles, 2016).

##### 2.2.5.4.1. Mallas Estructuradas

Están constituidas por una matriz de celdas cuadrangulares, de manera que cada una puede identificarse por sus índices  $(i, j)$ . Su principal ventaja, desde el punto de vista del cálculo numérico, es su eficiencia, tanto en lo que respecta a los algoritmos de programación como a su precisión; sin embargo, mediante estas mallas es difícil representar geometrías sumamente irregulares. (Robles, 2016)

**Figura N° 3:** Malla computacional estructurada (celdas simétricas)

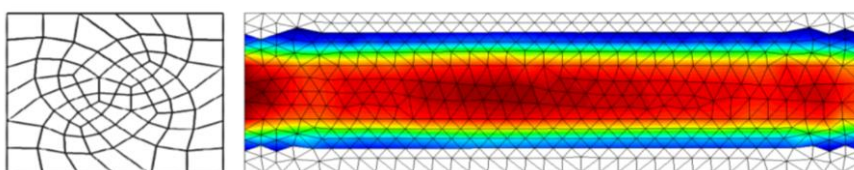


**Fuente:** Robles Montero, 2016

#### 2.2.5.4.2. Mallas no estructuradas

Pueden conformarse por elementos poligonales de distintos tamaños y formas; aunque generalmente se construyen con elementos triangulares. Al contrario de las estructuradas, este tipo de mallas es muy útil para representar de forma más real las irregularidades del terreno. (Robles, 2016)

**Figura N° 4:** Malla computacional no estructurada (celdas irregulares)



Fuente: Robles Montero, 2016

#### 2.2.5.5. Tiempo computacional

Otro de los parámetros importantes a la hora de modelar viene a ser el tiempo computacional que vamos a insertar en el programa para efectuar el modelo, entonces para encontrar el tiempo computacional debemos conocer el parámetro que relaciona dicho tiempo con la malla que estamos utilizando. (Flumen, 2013)

##### 2.2.5.5.1. Número de Courant

El número de Courant se obtiene de la relación entre espacio, velocidad y tiempo, siendo conocido que dicha relación debe ser menor igual que la unidad. Con el cual se trabaja como un medio de restricción para los diferentes modelos de ecuaciones bidimensionales. (Llun, 2015)

### **Número de Courant para la ecuación de Saint Venant**

$$C = \frac{V * \Delta T}{\Delta X} \leq 1$$

Máximo valor de C=3

#### **Donde:**

C = Número de Courant

V = Velocidad de Flujo. (m/s)

$\Delta T$  = Paso de tiempo computacional

$\Delta X$  = Promedio del tamaño de celda (malla)

#### **2.2.5.6. Condiciones de Contorno**

Las condiciones de contorno son aquellas que definen el comportamiento de un modelo en cada uno de sus límites. Por lo tanto, se entiende que cada modelo va a requerir que insertemos unas condiciones de contorno aguas arriba y aguas abajo. Cuando las condiciones de contorno son malas pueden generar inestabilidades en el modelo y además resultados falsos, así que es muy importante tener en cuenta que las condiciones de contorno se deben aplicar lo suficientemente lejos de la zona de estudio, para que no afecten negativamente el área de estudio.(Flumen, 2013)

### 2.3. Marco Conceptual

**Cauce:** Continente de las aguas durante sus máximas crecientes, constituye un bien de dominio público hidráulico. (Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2014)

**Pendiente:** Es el grado de inclinación del fondo de un río o un canal a lo largo de un tramo determinado.(MAZA ALVAREZ, 1998)

**Rugosidad:** Es el conjunto de las irregularidades de una superficie. Y en el caso de los fluidos esta es muy importante en el estudio del comportamiento del fluido con la respectiva rugosidad del material por donde pasa.(Chow, 2008)

**Tirante de agua.-** Es la profundidad máxima del agua en el canal. (Villón, 2007)

**Flujos en superficie libre:** Se denomina fluido de superficie libre a flujos en donde la superficie del agua está en contacto con el aire ya sea en conductos cerrados o abiertos.(Villón, 2007)

**Canales no prismáticos:** Se les llama canales no prismáticos a aquellos canales en donde ni su sección transversal ni su pendiente son constantes en todo su recorrido.(Villón, 2007)

**Turbulencia:** Es el movimiento desordenado de un fluido en el cual las moléculas, en vez de seguir trayectorias paralelas, describen trayectorias sinuosas y forman torbellinos.(Chow, 1994)

**Contracción:** Es una obra de ingeniería donde se reduce el ancho de la sección transversal provocando un estrechamiento del fluido.(MAZA ALVAREZ, 1998)

**Número de Courant:** Es la relación que existe entre el intervalo de tiempo y el tiempo de residencia de un volumen finito, se usa para resolver las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales.(Flumen, 2013)

**Mallado computacional:** Es una forma de computación distribuida, en la cual los elementos participantes pueden ser de iguales o de distintas arquitecturas y cubrir toda el área de estudio.(Flumen, 2013)

**Intervalo de tiempo de simulación:** Es el tiempo de simulación que se escoge para una modelización. Está íntimamente relacionado con el tamaño de la malla utilizada y se halla partir de la relación que existe en las fórmulas del número Courant.(Flumen, 2013)

## **2.4. Hipótesis**

### **2.4.1. General**

El tamaño de malla y el tiempo computacional que más se ajustará para la propuesta del modelo bidimensional de un canal de 100 metros con características de pendiente 0.50%, caudal de 1500 m<sup>3</sup>/s y una rugosidad de 0.023 usando el software Hec Ras 2D es de 25m y de 5s mientras que para el modelo Iber 2D el tamaño de malla adecuado es de 12m con un tiempo computacional de 2s.

## **2.5. Variables**

### **2.5.1. Variable**

- Modelamiento bidimensional para la estimación del tamaño de malla y tiempo computacional en canales de 100 metros.

## 2.6. Operacionalización de Variable

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN		
MODELAMIENTO BIDIMENSIONAL PARA LA ESTIMACIÓN DEL TAMAÑO DE MALLA Y TIEMPO COMPUTACIONAL EN CANALES DE 100 METROS	Serie de actividades que realiza el proyectista con el fin de estimar los valores del tamaño de malla y el tiempo computacional que garanticen la correcta modelación bidimensional en canales anchos (Bladé, 2005)	El presente proyecto está orientado a estimar los tamaños de malla y tiempo computacional para canales anchos, datos que son sumamente importantes para el desarrollo de una correcta modelación bidimensional de dichos canales en los programas IBER 2.5.2. y HEC – RAS 5.0.7.	Creación de los escenarios (modelos digitales) de canales anchos	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Razón		
				Pendiente (s)			
				Rugosidad (IRI)			
					Modelo numérico unidimensional	Modelo digital (escenarios) (m)	Razón
						Perfil de flujo (gráfico)	
						Condiciones de contorno (m <sup>3</sup> /s)	
			Modelación bidimensional	Modelo digital (escenarios) (m)	Razón		
				Perfil de flujo (gráfico)			
				Condiciones de contorno (m <sup>3</sup> /s)			
				Mallado del canal (m)			

Fuente Propia



### III. METODOLOGIA EMPLEADA

#### 3.1. Tipo y Nivel de Investigación

##### 3.1.1. Tipo de Investigación

- Aplicada.

##### 3.1.2. Nivel de Investigación

- Descriptiva.

#### 3.2. Población y Muestra de Estudio

##### 3.2.1. Población

- Todos los ríos (canales) anchos de 100 metros.

##### 3.2.2. Muestra

- Los ríos (canales) anchos de 100 metros que contengan las siguientes características:

Pendiente (s)	Rugosidad (n)	Caudal (Q)
0.003	0.023	500 m <sup>3</sup> /s
		1500 m <sup>3</sup> /s
	0.03	1000 m <sup>3</sup> /s
		2000 m <sup>3</sup> /s
	0.035	1500 m <sup>3</sup> /s
	0.005	0.023
1500 m <sup>3</sup> /s		
0.03		1000 m <sup>3</sup> /s
		2000 m <sup>3</sup> /s
0.035		1500 m <sup>3</sup> /s
0.007		0.023
	2000 m <sup>3</sup> /s	
	0.03	1000 m <sup>3</sup> /s
		1500 m <sup>3</sup> /s
	0.035	1500 m <sup>3</sup> /s
	0.009	0.023
1500 m <sup>3</sup> /s		
0.03		1000 m <sup>3</sup> /s
		2000 m <sup>3</sup> /s
0.035		1500 m <sup>3</sup> /s

### 3.3. Diseño de Investigación

- No experimental, transversal, descriptivo simple.

### 3.4. Técnicas e instrumentos de Recolección de Datos

#### Ficha resumen

- Donde se almacenaron las diferentes ideas para los escenarios propuestos que contienen características de los ríos del Perú.
- Además, esta técnica sirvió para la recolección de información sobre los softwares usados en esta investigación (AutoCad Civil 3D, Hec Ras, Iber) como, manuales, guías de usuario y procesos computacionales.

#### Análisis documental

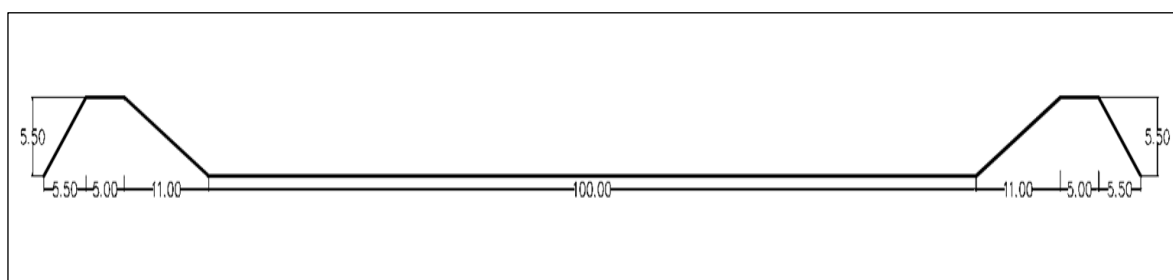
- Se utilizó la técnica de análisis documental para extraer información de artículos, revistas científicas, libros y/o investigaciones acerca de la modelación unidimensional y bidimensional para saber interpretar los cálculos, resultados y los parámetros con los cuales trabaja.

### 3.5. Procesamiento y Análisis de datos

#### 3.5.1. Datos de la Geometría

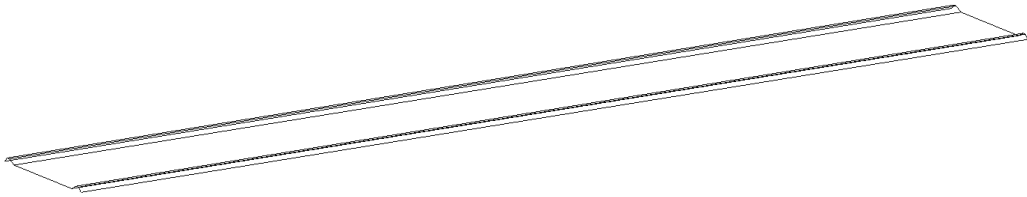
Este diseño de canal presenta una sección transversal trapezoidal, además se agregaron unos diques con la finalidad de prevenir la inundación y para contener el flujo de los ríos a fin de darles un flujo más rápido. El objeto de estudio de este canal presenta un tramo de 1 km

**Figura N° 5:** Sección transversal del canal de 100m de ancho



**Fuente:** Elaboración Propia

**Figura N° 6:** Vista en 3D del canal de 100m de ancho y 1 km de longitud.



**Fuente:** Elaboración Propia

### 3.5.2. Modelamiento Hidráulico Unidimensional con Hec-ras 5.0.7

**A.-** En el proyecto se propuso escenarios con diferentes características, donde los canales deberán diseñarse de manera que tengan la necesaria capacidad de conducción de agua. A continuación, en el siguiente cuadro se muestran los parámetros a utilizar para el diseño de los modelos en estudio.

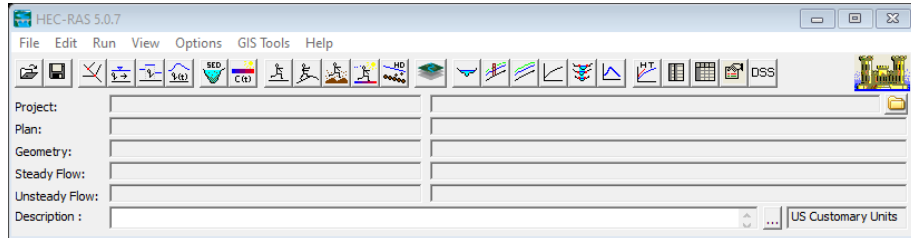
**Tabla N° 8:** Datos Iniciales

<b>Pendiente (s)</b>	<b>Rugosidad (n)</b>	<b>Caudal (Q)</b>
0.003	0.023	500 m <sup>3</sup> /s
		1500 m <sup>3</sup> /s
	0.03	1000 m <sup>3</sup> /s
		2000 m <sup>3</sup> /s
	0.035	1500 m <sup>3</sup> /s
	0.005	0.023
1500 m <sup>3</sup> /s		
0.03		1000 m <sup>3</sup> /s
		2000 m <sup>3</sup> /s
0.035		1500 m <sup>3</sup> /s
0.007		0.023
	2000 m <sup>3</sup> /s	
	0.03	1000 m <sup>3</sup> /s
		1500 m <sup>3</sup> /s
	0.035	1500 m <sup>3</sup> /s
	0.009	0.023
1500 m <sup>3</sup> /s		
0.03		1000 m <sup>3</sup> /s
		2000 m <sup>3</sup> /s
0.035		1500 m <sup>3</sup> /s

**Fuente:** Elaboración Propia

**B.-** Al abrir el programa HEC-RAS 5.0.7, necesitamos guardar el proyecto para poder operarlo, de esta manera se guarda una carpeta con todos los cálculos y resultados, según la geometría y parámetros utilizados en el modelo de estudio.

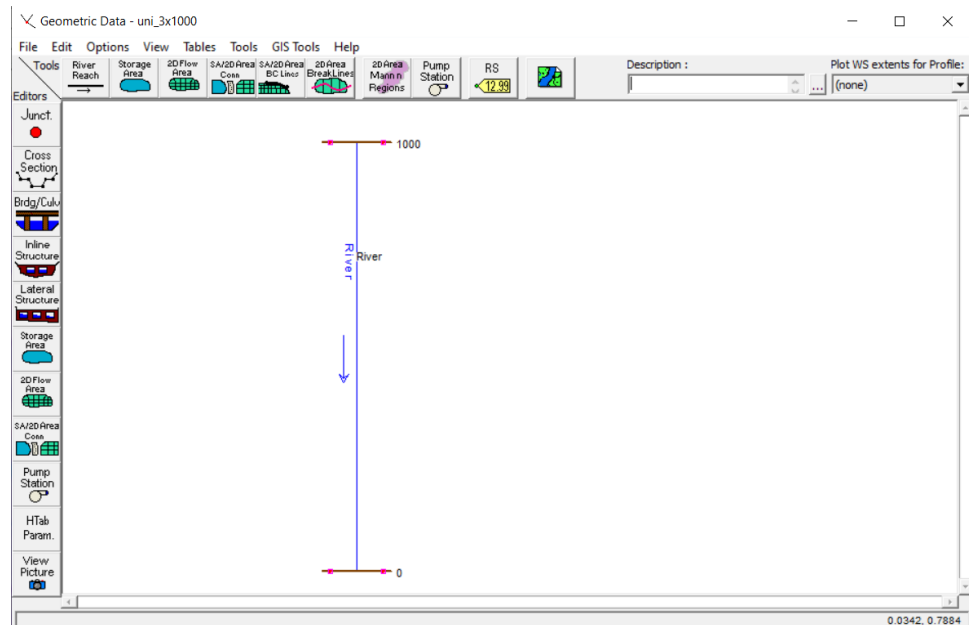
**Figura N° 7:** Interfaz del Hec-ras 5.0.7



**Fuente:** Elaboración Propia

**C.-** El primer paso para el modelamiento unidimensional es la geometría, diseñar la sección longitudinal donde indicamos las cotas de inicio y final, esto según la pendiente que le corresponde. El dibujo a continuación se realizó con una herramienta de dibujo en sentido que iba el flujo del canal, además se delimito según el área de estudio y con el sistema unidades correspondiente(m).

**Figura N° 8:** Ventana de Geometría del canal de 1 km

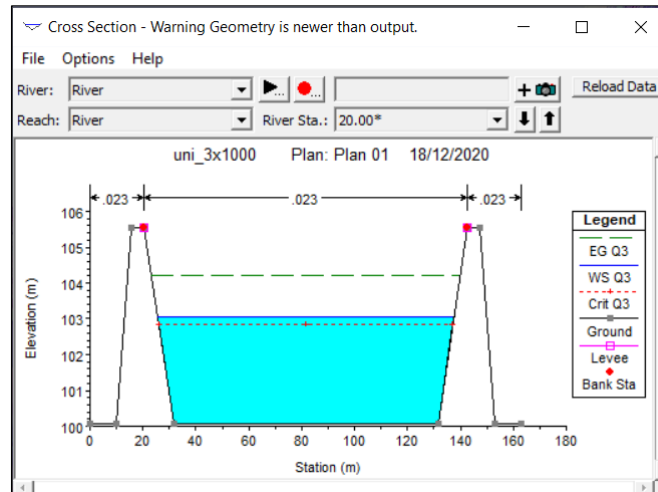


**Fuente:** Elaboración Propia

**D.-** Lo siguiente es el diseño de la sección transversal (trapezoidal) del canal que tiene una base ( $b=100$  m) y una altura de 5.5 m con un talud ( $z=2:1$ ). En la Fig. N°9 se observa la sección transversal, los

diques se encuentran en esa ubicación debido a que cumplen un rol importante en la geometría del canal con el objetivo de que no ocurran inundaciones.

**Figura N° 9: Sección Transversal del canal**



**Fuente:** Elaboración Propia

**E.-** Trabajamos con las cotas correspondientes del dique hasta la cota final del recorrido del canal ( $L=1$  km) según las pendientes correspondientes ( $s_1=0.003$ ,  $s_2=0.005$ ,  $s_3=0.007$ ,  $s_4=0.009$ ). En la Fig. N°10 es el modelamiento respecto a la pendiente  $s_1=0.003$  donde la cota de mayor elevación del canal (dique) es de 108.5

**Figura N° 10: Modelamiento respecto a la pendiente  $s_1=0.003$**

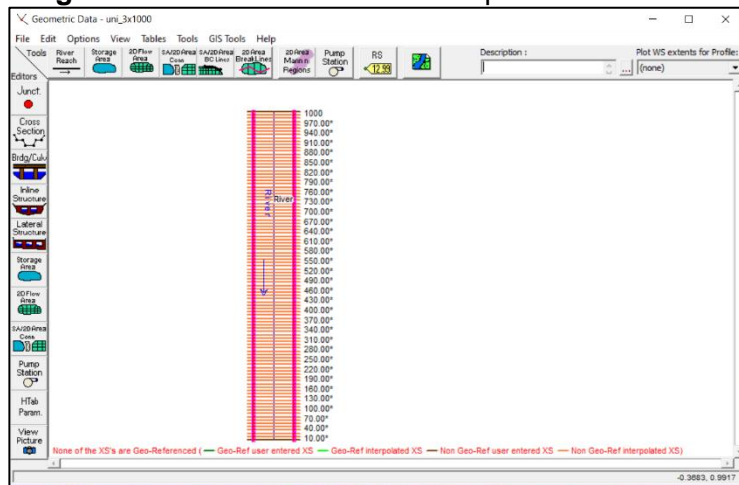
River Station	Left Sta	Left Elev	Right Sta	Right Elev
1 1000	20.5	108.5	142.5	108.5
2 990.00*	20.5	108.47	142.5	108.47
3 980.00*	20.5	108.44	142.5	108.44
4 970.00*	20.5	108.41	142.5	108.41
5 960.00*	20.5	108.38	142.5	108.38
6 950.00*	20.5	108.35	142.5	108.35
7 940.00*	20.5	108.32	142.5	108.32
8 930.00*	20.5	108.29	142.5	108.29
9 920.00*	20.5	108.26	142.5	108.26
10 910.00*	20.5	108.23	142.5	108.23
11 900.00*	20.5	108.2	142.5	108.2
12 890.00*	20.5	108.17	142.5	108.17
13 880.00*	20.5	108.14	142.5	108.14
14 870.00*	20.5	108.11	142.5	108.11
15 860.00*	20.5	108.08	142.5	108.08
16 850.00*	20.5	108.05	142.5	108.05
17 840.00*	20.5	108.02	142.5	108.02
18 830.00*	20.5	107.99	142.5	107.99
19 820.00*	20.5	107.96	142.5	107.96
20 810.00*	20.5	107.93	142.5	107.93
21 800.00*	20.5	107.9	142.5	107.9
22 790.00*	20.5	107.87	142.5	107.87
23 780.00*	20.5	107.84	142.5	107.84
24 770.00*	20.5	107.81	142.5	107.81

**Fuente:** Elaboración Propia

**F.-** Interpolación: En esta modelación se requiere comparar e interpretar los resultados de las diversas secciones, por lo que interpolamos a una cantidad de n metros y obtenemos las diferentes

secciones transversales del canal (L=1 km). De esta manera se puede analizar cómo trabaja el flujo del canal en las diferentes estaciones.

**Figura N° 11:** Geometría de canal por secciones



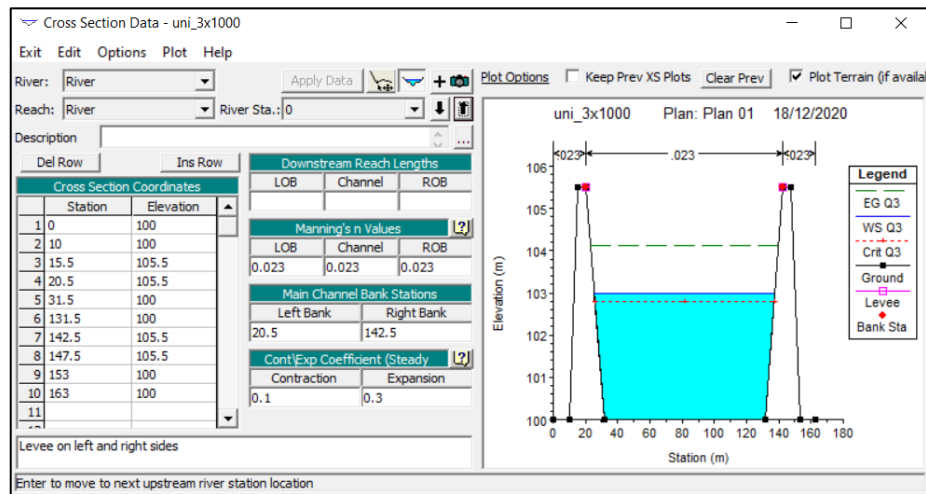
**Fuente:** Elaboración Propia

En la Fig. N° 11 se encuentra la geometría de canal que comprende el seccionamiento trasversal cada 10 m.

Al diseñar la geometría del canal hay parámetros que se debe tomar en cuenta:

- Bank station, es la planicie de inundación, para indicar el comportamiento del flujo.
- Left Bank and Right bank son puntos o coordenadas que encontramos en el eje x del plano elevation VS station
- Station: Es la estación o progresiva donde se permite evaluar el comportamiento del flujo y el estudio de sus parámetros.
- Elevation, más conocido como elevación o cota de la estructura y del flujo.

**Figura N° 12:** Parámetros de la sección transversal de la progresiva +0.000.00

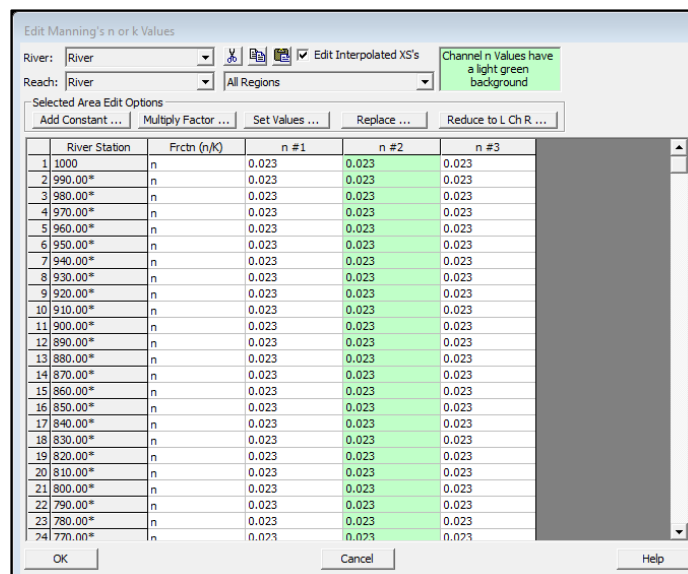


**Fuente:** Elaboración Propia

En la Fig. N° 12 encontramos la sección trasversal de la progresiva +0.00 y los diferentes parámetros digitados para dicha sección.

**G.-** Uso de suelo o Manning: seleccionar el botón de tablas y digitamos que toda la zona del canal tenga un mismo uso de suelo según el modelo en estudio respectivo. Fig. N°13. En este modelo unidimensional se utilizó según los parámetros del canal, el n Manning es 0.023 que quiere decir que es un canal en tierra, pero sin vegetación.

**Figura N° 13:** Asignación de la rugosidad



**Fuente:** Elaboración Propia

H.- En el siguiente paso es indicar las condiciones de contorno, las cuales tienen gran importancia debido a que el programa trabaja según su interpretación, correspondiente para aguas arriba y aguas abajo, que deben funcionar de manera eficaz para que el fenómeno del flujo del agua sea permanente, y siga su curso a causa del escenario propuesto. En la Fig. N°14 se observa los datos de flujo permanente del modelo unidimensional con pendiente 0.007 con una rugosidad de  $n=0.035$ , con los diferentes caudales que se encuentran en el siguiente cuadro:

**Figura N° 14: Datos del flujo**

Flow Change Location			Profile Names and Flow Rates			
River	Reach	RS	Q1	Q2	Q3	Q4
1 River	River	1000	500	1000	1500	2000

**Fuente:** Elaboración Propia

En la siguiente Fig. N°15 encontramos digitadas las condiciones de borde (aguas arriba y agua abajo). Donde encontramos que se trabaja en aguas abajo debido a que el flujo es subcrítico ( $F < 1$ ).

**Figura N° 15: Condiciones de contorno**

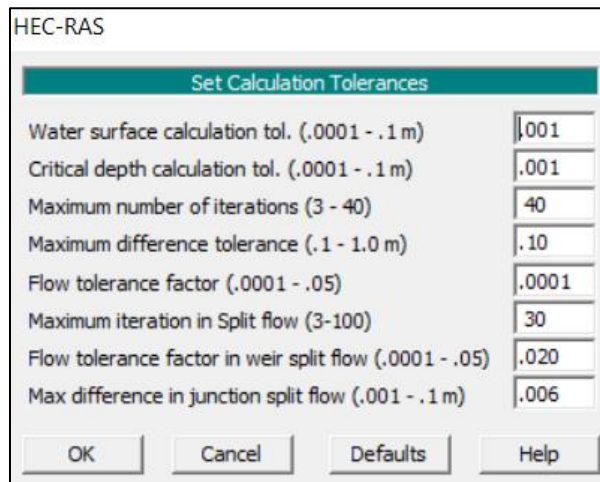
River	Reach	Profile	Upstream	Downstream
River	River	Q1		Normal Depth S = 0.007
River	River	Q2		Normal Depth S = 0.007
River	River	Q3		Normal Depth S = 0.007
River	River	Q4		Normal Depth S = 0.007

**Fuente:** Elaboración Propia



I.- Cálculo de las tolerancias para los modelos unidimensionales, si bien el programa nos brinda opciones predeterminadas, estas pueden ser modificadas según el uso y finalidad del estudio. Nuestro objeto de estudio es un canal de 100 m con un flujo permanente. Se modificaron las 3 primeras opciones de cálculo de tolerancia, puesto que estas se relacionan con el proyecto.

**Figura N° 16:** Tolerancias para los modelos unidimensionales



**Fuente:** Elaboración Propia

**Tolerancia de cálculo de la superficie del agua:** Se utiliza para comparar la diferencia entre las elevaciones de la superficie del agua calculadas y supuestas. Sea el caso que la diferencia es menor que la tolerancia, el programa asume que tiene una solución numérica válida. El valor predeterminado es 0.03.

**Tolerancia de cálculo de profundidad crítica:** Se utiliza durante el algoritmo de solución de profundidad crítica. El valor predeterminado es 0.03.

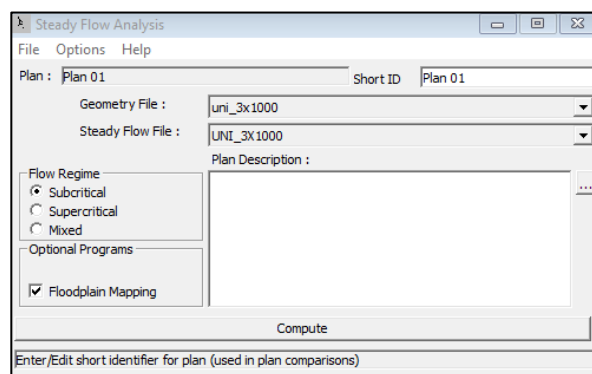
**Número máximo de iteraciones:** esta variable define el número máximo de iteraciones que hará el programa al intentar equilibrar una superficie de agua. Para mayor precisión le dimos mayor cantidad de iteraciones El valor predeterminado es 20.

**Tolerancia de diferencia máxima:** Se utiliza durante el balance de la ecuación de energía. A medida que el programa intenta equilibrar la

ecuación de energía, se guarda la solución con el error mínimo (asumido menos la superficie del agua calculada). Si el programa llega al número máximo de iteraciones sin cumplir con la tolerancia de cálculo especificada, la solución de error mínimo se compara con la tolerancia de diferencia máxima. Si la solución al error mínimo es menor que este valor, entonces el programa usa la solución del error mínimo como respuesta, emite una declaración de advertencia y luego procede con los cálculos. De esta manera se trabajó con un menor valor, para disminuir el error en los resultados de cálculo del programa. El valor predeterminado es 0.10.

**J.-** Cálculo de flujo constante, en este último paso seleccionamos la opción RUN para flujo permanente donde tendremos la opción de colocar el régimen de flujo (Subcrítico, supercrítico o mixto), la cual nos brinda los cálculos matemáticos previamente realizados para hallar el número de Froude y seleccionar el régimen correspondiente.

**Figura N° 17:** Elección del tipo del flujo



**Fuente:** Elaboración Propia

### 3.5.3. Número de Courant

Se realizaron iteraciones del Numero de Courant para los 20 escenarios del canal de 100 metros de ancho y 1 km de longitud, con la finalidad de obtener los posibles valores del tamaño y tiempo computacional necesarios para ingresar en cada modelo estudiado. Además, las velocidades se estimaron mediante la ecuación de Manning usando el software Hcanales.

En la tabla N°9 se da como ejemplo 1 de los 20 escenarios.

**Tabla N° 9:** Escenario: Caudal 1500 m<sup>3</sup>/s, S = 0.005 m/m, n = 0.023

C	v	dt	dx
0.5549	5.549	0.1	1
0.73986667	5.549	0.2	1.5
0.83235	5.549	0.3	2
0.73986667	5.549	0.4	3
0.92483333	5.549	0.5	3
0.92483333	5.549	1	6
0.79271429	5.549	1	7
0.693625	5.549	1	8
1.23311111	5.549	2	9
0.92483333	5.549	2	12
0.73986667	5.549	2	15
0.61655556	5.549	2	18
0.5549	5.549	2	20
0.92483333	5.549	3	18
0.83235	5.549	3	20
0.66588	5.549	3	25
0.89140562	5.549	4	24.9
0.79271429	5.549	4	28
0.73986667	5.549	4	30
0.63417143	5.549	4	35
0.99089286	5.549	5	28
0.92483333	5.549	5	30
0.79271429	5.549	5	35
0.693625	5.549	5	40
0.66059524	5.549	5	42
1.51336364	5.549	6	22
1.33176	5.549	6	25
1.18907143	5.549	6	28
1.1098	5.549	6	30
0.95125714	5.549	6	35
1.58542857	5.549	10	35
1.38725	5.549	10	40
1.23311111	5.549	10	45
1.1098	5.549	10	50
1.6647	5.549	12	40

Fuente: Elaboración Propia

### 3.5.4. Modelamiento Hidráulico Bidimensional con Hec-ras 5.0.7

A.- En el proyecto se propuso escenarios con diferentes características, donde los canales deberán diseñarse de manera que tengan la necesaria capacidad de conducción de agua. A continuación, en el siguiente cuadro se muestran los parámetros a utilizar para el diseño. Tabla N°10 Q, s, n.

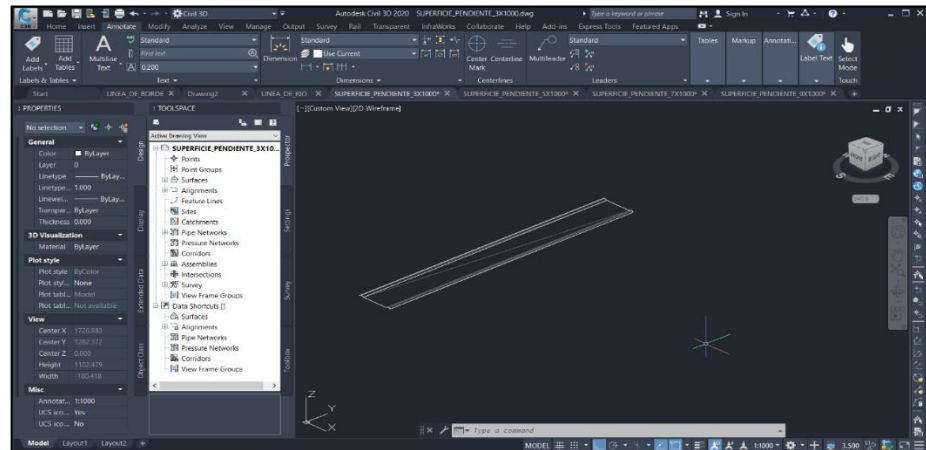
**Tabla N° 10:** Datos Iniciales

<b>Pendiente (s)</b>	<b>Rugosidad (n)</b>	<b>Caudal (Q)</b>
0.003	0.023	500 m <sup>3</sup> /s
		1500 m <sup>3</sup> /s
	0.03	1000 m <sup>3</sup> /s
		2000 m <sup>3</sup> /s
	0.035	1500 m <sup>3</sup> /s
	0.005	0.023
1500 m <sup>3</sup> /s		
0.03		1000 m <sup>3</sup> /s
		2000 m <sup>3</sup> /s
0.035		1500 m <sup>3</sup> /s
0.007		0.023
	2000 m <sup>3</sup> /s	
	0.03	1000 m <sup>3</sup> /s
		1500 m <sup>3</sup> /s
	0.035	1500 m <sup>3</sup> /s
	0.009	0.023
1500 m <sup>3</sup> /s		
0.03		1000 m <sup>3</sup> /s
		2000 m <sup>3</sup> /s
0.035		1500 m <sup>3</sup> /s

**Fuente:** Elaboración Propia

**B.-** Iniciamos haciendo un pre-proceso en AutoCAD Civil 3D, donde se crea la superficie a partir de polilíneas con nivel, dando la distancia de las curvas de nivel 1m 5m para esto se crearon 4 superficies correspondientes a las pendientes: 0.003, 0.005, 0.007, 0.009.

