

Manual de laboratorio de simulación computacional

Práctica N°4: El Resalto Hidráulico

Fuente del recurso: Ejemplo adaptado del video “Simulación de flujo estable HEC-RAS”, desarrollado por ENG -school y disponible en la plataforma YouTube <https://youtu.be/YZo3f508IpI?si=B-XYtwvCjZXn4q9F>. El material audiovisual fue utilizado como guía metodológica para la configuración y ejecución de la simulación hidráulica en el software HEC-RAS. La simulación fue adaptada y aplicada al Laboratorio de Hidráulica de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander (UIS) por el estudiante Marlon Yadir Gonzalez Santos y Silvia Fernanda Jaimes Toloza, como parte de la Práctica N.º 6: El Resalto Hidráulico

Las guías de simulación desarrolladas en el presente trabajo se adaptaron del trabajo de grado de Malaver Nieto (2023), adaptando su metodología a las condiciones y objetivos del presente estudio.

1. Objetivos de la Simulación

- ✓ Modelar y analizar el comportamiento del resalto hidráulico en un canal mediante simulación en HEC-RAS, evaluando la respuesta hidráulica del sistema ante diferentes caudales.
- ✓ Analizar la transición del flujo de régimen supercrítico a subcrítico para distintos caudales, mediante la simulación del resalto hidráulico en HEC-RAS.
- ✓ Determinar la capacidad hidráulica del canal y los principales parámetros hidráulicos, como el número de Froude, la elevación de la superficie del agua, la línea de energía y la profundidad crítica.

2. Requerimientos para la Simulación

- ✓ Sistema operativo Windows (Windows 10 o superior).
- ✓ Software HEC-RAS instalado

3. Introducción

El resalto hidráulico se manifiesta cuando una corriente de alta velocidad experimenta una perturbación, como la presencia de un obstáculo o una variación abrupta en la pendiente del canal. Estas condiciones generan una transición del flujo que permite analizar en detalle este fenómeno hidráulico. En la práctica ingenieril, comprender el comportamiento del resalto hidráulico resulta fundamental, ya que su presencia es frecuente en sistemas hidráulicos y puede aprovecharse para mejorar el desempeño de diversas estructuras.

Este fenómeno se presenta comúnmente en situaciones como la base de vertederos, en tramos con rápidas, y a la salida de compuertas con descarga de fondo, donde se producen cambios significativos en el régimen de flujo.

El análisis del resalto hidráulico tiene múltiples aplicaciones prácticas, entre las que se destacan la disipación de la energía del flujo para reducir procesos de socavación aguas abajo de las estructuras, la recuperación del nivel del agua en el tramo inferior del canal y el control del caudal en sistemas con compuertas. Adicionalmente, el resalto hidráulico se emplea para indicar condiciones especiales de flujo, favorecer la mezcla de sustancias químicas en procesos de tratamiento de agua, mejorar la aireación en sistemas de abastecimiento urbano y eliminar bolsas de aire en conducciones, contribuyendo así a la operación eficiente y segura de las infraestructuras hidráulicas.

4. Marco Teórico

4.1 El Resalto Hidráulico

El resalto hidráulico es un fenómeno que se presenta en un flujo rápidamente variado, cuando el flujo antes del resalto hidráulico es supercrítico y después de este es subcrítico. Esto se ve evidenciado en un aumento del tirante hidráulico y pérdida de energía por medio de calor. Se pueden producir varios escenarios en los cuales se presenta un resalto hidráulico, por ejemplo, vertederos de demasías, rápidas, salidas de compuertas con descargas por el fondo, entre otros (Villón, 1995).

En cuanto a las ecuaciones propias del resalto hidráulico, la deducción comienza a partir de la ecuación de cantidad de movimiento, aplicándose al análisis de lo que sucede en un resalto hidráulico representado en la *Figura 1* en la cual se establecen los parámetros de análisis.

Se debe tener en cuenta, que las deducciones presentadas a continuación son para un resalto hidráulico que se forma en un canal horizontal o de pendiente pequeña, es decir $\theta \leq 5^\circ$.

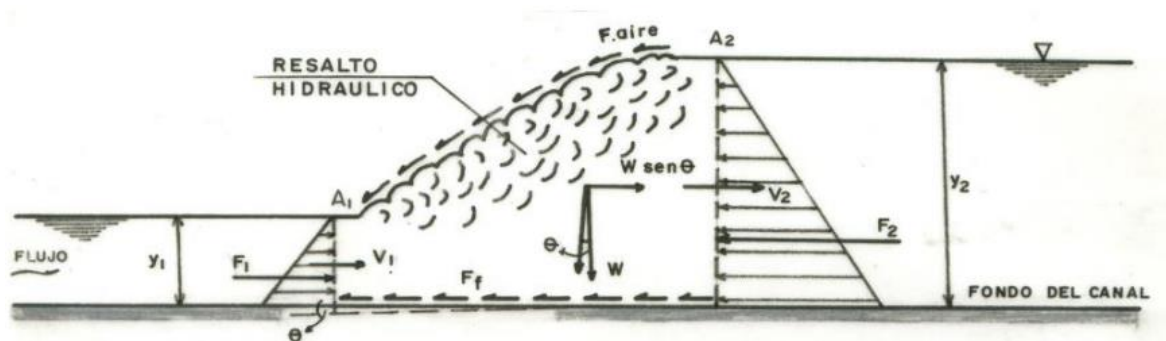


Figura 1 Fuerzas Externas que Actúan sobre un Volumen de Control a través de un Resalto Hidráulico (Marbello, 2005)

A partir del análisis presentado en la *Figura 1*, se procede a aplicar la ecuación de cantidad de movimiento la cual resulta en la siguiente deducción matemática.

Ecuación de cantidad de movimiento aplicada al análisis presentado en la *Figura 1*

$$\sum \vec{F}_{ext} = \oint \rho v (\beta v d\vec{A})_{sc} + \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{vc} \rho \beta v dvol \quad (1)$$

Donde:

- ✓ ρ = Densidad del fluido
- ✓ v = Velocidad del flujo
- ✓ β = Coeficiente de Boussinesq (Equivale a 1)
- ✓ $d\vec{A}$ = Diferencial de área de la superficie de control
- ✓ $dvol$ = Diferencial de volumen del volumen de control

El coeficiente de momentum o de Boussinesq, representa la relación que existe entre el valor del momento real en la sección transversal, y el que se obtendría considerando una distribución uniforme de velocidades. Para canales prismáticos el coeficiente de Boussinesq se encuentra usualmente entre 1.01 y 1.12. Una de las deducciones para el análisis del resalto hidráulico, es suponer la distribución uniforme de velocidades, resultando que el valor del coeficiente de Boussinesq sea igual a 1.

Antes de continuar con el desarrollando la ecuación 1, es fundamental tener conocimiento del concepto “fuerza específica”, el cual se ve expresado a través de la siguiente ecuación que relaciona tanto propiedades geométricas de la sección como características hidráulicas del fluido, por ejemplo, el caudal.

$$F = \bar{y}A + \frac{Q^2}{gA} \quad (2)$$

Donde:

\bar{y} : Hace referencia a la distancia hasta el centro de gravedad de la sección transversal, medida desde la superficie del agua [m]

A : Área de la sección transversal [m²]

Q : Valor del caudal [m³/s]

g : Valor de la gravedad [m/s²]

A partir de la ecuación 1 y teniendo en cuenta el concepto de fuerza específica expresado mediante la ecuación 2, se llegó a una expresión general para el resalto hidráulico, sabiendo que el valor F hace referencia a la fuerza específica del flujo en las secciones 1 y 2, y estas a su vez, son las secciones antes y después del resalto hidráulico respectivamente, mostrado en la *Figura 1*. La expresión antes mencionada es la siguiente:

$$F_1 + \frac{W \sin \theta - F_f - F_{aire}}{\delta g} = F_2 \quad (3)$$

Donde:

F_1 : Es la fuerza específica en la sección 1 antes del resalto hidráulico (*Figura 1*)

F_2 : Es la fuerza específica en la sección 2 después del resalto hidráulico (*Figura 1*)

$W \sin \theta$: Componente horizontal del peso del agua

F_f : Fuerza de fricción debida a las paredes del canal

F_{aire} : Fuerza de fricción del aire

δ : Densidad del fluido

Finalmente, la ecuación general para las profundidades antes y después de un resalto hidráulico en canales horizontales o de pendiente pequeña, se tiene para ($\theta \leq 5^\circ$), $\sin \theta \cong \tan \theta \approx 0$ y $(\cos \theta)^2 \cong 1$ (Marbello, 2005). Además de esto en la ecuación 3 se desprecian las fuerzas de resistencia con el

aire y con las fronteras sólidas del canal ($F_{aire} = F_f = 0$) y la componente horizontal del peso del agua, se desprecia debido a que el valor del ángulo θ es muy pequeño, resultando en la siguiente ecuación:

$$F_1 = F_2 \quad (4)$$

Es decir:

$$\bar{Y}_1 A_1 + \frac{Q^2}{g A_1} = \bar{Y}_2 A_2 + \frac{Q^2}{g A_2} \quad (5)$$

4.2 Ecuación del Resalto Hidráulico para un Canal Rectangular con ($\theta \leq 5^\circ$).

A partir de la ecuación 5, se pueden realizar distintas deducciones para diferentes secciones transversales según sea el problema, para el caso de secciones rectangulares se parte del hecho de que el coeficiente de Boussinesq es igual a 1, como se mencionó anteriormente. El procedimiento que se muestra a continuación es para un canal rectangular de pendiente pequeña (*Figura 2*).

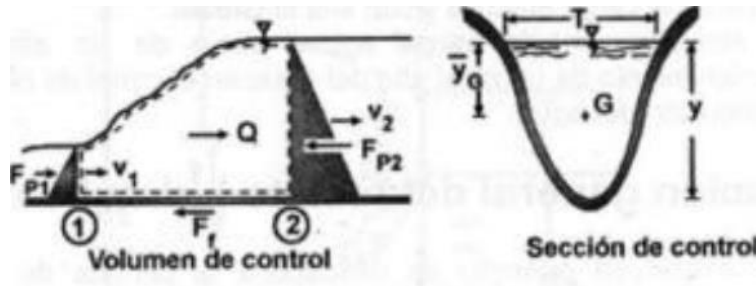


Figura 2 Volumen de Control para el Análisis del Resalto Hidráulico (Villón, 1995)

Teniendo en cuenta de las variables presentes en la *Figura 2* y la ecuación 5, se tiene:

$$\frac{Q^2}{gbY_1} + \frac{bY_1^2}{2} = \frac{Q^2}{gbY_2} + \frac{bY_2^2}{2} \quad (6)$$

Teniendo en cuenta que:

- ✓ Q = Caudal en el canal [m³/s]
- ✓ g = Gravedad [m/s²]
- ✓ b = Ancho del canal (Para canales rectangulares) [m]
- ✓ Y_1 = Altura de la lámina de agua en la sección 1, aguas arriba (*Figura 2*)
- ✓ Y_2 = Altura de la lámina de agua en la sección 2, aguas abajo (*Figura 2*)

Seguidamente:

$$\frac{b}{2} (Y_1^2 - Y_2^2) = \frac{Q^2}{g * b} \left(\frac{1}{Y_2} - \frac{1}{Y_1} \right) \quad (7)$$

Que resulta equivalente a:

$$\frac{b}{2}(Y_1 - Y_2)(Y_1 + Y_2) = \frac{Q^2}{g * b} \left(\frac{Y_1 - Y_2}{Y_1 * Y_2} \right) \quad (8)$$

Al simplificar queda:

$$\frac{1}{2}(Y_1 + Y_2) = \frac{Q^2}{g * b^2} \left(\frac{1}{Y_1 * Y_2} \right) \quad (9)$$

O también:

$$\frac{1}{2}(Y_1 + Y_2) = \frac{Q^2}{g * b^2 * Y_2^3} \left(\frac{Y_2^2}{Y_1} \right) \quad (10)$$

Teniendo en cuenta que $b^2 Y_2^2 = A_2^2$, se encuentra que:

$$\frac{1}{2}(Y_1 + Y_2) = \frac{Q^2}{g A_2^2 Y_2} \left(\frac{Y_2^2}{Y_1} \right) \quad (11)$$

Se puede ver que el primer factor del miembro derecho es el número de Froude:

$$\frac{Q^2}{g A_2^2 Y_2} = \frac{V^2}{g * Y_2} = F_2^2 \quad (12)$$

Al sustituirlo en la anterior expresión y dividir a ambos miembros de la ecuación por Y_2 , se encuentra lo siguiente:

$$\frac{1}{2} \left(\frac{Y_1}{Y_2} + \frac{Y_2}{Y_2} \right) = F_2^2 \left(\frac{Y_2}{Y_1} \right) \quad (13)$$

Se despeja el número de Froude:

$$\frac{1}{2} \left(\left(\frac{Y_1}{Y_2} \right)^2 + \frac{Y_1}{Y_2} \right) = F_2^2 \quad (14)$$

Al organizar un poco se evidencia que la solución aparecerá por medio de la ecuación cuadrática:

$$\left(\frac{Y_1}{Y_2}\right)^2 + \frac{Y_1}{Y_2} - 2F_2^2 = 0 \quad (15)$$

Al final de la deducción matemática se llega a una expresión que permite calcular la profundidad en la sección 1 o aguas arriba del resalto hidráulico formado en un canal rectangular, una vez conocida la altura del flujo en la sección 2 o aguas abajo del resalto hidráulico. Recordemos que Y_1 hace referencia al flujo supercrítico y Y_2 hace referencia al flujo subcrítico.

$$Y_1 = \frac{Y_2}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_2^2} - 1 \right) \quad (16)$$

Alternativamente, en un procedimiento similar se puede encontrar la ecuación inversa de la misma:

$$Y_2 = \frac{Y_1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right) \quad (17)$$

Finalmente, se obtienen expresiones presentadas en las ecuaciones 16 y 17, en las cuales se puede hallar la altura Y_1 , en función de la altura Y_2 y del número de Froude asociado a esta altura (F_2). Y alternativamente se puede hallar el valor de la altura Y_2 , en función de la altura Y_1 y del número de Froude asociado a esta altura (F_1), para canales rectangulares de pendiente pequeña.

