

**MODELACIÓN HIDRÁULICA DE LAS CONDICIONES ACTUALES DEL  
TRAMO CALAMAR SANTA LUCIA EN EL CANAL DEL DIQUE**

**CRISTIAN TORRES PINEDA**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**DIRECTOR:**

**GERMAN RICARDO SANTOS GRANADOS**

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA  
ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO AMBIENTE  
BOGOTÁ, FEBRERO DE 2015**

**MODELACIÓN HIDRÁULICA DE LAS CONDICIONES ACTUALES DEL  
TRAMO CALAMAR SANTA LUCIA EN EL CANAL DEL DIQUE**

**CRISTIAN TORRES PINEDA**

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA  
ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO AMBIENTE  
BOGOTÁ, FEBRERO DE 2015**

**Nota de aceptación**

El proyecto final titulado “MODELACIÓN HIDRÁULICA DE LAS CONDICIONES ACTUALES DEL TRAMO CALAMAR SANTA LUCIA EN EL CANAL DEL DIQUE” presentado por el ingeniero Cristian Enrique Torres Pineda en cumplimiento del requisito para optar al título de Especialista en recursos hidráulicos y medio ambiente, fue aprobado por el director del trabajo, German Santos Granados.

---

Calificación

---

German Santos Granados

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>2</b>
<b>3 METODOLOGÍA.....</b>	<b>3</b>
3.1 Requisitos de información para el modelo 1D .....	4
3.2 Bases teóricas para cálculo de flujo en una dimensión .....	7
3.2.1 Flujo Permanente .....	7
3.2.2 Flujo no Permanente .....	7
3.2.3 Transporte de Sedimentos .....	8
3.2.4 Procesos de erosión, transporte y sedimentación .....	9
3.2.5 Funciones de transporte de sedimentos .....	10
3.2.6 Definición de variables transporte de sedimentos Hec-Ras .....	15
<b>4 INFORMACIÓN GENERAL DEL ÁREA DEL PROYECTO.....</b>	<b>19</b>
4.1 Localización .....	19
4.2 Historia.....	20
4.3 Hidrología .....	21
4.3.1 Niveles.....	21
4.3.2 Caudales .....	24
4.3.3 Sedimentos .....	26
<b>5 MODELACIÓN HIDROSEDIMENTOLÓGICA - HEC RAS .....</b>	<b>29</b>
5.1 Geometría.....	29
5.2 Flujo permanente.....	32
5.2.1 Análisis de resultados.....	41
5.3 Flujo no permanente.....	42
5.3.1 Análisis de resultados.....	47
5.4 Transporte de sedimentos.....	58

5.4.1	Análisis de resultados.....	67
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>88</b>
<b>7</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA BÁSICA: .....</b>	<b>90</b>
	<b>ANEXO 1 - MODELO HEC RAS.....</b>	<b>91</b>

## FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Localización del tramo de estudio.....	19
Figura 2.localización de las estaciones.....	21
Figura 3. RIO MAGDALENA - ESTACION CALAMAR – IDEAM – FRECUENCIA DE NIVELES EXCEDIDOS1967- 2012 - NIVELES 2010.....	22
Figura 4. CANAL DEL DIQUE - ESTACION INCORA-K7 – IDEAM –NIVELES Y CAUDALES MEDIOS DIARIOS 2010 .....	23
Figura 5. Caudales Canal del Dique y Efluentes (Extraída de la referencia bibliográfica (Alvarado, 2008)) .....	25
Figura 6. Resumen de caudales sólidos derivados por los Caños (mediciones LEH LF) .....	27
Figura 7. Correlación caudal líquido-Caudal sólido total .....	28
Figura 8. Calibración Modelo HEC RAS.....	42
Figura 9. Calibración de niveles Modelo HEC RAS Flujo no permanente “Sección-0” .....	55
Figura 10. Calibración de caudales Modelo HEC RAS Flujo no permanente “Sección-0” .....	56
Figura 11. Calibración de caudales Modelo HEC RAS Flujo no permanente “Sección-0” .....	63
Figura 12. Curva de calibración de ( $Q_S$ vs $Q_L$ ) Modelo HEC RAS Transporte de sedimentos Toffaleti “Sección 7010” .....	72
Figura 13. Curva de calibración de ( $Q_S$ vs $Q_L$ ) Modelo HEC RAS Transporte de sedimentos Meyer Peter Müller “Sección 7010” .....	75
Figura 14. Curva de calibración de ( $Q_S$ vs $Q_L$ ) Transporte de sedimentos Yang “Sección 7010” .....	78
Figura 15. Curva de calibración de ( $Q_S$ vs $Q_L$ ) Transporte de sedimentos Ackers White “Sección 7010” .....	81
Figura 16. Curva de calibración de ( $Q_S$ vs $Q_L$ ) Transporte de sedimentos Ackers White “Sección 7010” .....	81
Figura 17. Curva de calibración de ( $Q_S$ vs $Q_L$ ) Transporte de sedimentos England Hansen “Sección 7010” .....	85

## TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Estaciones seleccionadas .....	22
Tabla 2. Curva de calibración de la estación INCORA-K7 (1984-2000) .....	24
Tabla 3. Periodos de retorno.....	24
Tabla 4. Localización de perforaciones, tramo (Calamar Santa Lucia) .....	26
Tabla 5. Correlación caudal líquido - Caudal sólido total.....	28
Tabla 6. Comparación de resultados HEC RAS vs Datos Estación de Calamar.....	41
Tabla 7. Cálculo del número de Courant.....	46
Tabla 8. Condiciones de la opción “Sediment Data” .....	58
Tabla 9. Plan e información de sedimentos.....	67
Tabla 10. Comparación de resultados Toffaleti (Curva de calibración de entrada Vs Curva de calibración de salida) .....	71
Tabla 11. Comparación de resultados Meyer Peter Müller (Curva de calibración de entrada Vs Curva de calibración de salida) .....	74
Tabla 12. Comparación de resultados Yang (Curva de calibración de entrada Vs Curva de calibración de salida) .....	77
Tabla 13. Comparación de resultados Ackers White (Curva de calibración de entrada Vs Curva de calibración de salida) .....	80
Tabla 14. Comparación de resultados England Hansen (Curva de calibración de entrada Vs Curva de calibración de salida) .....	84

## 1 INTRODUCCIÓN

Este informe contiene una descripción general del procedimiento que se puede llevar a cabo, en la simulación hidráulica de un río, canal natural o artificial, en diferentes escenarios, flujo permanente, no permanente, cuasi permanente y transporte de sedimentos.

En el capítulo 2 se plantean los objetivos del proyecto de investigación del presente informe.

El capítulo 3 indica la metodología empleada para el desarrollo del proyecto, los requisitos de información para modelos 1D y las bases teóricas para el flujo en una dimensión permanente, no permanente y transporte de sedimentos.

El capítulo 4, relaciona de forma general la información del proyecto como localización, historia e información hidrosedimentológica como niveles, caudales y sedimentos en el tramo de estudio del canal.

En el capítulo 5 se presenta el desarrollo de la modelación para flujo permanente, no permanente y transporte de sedimentos.

Finalmente en el capítulo 6 se presentan las conclusiones y recomendaciones a las cuales se llegaron en el desarrollo del modelo y análisis de los resultados obtenidos.



## 2 OBJETIVOS

### Objetivo principal

Elaborar un modelo hidráulico numérico de un tramo del Canal del Dique, usando el software HEC-RAS, en el cual se simulará flujo permanente, no permanente, cuasi permanente y transporte de sedimentos.

### Objetivos secundarios

Investigar qué información se debe recopilar para desarrollar el modelo.

Calibrar el modelo hidráulico con información hidroclimatológica actual, mediante un proceso de ensayo y error, hasta lograr el resultado esperado.

Validar el modelo con la información actual y analizar los resultados obtenidos de la modelación.

### 3 METODOLOGÍA

Para modelar el flujo en el canal, se buscará información primaria o secundaria sobre los Parámetros Hidráulicos propios del canal, lo cual servirá como punto de partida para realizar un modelo teórico del comportamiento del canal.

Para el cálculo de transporte de sedimentos, se investigará acerca de la carga de sedimento en suspensión en el sistema, utilizando curvas de duración de caudal sólido desarrolladas a partir de los datos disponibles de aforos sólidos en el sector de estudio.

Las variables medidas que se van a estudiar, son las características hidráulicas de flujo en el canal y del transporte de sedimentos, las cuales se usan para comparar los resultados obtenidos en el modelo con aquellos medidos en campo y así determinar la fiabilidad de los resultados de la modelación. Además de la información existente recolectada en campo, se utilizará información secundaria como series de climatología de la zona, series de caudales, y series de niveles en el tramo de estudio del Canal del Dique.

El modelo matemático utilizado, se calibrará y validará con información existente, recolectada de campañas de medición realizadas anteriormente. Para alimentar el modelo se organizará la información de 1 año, y se calibra el modelo con la información de campo para el mismo periodo de tiempo.

El modelo utilizado para la simulación, es el modelo HEC-RAS (HydrologicEngineering Center – RiverAnalysisSystem). El software HEC-RAS es un modelo hidrodinámico desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers, capaz de realizar análisis unidimensionales de sistemas fluviales mediante cuatro componentes: simulación de perfiles de flujo permanente, simulación de flujo no permanente, cálculo de transporte de sedimentos y cambios en el lecho, y calidad de aguas. El software está en continuo desarrollo, la última versión del HEC-RAS es la 4.1 de enero de 2010.

### **3.1 Requisitos de información para el modelo 1D**

Los siguientes datos son comúnmente requeridos para los modelos 1-D.

#### Alcance del estudio

El estudio usualmente cubre tanto el tramo de interés como tramos aguas arriba y aguas abajo. Sus entradas y salidas deben estar ubicadas cerca de estaciones de aforo o estructuras de control donde la información de flujo y sedimentos estén disponibles para la determinación de las condiciones de frontera.

#### Grilla computacional

El canal de estudio está representado por un número adecuado de secciones transversales. Cada par de secciones transversales consecutivas define un tramo entre ellas. Para una red de canales, las secciones transversales en las confluencias de los canales, divisiones y estructuras hidráulicas deben estar dispuestas de acuerdo con los requisitos del modelo utilizado.

#### Topografía del canal

Cada sección transversal está representada por puntos finitos (estaciones). En todos los puntos se deben medir las elevaciones del lecho y las distancias a la margen izquierda. También son necesarias las longitudes entre las secciones transversales. Si hay estructuras hidráulicas se deben proporcionar sus geometrías y características hidráulicas.

#### Coefficiente de rugosidad de Manning

El  $n$  de Manning se estima por lo general a partir de datos de flujo medidos. Se pueden utilizar fórmulas empíricas si no se dispone de datos de medición. Pueden ser utilizados como referencia los valores de  $n$  en arroyos con condiciones similares de flujo y de sedimentos.

### Propiedades de las partículas de sedimento

Deben ser medidos el factor de forma y la densidad relativa de las partículas de sedimento. Para la mayoría de las arenas naturales (arena de cuarzo), la densidad relativa es aproximadamente 2,65, y el factor de forma Corey es de aproximadamente 0,7.

La granulometría de los sedimentos debe abarcar todos los tamaños de carga de fondo, carga suspendida, material del lecho, y el material de banco existente. La carga de lavado a veces también se incluye. El rango completo se divide en un número adecuado de clases de tamaño. Se deben determinar los diámetros representativos y límites superior e inferior de todos los tamaños.

### Tamaño del material del lecho y gradación

Es necesario conocer la granulometría inicial del material del lecho para un cálculo realista del comportamiento de la corriente, en particular para determinar socavación y condiciones de estabilidad. Si sólo se espera deposición, por ejemplo, estudiando la sedimentación en los embalses, la gradación inicial del material del lecho es menos importante.

También se necesita la porosidad - del material del lecho.

### Propiedades del material del Banco

Si se consideran la erosión del banco y las superficies de falla, deben determinarse propiedades de los materiales del banco, tales como densidad y composición de los tamaños. Para un banco cohesivo, también son necesarios, la cohesión y ángulo de fricción del material, así como el esfuerzo de cizallamiento crítico para la erosión del pie del banco.

### Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera incluye la descarga de entrada del flujo de agua, el nivel del agua (a la entrada o salida dependiendo del régimen de flujo) y la descarga de sedimentos de entrada y composición del tamaño. La información elegida de series de tiempo de flujo y sedimento, debe representar el ciclo hidrológico promedio, en el alcance del estudio. Por lo general, la serie de tiempo debe ser lo suficientemente larga para incluir años con flujos altos, intermedios y bajos, con varios periodos de retorno.

### Datos históricos

Deben recolectarse y analizarse datos históricos de mediciones de propiedades de flujo, de descargas de sedimentos, de cambios de la morfología del canal, etc, para una mejor comprensión del problema de estudio y calibración del modelo numérico.

### Transporte de sedimentos

En la modelación de flujo cuasi permanente, la serie de tiempo continua de descarga de flujo, el nivel de agua, y la descarga de sedimentos, están representados por funciones escalonadas que se construyen con las correspondientes cantidades representativas, durante un número adecuado de intervalos de tiempo. En cada intervalo de tiempo, el flujo y transporte de sedimentos se suponen constantes, pero el cambio del lecho y granulometría del material del lecho se calculan, y por lo tanto se simula la evolución temporal de la morfología del canal.

Los pasos de tiempo en el cálculo de la variación del lecho y granulometría del material de lecho, están restringidos por los criterios de estabilidad del modelo de transporte de sedimentos. Además, los intervalos de tiempo deben definirse de tal manera que las variaciones temporales de la descarga de flujo, el nivel del agua, y la descarga de los sedimentos estén bien representadas. Esto significa que los intervalos más cortos deben ser utilizados para períodos de flujo alto y más largos durante flujo bajo. Normalmente, los intervalos de tiempo pueden ser de horas o días.

## 3.2 Bases teóricas para cálculo de flujo en una dimensión

### 3.2.1 Flujo Permanente

HEC RAS calcula perfiles de flujo de una sección a la siguiente resolviendo la ecuación de energía mediante un proceso iterativo llamado el método del paso estándar. La ecuación de energía se expresa como:

$$Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

Donde:

$Z_1$  y  $Z_2$ : Elevación del fondo del canal con respecto a un nivel de referencia.

$Y_1$  y  $Y_2$ : Profundidad de la lámina de agua en la sección transversal.

$V_1$  y  $V_2$ : Velocidad promedio ( $Q_{\text{total}}/\text{Área}_{\text{total}}$  de flujo)

$\alpha_1$  y  $\alpha_2$ : coeficientes de corrección de la energía cinética

$g$ : aceleración de la gravedad

$h_e$ : Pérdida de energía

### 3.2.2 Flujo no Permanente

Las leyes de la física que gobiernan el flujo de agua en un canal son: (1) el principio de conservación de la masa.(2) el principio de conservación de la cantidad de movimiento. Estas leyes son expresadas matemáticamente en forma de ecuaciones diferenciales parciales.

La ecuación de continuidad en su forma conservativa, se puede expresar como:

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

La ecuación de cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left( \frac{\partial z}{\partial x} + s_f \right) = 0$$

Para evitar la solución no lineal, Preissmann (según lo informado por Liggett y Cunge, 1975) y Chen (1973) desarrolló una técnica para linealizar las ecuaciones.

### 3.2.3 Transporte de Sedimentos

Continuidad de sedimento

HEC RAS resuelve la ecuación de continuidad de sedimentos también conocida como la ecuación de Exner:

$$(1 - \gamma_p)B \frac{\partial n}{\partial t} = - \frac{\partial Q_s}{\partial x}$$

Donde:

B: Ancho del canal

n: Elevación del canal

$\gamma_p$ : Porosidad de la capa activa

t: tiempo

x: distancia

$Q_s$ : Caudal sólido

Esta ecuación se limita a establecer que el cambio de volumen de sedimentos en un volumen de control (por ejemplo agradación o degradación) es igual a la diferencia entre la carga de entrada y salida.

La ecuación de continuidad de sedimento es solucionada mediante el cálculo de la capacidad de transporte de sedimento a través de un volumen de control asociado con cada sección transversal. Esta capacidad se compara con la carga de sedimentos que entra al volumen de control. Si la capacidad es mayor que la carga, hay un déficit de sedimento que se satisface al erosionar sedimentos del lecho. Si la oferta excede la capacidad hay un exceso de sedimentos causando material a depositar.

### **3.2.4 Procesos de erosión, transporte y sedimentación**

Cuando un fluido en movimiento entra en contacto con el cauce que lo contiene, se origina una relación mutua, cuyo resultado depende, de las características del movimiento del propio fluido. Se producen diferentes pérdidas de carga por rozamiento con el contorno, que dependen de la granulometría, la pendiente y la geometría del cauce, apareciendo entonces siempre para cada uno de los casos, un abanico de fuerzas, ya sean desestabilizadoras y de arrastre, ó estabilizantes y de deposición de las partículas sólidas.

Para que una partícula en lecho del río sea arrastrada, es necesario que el cortante en el fondo,  $\tau_0$ , supere un determinado umbral  $\tau_c$ , ( $\tau_0 - \tau_c > 0$ ), que depende del tamaño del sedimento, su forma, su confinamiento en el lecho, y la cohesión. La tasa de transporte de dichas partículas se denomina gasto sólido y su cálculo autores han formulado su teoría. Actualmente la mayoría de las relaciones de gasto sólido, son proporcionales al exceso de esfuerzo de corte, con respecto al esfuerzo de corte crítico, como por ejemplo la ecuación Meyer-Peter & Müller.

Una vez iniciado el movimiento, las partículas pueden estar en suspensión, o ser arrastradas en las proximidades de la solera. Existe una posibilidad intermedia en la que la partícula inicialmente situada en el fondo, es elevada por el flujo y transportada temporalmente, hasta que las fuerzas que actúan sobre ella decrezcan, y entonces sea depositada nuevamente en el fondo. Las partículas más finas y susceptibles al más mínimo movimiento, permanecerán siempre en suspensión originando la llamada carga de lavado.



En cuanto a las partículas de mayor diámetro y peso específico, si no logran alcanzar el seno del fluido, se ven abocadas al transporte de fondo, en forma de rodadura ó pequeños saltos.

### **3.2.5 Funciones de transporte de sedimentos**

Podemos clasificar los sedimentos, respecto a su origen ó respecto al modo en el que se desplazan, respecto a su origen, los sedimentos pueden provenir, bien como aporte del propio cauce, conocido como descarga de lecho, ó bien ser aportados al cauce como una fuente externa, ya sea como un aporte continuado ó temporal de material, denominado carga de lavado. En el segundo tipo, las partículas más gruesas son desplazadas, bien arrastradas por la corriente generada por el propio flujo, o por pequeños saltos muy cerca del lecho del río, conocido como arrastre de fondo, por el contrario, si partículas más finas se sostiene por efectos ascendentes provocados por la propia turbulencia, es denominado transporte suspendido.

A continuación, se muestran las ecuaciones empíricas, que describen el movimiento de las partículas en el seno de un fluido, y que serán empleadas mediante Hec-Ras con el fin de comparar cuál de ellas se acerca más a los valores medios del cauce:

Meyer Peter Muller

Yang

Ackers White

England Hansen

Toffaletti

### 3.2.5.1 Función de transporte MEYER-PETER & MÜLLER

La ecuación de Meyer-Peter Müller (MPM1948) fue una de las primeras ecuaciones desarrolladas y es aún una de las más utilizadas en el cálculo de transporte de sedimentos. Es una simple relación de exceso de esfuerzo cortante. Es estrictamente una ecuación de carga del lecho desarrollada con experimentos de aforos para arena y grava bajo condiciones de lecho plano. La mayoría de los datos fueron desarrollados utilizando sustratos uniformes de grava. MPM es sobre toda una buena ecuación de aproximación para el cálculo con gravas ya que tiende a subestimar el transporte de materiales finos.

Datos requeridos

Parámetro	Constante
Temperatura	T
Viscosidad Cinemática	$\nu$
Calado	D
Pendiente	S
Diámetro medio de la partícula	$d_{si}$
Diámetro máximo de la partícula	D90
Velocidad media	V
Caudal	Q
Densidad del agua	$\gamma_w$
Ancho del canal	B
Densidad relativa del sedimento	S

### 3.2.5.2 Función de transporte YANG

Yang (1973,1984) es una ecuación de carga total de transporte la cual basa el movimiento del lecho en el producto de la velocidad y el esfuerzo cortante. La función fue desarrollada sobre una gran variedad de aforadores y datos de campo. La ecuación está compuesta por dos relaciones separadas de transporte de arenas y gravas. La transición entre arena y grava es suavizada con el fin de evitar grandes discontinuidades. Yang tiende a ser muy sensible a la velocidad de la corriente y es más sensible a la velocidad de caída que todas las demás ecuaciones.

Datos requeridos

Parámetro	Constante
Temperatura	T
Viscosidad Cinemática	$\nu$
Calado	D
Pendiente	S
Diámetro medio de la partícula	dsi
Diámetro máximo de la partícula	D50
Velocidad media	V
Caudal	Q
Densidad del agua	$\gamma_w$
Ancho del canal	B
Densidad relativa del sedimento	S

### 3.2.5.3 Función de transporte ACKER & WHITE

Ackers and White (1973) es una función de carga total que fue desarrollada con datos de un aforador para gradaciones que van desde arenas a gravas finas. La hidrodinámica fue seleccionada para cubrir un rango de configuraciones del lecho que incluyen ondas, dunas y condiciones de lechos planos. El sedimento suspendido es función de la velocidad de corte mientras que la carga del lecho es función del esfuerzo cortante.

Datos requeridos

Parámetro	Constante
Temperatura	T
Viscosidad Cinemática	$\nu$
Calado	D
Pendiente	S
Diámetro medio de la partícula	dsi
Diámetro máximo de la partícula	D84
Velocidad media	V
Caudal	Q
Densidad del agua	$\gamma_w$
Ancho del canal	B
Densidad relativa del sedimento	S

### 3.2.5.4 Función de transporte ENGELUND & HANSEN

Engelund & Hansen (1967), es una ecuación de carga total de transporte que fue desarrollada a través de datos de aforador. Fueron usadas arenas de tamaño relativamente uniformes entre 0.19 mm y 0.03 mm. Aunque relativamente es función simple de la velocidad del canal, la fuerza cortante en el lecho y el material de gradación d50. La aplicación de esta ecuación debería ser únicamente para sistemas arenosos.