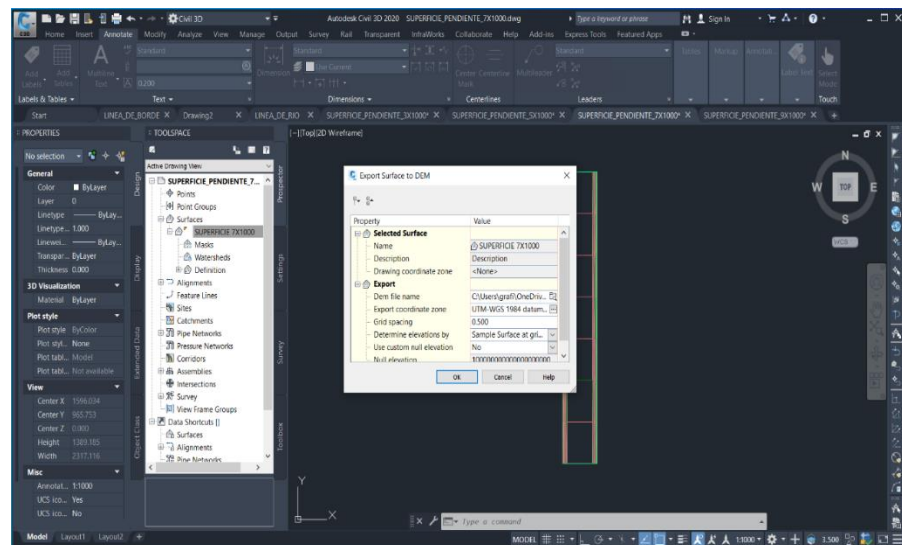
**Figura N° 18:** Creación de la superficie del canal



**Fuente:** Elaboración Propia

**C.-** Posterior a esto, vamos a exportar las superficies como Raster para esto utilizamos la herramienta Export Surface to DEM (Digital Elevation Model), elegimos el espaciamiento de la celda en 0.5m y le asignamos unas coordenadas de referencia para más adelante poder agregar elementos sobre la superficie en Hec Ras. Luego lo guardamos en una carpeta específica.

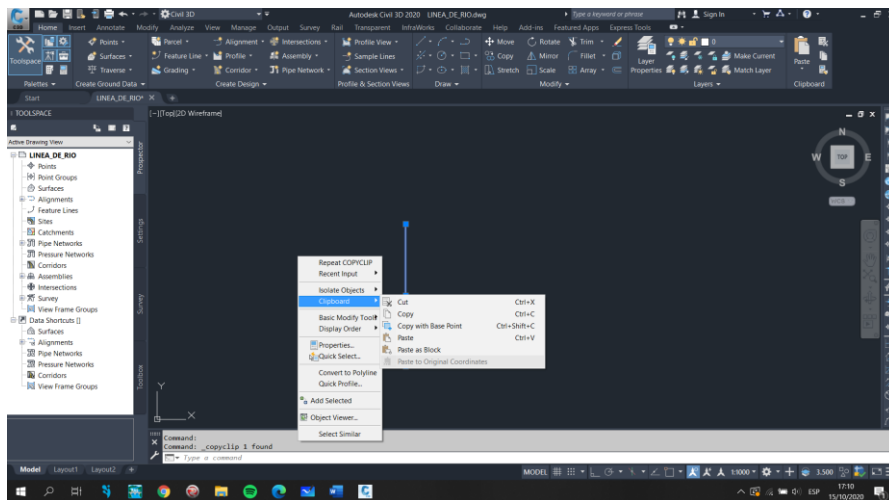
**Figura N° 19 :** Exportación de la superficie



**Fuente:** Elaboración Propia

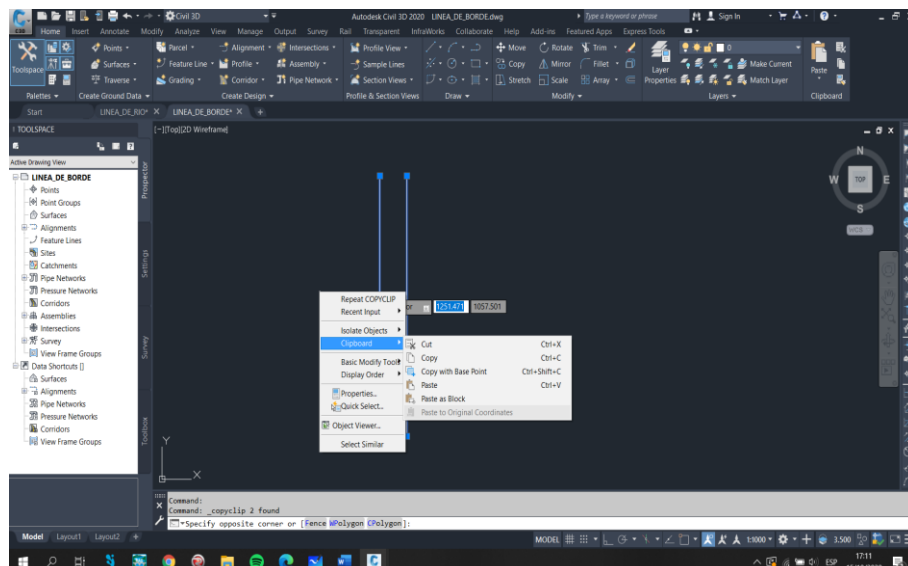
D.- Luego de esto, sobre esta superficie crearemos elementos en AutoCAD como: el eje del canal, las líneas que servirán como Break Lines, las líneas que servirán como condiciones de contorno (Boundary Conditions), y también el área 2D que se utilizará para el modelo; para luego exportarlos a Hec Ras. Para esto luego de dibujar cada elemento se copian con coordenadas originales en archivos separados y se guardan en una carpeta específica.

Figura N° 20: Creación de elementos del canal



Fuente: Elaboración Propia

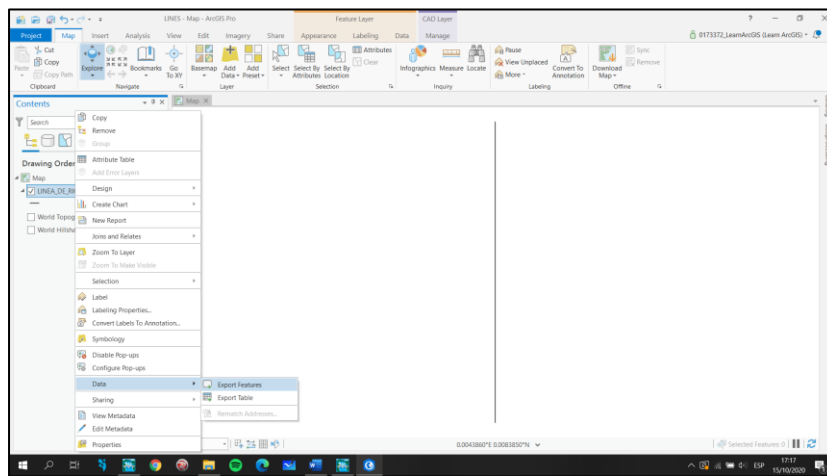
Figura N° 21: Creación de elementos del canal



Fuente: Elaboración Propia

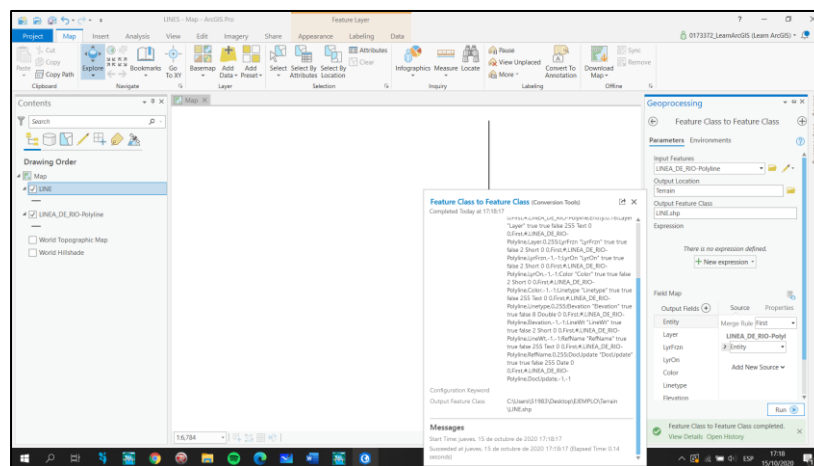
E.- Luego de crear los elementos, abrimos ArcGis Pro y arrastramos los documentos en formato DWG al mapa del programa para convertir los elementos en Shapefile y que el Hec Ras los pueda leer, para esto usamos la herramienta “Export Features” y elegimos la misma coordenada usada para crear la superficie en Civil 3D, luego elegimos la carpeta donde se guardará el shapefile y le damos en el botón “Run”.

**Figura N° 22: Convertir elementos en shapefile**



**Fuente: Elaboración Propia**

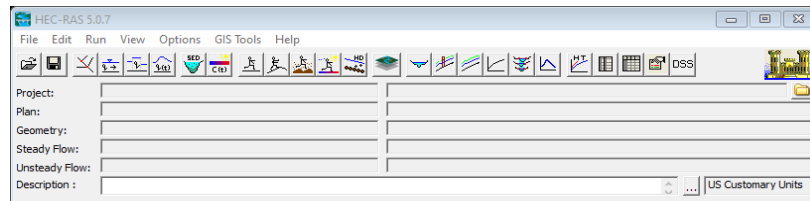
**Figura N° 23: Convertir elementos en shapefile**



**Fuente: Elaboración Propia**

**F.-** Posteriormente abrimos el programa HEC-RAS 5.0.7, necesitamos guardar el proyecto, para poder operarlo, de esta manera se guarda una carpeta con todos los cálculos y resultados, según la geometría y parámetros utilizados en el modelo de estudio.

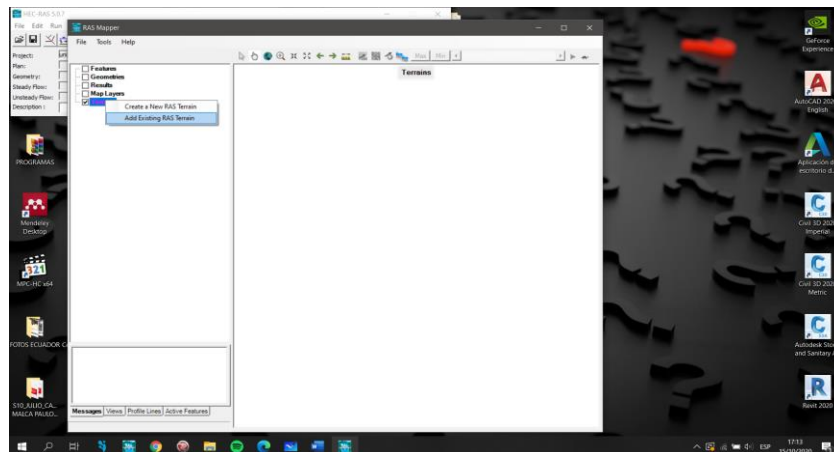
**Figura N° 24:** Interfaz del software Hec-ras 5.0.7



**Fuente:** Elaboración Propia

**G.-** Luego iremos a la novedosa herramienta Ras Mapper donde vamos a cargar el archivo “.tif” que es nuestro DEM, para esto usamos la herramienta “Create New RAS Terrain” y usamos el “+” en la ventana que nos aparece para buscar y cargar el archivo que contiene la superficie que hemos creado en AutoCAD Civil 3D y damos en el botón “Create”.

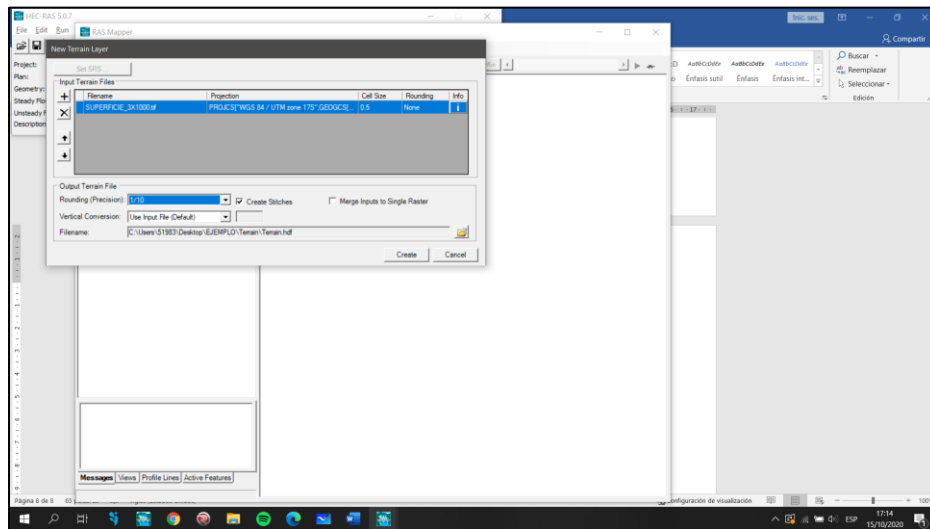
**Figura N° 25:** Interfaz del Ras Mapper



**Fuente:** Elaboración Propia

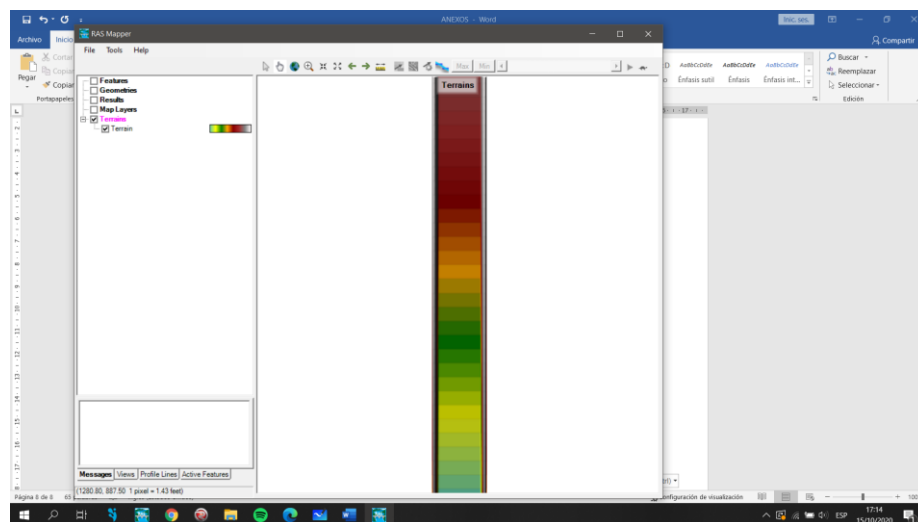


**Figura N° 26: Abrir el archivo “.tif”**



**Fuente: Elaboración Propia**

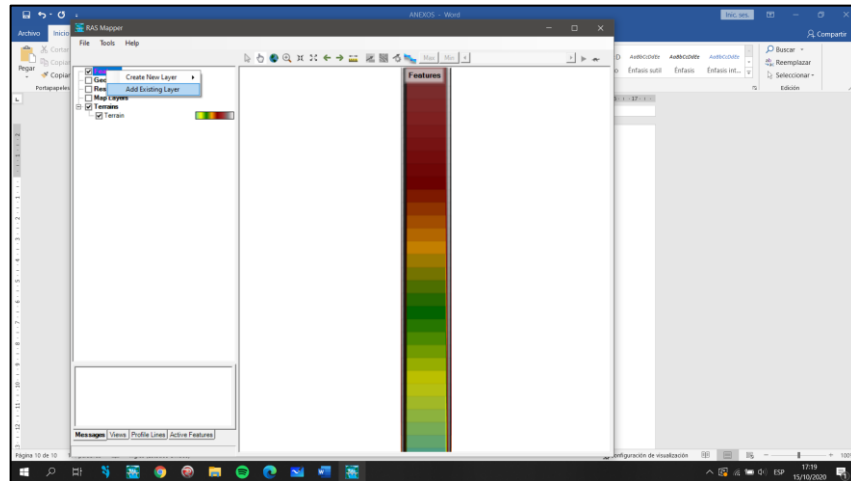
**Figura N° 27: Opción Terrain**



**Fuente: Elaboración Propia**

H.- Tenemos que cargar al Hec Ras, los shapefile que creamos en Civil 3D para esto, iremos a la herramienta “Add Existing Layer” y buscamos todos los archivos creados.

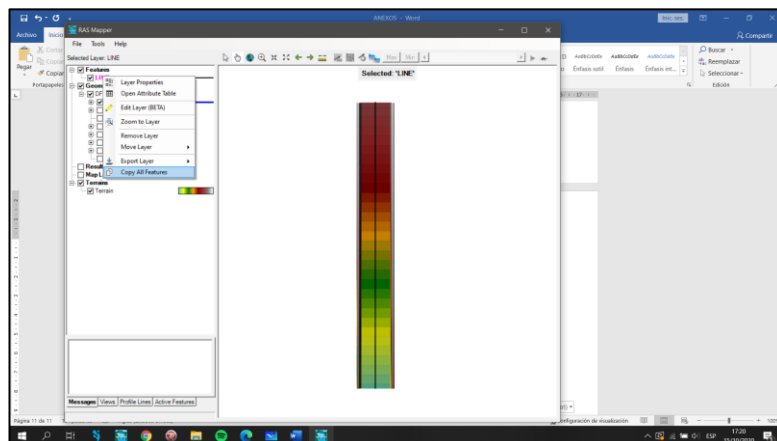
**Figura N° 28:** Herramienta “Add Existing Layer”



**Fuente:** Elaboración Propia

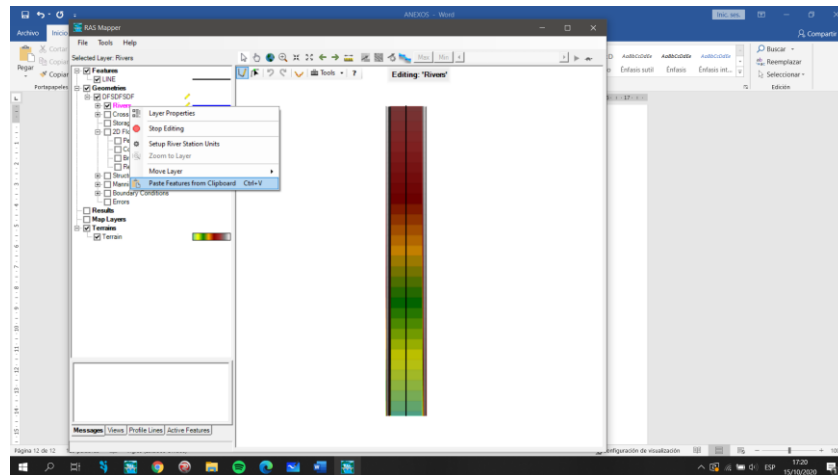
I.- Luego con los elementos cargados, procedemos crear una nueva geometría, copiamos y pegamos cada elemento en donde corresponde.

**Figura N° 29:** Opción crear y copiar



**Fuente:** Elaboración Propia

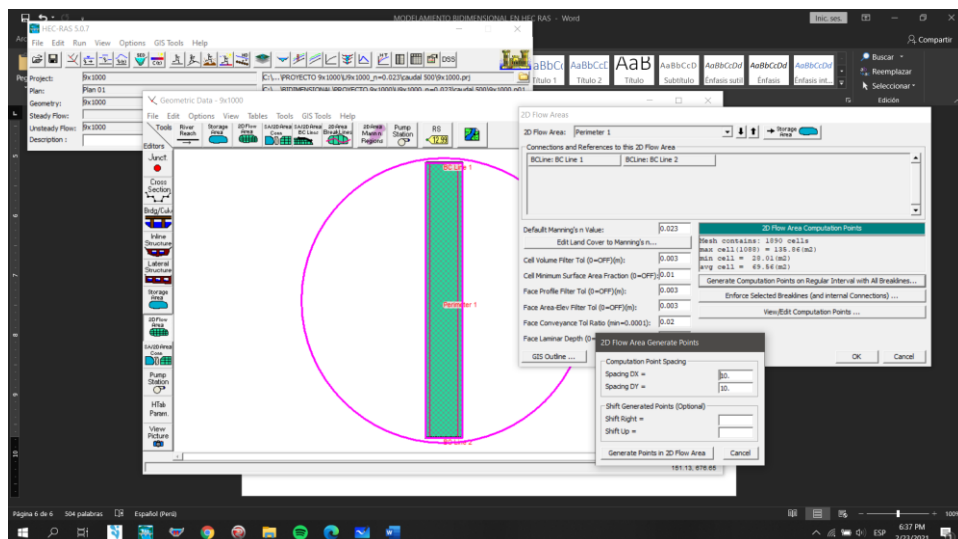
**Figura N° 30:** Opción Paste features from clipboard



**Fuente:** Elaboración Propia

J.- Luego en la ventana de Geometría damos click sobre el área 2D para editar la geometría, luego nos aparecerá una ventana donde podremos agregar el valor de la rugosidad de Manning para el modelo, podremos agregar el espaciamiento de los puntos que van a constituir la malla computacional, y generar la malla computacional. Guardamos los cambios y cerramos la ventana.

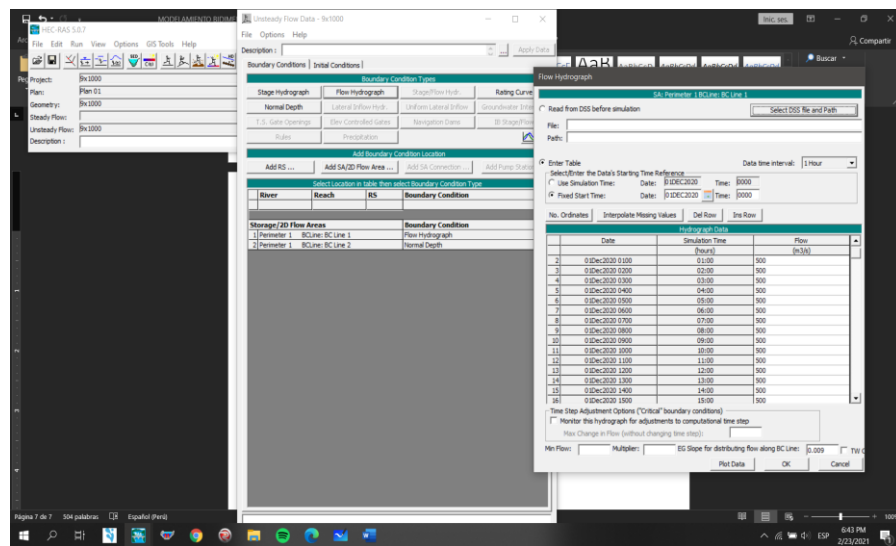
**Figura N° 31:** Edición de la geometría



**Fuente:** Elaboración Propia

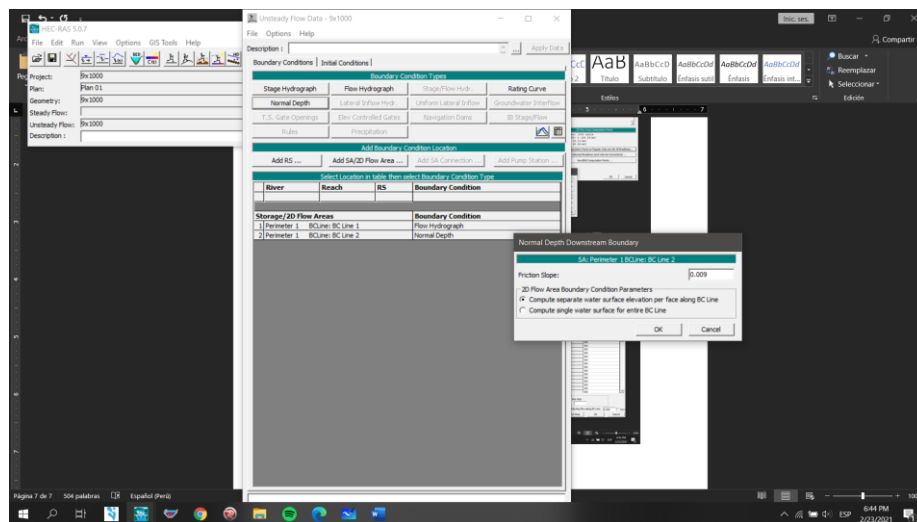
**K.-** Posteriormente nos vamos al menú “Edit”, luego a la pestaña “unsteady Flow data” para entrar a la ventana que nos permitirá agregar las condiciones de contorno tanto aguas arriba como aguas abajo. Para aguas arriba elegiremos la opción “Flow Hydrograph” y agregamos un hidrograma uniforme con el caudal que estamos analizando. Ahora para la condición de borde aguas abajo seleccionamos la opción “Normal Depth” donde agregaremos la pendiente del terreno que estamos evaluando.

**Figura N° 32:** Opción Unsteady Flow data



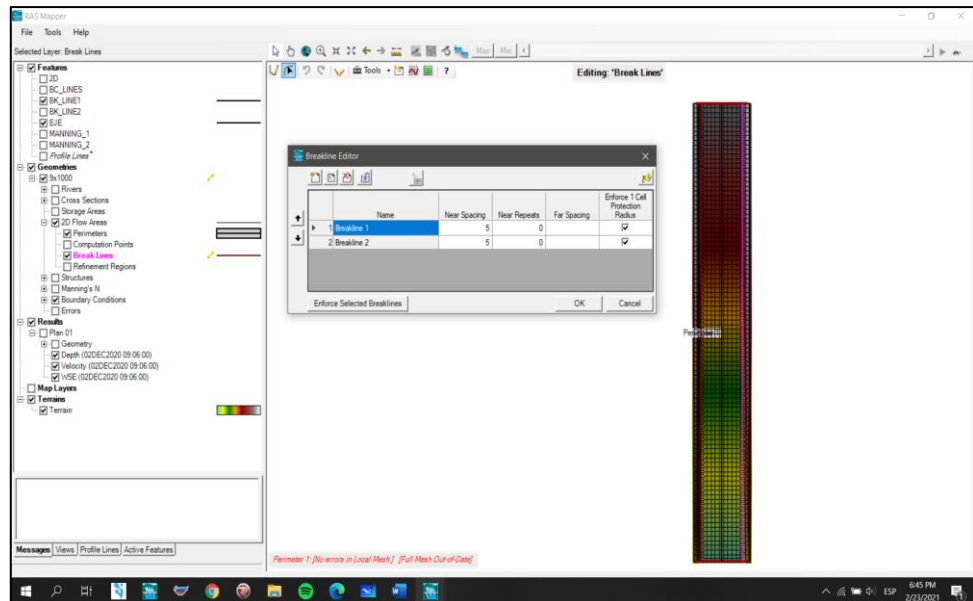
**Fuente:** Elaboración Propia

**Figura N° 33:** Opción Boundary conditions



**Fuente:** Elaboración Propia

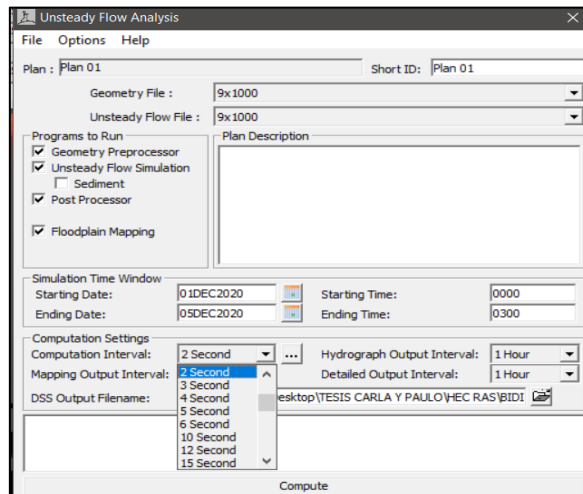
**L.-** Luego tenemos que configurar un tamaño más pequeño para evaluar con más precisión los cambios de nivel en los bordes del modelo para esto tenemos que hacer la malla más pequeña en esas zonas. Entonces vamos a abrir nuevamente la herramienta RAS Mapper e iremos al elemento “Break Lines” que hemos agregado anteriormente y con el anticlick abriremos el menú de edición donde podremos cambiar el tamaño de la malla adyacente al break line.



**Fuente:** Elaboración Propia

**M.-** Como penúltimo paso cerramos el RAS Mapper guardando los cambios y nos desplazamos al menú “Run” y entramos en la opción “Unsteady Flow Analysis” donde nos aparecerá la ventana de análisis donde seleccionamos todos los recuadros de análisis menos el de Sedimentos, luego elegimos el tiempo computacional con el que vamos a evaluar el modelo.

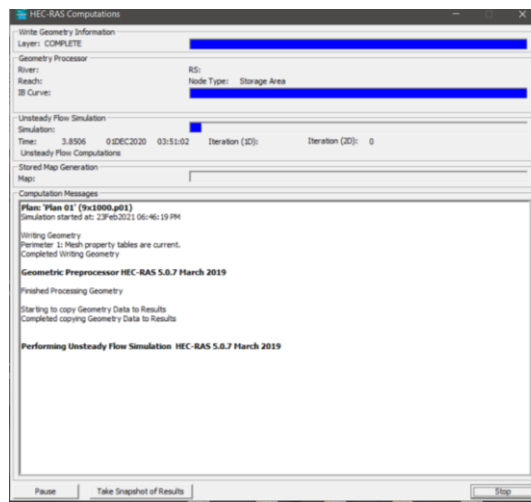
**Figura N° 34:** Corrida del modelo



**Fuente:** Elaboración Propia

**N.-** Por último, damos click en el botón “Compute”, nos saldrá la ventana de cómputo y esperamos que el programa termine de evaluar nuestro modelo.

**Figura N° 35:** Computar el modelo



**Fuente:** Elaboración Propia

### 3.5.5. Modelamiento Bidimensional en Iber

A.- El programa IBER sirve para la simulación del movimiento de agua, donde se pueden realizar modelos numéricos hidráulicos, además cálculo del flujo de un río que en una dimensión no se realizan correctamente, y dando estabilidad numérica al régimen variable, obteniendo resultados con mayor precisión, un modelo bidimensional y tiempo computacional. A continuación, los siguientes 20 modelos propuestos que se trabajó en el programa Iber.

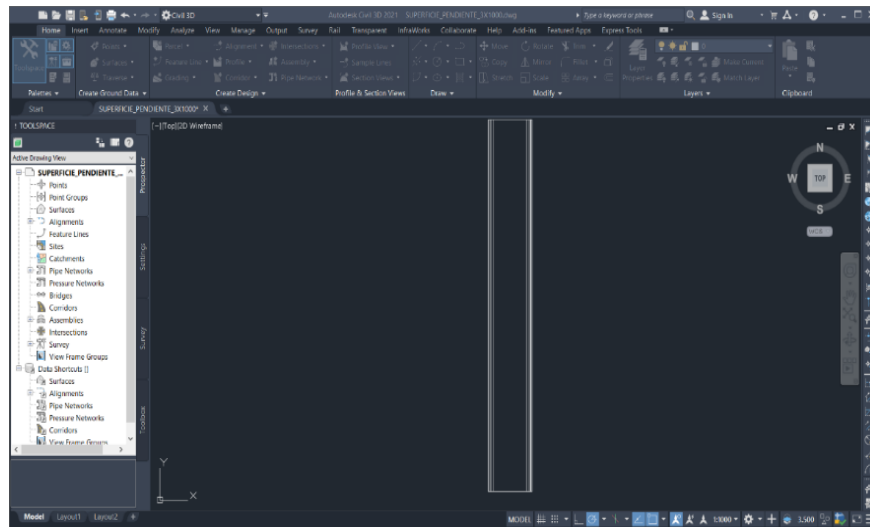
Tabla N° 11: Datos Iniciales

Pendiente (s)	Rugosidad (n)	Caudal (Q)
0.003	0.023	500 m <sup>3</sup> /s
		1500 m <sup>3</sup> /s
	0.03	1000 m <sup>3</sup> /s
		2000 m <sup>3</sup> /s
	0.035	1500 m <sup>3</sup> /s
	0.005	0.023
1500 m <sup>3</sup> /s		
0.03		1000 m <sup>3</sup> /s
		2000 m <sup>3</sup> /s
0.035		1500 m <sup>3</sup> /s
0.007		0.023
	2000 m <sup>3</sup> /s	
	0.03	1000 m <sup>3</sup> /s
		1500 m <sup>3</sup> /s
	0.035	1500 m <sup>3</sup> /s
	0.009	0.023
1500 m <sup>3</sup> /s		
0.03		1000 m <sup>3</sup> /s
		2000 m <sup>3</sup> /s
0.035		1500 m <sup>3</sup> /s

Fuente: Elaboración Propia

**B.-** Para trabajar en el programa Iber, nuestro modelo estaba previamente diseñado en Civil 3D, donde nos permitió diseñar el canal con su respectiva pendiente y cotas. Exportamos el modelo en el formato DXF.

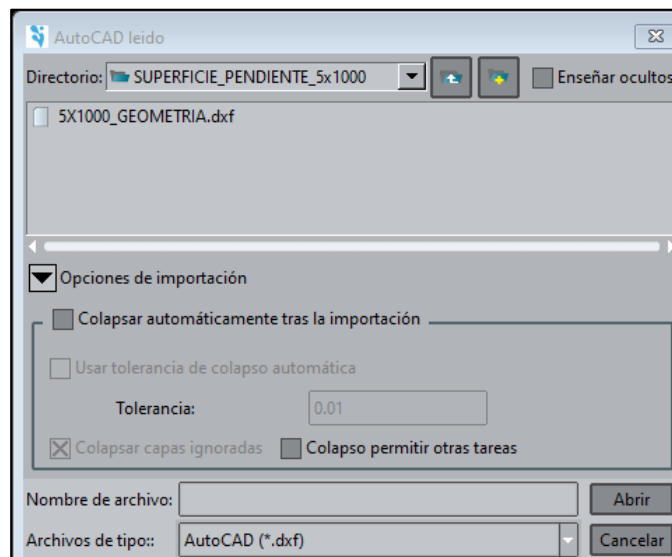
**Figura N° 36:** Creación de la superficie del canal



**Fuente:** Elaboración Propia

**C.-** Al igual que los anteriores programas, en Iber guardamos el proyecto de modelo bidimensional en una carpeta, donde se almacenan toda la data. Lo siguiente es importar el archivo DXF, con el diseño del canal.