4.3 Longitud del Resalto Hidráulico

La longitud del resalto hidráulico se define como la distancia desde la cara frontal del resalto hidráulico hasta un punto en la superficie inmediatamente aguas abajo del remolino. Ésta no se puede determinar con facilidad, sin embargo, algunos ingenieros hidráulicos se han dedicado a obtener datos experimentales de tal manera que se logre tener una expresión empírica que permita obtener un valor aproximado de su longitud.

Por lo general, los datos se muestran en una gráfica de F_1 versus L/Y_2 , donde F_1 es el valor del número de Froude antes del resalto hidráulico, L es la longitud del resalto hidráulico y Y_2 es la altura después del resalto hidráulico; la representación de los resultados de esta manera es tal vez la mejor ya que presenta los resultados de manera práctica y se obtienen mejores resultados de este (Chow, 1994).

La U.S. Bureau of Reclamation desarrolló una gráfica con la cual se puede calcular la longitud aproximada del resalto hidráulico para canales rectangulares (*Figura 3*)

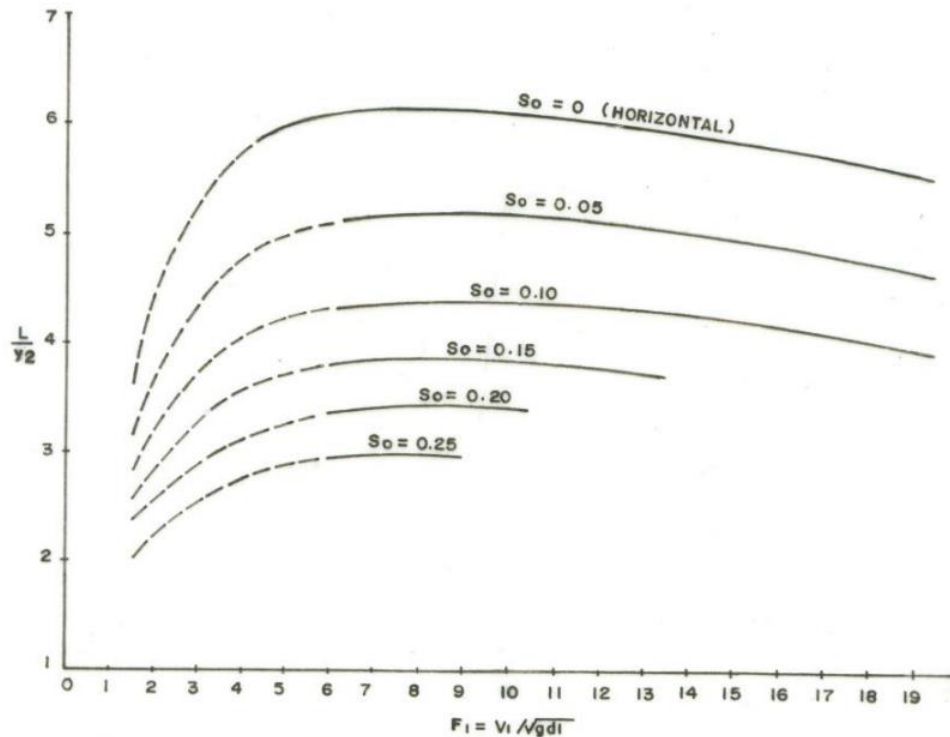


Figura 3 Curvas de Variación L_{RH}/Y_2 vs F_1 para Canales Rectangulares Horizontales e Inclinaados (Marbello, 2005)

La forma de entrar a esta gráfica es la siguiente:

- ✓ Se calcula el número de Froude en la sección aguas arriba del resalto hidráulico, es decir en la zona de flujo supercrítico
- ✓ Al encontrar ese valor se procede a ingresar por el eje de las abscisas, y se sube hasta encontrar la función que nos coincida con la pendiente del canal
- ✓ Luego de ello se procede a mover horizontalmente a la izquierda de tal manera que se llegue hasta el eje de las ordenadas
- ✓ En el eje de las ordenadas se leerá el valor inscrito en él
- ✓ Y por último se calcula el valor de la longitud del resalto hidráulico multiplicando el dato hallado en las ordenadas por el valor de la altura del tirante hidráulico aguas abajo.

Por su parte, Silvester (1964) (Marbello, 2005) propuso las siguientes ecuaciones para la longitud del resalto hidráulico de canales rectangulares, triangulares y parabólicos, en función del número de Froude en la sección aguas arriba del resalto hidráulico F_1 y de la profundidad inicial Y_1 .

- ✓ Para canales rectangulares: $L_{RH} = 9.75Y_1 * (F_1 - 1)^{1.01}$
- ✓ Para canales triangulares simétricos con un ángulo de 47.3° en el vértice del triángulo: $L_{RH} = 4.26Y_1 * (F_1 - 1)^{0.695}$
- ✓ Para canales parabólicos, con $F_1 < 3$: $L_{RH} = 11.7Y_1 * (F_1 - 1)^{0.832}$

4.4 Energía Disipada en un Resalto Hidráulico

En un resalto hidráulico, parte de la energía específica presente en el flujo se disipa en forma de calor y se parte de la siguiente expresión para tratar de cuantificar la pérdida de energía entre las secciones transversales.

$$\Delta E = E_1 - E_2 \quad (18)$$

$$\Delta E = \left(Y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right) - \left(Y_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right) \quad (19)$$

$$\Delta E = \left(Y_1 + \frac{\alpha_1 Q^2}{2g A_1^2} \right) - \left(Y_2 + \frac{\alpha_2 Q^2}{2g A_2^2} \right) \quad (20)$$

$$\Delta E = \left(Y_1 + \frac{\alpha_1 Q^2}{2g A_1^2} \right) - \left(Y_2 + \frac{\alpha_2 Q^2}{2g A_2^2} \right) \quad (21)$$

Suponiendo que $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ se tiene:

$$\Delta E = \left(Y_1 + \frac{\alpha Q^2}{2g A_1^2} \right) - \left(Y_2 + \frac{\alpha Q^2}{2g A_2^2} \right) \quad (22)$$

Teniendo en cuenta que el coeficiente de energía o Coriolis (α) representa la relación existente entre la energía real y la que se obtendría considerando una distribución uniforme de velocidades. Para canales prismáticos el coeficiente de Coriolis se encuentra usualmente entre 1.03 y 1.36. Una de las deducciones para el análisis del resalto hidráulico, es suponer la distribución uniforme de velocidades, resultando que el valor del coeficiente de Coriolis sea igual a 1. Por lo tanto $\alpha = 1$.

Y realizando las simplificaciones correspondientes se llega a la siguiente expresión general para el cálculo de pérdida de energía en cualquier sección transversal:

$$\Delta E = \frac{F_1^2}{2} \left(1 - \frac{A_1^2}{A_2^2} \right) D_1 - (Y_2 - Y_1) \quad (23)$$

Donde:

- ✓ F : Es el número de Froude
- ✓ A_1 : El área de la sección aguas arriba del resalto hidráulico [m²]
- ✓ A_2 : El área de la sección aguas debajo del resalto hidráulico [m²]

- ✓ D_1 : La profundidad hidráulica promedio de la sección aguas arriba del resalto hidráulico que está dada por la relación entre el área y el ancho superficial $\left(D_1 = \frac{A_1}{T_1}\right)$ [m]
- ✓ Y_1 : La profundidad aguas arriba del resalto hidráulico [m]
- ✓ Y_2 : La profundidad aguas abajo del resalto hidráulico [m]

4.4.1 Cálculo de Pérdida de Energía para Canales Rectangulares

Partiendo de la ecuación 17 se tiene:

$$Y_2 = \frac{Y_1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right) \quad (24)$$

$$1 + 8F_1^2 = \left[2 \left(\frac{Y_2}{Y_1} \right) + 1 \right]^2 \quad (25)$$

Por lo tanto:

$$F_1^2 = \frac{\left[2 \left(\frac{Y_2}{Y_1} \right) + 1 \right]^2 - 1}{8} \quad (26)$$

Reemplazando la ecuación 24 en la ecuación 22 se tiene:

$$\Delta E = \frac{1}{2} \left(\frac{\left[2 \left(\frac{Y_2}{Y_1} \right) + 1 \right]^2 - 1}{8} \right) \left(1 - \frac{b^2 Y_1^2}{b^2 Y_2^2} \right) Y_1 - (Y_2 - Y_1) \quad (27)$$

Y finalmente, realizando las simplificaciones correspondientes se llega a la siguiente expresión para canales rectangulares:

$$\Delta E = \frac{(Y_2 - Y_1)^3}{4Y_1 Y_2} \quad (28)$$

Donde Y_1 es la altura antes del resalto hidráulico o aguas arriba y Y_2 es la altura después del resalto hidráulico o aguas abajo.

4.5 Clasificación del Resalto Hidráulico

Una de las formas de clasificar el resalto hidráulico, es según el número de Froude de la sección aguas arriba del resalto hidráulico, es decir, la sección en la cual se presenta un flujo supercrítico, con una altura Y_1 , una velocidad V_1 , un área A_1 y un número de Froude F_1 . Esta clasificación fue desarrollada por la U.S. Bureau of Reclamation, en la cual al ingresar el número de Froude de la sección aguas arriba, se puede obtener el tipo de resalto hidráulico, las características de este y un pequeño esquema que muestra el comportamiento del resalto a clasificar. Esta clasificación se presenta en la *Tabla 1*.

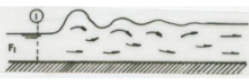
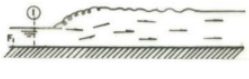



F_1	Tipo de Resalto Hidráulico	Características del Resalto Hidráulico	Esquema
$F_1 < 1$	No se forma	La corriente es subcrítica y seguiría siendo subcrítica.	
$F_1 = 1$	No se forma	El flujo es crítico y no se presentan condiciones para la formación de un R.H.	
$1 < F_1 \leq 1.7$	R.H. ondular	La superficie libre presenta ondulaciones. La disipación de energía es baja, menor del 5%.	
$1.7 < F_1 \leq 2.5$	R.H. débil	Se generan muchos rodillos de agua en la superficie del resalto, seguidos de una superficie suave y estable, aguas abajo. La energía disipada es del 5 al 15%.	
$2.5 < F_1 \leq 4.5$	R.H. oscilante	Presenta un chorro intermitente, sin ninguna periodicidad, que parte desde el fondo y se manifiesta hasta la superficie, y retrocede nuevamente. Cada oscilación produce una gran onda que puede viajar largas distancias. La disipación de energía es del 15 al 45%.	
$4.5 < F_1 \leq 9.0$	R.H. estable	Su acción y posición son poco variables y presenta el mejor comportamiento. La energía disipada en este resalto puede estar entre el 45 y el 70%.	
$F_1 > 9.0$	R.H. fuerte	Caracterizado por altas velocidades y turbulencia, con generación de ondas y formación de una superficie tosca, aguas abajo. Su acción es fuerte y de alta disipación de energía, que puede alcanzar hasta un 85%.	

Tabla 1 Clasificación del Resalto Hidráulico Según la U.S.B.R (Marbello, 2005).