Datos requeridos

Parámetro	Constante
Temperatura	T
Viscosidad Cinemática	$\nu$
Calado	D
Pendiente	S
Diámetro medio de la partícula	dsi
Diámetro máximo de la partícula	D84
Velocidad media	V
Caudal	Q
Densidad del agua	$\gamma_w$
Ancho del canal	B
Densidad relativa del sedimento	S

### 3.2.5.5 Función de transporte LAURSEN & COPELAND

Laursen (1968) propuso una función de carga total que inicialmente se basó en ecuaciones de aforadores y posteriormente fue ampliada por Madden para incluir los datos del Río Arkansas. Es una función básica del exceso de esfuerzo cortante y la relación entre la velocidad de corte y la velocidad de caída. Años después, Copeland (1989) generalizó la ecuación para el transporte de gravas, por lo que dotó a la ecuación la posibilidad de ser usada para lechos gradados.

Datos requeridos

Parámetro	Constante
Temperatura	T
Viscosidad Cinemática	$\nu$
Calado	D
Pendiente	S
Diámetro medio de la partícula	dsi
Diámetro máximo de la partícula	D84
Velocidad media	V
Caudal	Q
Densidad del agua	$\gamma_w$
Ancho del canal	B
Densidad relativa del sedimento	S

### 3.2.5.6 Función de transporte TOFFALETI

Al igual que England-Hansen, Toffaleti (1968) es una función de carga total desarrollada principalmente para partículas del tamaño en el entorno de las arenas. Toffaleti es considerada generalmente una función para ríos largos. Esta función no está influenciada por la velocidad de corte ni por el esfuerzo cortante en el lecho. En lugar de esto, la ecuación fue formulada en base a regresiones de temperatura y un exponente empírico que describe la relación entre los sedimentos y las características hidráulicas.

Datos requeridos

Parámetro	Constante
Temperatura	T
Viscosidad Cinemática	$\nu$
Calado	D
Pendiente	S
Diámetro medio de la partícula	dsi
Diámetro máximo de la partícula	D65
Velocidad media	V
Caudal	Q
Densidad del agua	$\gamma_w$
Ancho del canal	B
Densidad relativa del sedimento	S

### 3.2.6 Definición de variables transporte de sedimentos Hec-Ras

- Variación del Talweg (Ch Invert El) (m) - Elevación mínima del canal principal en cada paso de tiempo de salida.
- Altura de agua (Wsel) (m) - La elevación de la superficie del agua en cada paso de tiempo de salida.
- Datos observados (Observ Data) - La elevación observada del lecho del canal principal, introducido por el usuario.
- Incrementos del talweg (InvertChange) (m) - El cambio en el la elevación mínima del canal principal.
- Masa transportada (MassOut) (toneladas) - La masa total de sedimentos, para todas las clases de tamaño de grano, que salen del volumen de control de sedimentos, por cada paso de tiempo computacional.
- Masa transportada: la clase 1-20 (MassOut) (toneladas) - Masa de sedimentos dejando el volumen de control de sedimentos por fracción de tamaño de grano, por paso de tiempo computacional.
- Flujo (Flow) (m<sup>3</sup>/s) - Flujo total en la sección transversal de cada paso de tiempo de salida.
- Velocidad (velocity) (m/ s) - Velocidad media de la parte móvil de la cama en cada paso de tiempo.
- Esfuerzo de corte (Shear Stress) (Kg/m<sup>2</sup>) - Esfuerzo cortante promedio de la parte móvil de la cama en cada paso de tiempo.
- Pendiente de energía (EG Slope) (m /m) - Pendiente de la línea de energía en cada paso de tiempo de salida. Puede ser un valor en puntos de la sección transversal o un valor medio entre las secciones transversales.
- Incrementos acumulados, en masa ó volumen, en el talweg (MassBedChange Cum) (toneladas) - Masa acumulatda del cambio en la elevación del lecho con el tiempo.

- Incrementos acumulados, en masa ó volumen, en el talweg (MassBedChange Cum) clase 10 a 20 (toneladas) - Masa acumulada del cambio en la elevación del lecho con el tiempo, por tamaño de grano (clase de 1 a 20). Esto sólo muestra las fracciones del tamaño que se están utilizando.
- Cambio del Lecho (MassBedChange) (toneladas) - El cambio gradual de masa total en el lecho para el paso de tiempo de cálculo actual.
- Cambio del lecho clase 1-20 (MassBedChange, class 1-20) (toneladas) – El cambio de masa incremental en el lecho para el paso de tiempo actual, por la fracción de cada tamaño de grano.
- Capacidad de Transporte (MassCapacity) (toneladas/día) - La capacidad de transporte de la masa total en el intervalo de tiempo de cálculo actual.
- Capacidad de Transporte (MassCapacity) la clase 10-20 (toneladas/día) – La capacidad de transporte en masa, por la fracción de tamaño de grano, en el intervalo de tiempo de cálculo actual.
- d50 del acorazamiento (mm) - d50 de la capa de cobertura al final del incremento de cómputo. Utilizados en el Exner 5, rutina de acorazamiento.
- Subsuperficie d50 (mm) - d50 del material de la capa superficial al final del paso de tiempo computacional. Utilizados en el método de acorazamiento Exner 5d50 activa (mm) - d50 de la capa activa del lecho en el acorazamiento.
- Inactiva d50 (mm) - d50 de la capa de inactivos al final de cada paso de tiempo computacional. Utilizados en el método de acorazamiento Exner 5.
- Espesor de capa (CoverThickness) (m) - Espesor de la capa de cobertura al final de cada paso de tiempo computacional. Utilizados en el método de acorazamiento Exner 5.

- Espesor del subsuelo (SubsurfaceThickness) (m) - Espesor de la capa de la superficie al final de cada paso de tiempo computacional. Utilizados en el método de acorazamiento Exner 5.
- Espesor activo (m) - Espesor de la capa activa al comienzo de cada paso de tiempo computacional. Utilizados en los método de acorazamiento. Material total en el espesor de capa: (Masscover) (toneladas) – toneladas totales de material en la capa de cobertura, al final de cada paso de tiempo computacional.
- Masa inactiva (Mass Inactive) (toneladas) - Total de toneladas de material en la capa de inactivos al final de cada incremento de tiempo de cómputo.
- Masa inactiva (Mass Inactive) clase 10 a 20 (toneladas) - Toneladas de material en la capa de inactivos al final de cada incremento de cómputo, por tamaño de grano.
- Reducción del acorazamiento (ArmorReduction) (fracción) - Fracción de la capacidad total de transporte de sedimentos, basado en los conceptos de una computación capa de cobertura.
- Reducción del acorazamiento (ArmorReduction) la clase 1-20 (fracción) - Reducción de la capacidad de transporte para cada tamaño de los granos individuales Descarga de sedimentos (SedimentDischarge) (t/día) - Descarga total de sedimentos en toneladas/día que salen del volumen de control , por cada paso de tiempo computacional.
- Concentración de sedimentos (Sediment Concentración) (mg/l) – La concentración total de sedimentos en mg / litro que salen del volumen de control en el final del paso de tiempo computacional.
- Ef profundidad (EffDepth) (m) - Profundidad efectiva del agua en la la sección transversal móvil, en el final del paso de tiempo computacional.



- Ef ancho (EffWidth) (m) - Ancho efectivo del agua en la de la sección transversal móvil, en el final del paso de tiempo computacional.
- Ch Manning n -Número de Manning. Número de Froude (Ch FroudeNum) - Número de Manning y de Froude en el canal principal al final del paso de tiempo de cálculo actual.
- Velocidad de corte (ShearVelocity) -  $u^*$  (m / s) - Utilizados en el diagrama de Shields y varias ecuaciones del potencial de transporte de sedimentos.
- Cubierta d90 (mm) – d90 Cover - d90 de la capa de acorazamiento al final del incremento de cómputo. Utilizados en el método de acorazamiento de Exner 5, Subsuperficie d90 (mm) - D90 del material de la capa superficial en la final del paso de tiempo computacional. Utilizados en el método de acorazamiento de Exner 5.
- inactiva d90 (mm) - d90 de la capa de inactivos al final de cada paso de tiempo computacional. Utilizados en el método de acorazamiento de Exner 5. Elevación media del canal (EfInvert) (m) – Elevación media del fondo del canal, calculada restando la profundidad efectiva del canal principal de la elevación de la superficie del agua.
- Cambio de masa (toneladas) - El cambio total en la masa del lecho, acumulado en el espacio y el tiempo.

## 4 INFORMACIÓN GENERAL DEL ÁREA DEL PROYECTO

### 4.1 Localización

El Canal del Dique, está localizado en el tramo inferior del río Magdalena, al Norte de Colombia. En su recorrido cruza el departamento de Bolívar y sirve de límite interdepartamental entre Bolívar - Atlántico y Bolívar - Sucre. Se bifurca del río Magdalena en la población de Calamar (Bolívar), 110 Km aguas arriba de la desembocadura del río en Bocas de Ceniza. Tiene una longitud de 115 Km entre Calamar y su desembocadura en la bahía de Cartagena. A través de los caños Correa, Matunilla y Lequerica, presenta desembocaduras hacia el mar abierto y la bahía de Barbacoas.

El tramo de estudio del presente proyecto se localiza en lo que se conoce como el alto Canal del Dique, el tramo comprende los primeros 7 Km del Canal, entre las poblaciones de Calamar y Santa Lucia. Presenta como característica, gran variación de los niveles extremos del río.

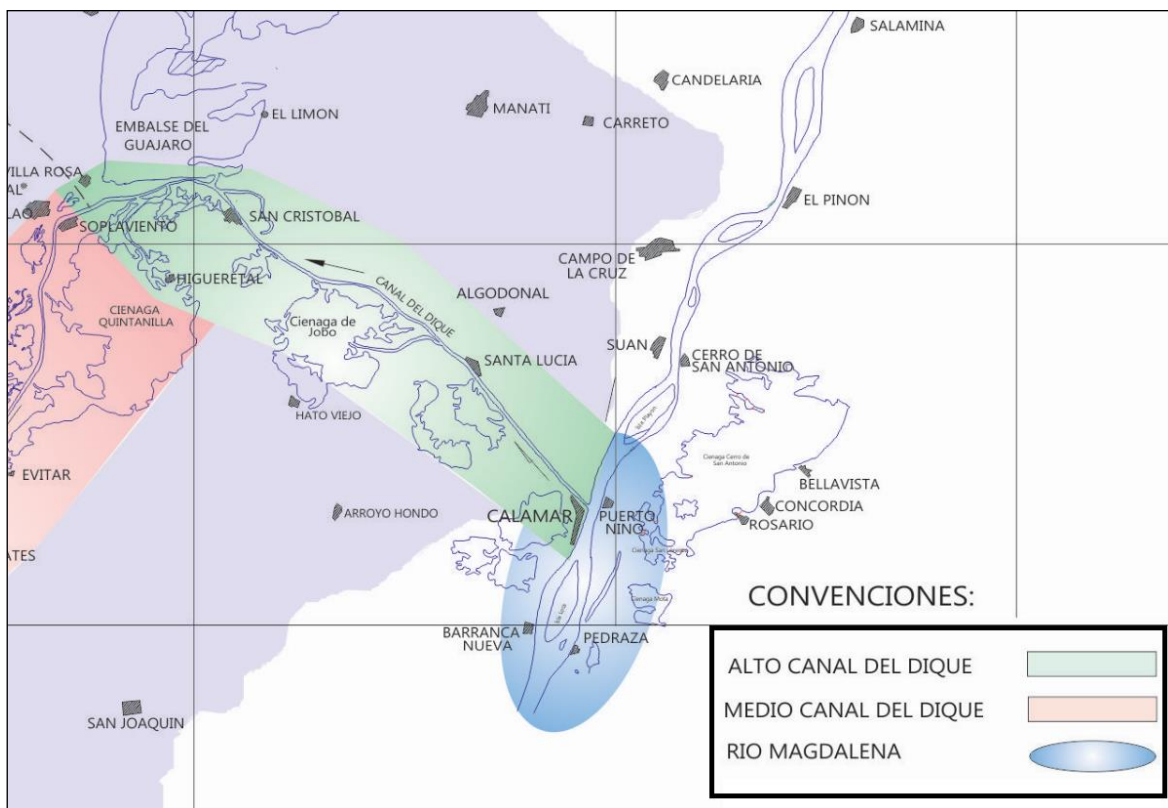


Figura 1. Localización del tramo de estudio.

Las aguas del Canal del Dique, cuyos caudales son función del comportamiento de niveles del río Magdalena entre Calamar y el mar Caribe, albergan diferentes formas de vida y se utilizan en su totalidad para diferentes fines en su área de influencia. El recurso agua ha sido explotado entre otros para el abastecimiento de acueductos, mantener la navegación mayor entre Cartagena y el río Magdalena y operar Distritos de Riego.

## 4.2 Historia

En 1650, el Gobernador de Cartagena, don Pedro Zapata de Mendoza, adelantó un trabajo de limpieza y conexión de las ciénagas y por último rompió un “dique” - vocablo derivado de “muro” en holandés, que separaba el río Magdalena de dichas ciénagas, en proximidades de lo que hoy es Barrancanueva, corregimiento de Calamar, localizado 10 Km al Sur de la cabecera. Del rompimiento de dicho dique, viene el nombre del Canal del Dique y también el sueño de un canal que uniera el río Magdalena con Cartagena de Indias. Don Pedro Zapata de Mendoza, realizó estas modestas obras con 200 hombres de hacha, pico y pala, entre enero y agosto de 1650, es decir, en poco más de 6 meses. En verdad su obra más grande no fue conectar unas ciénagas con el río ni cortar y remover unos manglares para comunicar la ciénaga de Matuna con la bahía de Barbacoas. Su hazaña, fue haber creado el mito del Canal del Dique, y la fama de haberlo construido. En ese momento no se podía hablar propiamente de un “canal” sino de una salida navegable del río al mar, en épocas de creciente, por unas ciénagas de agua dulce y de éstas, a través de la gran ciénaga de agua salada que era la ciénaga de Matuna, hacía la bahía de Barbacoas, que se comunicaba con la bahía de Cartagena por el caño del Estero.

Con las diferentes obras de rectificación y ampliación del Canal, realizadas durante este siglo, con el objetivo exclusivo de garantizar la navegación, se han venido incrementando los caudales de derivación a partir del río Magdalena, con el consiguiente aumento en el transporte de sedimentos. Antes de la última rectificación y ampliación del Canal (1981-1984) el caudal medio a la entrada en Calamar era de 320 m<sup>3</sup>/s; un año después de los trabajos el caudal medio había aumentado a 450 m<sup>3</sup>/s y las mediciones durante 1997-1998 indicaron un caudal medio de 520 m<sup>3</sup>/s. Estas condiciones han

generado algunos beneficios, entre otros, al desarrollo del manglar localizado en el sector fluvio - marítimo; sin embargo, han agravado los problemas de sedimentación en su sistema lagunar adyacente y en las bahías de Cartagena y Barbacoas.

### 4.3 Hidrología

Para evaluar el comportamiento del Canal del Dique, se analizó información histórica recopilada en el IDEAM, en la estación de Calamar, se consideró información de niveles del año 2010 y para la estación K7 – INCORA, una curva de calibración de correspondiente a los años 1972 a 1998. La figura 2, presenta la localización de las estaciones.

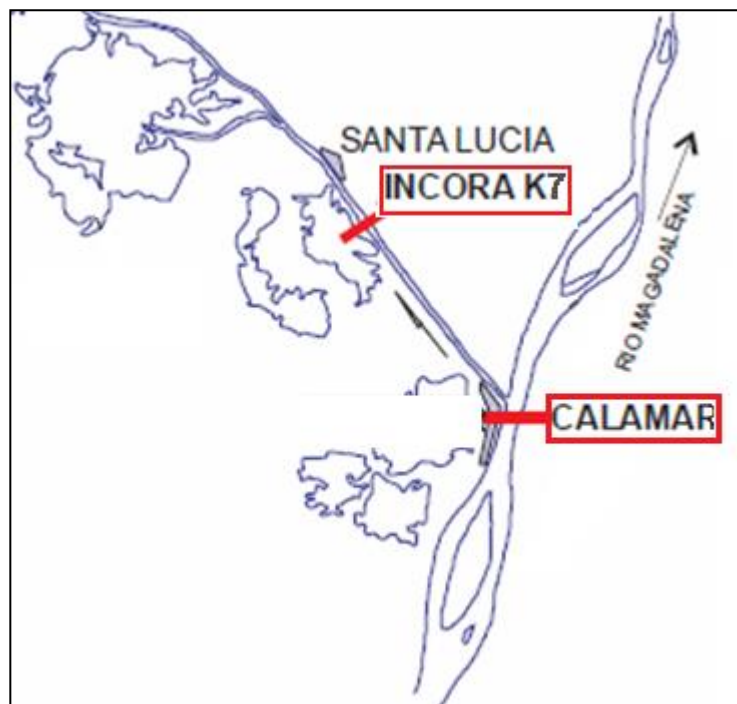


Figura 2.localización de las estaciones.

#### 4.3.1 Niveles

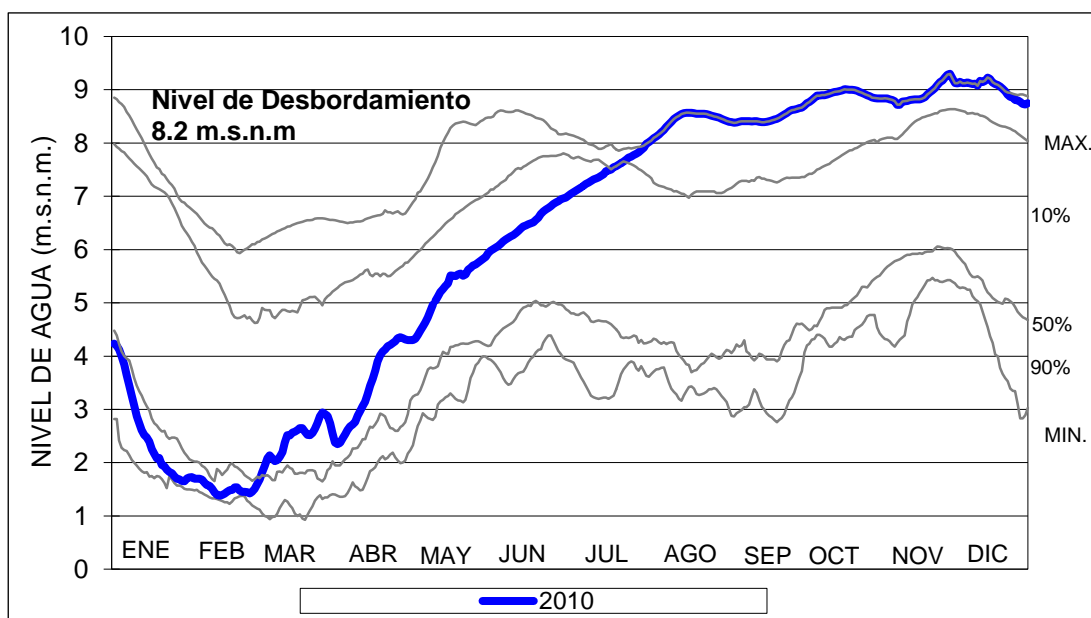
Como parte del desarrollo del modelo, se seleccionaron, las siguientes estaciones del IDEAM.

Tabla 1. Estaciones seleccionadas

ESTACIÓN	ABSCISA (K)	CÓDIGO	TIPO DE ESTACIÓN	PERIODO DE REGISTRO
Calamar		2903702	Limnimétrica	1967-2012
Incora K7	6+500	2903736	Limnigráfica	1967-2000

A partir de la información recopilada, se realizaron los siguientes análisis, que permitieron conocer el comportamiento de los niveles del Canal en estas estaciones:

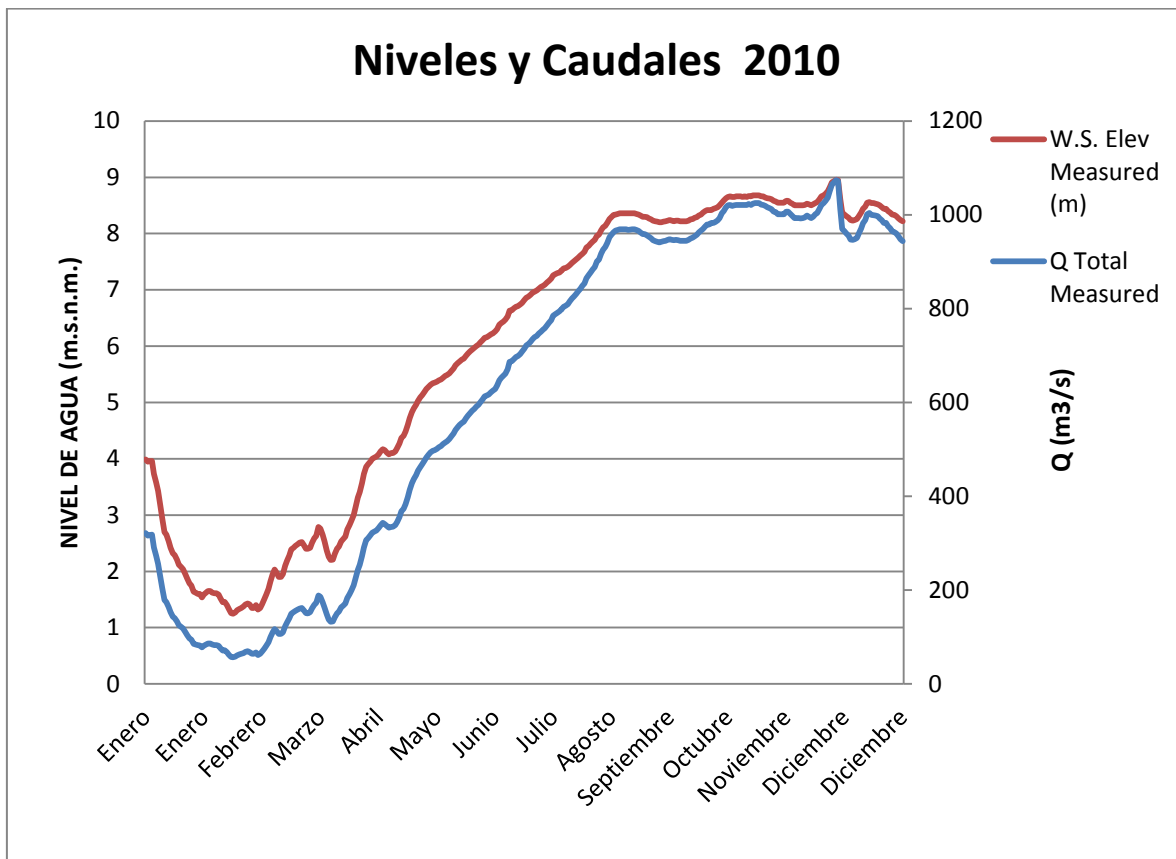
-Variación de niveles



**Figura 3. RIO MAGDALENA - ESTACION CALAMAR – IDEAM – FRECUENCIA DE NIVELES EXCEDIDOS 1967- 2012 - NIVELES 2010**

De acuerdo con la figura 3 se tiene la siguiente distribución de niveles: entre los meses de Enero a Mayo se tienen niveles bajos, de Junio a Julio niveles medios y a partir de Agosto se presentan niveles altos hasta el mes de diciembre. Para el año 2010 los niveles del canal del dique superaron el nivel de desbordamiento (8.2 m.s.n.m), circunstancia que

promovió la falla de los diques específicamente en este tramo de Calamar a Santa Lucia. De acuerdo con la frecuencia de niveles excedidos, se refleja que a partir del mes de Agosto, se superaron los niveles históricos máximos. En este evento extremo, proporcionalmente con el aumento de nivel, aumentó el caudal líquido, caudal sólido y como consecuencia se generó un transporte de sedimentos de considerable magnitud.