**Figura N° 37:** Importar el archivo DXF

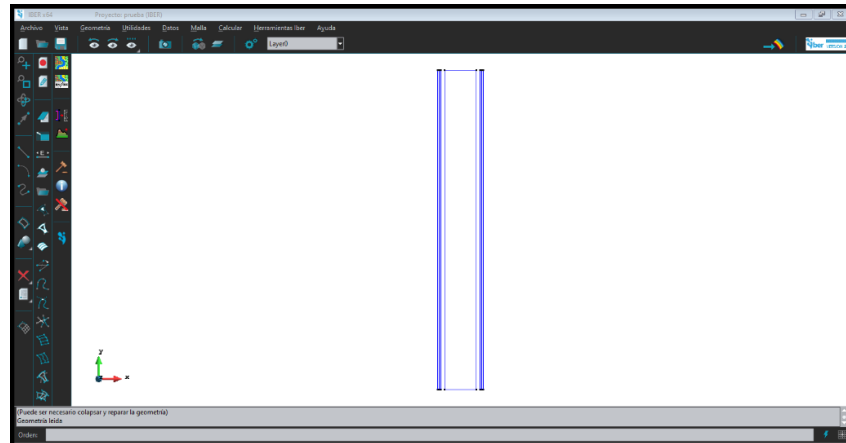


**Fuente:** Elaboración Propia



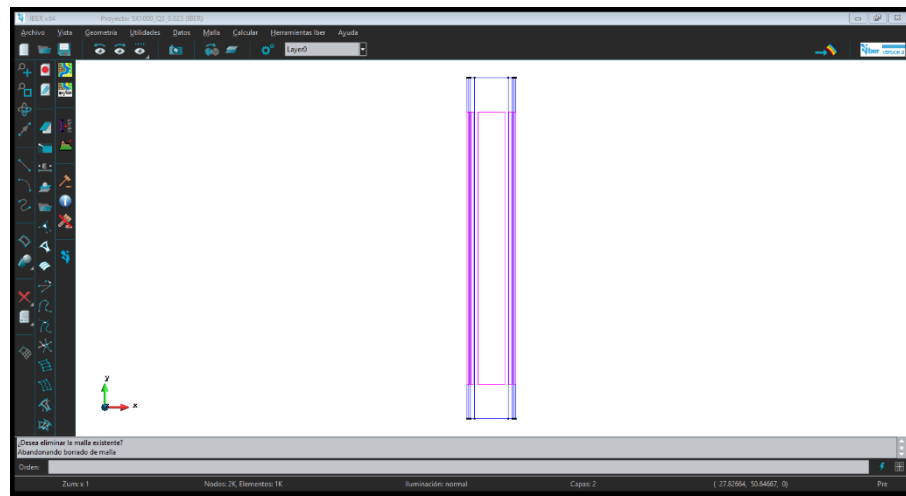
D.- Utilizamos el comando colapsar, debido a que IBER opera con puntos y líneas, por lo tanto, nos permitió unir puntos y crear la superficie de nuestro diseño.

**Figura N° 38:** Colapsar el modelo



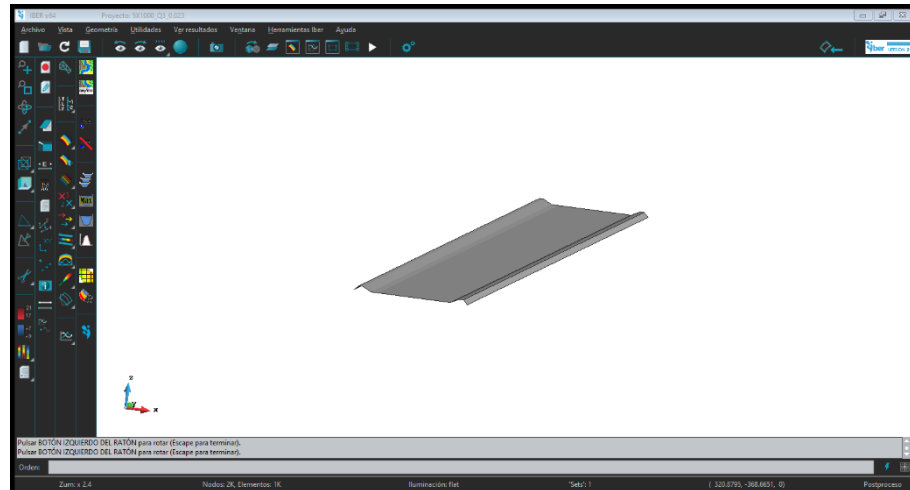
**Fuente:** Elaboración Propia

**Figura N° 39:** Superficie creada del canal



**Fuente:** Elaboración Propia

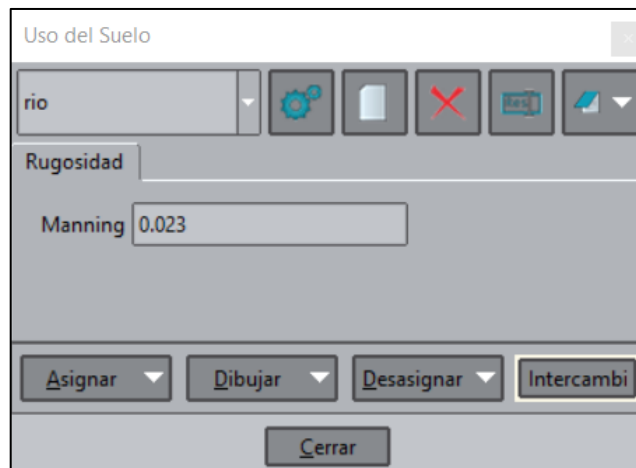
**Figura N° 40:** Vista o perspectiva del canal de 1km



**Fuente:** Elaboración Propia

**E.-** Uso de suelo o también conocido como Manning (n), en nuestro canal el Manning está en toda la zona.

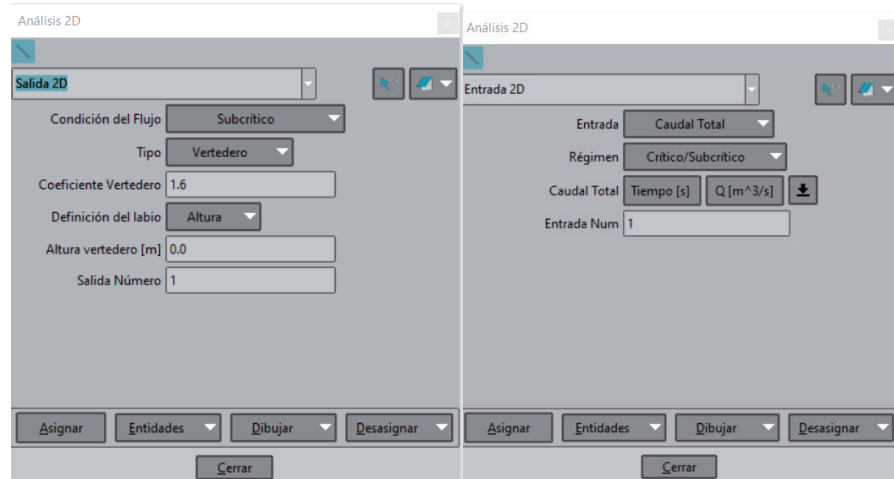
**Figura N° 41:** Asignación de la rugosidad



**Fuente:** Elaboración Propia

**F.-** Asignar las condiciones de contorno, esta va sujeta al régimen de flujo que tenga el modelo, según el número de Froude que puede ser, subcrítico, supercrítico o mixto. De las cuales una de ellas es acorde con el modelo, y se tienen diferentes variables operativas para cada una.

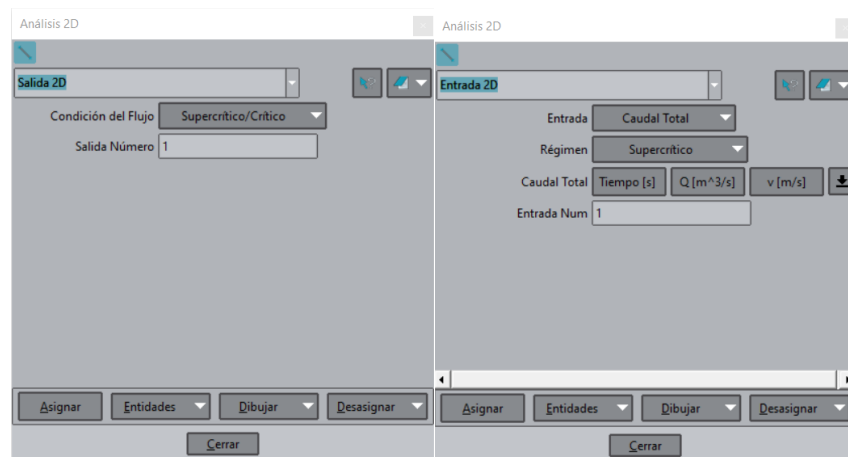
**Figura N° 42:** Asignación de las condiciones de contorno



**Fuente:** Elaboración Propia

**G.-** Presentar las condiciones de contorno aguas arriba y aguas abajo, de las cuales presenta el modelo en estudio, en esta ocasión el modelo tiene un régimen de flujo subcrítico, donde registran diferentes parámetros exclusivos para el modelo hidráulico.

**Figura N° 43:** Condiciones de contorno aguas arriba y aguas abajo

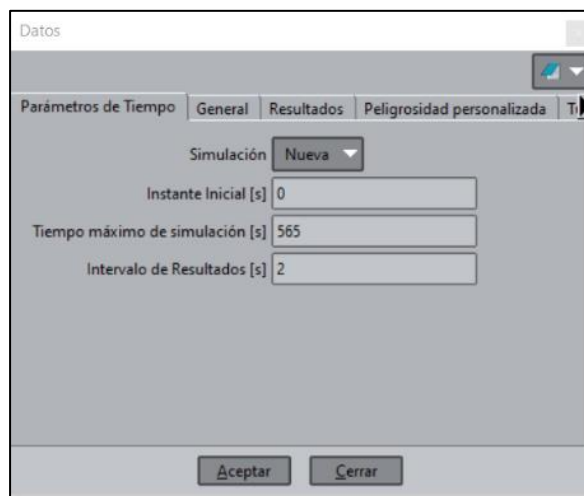


**Fuente:** Elaboración Propia

En la Fig.N°43 las condiciones de contorno en la entrada y salida del flujo son diferentes a las anteriores, esto quiere decir que el número de Froude es mayor a 1 y sigue un régimen supercrítico.

**H.-** Colocar el intervalo de resultados y tiempo de simulación son algunos de los pasos más importantes debido a que te basas en el cálculo de N° de Courant, las cuales tienen como variable dependiente la malla y tiempo computacional.

**Figura N° 44:** Asignar el tiempo de simulación



The image shows a software window titled "Datos" with a tabbed interface. The active tab is "Parámetros de Tiempo". Other tabs include "General", "Resultados", "Peligrosidad personalizada", and "Ti". The "Simulación" dropdown menu is set to "Nueva". Below it, there are three input fields: "Instante Inicial [s]" with the value "0", "Tiempo máximo de simulación [s]" with the value "565", and "Intervalo de Resultados [s]" with the value "2". At the bottom of the window, there are two buttons: "Aceptar" and "Cerrar".

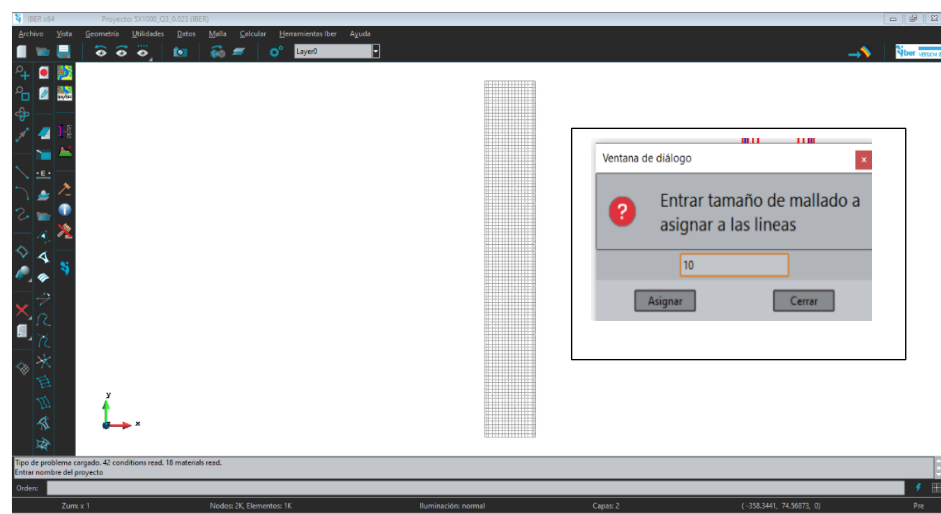
**Fuente:** Elaboración Propia

I.- Identificar el tamaño de malla computacional, este va relacionado al N° de Courant y tiempo computacional. Tenemos dos tipos de malla, estructurada y no estructurada.

El software fue diseñado para usar mallas computacionales no estructuradas, pero también puede manejar mallas estructuradas. Cuando una malla es estructurada, el software aprovecha las celdas que son ortogonales entre sí (es decir, esto simplifica algunos de los cálculos necesarios). Esto significa que las celdas computacionales pueden ser triángulos, cuadrados, rectángulos o incluso elementos de cinco y seis lados (el modelo está limitado a elementos de hasta ocho lados). Las mallas estructuradas bien hechas, pueden dar lugar a mejor convergencia y precisión que las mallas no estructuradas

La malla no estructurada puede estar formada por elementos de formas mucho más diversas, esto sucede cuando la conectividad no es trivial. Sin embargo, estas pueden adaptarse a geometrías más complejas. La malla puede ser una mezcla de formas y tamaños de celdas. La malla computacional no necesita ser ortogonal, pero si la malla es ortogonal, la discretización numérica se simplifica y es más eficiente.

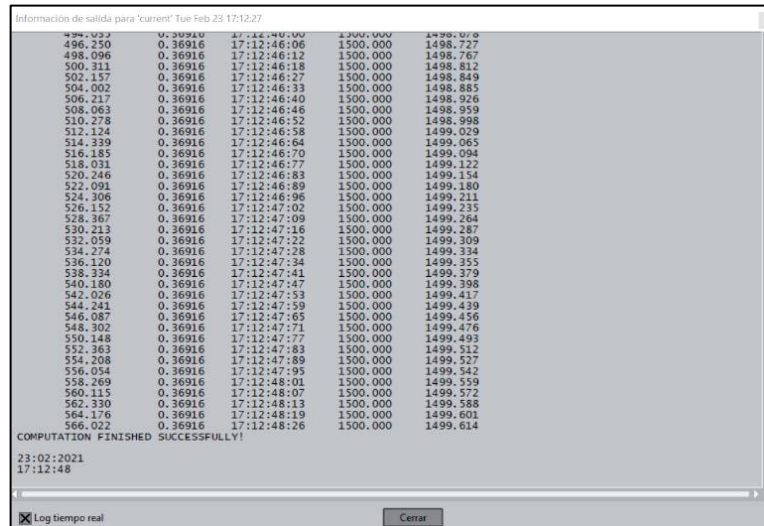
**Figura N° 45:** Seleccionamos la malla estructurada y el tamaño de malla de 10 m debido a que obtuvimos resultados con mayor precisión.



**Fuente:** Elaboración Propia

**J.-** Seleccionamos el icono de calcular, donde procesa los datos registrados en el programa y evalúa el objeto de estudio, el canal de 1 km.

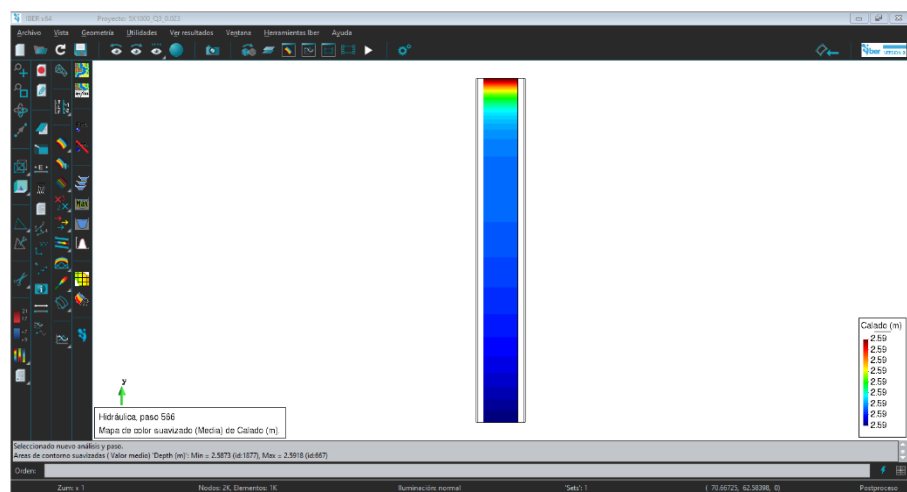
**Figura N° 46:** Iniciamos el cálculo



**Fuente:** Elaboración Propia

**K.-** Para finalizar nos vamos al Post proceso, donde obtendremos los resultados como el perfil de flujo, la simulación del movimiento del agua, los datos como el tirante, velocidad, etc.

**Figura N° 47:** Post proceso



**Fuente:** Elaboración Propia

## IV. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

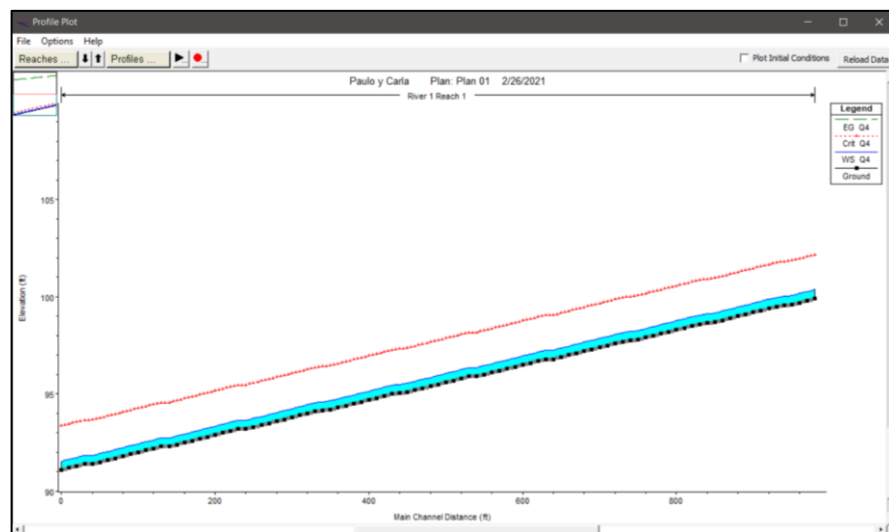
### 4.1. Particularidades de cada modelo

#### 4.1.1. Modelo unidimensional HEC-RAS

El modelo unidimensional, es el modelo hidrodinámico más sencillo de realizar ya que evalúa el flujo en un solo sentido, en las diferentes secciones del canal. Pero esto no quiere decir que no tenga ciertas complicaciones, las cuales son:

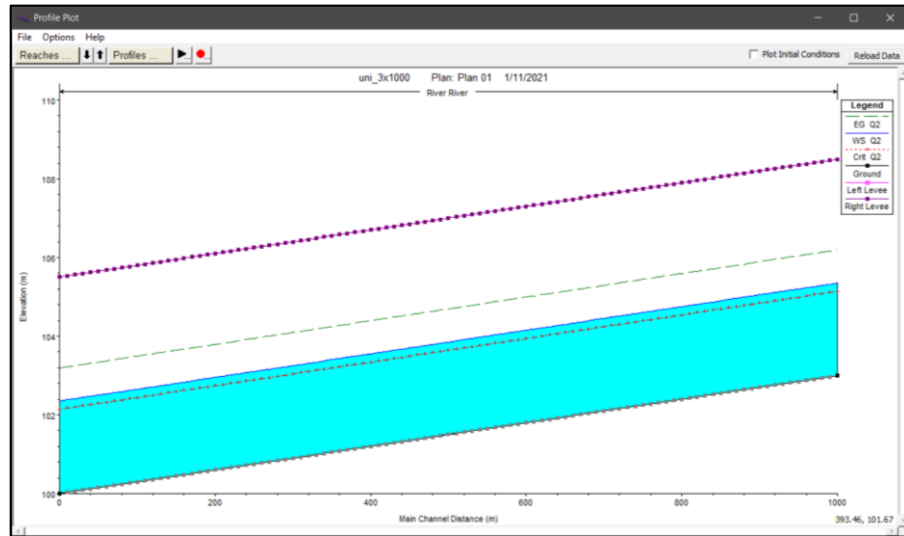
- Cuando se diseña un canal regular, la mejor decisión es usar las herramientas de dibujo que posee Hec Ras en la ventana Geometric Data, y así evitarse el problema de cargar un DEM que podría significar problemas si la resolución no es la adecuada formando una especie de desniveles. En las siguientes figuras se muestran una comparación entre ambos métodos para diseñar el flujo del canal.

**Figura N° 48:** Canal elaborado con un DEM con poca resolución



Fuente: Elaboración Propia

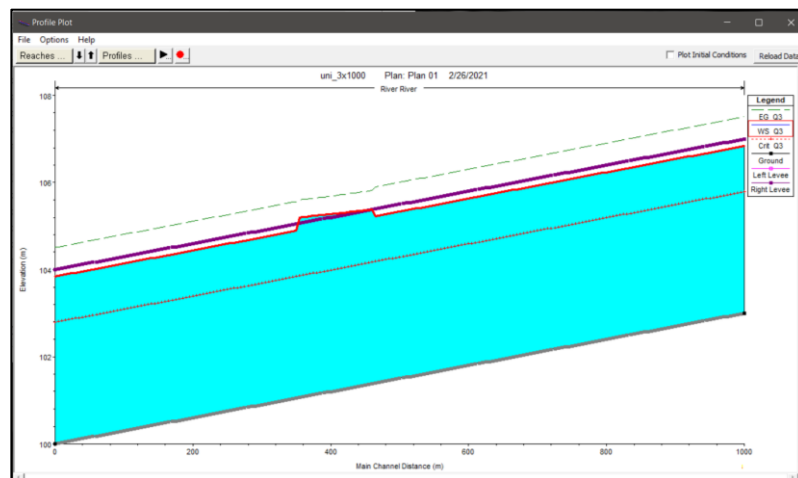
**Figura N° 49:** Canal elaborado con las herramientas de dibujo de Hec Ras



**Fuente:** Elaboración Propia

- La distancia entre las secciones transversales tiene que ser la acertada, para no generar problemas. Se recomienda usar secciones más pequeñas solo en regiones que consideramos que se necesita rescatar más información como: cambio de pendientes, curvas, irregularidades en el terreno, etc.
- También es importante al modelar un canal verificar la altura de los diques y dejar un margen libre considerable, porque cuando el tirante del flujo está cerca al límite de la altura del dique, genera inestabilidad en el modelo.

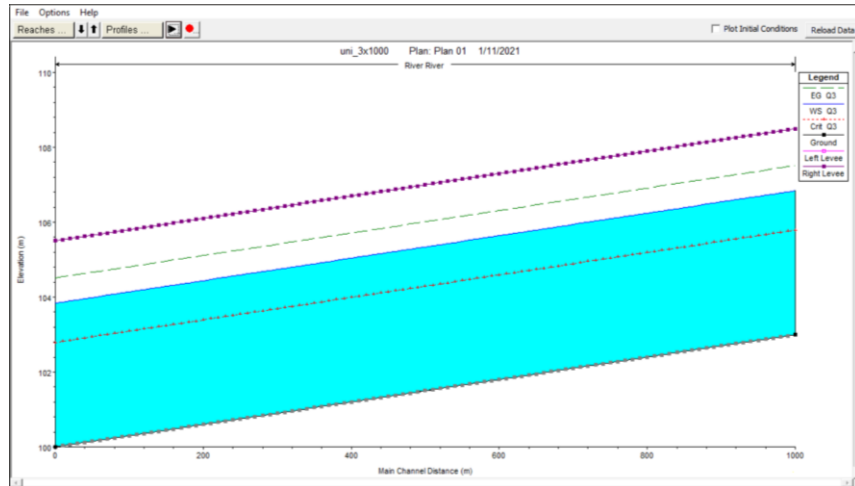
**Figura N° 50:** Tirante del flujo = 3.84 m, Altura de diques = 4.00m



**Fuente:** Elaboración Propia



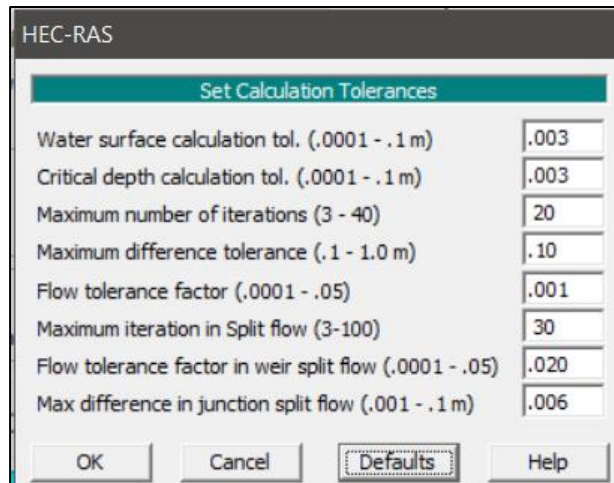
**Figura N° 51:** Tirante del flujo = 3.84 m, Altura de diques = 5.50 m



**Fuente:** Elaboración Propia

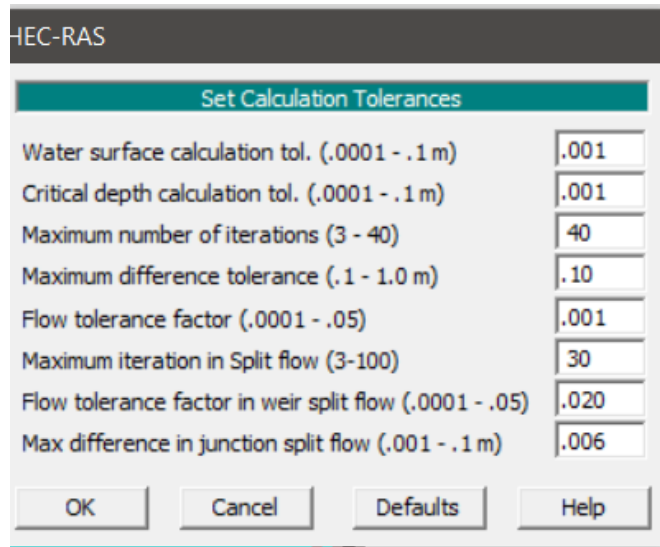
- Es importante decir que unas tolerancias de cálculo muy grandes podrían generar resultados erróneos. Ahora con los computadores actuales aumentar las tolerancias de cálculo no tiene mucho sentido. Lo más recomendable es disminuir el valor por defecto y aumentar las iteraciones de cálculo. En este caso solo se modificaron 3 tolerancias.

**Figura N° 52:** Tolerancias de Calculo por defecto.



**Fuente:** Elaboración Propia

**Figura N° 53:** Tolerancias de cálculo modificadas



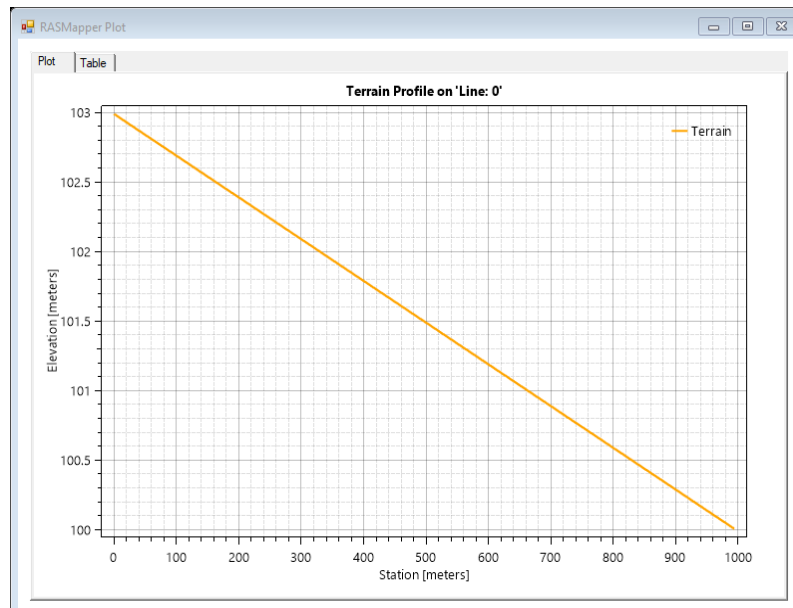
**Fuente:** Elaboración Propia

#### **4.1.2. Modelamiento Bidimensional HEC-RAS**

El modelo bidimensional de Hec Ras utiliza la ecuación de la onda difusa para resolver las ecuaciones de Saint Venant en dos dimensiones. Este método se ejecuta con un ráster que cuenta con las diferentes características del canal en estudio, donde el tamaño de malla y tiempo computacional son variables que intervienen directamente en la simulación del flujo. Sin embargo, se han contado con algunas particularidades al trabajar con los modelos bidimensionales.

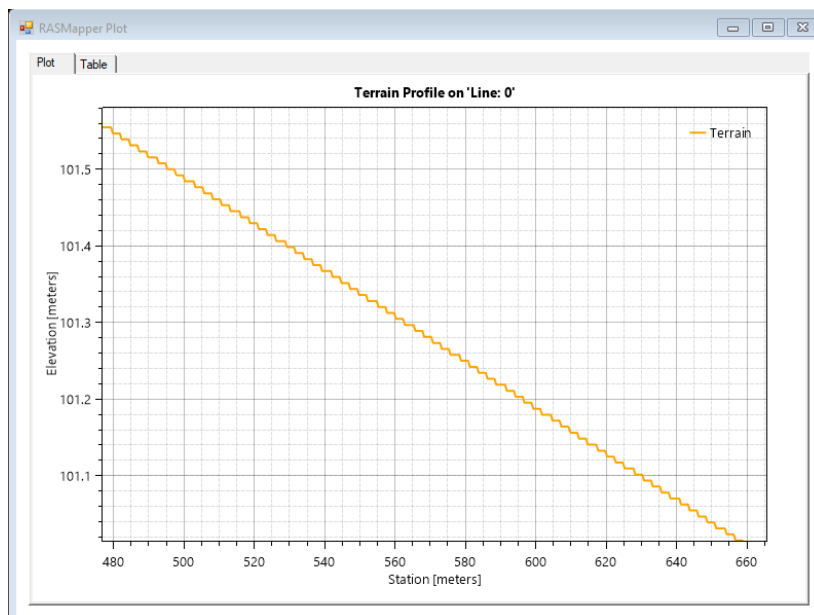
- La herramienta Geometric Preprocessor del Hec Ras crea perfiles y parámetros hidrológicos para cada cara de celda computacional, lo que permite usar tamaños de malla más amplios sin perder mucha información; pero al hacer el perfil, el programa toma los datos del ráster de superficie, lo que formará una especie de escalinatas más amplias o pequeñas dependiendo de la información del ráster. Esto provocará error en los cálculos de tirante del flujo.

**Figura N° 54:** Imagen del perfil del terreno en Ras Mapper



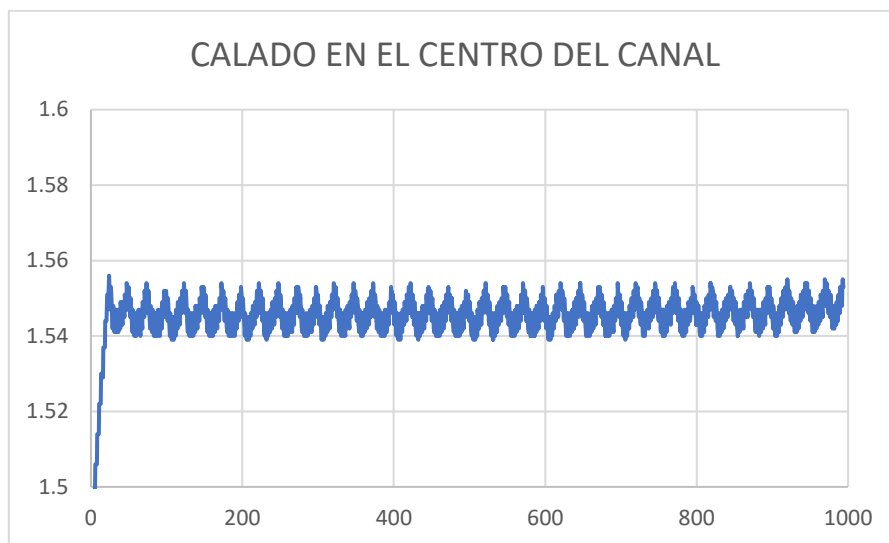
**Fuente:** Elaboración Propia

**Figura N° 55:** Imagen del perfil del terreno a una escala mayor



**Fuente:** Elaboración Propia

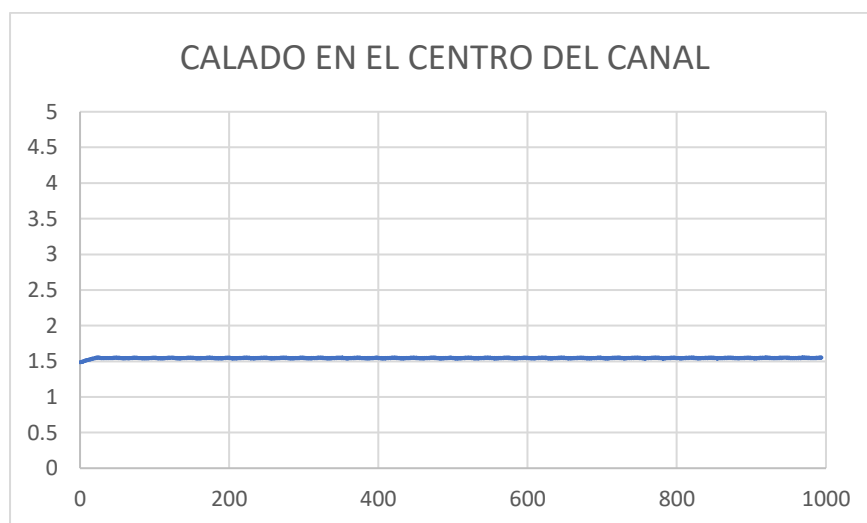
**Figura N° 56:** Gráfico de resultados obtenidos a partir del ráster con un intervalo en el eje Y de 1.5-1.6



**Fuente:** Elaboración Propia

- Las escalinatas que forma el ráster, producen un error en el cálculo de resultados que, de acuerdo con lo analizado, la variación de estos resultados es aproximadamente el doble de la variación del terreno, siendo esta 0.007m y la variación de los resultados entre 0.012 y 0.015; lo que no simboliza un error significativo ya que es mucho menos del 1% del promedio de los resultados.

