

Manual de laboratorio de simulación computacional

Práctica N°6: Estudio del Flujo Gradualmente Variado Mediante el Cambio de Pendiente.

Fuente del recurso:

Ejemplo adaptado del video “*Simulación de flujo estable HEC-RAS*”, desarrollado por **César Guadalupe González Parra** y disponible en la plataforma YouTube <https://www.youtube.com/watch?v=FlVc4Vmmtl4>. 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 Fernada Jaimes Toloza**, como parte de la **Práctica N.º 6: Estudio del Flujo Gradualmente Variado mediante el cambio de pendiente**.

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

1. Objetivos de la simulación

- ✓ Analizar el comportamiento del flujo gradualmente variado en un canal trapezoidal con pendientes variables, mediante la simulación hidráulica en el software HEC-RAS, con el fin de identificar la variación espacial del tirante, la velocidad y el número de Froude a lo largo del tramo y comprender la respuesta hidráulica del sistema ante cambios en la pendiente del fondo.
- ✓ Comprender los fundamentos del flujo gradualmente variado en canales abiertos y su representación mediante perfiles de energía, superficie libre y línea de gradiente hidráulico.
- ✓ Implementar una simulación computacional en HEC-RAS que permita modelar el flujo permanente en un canal trapezoidal con dos pendientes diferentes, verificando la influencia del cambio de pendiente sobre las condiciones del flujo.
- ✓ Analizar los resultados obtenidos (tirante, velocidad, número de Froude, línea de energía y superficie libre) e interpretar el comportamiento hidráulico del canal, determinando si el flujo se mantiene en régimen subcrítico o presenta transiciones.

2. Requerimientos de la simulación

- ✓ Sistema operativo Windows 7 64-bit (o superior) o Linux
- ✓ Seguir la Guía N°1: Proceso de instalación de HEC-RAS
- ✓ Preferiblemente poseer la versión 5.0.7 del programa HEC-RAS

3. Introducción

La presente práctica del laboratorio de hidráulica tiene como objetivo analizar el **flujo gradualmente variado (FGV)** en un canal lateral derecho derivado del **Canal Principal Margen Izquierda (CPMI)**, mediante el uso del software **HEC-RAS**. Este tipo de flujo se caracteriza por una variación progresiva de las condiciones hidráulicas del agua a lo largo del canal —como la velocidad, el tirante y la energía específica—, generada por cambios en la pendiente del fondo, en la rugosidad o en las condiciones de descarga (Chow, 1959; Chaudhry, 2008).

El estudio del flujo gradualmente variado resulta fundamental para comprender el comportamiento real de los **canales abiertos**, en los cuales las condiciones geométricas e hidráulicas rara vez permanecen constantes. En este tipo de flujo, el equilibrio entre las fuerzas de gravedad y fricción se ve alterado, ocasionando que las líneas de energía, superficie libre y fondo del canal no sean paralelas (Mays, 2010). Su análisis permite interpretar los perfiles del flujo y evaluar el desempeño hidráulico del canal en diferentes condiciones operativas.

En esta simulación se modela un **tramo de 2 km de longitud** del canal lateral derecho del CPMI, comprendido aproximadamente entre las progresivas **35+650 y 37+650**. Este sector fue seleccionado por presentar **variaciones en la pendiente** y condiciones geométricas representativas del canal, que permiten observar con claridad el comportamiento del flujo gradualmente variado. Cabe destacar que el **régimen de flujo se mantiene subcrítico** a lo largo del tramo, tal como corresponde a canales con pendientes suaves y flujo controlado por gravedad (Brunner, 2016).

Para el desarrollo del modelo se incorporan las **secciones transversales, rugosidades y condiciones de borde reales** del tramo, con el fin de reproducir de manera precisa la dinámica hidráulica del canal. Mediante la simulación en HEC-RAS se busca obtener la variación espacial de las variables del flujo, determinar el tipo de perfil generado (perfil M2 típico de régimen subcrítico) y analizar la respuesta hidráulica del canal ante las condiciones establecidas.

De esta manera, la práctica permite **reforzar los conocimientos teóricos sobre el flujo gradualmente variado** y el uso de herramientas computacionales en hidráulica, promoviendo el análisis crítico de los resultados y la interpretación física del comportamiento del flujo en canales de riego.

4. Marco teórico

4.1 El Flujo gradualmente variado (FGV)

El flujo gradualmente variado (FGV) es un régimen de flujo permanente no uniforme en canales abiertos, caracterizado por una variación progresiva de la profundidad del agua a lo largo del canal al encontrarse bajo condiciones de caudal constante y sin cambios bruscos en la geometría (Chow, 1959). Este tipo de flujo ocurre cuando la pendiente del fondo S_0 , la rugosidad del canal o las condiciones de contorno presentan cambios suaves, de modo que la distribución de presión puede considerarse hidrostática (Ramamurthy, 2000). La relevancia del FGV radica en que en la mayoría de los canales reales las condiciones geométricas, de pendiente o de descarga varían, impidiendo que el flujo sea completamente uniforme. Estos cambios provocan que las líneas de energía, superficie libre y fondo no sean paralelas, y que la profundidad, velocidad y otros parámetros evolucionen a lo largo del canal (USGS, 1988).

4.2 Expresión para el flujo gradualmente variado

El perfil de flujo en un tramo con FGV se puede modelar mediante la ecuación diferencial:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f}{1 - Fr^2} \quad (I)$$

Donde y es la profundidad, S_0 la pendiente del fondo, S_f la pendiente de fricción y Fr el número de Froude (Chow, 1959; Ramamurthy, 2000). Esta expresión permite estimar la variación de la profundidad a lo largo del canal y caracteriza la forma del perfil del agua (Vatankhah, 2013). La ecuación se integra numéricamente en programas como el HEC-RAS para generar los perfiles longitudinales del flujo.

4.3 Condiciones normales y ecuación de la pendiente crítica

4.3.1 Condiciones normales del flujo

Las condiciones normales del flujo están asociadas al régimen **uniforme y permanente**, en el cual la profundidad, la velocidad y las demás propiedades hidráulicas se mantienen constantes a lo largo del canal (Chaudhry, 2008). En estas condiciones, la pendiente del fondo (S_0), la superficie libre y la línea de energía son paralelas, y la fricción equilibra exactamente la componente de la gravedad.

Para este caso, el **tirante normal** (y_n) y la **velocidad normal** (V_n) son parámetros fundamentales, que se calculan comúnmente mediante la **ecuación de Manning**, ampliamente utilizada por su simplicidad y buena aproximación en canales de laboratorio y campo (Chow, 1994; Sturm, 2010).

La expresión de **Manning** para velocidad uniforme es:

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S_0^{1/2} \quad (2)$$

donde:

- V : velocidad media del flujo (m/s),

- R : radio hidráulico (m),
- S_0 : pendiente del canal (m/m),
- n : coeficiente de rugosidad de Manning ($s/ m^{1/3}$).

A su vez, el **caudal** en condiciones uniformes se determina como:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S_0^{1/2} \quad (3)$$

donde A es el área de la sección transversal (m^2).

Despejando para la pendiente normal del canal, se obtiene:

$$S_0 = \left(\frac{nV}{R^{2/3}} \right)^2 \quad (4)$$

o, alternativamente,

$$S_0 = \left(\frac{nQ}{AR^{2/3}} \right)^2 \quad (5)$$

4.3.1.1 Cálculo del tirante normal (y_n)

El **tirante normal** (y_n) corresponde a la profundidad de flujo bajo condiciones de equilibrio entre las fuerzas de gravedad y fricción. A partir de la ecuación de Manning (3), se tiene:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S_0^{1/2} \quad (6)$$

Reorganizando términos:

$$\frac{Qn}{S_0^{1/2}} = AR^{2/3} \quad (7)$$

Dependiendo de la geometría del canal, tanto el área como el radio hidráulico se expresan en función del tirante y .

Para un canal **trapezoidal**, se tiene:

$$A = (b + zy)y \quad (8)$$

$$P = b + 2y\sqrt{1 + z^2} \quad (9)$$

$$R = \frac{A}{P} = \frac{(b+zy)y}{b+2y\sqrt{1+z^2}} \quad (10)$$

Sustituyendo en la ecuación (7):

$$\frac{Qn}{S_0^{1/2}} = [(b + zyn)yn] \left[\frac{(b + zyn)yn}{b + 2yn\sqrt{1 + z^2}} \right]^{2/3} \quad (11)$$

Esta ecuación se resuelve iterativamente o mediante métodos numéricos hasta obtener el valor del **tirante normal (yn)**, único para el caudal, rugosidad y pendiente dados.

En la práctica, este cálculo se realiza empleando software especializado (como HEC-RAS o H-Canales), el cual automatiza el procedimiento mediante algoritmos de tanteo (Brunner, 2016). Sin embargo, es fundamental que el estudiante comprenda la base analítica del proceso, ya que este valor representa el punto de equilibrio hidráulico del flujo.

El conocimiento del **tirante normal** permite definir las condiciones de contorno para análisis de **flujo gradualmente variado (FGV)**, establecer el régimen (subcrítico o supercrítico) y evaluar el comportamiento hidráulico de canales naturales o revestidos (Henderson, 1966; Sturm, 2010).

4.3.2 Ecuación de la pendiente crítica

A partir de la ecuación de Manning para flujo uniforme, se puede expresar la pendiente crítica como:

$$S_c = \left(\frac{V_c n}{R_c^{2/3}} \right)^2 \quad (12)$$

donde:

- S_c : Pendiente crítica del canal (m/m).
- V_c : Velocidad del flujo en condiciones críticas (m/s).
- n : Coeficiente de rugosidad de Manning ($s/m^{1/3}$).
- R_c : Radio hidráulico bajo condiciones críticas (m).

El radio hidráulico en condiciones críticas se define como la razón entre el área hidráulica crítica (A_c) y el perímetro mojado correspondiente (P_c):

$$R_c = \frac{A_c}{P_c} \quad (13)$$

Para el cálculo de la pendiente crítica, es necesario conocer las características geométricas de la sección transversal y el caudal del flujo. De acuerdo con **Henderson (1966)**, el flujo crítico se produce cuando la energía específica del sistema alcanza un valor mínimo, lo que implica que la pendiente del fondo se ajusta para mantener un equilibrio entre la energía potencial, cinética y las pérdidas por fricción. El conocimiento de la pendiente crítica permite establecer criterios de diseño en canales hidráulicos, evitando fenómenos indeseados como la formación de resaltes hidráulicos o zonas de remanso, y garantizando un transporte estable del flujo (**Chow, 1994; Sturm, 2010**). En modelaciones computacionales, como las realizadas con **HEC-RAS**, este parámetro es esencial para definir las condiciones de contorno y analizar el comportamiento del flujo gradualmente variado.

4.4 Curvas de Remanso

Las **curvas de remanso** representan los perfiles longitudinales de la superficie libre del flujo en canales abiertos bajo condiciones de **flujo gradualmente variado (FGV)**. Estas curvas se originan cuando el equilibrio entre las fuerzas de gravedad y fricción se ve alterado, provocando que las líneas del fondo, energía y superficie del agua no sean paralelas (Chaudhry, 2008). El análisis de las curvas de remanso permite conocer la variación del tirante del agua a lo largo del canal y su relación con el régimen de flujo,

lo cual resulta esencial en el diseño hidráulico y la operación de estructuras como vertederos, compuertas y canales de transición (Henderson, 1966; Sturm, 2010).

El perfil del flujo depende de parámetros como la **pendiente del fondo (S_0)**, el **tirante normal (Y_n)** y el **tirante crítico (Y_c)**. Estos valores determinan el tipo de pendiente (suave, crítica, fuerte, horizontal o adversa) y, por tanto, la forma de la curva de remanso. En los flujos gradualmente variados, el agua tiende a ajustar su nivel hasta alcanzar una condición de equilibrio, generando superficies libres características según el régimen predominante (subcrítico o supercrítico) (Cengel & Cimbala, 2014).

4.4.1 Clasificación y nomenclatura de las curvas de remanso

Las curvas de remanso se clasifican según la **pendiente del canal** y el **régimen del flujo**. De acuerdo con *Henderson (1966)* y *Chow (1994)*, las principales categorías son:

Tipo de pendiente	Condición hidráulica	Relación entre tirantes	Símbolo	Régimen del flujo
Suave (Mild)	$S_0 < S_\square$	$y_n > y_\square$	M	Subcrítico
Crítica (Critical)	$S_0 = S_\square$	$y_n = y_\square$	C	Crítico
Fuerte (Steep)	$S_0 > S_\square$	$y_n < y_\square$	S	Supercrítico
Horizontal (Horizontal)	$S_0 = 0$	$y_n \rightarrow \infty$	H	Estático o sin escurrimiento
Adversa (Adverse)	$S_0 < 0$	No existe y_n real	A	Flujo ascendente u oposición a la gravedad

Tabla 1. Curvas de remanso dependiendo de la pendiente de fondo

Estas clasificaciones permiten determinar las condiciones predominantes en un canal y prever la posible formación de **resaltes hidráulicos o remansos localizados**. En la práctica, la identificación de estas curvas ayuda a establecer los puntos de control del flujo y las zonas donde es necesario incluir estructuras disipadoras de energía (Ven Te Chow, 1994; Sturm, 2010).

4.4.2 Zonas de generación de las curvas de remanso

Además de la pendiente del fondo, las curvas de remanso se clasifican según la **zona de generación**, definida por la posición relativa del tirante real (Y) respecto a los tirantes normal (Y_n) y crítico (Y_c). Estas zonas fueron sistematizadas inicialmente por *Henderson (1966)* y posteriormente refinadas por *Chaudhry (2008)* y *Sturm (2010)*, quedando así:

Zona	Condición del tirante	Descripción	Características del flujo
------	-----------------------	-------------	---------------------------

Zona 1	$y > \max(y_n, y_c)$	Se genera aguas arriba de estructuras o aumentos bruscos de energía.	Flujo subcrítico con remanso creciente.
Zona 2	$y_c < y < y_n$	Corresponde a la parte intermedia del perfil donde el flujo se ajusta gradualmente.	Flujo transitorio entre regímenes.
Zona 3	$y < \min(y_n, y_c)$	Se presenta aguas abajo de caídas o descargas abruptas.	Flujo supercrítico con disminución de profundidad.

Tabla 2. Zonas de generación de curvas de remanso

El conocimiento de estas zonas es fundamental para interpretar la forma del perfil del flujo y su estabilidad. Por ejemplo, en canales de pendiente suave (M), las curvas típicas son **M1**, **M2** y **M3**, dependiendo de la posición del flujo respecto a y_n y y_c . De manera análoga, en pendientes fuertes (S), se obtienen las curvas **S1**, **S2** y **S3** (Henderson, 1966; Chanson, 2004).