**Figura 4. CANAL DEL DIQUE - ESTACION INCORA-K7 – IDEAM –NIVELES Y CAUDALES MEDIOS DIARIOS 2010**

En la figura 4 se pueden ver los niveles y caudales medios diarios para el año 2010 en la estación de INCORA-K7, información que será usada para verificar la calibración del modelo en flujo no permanente.

### -Curva de calibración

La tabla 2 la presenta los caudales para varias probabilidades de excedencia durante periodo 1984-2000 en la estación de INCORA. Este periodo es representativo de las condiciones actuales en el Canal del Dique y después de las últimas obras de rectificación en el año 1984.

Tabla 2. Curva de calibración de la estación INCORA-K7 (1984-2000)

% Excedencia	Nivel (m.s.n.m)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
100	0.73	37
95	2.06	131
90	2.69	193
80	3.53	291
70	4.09	367
60	4.5	427
50	4.94	497
40	5.45	583
30	6	683
20	6.5	809
10	6.93	925
5	7.21	1005
0	7.96	1241

### 4.3.2 Caudales

Se calculan los periodos de retorno correspondientes a los porcentajes de excedencia de la curva de calibración de la estación INCORA-K7.

Tabla 3. Periodos de retorno

P $\geq$	Tr	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
100%	1	37
95%	1.05	131
90%	1.11	193
80%	1.25	291
70%	1.43	367
60%	1.67	427
50%	2	497
40%	2.5	583
30%	3.33	683
20%	5	809
10%	10	925
5%	20	1005
0%	100	1241

#### 4.3.2.1 Estudio “Río Magdalena Navegación Marítima y Fluvial (1986 - 2008)”

Al revisar los estudios sobre el Canal del Dique se encuentra el estudio titulado Río Magdalena – Navegación Marítima y Fluvial (1986 - 2008), (Alvarado, 2008), en el capítulo 4 de esta referencia se realiza una caracterización hidráulica, sedimentológica y morfológica del Canal del Dique entre Calamar y Pasacaballos. En dicho documento se encuentra la distribución de caudales a lo largo del Canal del Dique y sus efluentes, el siguiente diagrama se realizó a partir de relaciones de la estación Gambote con aforos realizados por el Laboratorio de Ensayos Hidráulicos de Bogotá (1985 - 1993), el laboratorio las Flores (1994 – 2002) y el Ministerio del Medio Ambiente durante (1999 – 2000).

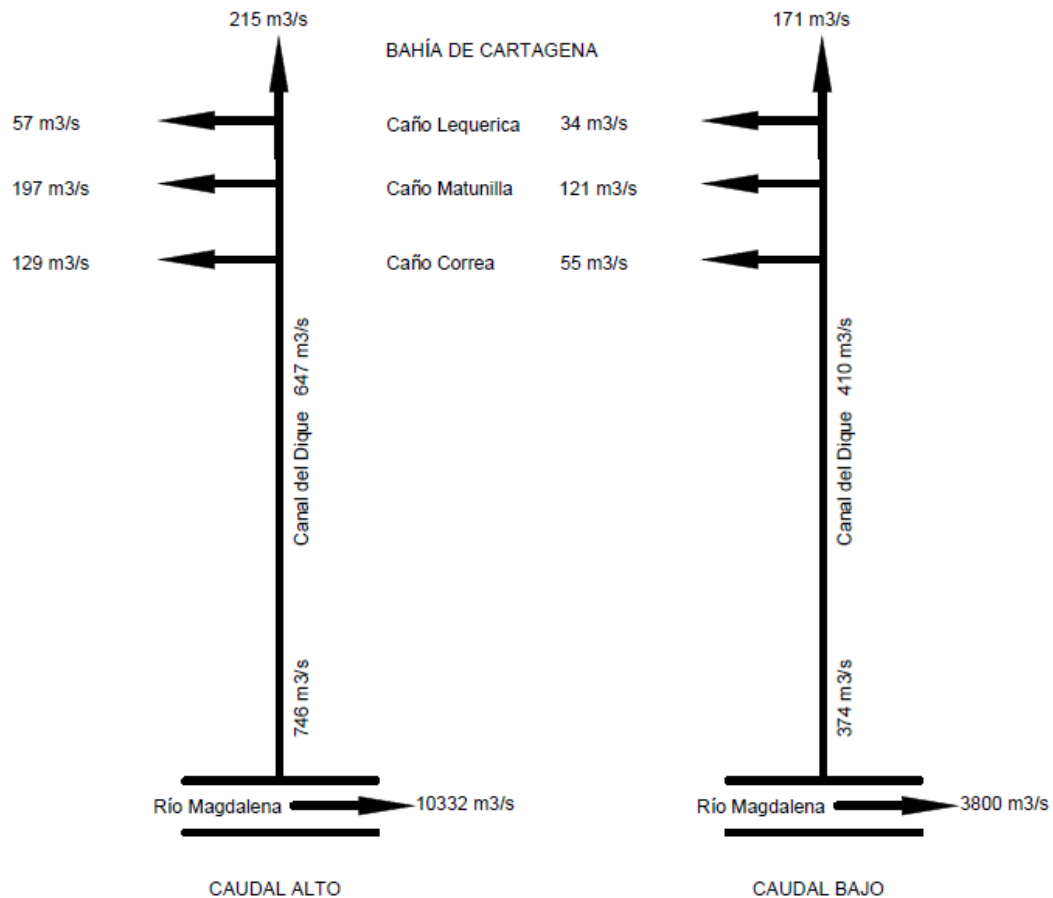


Figura 5. Caudales Canal del Dique y Efluentes (Extraída de la referencia bibliográfica (Alvarado, 2008))



### 4.3.3 Sedimentos

#### 4.3.3.1 Estudio Geotécnico realizado por H.M.V.

La caracterización geotécnica del lecho del canal, se llevó a cabo, por medio de la ejecución de ensayos “in situ” y de laboratorio, en los sectores donde se proponen hacer obras. La localización de cada una de estas perforaciones se presenta a continuación indicando en la sección que corresponde al modelo de HEC RAS:

Tabla 4. Localización de perforaciones, tramo (Calamar Santa Lucia)

SECCIÓN	PERFORACIÓN No.	PROFUNDIDAD	% FINOS
6790	2	0.75	87
6140	3	1.75	88
5890	69	3.25	11
5640	5	3.24	75
5390	6	1.75	20
5140	7	2.75	40
4890	8	0.75	26
4640	72	3.25	--
4390	10	3.25	12
4140	11	3.25	20
3890	12	3.25	7
3640	13	3.25	98
3390	14	3.25	12
3140	15	3.25	91
2890	75	1.75	38.6
2640	17	1.75	85.8
2390	18	3.25	71.6
2140	19	3.25	96.3
1890	20	0.75	90
1640	21	0.75	21.7
1390	22	0.75	95.9
1140	23	3.25	99.4
890	24	3.25	19.3
640	25	1.75	96.9

#### 4.3.3.2 Correlación de parámetros hidrosedimentológicos

Estudio “Río Magdalena Navegación Marítima y Fluvial (1986 - 2008)”

Con base en los caudales líquidos y sólidos medidos en la estación K7-Incora por parte del Laboratorio de Ensayos hidráulicos de Bogotá (1985-1993), del Laboratorio de Ensayos hidráulicos de las Flores (1995-2002) y del ministerio del Medio Ambiente (1999-2000) se elaboró la curva de calibración.

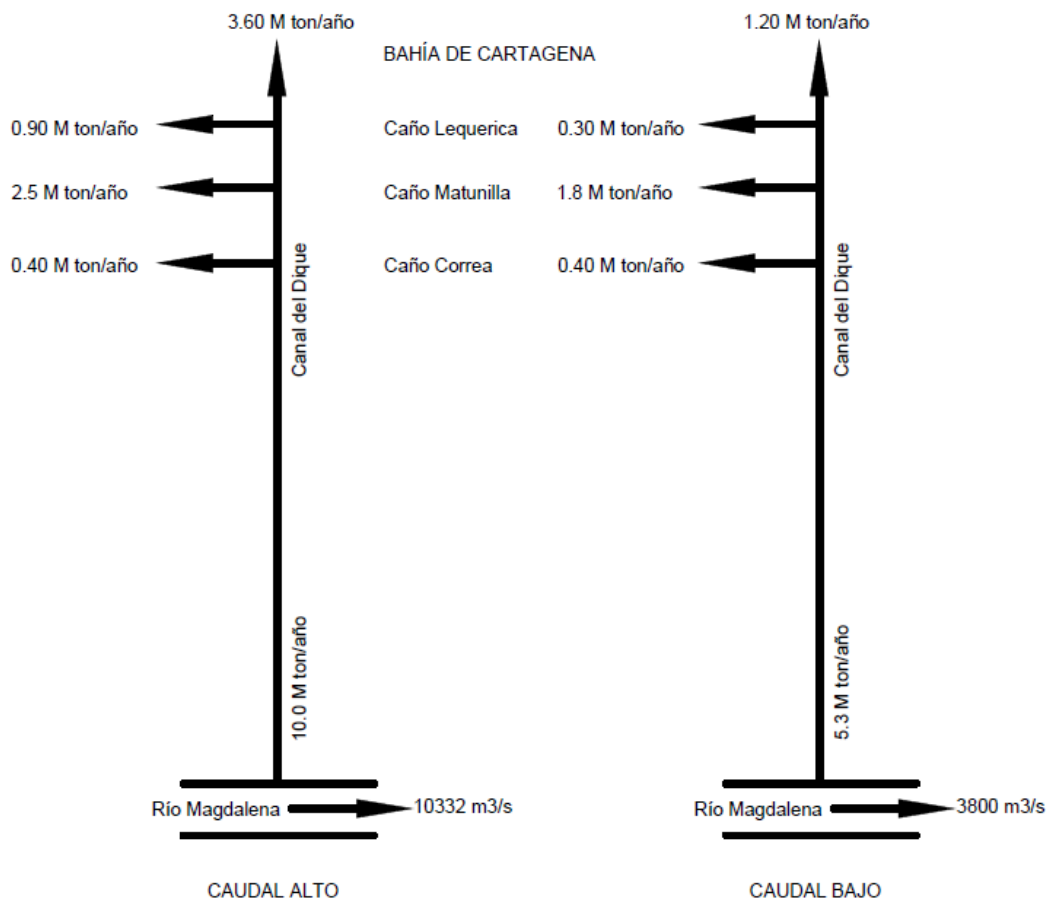


Figura 6. Resumen de caudales sólidos derivados por los Caños (mediciones LEH LF)

Tabla 5. Correlación caudal líquido - Caudal sólido total

$Q_L(m^3/s)$	$Q_s(\text{ton}/\text{dia})$
68	1800
122	2300
270	7000
370	18000
690	43000
1000	54000

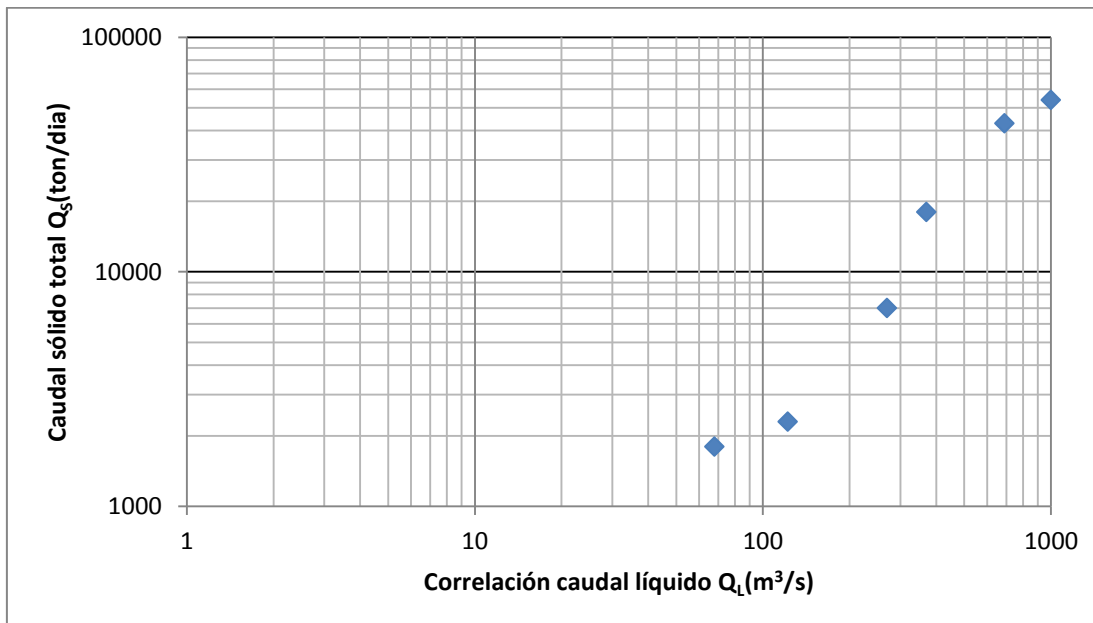
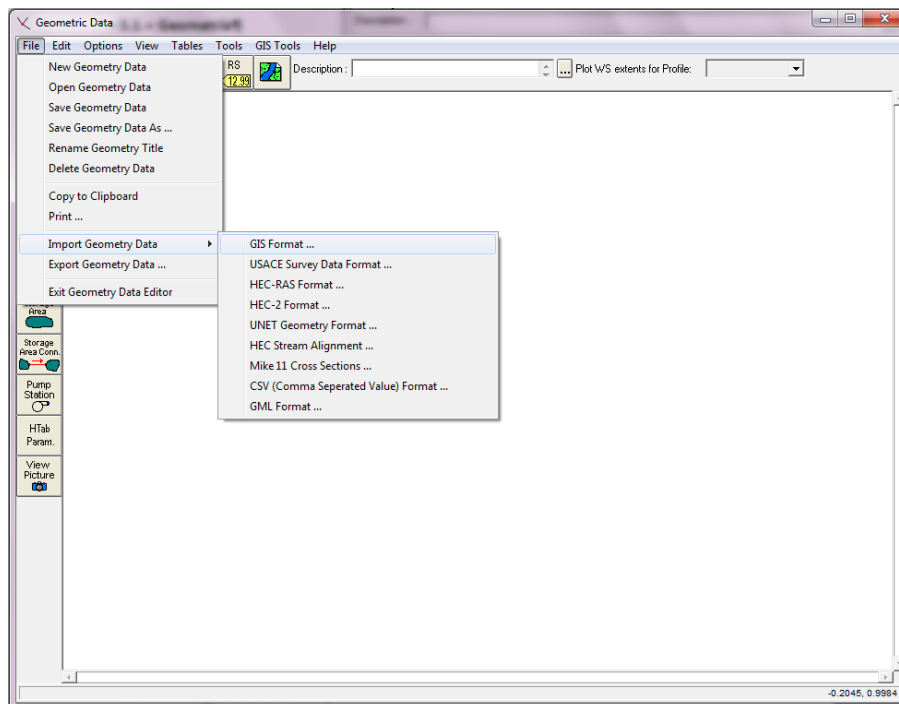


Figura 7. Correlación caudal líquido-Caudal sólido total

## 5 MODELACIÓN HIDROSEDIMENTOLÓGICA - HEC RAS

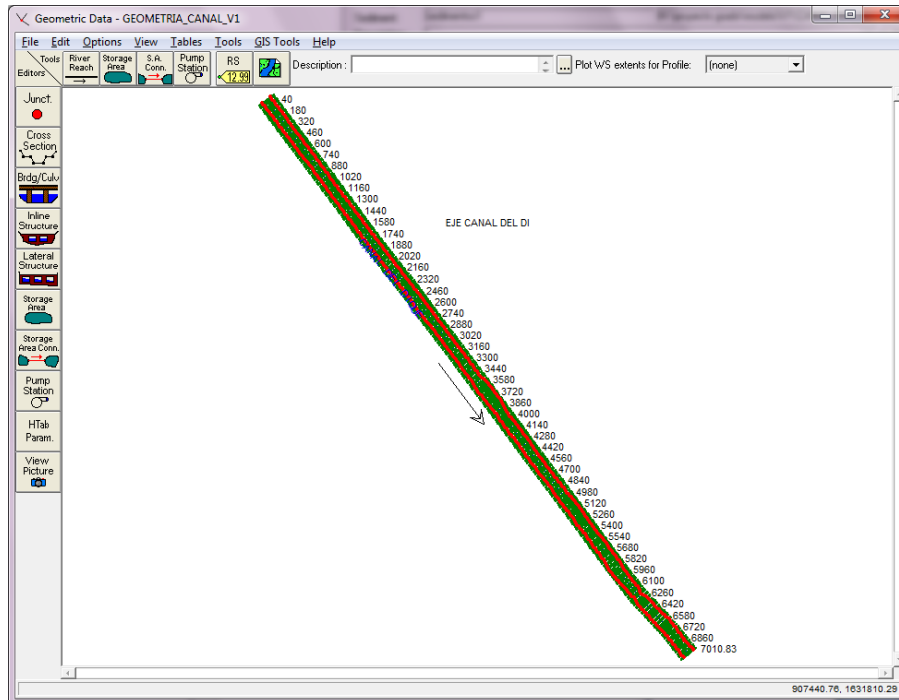
### 5.1 Geometría

Para modelar la superficie del terreno, se realizó un modelo digital de la superficie del terreno, de acuerdo con la topografía y batimetría actual mediante el software Civil 3D, se definió el eje del canal y se sacaron secciones transversales cada 20m. Se debe exportar la información a HEC-RAS indicando el eje del canal, el grupo de secciones transversales y las bancas izquierda y derecha. Exportando los datos se debe indicar la ubicación en la cual se guarda la información de la geometría, se genera un archivo con extensión .geo. Estos datos son la información de la geometría del canal en el modelo, el paso siguiente es abrir HEC RAS e importar la geometría, en la sección de: Geometric Data>>ImportGeometric Data>>GIS Format.

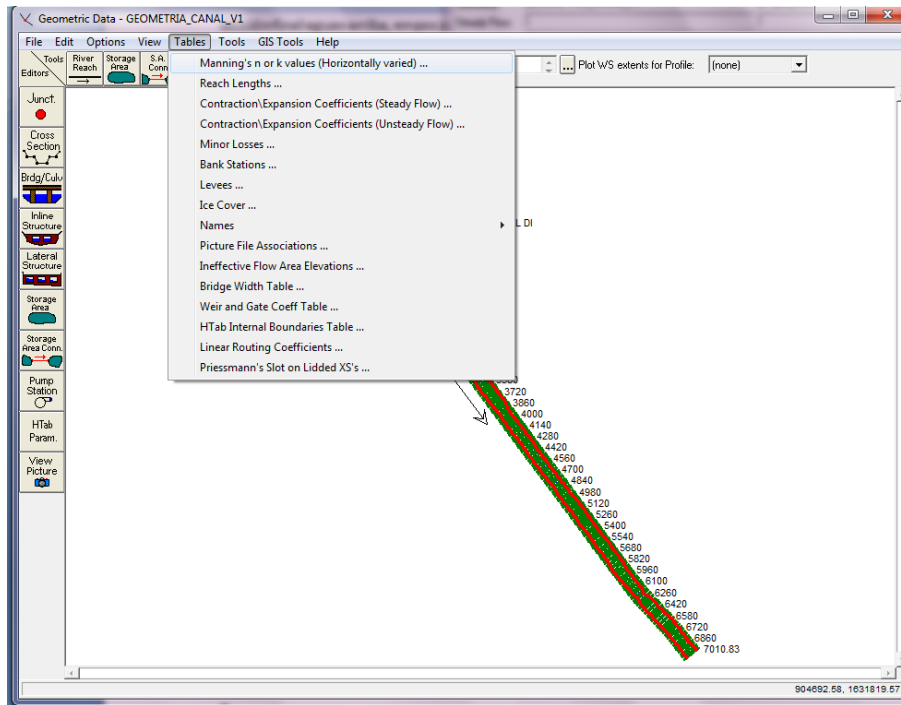


Una vez se importa la geometría, se puede visualizar la planta del canal y las secciones transversales. Se debe tener en cuenta en el momento de definir el inicio del eje del canal, la forma como HEC RAS reconoce las secciones transversales, la sección aguas abajo del canal corresponde al inicio del eje, abscisa K0 + 000, la abscisa del fin

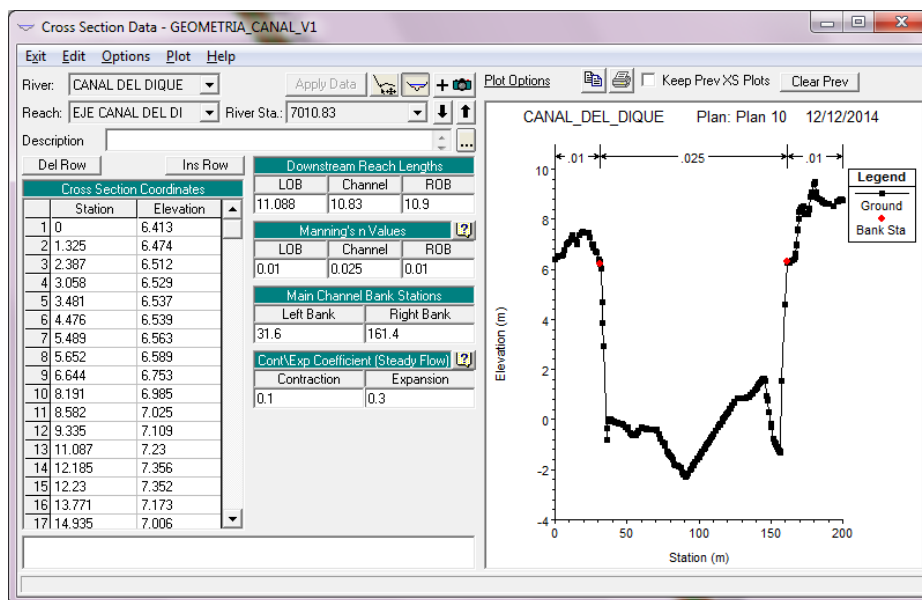
corresponde a la sección final aguas arriba, en pocas palabras el inicio y final del canal se escoge en sentido contrario al flujo



El siguiente paso es indicar los valores  $n$  de Manning, para las bancas izquierda, derecha y en el canal, mediante la opción Geometric Data>>Tables>>Manning's  $n$  or  $k$  values (horizontally varied).