4.6 Fuente de Información Adicional

Para una mayor información adicional, puede consultar el siguiente enlace el cual lo redirigirá a un documento de la guía de laboratorio de la Universidad Nacional en el cual podrá ampliar más la información.

- ✓ [EL RESALTO HIDRAULICO, RH \(unl.edu.co\)](http://unl.edu.co) (Marbello, 2005)

5. Implementación de la Simulación

Este ejercicio consiste en la modelación de un resalto hidráulico en un canal de 600 metros de longitud utilizando el software HEC-RAS.

5.1 Descripción del Problema

Para la configuración geométrica, se deben definir secciones transversales trapezoidales en las estaciones 0, 100 y 600 metros, aplicando un coeficiente de rugosidad de Manning de 0.018 y realizando una interpolación de secciones cada 10 metros para asegurar la precisión del modelo. El análisis se ejecutará bajo un régimen de flujo mixto, evaluando cinco perfiles de flujo con caudales de 50, 100, 150, 200 y 250 m^3/s respectivamente. Como condiciones de contorno, se establecerá el tirante normal con una pendiente de 0.01 tanto para aguas arriba como para aguas abajo. El objetivo final es identificar mediante la visualización del perfil del agua en qué escenarios se sobrepasa la capacidad del canal —observando que a partir de los 200 m^3/s el diseño se vuelve insuficiente— y extraer de las tablas de resultados el número de Froude, la elevación de la superficie libre y la línea de energía.

La sección transversal se muestra en la *Figura 4*.

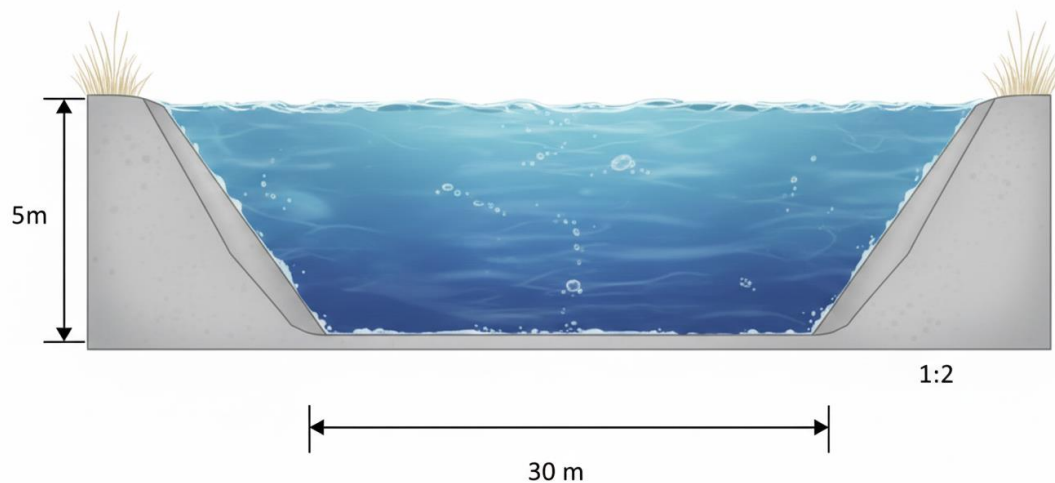


Figura 4 Sección Transversal del Canal

5.2 Procedimiento de Implementación

Configuración Inicial

Crear el proyecto: Ve a File > New Project, elige una carpeta y ponle nombre al archivo.

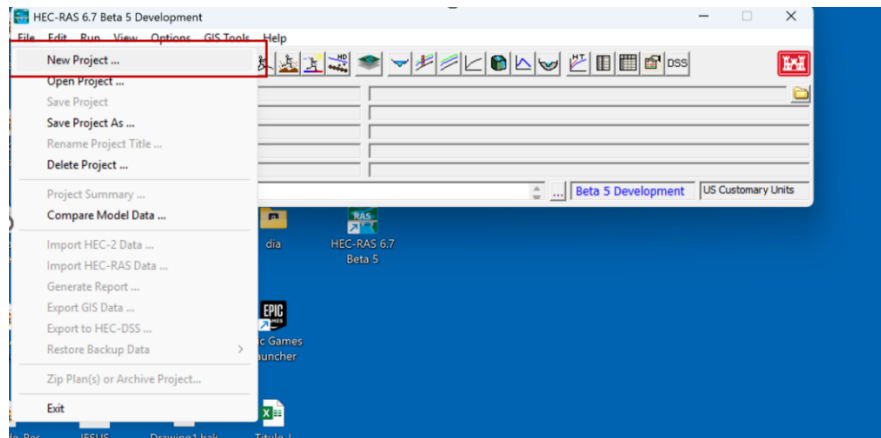


Figura 5 Configuración inicial del proyecto (File > New Project).

Establecer unidades: Es crucial ir a Options > Unit System y seleccionar System International (Metric System) para trabajar en metros y m³/s.

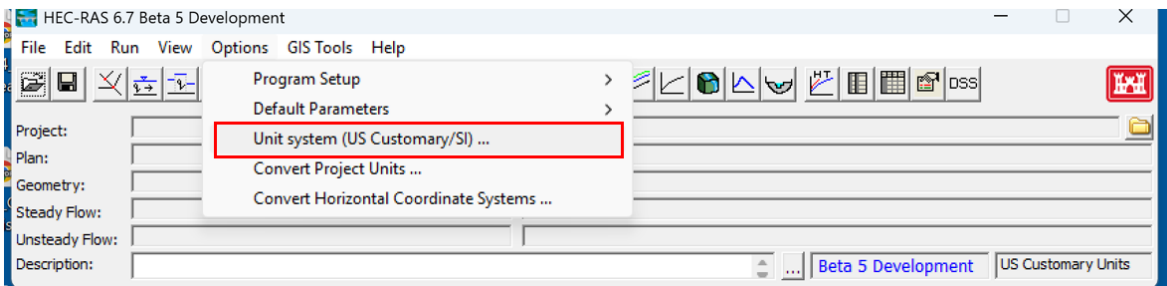


Figura 6 Configuración del sistema de unidades en el Sistema Internacional (Options > Unit System).

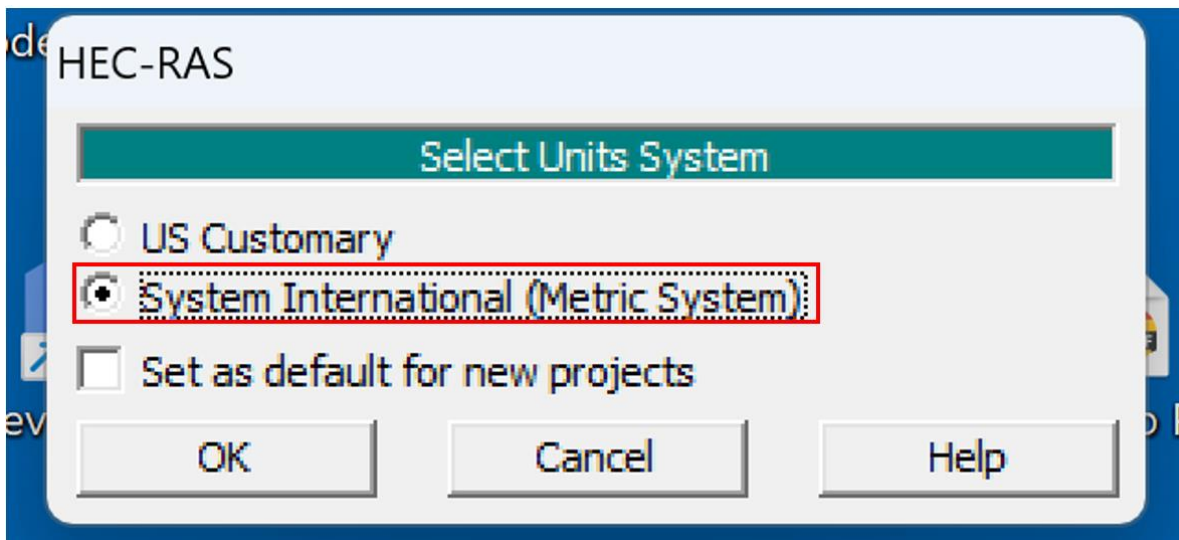


Figura 7 System International (Metric System).

2. Creación de la Geometría

Dibujar el tramo: Abre el editor de datos geométricos, selecciona la herramienta River Reach y dibuja una línea de arriba hacia abajo. Ponle nombre al río y al tramo.

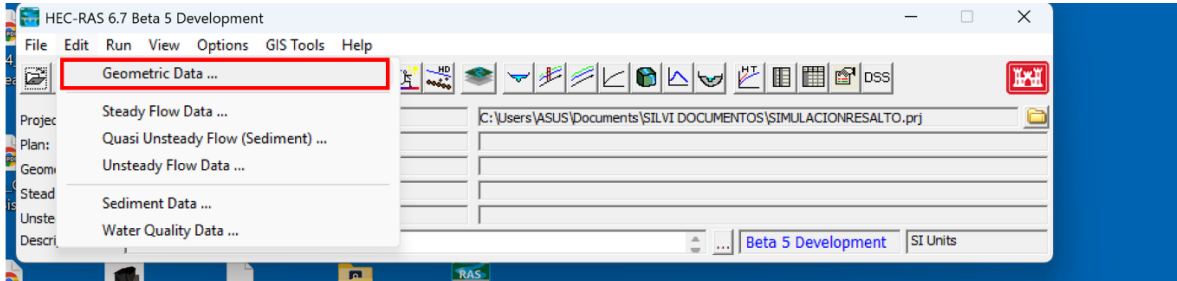


Figura 8 Edit + Geometric Data

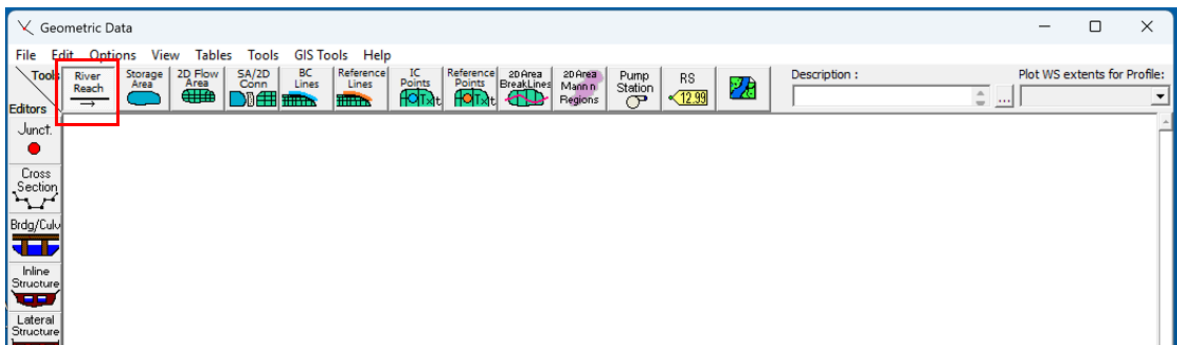


Figura 9 River Reach

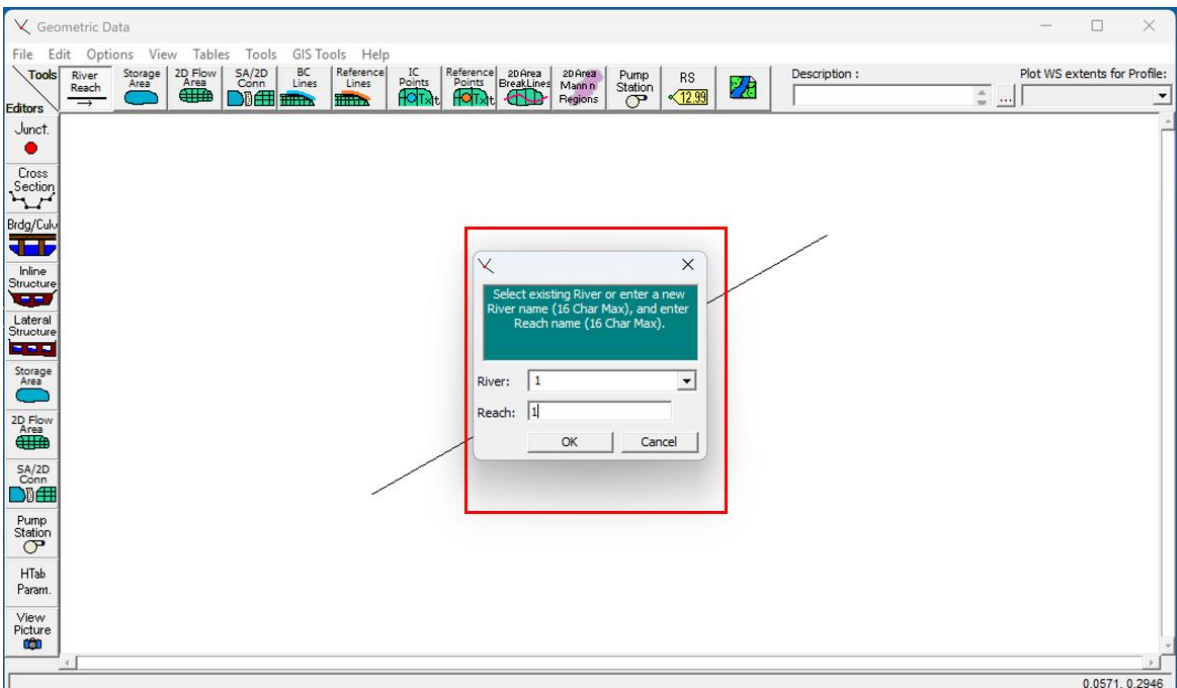


Figura 10 River: 1 Reach: 1

Para crear secciones:

- Dentro de esa ventana: Clic en Options > Add a new Cross Section.