El análisis de las curvas de remanso no solo tiene relevancia teórica, sino también práctica, pues permite prever fenómenos como el **resalto hidráulico**, la **acumulación aguas arriba de estructuras**, o la **pérdida de energía disponible** en canales de riego, drenaje y conducción (Ramírez & Escobar, 2021).

5. Implementación de la simulación

5.1 Descripción del problema:

El presente ejercicio corresponde a la simulación hidráulica de un tramo del **Canal Lateral Derecho (CLD)** del **Canal Principal Margen Izquierda (CPMI)**, comprendido entre las progresivas **35+650** y **37+650**, con una longitud total de **2 km**.

El objetivo del análisis es evaluar el **comportamiento del flujo** a lo largo del canal ante variaciones de la pendiente del fondo, bajo condiciones de **flujo permanente gradualmente variado (FGV)**.

El canal presenta una **sección trapezoidal**, con **ancho de plantilla** $b = 1.5$ m, **talud lateral** $t = 1.5$, y un **tirante inicial** $d = 1.5$ m. La **rugosidad del canal** corresponde a **concreto liso**, con un **coeficiente de Manning** $n = 0.014$.

Se analizan **dos tramos consecutivos**:

- **Tramo 1:** entre las progresivas 0+000 y 1+000 km, con **pendiente hidráulica** $S = 0.0005$.
- **Tramo 2:** entre las progresivas 1+000 y 2+000 km, con **pendiente menor** $S = 0.0003$.

En ambos casos, el canal transporta un **caudal constante** de $Q = 7.312 \text{ m}^3/\text{s}$.

Bajo estas condiciones, la simulación en **HEC-RAS 5.0.7** se ejecutará en **régimen permanente (steady flow)** y con la posibilidad de obtener **estados mixtos**, permitiendo caracterizar el **perfil del flujo** y las **variables hidráulicas** (tirante, velocidad, número de Froude, línea de energía y superficie libre) a lo largo del tramo.

Asimismo, se busca **identificar posibles transiciones de régimen** (de flujo subcrítico a supercrítico o la formación de resaltes hidráulicos) ocasionadas por la variación de la pendiente del fondo.

CANAL LATERAL DER. KM 35+650 DEL CPMI		Del km:	0+000	1+000
		Al km:	1+000	2+000
Plantilla	b:	m	1.5	1.5
Tirante	d:	m	1.5	1.5
Borde libre	BL:	m	0.3	0.3
Talud en canal	t:	adim	1.5	1.5
Número de Manning	n Concreto liso:	adim	0.014	0.014
Pendiente hidráulica	S:	adim	0.0005	0.0003
Caudal	Q:	m ³ /s	7.312	7.312

Tabla 3. Datos del problema

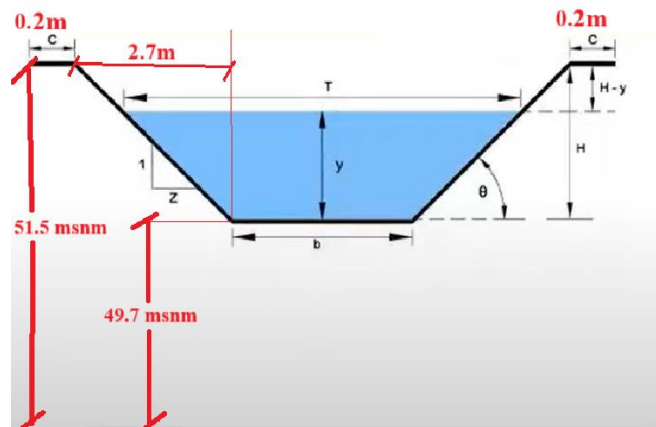


Figura 1. Sección Transversal del canal trapecoidal

5.2 Procedimiento de implementación

Este se llevará a cabo en HEC-RAS, v5.0.7 (HEC-RAS, 2008), donde se deberán ingresar datos como la geometría del canal, valores de flujo (entre ellos condiciones de contorno) y un plan de ejecución que el programa utilizará para realizar la simulación.

5.2.1 Abrir del Programa HEC-RAS

Busque el acceso directo que se creó al instalar HEC-RAS, y ejecute el programa.

5.2.2 Acomodar las unidades

- ✓ Seleccione el botón *Options*, posteriormente seleccione *Unit system (US Customary/SI)*

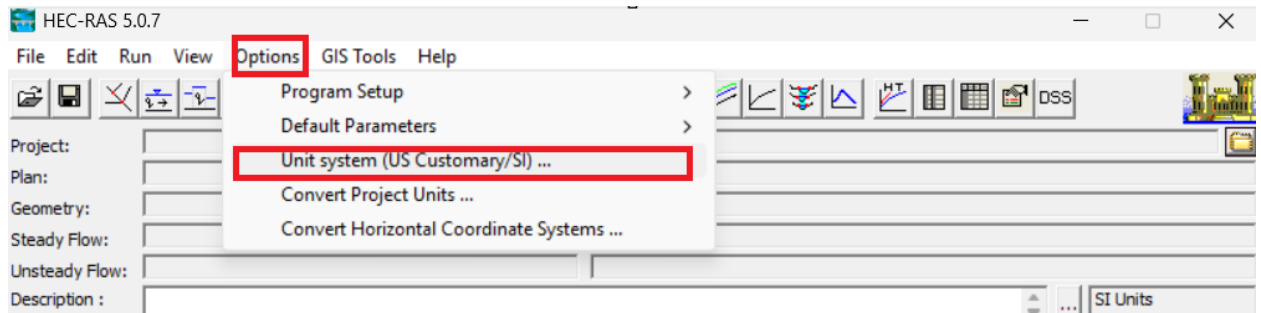


Figura 2. Ventana para modificar las unidades

- ✓ Seleccione *Set as default for new projects* y luego de clic en *OK* (Figura 3)

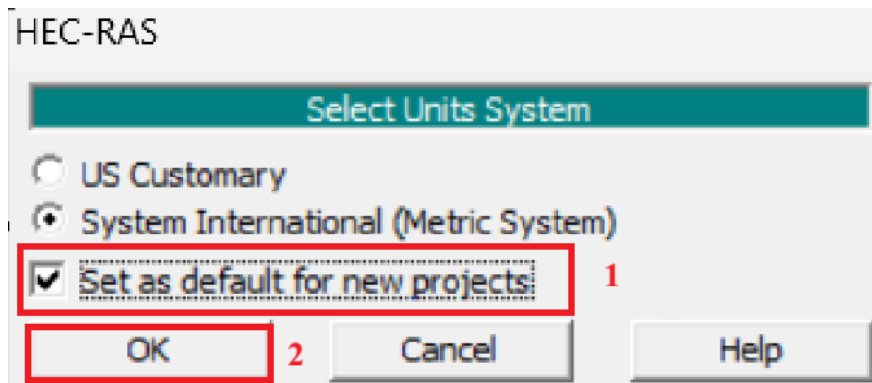


Figura 3. Ventana para ejecutar las unidades internacionales

5.2.3 Creación del proyecto

En este paso proceda a crear el proyecto de tal manera que se guarde en una ubicación segura dentro del ordenador:

- ✓ Ingrese al programa HEC-RAS, dé clic en *File* y luego en *New Project* (Figura 4)



Figura 4. Ventana para la creación del nuevo proyecto

- ✓ Seleccione *File* y luego *New Project* (Figura 5)

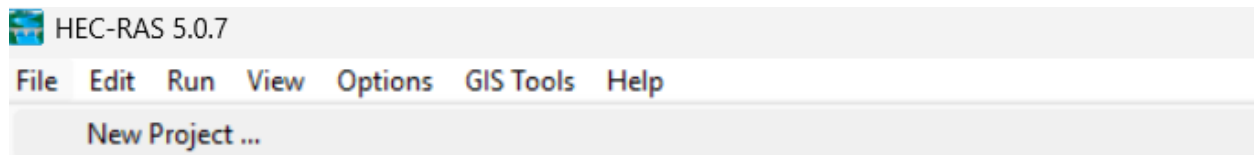


Figura 5. Ventana para empezar el nuevo proyecto

- ✓ Dé clic en el botón *Default Project Folder*, y luego de esto dé clic en el botón *Create Folder* (Figura 6)

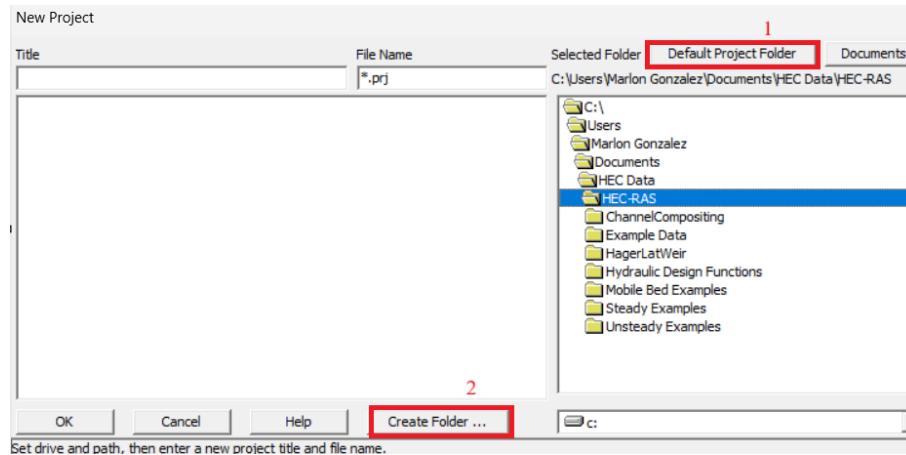


Figura 6. Ventana de creación de un nuevo proyecto

- ✓ En la ventana emergente coloque el nombre de la carpeta *Simulación FGV* (Figura 7)

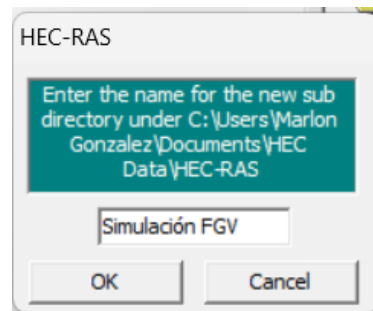


Figura 7. Ventana para nombrar la nueva carpeta

- ✓ Dé clic en “OK”. La nueva carpeta se muestra en la ruta seleccionada (Figura 8)

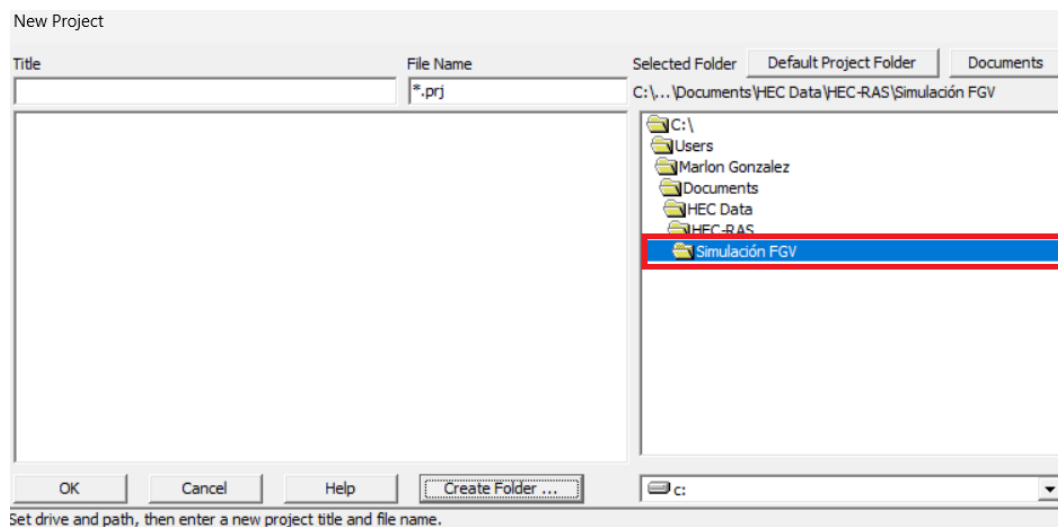


Figura 8. Ventana del proyecto con una nueva carpeta asignada

- ✓ Ingrese el nombre del proyecto “*Práctica_6*” en el campo *Title*. Acepte la asignación del nombre presionando la tecla “OK” (Figura 9)

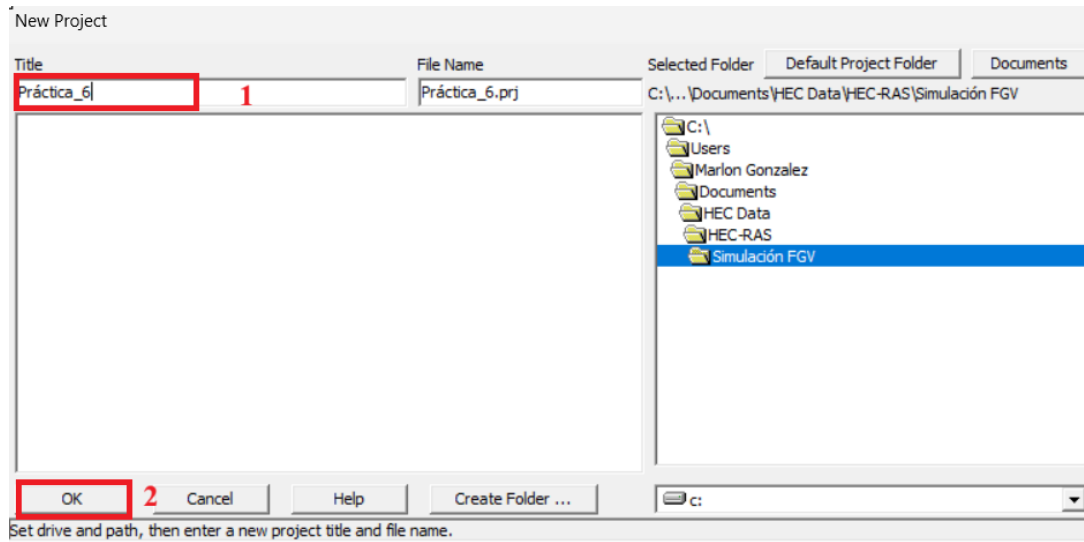


Figura 9. Ventana del nombre para guardar el proyecto

- ✓ La ventana emergente busca confirmar la creación del proyecto en la ruta seleccionada. Si está de acuerdo, seleccione “Aceptar” (Figura 10)