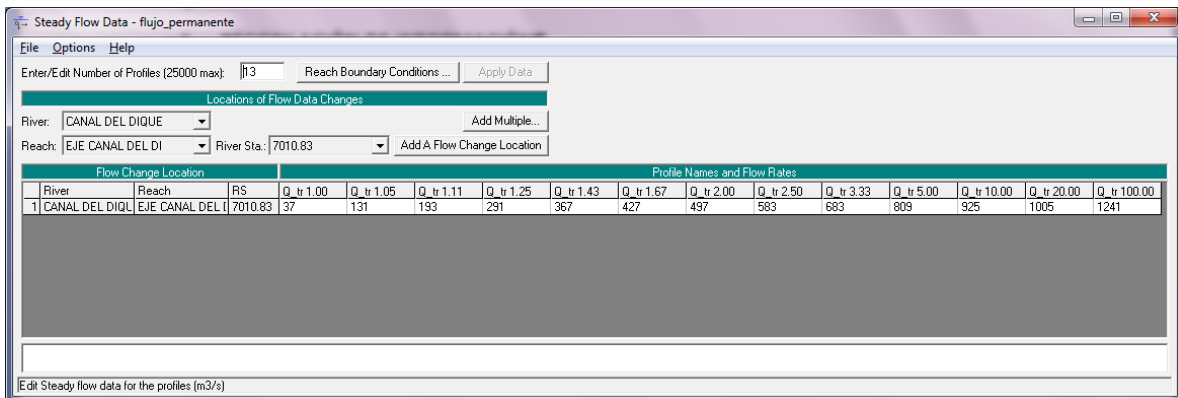
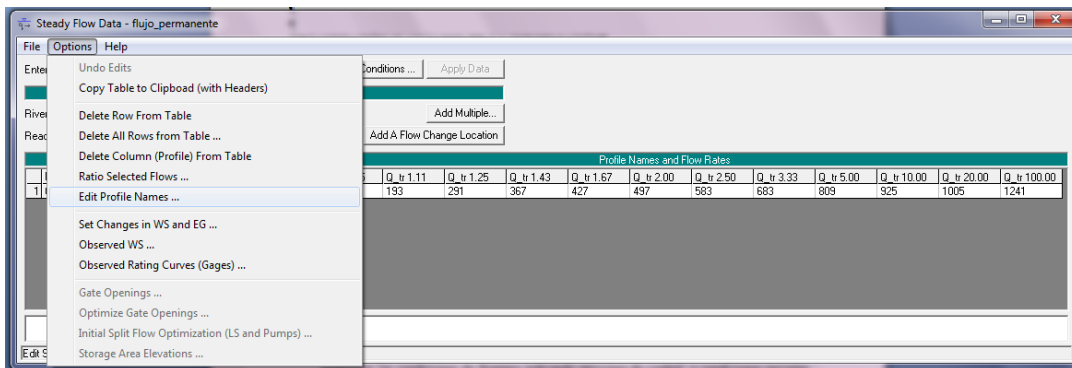


Ya se tiene la información completa en cuanto a geometría, se verifica en cualquier sección, que todos los parámetros requeridos estén completos.

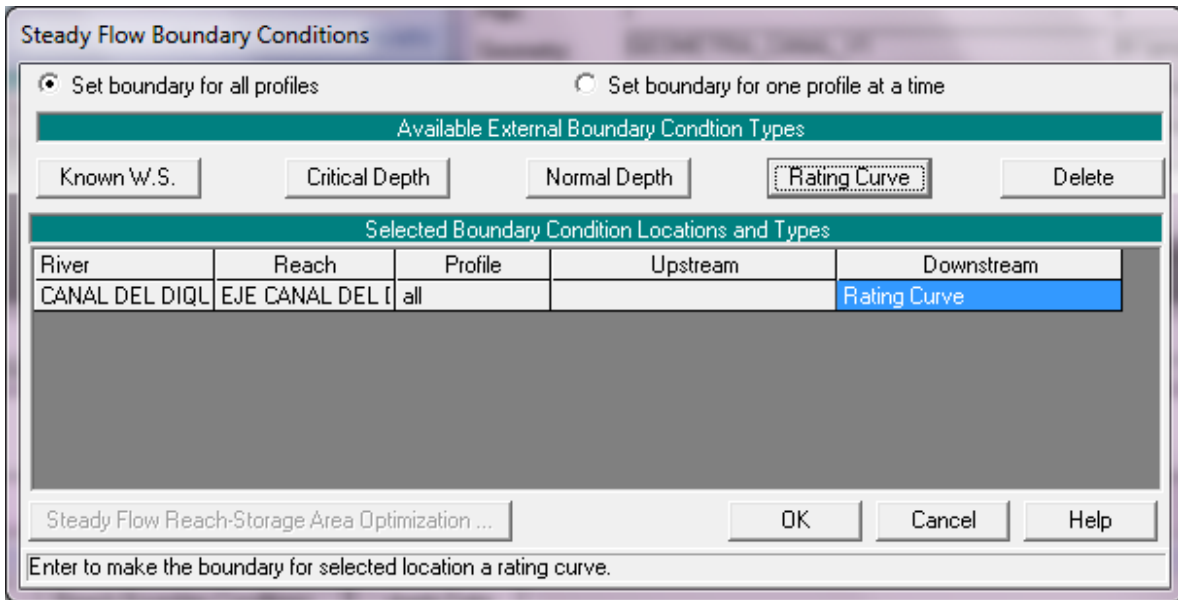


## 5.2 Flujo permanente

Para la simulación unidimensional con flujo permanente, inicialmente se indica el número de perfiles de flujo a generar, cada uno de estos perfiles corresponde a los caudales que se van a simular, en el numeral 4.3.2 se establecen los caudales y periodos de retorno de cada caudal, de acuerdo con su probabilidad de excedencia. En la opción SteadyFlow Data>>Options>>EditProfileNames, se pueden editar los nombre de los perfiles y así asignar el periodo de retorno correspondiente.



Se establecen las condiciones de frontera indicando las secciones de control, para este caso la curva de calibración que se tiene para la estación INCORA K7, en la sección aguas abajo ya que se tiene un régimen de flujo subcrítico.



HEC-RAS

Enter/Edit rating curve for downstream of reach: EJE CANAL DEL DI

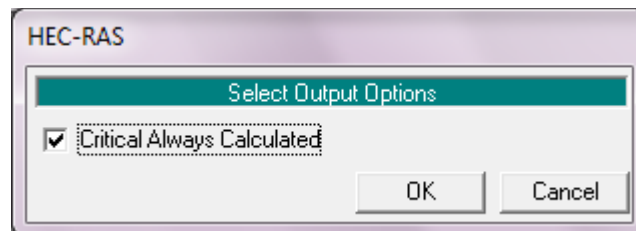
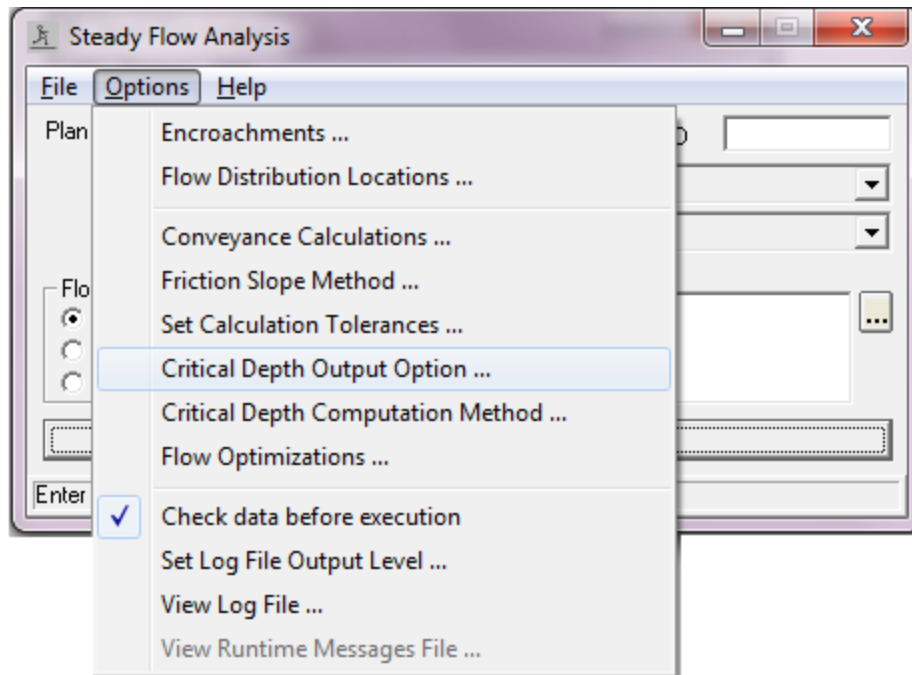
	Stage (m)	Flow (m <sup>3</sup> /s) ▲
1	0	0
2	0.73	37
3	2.06	131
4	2.69	193
5	3.53	291
6	4.09	367
7	4.5	427
8	4.94	497
9	5.45	583
10	6	683
11	6.5	809
12	6.93	925
13	7.21	1005
14	7.96	1241

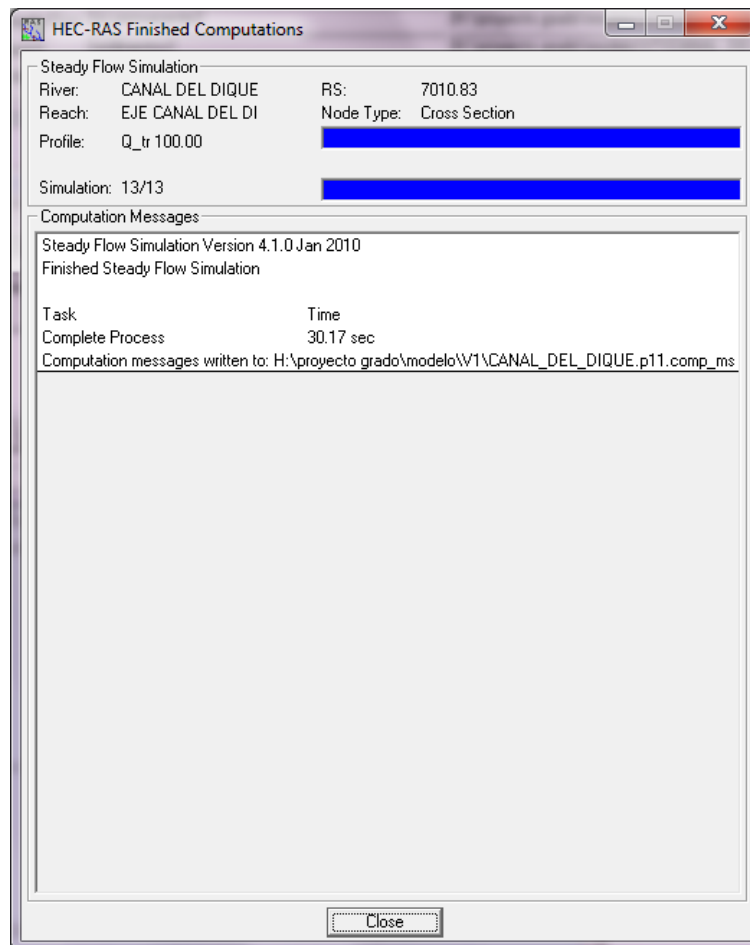
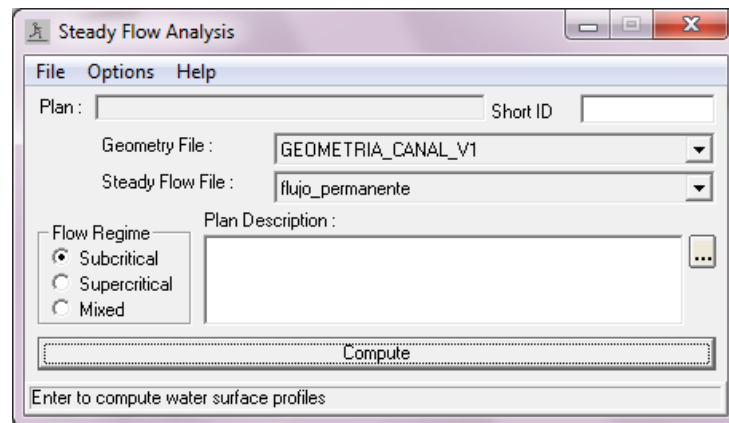
OK Cancel

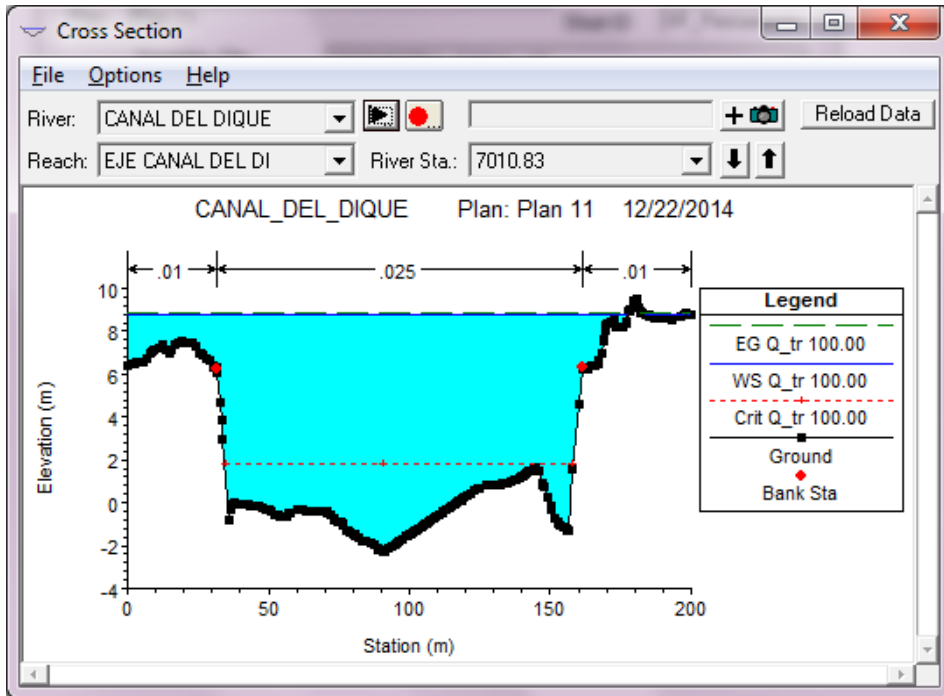
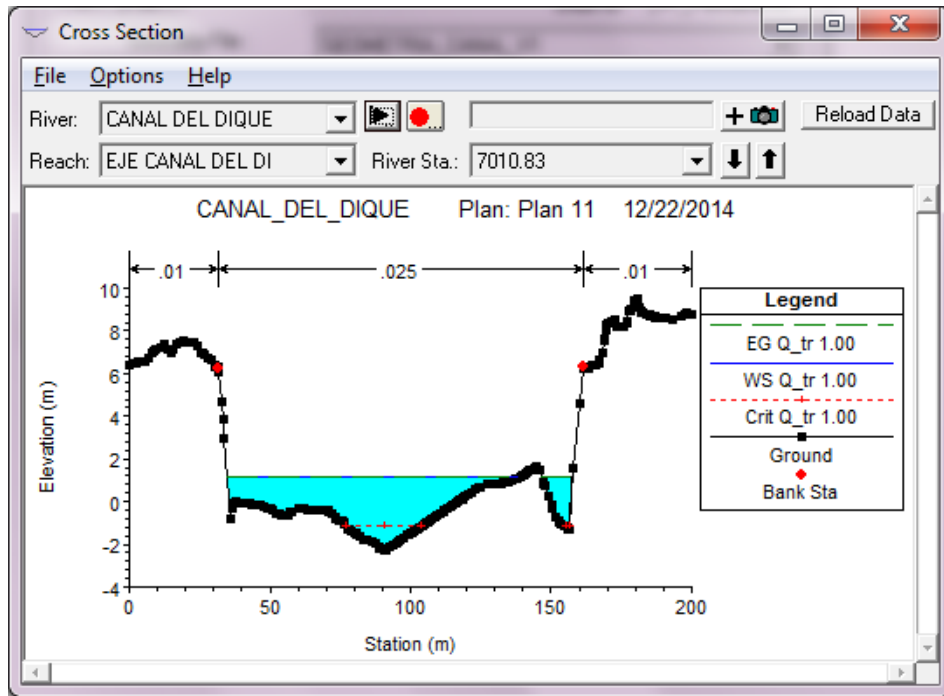
El siguiente paso es guardar las condiciones de flujo y se procede a correr el modelo escogiendo régimen de flujo subcrítico, en la opción Perform a steadyflowsimulation.

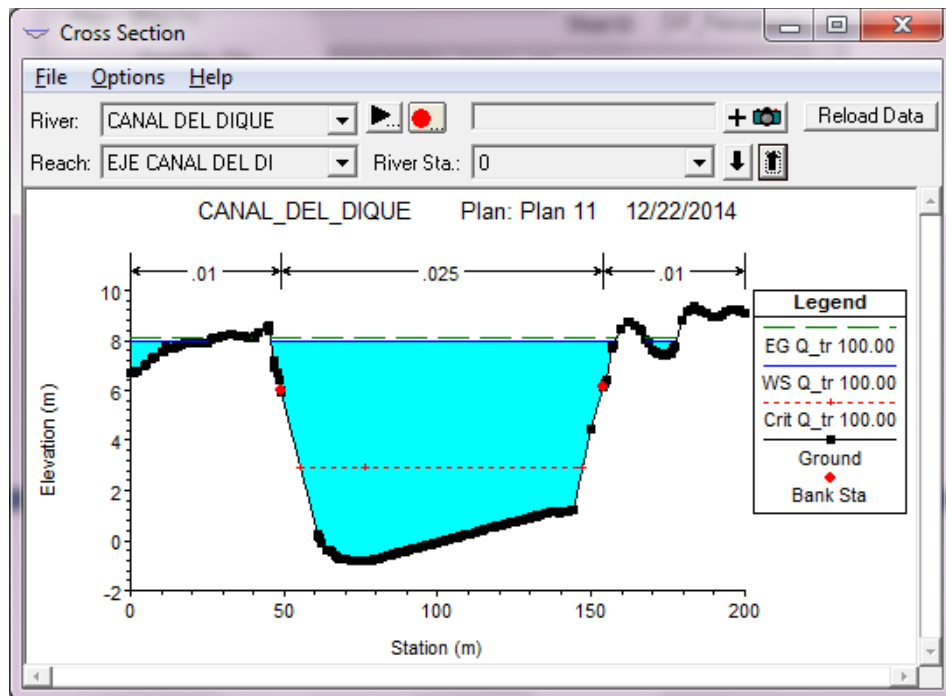
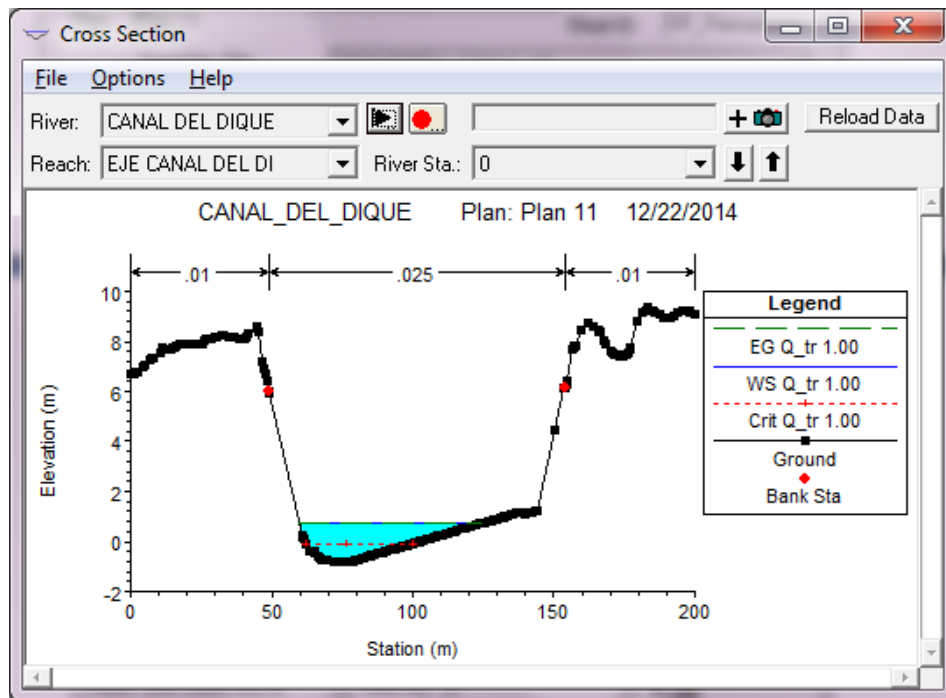


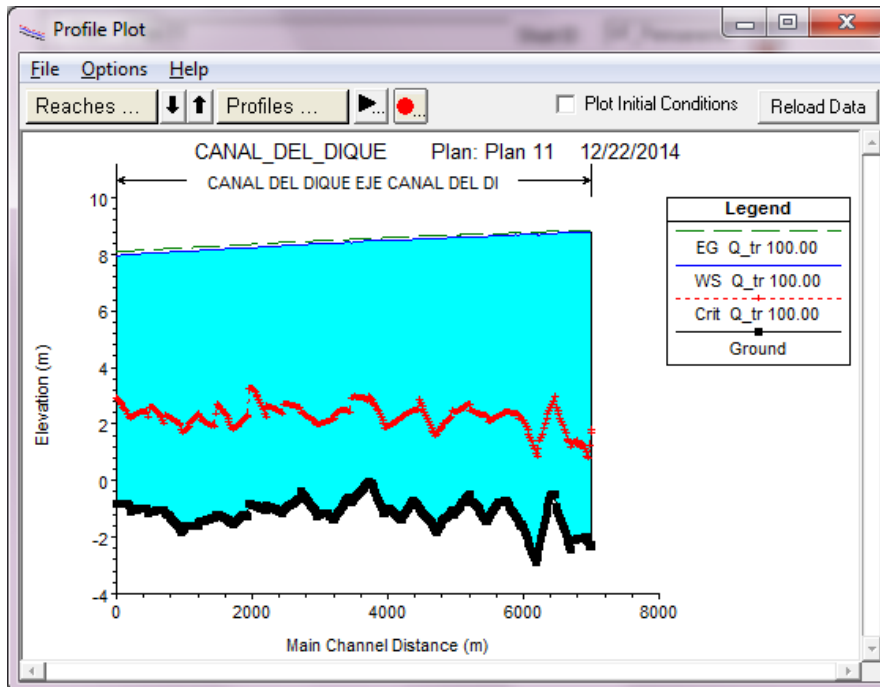
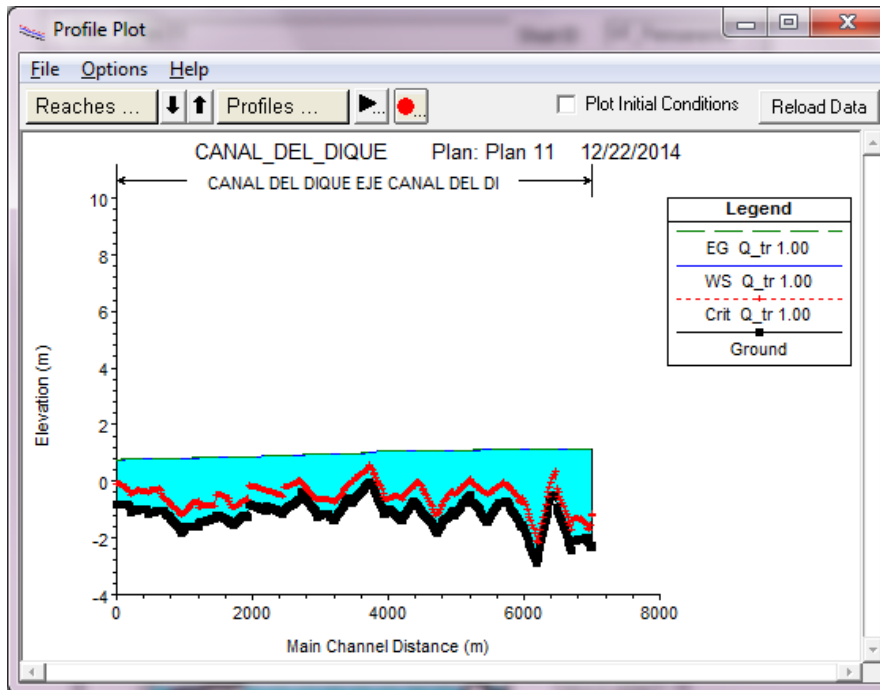
En el menú de opciones se habilita la opción de que siempre se calcule la profundidad crítica, SteadyFlowAnalysis>>options>>CriticalDepth Output Option.