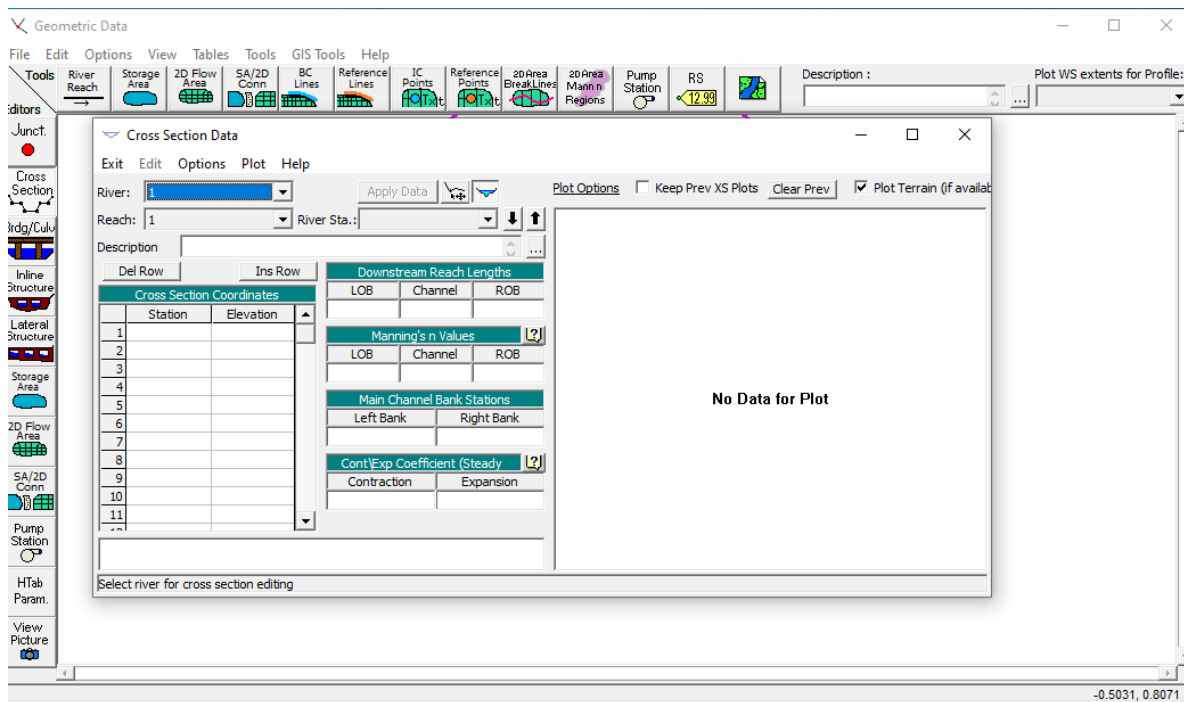


Figura 11 Options

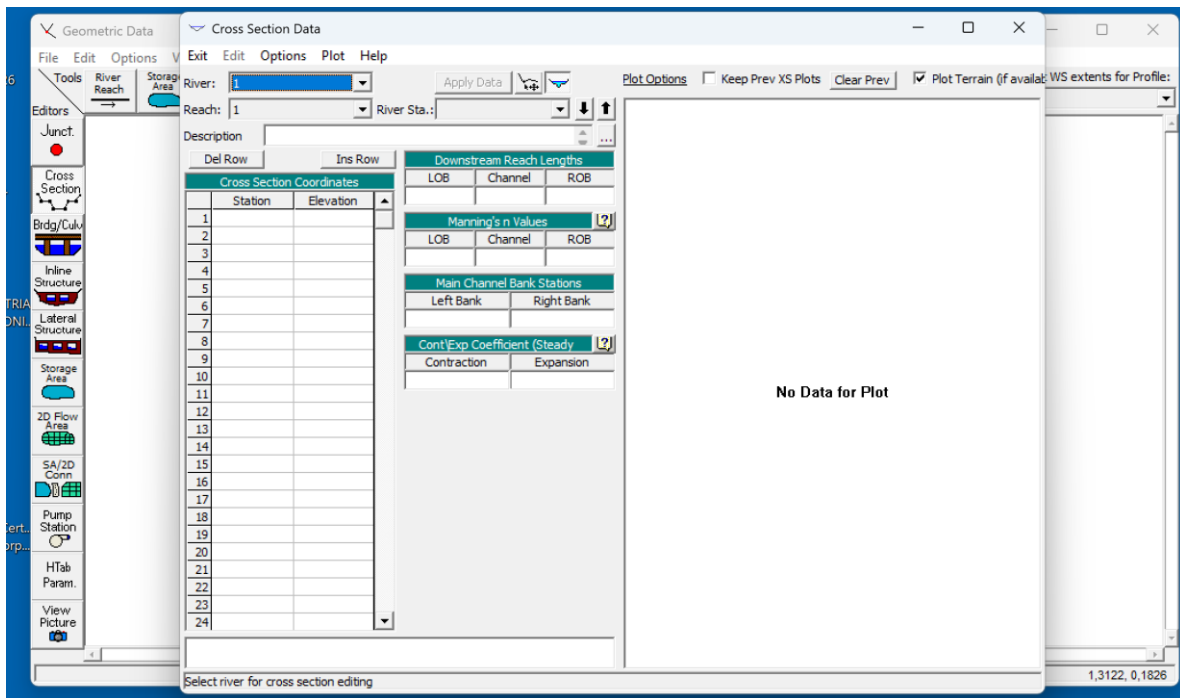


Figura 12 Add a new Cross Section.

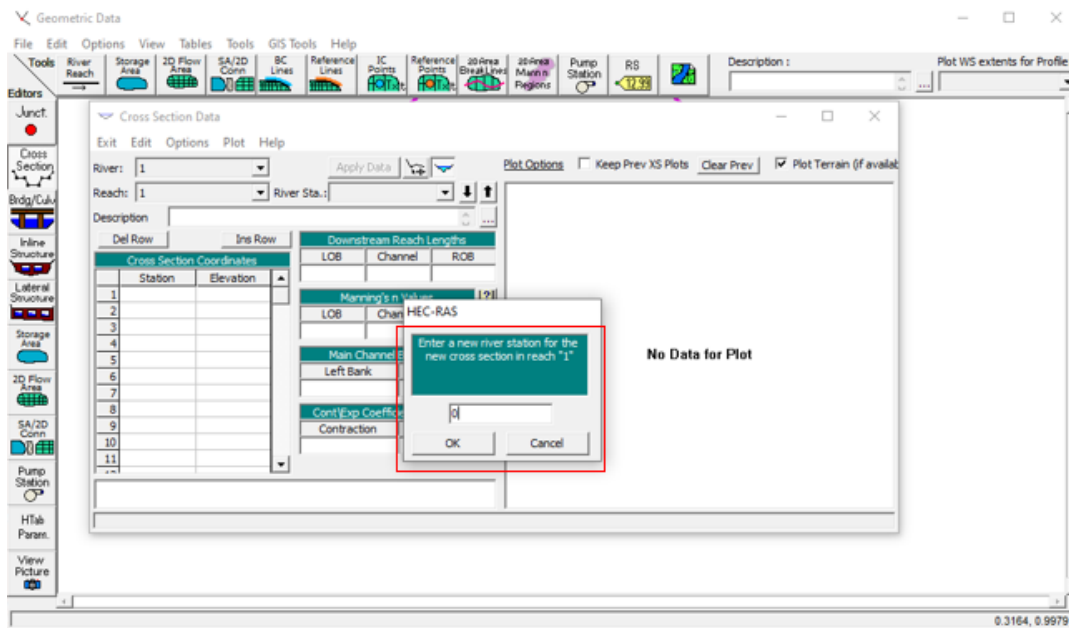


Figura 13 Sección transversal en el alcance 1

Sección Transversal Aguas Abajo (Estación 0):

Introduce las coordenadas de estación y elevación para definir la geometría del canal. Completa la tabla Station y Elevation. Ingresa el valor 0.018 en las columnas de Manning (LOB, Channel y ROB).

Define los límites del canal principal estableciendo las márgenes izquierda y derecha (Left/Right Bank). Y le damos en Apply data

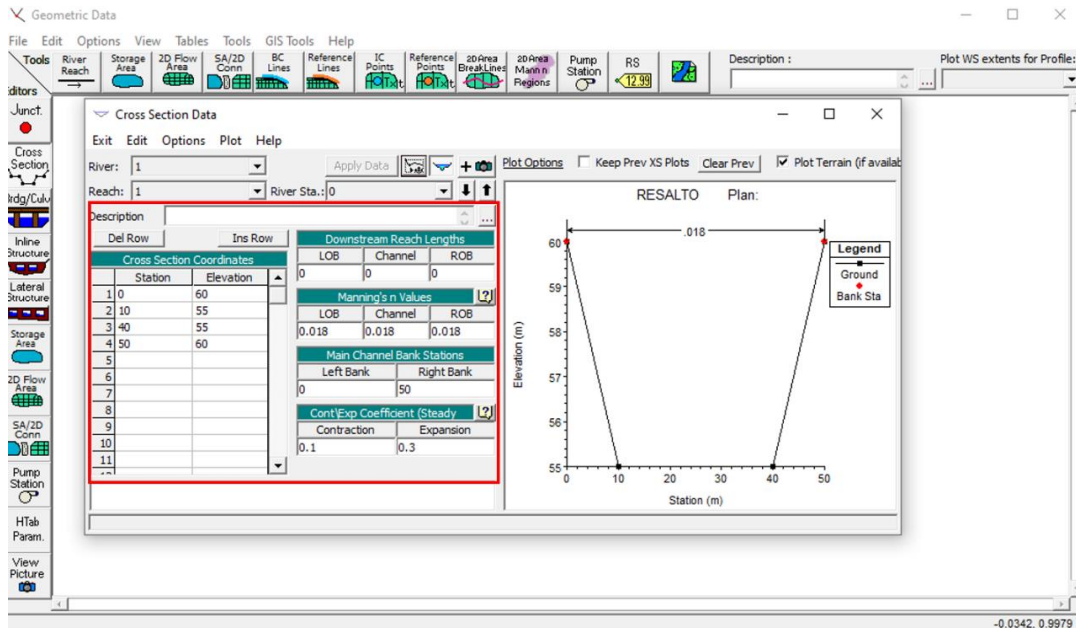


Figura 14 Ingreso de coordenadas de estación-elevación, coeficiente de Manning y definición de márgenes del canal.

Secciones Aguas Arriba:

Copia la sección actual (Options > Copy Current Cross Section) y asígnale una nueva distancia (ej. estación 100 y luego 600).