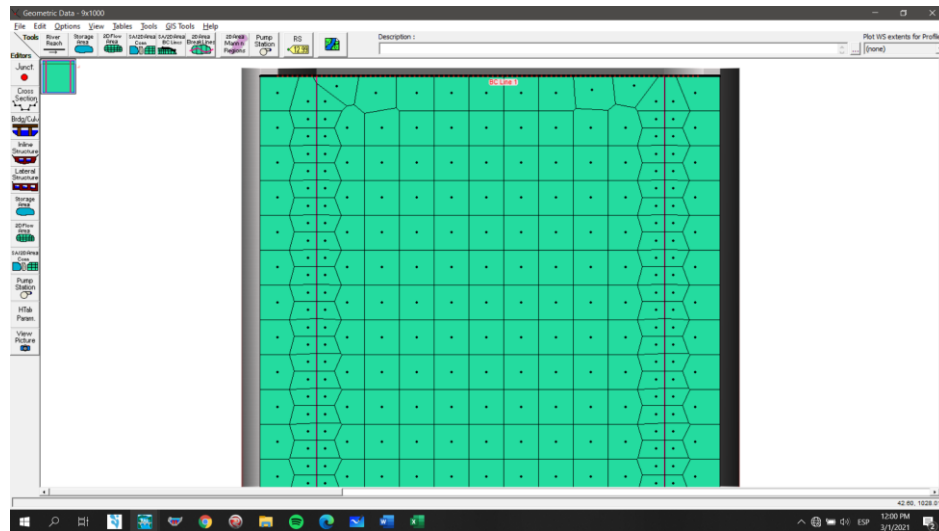
**Figura N° 57:** Gráficos de resultados obtenidos a partir del ráster con un intervalo en el eje Y de 0 a 5



**Fuente:** Elaboración Propia

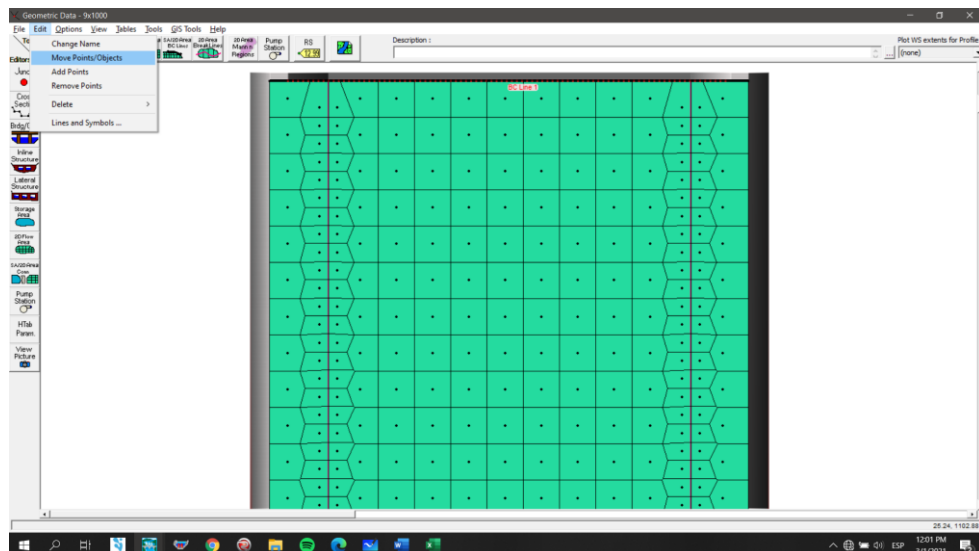
- Al momento de generar el mallado 2D, algunas celdas no salían como se esperaba, pero gracias a la herramienta Geometric Data del Hec Ras. Pudimos mover, agregar y remover puntos con el fin de obtener la malla acertada.

**Figura N° 58:** Imagen de malla generada



Fuente: Elaboración Propia

**Figura N° 59:** Imagen de malla corregida con el editor de Geometric Data en Hec Ras



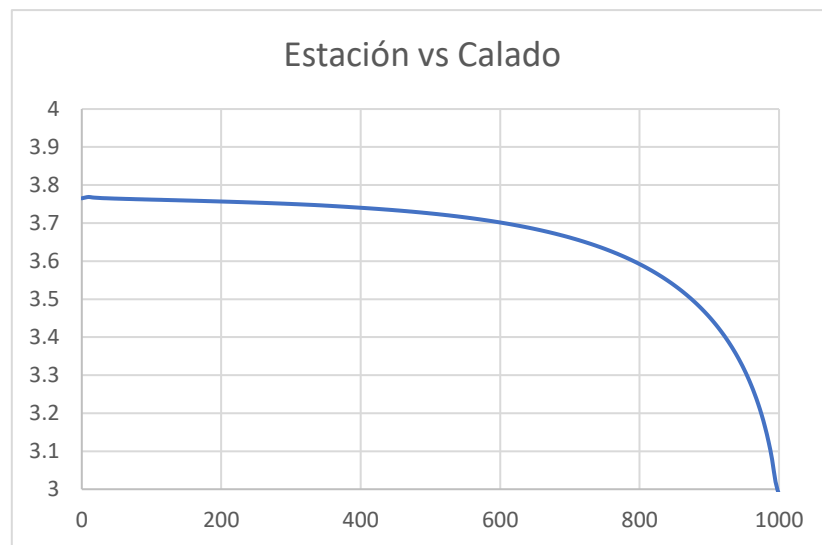
Fuente: Elaboración Propia

#### 4.1.3. Modelamiento Bidimensional IBER

Esta modelación numérica trabaja con las ecuaciones de Saint Venant. Además, para la superficie, este programa cuenta con una ventaja, se trabajó con herramientas de dibujo que simplifican la edición de la geometría y brindan mayor flexibilidad.

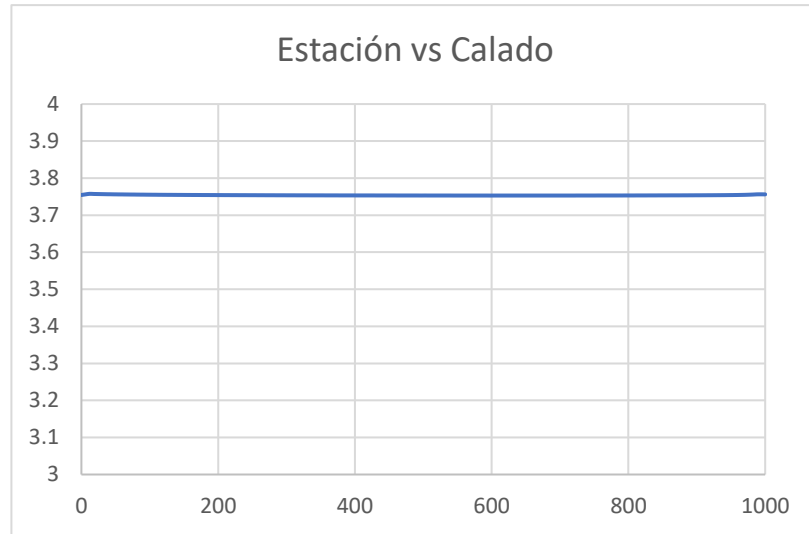
- Para generar la malla se tiene que agregar previamente las condiciones de contorno tanto de entrada como de salida. En este caso tenemos que identificar cual es la condición del flujo (subcrítico o supercrítico) para agregar adecuadamente los datos. Si es subcrítico, debemos agregar el caudal o el hidrograma para la condición de contorno aguas arriba. En contraste a la condición de contorno aguas abajo, donde tenemos opciones de flujo subcrítico, de acuerdo con lo analizado la condición que más se ajusta para este tipo de flujo es la opción de vertedero con una altura variable que corresponde únicamente a cada modelo. Ejemplo:

**Figura N° 60:** Condiciones de contorno Subcrítico – Supercrítico



**Fuente:** Elaboración Propia

**Figura N° 61:** Condiciones de contorno Subcrítico – Subcrítico (Vertedero +0.19)



**Fuente:** Elaboración Propia

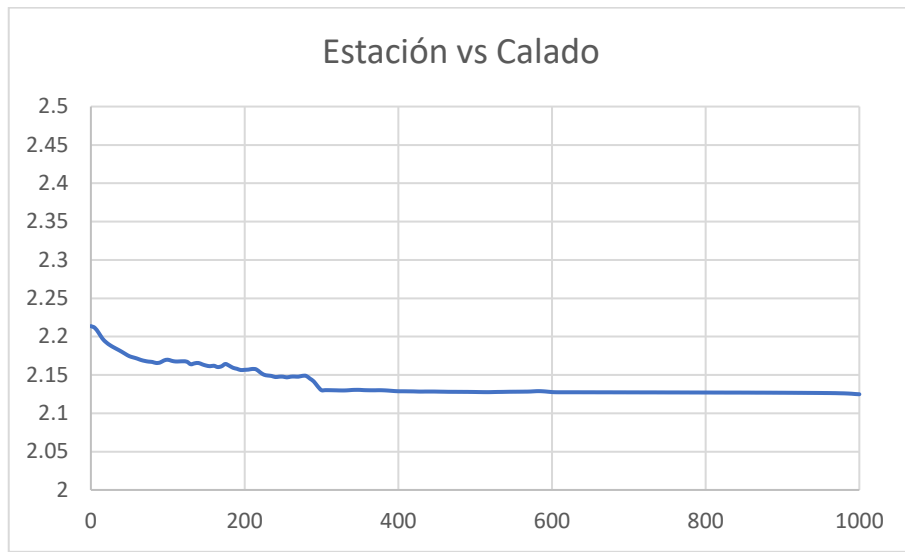
**Tabla N° 12:** Altura de vertedero usados para los modelos en régimen subcrítico

IBER			
NÚMERO	MODELO	TIRANTE	VERTEDERO
1	3X1000_Q500_n0.023	1.548	-0.07
2	3X1000_Q1000_n0.030	2.761	0.025
3	5X1000_Q1500_n0.035	3.274	-0.125
4	5X1000_Q2000_n0.030	3.55	-0.23
5	3X1000_Q1500_n0.035	3.754	0.19
6	3X1000_Q2000_n0.030	4.069	0.000

**Fuente:** Elaboración Propia

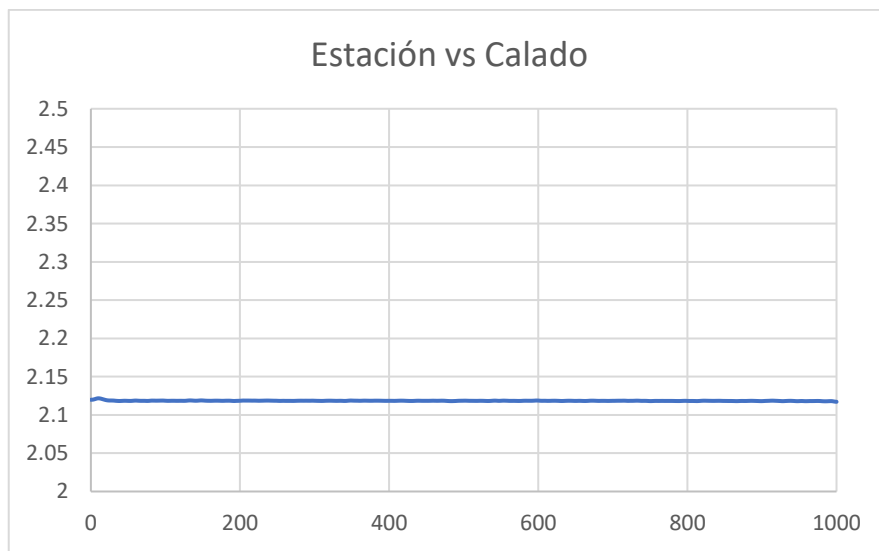
- Si es supercrítico, el programa permite a la condición del contorno aguas arriba del modelo, que además del caudal adicione una velocidad de entrada para el flujo. Es importante resaltar que la velocidad, que hemos analizado en régimen supercrítico, salía por encima de la velocidad promedio del flujo encontrada en Hec Ras 1D y Hec Ras 2D. Mientras que para la condición de contorno aguas abajo, solo se asigna que sea supercrítico a la salida.

**Figura N° 62:** Condiciones de contorno Subcrítico – Supercrítico



**Fuente:** Elaboración Propia

**Figura N° 63:** Condiciones de contorno Supercrítico (velocidad +4.92 m/s) – Supercrítico



**Fuente:** Elaboración Propia

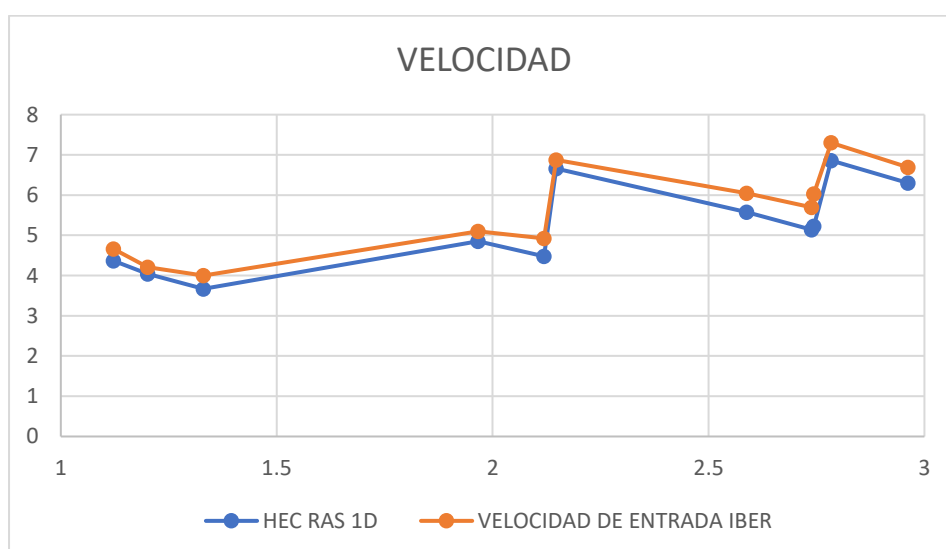


**Tabla N° 13:** Tabla de la velocidad usada para los modelos en régimen supercrítico

IBER				
NÚMERO	MODELO	TIRANTE.I	V.HEC RAS 1D	V.IBER
1	9X1000_Q500_n0.023	1.122	4.37	4.66
2	7X1000_Q500_n0.023	1.201	4.04	4.21
3	5X1000_Q500_n0.023	1.33	3.67	4.00
4	9X1000_Q1000_n0.030	1.966	4.85	5.10
5	7X1000_Q1000_n0.030	2.119	4.48	4.925
6	9X1000_Q1500_n0.023	2.147	6.66	6.87
7	5X1000_Q1500_n0.023	2.588	5.58	6.05
8	9X1000_Q1500_n0.035	2.739	5.14	5.70
9	7X1000_Q1500_n0.030	2.744	5.23	6.03
10	7X1000_Q2000_n0.023	2.784	6.86	7.30
11	9X1000_Q2000_n0.030	2.962	6.30	6.69

**Fuente:** Elaboración Propia

**Figura N° 64:** Comparación de velocidad entre el modelo de Hec-ras 1D e Iber

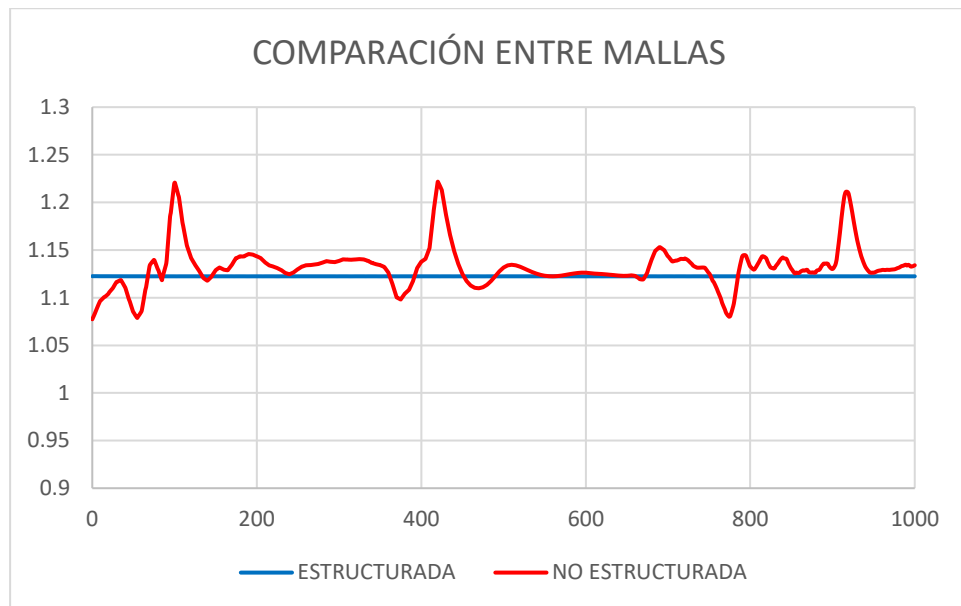


**Fuente:** Elaboración Propia

- La elección de la malla es importante debido a que, si elegimos una malla estructurada, el software aprovecha las celdas que son ortogonales entre sí para simplificar algunos de los cálculos y hace que el tiempo de cálculo sea menor. Sin embargo, esto es adecuado cuando tenemos un flujo con cauce definido, mientras que una malla no estructurada se usa para casos donde no es seguro en qué dirección se mueve el flujo.

- Cuando no se tiene en cuenta este criterio pueden surgir algunos inconvenientes. El cauce como objeto de estudio, está bien definido, por lo que usamos una malla estructurada. Pero de todas maneras se hizo una comparación entre el trabajo de ambas mallas para comprobar la teoría anterior.

**Figura N° 65:** Comparación entre malla estructurada y no estructurada

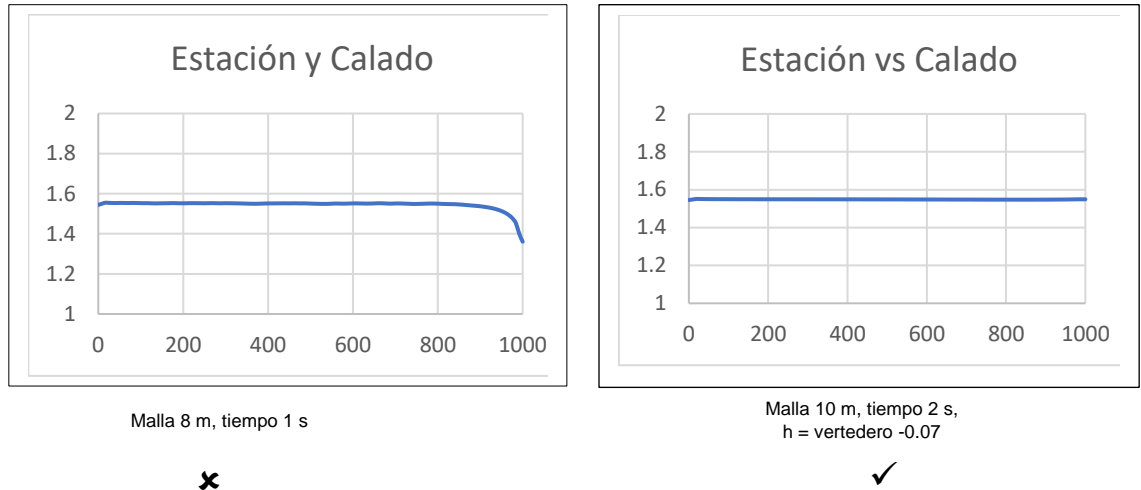


**Fuente:** Elaboración Propia

- Luego de haber descrito las dificultades encontradas en el modelo Iber, presentamos las correcciones que se hicieron siguiendo los pasos anteriores para llegar a estabilizar cada uno de los modelos. Cabe recalcar que no solo fueron 2 modelos los necesarios para llegar al objetivo, sino que se intenta resaltar como se inició la primera modelación en comparación con la modelación final.

- Este modelo cuenta con una pendiente de 0.003, un caudal de 500 m<sup>3</sup>/s y una rugosidad de 0.023, además es un flujo subcrítico.

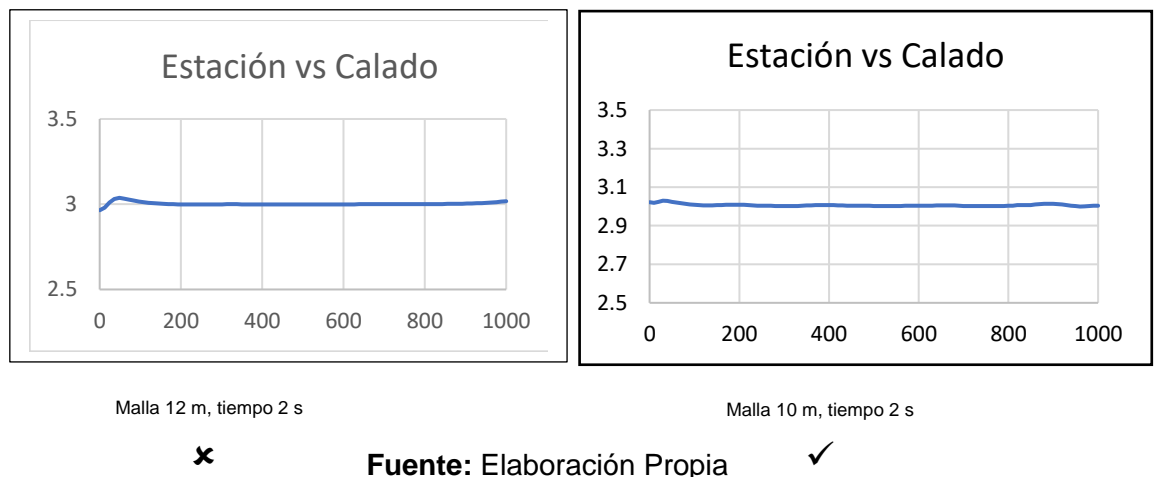
**Figura N° 66:** Tamaño de malla y tiempo computacional



**Fuente:** Elaboración Propia

- Este modelo cuenta con una pendiente de 0.003, un caudal de 1500 m<sup>3</sup>/s y una rugosidad de 0.023, además es un flujo subcrítico.

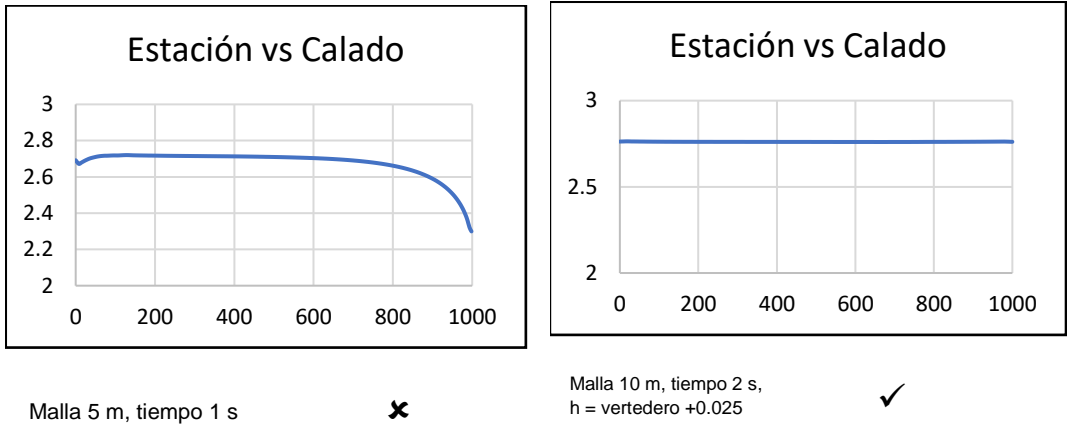
**Figura N° 67:** Tamaño de malla y tiempo computacional



**Fuente:** Elaboración Propia

- Este modelo cuenta con una pendiente de 0.003, un caudal de 1000 m<sup>3</sup>/s y una rugosidad de 0.030, además es un flujo subcrítico.

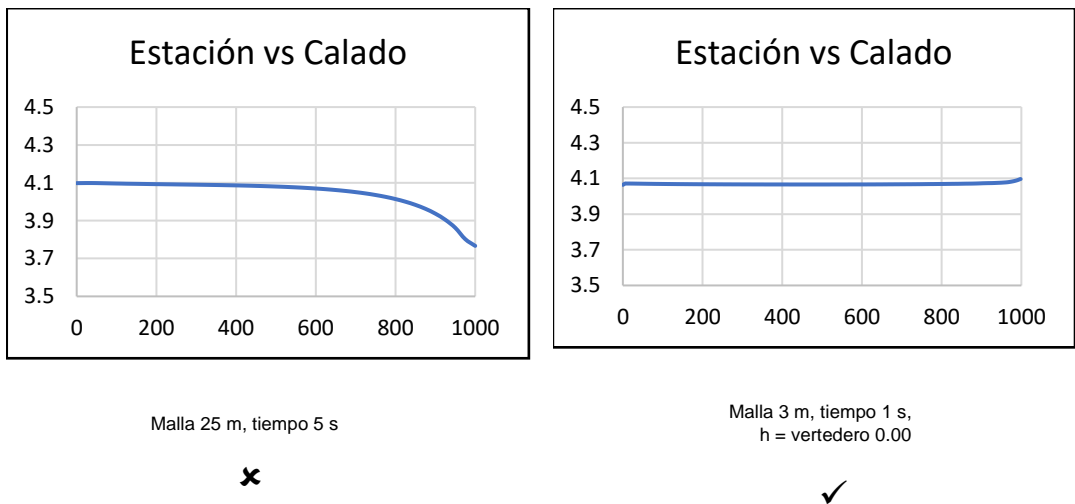
**Figura N° 68:** Tamaño de malla y tiempo computacional



**Fuente:** Elaboración Propia

- Este modelo cuenta con una pendiente de 0.003, un caudal de 2000 m<sup>3</sup>/s y una rugosidad de 0.030, además es un flujo subcrítico.

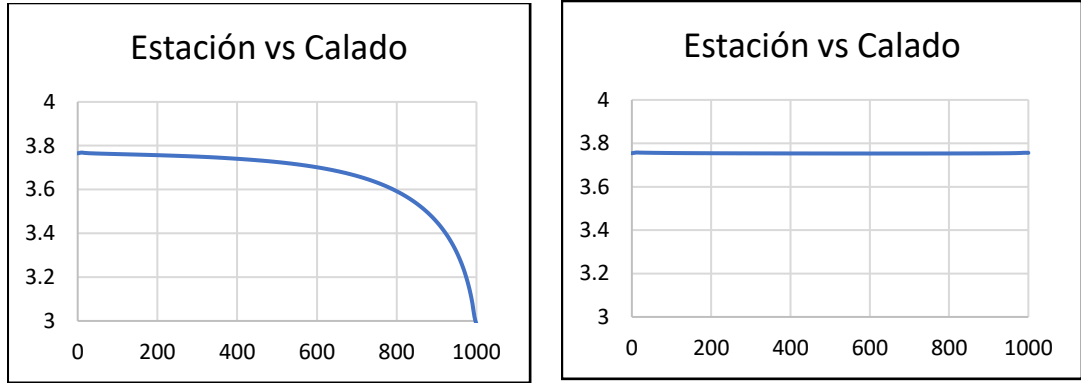
**Figura N° 69:** Tamaño de malla y tiempo computacional



**Fuente:** Elaboración Propia

- Este modelo cuenta con una pendiente de 0.003, un caudal de 1500 m<sup>3</sup>/s y una rugosidad de 0.035, además es un flujo subcrítico.

**Figura N° 70:** Tamaño de malla y tiempo computacional



Malla 5 m, tiempo 1 s

✘

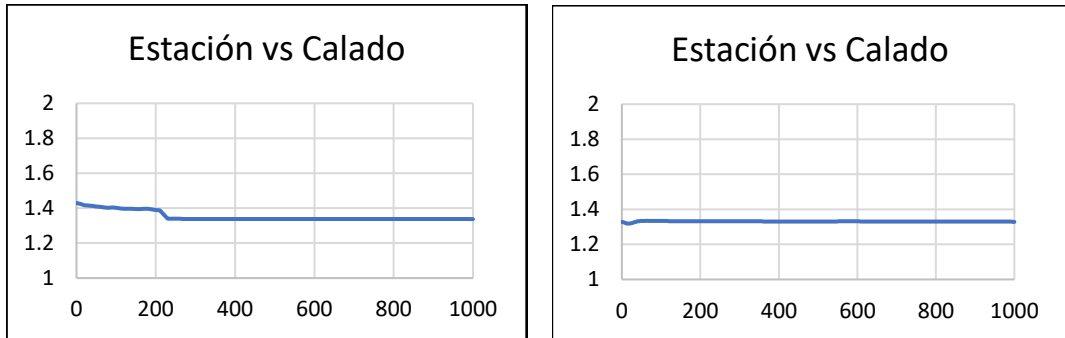
Malla 6 m, tiempo 1 s,  
h = vertedero +0.19

✔

Fuente: Elaboración Propia

- El siguiente modelo cuenta con una pendiente de 0.005, un caudal de 500 m<sup>3</sup>/s y una rugosidad de 0.023, además es un flujo supercrítico.

**Figura N° 71:** Tamaño de malla y tiempo computacional



Malla 10 m, tiempo 2 s

✘

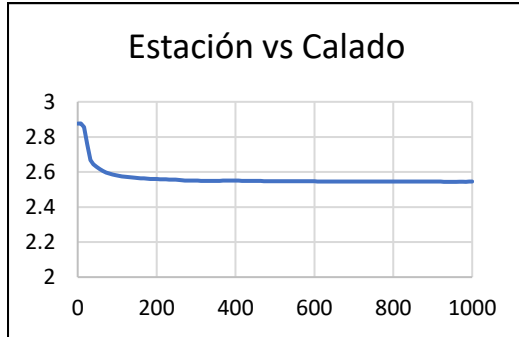
Malla 4 m, tiempo 1 s, V = 4 m/s

✔

Fuente: Elaboración Propia

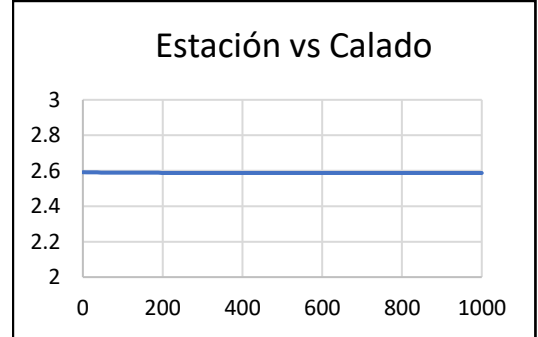
- El modelo cuenta con una pendiente de 0.005, un caudal de 1500 m<sup>3</sup>/s y una rugosidad de 0.023, además es un flujo supercrítico.

**Figura N° 72:** Tamaño de malla y tiempo computacional



Malla 8 m, tiempo 2 s

✘



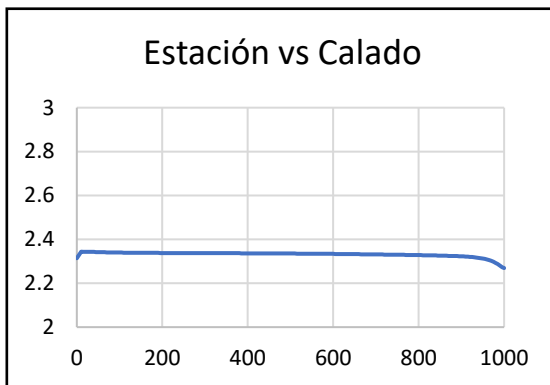
Malla 9 m, tiempo 2 s, V = 6.05 m/s

✔

**Fuente:** Elaboración Propia

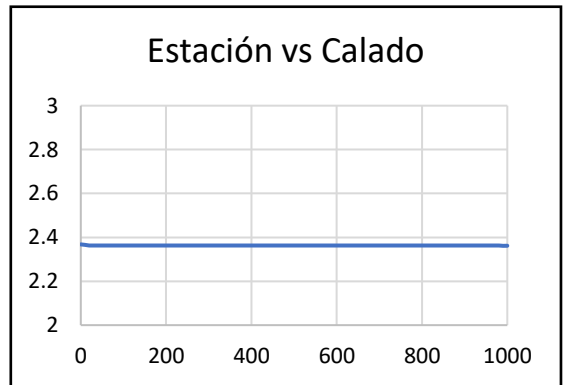
- El modelo cuenta con una pendiente de 0.005, un caudal de 1000 m<sup>3</sup>/s y una rugosidad de 0.03, además es un flujo subcrítico.

**Figura N° 73:** Tamaño de malla y tiempo computacional



Malla 5 m, tiempo 1 s

✘



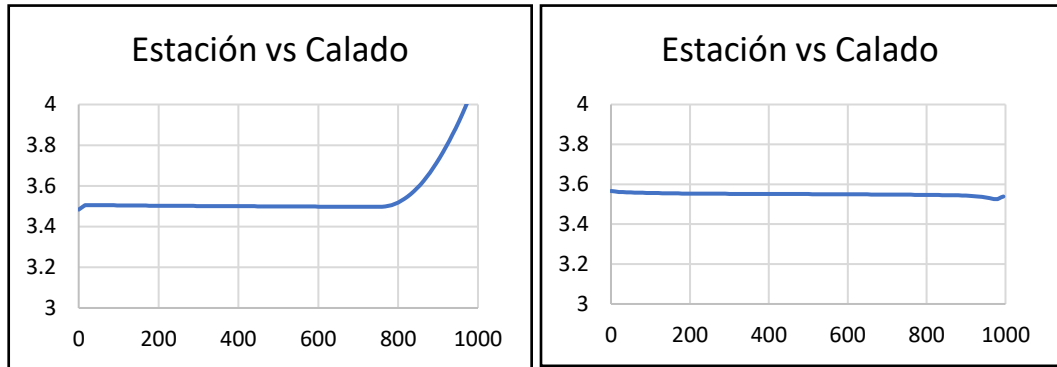
Malla 10 m, tiempo 2 s

✔

**Fuente:** Elaboración Propia

- El modelo cuenta con una pendiente de 0.005, un caudal de 2000 m<sup>3</sup>/s y una rugosidad de 0.03, además es un flujo subcrítico.

**Figura N° 74:** Tamaño de malla y tiempo computacional



Malla 8 m, tiempo 2 s

✘

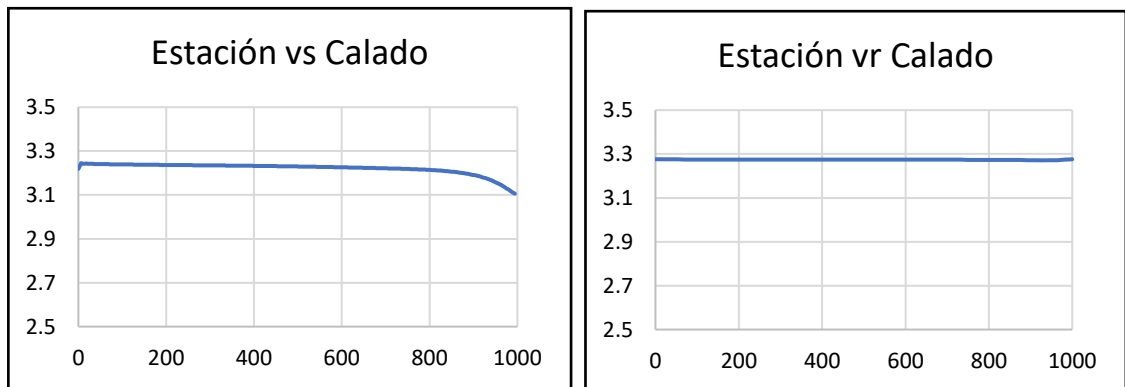
Malla 10 m, tiempo 2 s,  
h = vertedero -0.23

✔

**Fuente:** Elaboración Propia

- El modelo cuenta con una pendiente de 0.005, un caudal de 1500 m<sup>3</sup>/s y una rugosidad de 0.035, además es un flujo subcrítico.