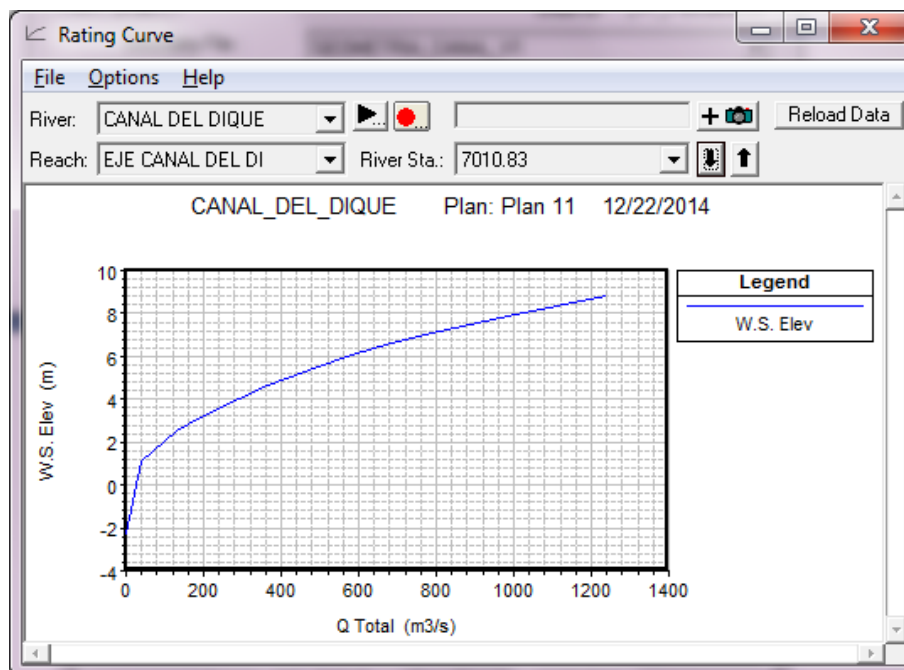
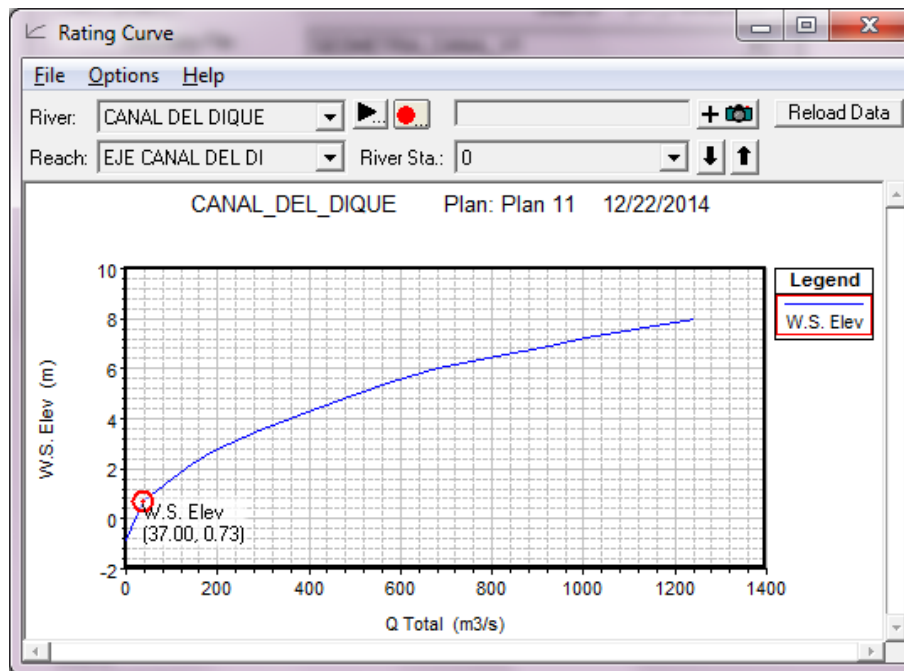


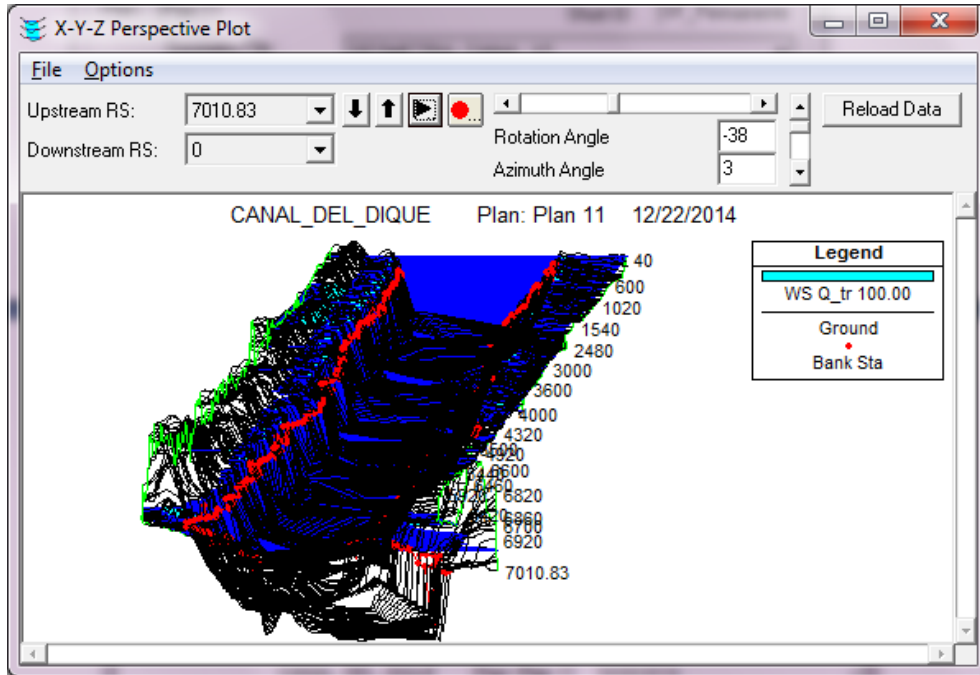
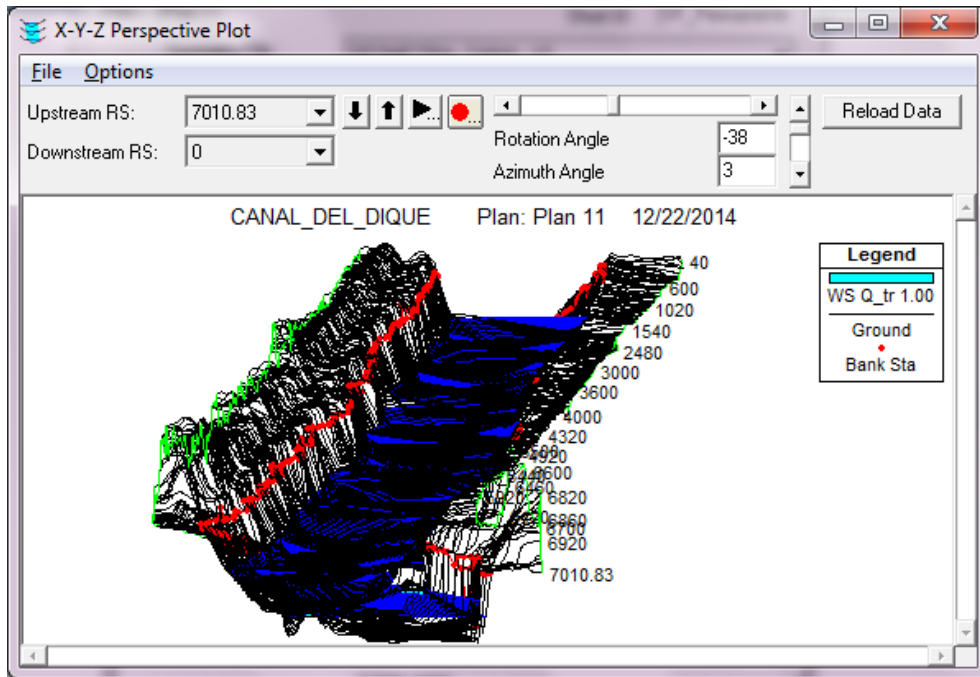












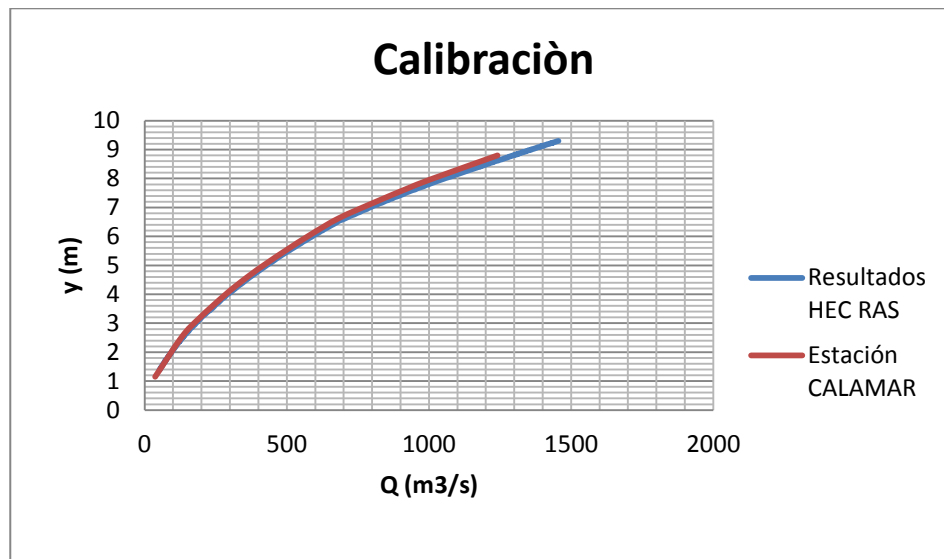
### 5.2.1 Análisis de resultados

Bajo el rango de caudales indicado en el numeral 4.3.2 se realizó la calibración del modelo HEC-RAS asignando valores  $n$  de Manning hasta que el modelo reprodujera correctamente las curvas de caudal/nivel medidas en la estación hidrométrica de CALAMAR. En resumen fue necesario incrementar el valor de este parámetro de 0.019 (constante a lo largo del canal) a 0.025 y en las bancas se asignó un valor de 0.01. Las tablas y figuras a continuación, muestran una calibración adecuada en el modelo HEC-RAS con respecto a la información tomada de la estación CALAMAR.

Tabla 6. Comparación de resultados HEC RAS vs Datos Estación de Calamar

Resultados HEC RAS		Estación CALAMAR	
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Nivel (m.s.n.m)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Nivel (m.s.n.m)
37	1.15	37	1.00
131	2.53	131	2.48
193	3.18	193	3.13
291	4.05	291	4.00
367	4.64	367	4.57
427	5.06	427	4.99
497	5.52	497	5.45
583	6.06	583	5.96
683	6.63	683	6.53
809	7.18	809	7.07
925	7.66	925	7.53
1005	7.97	1005	7.82
1241	8.8	1241	8.62





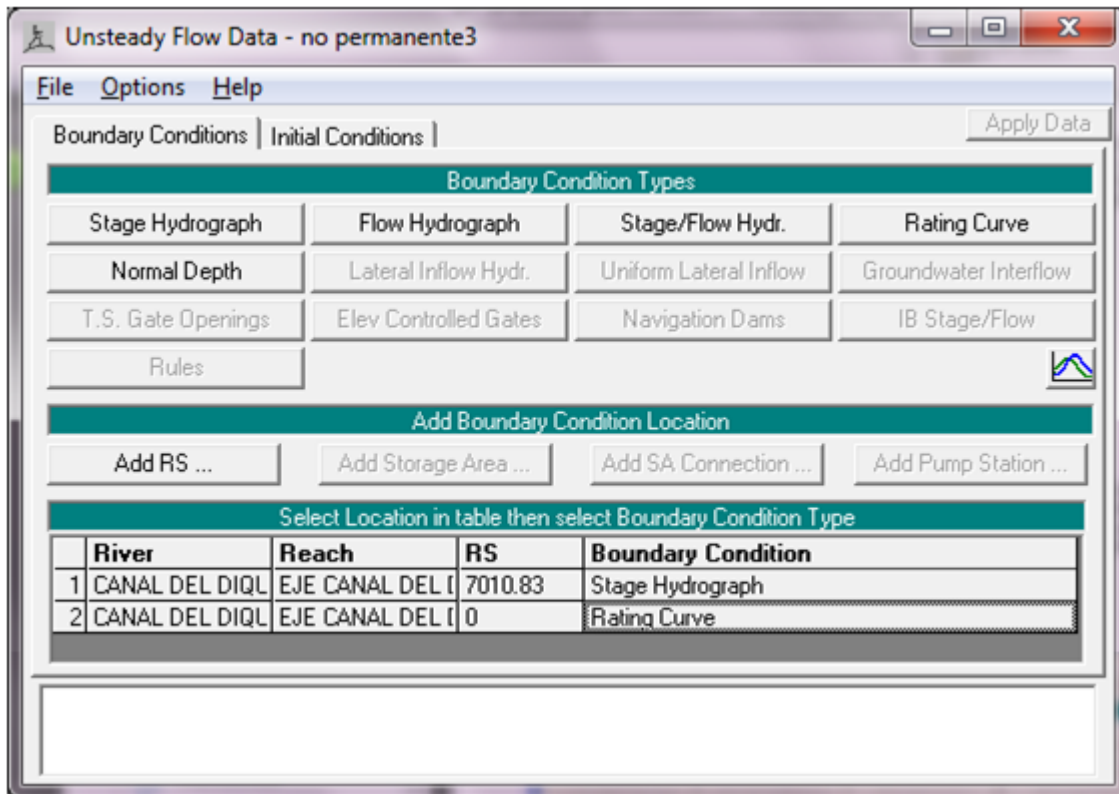
**Figura 8. Calibración Modelo HEC RAS**

El coeficiente de correlación correspondiente a los niveles obtenidos de HEC RAS y los datos de la estación Calamar es 0.99988, muy cercano a 1 lo cual indica que los datos obtenidos como resultado, representan adecuadamente los datos medidos en la estación de Calamar.

### 5.3 Flujo no permanente

Se procede con el análisis del modelo en flujo no permanente con la Geometría del numeral 5.1. Inicialmente se debe escoger la opción de UnsteadyFlow Data, de la ventana principal de HEC RAS.

Como condición de frontera aguas abajo en la sección “0”, se tiene la curva de calibración de la estación INCORA K7, en la sección aguas arriba se tiene el hidrograma de niveles medidos en la estación de calamar para el año 2010 (numeral 4.3.1), los cuales corresponden a la sección 7010.83.



Para ingresar la información a HEC RAS, es de gran ayuda tener los datos en Excel, copiarlos y pegarlos, teniendo en cuenta que se tenga el mismo número de filas seleccionadas en la ventana de “StageHydrograph” antes de pegar los datos. Para adicionar más filas se debe escoger la opción “No. Ordinates” en la ventana de “StageHydrograph” para este caso son 365 filas.

Stage Hydrograph

River: CANAL DEL DIQUE Reach: EJE CANAL DEL DI RS: 7010.83

Read from DSS before simulation Select DSS file and Path

File:

Path:

Enter Table Data time interval: 1 Day

Select/Enter the Data's Starting Time Reference

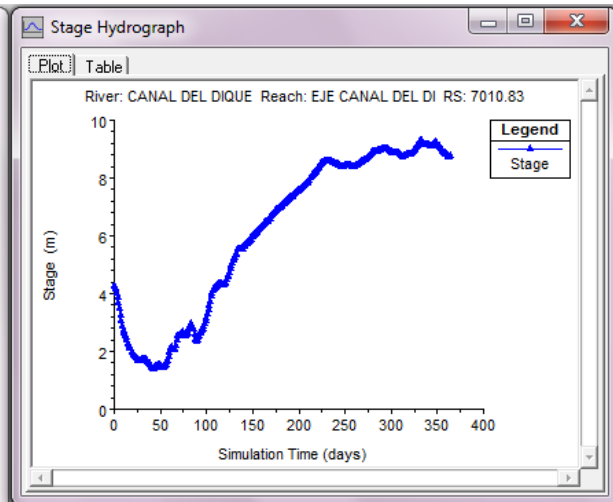
Use Simulation Time: Date:  Time:

Fixed Start Time: Date: 31DEC2010 Time: 2400

No. Ordinates Interpolate Missing Values Del Row Ins Row

Hydrograph Data			
	Date	Simulation Time (hours)	Stage (m)
1		00:00	4.235
2		24:00	4.2
3		48:00	4.12
4		72:00	3.99
5		96:00	3.84
6		120:00	3.655
7		144:00	3.46
8		168:00	3.26
9		192:00	3.07
10		216:00	2.87

Plot Data OK Cancel



Rating Curve

River: CANAL DEL DIQUE Reach: EJE CANAL DEL DI RS: 0

Read from DSS before simulation Select DSS file and Path

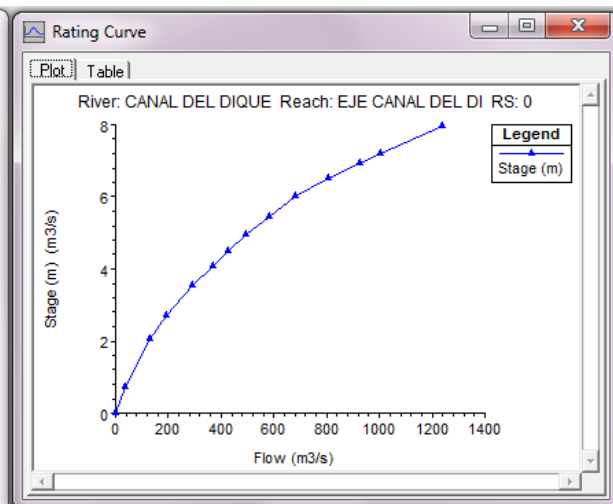
File:

Path:

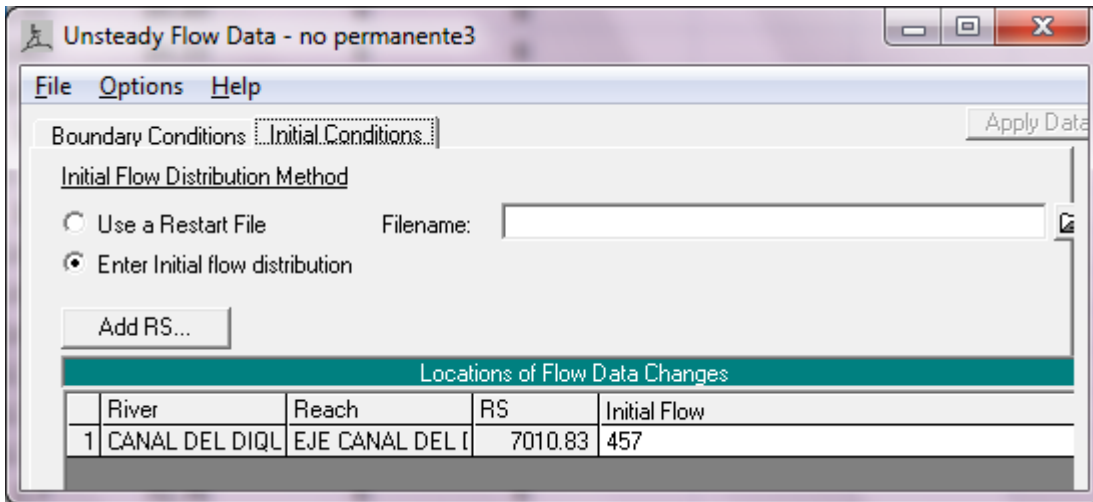
Enter Table Del Row Ins Row

Hydrograph Data		
	Stage (m)	Flow (m3/s)
1	0.	0.
2	0.73	37.
3	2.06	131.
4	2.69	193.
5	3.53	291.
6	4.09	367.
7	4.5	427.
8	4.94	497.
9	5.45	583.
10	6.	683.
11	6.5	809.
12	6.93	925.
13	7.21	1005.
14	7.96	1241.