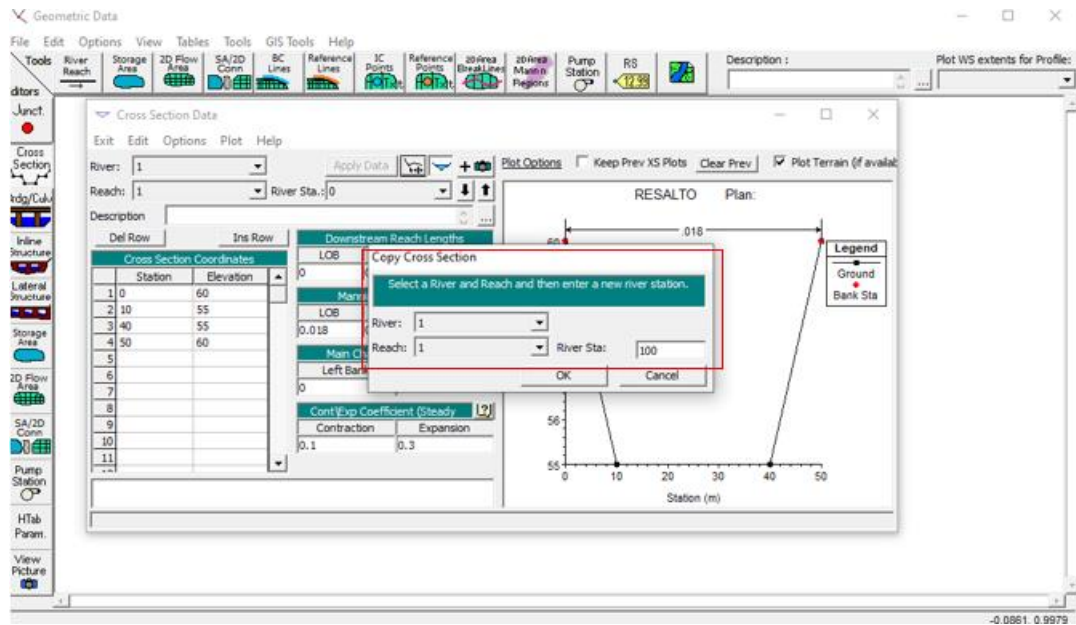


Figura 15 Copia de la sección transversal y asignación de nuevas estaciones.

The screenshot displays the HEC-RAS software interface, specifically the 'Cross Section Data' window. The window is titled 'Cross Section Data' and contains a menu bar (Exit, Edit, Options, Plot, Help) and a toolbar. The main area is divided into several sections:

- Top Section:** Contains fields for 'River: 1', 'Reach: 1', and 'River Sta.: 100'. There are buttons for 'Apply Data', 'Plot Options', 'Keep Prev XS Plots', 'Clear Prev', and a checked option for 'Plot Terrain (if available)'.
- Left Panel:** A tree view showing the project structure, including 'Cross Section', 'Bridge/Culvert', 'Inline Structure', 'Lateral Structure', 'Storage Area', '2D Flow Area', 'SA/2D Conn', 'Pump Station', 'HTab Param.', and 'View Picture'.
- Table Section:** A table titled 'Cross Section Coordinates' with columns 'Station' and 'Elevation'. It lists 11 stations with elevations ranging from 55 to 60. Below this is a table for 'Downstream Reach Lengths' with columns 'LOB', 'Channel', and 'ROB', showing values of 100, 100, and 100 respectively. Another table for 'Manning's n Values' shows values of 0.018 and 0.018 for 'Main Channel' and 'Left Bank'.
- Plot Section:** A plan view of the cross-section showing the channel and banks. The channel width is labeled as 10.18m and the depth as 0.18m. The elevation of the channel bed is 59.0m. The plot also shows the ground and bank station elevations.
- Dialog Box:** A small dialog box is open over the channel, titled 'Enter amount to add to Elevations (+/-)'. It has a text input field with the value '0.2' and 'OK' and 'Cancel' buttons.

Figura 17 Elevación 0.2

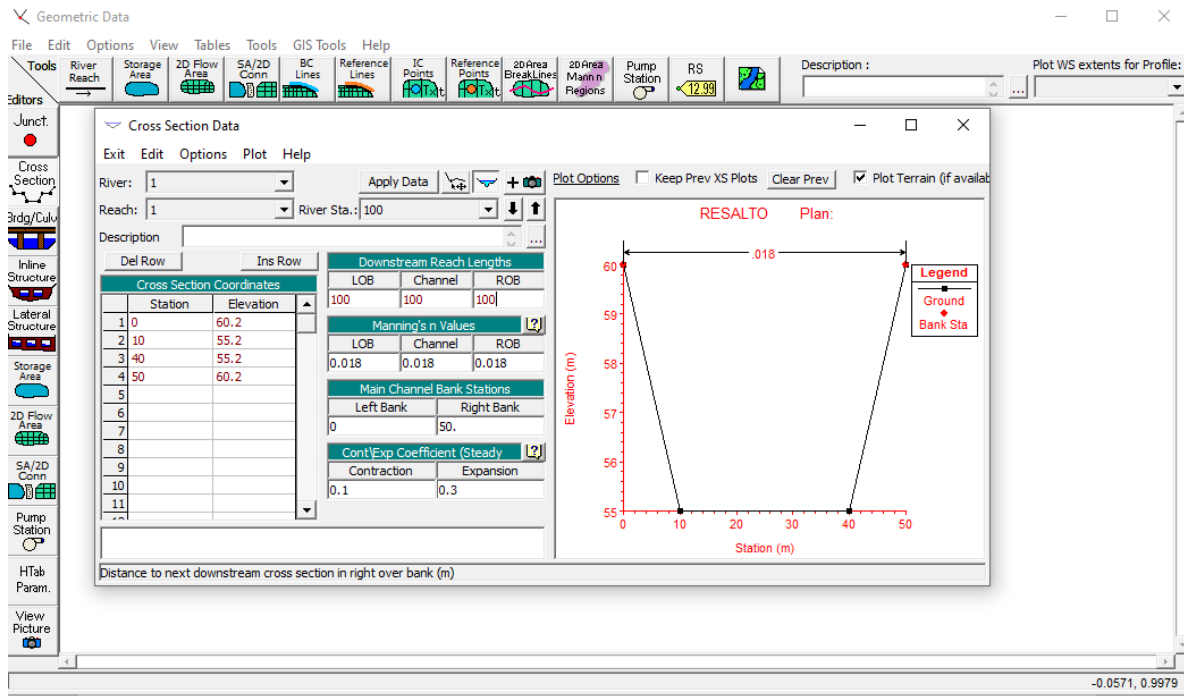


Figura 18

Copia esta sección para crear estaciones adicionales aguas arriba (a 600m), ajustando las elevaciones para crear la pendiente del canal.

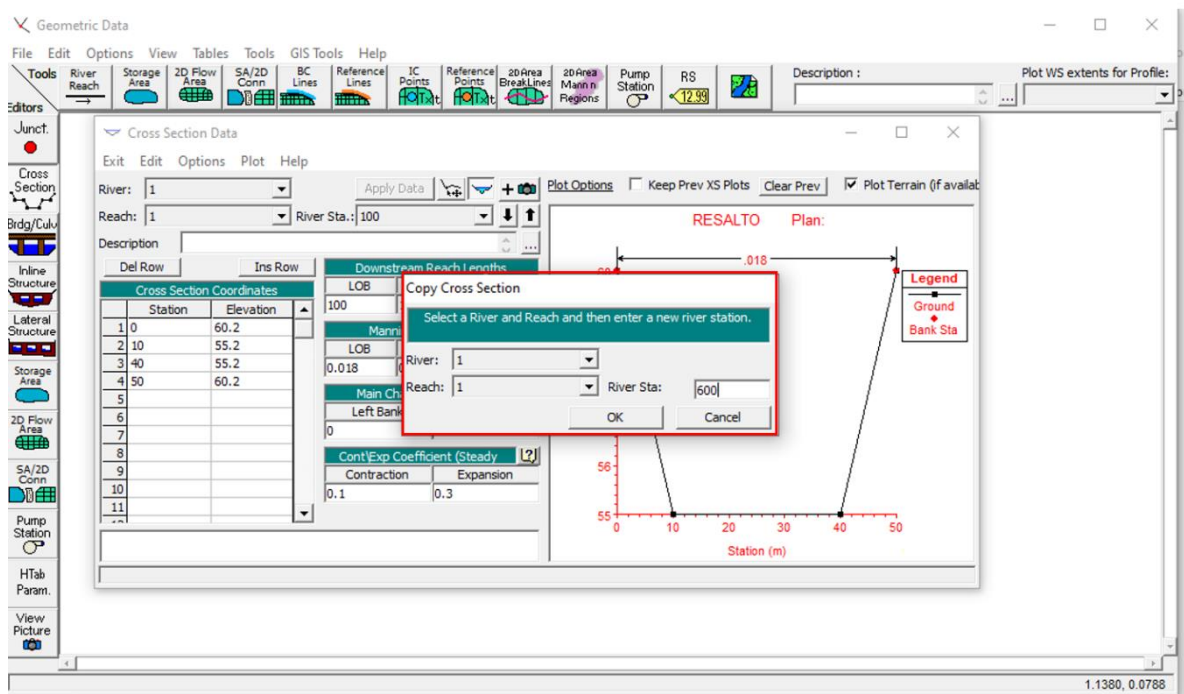


Figura 19 aguas arriba (a 600m)

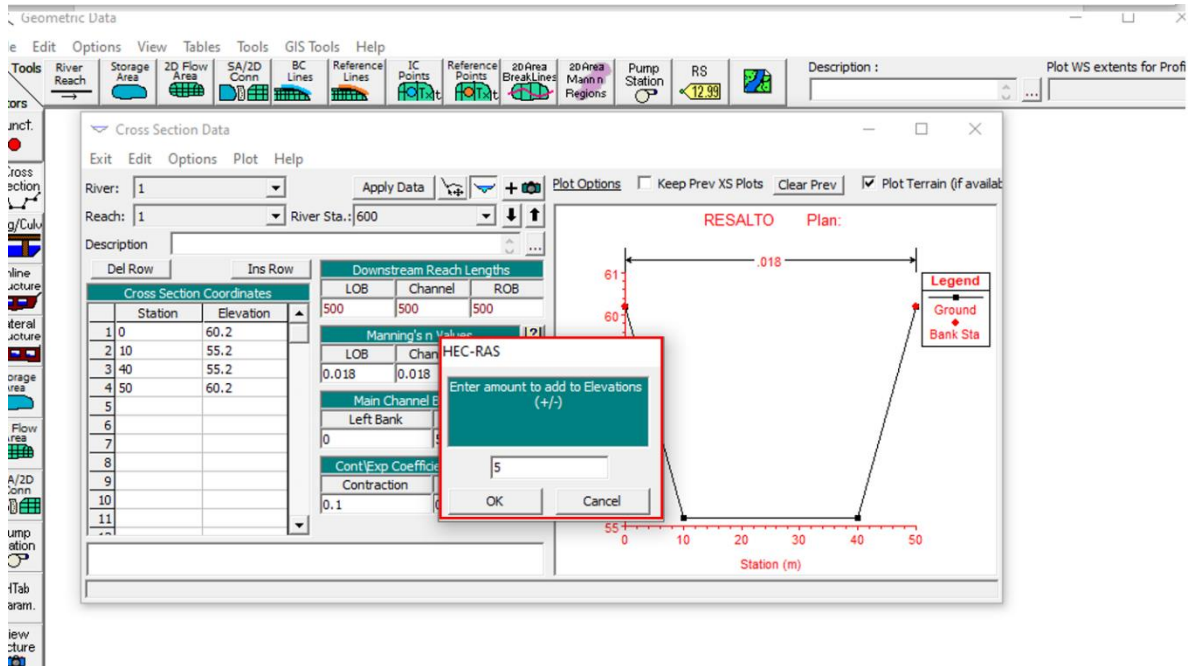


Figura 20 Elevación = 5

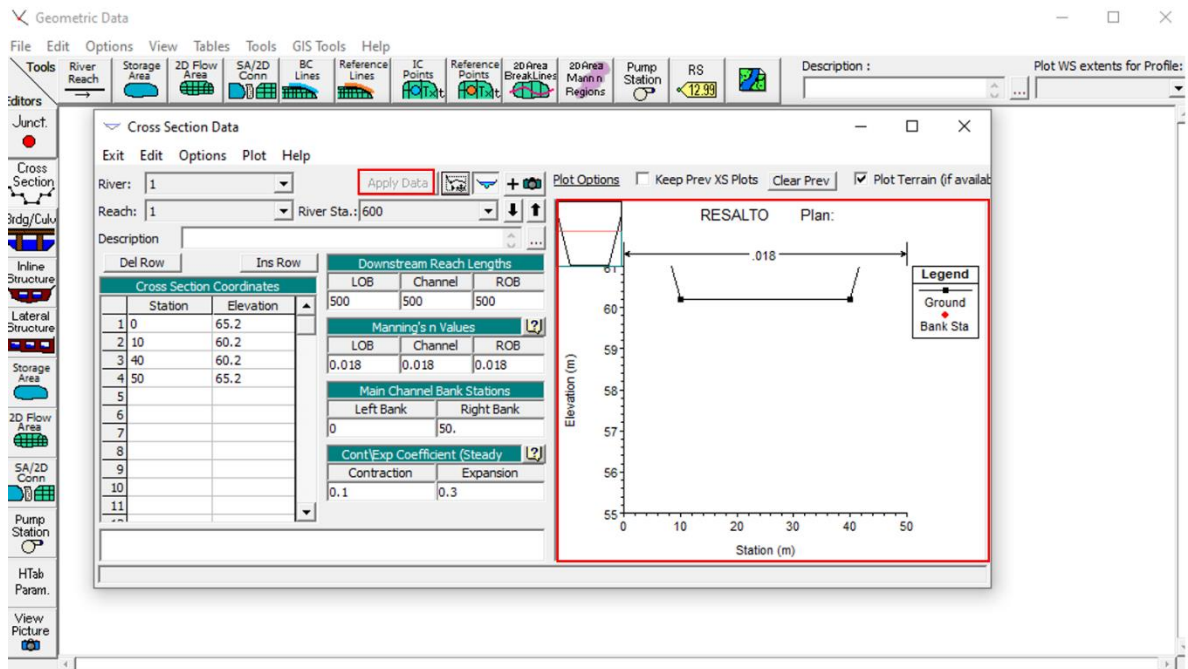


Figura 21 Apply Data

Interpolación: Para que la simulación sea fluida, ve a Tools > XS Interpolation y genera secciones intermedias cada 10 metros.