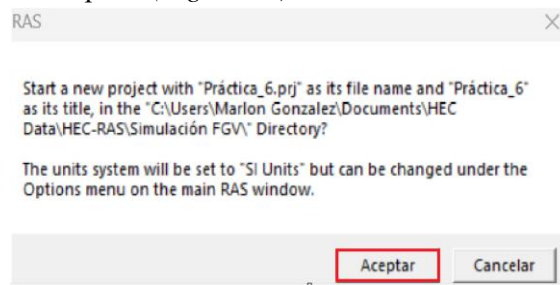


Figura 10. Ventana de carpeta final de destino

5.2.4 Datos geométricos

Creación de la secciones transversales:

- ✓ **Primera sección transversal**
- ✓ Clic en el icono *View/Edit geometric data* que se detalla en la (Figura 11)

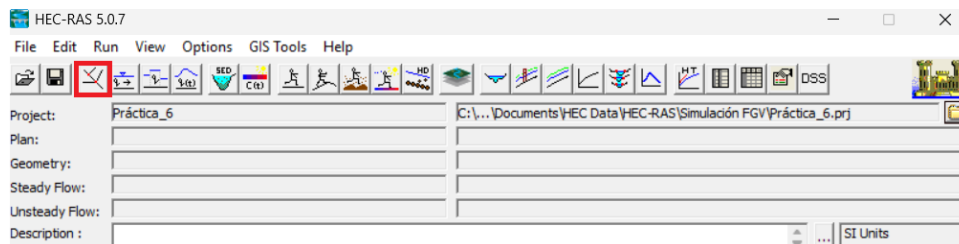


Figura 11. View/ Edit geometric data

- ✓ Se abrirá la siguiente ventana (Figura 12)

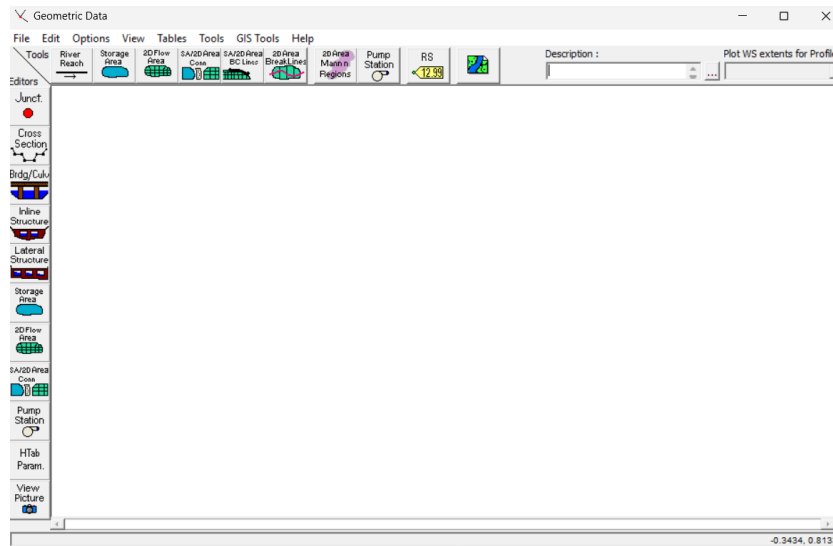


Figura 12. Ventana de Geometric Data

- ✓ Dé clic en el icono de *River Reach* (Figura 13) y el puntero del ratón se convertirá en un lápiz de tal manera que permitirá dibujar en la ventana de datos geométricos



Figura 13.Opción River Reach

- ✓ Dibujar desde aguas arriba hasta aguas abajo (Figura 14)

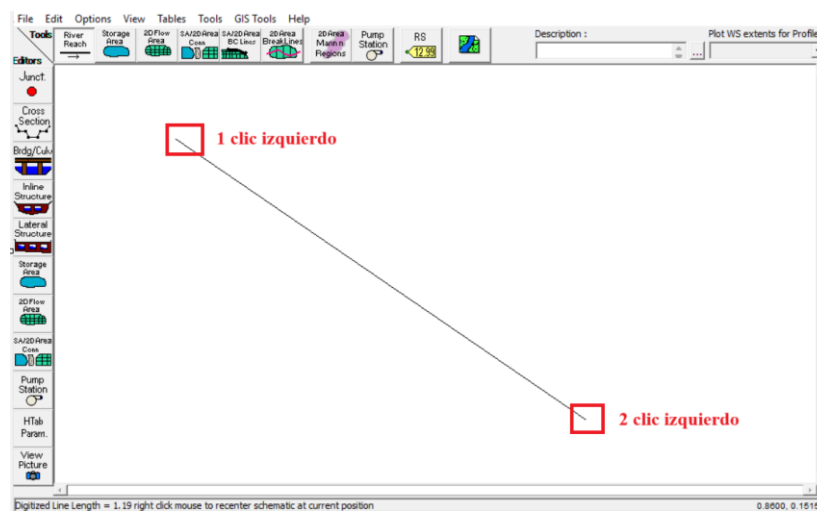


Figura 14.Ventana para dibujar la situación

- ✓ Al hacer doble clic izquierdo en la parte inferior derecha, aparecerá una ventana en la cual se nombrará el río y el alcance a analizar. En *River* coloque el nombre de *Canal lateral derecho* y su longitud (*CLD 35+650*) y en *Reach* coloque el alcance de *2km* (Figura 15)

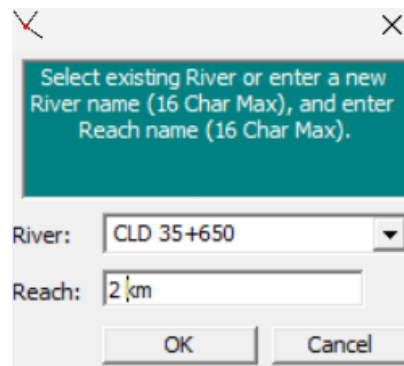


Figura 15. Ventana para nombrar el canal y su particularidad

- ✓ Obtendrá el siguiente resultado (Figura 16):

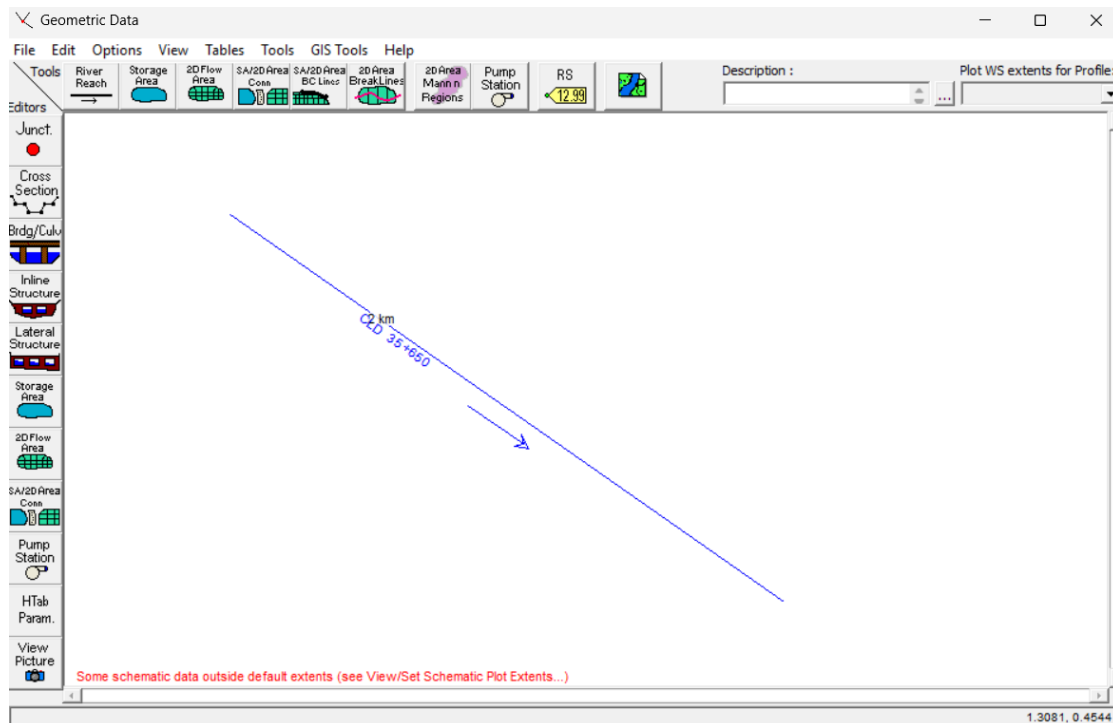


Figura 16. Ventana de creación del canal

- ✓ Pasaremos a ubicar las secciones en el canal, dar clic en *Cross Section* en HEC-RAS (Figura 17)

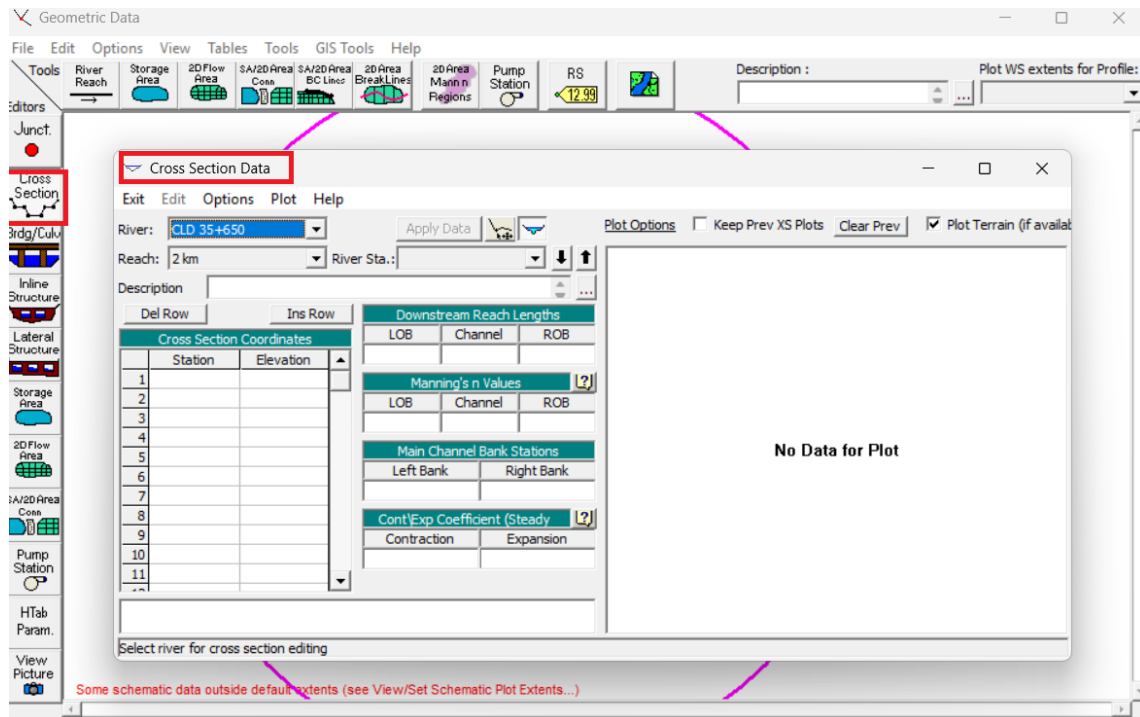


Figura 17. Opción de Cross section

- ✓ Guiándonos de la (Figura 1) se proceden a poner las coordenadas de la sección transversal, para cada tramo de los 2km, para esto en la misma ventana de *Cross Section Data* damos clic en *Options* y posteriormente en *Add a new Cross Section*(Figura 18)

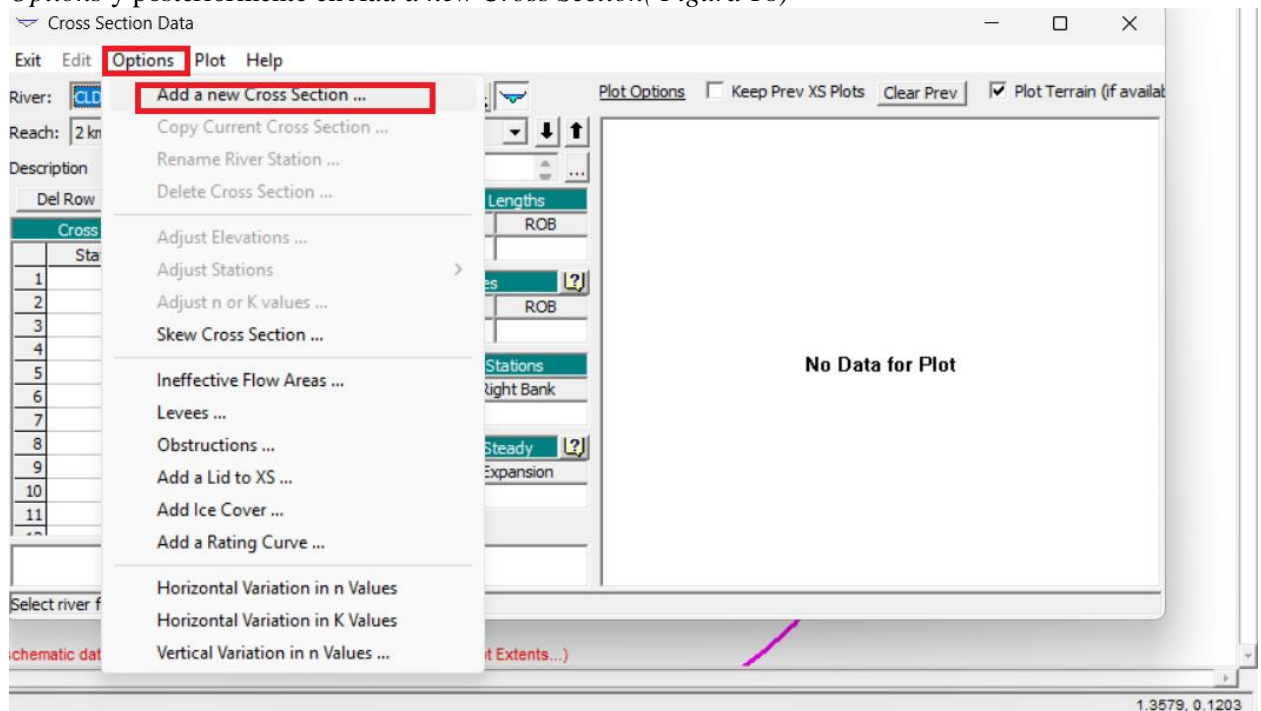


Figura 18. Ventana para añadir sección transversal

- ✓ Se abrirá una nueva ventana emergente la cual solicita un indicativo para esta nueva sección transversal, en esta ventana coloque el número 0000 ya que vamos a crear la primera sección en el km 0+000 (Figura 19) le damos en OK y luego nos arroja nuevamente la ventana de Cross section data y en la opción de Description escriba 0+000 para poner la nomenclatura correcta del kilómetro (Figura 20)