Plot Data OK Cancel



Como condición inicial se tiene un caudal de 457m<sup>3</sup>/s.



El siguiente paso es correr el programa escogiendo un  $\Delta t$  apropiado de acuerdo con las condiciones establecidas para el canal.

Para calcular  $\Delta t$  se considera como un canal ancho y se calcula cada uno de los términos para esas condiciones, se escoge un  $Q$  medio=497m<sup>3</sup>/s correspondiente a un caudal con una probabilidad de 50% de ser igualado o superado, un ancho promedio de 130m, una pendiente de la línea de energía de 0.00003 m/m la cual fue determinada en la simulación de flujo permanente para ese caudal  $Q=497$ m<sup>3</sup>/s en la sección “7010.83”. De acuerdo con estos parámetros de determina la profundidad de flujo “y”, la velocidad de la onda cinemática y se calcula un  $\Delta t$  apropiado para cumplir la condición del número de Courant  $\leq 1$ .

$$C_r = C_k \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1$$

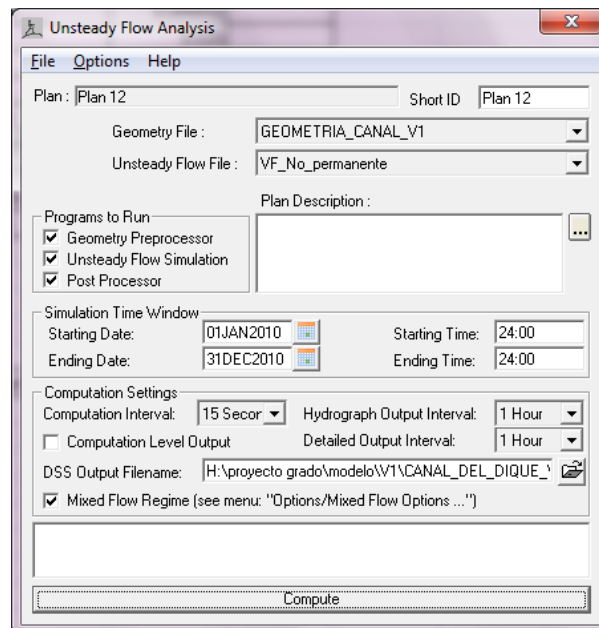
$$y = \left( \frac{nQ}{C_o S^{1/2} B} \right)^{3/5}$$

$$c_k = \frac{1}{T} \frac{dQ}{dy} = \left( \frac{C_o}{n} S^{1/2} \right) \left( \frac{5}{3} \right) y^{2/3}$$

Tabla 7. Cálculo del número de Courant

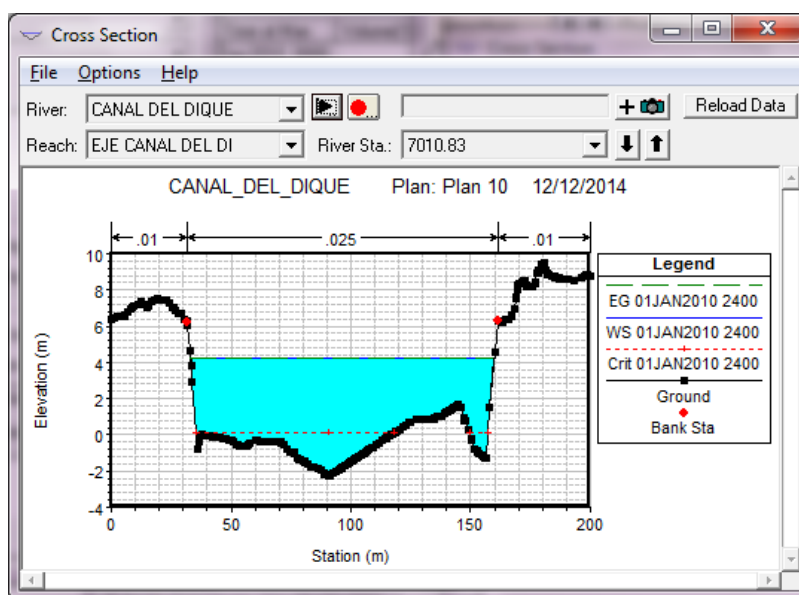
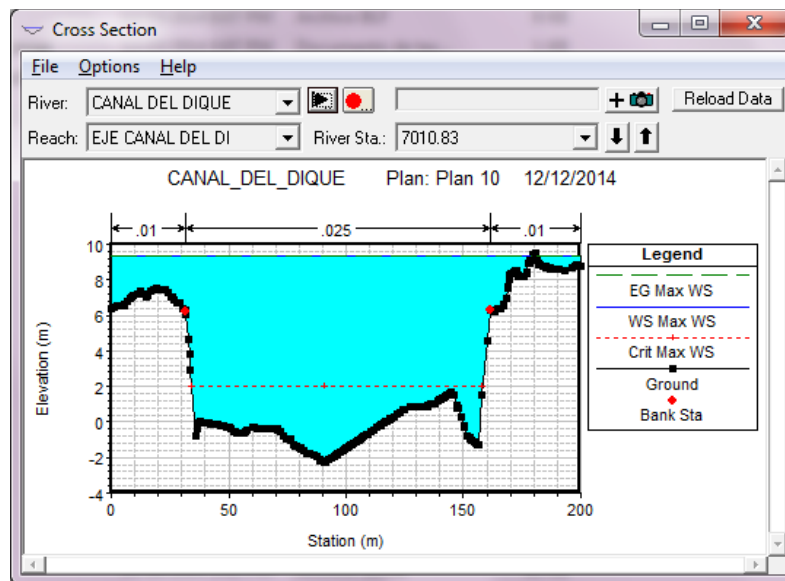
Considerando Canal Ancho		
Long	7000.00	m
B	130.00	m
Z	1.50	
So	0.00003	
n	0.025	
T	130.00	m
Y	5.56	m
Ck	1.15	m/s
$\Delta x$	20.00	m
$\Delta t$	15.00	s
Qmedio	497.00	m <sup>3</sup> /s
Cr	0.86	

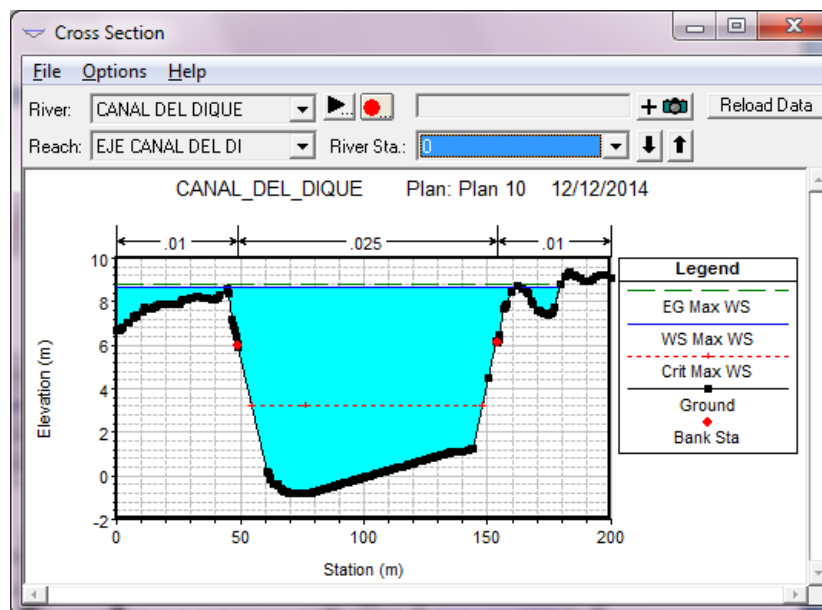
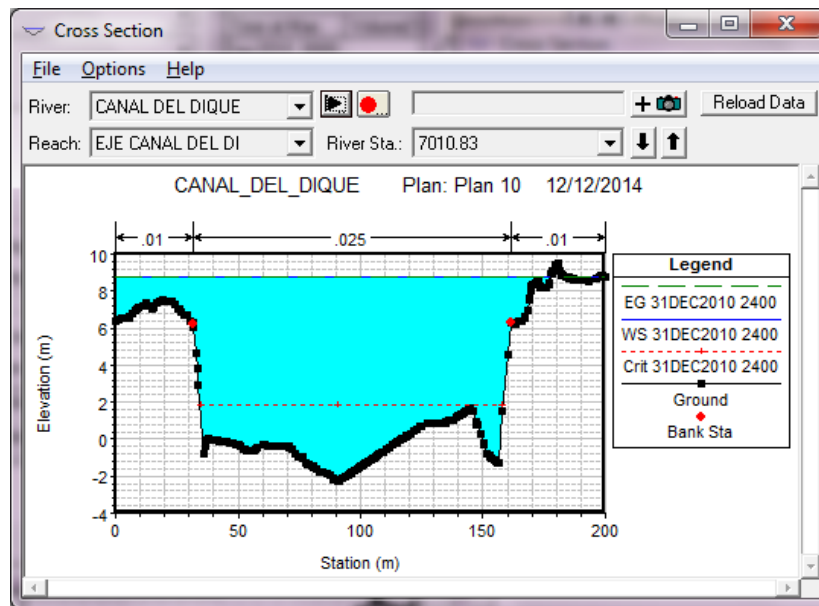
Para cumplir con la condición de Courant,  $\Delta t$  debe ser igual a 15s, ya que las secciones transversales están cada 20m, la velocidad cinemática de onda es 1.15m/s y el caudal medio es de 497m<sup>3</sup>/s.

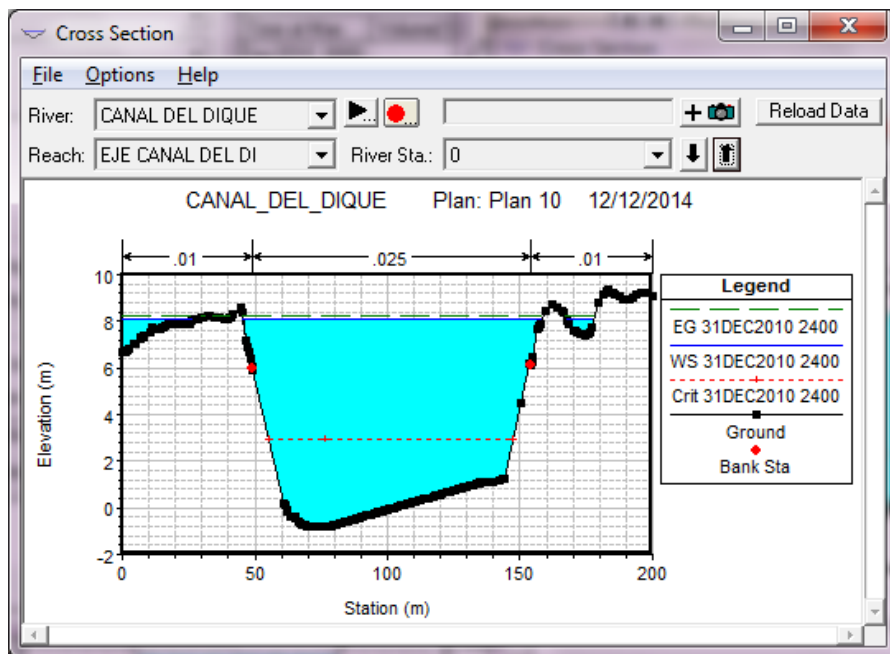
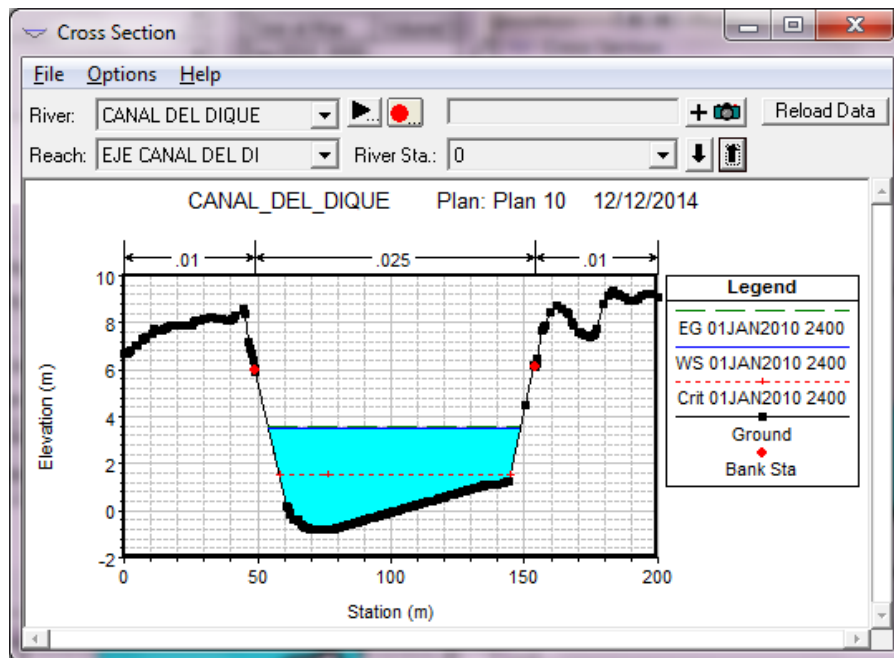


### 5.3.1 Análisis de resultados

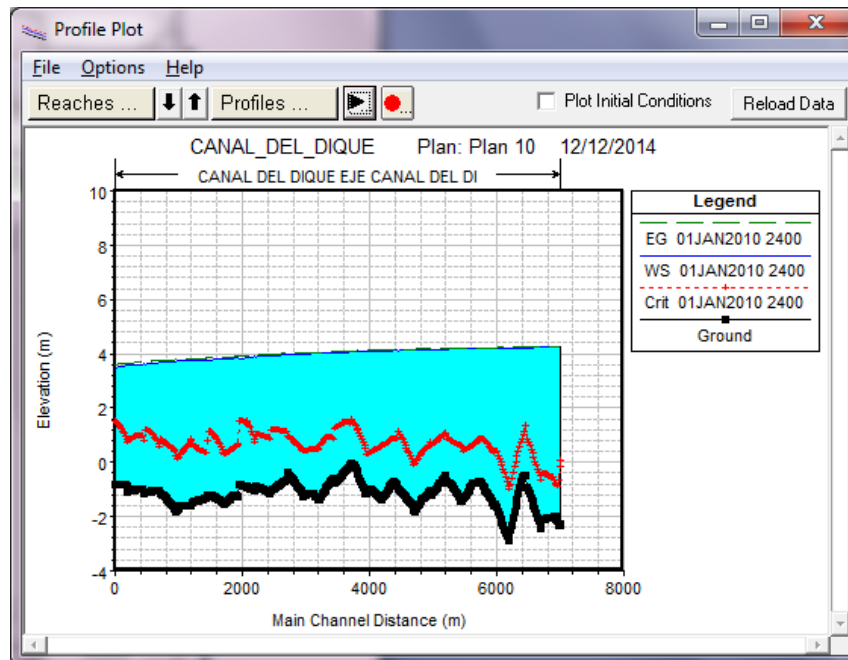
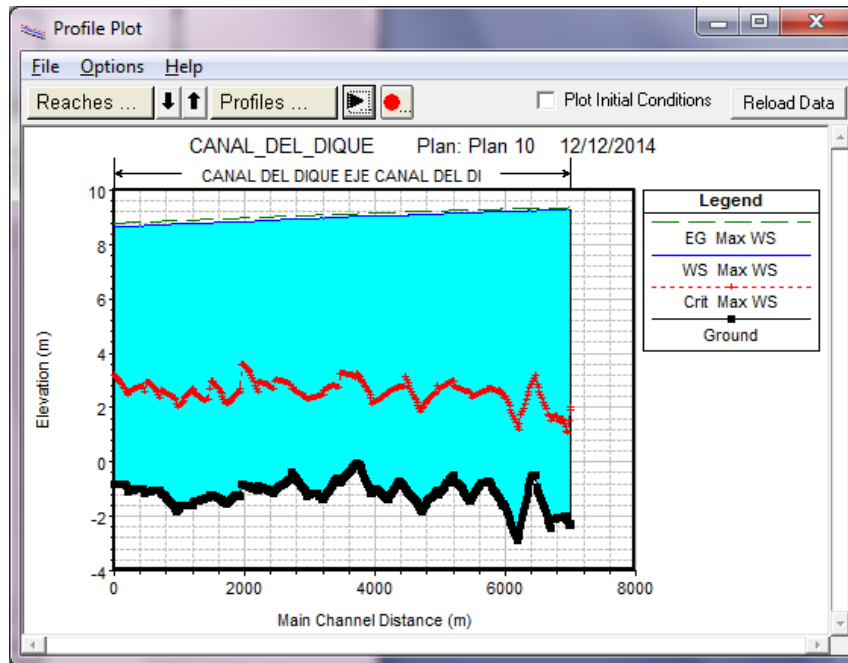
A continuación se muestran los resultados de la modelación en HEC-RAS para flujo no permanente. Se muestran los resultados de la modelación de las secciones transversales “0” y la “7010”, el perfil longitudinal, para el nivel de aguas máximo, 1 de Enero y 31 de Diciembre de 2010, curva de calibración de las secciones transversales “0” y la “7010”, una perspectiva en 3D de todo el canal y los hidrogramas de caudales y niveles de entrada y salida.

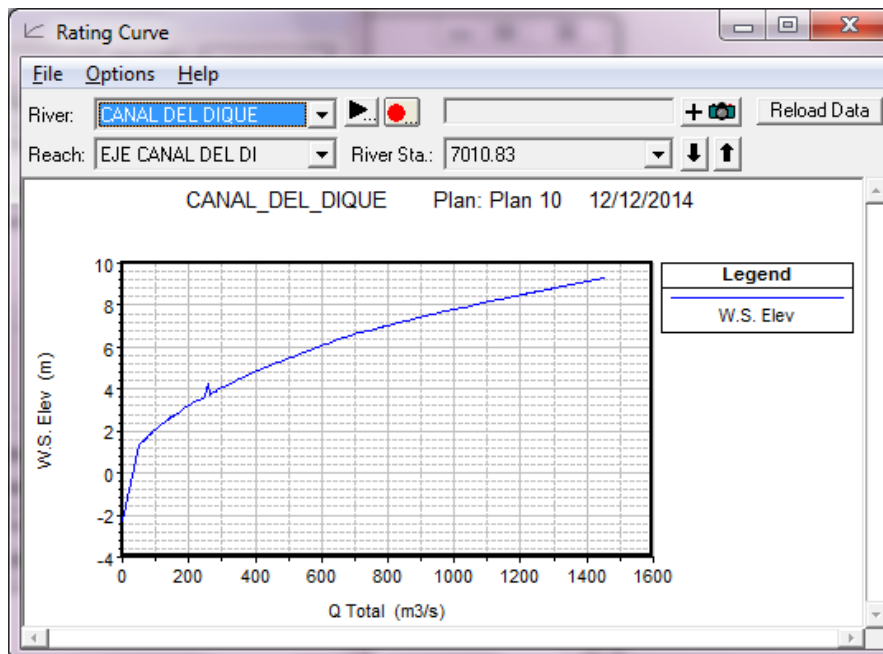
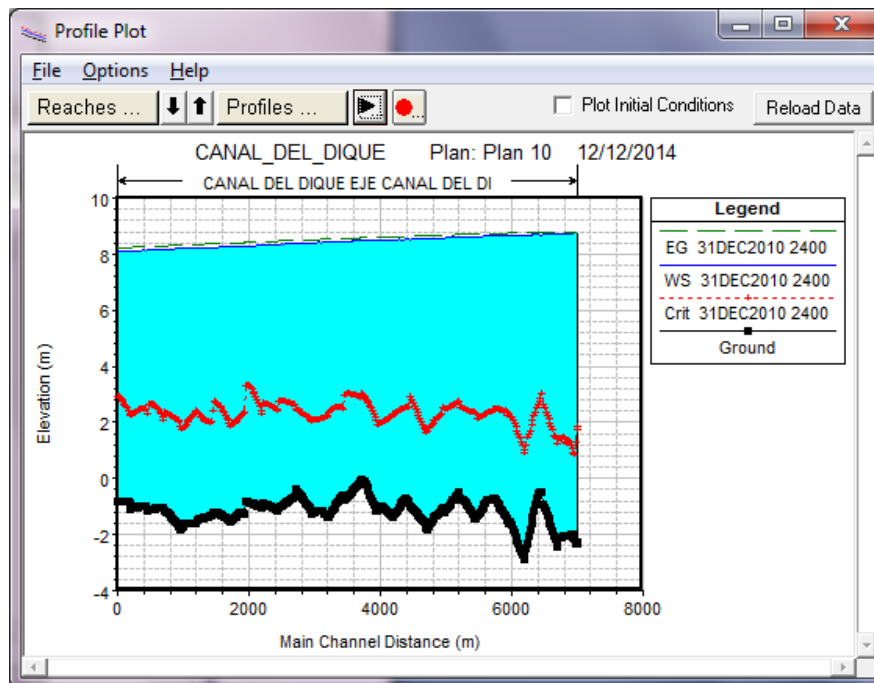