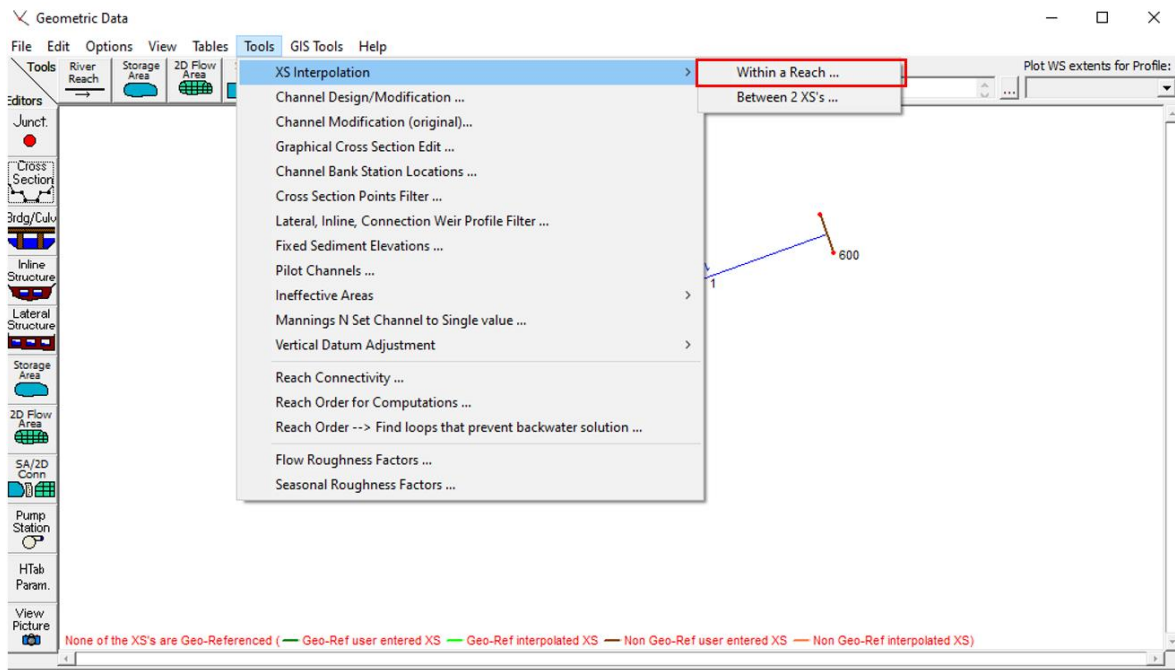


Figura 22 Tools > XS Interpolation

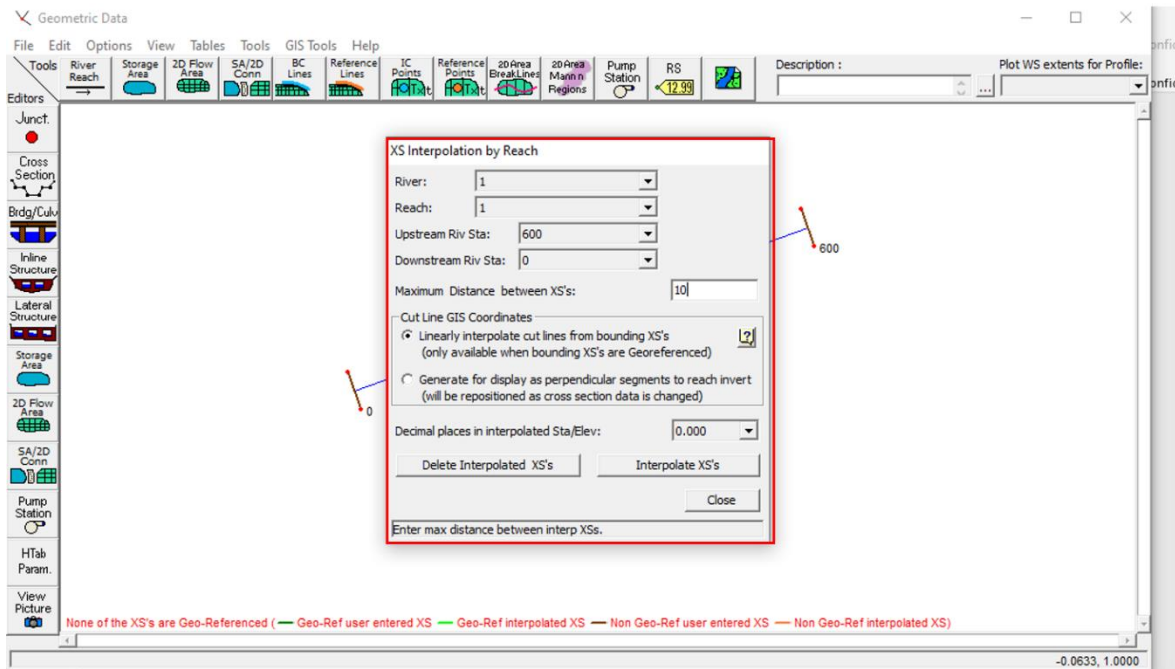


Figura 23 Secciones intermedias cada 10 metros

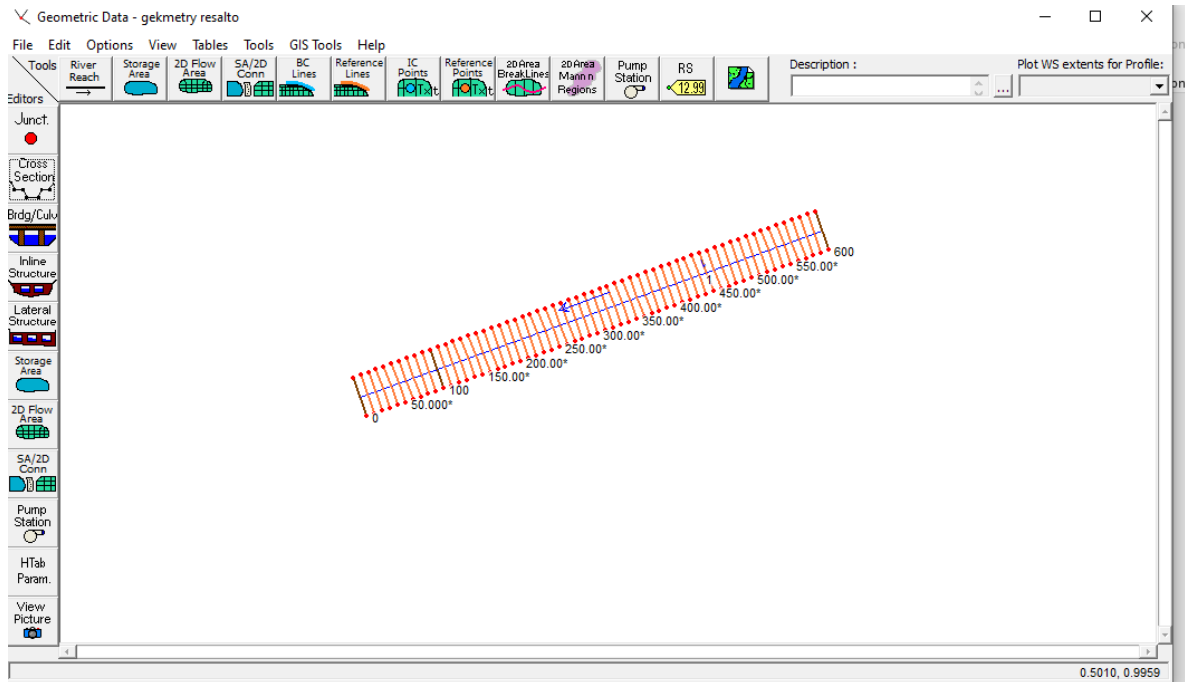


Figura 23

3. Datos de Flujo Estacionario (Steady Flow)

Caudales: Abre el editor de Steady Flow Data. Indica que quieres simular 5 perfiles y escribe los valores de los caudales (descargas).

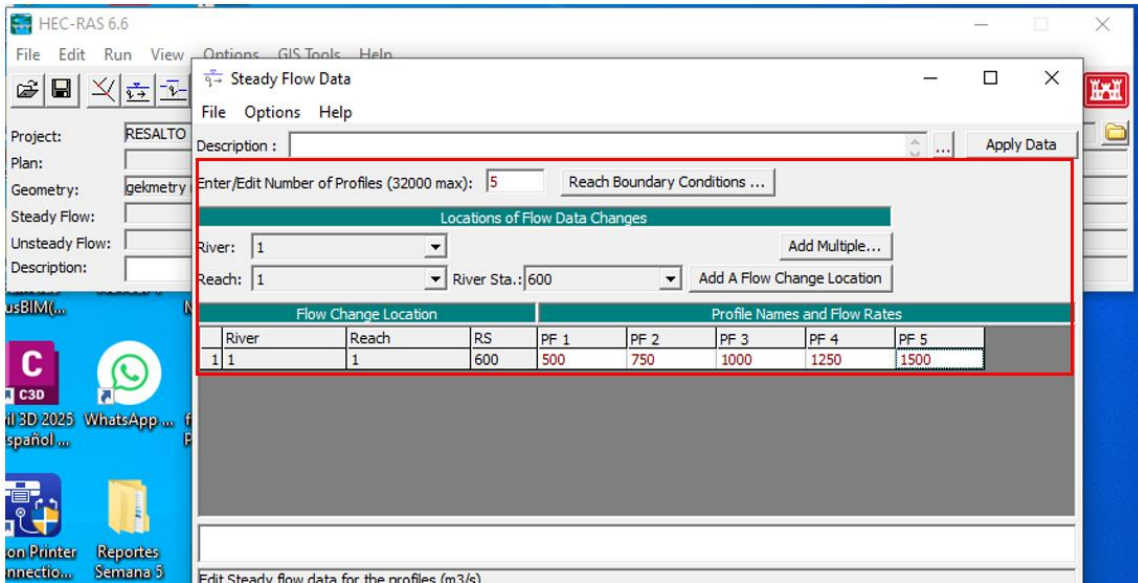


Figura 24 Ingreso de caudales en el editor Steady Flow Data para la simulación de múltiples perfiles.

Condiciones de Contorno: Haz clic en Reach Boundary Conditions. Para un salto hidráulico, se suele usar Normal Depth tanto aguas arriba como aguas abajo, ingresando el valor de la pendiente (ej. 0.01).