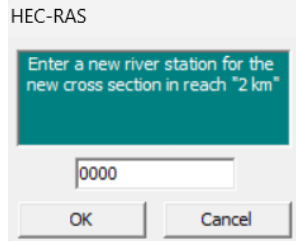


Figura 19. Ventana para añadir el kilómetro

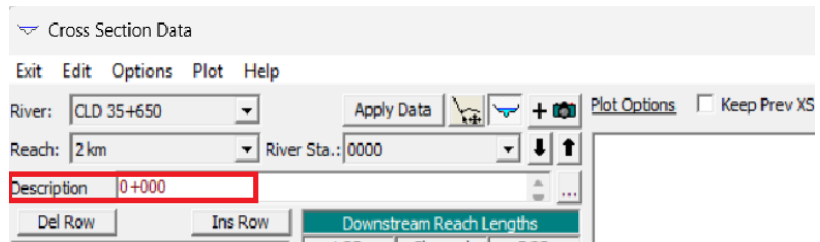


Figura 20. Ventana de la descripción

- ✓ En la misma ventana de Cross Section Data hay una opción que se llama Manning's n Values en LOB, Channel y ROB ponga 0.014 en todas y luego de clic en Apply Data (Figura 21)

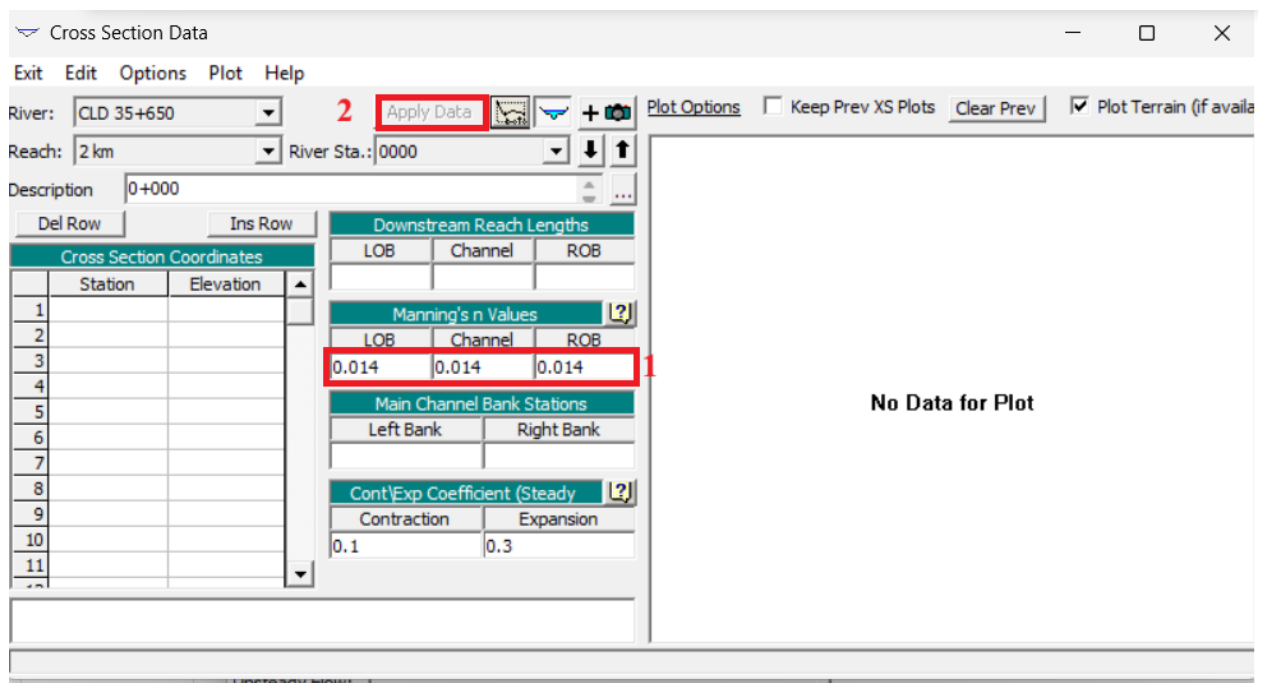


Figura 21. Opción para poner el coeficiente de Manning

- ✓ Ahora si ingresaremos las coordenadas de nuestro canal trapezoidal mirando la Figura 1 de izquierda a derecha punto por punto y se pone esa información en Cross Section Coordinates posterior a eso le damos en Apply Data (Figura 22)

Cross Section Data

Exit Edit Options Plot Help

River: CLD 35+650 2 Apply Data Plot Options Keep Prev XS Plots Clear Prev Plot Terrain (if avail)

Reach: 2 km River Sta.: 0000

Description 0+000

Del Row	Ins Row	Station	Elevation
1	0	0	51.5
2	0.2	0.2	51.5
3	2.9	2.9	49.7
4	4.4	4.4	49.7
5	7.1	7.1	51.5
6	7.3	7.3	51.5
7			
8			
9			
10			
11			

Downstream Reach Lengths		
LOB	Channel	ROB

Manning's n Values		
LOB	Channel	ROB
0.014	0.014	0.014

Main Channel Bank Stations	
Left Bank	Right Bank

Cont'Exp Coefficient (Steady)	
Contraction	Expansion
0.1	0.3

Edit Station Elevation Data (m)

Figura 22. Ventana para añadir las coordenadas de la sección transversal

- ✓ En *Downstream Reach Lengths*, que hace referencia a las longitudes aguas abajo del siguiente alcance que tienen, en este caso como es el 0+000 la longitud que hay es 0 porque es la longitud inicial entonces en *LOB*, *Channel* y *ROB* ponga 0; posterior a eso, en la opción *Main channel Bank Stations*, en *left bank* ponga 0.2 que corresponde a la coordenada de la corona inicial y en *Right Bank* escriba 7.1 que corresponde al final de la corona y finalmente de clic en *Apply Data* (Figura 23)

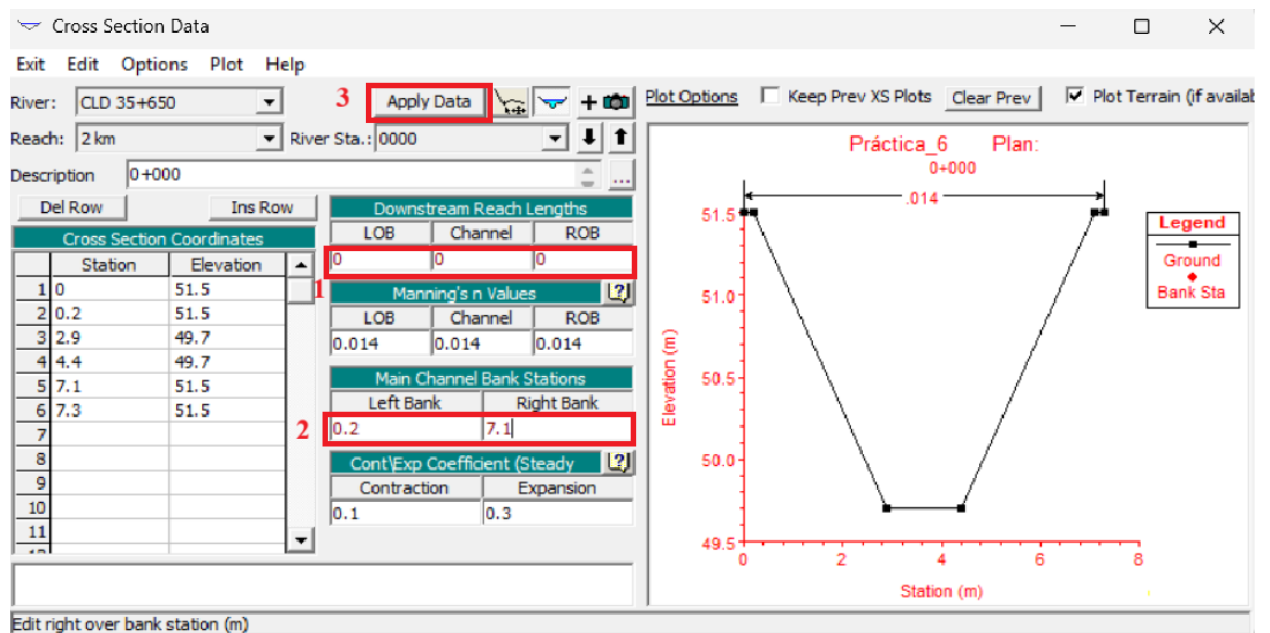


Figura 23. Ventana para guardar la sección a 0km

✓ **Segunda sección transversal**

- ✓ Ahora vamos a duplicar la sección transversal para hacer la sección a un 1km, para esto en la ventana de *Cross Section Data* le damos en *Options* y luego en *Copy Current Cross Section* (Figura 24)

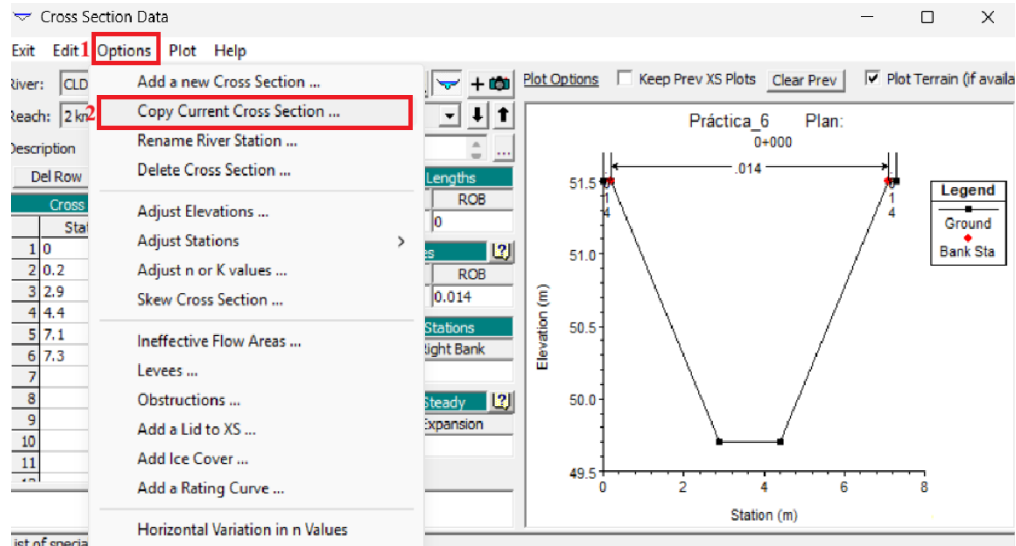


Figura 24. Ventana para añadir la sección a 1km

- ✓ En la ventana *Copy Cross Section* en *River Sta* escriba 1000 que corresponde al kilómetro a añadir y dele en *OK* (Figura 25)

The screenshot shows the 'Copy Cross Section' dialog box. It prompts the user to 'Select a River and Reach and then enter a new river station.' The 'River' is set to 'CLD 35+650', the 'Reach' is '2 km', and the 'River Sta' is '1000'.

Figura 25. Ventana para copiar la sección a 1km

- ✓ En *Description* escriba 1+000 y de clic en *Apply Data* para guardar (Figura 26)

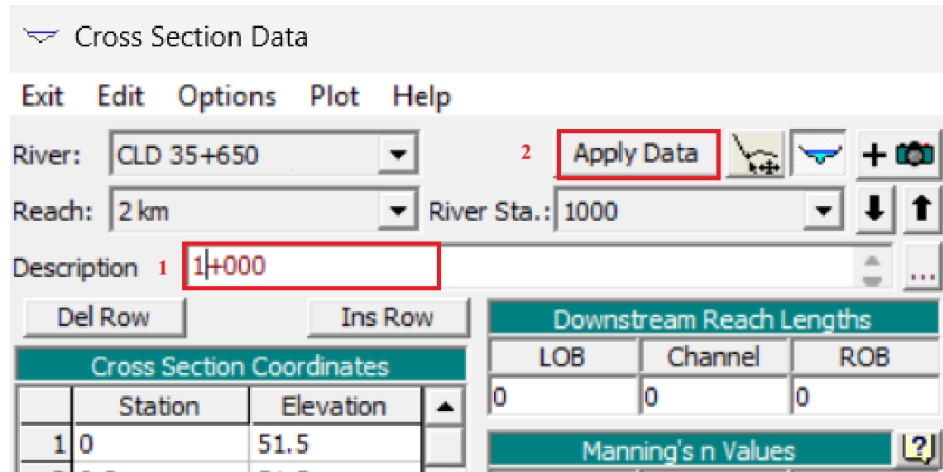


Figura 26. Ventana para especificar el kilómetro de la nueva sección

- ✓ Para añadir la elevación de la nueva sección en el km 1+000 seleccione *Options* y luego *Adjust Elevations* (Figura 27)

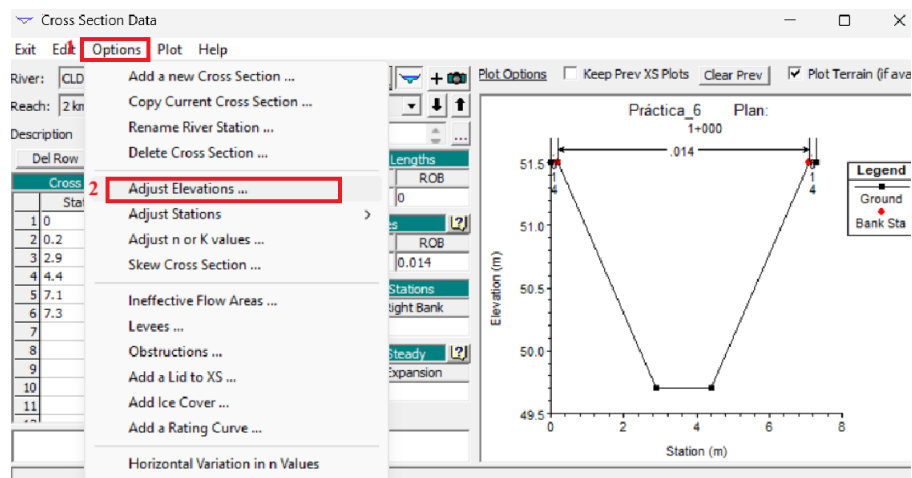


Figura 27. Ventana para añadir la elevación

- ✓ En la siguiente ventana escriba la diferencia de nivel la cual es 0.3m y dele en *OK* (Figura 28)