**Figura N° 75:** Tamaño de malla y tiempo computacional



Malla 3 m, tiempo 1 s

✘

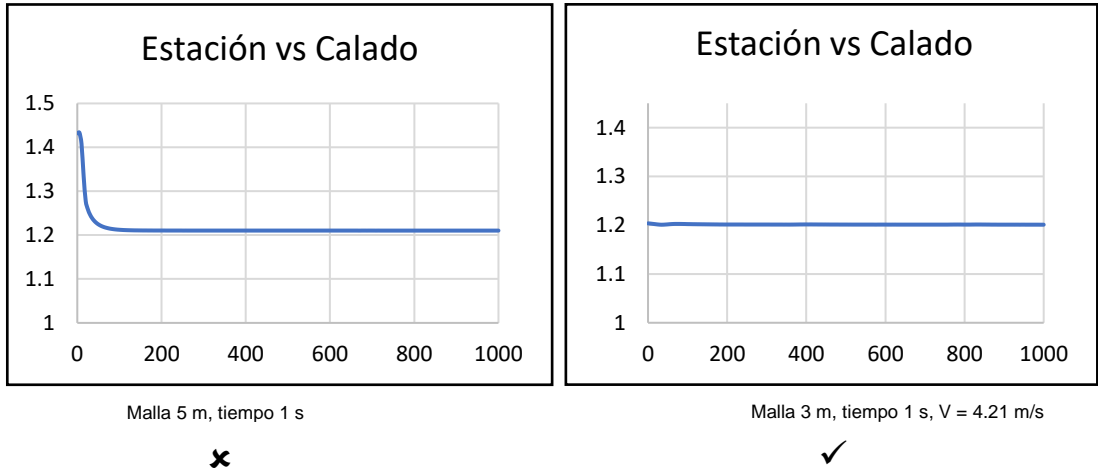
Malla 18 m, tiempo 3 s,  
h = vertedero -0.125

✔

**Fuente:** Elaboración Propia

- El modelo cuenta con una pendiente de 0.007, un caudal de 500 m<sup>3</sup>/s y una rugosidad de 0.023, además es un flujo supercrítico.

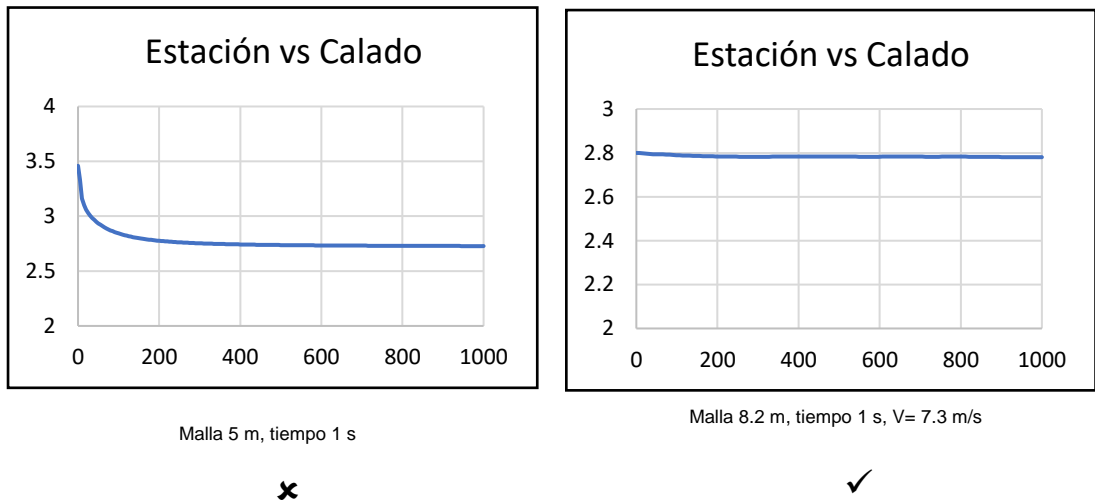
**Figura N° 76:** Tamaño de malla y tiempo computacional



**Fuente:** Elaboración Propia

- El modelo cuenta con una pendiente de 0.007, un caudal de 2000 m<sup>3</sup>/s y una rugosidad de 0.023, además es un flujo supercrítico.

**Figura N° 77:** Tamaño de malla y tiempo computacional

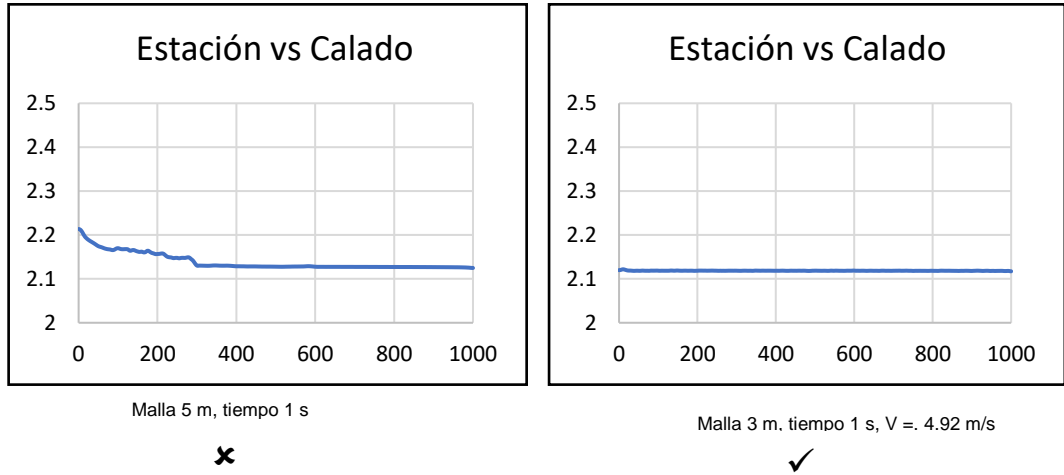


**Fuente:** Elaboración Propia



- El modelo cuenta con una pendiente de 0.007, un caudal de 1000 m<sup>3</sup>/s y una rugosidad de 0.03, además es un flujo supercrítico.

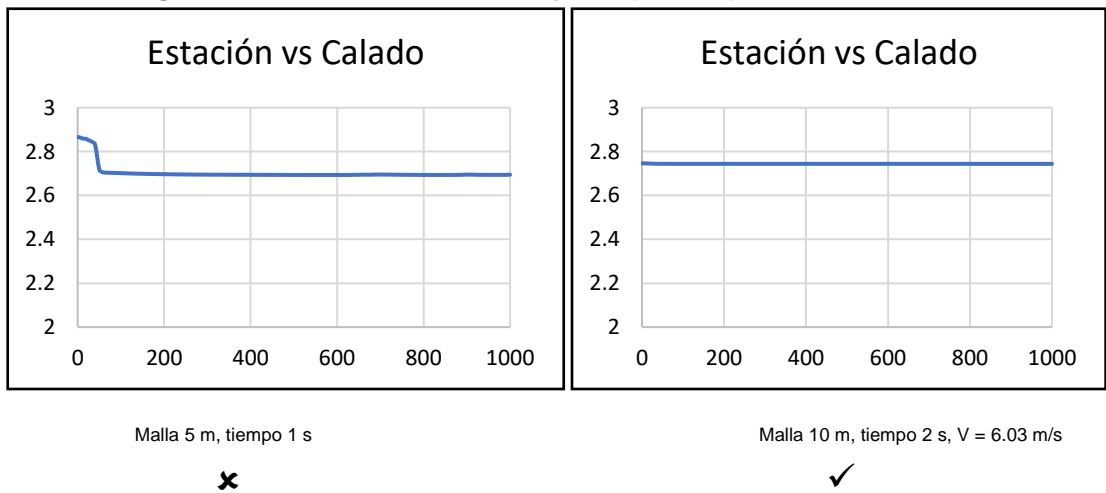
**Figura N° 78:** Tamaño de malla y tiempo computacional



**Fuente:** Elaboración Propia

- El modelo cuenta con una pendiente de 0.007, un caudal de 1500 m<sup>3</sup>/s y una rugosidad de 0.030, además es un flujo supercrítico.

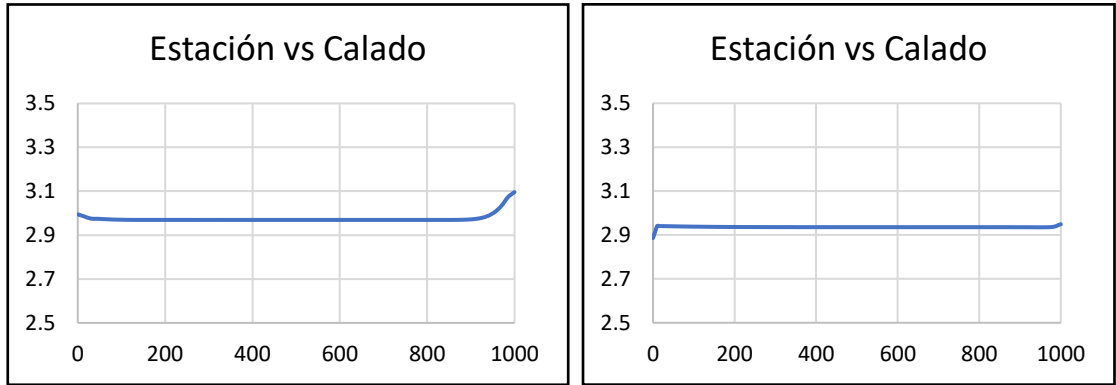
**Figura N° 79:** Tamaño de malla y tiempo computacional



**Fuente:** Elaboración Propia

- El modelo cuenta con una pendiente de 0.007, un caudal de 1500 m<sup>3</sup>/s y una rugosidad de 0.035, además es un flujo supercrítico.

**Figura N° 80:** Tamaño de malla y tiempo computacional



Malla 15 m, tiempo 2 s

Malla 5 m, tiempo 1 s

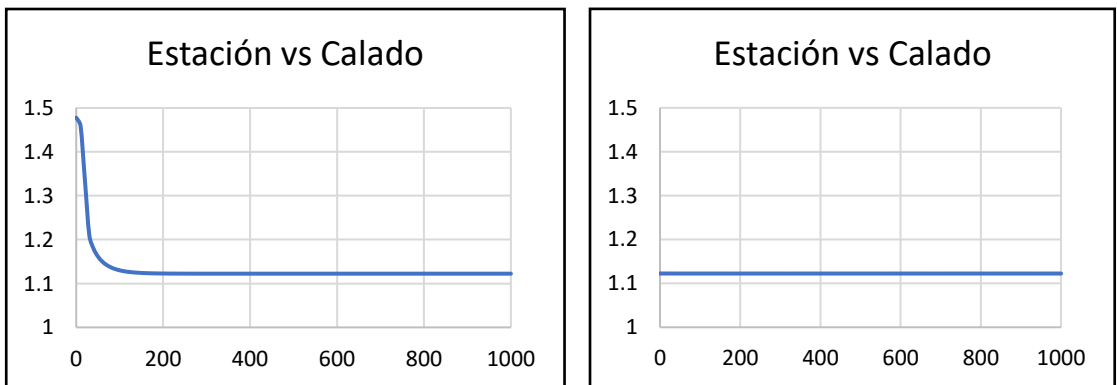
✘

✓

**Fuente:** Elaboración Propia

- El modelo cuenta con una pendiente de 0.009, un caudal de 500 m<sup>3</sup>/s y una rugosidad de 0.023, además es un flujo supercrítico.

**Figura N° 81:** Tamaño de malla y tiempo computacional



Malla 10 m, tiempo 2 s

Malla 5 m, tiempo 1 s, V = 4.66 m/s

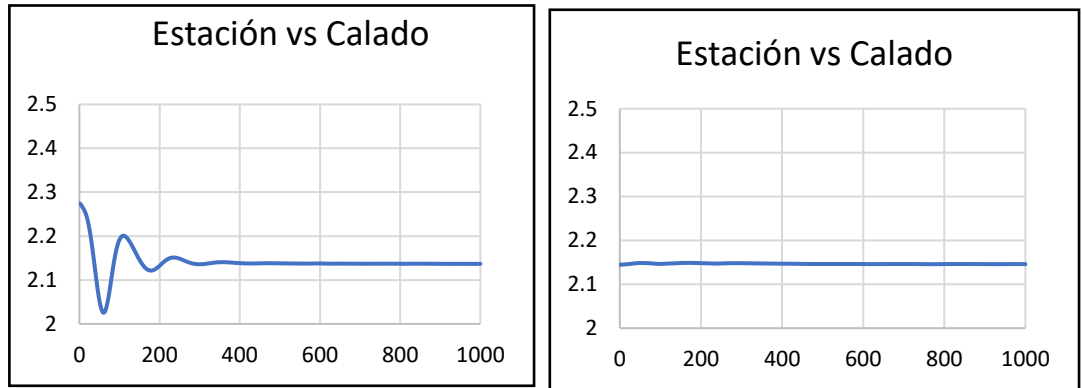
✘

✓

**Fuente:** Elaboración Propia

- El modelo cuenta con una pendiente de 0.009, un caudal de 1500 m<sup>3</sup>/s y una rugosidad de 0.023, además es un flujo supercrítico.

**Figura N° 82:** Tamaño de malla y tiempo computacional



Malla 3 m, tiempo 0.4 s

Malla 6 m, tiempo 1 s, V = 6.871 m/s

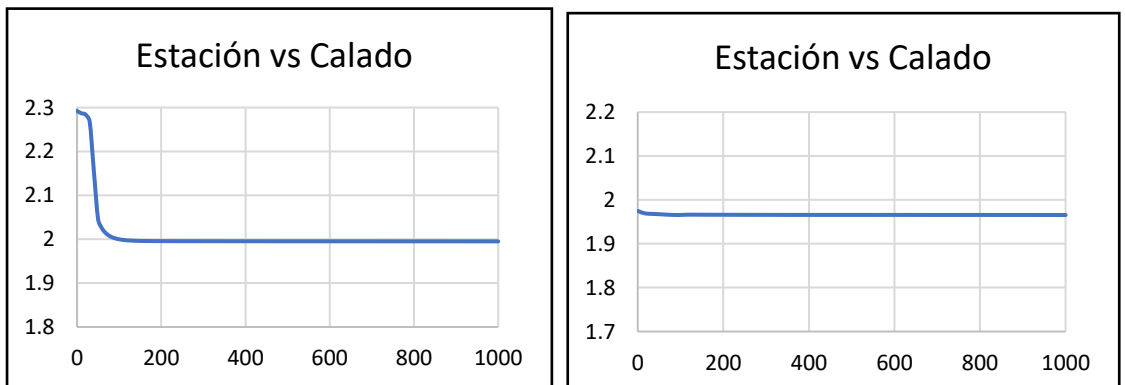
✘

✓

**Fuente:** Elaboración Propia

- El modelo cuenta con una pendiente de 0.009, un caudal de 1000 m<sup>3</sup>/s y una rugosidad de 0.030, además es un flujo supercrítico.

**Figura N° 83:** Tamaño de malla y tiempo computacional



Malla 10 m, tiempo 2 s

Malla 3 m, tiempo 1 s, V = 5.10 m/s

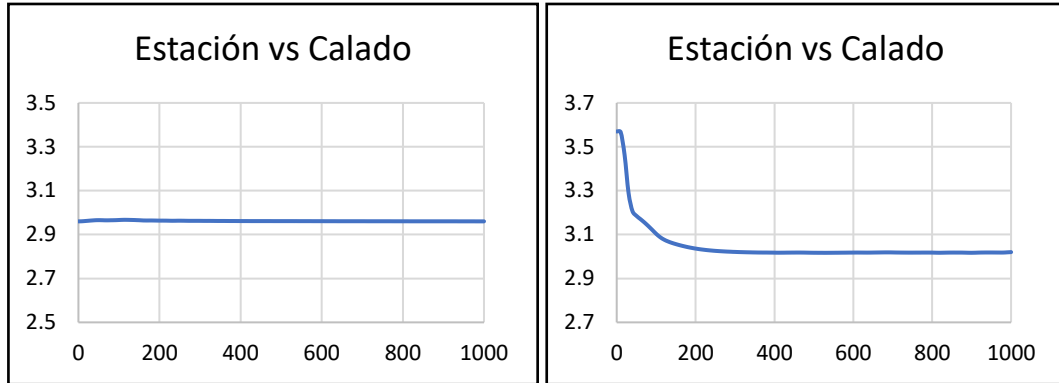
✘

✓

**Fuente:** Elaboración Propia

- El modelo cuenta con una pendiente de 0.009, un caudal de 2000 m<sup>3</sup>/s y una rugosidad de 0.030, además es un flujo supercrítico.

**Figura N° 84:** Tamaño de malla y tiempo computacional



Malla 10 m, tiempo 2 s

Malla 8 m, tiempo 2 s, V = 6.69 m/s

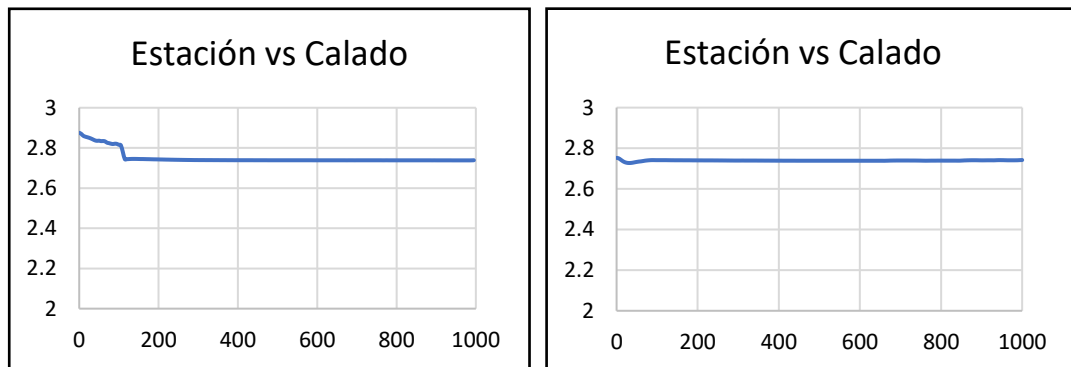
✘

✔

**Fuente:** Elaboración Propia

- El modelo cuenta con una pendiente de 0.009, un caudal de 1500 m<sup>3</sup>/s y una rugosidad de 0.035, además es un flujo supercrítico.

**Figura N° 85:** Tamaño de malla y tiempo computacional



Malla 15 m, tiempo 2 s

Malla 5 m, tiempo 1 s, V = 5.70 m/s

✘

✔

**Fuente:** Elaboración Propia

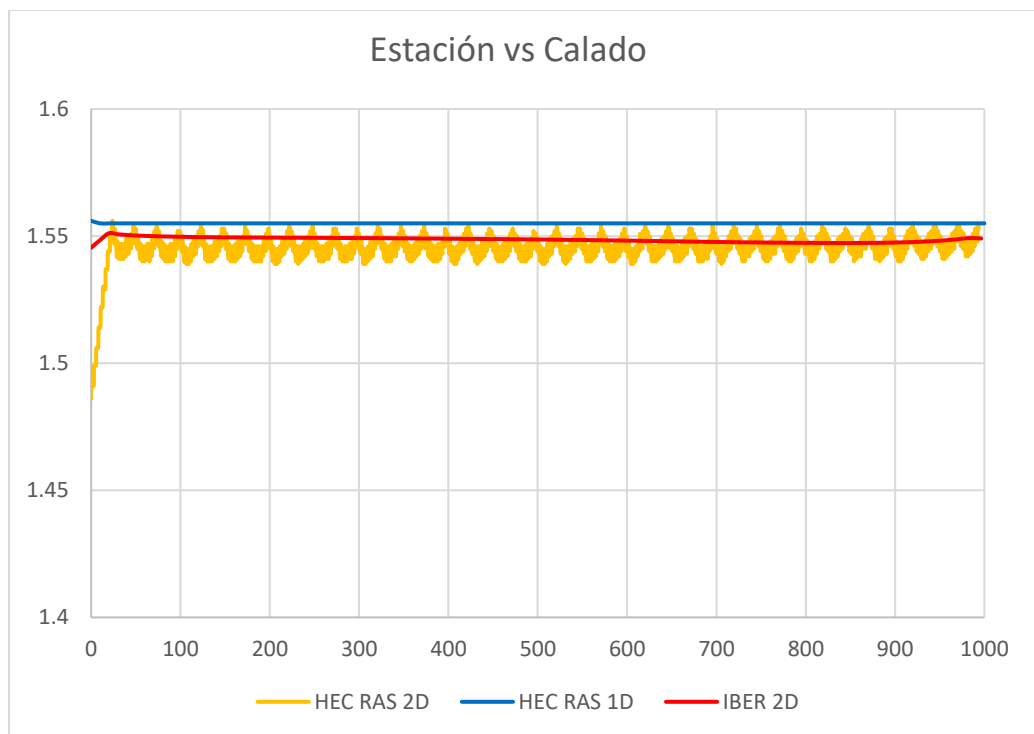
## 4.2. Resultados de los 3 Modelos

### 4.2.1. Modelo N° 1

#### A.- Características

- Pendiente: 0.003
- Rugosidad: 0.023
- Caudal: 500 m<sup>3</sup>/s
- Flujo: Permanente (subcrítico)

**Gráfico N° 1:** Resultado del Calado



**Fuente:** Elaboración Propia

## **B.- Particularidades de cada modelo**

**HEC-RAS 1D:** Se usó solo una condición de contorno aguas abajo N. Depth = 0.003 y se tuvo que ajustar las tolerancias a 0.001 m en el cálculo de la superficie del agua, además se aumentaron las iteraciones de cálculo a 40, con el fin de disminuir la variación en los resultados.

**HEC-RAS 2D:** Se usó un tamaño de malla de 24.9 m y 6s siguiendo los parámetros del N° de Courant, además, para los bordes donde inician los diques se usó un tamaño de malla de 10 m para obtener un poco más de información en esa zona. Las condiciones de borde usadas fueron, un hidrograma uniforme con el caudal 500 m<sup>3</sup>/s para la condición aguas arriba y N. Depth = 0.003 para la condición aguas abajo.

**IBER 2D:** Se usó un tamaño de malla de 10 m y tiempo 2 s, además, para la condición de borde aguas arriba se usó subcrítico con un hidrograma uniforme de 500 m<sup>3</sup>/s mientras que para la condición de borde aguas abajo, se usó subcrítico con la opción de vertedero a una altura de -0.070.0

## **C.- Comentario**

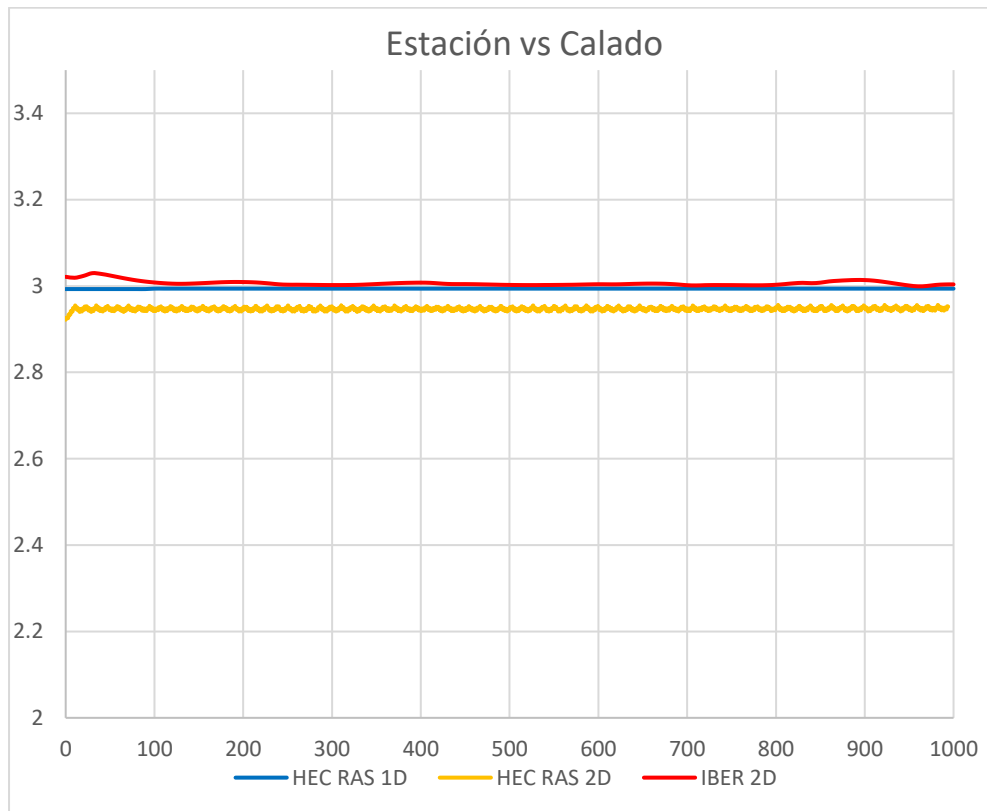
Podemos apreciar que los resultados de los modelos Iber 2D y Hec-Ras 1D son similares, mientras que las oscilaciones del modelo Hec-Ras 2D se aleja, sin ser relevante. Se puede decir que los 3 modelos son acertados para este escenario.

### **4.2.2. Modelo 2**

#### **A.- Características**

- Pendiente: 0.003
- Rugosidad: 0.023
- Caudal: 1500 m<sup>3</sup>/s
- Flujo: Permanente (subcrítico)

**Gráfico N° 2: Resultado del Calado**



**Fuente:** Elaboración Propia

### **B.- Particularidades de cada modelo**

**HEC-RAS 1D:** Se usó solo una condición de contorno aguas abajo  $N.Depth = 0.003$  y se tuvo que ajustar las tolerancias a  $0.001$  m en el cálculo de la superficie del agua, además, se aumentaron las iteraciones de cálculo a 40, con el fin de disminuir la variación en los resultados.

**HEC-RAS 2D:** Se usó un tamaño de malla de 12 m y 2s siguiendo los parámetros del N° de Courant, además, para los bordes donde inician los diques se usó un tamaño de malla de 6 m para obtener un poco más de información en esa zona.

Las condiciones de borde usadas fueron, un hidrograma uniforme con el caudal  $1500 \text{ m}^3/\text{s}$  para la condición aguas arriba y  $N. Depth = 0.003$  para la condición aguas abajo.

**IBER 2D:** Se usó un tamaño de malla de 10 m y tiempo 2s, además, para la condición de borde aguas arriba se usó subcrítico con un hidrograma uniforme de 1500 m<sup>3</sup>/s mientras que para la condición de borde aguas abajo, se usó supercrítico.

### **C.- Comentario**

Podemos apreciar nuevamente que los resultados de los modelos Iber 2D y Hec-Ras 1D son similares, aunque esta vez las variaciones de Iber 2D son un poco más notorias, mientras que las oscilaciones del modelo Hec-Ras 2D se alejan más obteniendo un error de 1.57% respecto a los demás modelos, por lo tanto, se considera dentro del margen. Se puede decir que los 3 modelos son acertados para este escenario.

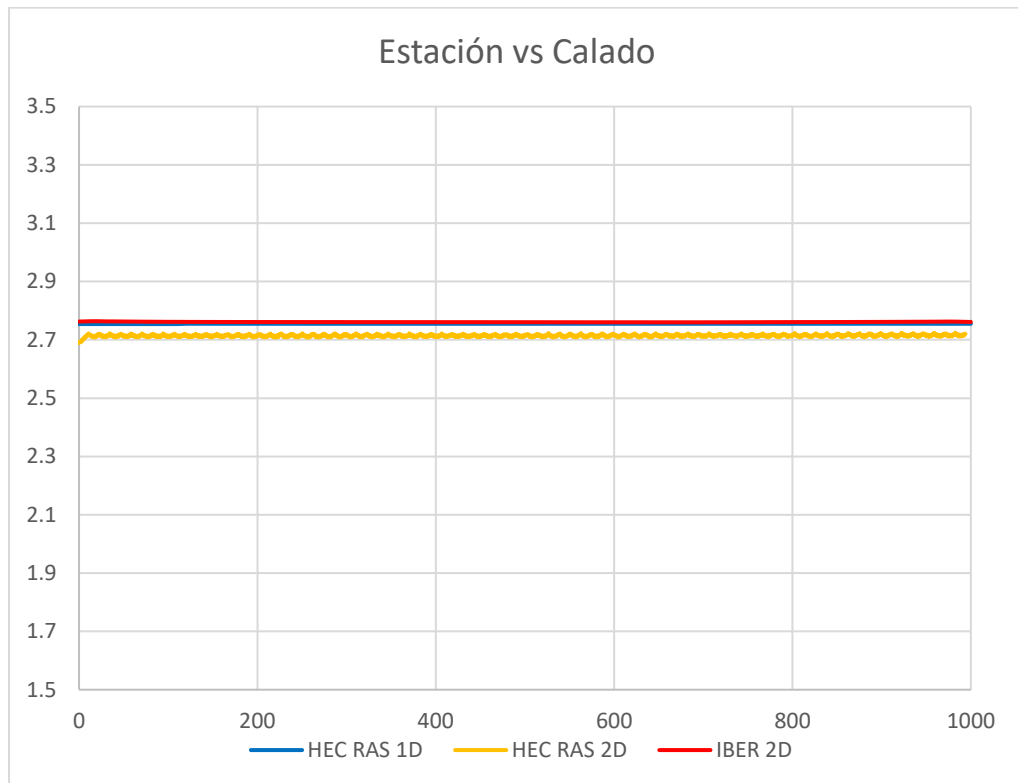
### **4.2.3. Modelo 3**

#### **A.- Características**

- Pendiente: 0.003
- Rugosidad: 0.030
- Caudal: 1000 m<sup>3</sup>/s
- Flujo: Permanente (subcrítico)



**Gráfico N° 3: Resultado del Calado**



**Fuente:** Elaboración Propia

### **B.- Particularidades de cada modelo**

**HEC-RAS 1D:** Se usó solo una condición de contorno aguas abajo N. Depth = 0.003 y se tuvo que ajustar las tolerancias a 0.0001 m en el cálculo de la superficie del agua, además, se aumentaron las iteraciones de cálculo a 40, con el fin de disminuir la variación en los resultados.

**HEC-RAS 2D:** Se usó un tamaño de malla de 12 m y 3s siguiendo los parámetros del N° de Courant, además, para los bordes donde inician los diques se usó un tamaño de malla de 6 m para obtener un poco más de información en esa zona.

Las condiciones de borde usadas fueron, un hidrograma uniforme con el caudal 1000 m<sup>3</sup>/s para la condición aguas arriba y N. Depth = 0.003 para la condición aguas abajo.

**IBER 2D:** Se usó un tamaño de malla de 10 m y tiempo 2s, además, para la condición de borde aguas arriba se usó subcrítico con un hidrograma uniforme de 1000 m<sup>3</sup>/s mientras que para la condición de borde aguas abajo, se usó subcrítico con la opción de vertedero a una altura de +0.025.

### **C.- Comentario**

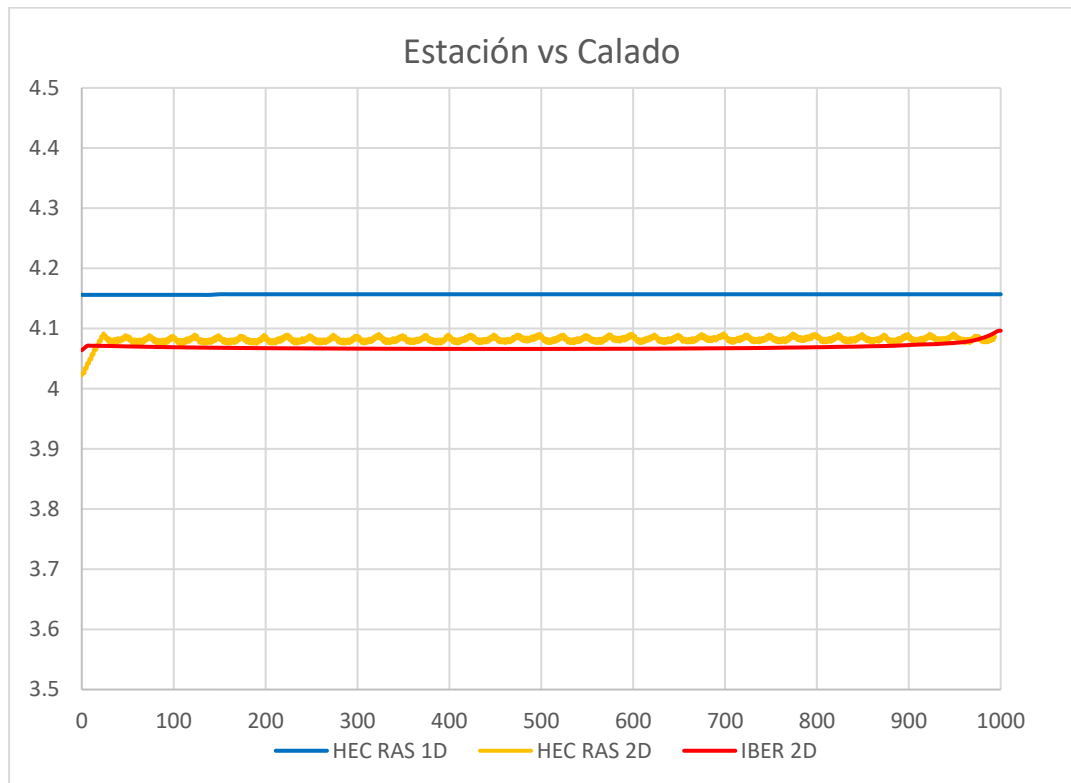
Podemos apreciar nuevamente que los resultados de los modelos Iber 2D y Hec-Ras 1D son similares, mientras que las oscilaciones del modelo Hec-Ras 2D se alejan más obteniendo un error de 1.28% respecto a los demás modelos, por lo tanto, se considera dentro del margen. Se puede decir que los 3 modelos son acertados para este escenario.

## **4.2.4. Modelo 4**

### **A.- Características**

- Pendiente: 0.003
- Rugosidad: 0.030
- Caudal: 2000 m<sup>3</sup>/s
- Flujo: Permanente (subcrítico)

**Gráfico N° 4: Resultado del Calado**



**Fuente:** Elaboración Propia

### **B.- Particularidades de cada modelo**

**HEC-RAS 1D:** Se usó solo una condición de contorno aguas abajo N. Depth = 0.003 y se tuvo que ajustar las tolerancias a 0.0001 m en el cálculo de la superficie del agua, además, se aumentaron las iteraciones de cálculo a 40, con el fin de disminuir la variación en los resultados.

**HEC-RAS 2D:** Se usó un tamaño de malla de 25 m y 5s siguiendo los parámetros del N° de Courant, además, para los bordes donde inician los diques se usó un tamaño de malla de 10 m para obtener un poco más de información en esa zona.

Las condiciones de borde usadas fueron, un hidrograma uniforme con el caudal 2000 m<sup>3</sup>/s para la condición aguas arriba y N. Depth = 0.003 para la condición aguas abajo.

**IBER 2D:** Se usó un tamaño de malla de 3 m y tiempo 1s, además, para la condición de borde aguas arriba se usó subcrítico con un hidrograma uniforme de 2000 m<sup>3</sup>/s mientras que para la condición de borde aguas abajo, se usó subcrítico con la opción de vertedero a una altura de -0.0008.