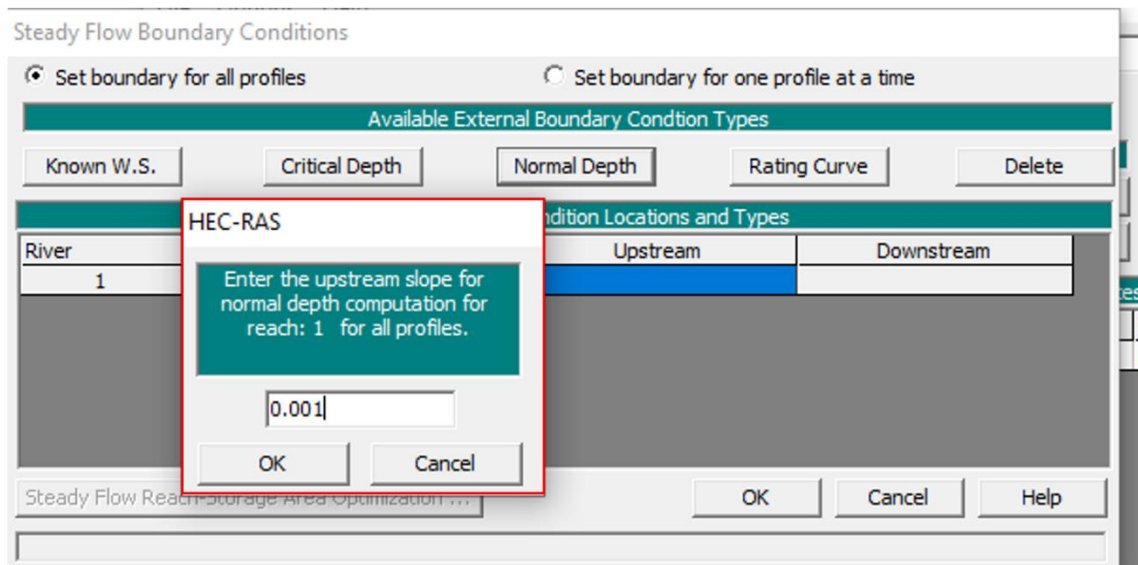


Figura 25 valor de la pendiente Upstream 0.001

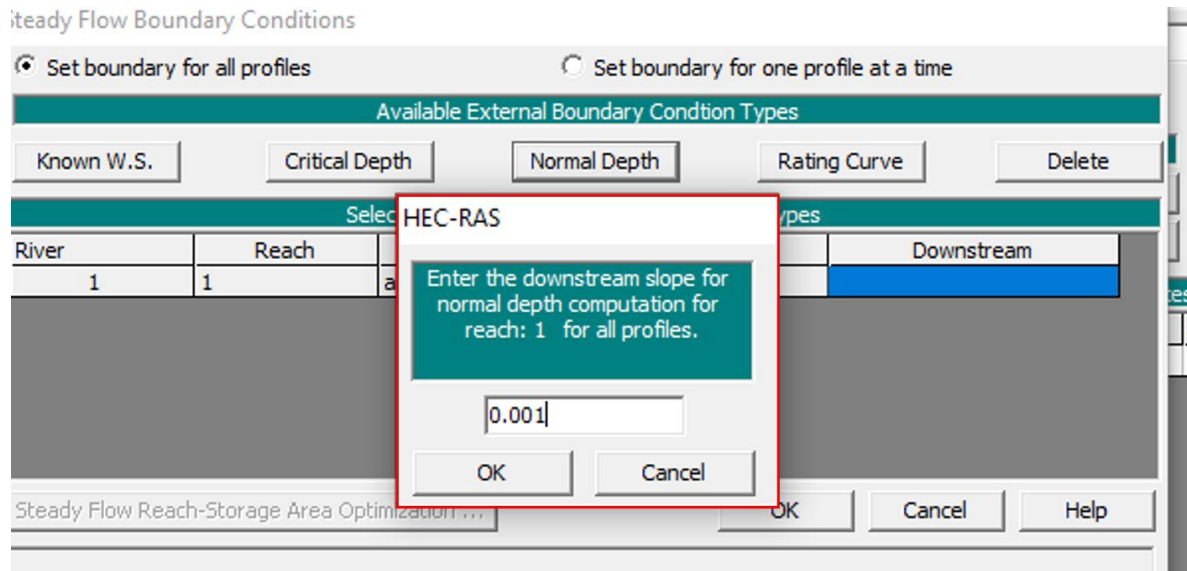


Figura 26 valor de la pendiente Downstream 0.001

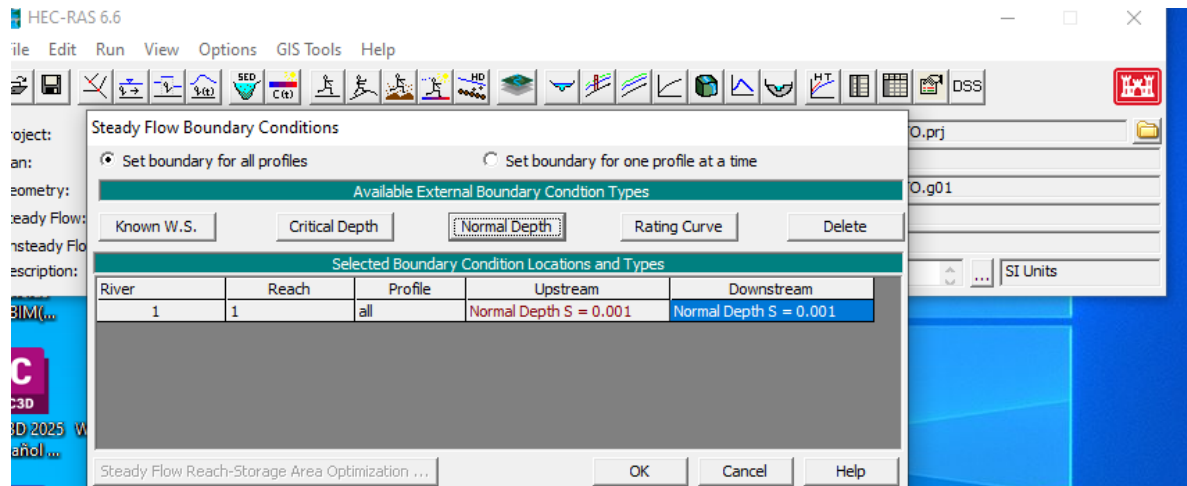


Figura 27 Normal Depth

4. Simulación y Análisis

Ejecutar: Abre la ventana Steady Flow Analysis. Selecciona el régimen de flujo Mixed (Mixto). Esto es vital para que el software pueda calcular el paso de régimen supercrítico a subcrítico (el salto).

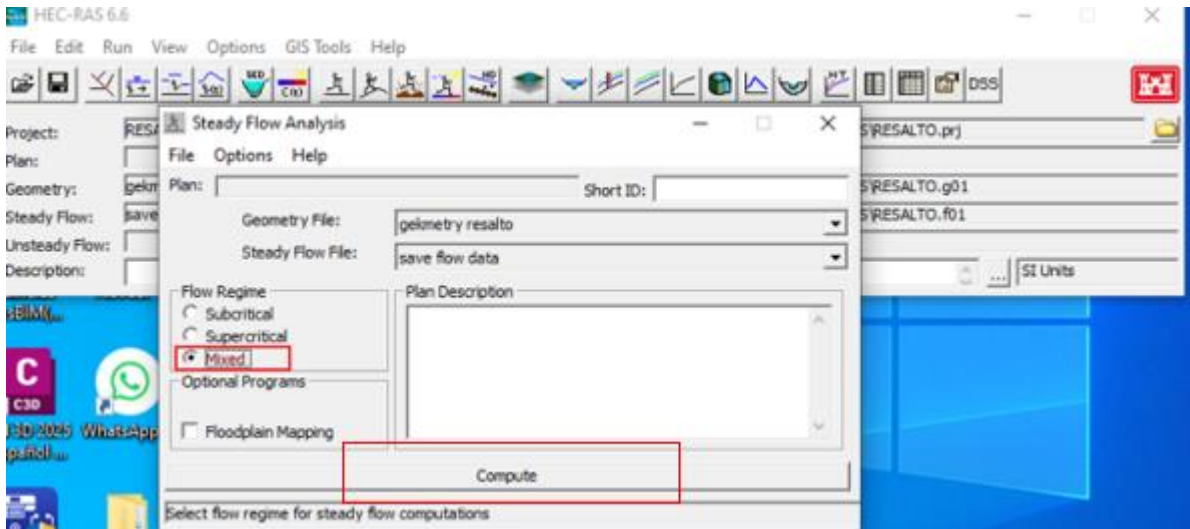


Figura 28 Correr la simulación

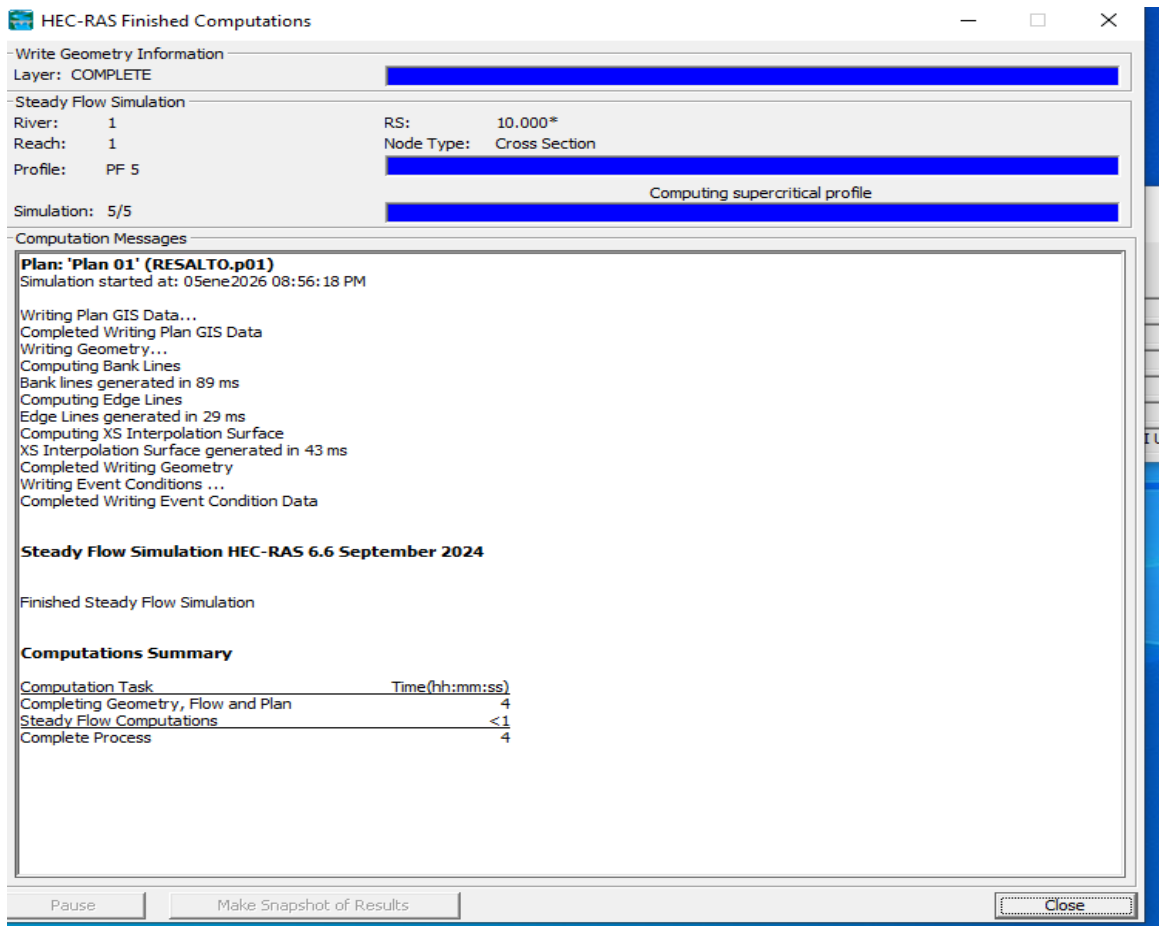


Figura 29 Ejecución de la simulación

Visualización:

Perfiles: Revisa el Profile Plot para ver gráficamente dónde ocurre el salto hidráulico. Capacidad: Verifica si el agua se sale del canal (en el video, los caudales 4 y 5 sobrepasan la capacidad diseñada).