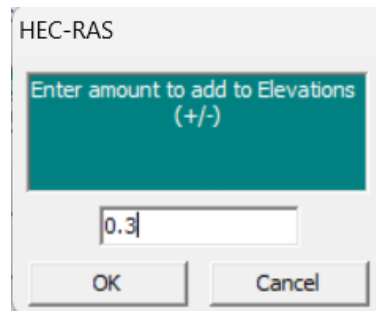


Figura 28. Ventana para añadir la diferencia de nivel

- ✓ Se puede observar que la elevación de cada coordenada cambió, posterior a eso en la opción *Downstream Reach Lengths* en *LOB*, *Channel* y *ROB* escriba 1000m, que corresponde al kilómetro a modificar y finalmente dele clic en *Apply Data* (Figura 29)

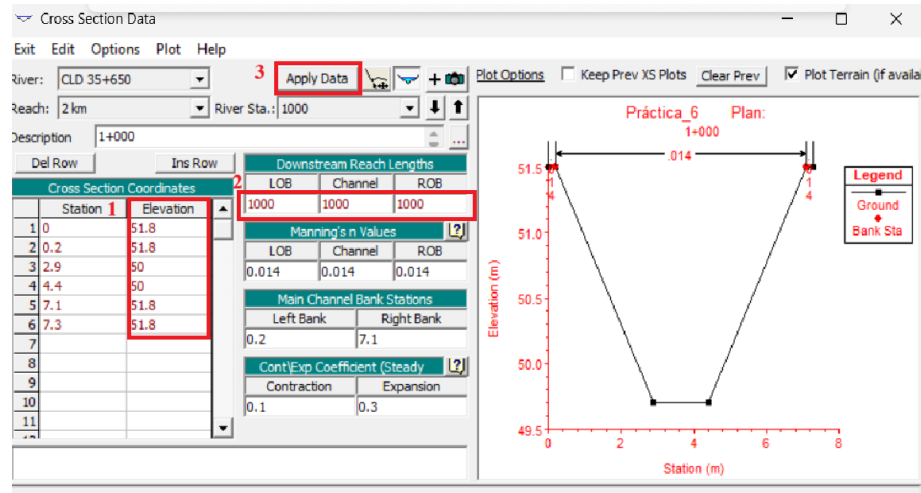


Figura 29. Ventana para guardar la sección a 1km

✓ Tercera sección transversal

- ✓ Falta crear la ultima sección a 2km, para esto le damos clic en *Options* y luego en *Copy Current Cross Section* (Figura 30)

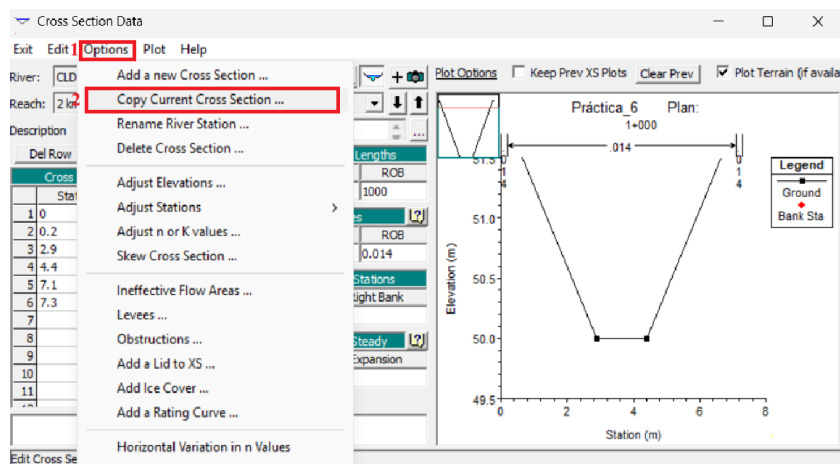


Figura 30. Ventana para copiar la sección a 2km

- ✓ En la ventana *Copy Cross Section* en *River Sta* escriba 2000 que corresponde al kilometro a añadir y dele en *OK* (Figura 31)

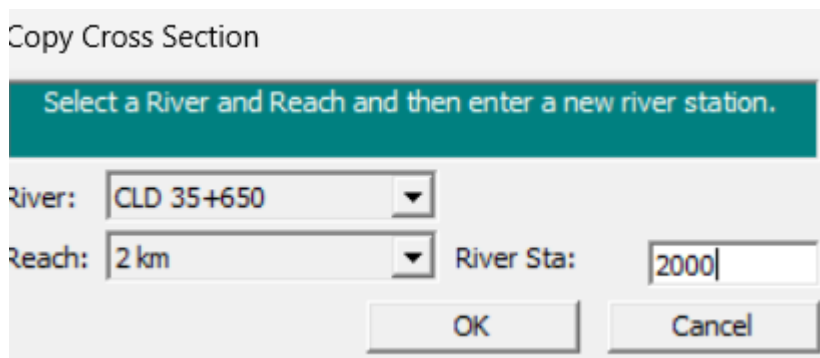


Figura 31. Ventana para copiar la sección a 2km

- ✓ En *Description* escriba 2+000 y de clic en *Apply Data* para guardar (Figura 32)

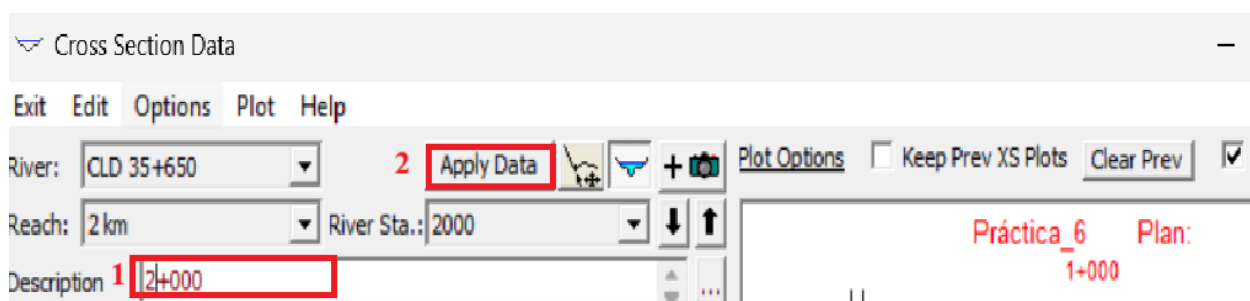


Figura 32. Ventana para especificar el kilómetro de la nueva sección

- ✓ Para añadir la elevación de la nueva sección en el km 1+000 seleccione *Options* y luego *Adjust Elevations* (Figura 33)

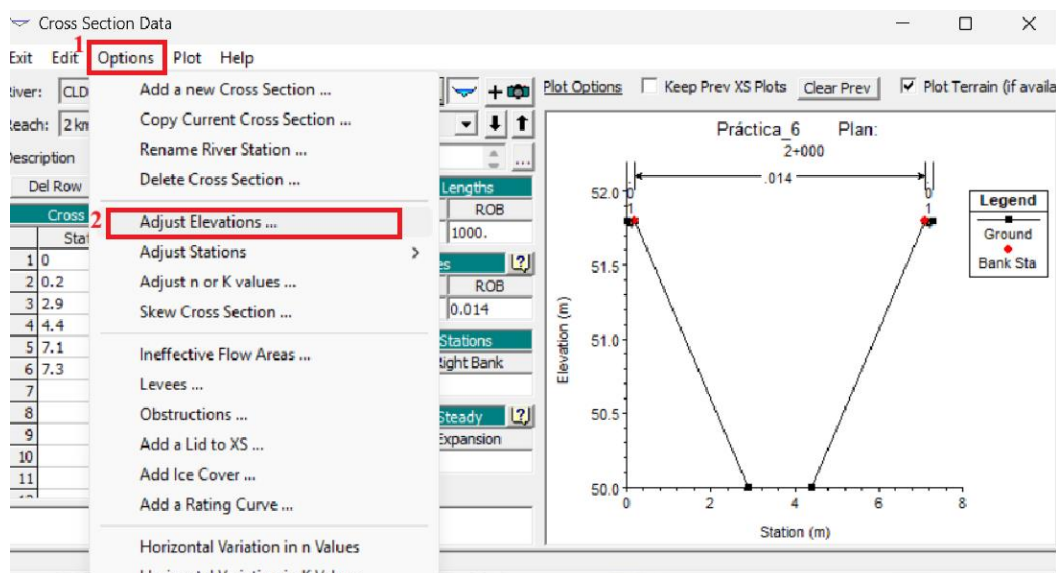


Figura 33. Ventana para añadir la elevación

- ✓ En la siguiente ventana escriba la diferencia de nivel la cual es 0.5m dele en *OK* (Figura 34)

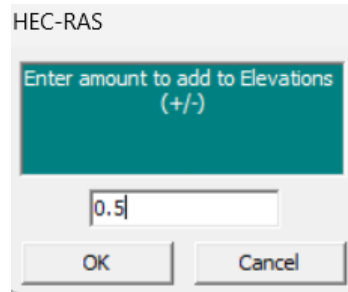


Figura 34. Ventana para añadir la diferencia de nivel

- ✓ Se puede observar que la elevación de cada coordenada cambió, finalmente dele clic en *Apply Data* (Figura 35)

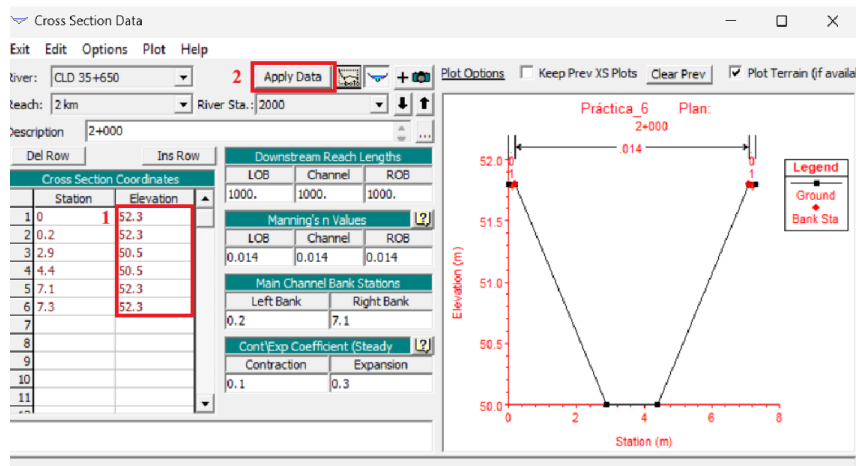


Figura 35. Ventana para guardar la sección a 2km

- ✓ Después de eso se puede cerrar la ventana *Cross Section Data* y se puede observar que en la ventana *Geometric Data* quedó guardado el canal con la longitud de 2km (Figura 36)

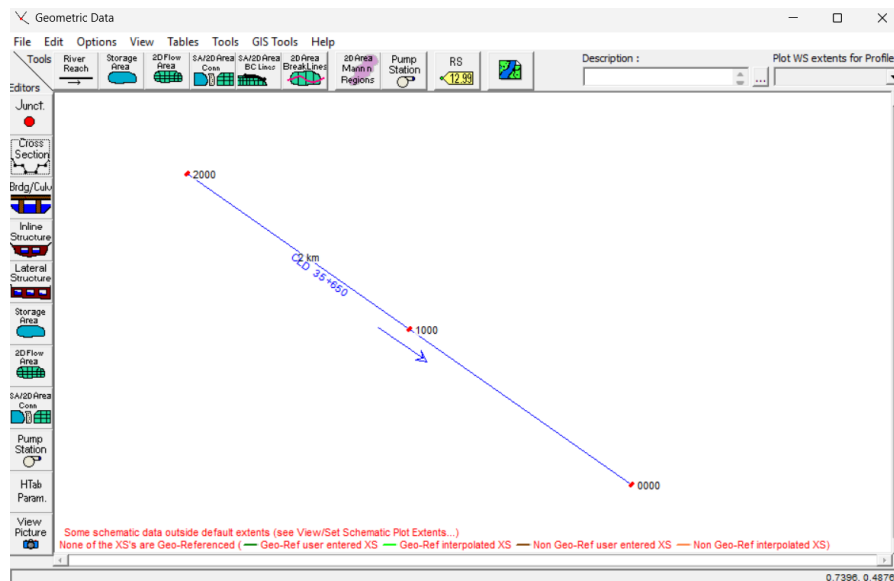


Figura 36. Canal de 2km

- ✓ En esa venta dele clic en *File* y luego en *Save Geometry Data As* (Figura 37) y en la siguiente ventana en *Title* escriba *Secciones transversales* y dele en *OK* (Figura 38)

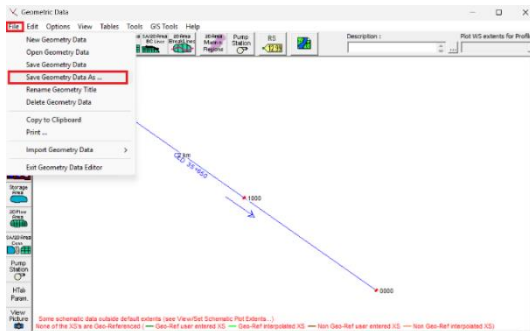


Figura 37. Ventana para ir a guardar las secciones

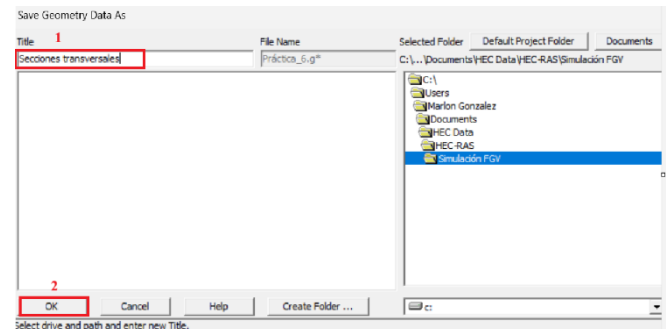


Figura 38. Ventana para guardar las secciones

5.2.5 Datos del flujo

- ✓ Vamos a definir los valores del gasto, la pendiente y el tipo de flujo que se está presentando en el problema planteado para esto damos clic en *Steady Flow Data* (Figura 39)