**Comentario:** Podemos apreciar que los resultados de los modelos Iber 2D y Hec-Ras 2D son similares, mientras el modelo Hec-Ras 1D se aleja más obteniendo un error de 2.13% respecto a los demás modelos, por lo tanto, se considera dentro del margen. Se puede decir que los 3 modelos son acertados para este escenario.

### **C.- Comentario**

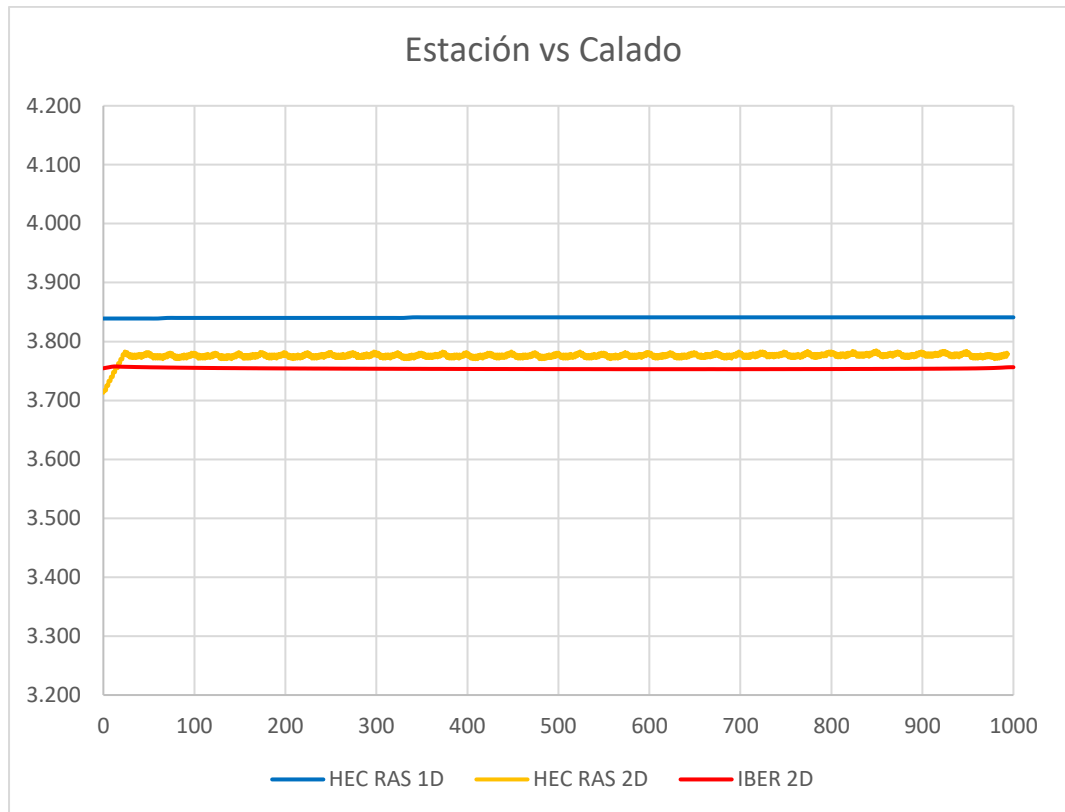
Podemos apreciar que los resultados de los modelos Iber 2D y Hec-Ras 2D son similares, mientras el modelo Hec-Ras 1D se aleja más obteniendo un error de 2.13% respecto a los demás modelos, por lo tanto, se considera dentro del margen. Se puede decir que los 3 modelos son acertados para este escenario.

## **4.2.5. Modelo 5**

### **A.- Características**

- Pendiente: 0.003
- Rugosidad: 0.035
- Caudal: 1500 m<sup>3</sup>/s
- Flujo: Permanente (subcrítico)

**Gráfico N° 5: Resultado del Calado**



**Fuente:** Elaboración Propia

### **B.- Particularidades de cada modelo**

**HEC-RAS 1D:** Se usó solo una condición de contorno aguas abajo N. Depth = 0.003 y se tuvo que ajustar las tolerancias a 0.001 m en el cálculo de la superficie del agua, además, se aumentaron las iteraciones de cálculo a 40, con el fin de disminuir la variación en los resultados.

**HEC-RAS 2D:** Se usó un tamaño de malla de 24.9 m y 4s siguiendo los parámetros del N° de Courant, además, para los bordes donde inician los diques se usó un tamaño de malla de 12.5 m para obtener un poco más de información en esa zona. Las condiciones de borde usadas fueron, un hidrograma uniforme con el caudal 1500 m<sup>3</sup>/s para la condición aguas arriba y N. Depth = 0.003 para la condición aguas abajo.

**IBER 2D:** Se usó un tamaño de malla de 6 m y tiempo 1s, además, para la condición de borde aguas arriba se usó subcrítico con un hidrograma uniforme de 1500 m<sup>3</sup>/s mientras que para la condición de borde aguas abajo, se usó subcrítico con la opción de vertedero a una altura de +0.19.

### C.- Comentario

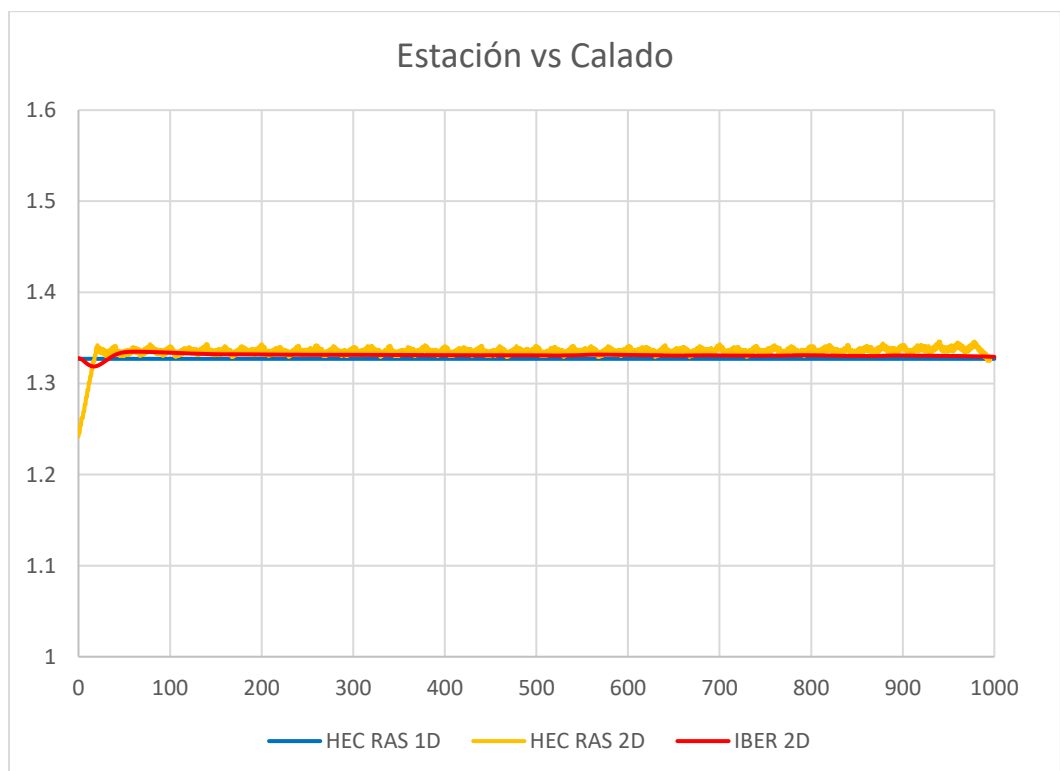
Podemos apreciar que los resultados de los modelos Iber 2D y Hec-Ras 2D son similares, mientras el modelo Hec-Ras 1D se alejan más obteniendo un error de 2.10% respecto a los demás modelos, por lo tanto, se considera dentro del margen. Se puede decir que los 3 modelos son acertados para este escenario.

## 4.2.6. Modelo 6

### A.- Características

- Pendiente: 0.005
- Rugosidad: 0.023
- Caudal: 500 m<sup>3</sup>/s
- Flujo: Permanente (supercritico)

**Gráfico N° 6:** Resultado del Calado



Fuente: Elaboración Propia

## **B.- Particularidades de cada modelo**

**HEC-RAS 1D:** Se usó solo una condición de contorno aguas arriba N. Depth = 0.005, las tolerancias de cálculo se dejaron por defecto y solo se aumentaron las iteraciones de cálculo a 40.

**HEC-RAS 2D:** Se usó un tamaño de malla de 20 m y 4s siguiendo los parámetros del N° de Courant, además, para los bordes donde inician los diques se usó un tamaño de malla de 10 m para obtener un poco más de información en esa zona.

Las condiciones de borde usadas fueron, un hidrograma uniforme con el caudal 500 m<sup>3</sup>/s para la condición aguas arriba y N. Depth = 0.005 para la condición aguas abajo.

**IBER 2D:** Se usó un tamaño de malla de 4 m y tiempo 1s, además, para la condición de borde aguas arriba se usó supercrítico con una velocidad de 4 m/s con un hidrograma uniforme de 500 m<sup>3</sup>/s mientras que para la condición de borde aguas abajo, se usó supercrítico.

## **C.- Comentario**

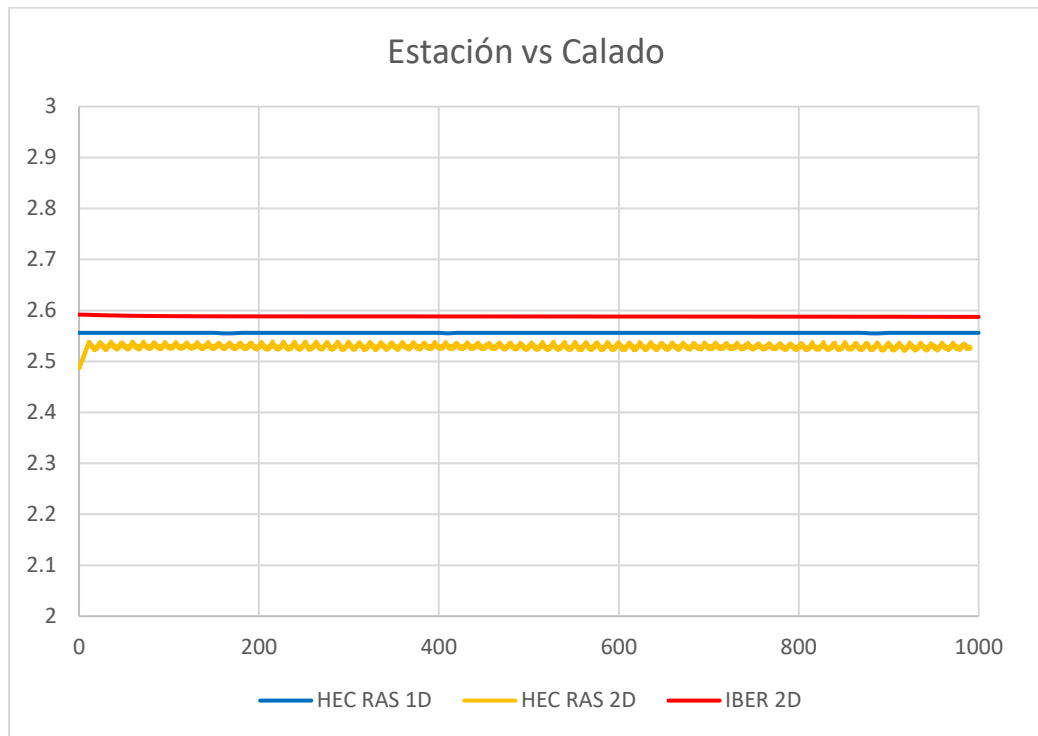
Podemos apreciar que en los 3 modelos el resultado varía muy poco, por lo tanto, se puede concluir que los 3 modelos son acertados para este escenario.

### **4.2.7. Modelo 7**

#### **A.- Características**

- Pendiente: 0.005
- Rugosidad: 0.023
- Caudal: 1500 m<sup>3</sup>/s
- Flujo: Permanente (supercrítico)

**Gráfico N° 7: Resultado del Calado**



**Fuente:** Elaboración Propia

### **B.- Particularidades de cada modelo**

**HEC-RAS 1D:** Se usó solo una condición de contorno aguas arriba N. Depth = 0.005, las tolerancias de cálculo se dejaron por defecto y solo se aumentaron las iteraciones de cálculo a 40.

**HEC-RAS 2D:** Se usó un tamaño de malla de 12 m y 2s siguiendo los parámetros del N° de Courant, además, para los bordes donde inician los diques se usó un tamaño de malla de 6m para obtener un poco más de información en esa zona.

Las condiciones de borde usadas fueron, un hidrograma uniforme con el caudal 1500 m<sup>3</sup>/s para la condición aguas arriba y N. Depth = 0.005 para la condición aguas abajo.

**IBER 2D:** Se usó un tamaño de malla de 9 m y tiempo 2s, además, para la condición de borde aguas arriba se usó supercrítico con una velocidad de 6.05 m/s con un hidrograma uniforme de 1500 m<sup>3</sup>/s mientras que para la condición de borde aguas abajo, se usó supercrítico.



### C.- Comentario

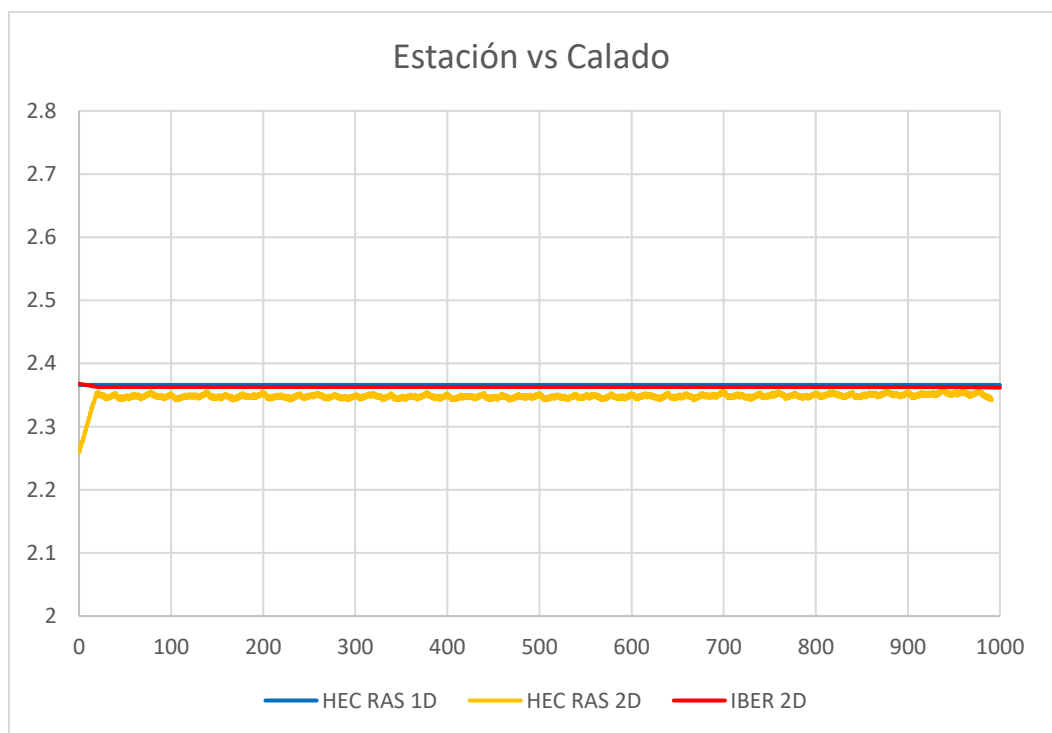
Podemos apreciar que los 3 resultados varían siendo la variación entre Iber 2D y Hec Ras 2D la variación más amplia obteniendo un error de 2.33%, que está dentro del margen permitido y no supera el 5% por lo que se considera que los 3 modelos son acertados para este escenario.

#### 4.2.8. Modelo 8

##### A.- Características

- Pendiente: 0.005
- Rugosidad: 0.030
- Caudal: 1000 m<sup>3</sup>/s
- Flujo: Permanente (subcrítico)

**Gráfico N° 8:** Resultado del Calado



**Fuente:** Elaboración Propia

## **B.- Particularidades de cada modelo**

**HEC-RAS 1D:** Se usó solo una condición de contorno aguas abajo N. Depth = 0.005 y se tuvo que ajustar las tolerancias a 0.001 m en el cálculo de la superficie del agua, además, se aumentaron las iteraciones de cálculo a 40, con el fin de disminuir la variación en los resultados.

**HEC-RAS 2D:** Se usó un tamaño de malla de 20 m y 4s siguiendo los parámetros del N° de Courant, además, para los bordes donde inician los diques se usó un tamaño de malla de 6m para obtener un poco más de información en esa zona.

Las condiciones de borde usadas fueron, un hidrograma uniforme con el caudal 1000 m<sup>3</sup>/s para la condición aguas arriba y N. Depth = 0.005 para la condición aguas abajo.

**IBER 2D:** Se usó un tamaño de malla de 10 m y tiempo 2s, además, para la condición de borde aguas arriba se usó subcrítico con un hidrograma uniforme de 1000 m<sup>3</sup>/s mientras que para la condición de borde aguas abajo, se usó supercrítico.

## **C.- Comentario**

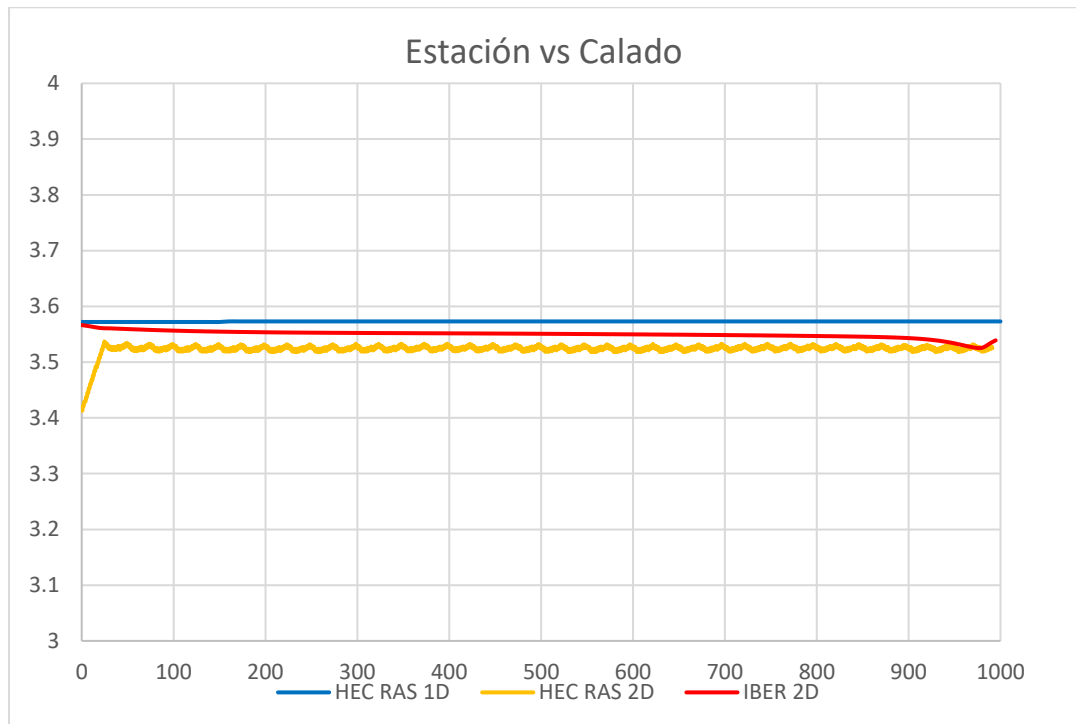
Podemos apreciar que los resultados de los modelos Iber 2D y Hec-Ras 1D son similares, mientras el modelo Hec-Ras 2D se aleja más obteniendo un error de 0.76% respecto a los demás modelos, por lo tanto, se considera dentro del margen y es menor de 5%. Se puede decir que los 3 modelos son acertados para este escenario.

#### 4.2.9. Modelo 9

##### A.- Características

- Pendiente: 0.005
- Rugosidad: 0.030
- Caudal: 2000 m<sup>3</sup>/s
- Flujo: Permanente (subcrítico)

Gráfico N° 9: Resultado del Calado



Fuente: Elaboración Propia

##### B.- Particularidades de cada modelo

**HEC-RAS 1D:** Se usó solo una condición de contorno aguas abajo N. Depth = 0.005 y se tuvo que ajustar las tolerancias a 0.001 m en el cálculo de la superficie del agua, además, se aumentaron las iteraciones de cálculo a 40, con el fin de disminuir la variación en los resultados.

**HEC-RAS 2D:** Se usó un tamaño de malla de 24.9 m y 4s siguiendo los parámetros del N° de Courant, además, para los bordes donde inician los diques se usó un tamaño de malla de 12.5 m para obtener un poco más de información en esa zona.

Las condiciones de borde usadas fueron, un hidrograma uniforme con el caudal 2000 m<sup>3</sup>/s para la condición aguas arriba y N. Depth = 0.005 para la condición aguas abajo.

**IBER 2D:** Se usó un tamaño de malla de 10 m y tiempo 2s, además, para la condición de borde aguas arriba se usó subcrítico con un hidrograma uniforme de 2000 m<sup>3</sup>/s mientras que para la condición de borde aguas abajo, se usó subcrítico con la opción de vertedero a una altura de -0.23.

### **C.- Comentario**

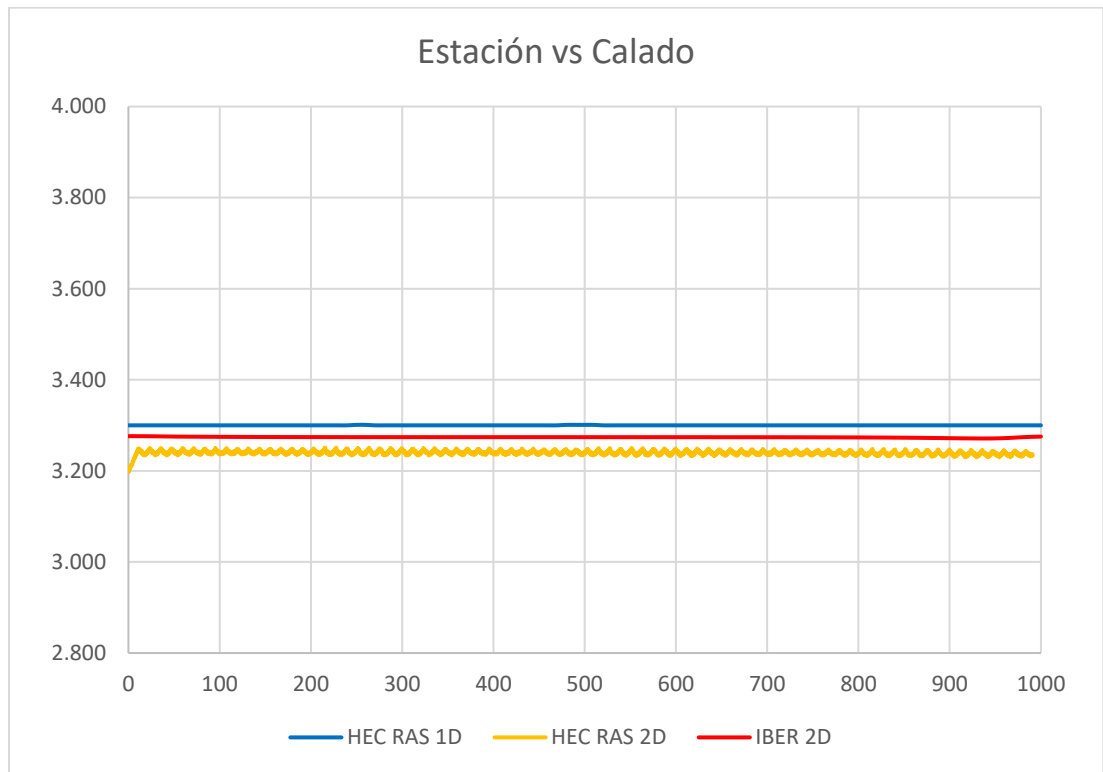
Podemos apreciar que los 3 resultados varían siendo la variación entre Hec Ras 1D y Hec Ras 2D la variación más amplia obteniendo un error de 1.35%, que está dentro del margen permitido y no supera el 5% por lo que se considera que los 3 modelos son acertados para este escenario.

## **4.2.10. Modelo 10**

### **A.- Características**

- Pendiente: 0.005
- Rugosidad: 0.035
- Caudal: 1500 m<sup>3</sup>/s
- Flujo: Permanente (subcrítico)

**Gráfico N° 10: Resultado del Calado**



**Fuente:** Elaboración Propia

### **B.- Particularidades de cada modelo**

**HEC-RAS 1D:** Se usó solo una condición de contorno aguas abajo N. Depth = 0.005 y se tuvo que ajustar las tolerancias a 0.001 m en el cálculo de la superficie del agua, además, se aumentaron las iteraciones de cálculo a 40, con el fin de disminuir la variación en los resultados.

**HEC-RAS 2D:** Se usó un tamaño de malla de 24.9 m y 4s siguiendo los parámetros del N° de Courant, además, para los bordes donde inician los diques se usó un tamaño de malla de 12.5 m para obtener un poco más de información en esa zona. Las condiciones de borde usadas fueron, un hidrograma uniforme con el caudal 1500 m<sup>3</sup>/s para la condición aguas arriba y N. Depth = 0.005 para la condición aguas abajo.

**IBER 2D:** Se usó un tamaño de malla de 18 m y tiempo 3s, además, para la condición de borde aguas arriba se usó subcrítico con un hidrograma uniforme de 1500 m<sup>3</sup>/s mientras que para la condición de borde aguas abajo, se usó subcrítico con la opción de vertedero a una altura de +0.125.

### C.- Comentario

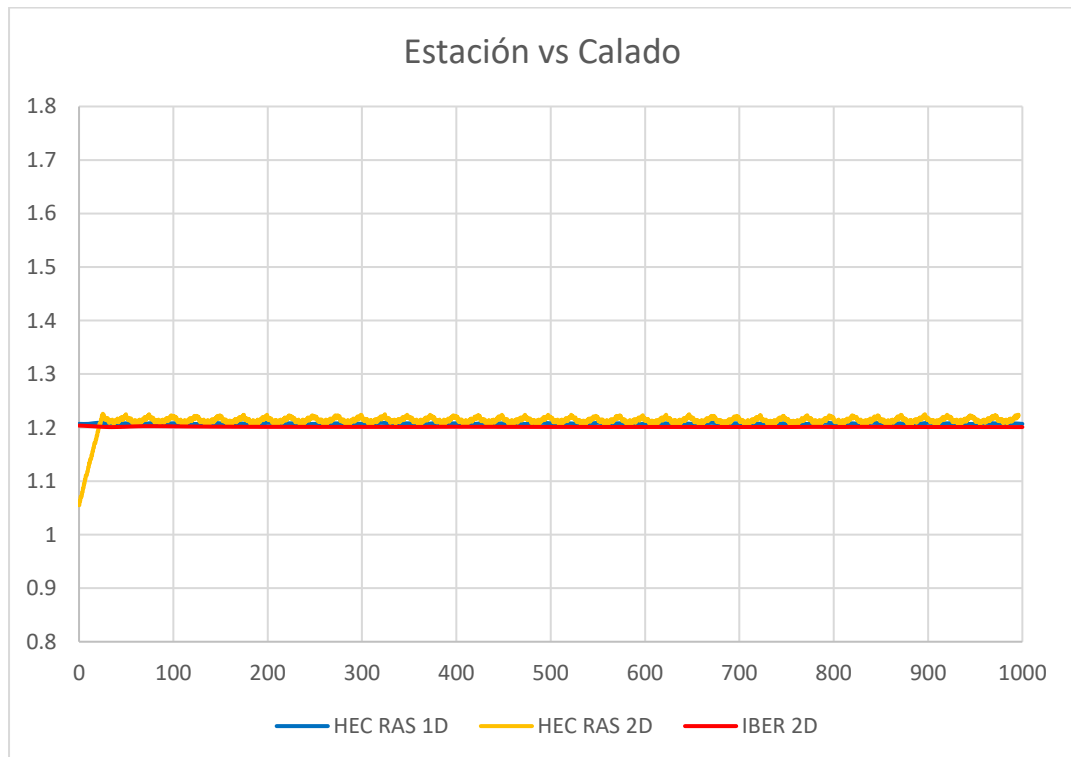
Podemos apreciar que los 3 resultados varían siendo la variación entre Hec Ras 1D y Hec Ras 2D la variación más amplia obteniendo un error de 1.85%, que está dentro del margen permitido y no supera el 5% por lo que se considera que los 3 modelos son acertados para este escenario.

## 4.2.11. Modelo 11

### A.- Características

- Pendiente: 0.007
- Rugosidad: 0.023
- Caudal: 500 m<sup>3</sup>/s
- Flujo: Permanente (supercrítico)

**Gráfico N° 11:** Resultado del Calado



**Fuente:** Elaboración Propia

## **B.- Particularidades de cada modelo**

**HEC-RAS 1D:** Se usó solo una condición de contorno aguas arriba N. Depth = 0.007 y se tuvo que ajustar las tolerancias a 0.0001 m en el cálculo de la superficie del agua, además, se aumentaron las iteraciones de cálculo a 30, con el fin de disminuir la variación en los resultados.

**HEC-RAS 2D:** Se usó un tamaño de malla de 24.9 m y 5s siguiendo los parámetros del N° de Courant, además, para los bordes donde inician los diques se usó un tamaño de malla de 12.5 m para obtener un poco más de información en esa zona. Las condiciones de borde usadas fueron, un hidrograma uniforme con el caudal 500 m<sup>3</sup>/s para la condición aguas arriba y N. Depth = 0.007 para la condición aguas abajo.

**IBER 2D:** Se usó un tamaño de malla de 3 m y tiempo 1s, además, para la condición de borde aguas arriba se usó supercrítico con una velocidad de 4.21 m/s con un hidrograma uniforme de 500 m<sup>3</sup>/s mientras que para la condición de borde aguas abajo, se usó supercrítico.

## **C.- Comentario**

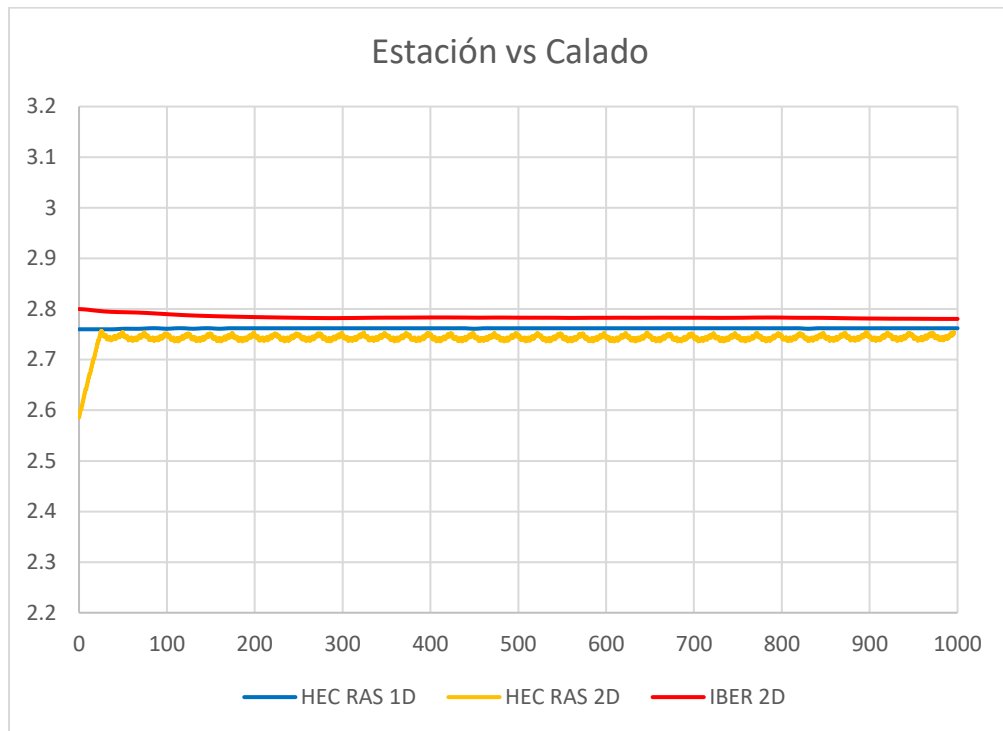
Podemos apreciar que en los 3 modelos el resultado varía muy poco, por lo tanto, se puede concluir que los 3 modelos son acertados para este escenario.

### **4.2.12. Modelo 12**

#### **A.- Características**

- Pendiente: 0.007
- Rugosidad: 0.023
- Caudal: 2000 m<sup>3</sup>/s
- Flujo: Permanente (supercrítico)

**Gráfico N° 12: Resultado del Calado**



**Fuente:** Elaboración Propia

### **B.- Particularidades de cada modelo**

**HEC-RAS 1D:** Se usó solo una condición de contorno aguas arriba N. Depth = 0.007 y se tuvo que ajustar las tolerancias a 0.0001 m en el cálculo de la superficie del agua, además, se aumentaron las iteraciones de cálculo a 30, con el fin de disminuir la variación en los resultados.

**HEC-RAS 2D:** Se usó un tamaño de malla de 24.9 m y 3s siguiendo los parámetros del N° de Courant, además, para los bordes donde inician los diques se usó un tamaño de malla de 12.5 m para obtener un poco más de información en esa zona. Las condiciones de borde usadas fueron, un hidrograma uniforme con el caudal 2000 m<sup>3</sup>/s para la condición aguas arriba y N. Depth = 0.007 para la condición aguas abajo.

**IBER 2D:** Se usó un tamaño de malla de 8.2 m y tiempo 1s, además, para la condición de borde aguas arriba se usó supercrítico con una velocidad de 7.30 m/s con un hidrograma



uniforme de 2000 m<sup>3</sup>/s mientras que para la condición de borde aguas abajo, se usó supercrítico.