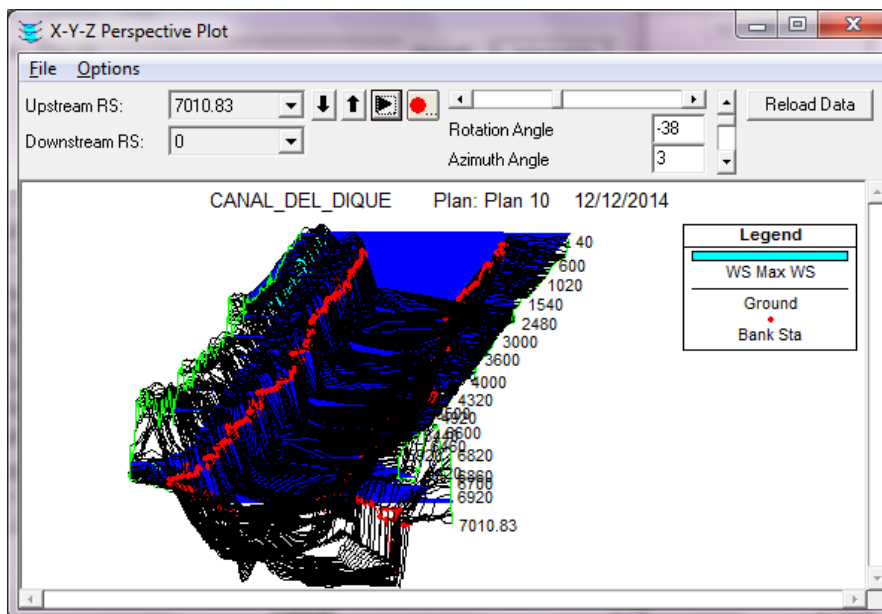
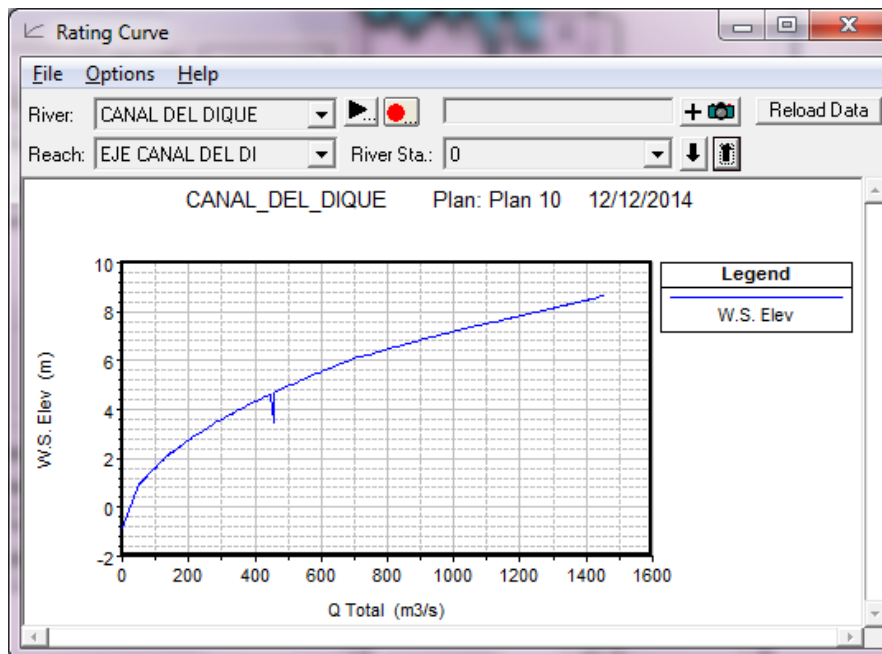


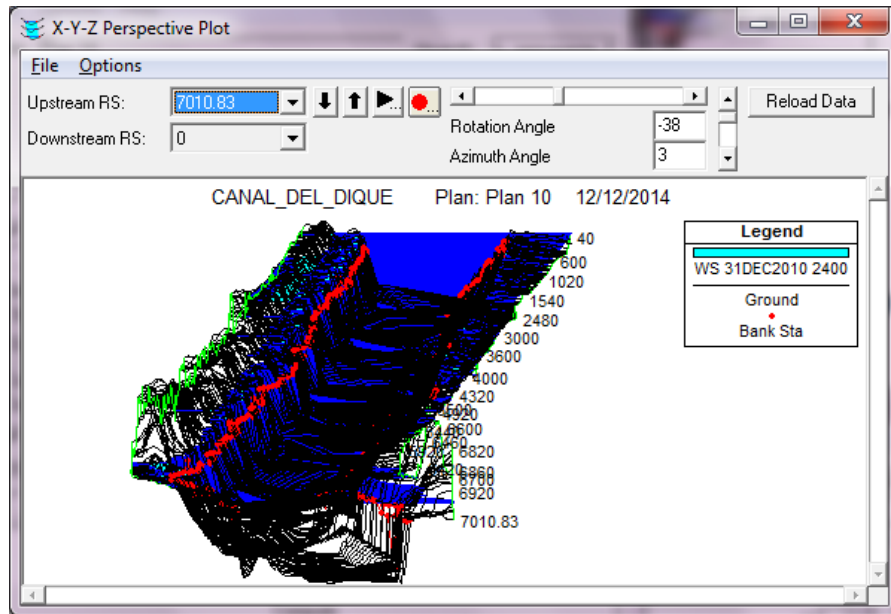
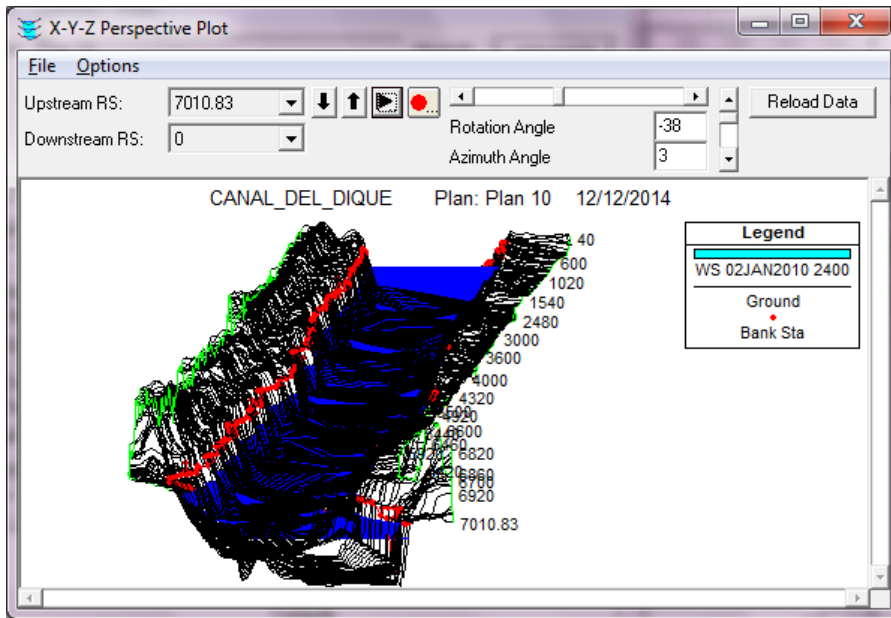


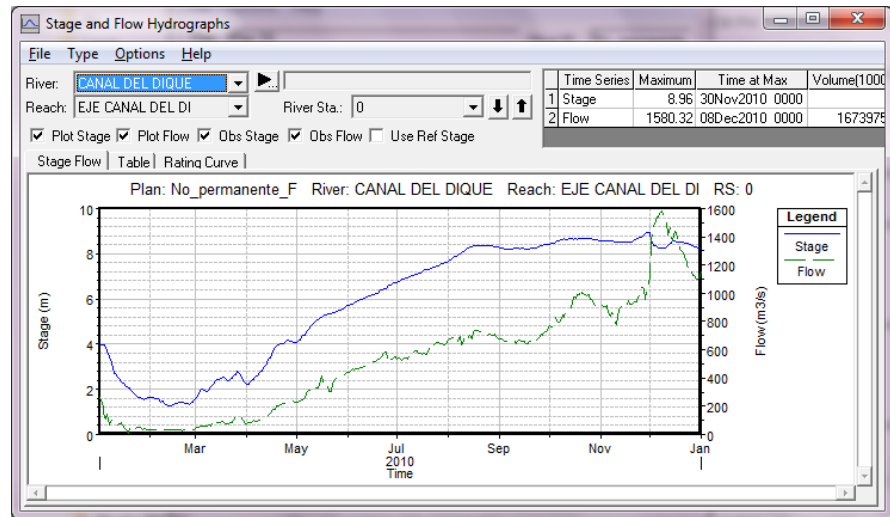
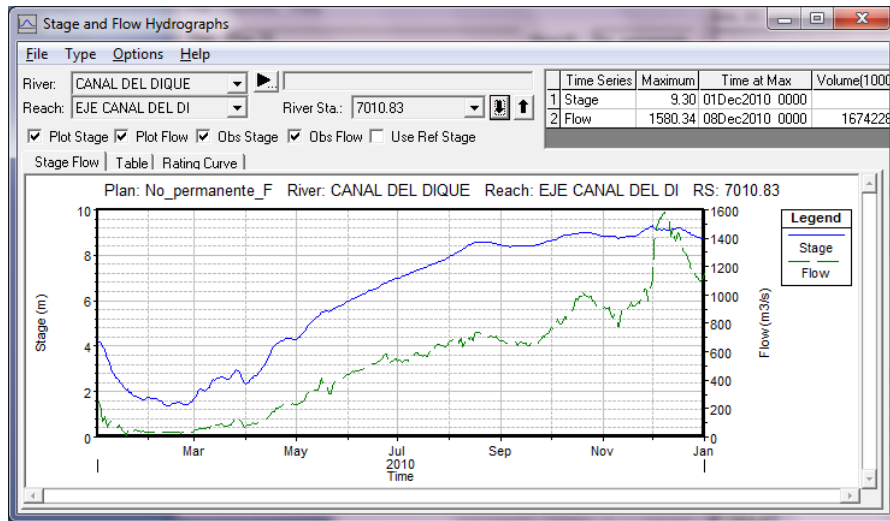




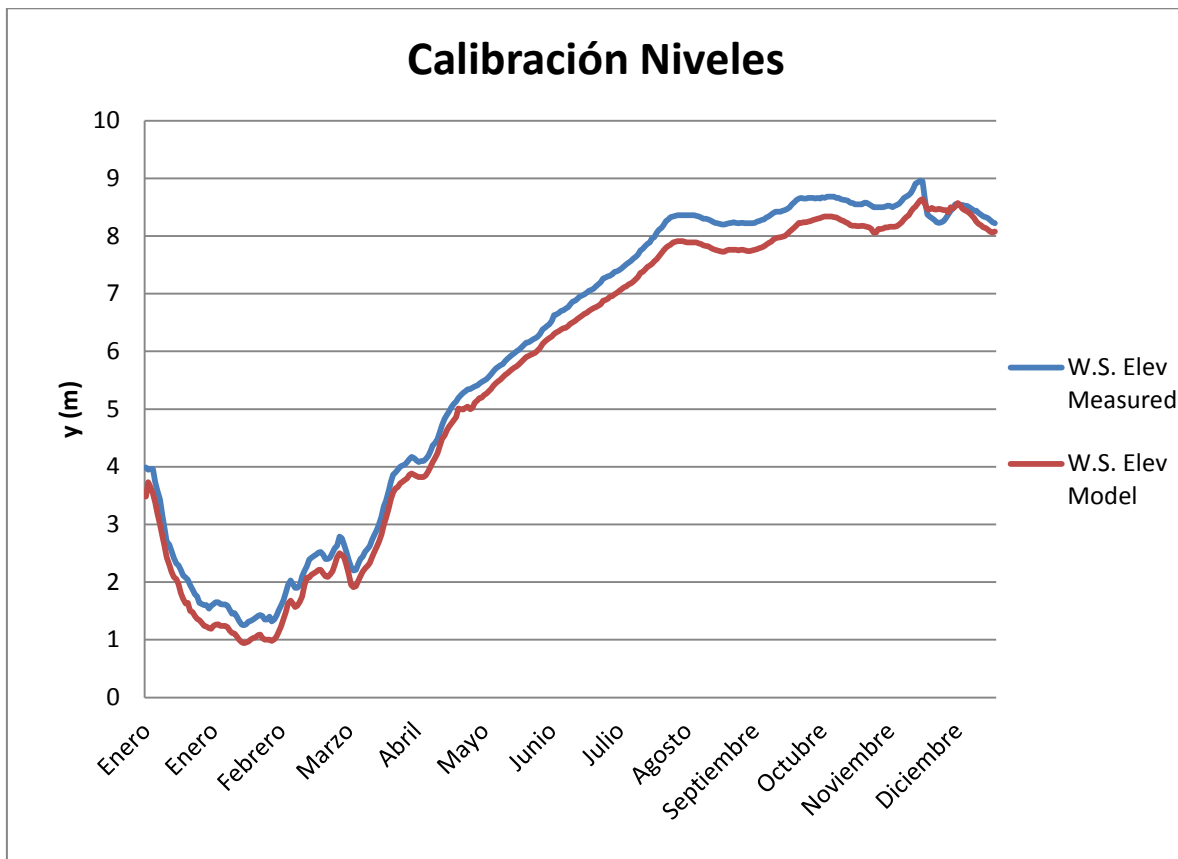








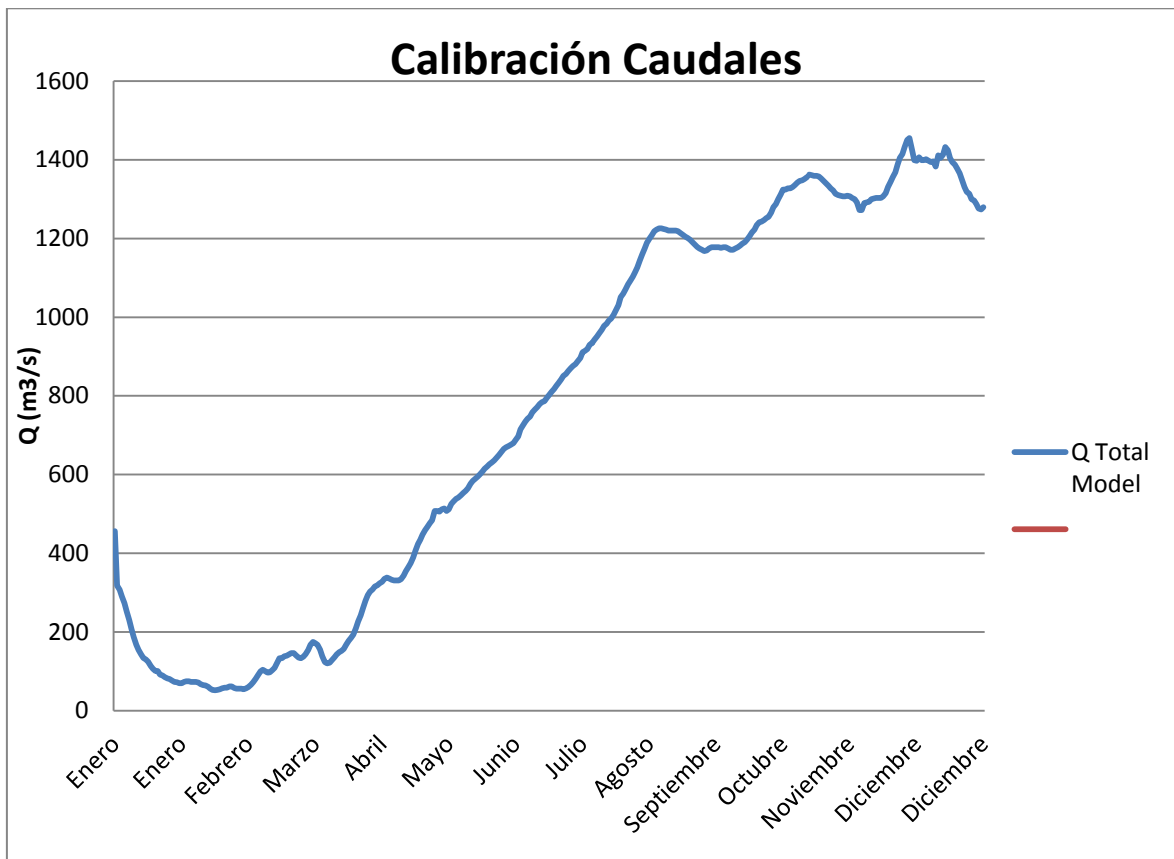
Con la información de niveles y caudales del numeral 4.3.2 se realizó la calibración del modelo HEC-RAS asignando valores  $n$  de Manning hasta que el modelo reprodujera correctamente las curvas de caudal/nivel medidas en la estación hidrométrica de INCORA-K7. Las figuras a continuación, muestran una calibración adecuada en el modelo HEC-RAS con respecto a la información tomada de la estación INCORA-K7.



**Figura 9. Calibración de niveles Modelo HEC RAS Flujo no permanente “Sección-0”**

El coeficiente de correlación correspondiente a los niveles obtenidos de HEC RAS en la sección aguas abajo “sección-0” y los datos de la estación INCORA-K7 es 0.99894, muy cercano a 1, lo cual indica que los datos obtenidos como resultado, representan adecuadamente los datos medidos en la estación de INCORA-K7, para las condiciones de flujo no permanente.

En general los datos obtenidos siguen la misma tendencia y se presentan diferencias de niveles medidos y los obtenidos del modelo máximas de 0.51m. El nivel pico se presenta el 30 de Noviembre y tiene un valor de 8.64 m.s.n.m, se tiene una diferencia de 0.66m con respecto al hidrograma de entrada aguas arriba en la sección 7010.



**Figura 10. Calibración de caudales Modelo HEC RAS Flujo no permanente “Sección-0”**

El coeficiente de correlación correspondiente a los caudales obtenidos de HEC RAS en la sección aguas abajo “sección-0” y los datos de la estación INCORA-K7 es 0.99266, muy cercano a 1, lo cual indica que los datos obtenidos como resultado, representan adecuadamente los datos medidos en la estación de INCORA-K7, para las condiciones de flujo no permanente.

El caudal pico se presenta el 30 de Noviembre y tiene un valor de 1455.19 m<sup>3</sup>/s, se tiene una diferencia de 0.21m<sup>3</sup>/s con respecto al hidrograma de entrada aguas arriba en la sección 7010.

De acuerdo con los resultados obtenidos del modelo HEC-RAS, para los meses entre Enero a Junio, los datos siguen la misma tendencia y son muy similares, a partir de Julio los datos obtenidos se alejan de los datos medidos en la estación debido a que la curva

de calibración no contempló los niveles hasta el periodo 2010, sólo para el periodo 1967-2000. Se puede apreciar que desde el mes de Julio inicia el evento extremo que aumentó los niveles.

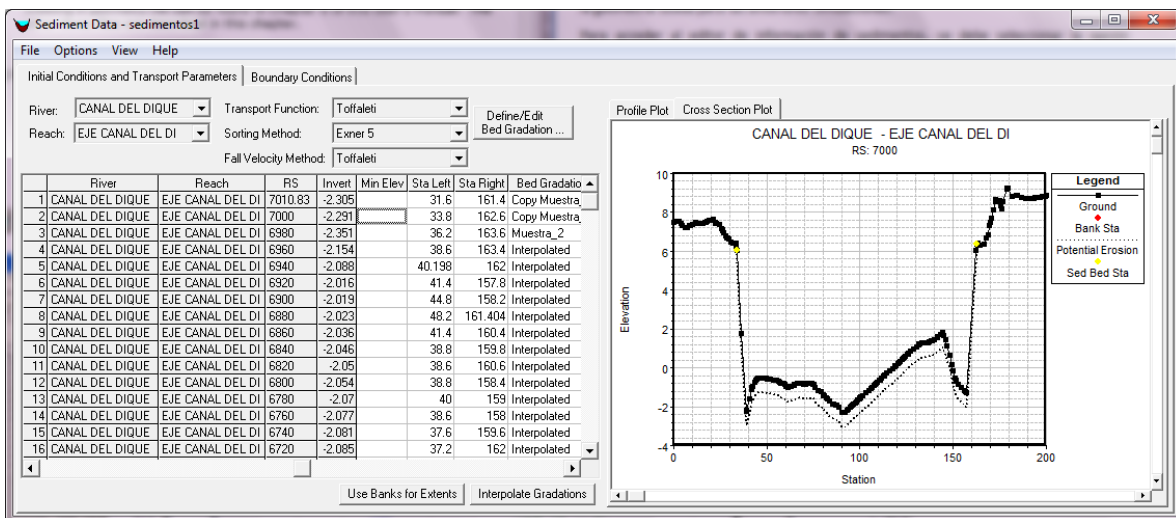
En el momento de obtener este resultado, se llevaron a cabo otras alternativas de condiciones de frontera en la sección aguas abajo con el fin de optimizar los resultados obtenidos del modelo HEC-RAS, cambiando la curva de calibración por el hidrograma de niveles y caudales para el año 2010 de la estación INCORA-K7 y modificando la geometría del canal, cambiando el  $n$  de Manning en las secciones transversales. Corriendo el programa bajo estas condiciones, se tiene un coeficiente de correlación de 1 para los niveles, pero para los caudales un coeficiente de 0.91145 el cual es inferior al obtenido con la alternativa de la curva de calibración como condición de frontera aguas abajo en la “sección 0”.



## 5.4 Transporte de sedimentos

Para modelar el lecho móvil y transporte de sedimentos con HEC-RAS, se toma como base la geometría usada para las anteriores simulaciones.

Para acceder al editor de información de sedimentos, se debe seleccionar la opción “**Sediment Data**” del menú de la ventana principal de HEC-RAS.



### -Condiciones iniciales y parámetros de transporte

Con el fin de comparar el resultado de la modelación de transporte de sedimentos usando diferentes funciones, se crean 5 archivos de condiciones de sedimentos y a cada uno se le asigna una función de transporte diferente, los archivos tienen el siguiente nombre:

Tabla 8. Condiciones de la opción “Sediment Data”

Archivo	Función de transporte
Sedimentos 2	Toffaleti
Sedimentos 3	Meyer Peter Muller
Sedimentos 4	Yang
Sedimentos 5	Ackers White
Sedimentos 6	England Hansen

Función de transporte: Se selecciona la función de transporte en cada uno de los archivos correspondientes.

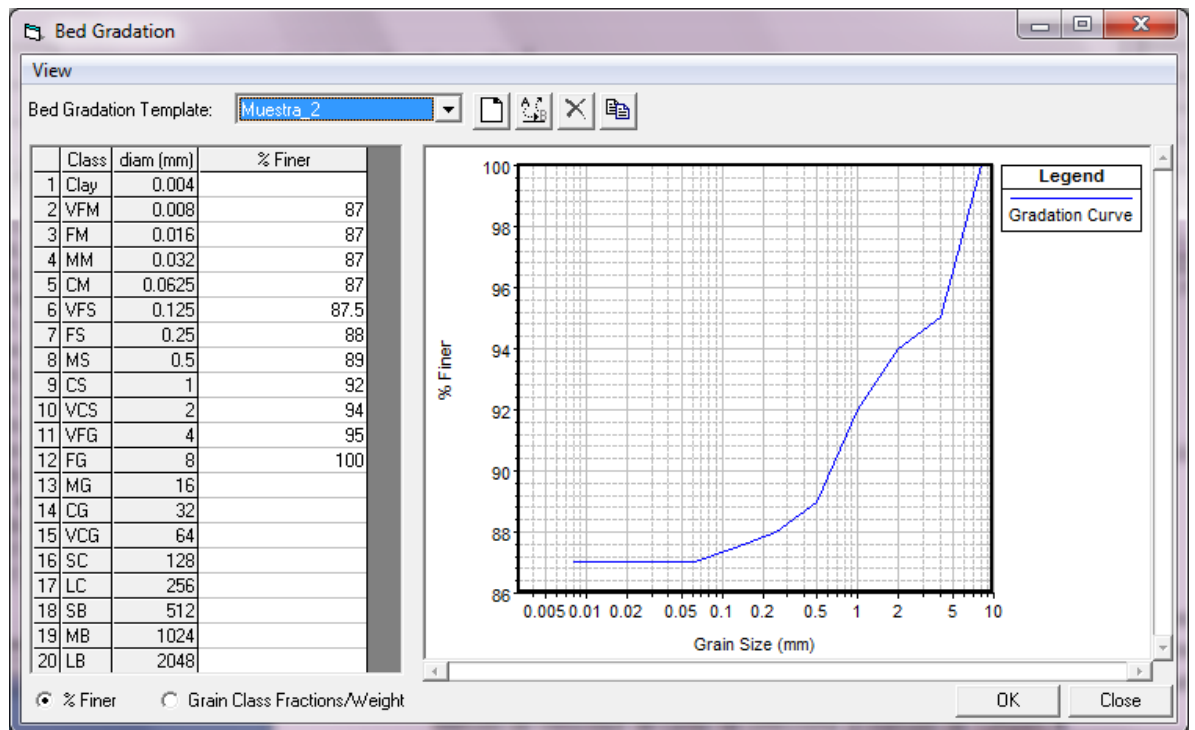
Método de acorazamiento: Exner 5, Un modelo de lecho de tres capas activas que incluyen la capacidad de formar una superficie de material grueso que limita la erosión del material que está más profundo, simulando con ello acorazamiento del lecho.