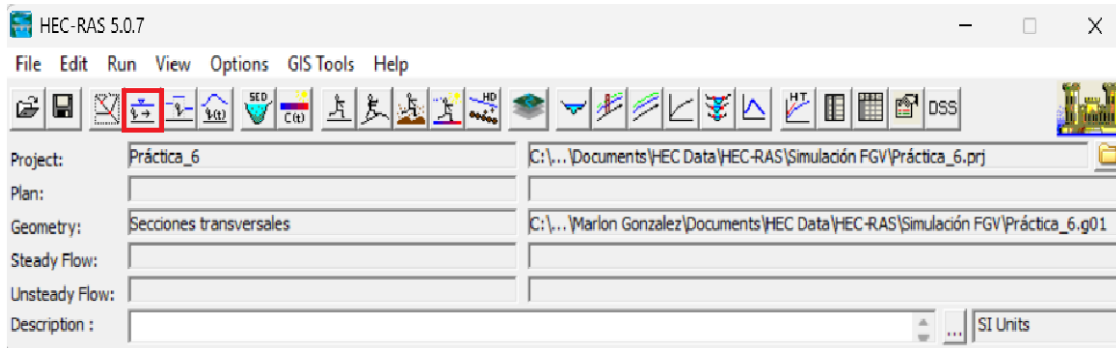


Figura 39. Herramienta para definir las propiedades hidráulicas

- ✓ Vamos a identificar el perfil y/o situación que vamos a trabajar nosotros para esto de clic en *Options* y luego en *Edit Profile Names* (Figura 40) y en la ventana que se nos abre, en la opción *Profile Name* ponga *Perfil-01* y dele en *OK* (Figura 41)

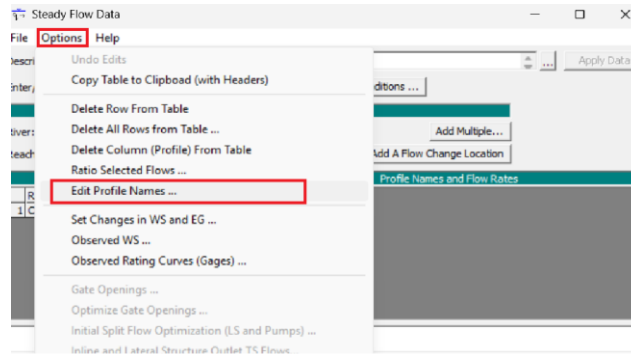


Figura 40. Herramienta para dar nombre al perfil

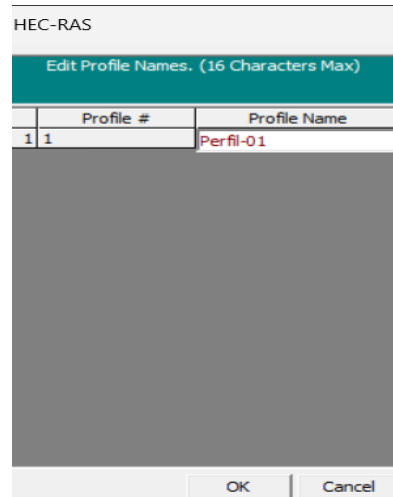


Figura 41. Ventana para editar el nombre

- ✓ Vamos a definir las condiciones del flujo para esto de clic en *Reach Boundary Conditions* (Figura 42)

Figura 42. Opción para modificar el flujo

- ✓ Como se trata de un **flujo permanente gradualmente variado (FGV)** y se pretende comprobar el comportamiento en régimen subcrítico, pero teniendo en cuenta que el problema nos da valores de la pendiente para un tramo y para otro tramo entonces seleccione *Upstream* y luego *Normal Depth* con el fin de poner la pendiente del primer tramo desde K0+000 hasta K1+000 (Figura 43)

Figura 43. Ventana para añadir la pendiente del primer tramo

- ✓ En la ventana que se abre, de acuerdo con la Tabla 1 el valor de la primera pendiente es 0.0005, escríbelo y dele en OK (Figura 44)

HEC-RAS

Enter the upstream slope for normal depth computation for reach: 2 km for all profiles.

0.0005

OK Cancel

Figura 44. Ventana para añadir pendiente

- ✓ Hacemos lo mismo de la figura 43 pero con la excepción de que primero se escoge la sección *Downstream* para añadir la pendiente del otro tramo (Figura 45)

Steady Flow Boundary Conditions

☒ Set boundary for all profiles ☐ Set boundary for one profile at a time

Available External Boundary Condition Types

Known W.S. Critical Depth **2** Normal Depth Rating Curve Delete

Selected Boundary Condition Locations and Types

River	Reach	Profile	Upstream	Downstream
CLD 35+650	2 km	all	Normal Depth S = 0.0005 1	

Steady Flow Reach-Storage Area Optimization ...

OK Cancel Help

Select Boundary condition for the downstream side of selected reach.

Figura 45. Ventana para añadir la pendiente del segundo tramo

- ✓ En la ventana que se abre, de acuerdo con la Tabla 1 el valor de la segunda pendiente es 0.0003, escríbalo y dele en OK (Figura 46)

HEC-RAS

Enter the downstream slope for normal depth computation for reach: 2 km for all profiles.

0.0003

OK Cancel

Figura 46. Ventana para añadir pendiente

- ✓ Dele en Ok para guardar las condiciones de contorno (Figura 47)

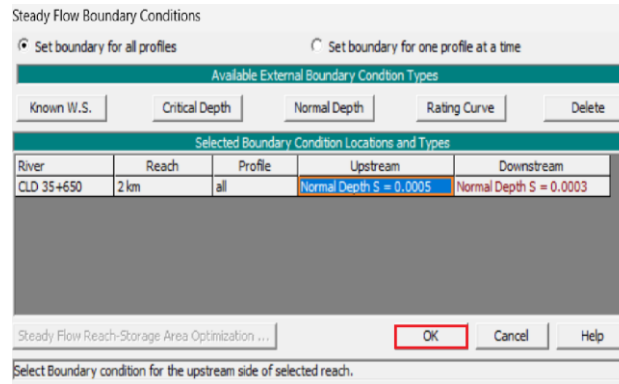


Figura 47. Ventana de condiciones de contorno

- ✓ En *Perfil-01* escriba 7.312 que corresponde al caudal a los 2km y luego de clic en *Apply Data*, finalmente de clic en *Add Multiple* para configurar el caudal en los dos tramos (Figura 48)

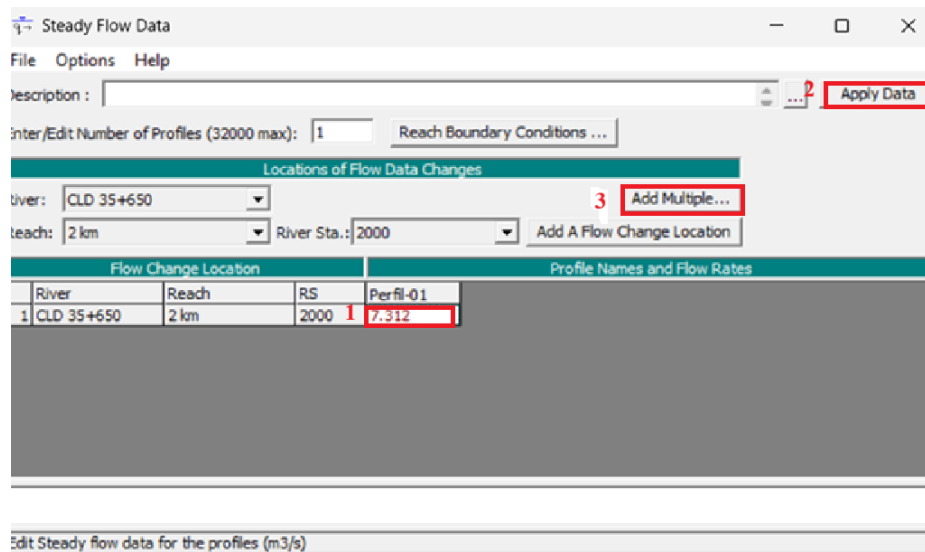


Figura 48. Ventana para añadir el caudal

- ✓ Se abrirá la ventana *Steady Flow Locations*, en *RS:*, seleccione 1000 y de clic en la flecha (Figura 49), repita el proceso, pero con la de 2000 y de clic en *OK* para guardar todo (Figura 50)

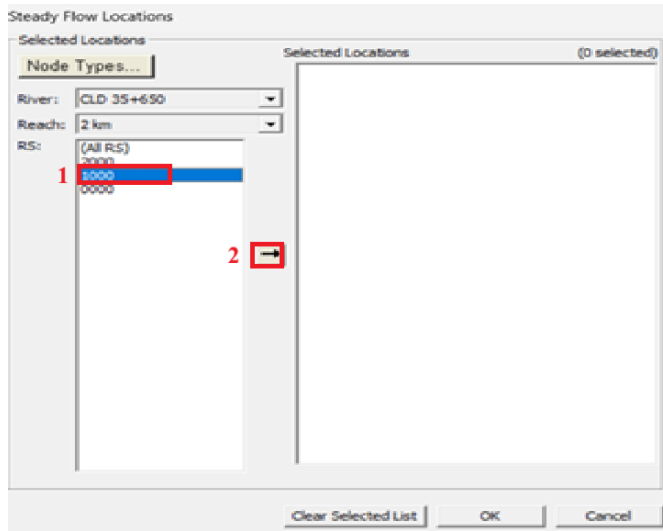


Figura 50. Ventana para seleccionar la localización de 1000

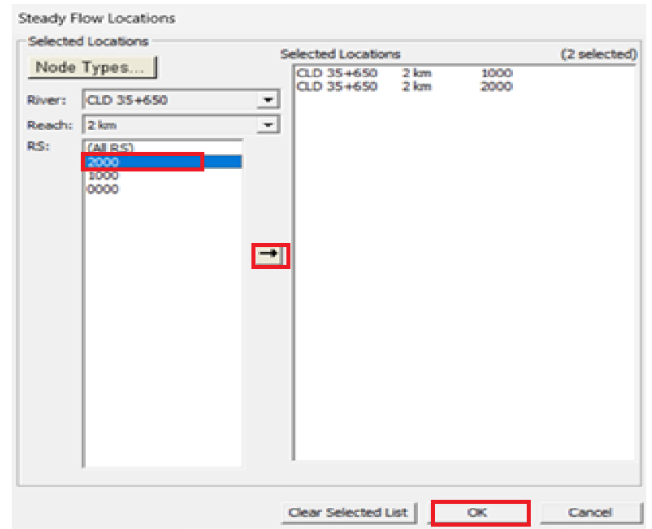


Figura 49. Ventana para añadir la localización de 2000 y guardar todo

- ✓ En Perfil-01 escriba 7.312 en las dos y dele Apply Data para guardar (Figura 51)

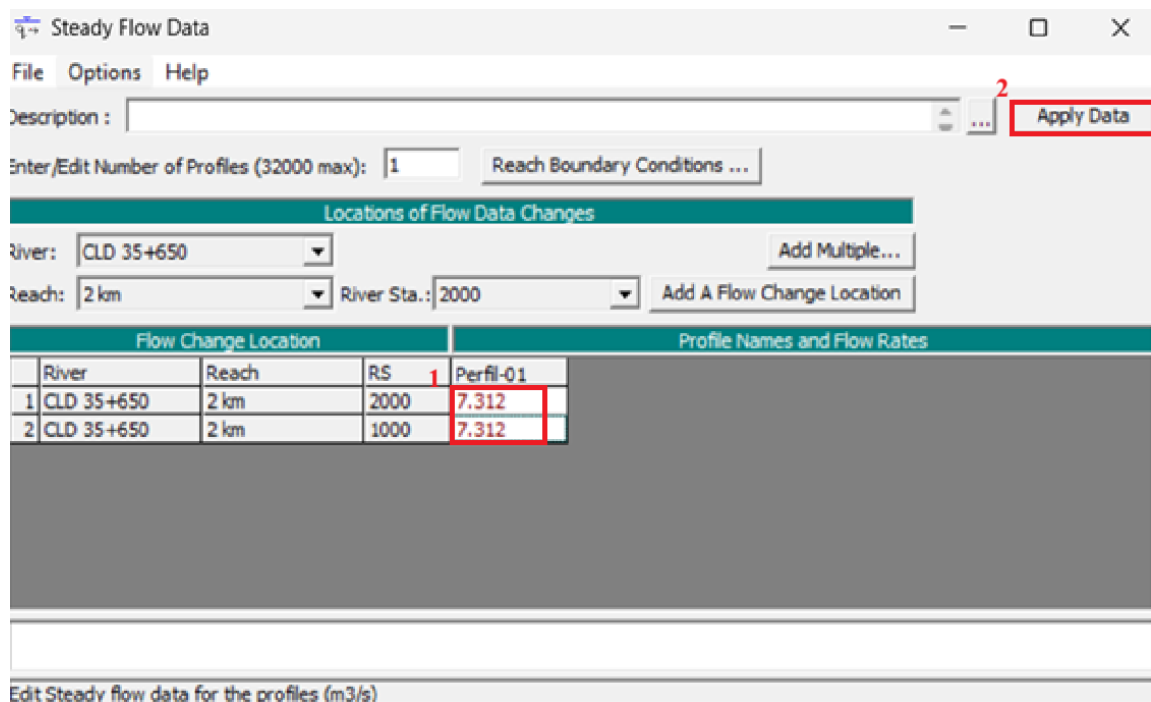


Figura 51. Ventana para añadir el caudal

- ✓ Lo siguiente en hacer es guardar las condiciones del flujo, para esto damos clic en File luego en Save Flow Data (Figura 52)

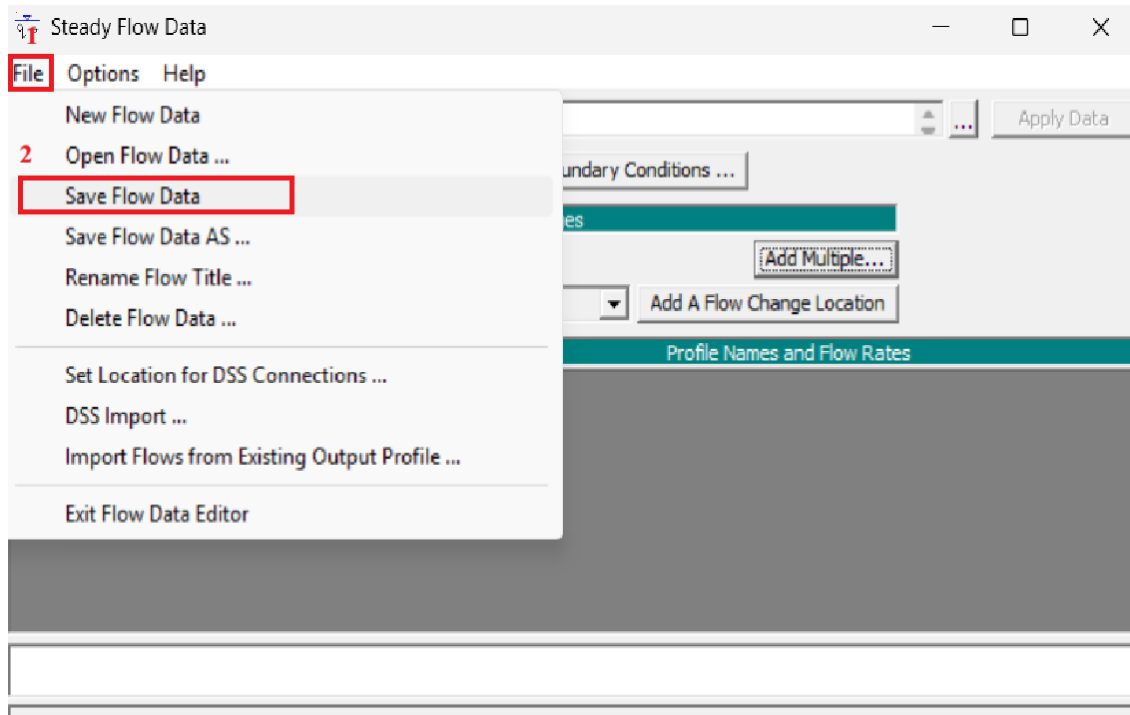


Figura 52. Ventana para guardar las condiciones de flujo

- ✓ En title poner *FLOW_canal* y darle en OK (Figura 53)