### C.- Comentario

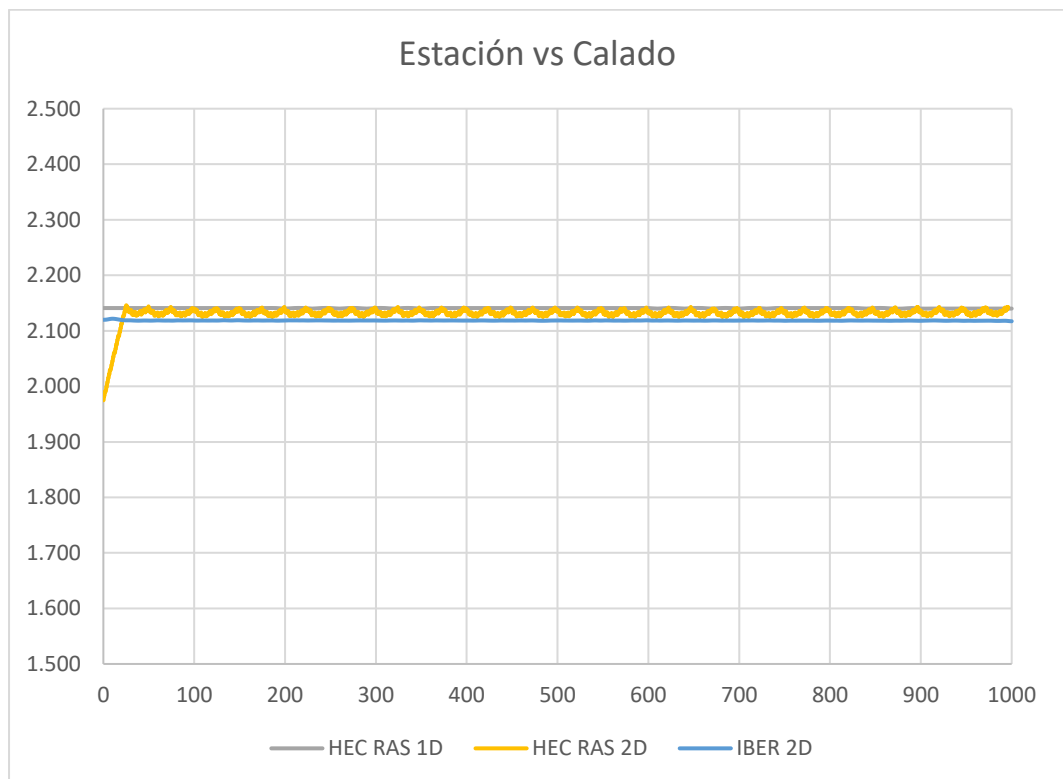
Podemos apreciar que los 3 resultados varían siendo la variación entre Iber 2D y Hec Ras 2D la variación más amplia obteniendo un error de 1.51%, que está dentro del margen permitido y no supera el 5% por lo que se considera que los 3 modelos son acertados para este escenario.

## 4.2.13. Modelo 13

### A.- Características

- Pendiente: 0.007
- Rugosidad: 0.030
- Caudal: 1000 m<sup>3</sup>/s
- Flujo: Permanente (supercrítico – subcrítico)

**Gráfico N° 13: Resultado del Calado**



**Fuente:** Elaboración Propia

## **B.- Particularidades de cada modelo**

**HEC-RAS 1D:** Se usaron dos condiciones de contorno aguas arriba N. Depth = 0.007 y aguas abajo N. Depth = 0.007 porque el flujo se acerca a crítico y no es seguro que sea subcrítico o supercrítico por lo que se corrió como mixto, las tolerancias de cálculo se dejaron por defecto.

**HEC-RAS 2D:** Se usó un tamaño de malla de 24.9 m y 4s siguiendo los parámetros del N° de Courant, además, para los bordes donde inician los diques se usó un tamaño de malla de 12.5 m para obtener un poco más de información en esa zona. Las condiciones de borde usadas fueron, un hidrograma uniforme con el caudal 1000 m<sup>3</sup>/s para la condición aguas arriba y N. Depth = 0.007 para la condición aguas abajo.

**IBER 2D:** Se usó un tamaño de malla de 3 m y tiempo 1s, además, para la condición de borde aguas arriba se usó supercrítico con una velocidad de 4.92 m/s con un hidrograma uniforme de 1000 m<sup>3</sup>/s mientras que para la condición de borde aguas abajo, se usó supercrítico.

## **C.- Comentario**

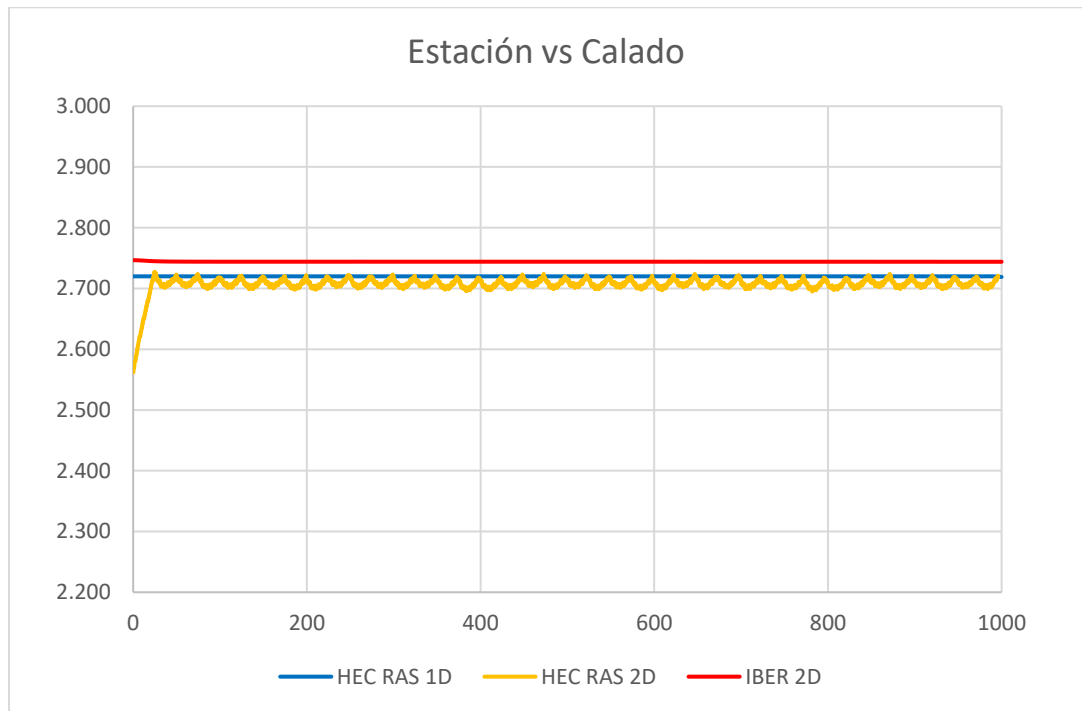
Podemos apreciar que en los 3 modelos el resultado varía muy poco, por lo tanto, se puede concluir que los 3 modelos son acertados para este escenario. Una consideración para tener en cuenta en Hec Ras 1D nos sale el flujo subcrítico con numero de Froude 0.997 mientras que en Iber para estabilizar el modelo tuvo que usarse condición de contorno supercrítico aguas arriba y aguas abajo adicionando la velocidad.

#### 4.2.14. Modelo 14

##### A.- Características

- Pendiente: 0.007
- Rugosidad: 0.030
- Caudal: 1500 m<sup>3</sup>/s
- Flujo: Permanente (supercrítico)

Gráfico N° 14: Resultado del Calado



Fuente: Elaboración Propia

##### B.- Particularidades de cada modelo

**HEC-RAS 1D:** Se usó solo una condición de contorno aguas arriba N° Depth = 0.007 y se tuvo que ajustar las tolerancias a 0.001 m en el cálculo de la superficie del agua, además, se aumentaron las iteraciones de cálculo a 40, con el fin de disminuir la variación en los resultados.

**HEC-RAS 2D:** Se usó un tamaño de malla de 24.9 m y 4s siguiendo los parámetros del N° de Courant, además, para los bordes donde inician los diques se usó un tamaño de malla de 8 m para obtener un poco más de información en esa zona.

Las condiciones de borde usadas fueron, un hidrograma uniforme con el caudal 1500 m<sup>3</sup>/s para la condición aguas arriba y N. Depth = 0.007 para la condición aguas abajo.

**IBER 2D:** Se usó un tamaño de malla de 10 m y tiempo 2s, además, para la condición de borde aguas arriba se usó supercrítico con una velocidad de 6.03 m/s con un hidrograma uniforme de 1500 m<sup>3</sup>/s mientras que para la condición de borde aguas abajo, se usó supercrítico.

### **C.- Comentario**

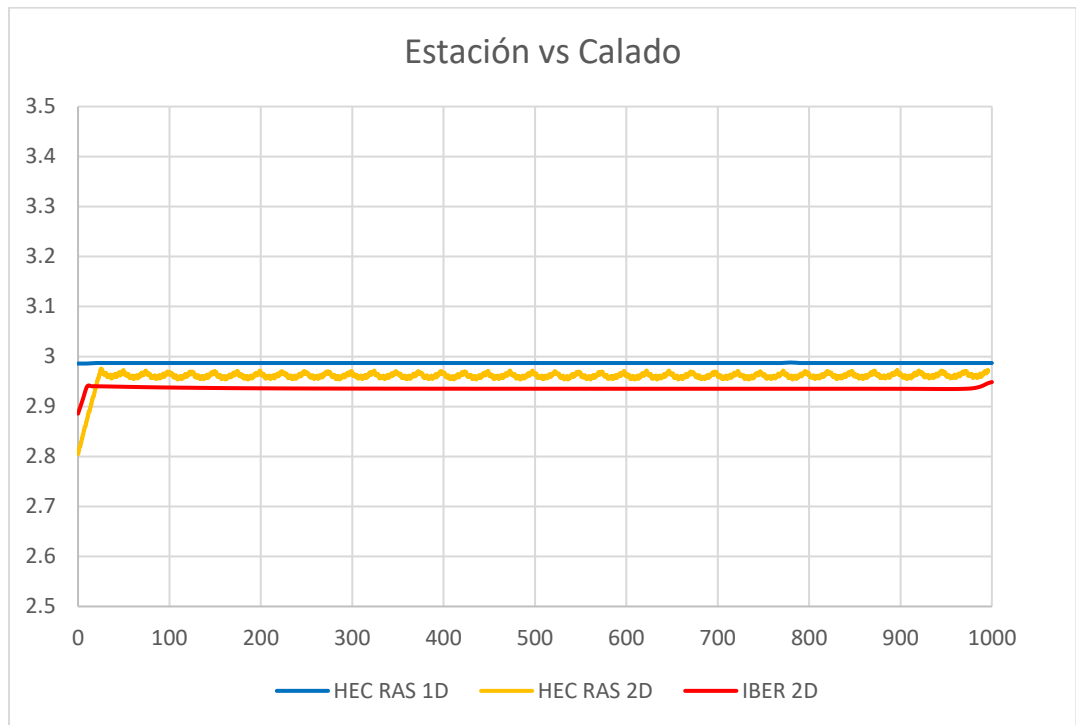
Hec Ras 1D y Hec Ras 2D tienen resultados similares mientras que Iber 2D y Hec Ras 2D tienen la variación más amplia obteniendo un error de 1.34%, que está dentro del margen permitido y no supera el 5% por lo que se considera que los 3 modelos son acertados para este escenario.

## **4.2.15. Modelo 15**

### **A.- Características**

- Pendiente: 0.007
- Rugosidad: 0.035
- Caudal: 1500 m<sup>3</sup>/s
- Flujo: Permanente (subcrítico)

**Gráfico N° 15: Resultado del Calado**



**Fuente:** Elaboración Propia

### **B.- Particularidades de cada modelo**

**HEC-RAS 1D:** Se usó solo una condición de contorno aguas abajo  $N^{\circ}$  Depth = 0.007 y se tuvo que ajustar las tolerancias a 0.0001 m en el cálculo de la superficie del agua, además, se aumentaron las iteraciones de cálculo a 40, con el fin de disminuir la variación en los resultados.

**HEC-RAS 2D:** Se usó un tamaño de malla de 24.9 m y 5s siguiendo los parámetros del  $N^{\circ}$  de Courant, además, para los bordes donde inician los diques se usó un tamaño de malla de 12.5 m para obtener un poco más de información en esa zona. Las condiciones de borde usadas fueron, un hidrograma uniforme con el caudal  $1500 \text{ m}^3/\text{s}$  para la condición aguas arriba y  $N^{\circ}$  Depth = 0.007 para la condición aguas abajo.

**IBER 2D:** Se usó un tamaño de malla de 5 m y tiempo 1s, además, para la condición de borde aguas arriba se usó subcrítico con un hidrograma uniforme de  $1500 \text{ m}^3/\text{s}$  mientras que para la condición de borde aguas abajo, se usó supercrítico.

### C.- Comentario

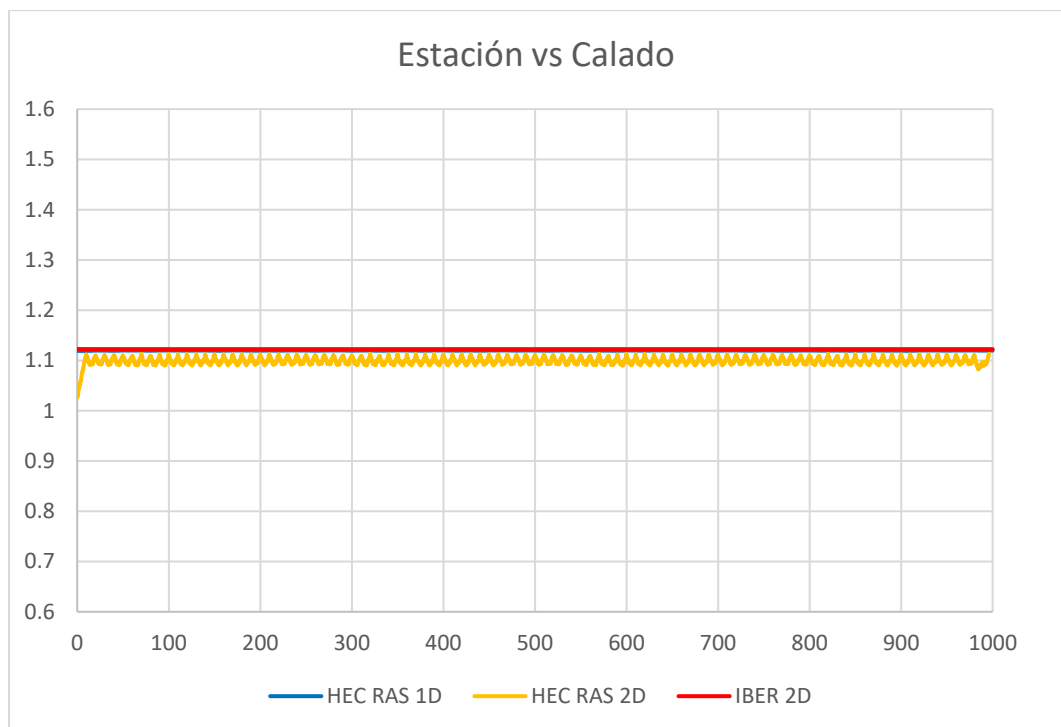
Podemos apreciar que los 3 resultados varían siendo la variación entre Iber 2D y Hec Ras 1D la variación más amplia obteniendo un error de 1.74%, que está dentro del margen permitido y no supera el 5% por lo que se considera que los 3 modelos son acertados para este escenario.

#### 4.2.16. Modelo 16

##### A.- Características

- Pendiente: 0.009
- Rugosidad: 0.023
- Caudal: 500 m<sup>3</sup>/s
- Flujo: Permanente (supercrítico)

**Gráfico N° 16:** Resultado del Calado



**Fuente:** Elaboración Propia

## **B.- Particularidades de cada modelo**

**HEC-RAS 1D:** Se usó solo una condición de contorno aguas arriba N. Depth = 0.009 y se tuvo que ajustar las tolerancias a 0.0001 m en el cálculo de la superficie del agua, además, se aumentaron las iteraciones de cálculo a 40, con el fin de disminuir la variación en los resultados.

**HEC-RAS 2D:** Se usó un tamaño de malla de 10 m y 2s siguiendo los parámetros del N° de Courant, además, para los bordes donde inician los diques se usó un tamaño de malla de 5 m para obtener un poco más de información en esa zona.

Las condiciones de borde usadas fueron, un hidrograma uniforme con el caudal 500 m<sup>3</sup>/s para la condición aguas arriba y N. Depth = 0.009 para la condición aguas abajo.

**IBER 2D:** Se usó un tamaño de malla de 5 m y tiempo 1s, además, para la condición de borde aguas arriba se usó supercrítico con una velocidad de 4.66 m/s con un hidrograma uniforme de 500 m<sup>3</sup>/s mientras que para la condición de borde aguas abajo, se usó supercrítico.

## **C.- Comentario**

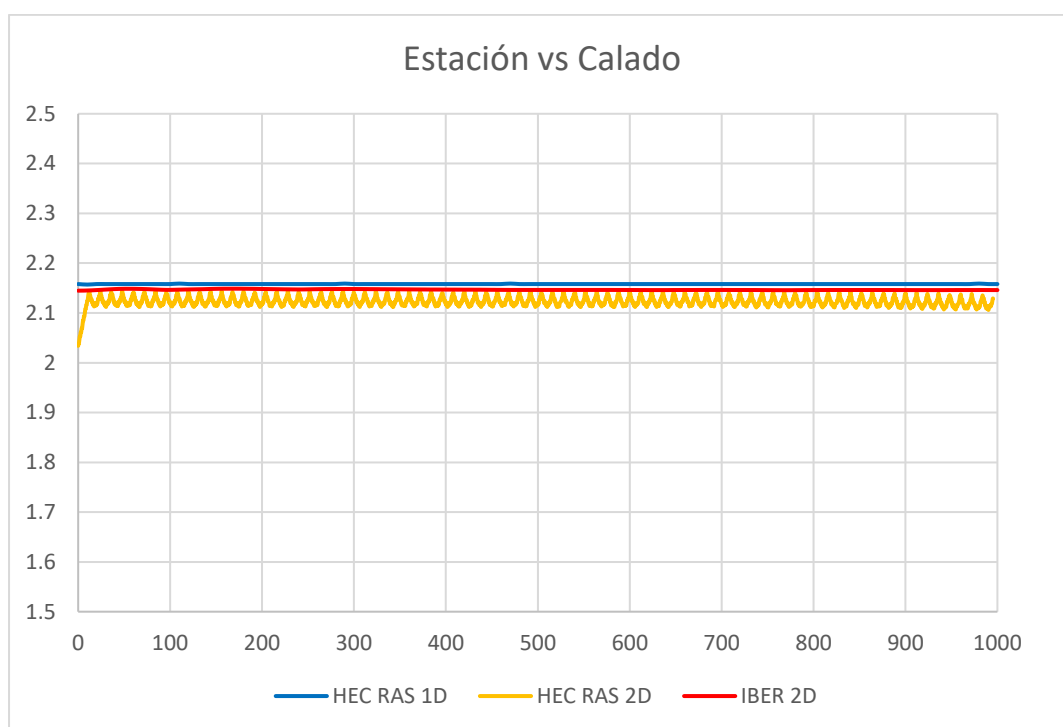
Hec Ras 1D e Iber 2D tienen resultados similares mientras que Hec Ras 2D se aleja un poco más obteniendo un error de 1.85%, que está dentro del margen permitido y no supera el 5% por lo que se considera que los 3 modelos son acertados para este escenario.

#### 4.2.17. Modelo 17

##### A.- Características

- Pendiente: 0.009
- Rugosidad: 0.023
- Caudal: 1500 m<sup>3</sup>/s
- Flujo: Permanente (supercrítico)

Gráfico N° 17: Resultado del Calado



Fuente: Elaboración Propia

##### B.- Particularidades de cada modelo

**HEC-RAS 1D:** Se usó solo una condición de contorno aguas arriba N. Depth = 0.009 y se tuvo que ajustar las tolerancias a 0.0001 m en el cálculo de la superficie del agua, además, se aumentaron las iteraciones de cálculo a 40, con el fin de disminuir la variación en los resultados.

**HEC-RAS 2D:** Se usó un tamaño de malla de 12 m y 1s siguiendo los parámetros del N° de Courant, además, para los bordes donde



inician los diques se usó un tamaño de malla de 6 m para obtener un poco más de información en esa zona.

Las condiciones de borde usadas fueron, un hidrograma uniforme con el caudal 1500 m<sup>3</sup>/s para la condición aguas arriba y N. Depth = 0.009 para la condición aguas abajo.

**IBER 2D:** Se usó un tamaño de malla de 6 m y tiempo 1s, además, para la condición de borde aguas arriba se usó supercrítico con una velocidad de 6.871 m/s con un hidrograma uniforme de 1500 m<sup>3</sup>/s mientras que para la condición de borde aguas abajo, se usó supercrítico.

### **C.- Comentario**

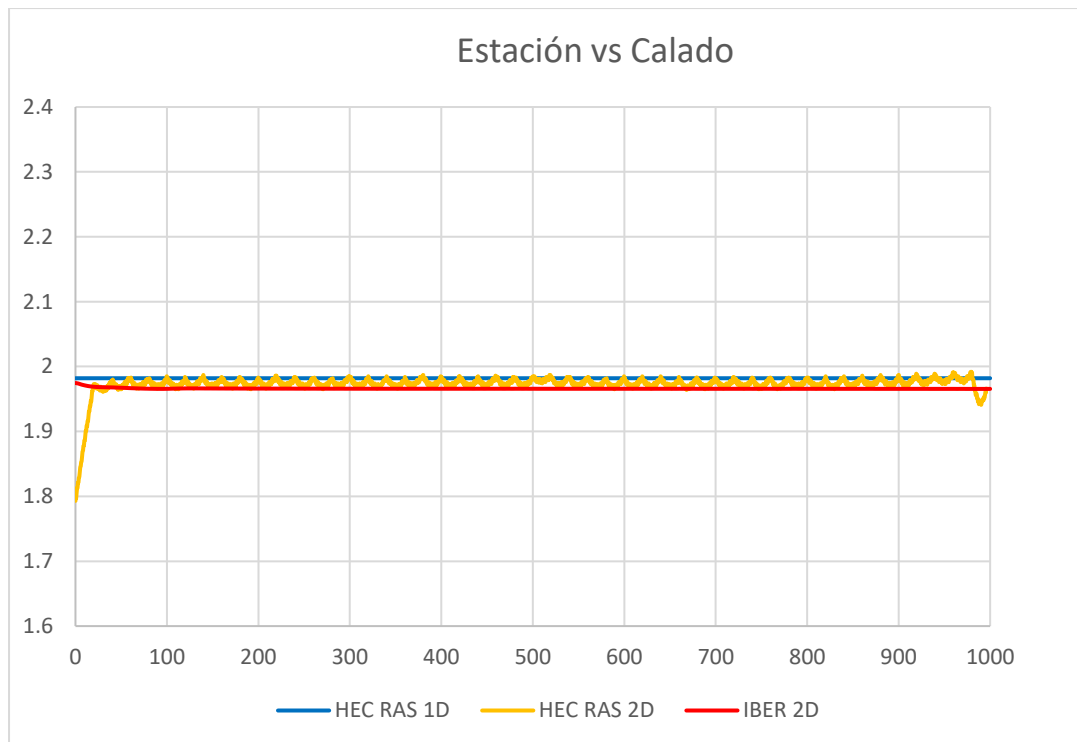
Podemos apreciar que los 3 resultados varían siendo la variación entre Hec Ras 1D y Hec Ras 2D la variación más amplia obteniendo un error de 1.62%, que está dentro del margen permitido y no supera el 5% por lo que se considera que los 3 modelos son acertados para este escenario.

## **4.2.18. Modelo 18**

### **A.- Características**

- Pendiente: 0.009
- Rugosidad: 0.030
- Caudal: 1000 m<sup>3</sup>/s
- Flujo: Permanente (supercrítico)

**Gráfico N° 18: Resultado del Calado**



**Fuente:** Elaboración Propia

### **B.- Particularidades de cada modelo**

**HEC-RAS 1D:** Se usó solo una condición de contorno aguas arriba N. Depth = 0.009 y se tuvo que ajustar las tolerancias a 0.001 m en el cálculo de la superficie del agua, las iteraciones de cálculo se dejaron por defecto en 20, con el fin de disminuir la variación en los resultados.

**HEC-RAS 2D:** Se usó un tamaño de malla de 20 m y 4s siguiendo los parámetros del N° de Courant, además, para los bordes donde inician los diques se usó un tamaño de malla de 8 m para obtener un poco más de información en esa zona.

Las condiciones de borde usadas fueron, un hidrograma uniforme con el caudal 1000 m<sup>3</sup>/s para la condición aguas arriba y N. Depth = 0.009 para la condición aguas abajo.

**IBER 2D:** Se usó un tamaño de malla de 3 m y tiempo 1s, además, para la condición de borde aguas arriba se usó supercrítico con una velocidad de 5.10 m/s con un hidrograma uniforme de 1000 m<sup>3</sup>/s mientras que para la condición de borde aguas abajo, se usó supercrítico.

### C.- Comentario

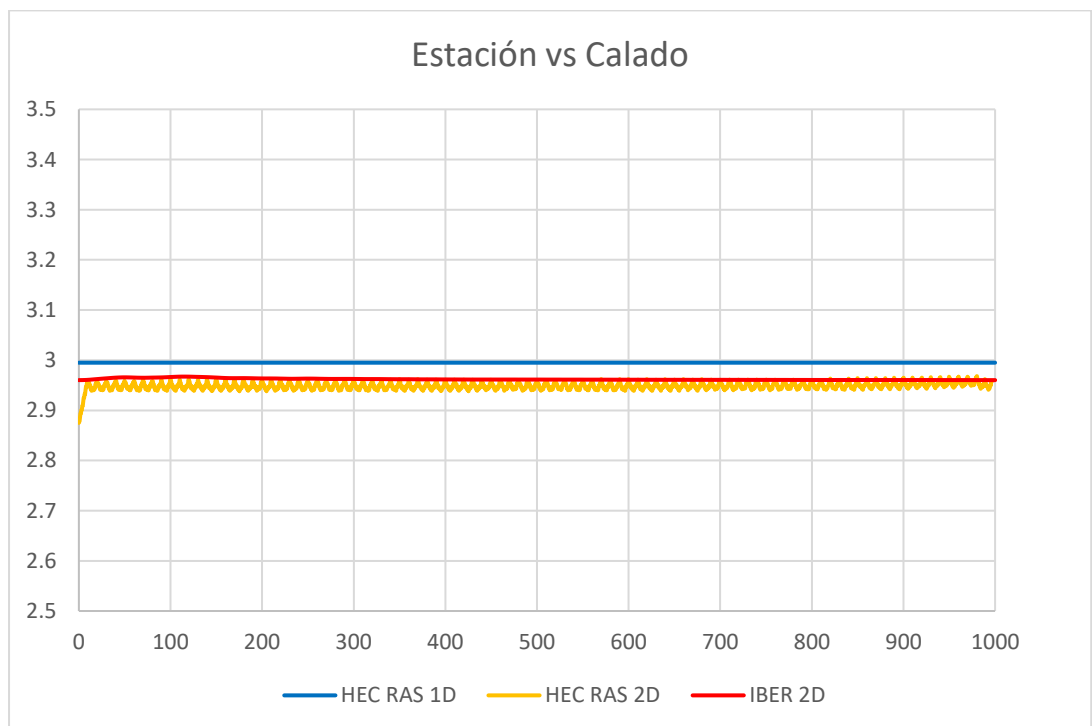
Podemos apreciar que los 3 resultados varían siendo la variación entre Hec Ras 1D e Iber 2D la más amplia obteniendo un error de 0.81%, que está dentro del margen permitido y no supera el 5% por lo que se considera que los 3 modelos son acertados para este escenario.

## 4.2.19. Modelo 19

### A.- Características

- Pendiente: 0.009
- Rugosidad: 0.030
- Caudal: 2000 m<sup>3</sup>/s
- Flujo: Permanente (supercrítico)

**Gráfico N° 19:** Resultado del Calado



Fuente: Elaboración Propia

## **B.- Particularidades de cada modelo**

**HEC-RAS 1D:** Se usó solo una condición de contorno aguas arriba N. Depth = 0.009 y se tuvo que ajustar las tolerancias a 0.001 m en el cálculo de la superficie del agua, las iteraciones de cálculo se dejaron por defecto en 20, con el fin de disminuir la variación en los resultados.

**HEC-RAS 2D:** Se usó un tamaño de malla de 12 m y 2s siguiendo los parámetros del N° de Courant, además, para los bordes donde inician los diques se usó un tamaño de malla de 5 m para obtener un poco más de información en esa zona.

Las condiciones de borde usadas fueron, un hidrograma uniforme con el caudal 2000 m<sup>3</sup>/s para la condición aguas arriba y N. Depth = 0.009 para la condición aguas abajo.

**IBER 2D:** Se usó un tamaño de malla de 8 m y tiempo 1s, además, para la condición de borde aguas arriba se usó supercrítico con una velocidad de 6.69 m/s con un hidrograma uniforme de 2000 m<sup>3</sup>/s mientras que para la condición de borde aguas abajo, se usó supercrítico.

## **C.- Comentario**

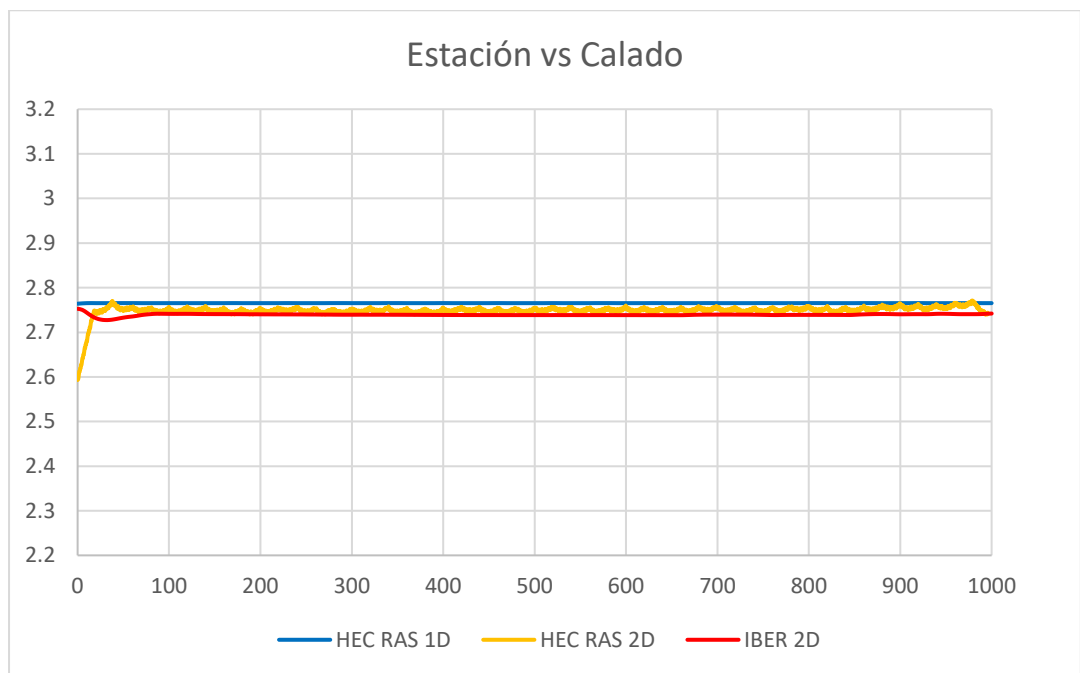
Hec Ras 2D e Iber 2D tienen resultados similares mientras que Hec Ras 1D se aleja un poco más obteniendo un error de 1.56%, que está dentro del margen permitido y no supera el 5% por lo que se considera que los 3 modelos son acertados para este escenario.

#### 4.2.20. Modelo 20

##### A.- Características

- Pendiente: 0.009
- Rugosidad: 0.035
- Caudal: 1500 m<sup>3</sup>/s
- Flujo: Permanente (supercrítico)

Gráfico N° 20: Resultado del Calado



Fuente: Elaboración Propia

##### B.- Particularidades de cada modelo

**HEC-RAS 1D:** Se usaron dos condiciones de contorno aguas arriba N. Depth = 0.009 y aguas abajo N. Depth = 0.009 porque el flujo se acerca a crítico y no es seguro que sea subcrítico o supercrítico por lo que se corrió como mixto, las tolerancias a 0.001 m en el cálculo de la superficie del agua, las iteraciones de cálculo se aumentaron a 20, con el fin de disminuir la variación en los resultados.

**HEC-RAS 2D:** Se usó un tamaño de malla de 20m y 4s siguiendo los parámetros del N° de Courant, además, para los bordes donde inician los diques se usó un tamaño de malla de 12.5 m para obtener un poco más de información en esa zona.

Las condiciones de borde usadas fueron, un hidrograma uniforme con el caudal 1500 m<sup>3</sup>/s para la condición aguas arriba y N. Depth = 0.009 para la condición aguas abajo.

**IBER 2D:** Se usó un tamaño de malla de 5 m y tiempo 1s, además, para la condición de borde aguas arriba se usó supercrítico con una velocidad de 5.70 m/s con un hidrograma uniforme de 1500 m<sup>3</sup>/s mientras que para la condición de borde aguas abajo, se usó supercrítico.

### **C.- Comentario**

Podemos apreciar que los 3 resultados varían siendo la variación entre Hec Ras 1D e Iber 2D la más amplia obteniendo un error de 0.95%, que está dentro del margen permitido y no supera el 5% por lo que se considera que los 3 modelos son acertados para este escenario.