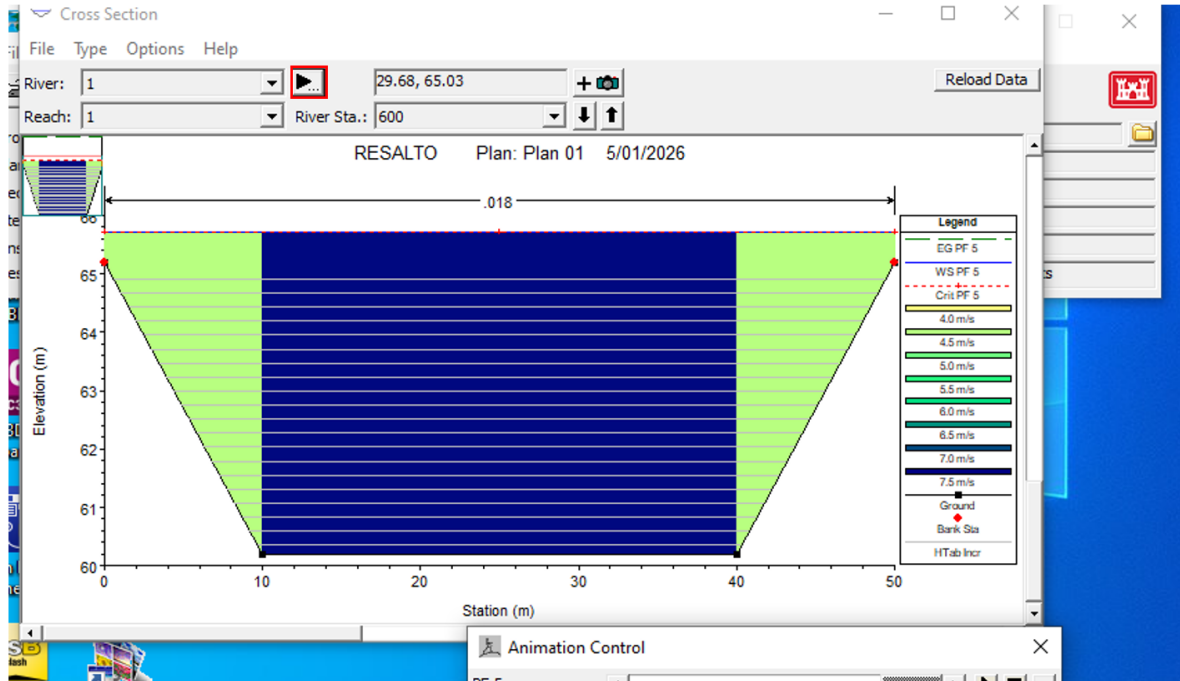


Figura 30

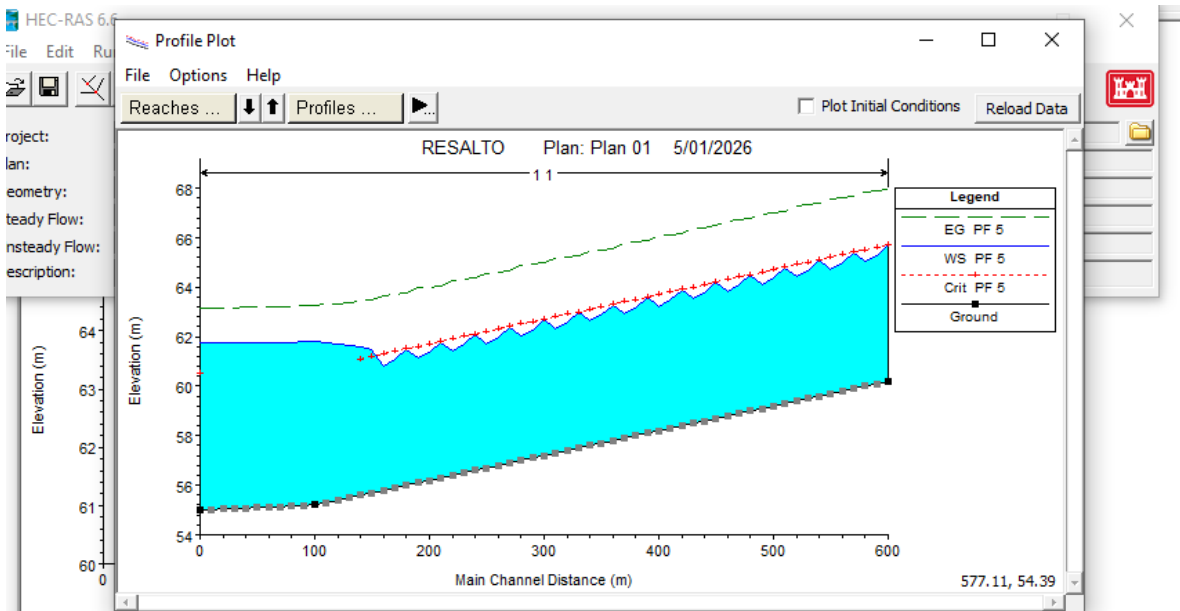


Figura 31 Salto hidráulico

Tablas: Consulta las tablas de salida para verificar el Número de Froude; el salto ocurre donde este número pasa de ser mayor a 1 a ser menor a 1.

HEC-RAS Plan: Plan 01 River: 1 Reach: 1 Profile: PF 5													Reload Data
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	Froude # Chl	
			(m ³ /s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m ²)	(m)		
1	600	PF 5	1500.00	60.20	65.71	65.71	67.97	0.002104	6.66	225.33	50.00	1.00	
1	590.00*	PF 5	1500.00	60.10	65.28	65.60	67.91	0.002661	7.18	208.98	50.00	1.12	
1	580.00*	PF 5	1500.00	60.00	65.03	65.51	67.86	0.002987	7.45	201.38	50.00	1.19	
1	570.00*	PF 5	1500.00	59.90	65.38	65.41	67.67	0.002145	6.70	223.95	50.00	1.01	
1	560.00*	PF 5	1500.00	59.80	64.97	65.31	67.61	0.002674	7.19	208.65	50.00	1.12	
1	550.00*	PF 5	1500.00	59.70	64.72	65.21	67.56	0.003004	7.46	201.03	50.00	1.19	
1	540.00*	PF 5	1500.00	59.60	65.08	65.10	67.37	0.002144	6.70	223.99	50.00	1.01	
1	530.00*	PF 5	1500.00	59.50	64.67	65.01	67.31	0.002673	7.19	208.67	50.00	1.12	
1	520.00*	PF 5	1500.00	59.40	64.42	64.91	67.26	0.003003	7.46	201.05	50.00	1.19	
1	510.00*	PF 5	1500.00	59.30	64.78	64.81	67.07	0.002146	6.70	223.90	50.00	1.01	
1	500.00*	PF 5	1500.00	59.20	64.37	64.71	67.01	0.002674	7.19	208.64	50.00	1.12	
1	490.00*	PF 5	1500.00	59.10	64.12	64.61	66.96	0.003004	7.46	201.03	50.00	1.19	
1	480.00*	PF 5	1500.00	59.00	64.48	64.51	66.77	0.002147	6.70	223.89	50.00	1.01	
1	470.00*	PF 5	1500.00	58.90	64.07	64.41	66.71	0.002675	7.19	208.61	50.00	1.12	
1	460.00*	PF 5	1500.00	58.80	63.82	64.31	66.66	0.003005	7.46	201.01	50.00	1.19	
1	450.00*	PF 5	1500.00	58.70	64.18	64.20	66.47	0.002144	6.70	223.99	50.00	1.01	
1	440.00*	PF 5	1500.00	58.60	63.77	64.11	66.41	0.002673	7.19	208.66	50.00	1.12	
1	430.00*	PF 5	1500.00	58.50	63.52	64.01	66.36	0.003003	7.46	201.04	50.00	1.19	
1	420.00*	PF 5	1500.00	58.40	63.88	63.91	66.17	0.002146	6.70	223.90	50.00	1.01	
1	410.00*	PF 5	1500.00	58.30	63.47	63.81	66.11	0.002674	7.19	208.64	50.00	1.12	
1	400.00*	PF 5	1500.00	58.20	63.22	63.71	66.06	0.003004	7.46	201.03	50.00	1.19	
1	390.00*	PF 5	1500.00	58.10	63.58	63.61	65.87	0.002146	6.70	223.90	50.00	1.01	
1	380.00*	PF 5	1500.00	58.00	63.17	63.51	65.81	0.002674	7.19	208.64	50.00	1.12	
1	370.00*	PF 5	1500.00	57.90	62.92	63.41	65.76	0.003004	7.46	201.03	50.00	1.19	
1	360.00*	PF 5	1500.00	57.80	63.28	63.30	65.57	0.002144	6.70	223.99	50.00	1.01	
1	350.00*	PF 5	1500.00	57.70	62.87	63.20	65.51	0.002674	7.19	208.64	50.00	1.12	
1	340.00*	PF 5	1500.00	57.60	62.62	63.10	65.46	0.002995	7.46	201.21	50.00	1.19	
1	330.00*	PF 5	1500.00	57.50	62.98	63.01	65.27	0.002145	6.70	223.94	50.00	1.01	
1	320.00*	PF 5	1500.00	57.40	62.57	62.91	65.21	0.002674	7.19	208.66	50.00	1.12	
1	310.00*	PF 5	1500.00	57.30	62.32	62.81	65.16	0.003003	7.46	201.04	50.00	1.19	
1	300.00*	PF 5	1500.00	57.20	62.68	62.71	64.97	0.002146	6.70	223.90	50.00	1.01	
1	290.00*	PF 5	1500.00	57.10	62.27	62.60	64.91	0.002674	7.19	208.64	50.00	1.12	
1	280.00*	PF 5	1500.00	57.00	62.02	62.51	64.86	0.003004	7.46	201.03	50.00	1.19	
1	270.00*	PF 5	1500.00	56.90	62.38	62.41	64.67	0.002146	6.70	223.90	50.00	1.01	

Total flow in cross section.

Capacidad: Verifica si el agua se sale del canal (en el video, los caudales 4 y 5 sobrepasan la capacidad diseñada).

5.6 Video de la Simulación

- ✓ A continuación, se presenta el enlace al video correspondiente a la simulación número cuatro incluida en este documento. Dicho video forma parte de una serie de tutoriales que orientan al usuario en el manejo del programa computacional utilizado en cada simulación.
- ✓ Enlace del video: <https://youtu.be/IVqbL6nrPQI>

6. Descripción del Entregable

6.1 Entregables de la Simulación Inicial

Debe entregar en archivo PDF un documento donde se realice una captura de toda la pantalla (no solo una sección del programa computacional sino **TODA LA PANTALLA DEL ESCRITORIO**) de los siguientes pasos durante el proceso:

NOTA: (TENGA EN CUENTA QUE LAS CAPTURAS DEBEN INCLUIR TAMBIEN LA PARTE DEL ADMINISTRADOR DE TAREAS PARA QUE SE PUEDA VER LA FECHA, HORA Y DIA QUE LO HIZO)

- ✓ **Creación y guardado del proyecto** de simulación en HEC-RAS, donde se identifique el nombre del archivo y la ruta de almacenamiento, como se muestra en la (Figura 5)
- ✓ **Guardado de los datos de flujo** (Figura 24,25,26,27)
- ✓ **Ejecución exitosa de la simulación**, con la ventana de confirmación de cálculo completado sin errores, como la (Figura 29)
- ✓ **Resultados obtenidos del modelado hidráulico (en el video se muestra)**, incluyendo:
 - Resultados de las secciones transversales (Figura 13,18 y 21)

6.2 Preguntas de Análisis

- En la práctica usamos un coeficiente de Manning de 0.018. Si decidiéramos revestir el canal con un material mucho más rugoso (aumentando el valor de Manning), ¿qué esperarían que ocurriera con la **ubicación** del salto hidráulico? ¿Se desplazaría hacia aguas arriba (el inicio) o hacia aguas abajo (el final)
- ¿Cuál es la eficiencia de este salto como disipador de energía? Comparando la Línea de Energía antes y después del salto, ¿qué porcentaje de energía se perdió y qué impacto tendría esto en la erosión del lecho si el canal no fuera revestido?
- ¿Cómo influye el "Borde Libre" (Freeboard)? En los perfiles 1, 2 y 3 el agua no se sale, pero ¿es el espacio restante suficiente para cumplir con las normas de seguridad ante ondas u oscilaciones del salto hidráulico?
- ¿Qué errores se presentan en los resultados de HEC-¿RAS cuando se simula únicamente en régimen subcrítico un flujo que en realidad es supercrítico, y por qué es indispensable activar la opción de flujo mixto (Mixed Flow) para lograr la correcta visualización del resalto hidráulico?
- ¿Es el desbordamiento de los perfiles 4 y 5 un error de cálculo o de diseño? ¿Cómo justifica un ingeniero que el canal falle para caudales altos? ¿Se debe rediseñar la geometría o es aceptable que el canal falle ante eventos extremos (periodos de retorno largos)?

7. Referencias Bibliográficas

- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos*.
https://www.academia.edu/43519012/Ven_Te_Chow_HIDRAULICA_DE_CANALES_ABIERTOS
- Marbello, R. (2005). 6. *El resalto hidráulico*. Universidad Nacional de Colombia.
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/21725/3353962.2005.Parte%2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Villón, B. (1995). *Hidráulica de canales*. <https://uis-odilotk-es.bibliotecavirtual.uis.edu.co/.https://pdfb9c6919cf9985b759bfeca2ebb3e1fa1.odilo.us/#/e81c25ea3bb04acc86cfe4f557ac2fae/18955710ff93c4e1ea3445e0c6c773fc3fa6b9587e23c2b8572103ae049747ae>
- Malaver Nieto, E. D. (2023). Desarrollo de simulaciones de modelos hidráulicos como herramienta de soporte de la enseñanza del laboratorio de hidráulica [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio institucional UIS.