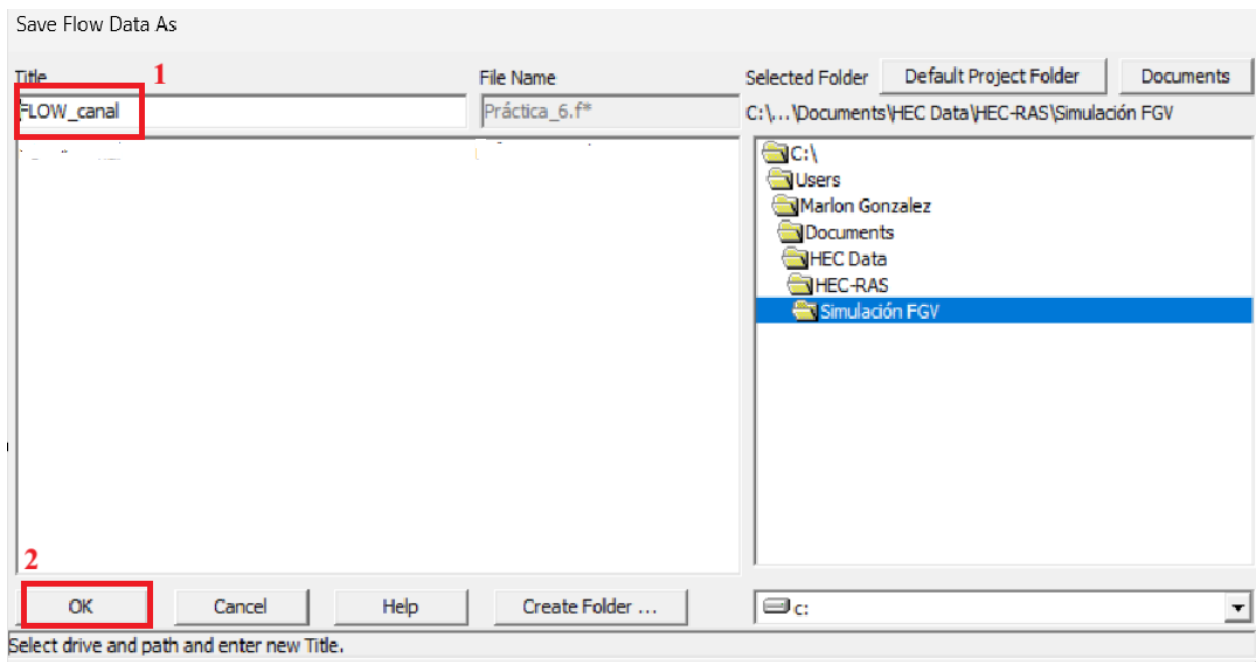


Figura 53. Ventana para poner el nombre de las condiciones de contorno (flujo)

- ✓ Finalmente en *Description* ponga el nombre de: *Datos del gasto y pendiente hidráulica*, le da en *Apply Data* para guardar y finalmente le da en la *X* para cerrar (Figura 54)

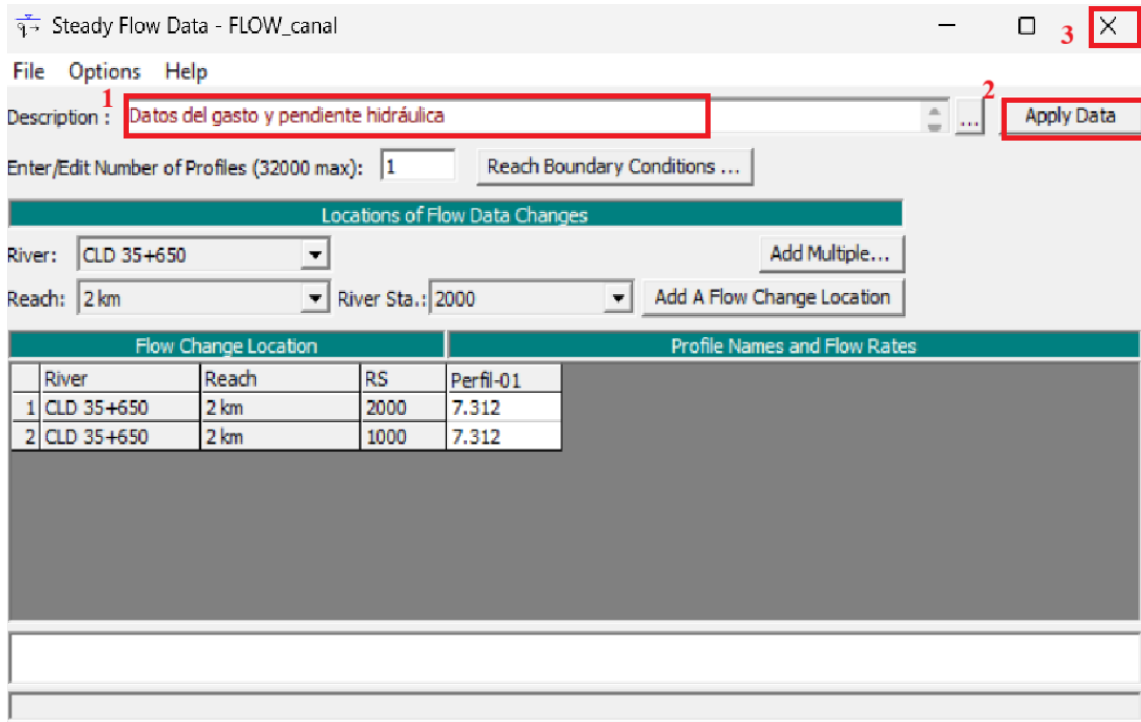


Figura 54. Ventana para añadir la descripción

5.2.6 Plan de simulación

Para ejecutar la simulación se sabe que es un flujo mixto y se hace así:

- ✓ Haga clic en el icono de *Perform a Steady Flow Simulation* (Figura 55)

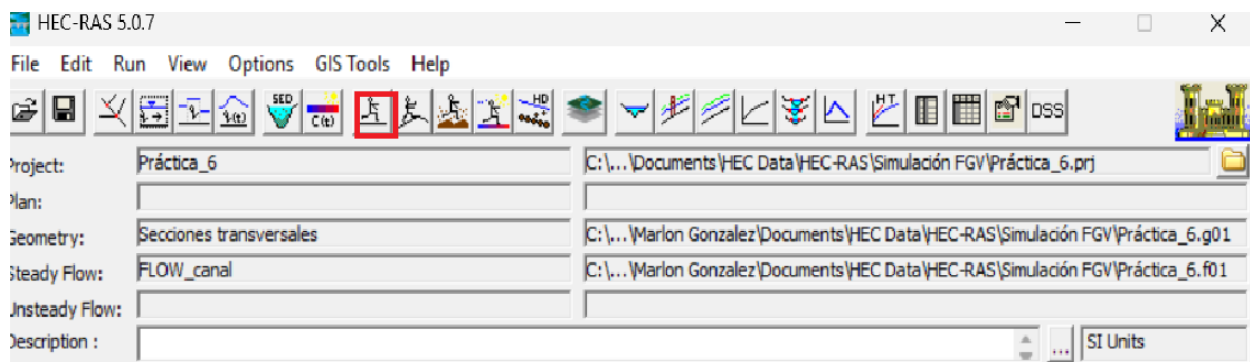


Figura 55. Ventana principal y el símbolo de Perform a Steady Flow Simulation

- ✓ En la ventana que se abre, seleccione *Mixed* y en Short ID escriba *01* (Figura 56)

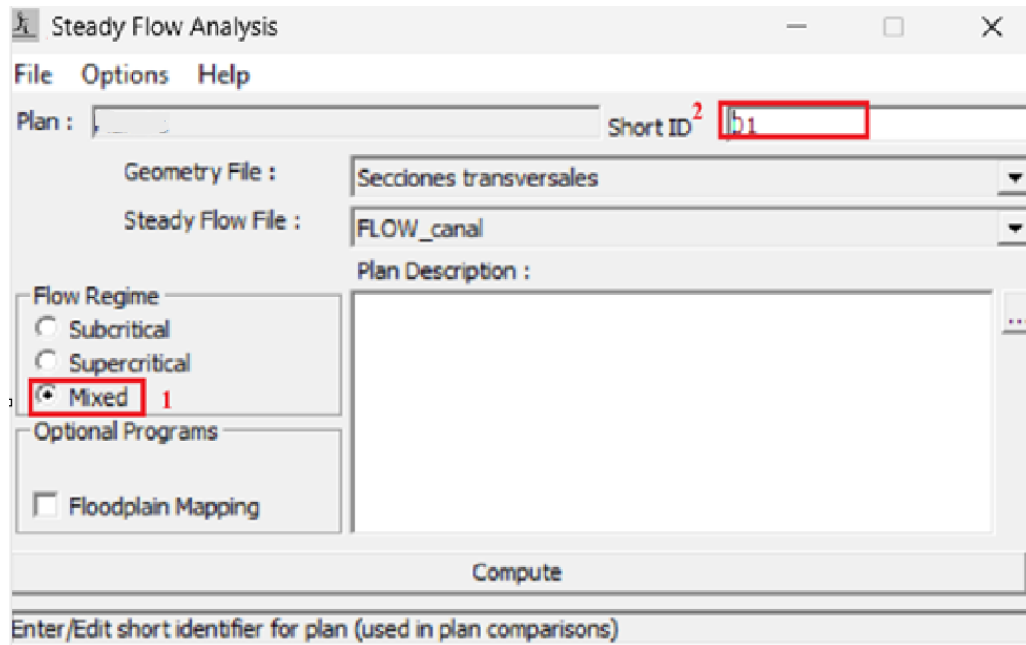


Figura 56. Ventana de flujo permanente con régimen mixto

- ✓ Luego haga clic en *File* y *Save Plan As* (Figura 57). Ingrese el nombre del plan “Plan_canal” para luego hacer clic en “Ok” (Figura 58). En la ventana emergente que se muestra haga clic en “Ok” (Figura 59)