### 4.3. Resumen

Tabla N° 14: Cuadro resumen

Pendiente (s)	Rugosidad (n)	Caudal (Q)	TIRANTE			TAMAÑO DE MALLA				TIEMPO COMPUTACIONAL	
			1D	2D		2D				2D	
			HEC RAS	IBER	HEC RAS	IBER	N° Courant	HEC RAS	N° Courant	IBER	HEC RAS
0.003	0.023	500 m³/s	1.555	1.55	1.546	10	0.624	24.90	0.752	2	6
		1500 m³/s	2.994	3.01	2.95	10	0.946	12.00	0.788	2	2
	0.03	1000 m³/s	2.755	2.76	2.71	10	0.688	12.00	0.860	2	3
		2000 m³/s	4.157	4.07	4.082	3	1.481	25.00	0.889	1	5
	0.035	1500 m³/s	3.841	3.75	3.776	6	0.605	24.90	0.583	1	4
0.005	0.023	500 m³/s	1.327	1.33	1.335	4	0.911	20.00	0.911	1	4
		1500 m³/s	2.556	2.59	2.53	9	0.617	12.00	0.925	2	2
	0.03	1000 m³/s	2.366	2.36	2.348	10	0.807	20.00	0.807	2	4
		2000 m³/s	3.573	3.55	3.52	10	1.045	24.90	0.839	2	4
	0.035	1500 m³/s	3.3	3.27	3.24	18	0.711	24.90	0.685	3	4
0.007	0.023	500 m³/s	1.208	1.2	1.213	3	1.348	24.90	0.812	1	5
		2000 m³/s	2.762	2.78	2.743	8.2	0.837	24.90	0.827	1	3
	0.03	1000 m³/s	2.141	2.12	2.13	3	1.494	24.90	0.720	1	4
		1500 m³/s	2.72	2.74	2.71	10	1.044	24.90	0.839	2	4
	0.035	1500 m³/s	2.987	2.94	2.961	5	0.948	24.90	0.952	1	5
0.009	0.023	500 m³/s	1.119	1.12	1.099	5	0.874	10.00	0.874	1	2
		1500 m³/s	2.158	2.15	2.12	6	1.111	12.00	0.555	1	1
	0.03	1000 m³/s	1.982	1.97	1.97	3	1.615	20.00	0.969	1	4
		2000 m³/s	2.995	2.96	2.95	8	0.786	12.00	1.048	1	2
	0.035	1500 m³/s	2.765	2.74	2.749	5	1.026	20.00	1.026	1	4

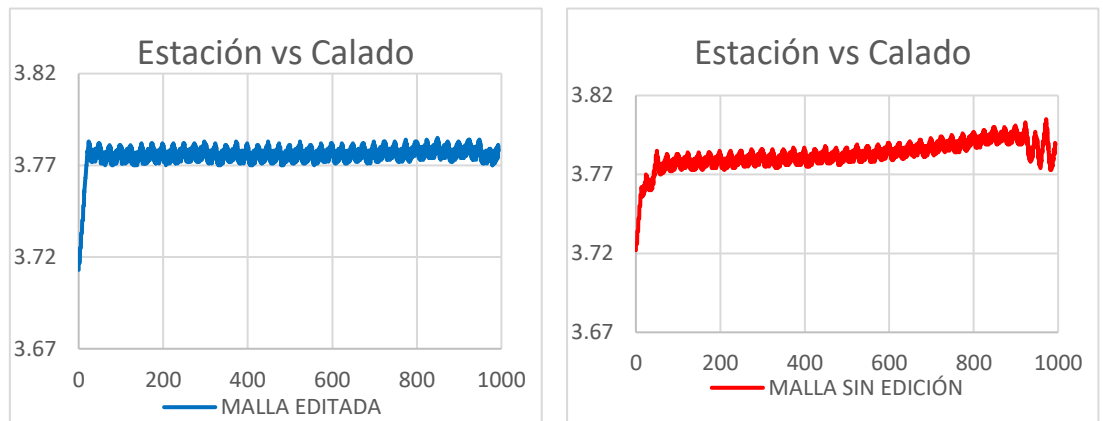
Fuente: Elaboración Propia

## CONCLUSIONES

1. Se determinaron los siguientes parámetros para la creación de los escenarios:
  - Se eligió un ancho de 100m y una longitud de 1000m, un tramo aceptable ya que se pretende representar un modelo para ríos aluviales de la Costa peruana.
  - Se escogieron pendientes de 0.003 m/m, 0.005 m/m, 0.007 m/m, 0.009 m/m; siendo estos valores cercanos a los ríos de la Costa y Sierra del Perú.
  - Se seleccionaron rugosidades de 0.023 (pastos cortos), 0.030 (pastos altos) y 0.035 (arbustos y piedra); ya que son rugosidades presentes en los ríos de nuestra Costa peruana.
  - Con respecto a los caudales, se asumieron caudales constantes que se complementan con el canal de investigación, con la finalidad de mantener un tirante estable que permita su evaluación y esto origino resultados aceptables. Los caudales elegidos fueron: 500m<sup>3</sup>/s, 1000m<sup>3</sup>/s, 1500m<sup>3</sup>/s, 2000m<sup>3</sup>/s.
2. Geometrías, seccionamiento y condiciones de contorno
  - Geometría: Se utilizó una sección trapezoidal con un talud 2:1, asemejando las riveras de un cauce natural, con diques de una altura de 5.5 para evitar desbordes y así poder analizar correctamente el flujo del agua.
  - Seccionamiento: Se usaron distancias de 10 m entre las secciones transversales ya que después de un análisis con diferentes distancias se llegó a la conclusión que para un análisis de un canal de 1000m de longitud, el programa Hec Ras 1D trabaja mejor con esta distancia.
  - Condiciones de contorno: Se tomó en cuenta el régimen del flujo (Subcrítico, Supercrítico), que se estimó mediante la fórmula de Manning usando el software Hcanales. Debido a la singularidad de este apartado, cada escenario cuenta con condiciones de contorno específicas, tal y como se describe en la presentación de resultados.

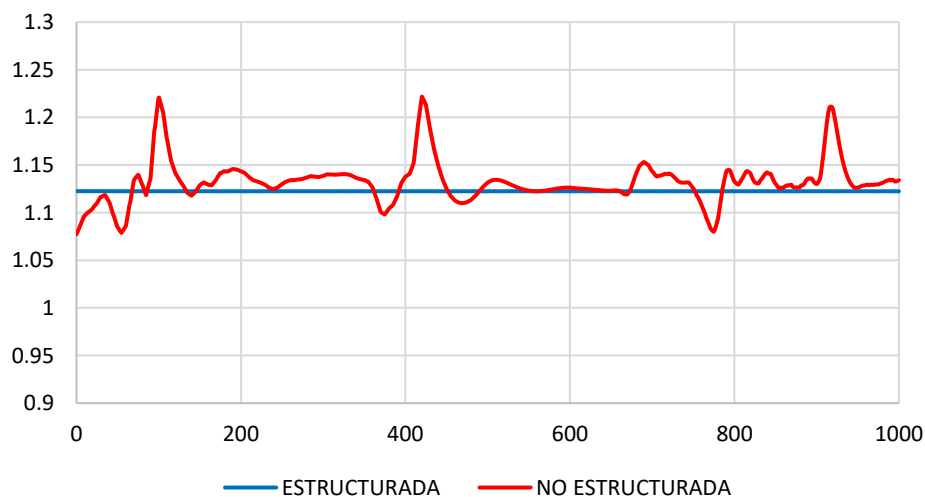


3. Se crearon 20 escenarios y se analizaron en Hec Ras 1D, Hec Ras 2D e Iber 2D, dando un total de 60 modelos generados.
4. Al realizar la modelación bidimensional de un canal de 100 metros de ancho en el programa Hec Ras, se concluyó que cuando se edita la malla y esta contiene más lados ortogonales (malla estructurada), la simulación del flujo se estabiliza. Ejemplo: caudal 1500 m<sup>3</sup>/s, pendiente 0.003 m/m y rugosidad 0.035.



Además, se concluye que en el programa Iber, la modelación para este caso en particular trabaja mejor con una malla estructurada debido a que no presenta muchas irregularidades en el terreno.

### COMPARACIÓN ENTRE MALLAS



5. El programa Hec Ras trabaja con un ráster de modelo digital de elevación para generar el Terrain, influyendo directamente el tamaño del píxel del DEM; donde se observó que cuando se genera el perfil del terreno se

visualiza en forma escalonada. Sin embargo, bajo efecto de evaluación, cuando son muy pequeños los desniveles, los resultados no superan el error en 1%. Asimismo, la relación que se observó entre el desnivel del terreno y los resultados del tirante es aproximadamente el doble.

6. Para las condiciones de contorno en el software Iber se llegaron a las siguientes conclusiones:
  - Cuando el régimen de flujo es subcrítico, se ha considerado la condición de contorno aguas abajo **Subcrítico(vertedero)**, para poder tener a la salida el tirante correcto y tener un modelo estable.
  - Cuando el régimen del flujo es supercrítico, la condición de contorno aguas arriba se colocó **Supercrítico**, donde se cuenta con una velocidad 10% mayor a la obtenida del modelo unidimensional con Hec Ras.
7. Los modelamientos han demostrado que cuando el régimen de flujo es crítico se genera una inestabilidad en el tirante, lo cual obligó que para el modelo Iber 2D en el escenario con las características caudal 1000 m<sup>3</sup>/s, pendiente 0.007m/m y rugosidad 0.030; el número de Froude resultante en el software Hec Ras 1D era 1 pero la condición de contorno se tuvo que colocar supercrítico.
8. Con respecto a la malla que se genera del modelo digital de elevación, existen diferencias entre el modelo Iber y Hec Ras, el primero otorga una cota promedio para cada celda y la segunda toma las cotas de los lados de la celda.
9. Se ha encontrado los siguientes números de Courant para que los modelos bidimensionales Iber y Hec Ras sean estables, y están dentro de este orden.

<b>NÚMERO DE COURANT</b>		
Software	Iber 2D	Hec Ras 2D
Ecuación	Saint Venant	Saint Venant (Onda difusa)
Rango de valores	$0.6 < x < 1.6$	$0.5 < x < 1.05$

- Para el cálculo de la fórmula del número de Courant, interviene el tamaño de malla y el tiempo de cálculo. Por lo que escoger el correcto tamaño de malla significaría más veracidad en los resultados, esta variable es muy importante en el desarrollo de la modelación.

10. En respuesta a la hipótesis en el modelo bidimensional de un canal de 100 metros con características de pendiente 0.50%, caudal de 1500 m<sup>3</sup>/s y una rugosidad de 0.023. El tamaño de malla y el tiempo computacional que más se ajustan se presenta en el siguiente cuadro de comparación:

	HIPÓTESIS		CONCLUSIÓN	
	Hec Ras 2D	Iber 2D	Hec Ras 2D	Iber 2D
<b>Tamaño de malla</b>	25m	12m	12m	9m
<b>Tiempo computacional</b>	2s	2s	2s	2s

11. La propuesta que se presenta a continuación sugiere usar los siguientes datos para la modelación bidimensional de canales anchos de 100 metros en los programas Hec Ras 5.0.7. e Iber 2.5.2.; teniendo en cuenta sus características físicas:

Pendiente (s)	Rugosidad (n)	Caudal (Q)	TAMAÑO DE MALLA (m)		TIEMPO COMPUTACIONAL (s)	
			IBER	HEC RAS	IBER	HEC RAS
0.003	0.023	500 m <sup>3</sup> /s	10	24.9	2	6
	0.030	1000 m <sup>3</sup> /s	10	12	2	3
	0.035	1500 m <sup>3</sup> /s	6	24.9	1	4
0.005	0.023	1500 m <sup>3</sup> /s	9	12	2	2
	0.030	1000 m <sup>3</sup> /s	10	20	2	4
	0.035	1500 m <sup>3</sup> /s	18	24.9	3	4
0.007	0.023	500 m <sup>3</sup> /s	3	24.9	1	5
	0.030	1000 m <sup>3</sup> /s	3	24.9	1	4
		1500 m <sup>3</sup> /s	10	24.9	2	4
0.009	0.023	500 m <sup>3</sup> /s	5	10	1	2
		1500 m <sup>3</sup> /s	6	12	1	2
	0.030	1000 m <sup>3</sup> /s	3	20	1	4
		2000 m <sup>3</sup> /s	8	12	1	2

## RECOMENDACIONES

- En el modelo Hec Ras 1D se recomienda dejar un margen libre considerable entre la superficie del flujo y los diques que limitan nuestro canal o río, para evitar problemas con el tirante. Además, para el cálculo de resultados se recomienda disminuir las tolerancias de cálculo que vienen por defecto para evitar errores en el modelo.
- Para Hec Ras 2D se recomienda usar un ráster con una resolución considerable de los datos, de acuerdo con el tamaño del terreno. Para un tramo de 1000m de longitud y 100m de ancho, se usa un ráster de 0.5m; en tanto se quiera utilizar un tramo diferente se podría emplear esta relación para encontrar el ráster adecuado, siendo el error de este, en la creación del perfil y en los resultados, irrelevante debido a que es menor al 1%.
- Se recomienda editar y crear la malla de tal manera de que sea ortogonal en la dirección en la que fluye el flujo, para simplificar los cálculos y evitar los tiempos amplios del procesamiento del modelo. En caso no se pueda estimar la dirección del flujo es preferible usar breaklines y una malla no estructurada para esas zonas.
- Para el modelo Iber 2D se recomienda estimar en que régimen está trabajando el flujo (subcrítico, supercrítico), previamente de las condiciones de borde, ya que agregar condiciones de contorno inadecuadas genera inestabilidad en el flujo.
- Citando el párrafo anterior, cuando el flujo tiene un régimen supercrítico, nos pide agregar la velocidad de entrada (aguas arriba), la cual se puede estimar fácilmente usando la fórmula de Manning y luego ir calibrando hasta que el modelo se estabilice.
- Cuando el flujo tiene régimen subcrítico en el modelamiento de Iber, las condiciones de borde en la salida te piden ingresar valores de vertedero o nivel dado, lo que la primera opción supone un problema ya que el valor del vertedero genera una continuación en la línea de investigación para evaluar el modelamiento, y la otra opción nos pide un nivel establecido para un

tiempo dado, siendo un dato específico complicado de estimar sino se tiene un modelo real o un modelo físico a escala.

- Además, para la creación de la malla en Iber 2D pasa lo mismo que en Hec Ras 2D, si se conoce el sentido del flujo es mejor usar una malla estructurada, mientras que, si no, es preferible usar la malla no estructurada.

## BIBLIOGRAFÍA

- Bladé Castellet, E. (2005). Capítulo 2. Flujo variable en lámina libre. Pag 41–104.
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., & Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Metodos Numericos Para Calculo y Diseno En Ingenieria*, 30(1), 1–10. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Bladé, E., Sánchez, M., Juny, Sánchez, H. P., Niñerola, D., & Gómez, M. (2009). Modelación numérica en ríos en régimen permanente y variable Modelación numérica en ríos en régimen permanente y variable.
- Chanson, H. (2004). *The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction: Basic Principles, Sediment Motion, Hydraulic Modelling, Design of Hydraulic Structures: Second Edition*. In *The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction: Basic Principles, Sediment Motion, Hydraulic Modelling, Design of Hydraulic Structures: Second Edition*. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-5978-9.X5000-4>
- Chow, V. te. (1994). *Hidraulica de canales abiertos (Ven Te Chow).pdf* (1° Edición; M. E. Suárez, Ed.). Santa Fé de Bogota, Colombai.
- Chow, V. Te. (2008). *Hidrologia Aplicada* (1° Edición; MARTHA Suárez R., Ed.). Colombia.
- Flumen. (2013). *Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas*. 24.
- MAZA ALVAREZ, J. (1998). *Estabilidad de Cauces* (1 era edii; UNAM, Ed.). México D.F.
- MAZA ALVAREZ, J. (1998). *Hidráulica de Canales* (1 era edic; UNAM, Ed.). México D.F.
- MAZA ALVAREZ, J. (1998c). *MORFOLOGIA DE RÍOS*. pag 50. (1 era edic; UNAM, Ed.). México D.F.
- ROCHA, A. (1998). *INTRODUCCIÓN A LA HIDRÁULICA FLUVIAL* (Primera Ed; UNI, Ed.).
- US Army Corps of Engineers. (2020). *HEC-RAS\_6.0\_ReleaseNotes.pdf* (p. 705). p. 705. California.
- Toro, F. M. (1998). *Ecuaciones de Navier Stokes y una solución numérica para flujos a superficie libre*.
- Villón, M. (2007). *Hidráulica de Canales* (2° Edición; Villon, Ed.). LIMA.

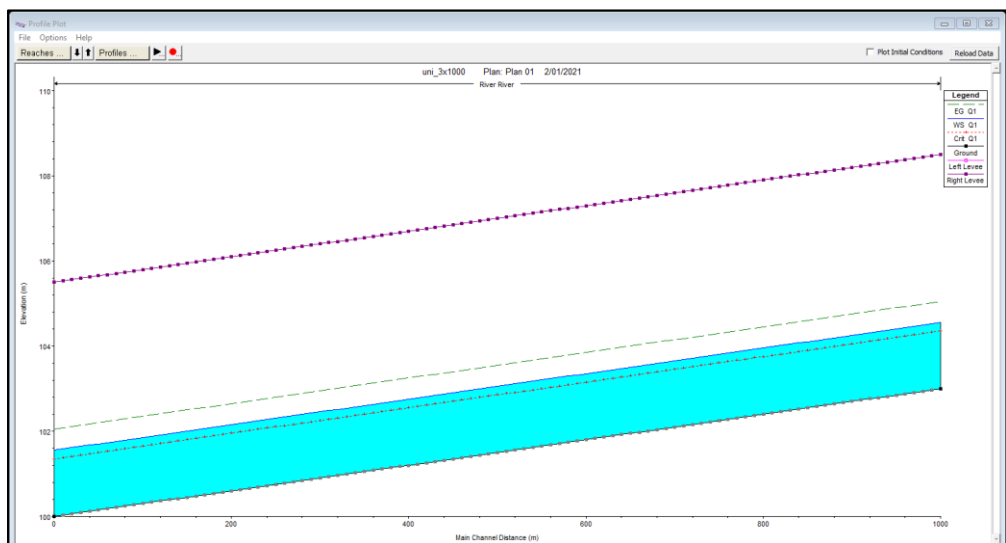
## ANEXOS

**Figura N° 86:** Cuadro de resultados del modelo unidimensional UNI\_3X1000XQ1 (n=0.023)

HEC-RAS Plan: Plan 01 River: River Reach: River Profile: Q1															
Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Frctn Loss	Vel Total	Froude # XS	Froude # CH
			(m <sup>3</sup> /s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m <sup>2</sup> )	(m)	(m)	(m/s)		
River	1000	Q1	500.00	103.00	104.56	104.35	105.05	0.002997	3.12	160.35	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	990.00*	Q1	500.00	102.97	104.53	104.32	105.02	0.002996	3.12	160.37	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	980.00*	Q1	500.00	102.94	104.50	104.30	104.99	0.002997	3.12	160.36	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	970.00*	Q1	500.00	102.91	104.47	104.26	104.96	0.002996	3.12	160.38	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	960.00*	Q1	500.00	102.88	104.44	104.23	104.93	0.002997	3.12	160.36	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	950.00*	Q1	500.00	102.85	104.41	104.20	104.90	0.002995	3.12	160.39	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	940.00*	Q1	500.00	102.82	104.38	104.17	104.87	0.002996	3.12	160.37	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	930.00*	Q1	500.00	102.79	104.35	104.14	104.84	0.002997	3.12	160.35	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	920.00*	Q1	500.00	102.76	104.32	104.11	104.81	0.002996	3.12	160.37	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	910.00*	Q1	500.00	102.73	104.29	104.08	104.78	0.002997	3.12	160.36	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	900.00*	Q1	500.00	102.70	104.26	104.05	104.75	0.002996	3.12	160.38	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	890.00*	Q1	500.00	102.67	104.23	104.02	104.72	0.002997	3.12	160.36	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	880.00*	Q1	500.00	102.64	104.20	103.99	104.69	0.002995	3.12	160.39	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	870.00*	Q1	500.00	102.61	104.17	103.96	104.66	0.002996	3.12	160.37	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	860.00*	Q1	500.00	102.58	104.14	103.94	104.63	0.002997	3.12	160.35	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	850.00*	Q1	500.00	102.55	104.11	103.90	104.60	0.002996	3.12	160.37	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	840.00*	Q1	500.00	102.52	104.08	103.87	104.57	0.002997	3.12	160.36	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	830.00*	Q1	500.00	102.49	104.05	103.84	104.54	0.002996	3.12	160.38	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	820.00*	Q1	500.00	102.46	104.02	103.81	104.51	0.002997	3.12	160.37	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	810.00*	Q1	500.00	102.43	103.99	103.78	104.48	0.002995	3.12	160.39	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	800.00*	Q1	500.00	102.40	103.96	103.75	104.45	0.002996	3.12	160.37	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	790.00*	Q1	500.00	102.37	103.93	103.72	104.42	0.002997	3.12	160.35	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	780.00*	Q1	500.00	102.34	103.90	103.69	104.39	0.002996	3.12	160.38	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	770.00*	Q1	500.00	102.31	103.87	103.66	104.36	0.002997	3.12	160.36	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	760.00*	Q1	500.00	102.28	103.84	103.63	104.33	0.002996	3.12	160.38	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	750.00*	Q1	500.00	102.25	103.81	103.60	104.30	0.002997	3.12	160.37	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	740.00*	Q1	500.00	102.22	103.78	103.57	104.27	0.002995	3.12	160.39	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	730.00*	Q1	500.00	102.19	103.75	103.54	104.24	0.002996	3.12	160.37	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	720.00*	Q1	500.00	102.16	103.72	103.51	104.21	0.002997	3.12	160.35	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	710.00*	Q1	500.00	102.13	103.69	103.48	104.18	0.002996	3.12	160.38	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	700.00*	Q1	500.00	102.10	103.66	103.45	104.15	0.002997	3.12	160.36	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	690.00*	Q1	500.00	102.07	103.63	103.42	104.12	0.002996	3.12	160.38	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	680.00*	Q1	500.00	102.04	103.60	103.39	104.09	0.002997	3.12	160.36	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	670.00*	Q1	500.00	102.01	103.57	103.36	104.06	0.002995	3.12	160.39	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	660.00*	Q1	500.00	101.98	103.54	103.33	104.03	0.002996	3.12	160.37	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	650.00*	Q1	500.00	101.95	103.51	103.30	104.00	0.002997	3.12	160.36	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	640.00*	Q1	500.00	101.92	103.48	103.27	103.97	0.002996	3.12	160.38	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	630.00*	Q1	500.00	101.89	103.45	103.24	103.94	0.002997	3.12	160.36	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	620.00*	Q1	500.00	101.86	103.42	103.21	103.91	0.002995	3.12	160.39	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	610.00*	Q1	500.00	101.83	103.39	103.18	103.88	0.002996	3.12	160.37	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	600.00*	Q1	500.00	101.80	103.36	103.15	103.85	0.002997	3.12	160.35	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81
River	590.00*	Q1	500.00	101.77	103.33	103.12	103.82	0.002996	3.12	160.37	106.22	0.03	3.12	0.81	0.81

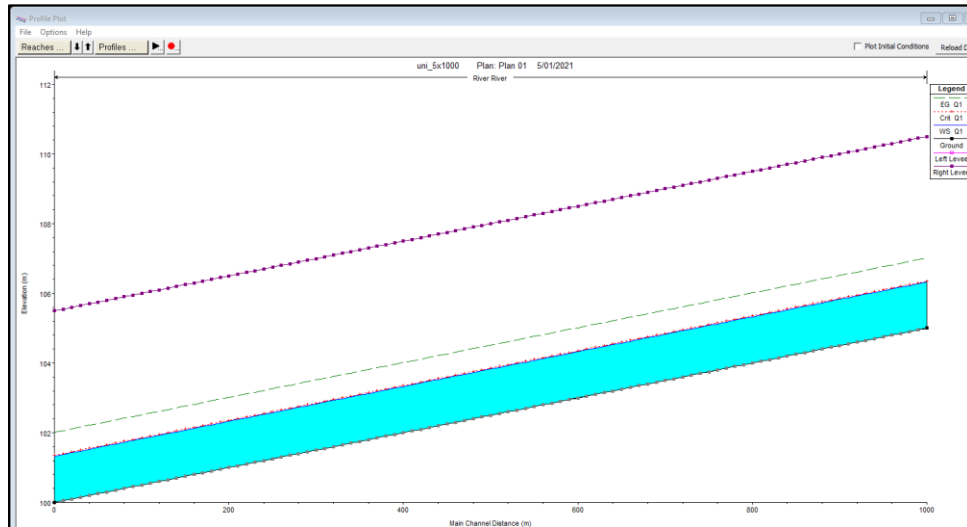
Fuente: Elaboración Propia

**Figura N° 87:** Perfil de flujo de modelo unidimensional UNI\_3X1000XQ1 (n=0.023), que presenta un flujo de régimen subcrítico.



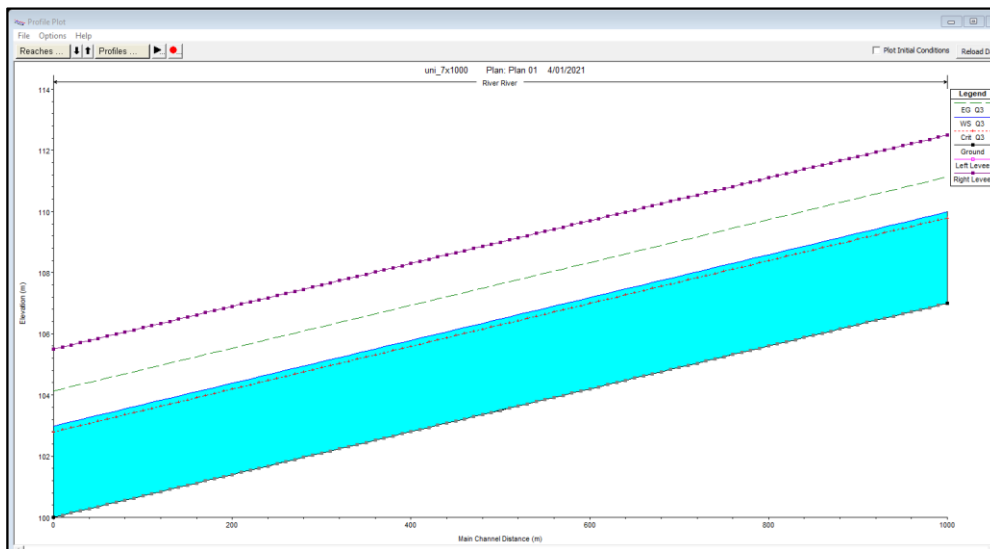
Fuente: Elaboración Propia

**Figura N° 88:** Perfil de flujo del modelo unidimensional UNI\_5X1000\_Q1 ( $n=0.023$ ), que presenta a un flujo de régimen mixto.



**Fuente:** Elaboración Propia

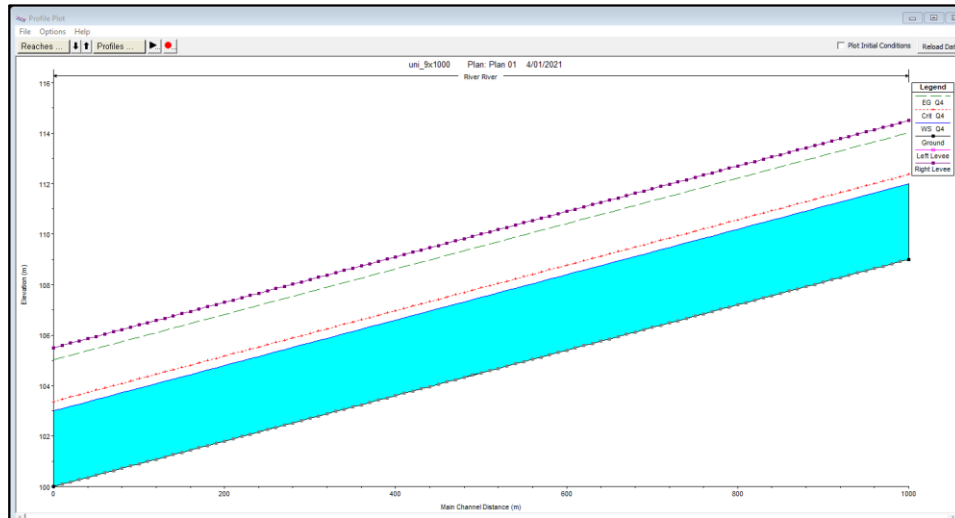
**Figura N° 89:** Perfil de flujo del modelo unidimensional UNI\_7X1000\_Q3 ( $n=0.035$ ), que presenta a un flujo de régimen subcrítico.



**Fuente:** Elaboración Propia

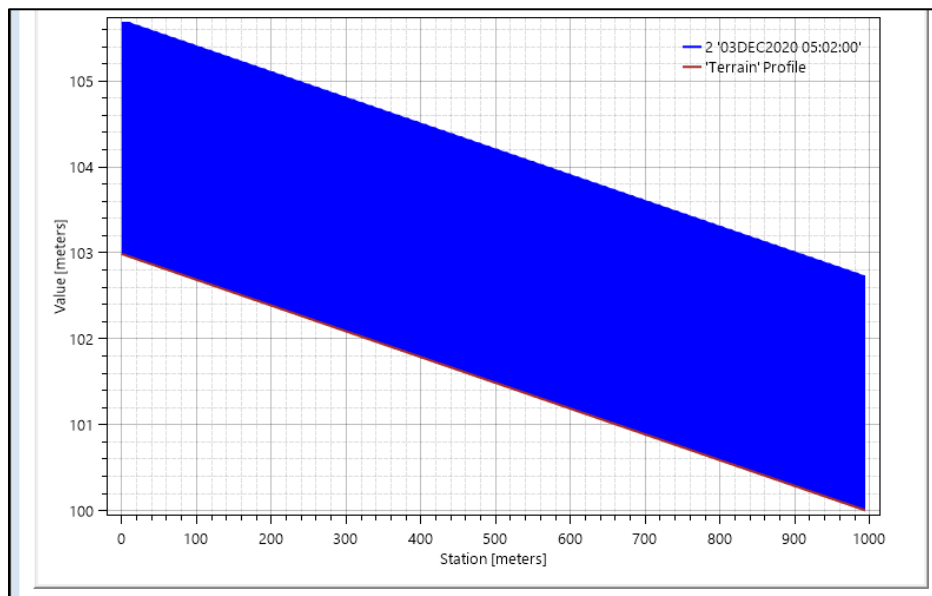


**Figura N° 90:** Perfil de flujo del modelo unidimensional UNI\_9X1000\_Q4 (n=0.030), que presenta a un flujo de régimen supercrítico



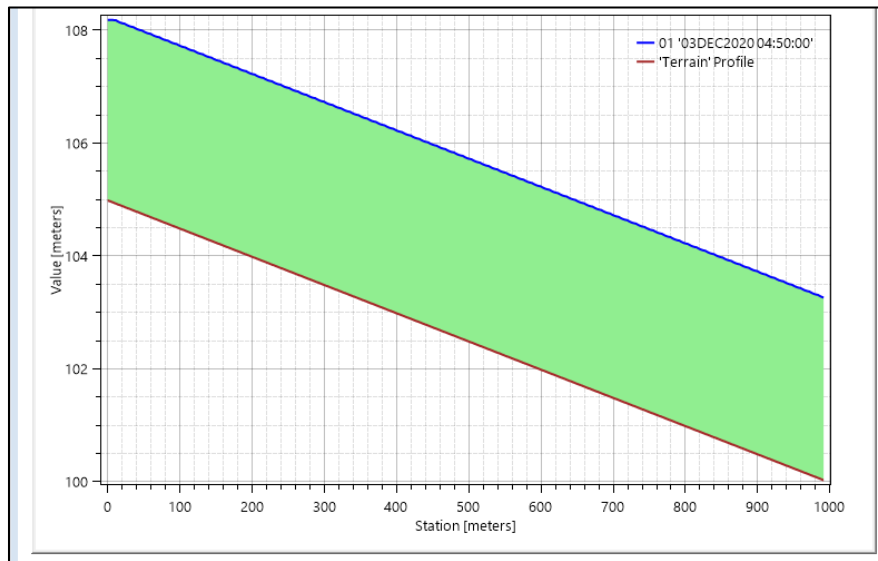
**Fuente:** Elaboración Propia

**Figura N° 91:** Perfil de flujo del modelo bidimensional 3X1000\_Q2 (n=0.030) en el programa HEC RAS 5.0.7, que presenta a un flujo de régimen subcrítico.



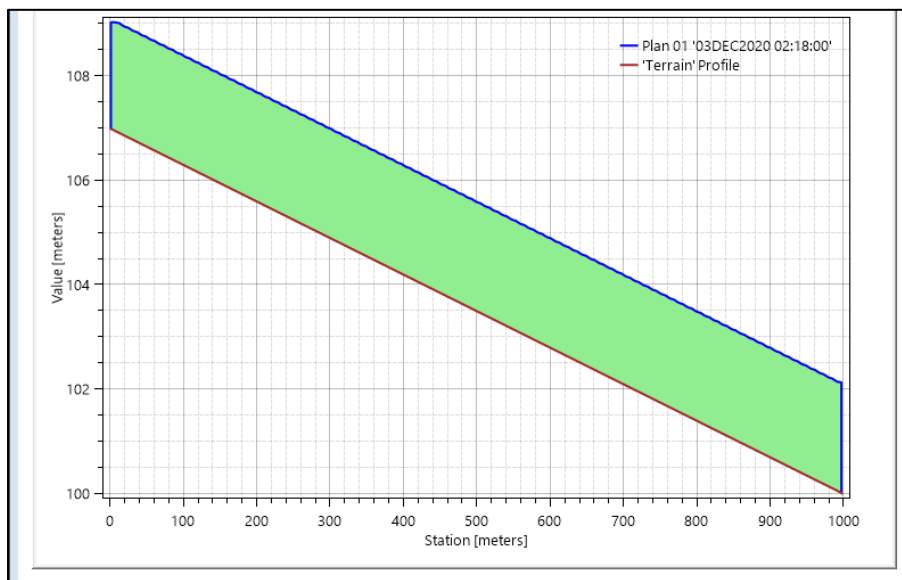
**Fuente:** Elaboración Propia

**Figura N° 92:** Perfil de flujo del modelo bidimensional 5X1000\_Q3 ( $n=0.035$ ) en el programa HEC RAS 5.0.7, que presenta a un flujo de régimen subcrítico.



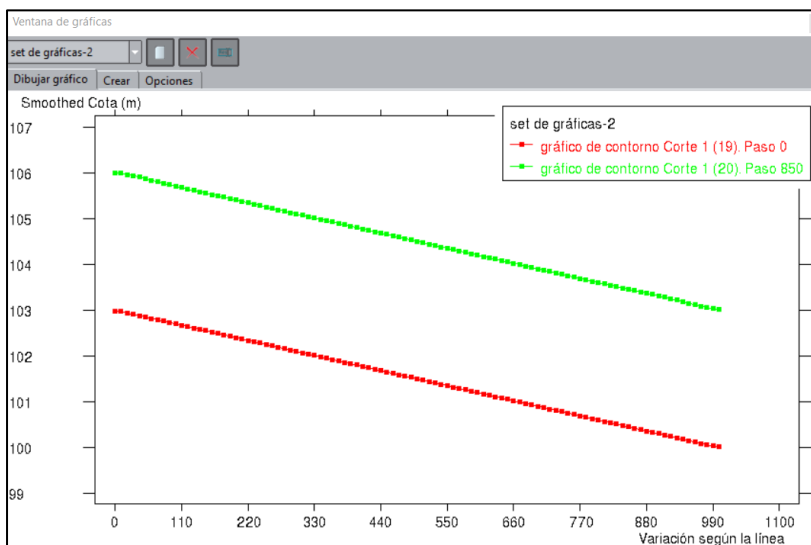
**Fuente:** Elaboración Propia

**Figura N° 93:** Perfil de flujo del modelo bidimensional 7X1000\_Q2 ( $n=0.030$ ) en el programa HEC RAS 5.0.7, que presenta a un flujo de régimen subcrítico.



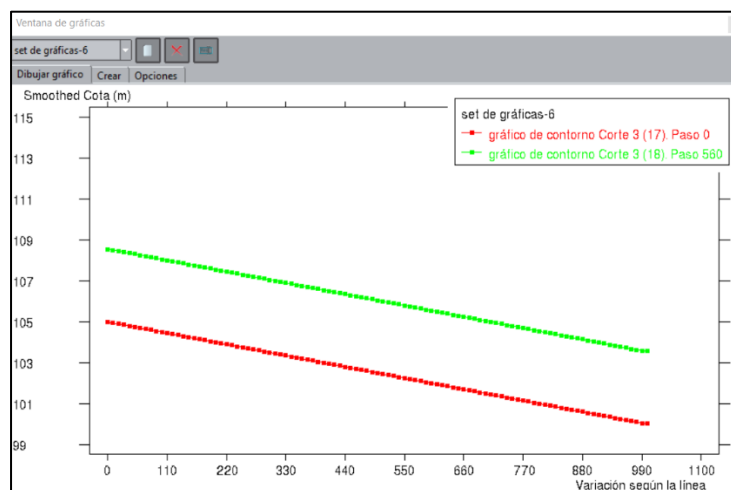
**Fuente:** Elaboración Propia

**Figura N° 94:** Perfil de flujo del modelo bidimensional 3X1000\_Q3 ( $n=0.023$ ) en el programa IBER 2.5.2., que presenta a un flujo de régimen subcrítico.



Fuente: Elaboración Propia

**Figura N° 95:** Perfil de flujo del modelo bidimensional 5X1000\_Q4 ( $n=0.030$ ) en el programa IBER 2.5.2., que presenta a un flujo de régimen subcrítico.



Fuente: Elaboración Propia