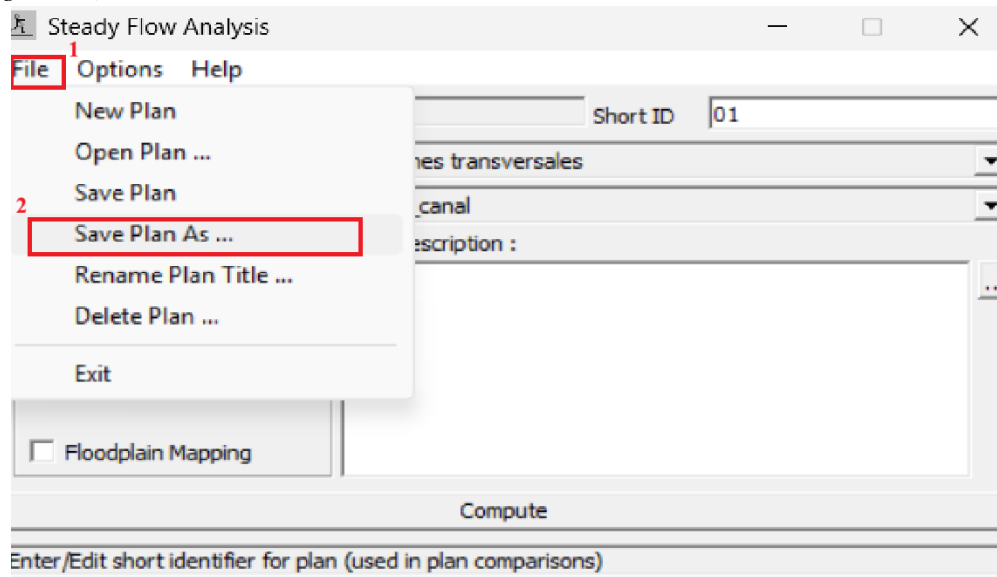


Figura 57. Ventana para el guardado del plan de análisis en flujo permanente

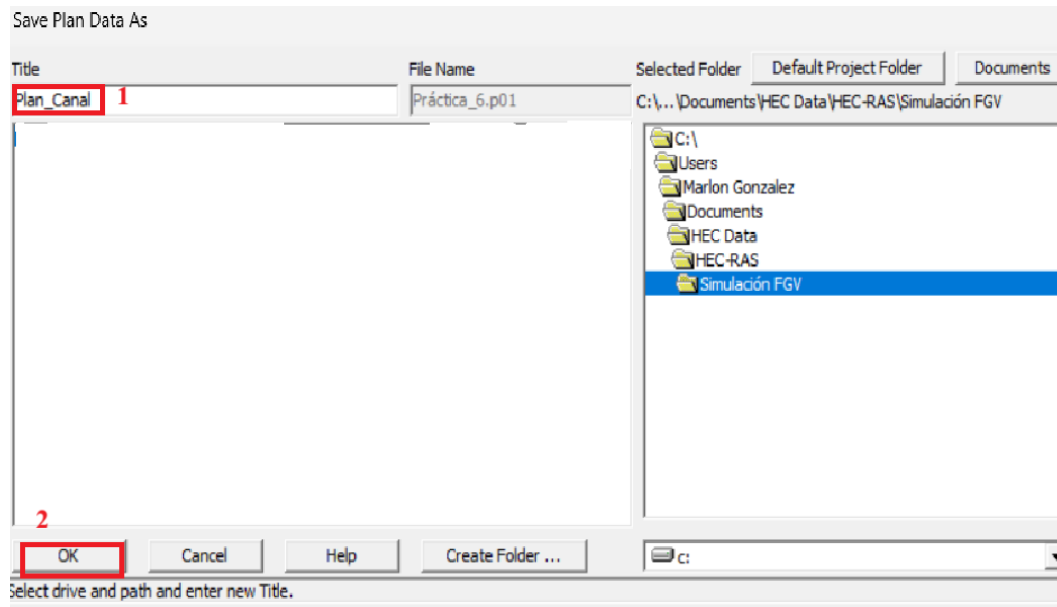


Figura 58. Ventana del guardado del plan de análisis para flujo permanente

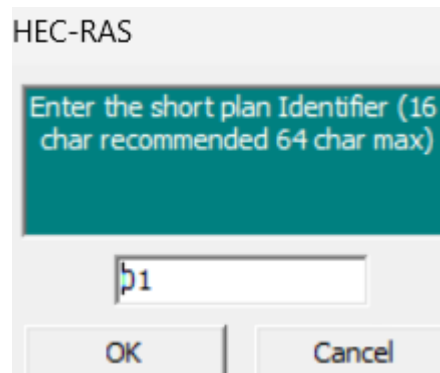


Figura 59. Ventana para el indicativo del plan a realizar

- ✓ Deberá regresar a la ventana mostrada en la (Figura 60) y dele en *Compute*

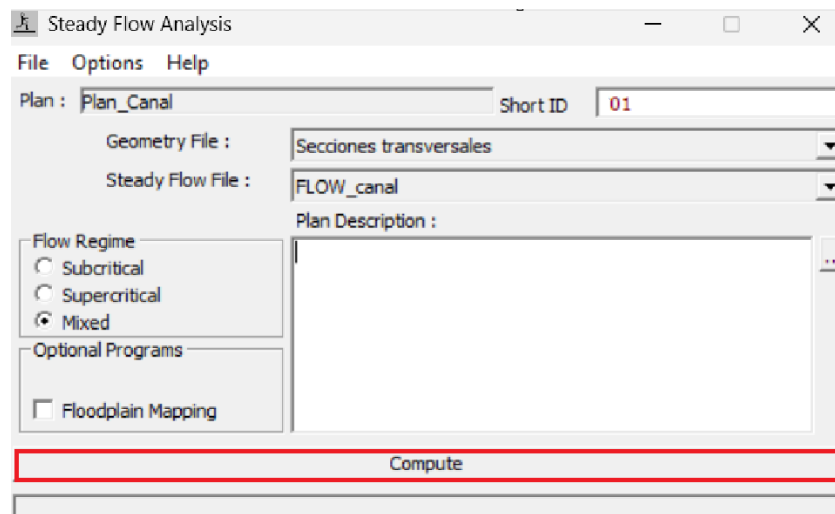


Figura 60. Ventana para correr la simulación

- ✓ Finalmente aparecerá un recuadro donde se evidenciará el avance de la simulación. Al finalizar el proceso haga clic en el icono de *Close* (Figura 61)

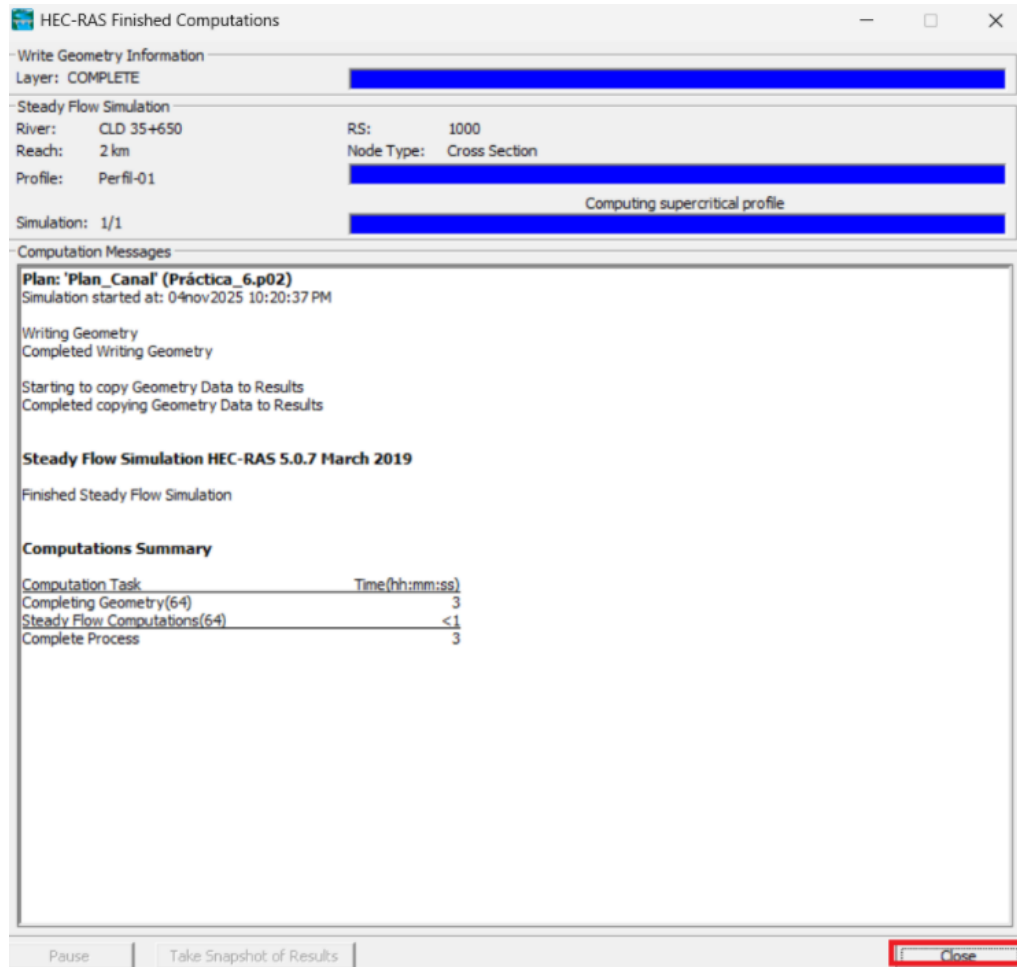


Figura 61. Ventana de computación de la simulación

Nota: Si desea realizar modificaciones en las condiciones de la simulación, solo debe cambiar los datos que desee editar (*geometría, flujo, condiciones de frontera, etc.*) ejecutando el paso a paso que se ha seguido, pero para la situación específica que desea ejecutar, guardar esos datos y luego computar nuevamente el proyecto.

5.2.7 Presentación de resultados

Para conocer los resultados de la simulación, desarrolle el siguiente procedimiento:

- ✓ Regrese a la ventana inicial de HEC-RAS (Figura 62) y proceda a ubicar las diferentes herramientas que tiene para la visualización de resultados (Figura 63)

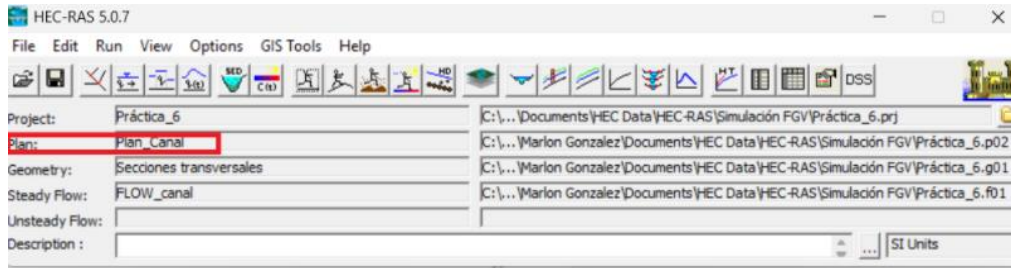


Figura 62. Ventana de HEC-RAS con los datos del plan de simulación añadidos



Figura 63. Iconos de los comandos principales de HEC-RAS

✓ Resultados de las secciones transversales (Figura 64)



Figura 64. Secciones transversales

✓ Resultados del perfil longitudinal (Figura 65)



Figura 65. Perfil longitudinal

✓ Resultados de la vista 3D del canal (Figura 66)



Figura 66. Vista 3D

✓ Tabla resumen de los resultados (Figura 67)



Figura 67. Tabla Resumen

Importante:

- Con el ánimo de no extender tanto este documento, la explicación de cómo obtener y

visualizar los resultados se explicará a detalle en el video que enmarca el proceso realizado en esta guía.

- Asimismo, al finalizar el video de la simulación se incluye una breve explicación sobre el procedimiento de interpolación en las secciones transversales, con el fin de obtener resultados más precisos. Se destaca la relevancia de aplicar esta interpolación para poder resolver adecuadamente las preguntas de análisis

5.2.8 Guardado final del proyecto

- ✓ Finalmente, para guardar todo el proyecto y demás componentes de este, dé clic en *File>Save Project* (Figura 68)

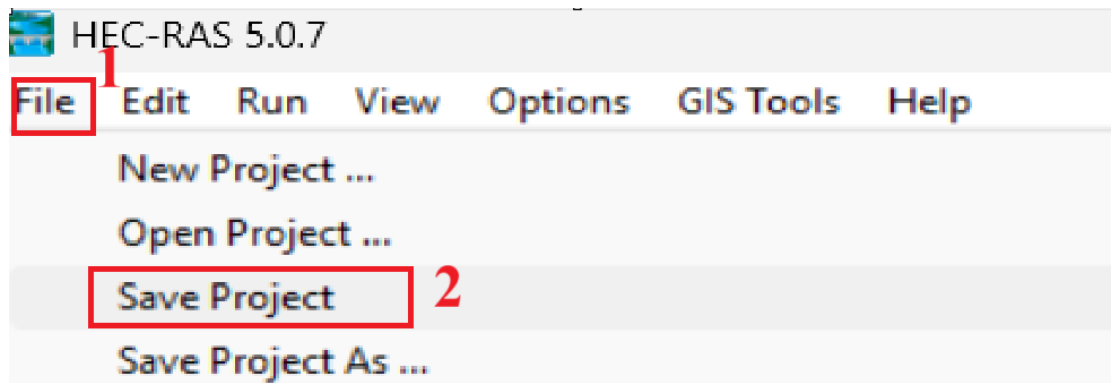


Figura 68. Guardado final del proyecto en HEC-RAS

5.3 Video de la simulación

A continuación, se presentará el enlace del video que hace referencia a la simulación número seis presentada en este documento. Este video hace parte de una serie de tutoriales que apoyan al usuario en el manejo del programa computacional abordado en cada una de las simulaciones.

- ✓ Enlace del video: <https://youtu.be/B43kqLnghs8>

6. Descripción del entregable

6.1 Entregables de la simulación inicial

El estudiante deberá entregar **un informe en formato PDF**, que incluya **capturas de pantalla completas** (de toda la pantalla del computador, no solo del programa HEC-RAS) correspondientes a cada una de las etapas del proceso de modelación hidráulica.

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)

Las evidencias mínimas por presentar son las siguientes:

- ✓ **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 69)
- ✓ Las secciones transversales finales presentadas en la (Figura 23, Figura 29 y Figura 35)
- ✓ El guardado de los datos geométricos como se muestra en la (Figura 38)
- ✓ **Configuración y guardado de las condiciones de contorno**, donde se evidencia las pendientes aguas arriba y aguas abajo, como se observa en la (Figura 47)
- ✓ **Guardado de los datos de flujo** (Figura 53)
- ✓ **Definición y guardado del plan de simulación** (Figura 58)
- ✓ **Ejecución exitosa de la simulación**, con la ventana de confirmación de cálculo completado sin errores, como la (Figura 61)
- ✓ **Resultados obtenidos del modelado hidráulico (en el video se muestra)**, incluyendo:
 - Resultados de las secciones transversales (Figura 64)
 - Perfiles longitudinales de la superficie libre y la línea de energía (Figura 65)
 - Distribución del número de Froude y la variación del tirante a lo largo del canal (en el video se indica donde obtenerlo)
 - Vista 3D del flujo para la interpretación del perfil gradualmente variado (Figura 66)

6.2 Preguntas de análisis

Responda e indague sobre lo siguiente:

1. En la simulación realizada, el número de Froude presenta valores menores a 1 en ambos tramos ($F = 0.44$ y $F = 0.36$). ¿Puede considerarse este flujo como gradualmente variado, aun cuando no existe cambio de régimen?
2. ¿Cómo afecta la variación de la pendiente del fondo (de 0.0005 a 0.0003) las propiedades hidráulicas del flujo, como la velocidad, el área y el número de Froude?
3. Analizando las líneas de energía y superficie libre, ¿qué tipo de perfil de flujo se desarrolla a lo largo del canal?
4. ¿Por qué el número de Froude es un parámetro clave para identificar el tipo de régimen y el comportamiento del flujo en la simulación?
5. Si se incrementara el coeficiente de Manning a $n = 0.025$, ¿qué efectos esperaríamos observar en la simulación sobre la velocidad, el tirante y la energía del flujo?

7. Referencias Bibliográficas

- Brunner, G. W. (2016). *HEC-RAS river analysis system: Hydraulic reference manual* (Version 5.0). U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
- Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2014). *Fluid mechanics: Fundamentals and applications* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Chanson, H. (2004). *Hydraulics of open channel flow: An introduction*. Elsevier.
- Chaudhry, M. H. (2008). *Open-channel flow* (2nd ed.). Springer.
- Chow, V. T. (1959). *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill.
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw-Hill.
- González Parra, C. G. (2021, abril 26). *Simulación de flujo estable HEC-RAS* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=FLVc4Vmntl4>
- Henderson, F. M. (1966). *Open channel flow*. Macmillan.
- Malaver Nieto, E. D. (2023). *Desarrollo de simulaciones de modelos hidráulicos como herramienta de soporte de la enseñanza del laboratorio de hidráulica* (Trabajo de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Ramamurthy, A. S. (2000). A direct integration method for computation of gradually varied flow. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27(1), 88–94. <https://doi.org/10.1139/100-049>
- Ramírez, D., & Escobar, J. (2021). *Análisis de perfiles de flujo gradualmente variado en canales trapecoidales utilizando HEC-RAS*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería Civil.
- Sturm, T. W. (2010). *Open channel hydraulics* (2nd ed.). McGraw-Hill Education.
- United States Geological Survey. (1988). *Basic hydraulic principles of open-channel flow* (Open-File Report 88-707). <https://pubs.usgs.gov/of/1988/0707/report.pdf>
- Vatankhah, A. R. (2013). Accurate gradually varied flow model for water surface profiles. *Journal of Hydrology*, 491, 186–197. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.03.024>
- Villón, M. (1995). *Hidráulica de canales*. Universidad Nacional de Ingeniería.