Método de Velocidad de caída: Se selecciona el método de Toffaleti.

Para cada una de las secciones transversales se indica un límite o profundidad para el volumen de control asociado a cada sección transversal.

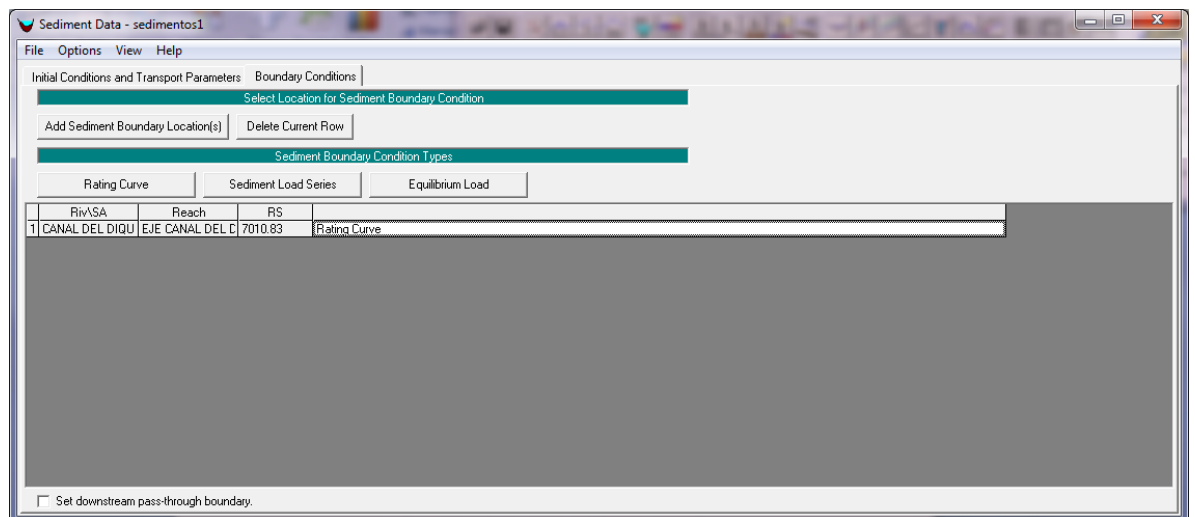
Como límite móvil de las secciones transversales o ancho de los límites del volumen de control, se escogen las bancas de cada sección, mediante la opción “Use Banks forExtents”

Para definir la gradación del lecho se usa la opción “Define/Edit-BedGradation”, una vez en la ventana BedGradation, se van creando las curvas granulométricas correspondientes a los sitios donde se llevaron a cabo ensayos “in situ” y de esa misma manera se indica sección a la cual corresponde la curva granulométrica en la ventana “**Sediment Data**” en la columna Bedgradation. Para cada uno de estos ensayos in situ se tiene el porcentaje de finos, por lo tanto se asumen valores de porcentaje de tamaño acumulado, para los demás tamaños.



-Condiciones de frontera

En la ventana “Sediment Data” Boundary conditions, como condición de frontera se usa la opción de una curva de calibración en la sección 7010, correspondiente a la información del numeral 4.3.3.2.



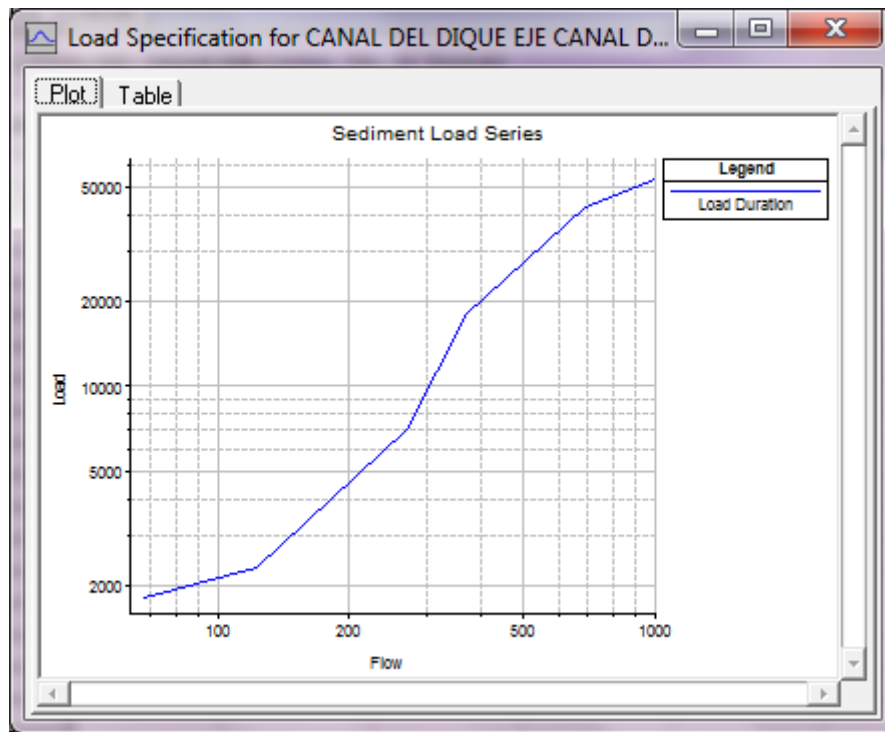
Esta curva de calibración determina el flujo de entrada de sedimentos basado en el flujo de entrada de agua. Al elegir la opción de curva de calibración aparece la ventana del editor de especificación de la carga “Load Specification”. Cada columna tiene un flujo y una carga total asociada en (ton/día). La gradación característica de la carga total de sedimentos debe ser especificada en cada columna, para este caso no se expresa como porcentaje de finos, se deben indicar los incrementos porcentuales no acumulativos.

Load Specification for CANAL DEL DIQUE EJE CANAL DEL DI 7010.83

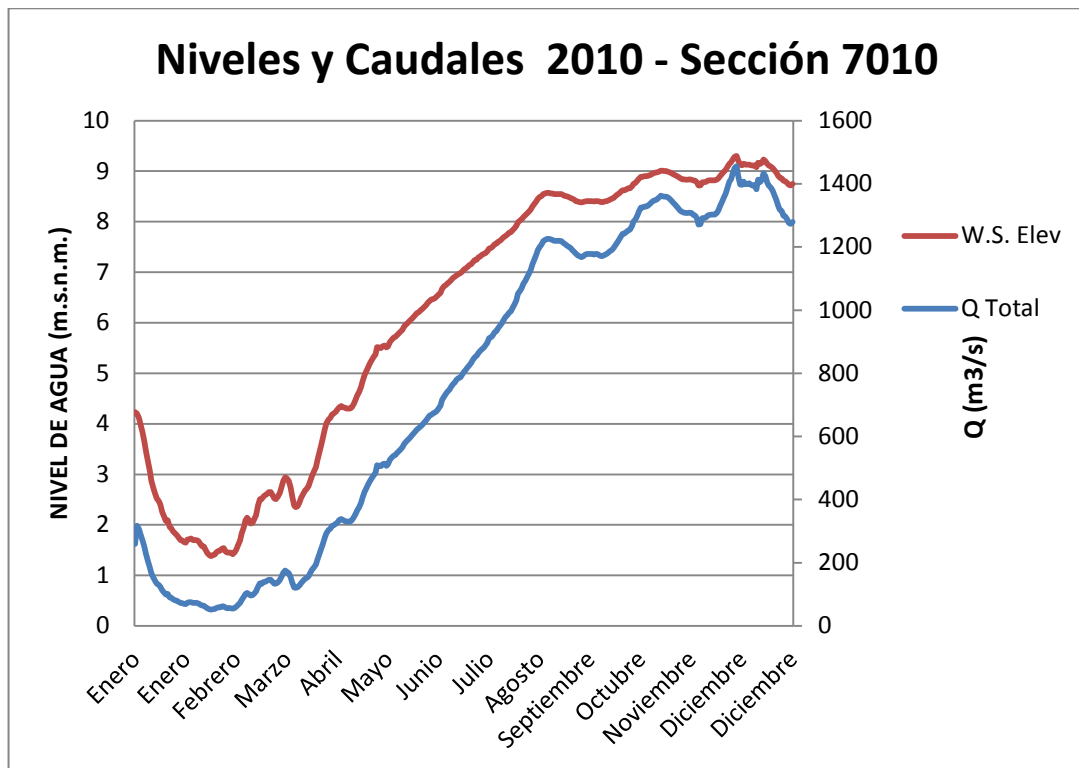
Number of flow-load points: 5 sets

	Flow (m3/s)	68	122	270	370	690	1000
	Total Load (tonnes/day)	1800	2300	7000	18000	43000	54000
1	Clay						
2	VFM						
3	FM						
4	MM						
5	CM						
6	VFS						
7	FS	0.18	0.2	0.2	0.13	0.12	0.05
8	MS	0.16	0.26	0.2	0.15	0.15	0.1
9	CS	0.14	0.16	0.26	0.15	0.15	0.2
10	VCS	0.1	0.14	0.3	0.2	0.2	0.25
11	VFG		0.04	0.12	0.1	0.15	0.15
12	FG			0.02	0.06	0.08	0.1
13	MG						
14	CG						
15	VCG						
16	SC						
17	LC						
18	SS						

Plot ... OK Cancel



Para la sección aguas arriba se tiene información de niveles y caudales en la estación de Calamar, en la sección transversal del Río Magdalena, por lo tanto se decide usar los mismos niveles de la estación y determinar el caudal correspondiente a ese nivel, en la sección del canal del dique. Estos caudales fueron obtenidos en la simulación de flujo no permanente, en la siguiente gráfica se muestran los niveles de entrada y caudales obtenidos.



**Figura 11. Calibración de caudales Modelo HEC RAS Flujo no permanente “Sección-0”**

La serie de flujo obtenida para el año 2010 se debe organizar en la venta de “Flow series”. Se debe escoger la opción de usar el tiempo simulación el cual representa la duración total del evento.

La duración de flujo corresponde a periodo de 24 horas ya que la información corresponde a lecturas diarias.

El incremento computacional se asigna teniendo en cuenta que para caudales de una magnitud entre 1455 y 1107m<sup>3</sup>/s corresponde a un incremento de 1 Hora, para caudales de una magnitud entre 1107 y 405m<sup>3</sup>/s corresponde a un incremento de 2 Horas y para caudales de una magnitud entre 405 y 51m<sup>3</sup>/s corresponde a un incremento de 6 Horas. Para asignar los incrementos se tiene en cuenta que los eventos de gran magnitud tienen una duración corta mientras los que tienen una magnitud significativamente pequeña, tienen una duración más larga.

Flow Series for CANAL DEL DIQUE EJE CANAL DEL DI 7010.83

Select/Enter the Data's Starting Time Reference

Use Simulation Time: Date: 01JAN2010 Time: 2400

Fixed Start Time: Date: Time:

Hydrograph Data

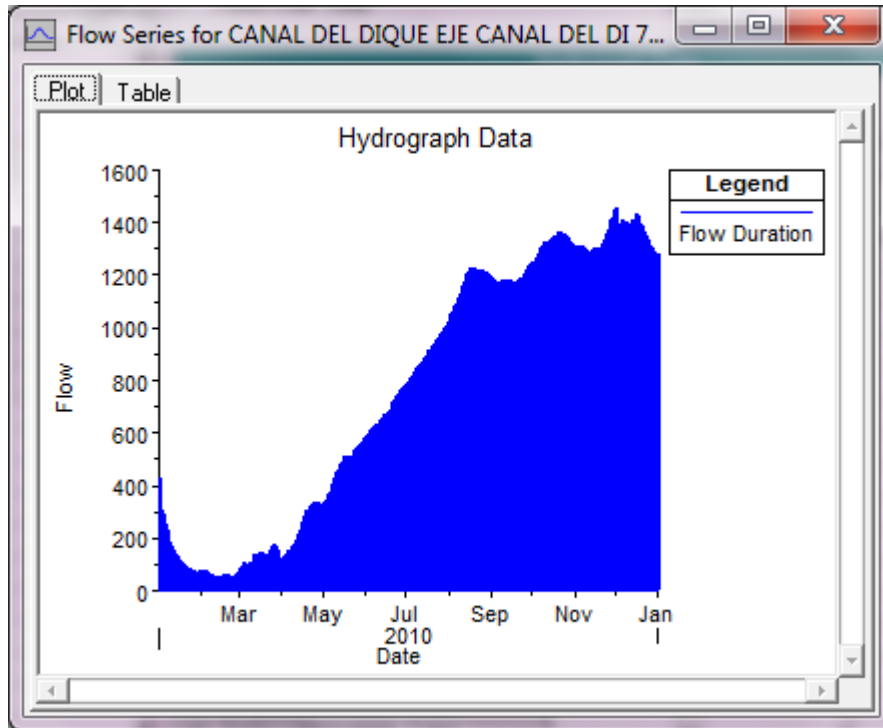
No. Ordinates Interpolate Values Del Row Ins Row

	Simulation Time	Elapsed Time (hours)	Flow Duration (hours)	Computation Increment (hours)	Flow (m <sup>3</sup> /s)
1	02Jan2010 0000	24	24	6	427.21
2	03Jan2010 0000	48	24	6	317.46
3	04Jan2010 0000	72	24	6	306.67
4	05Jan2010 0000	96	24	6	289.53
5	06Jan2010 0000	120	24	6	271.91
6	07Jan2010 0000	144	24	6	250.36
7	08Jan2010 0000	168	24	6	228.14
8	09Jan2010 0000	192	24	6	205.73
9	10Jan2010 0000	216	24	6	185.52
10	11Jan2010 0000	240	24	6	165.99
11	12Jan2010 0000	264	24	6	153.45
12	13Jan2010 0000	288	24	6	142.19
13	14Jan2010 0000	312	24	6	133.52
14	15Jan2010 0000	336	24	6	129.81
15	16Jan2010 0000	360	24	6	123.52
16	17Jan2010 0000	384	24	6	112.54
17	18Jan2010 0000	408	24	6	105.71
18	19Jan2010 0000	432	24	6	99.84
19	20Jan2010 0000	456	24	6	101.12
20	21Jan2010 0000	480	24	6	90.71
21	22Jan2010 0000	504	24	6	89.49
22	23Jan2010 0000	528	24	6	84.59
23	24Jan2010 0000	552	24	6	81.5
24	25Jan2010 0000	576	24	6	79.83
25	26Jan2010 0000	600	24	6	76.14
26	27Jan2010 0000	624	24	6	72.66
27	28Jan2010 0000	648	24	6	72.2

Compute computation increments based on flow

Plot... OK Cancel

En la siguiente gráfica se presenta el hidrograma de flujo cuasi permanente correspondiente a los datos de entrada.



El siguiente paso es ingresar la información de la serie de temperaturas correspondiente a la serie de flujo. Esta información de series de temperatura fue obtenida de ensayos de calidad del agua realizados a lo largo del Canal del Dique, como tal no se tenía la información diariamente, sólo de algunas fechas en las que se llevaron cabo campañas de exploración. Al analizar la información de la temperatura se puede observar que se tenían valores muy similares a lo largo del canal, por lo tanto se toman estos valores correspondientes a días puntuales y se replican con el fin de completar la información de 365 días.



**Temperature Series**

Select/Enter the Data's Starting Time Reference

Use Simulation Time: Date: 01JAN2010 Time: 2400

Use Fixed Start Time: Date: Time:

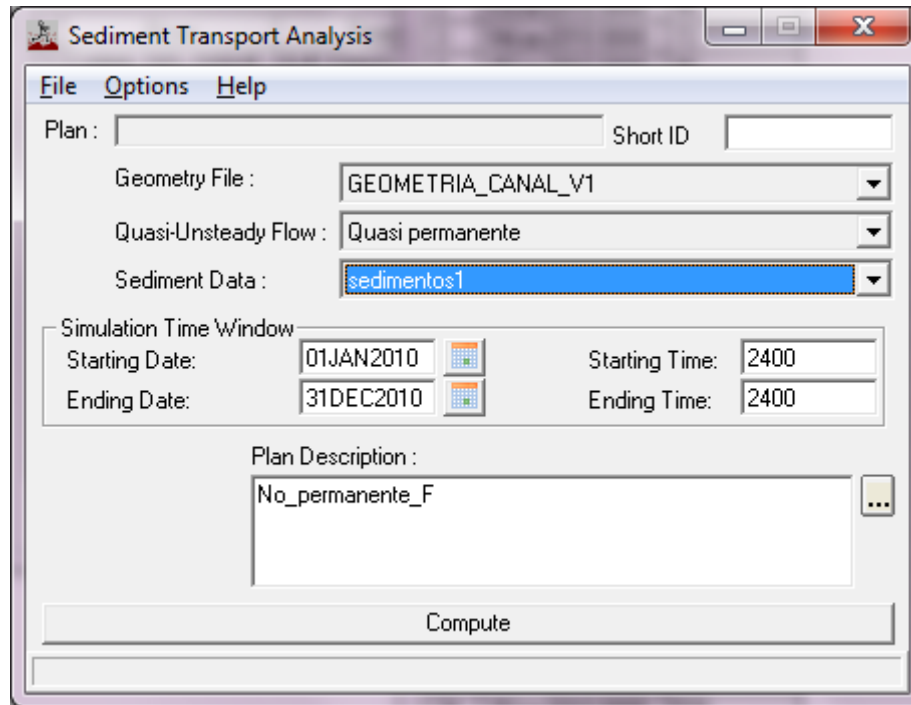
**Temperature Data**

No. Ordinates Interpolate Missing Values Del Row Ins Row

	Simulation Time	Elapsed Time (hours)	Duration (hours)	Temp (C)
1	01Jan2010 24	24	24	31.3
2	02Jan2010 24	48	24	33.1
3	03Jan2010 24	72	24	33.6
4	04Jan2010 24	96	24	33.6
5	05Jan2010 24	120	24	33.8
6	06Jan2010 24	144	24	31.8
7	07Jan2010 24	168	24	32.8
8	08Jan2010 24	192	24	33.3
9	09Jan2010 24	216	24	32.3
10	10Jan2010 24	240	24	32.6
11	11Jan2010 24	264	24	33.2
12	12Jan2010 24	288	24	32.3
13	13Jan2010 24	312	24	32.2
14	14Jan2010 24	336	24	32.5
15	15Jan2010 24	360	24	32.5
16	16Jan2010 24	384	24	32.5
17	17Jan2010 24	408	24	32.6
18	18Jan2010 24	432	24	32.6
19	19Jan2010 24	456	24	32.8
20	20Jan2010 24	480	24	32.7
21	21Jan2010 24	504	24	32.5
22	22Jan2010 24	528	24	32.3
23	23Jan2010 24	552	24	32.1
24	24Jan2010 24	576	24	32.2

OK Cancel

Como último se lleva a cabo la simulación de transporte de sedimentos con la geometría inicial, las condiciones de flujo cuasi permanente y la información de sedimentos.



Para hacer la comparación de los resultados de las diferentes funciones de transporte a usar, se crean los siguientes planes, con diferentes condiciones de sedimento.

Tabla 9. Plan e información de sedimentos.

PLAN	ARCHIVO	FUNCIÓN DE TRANSPORTE	MÉTODO DE ACORAZAMIENTO	MÉTODO DE VELOCIDAD DE CAIDA
Plan105	Sedimentos 2	Toffaleti	EXNER 5	Toffaleti
Plan101	Sedimentos 3	Meyer Peter Muller	EXNER 5	Toffaleti
Plan102	Sedimentos 4	Yang	EXNER 5	Toffaleti
Plan103	Sedimentos 5	Ackers White	EXNER 5	Toffaleti
Plan104	Sedimentos 6	England Hansen	EXNER 5	Toffaleti

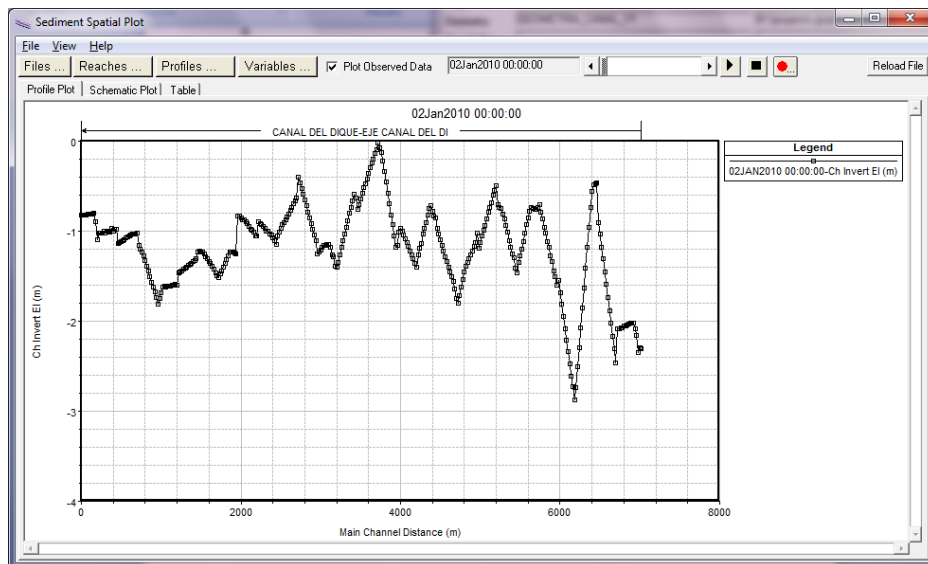
#### 5.4.1 Análisis de resultados

Con el fin de verificar cuál de las funciones de transporte se ajusta mejor a las condiciones existentes, se analizan los resultados obtenidos y se define cuál de ellas presenta el mejor ajuste.

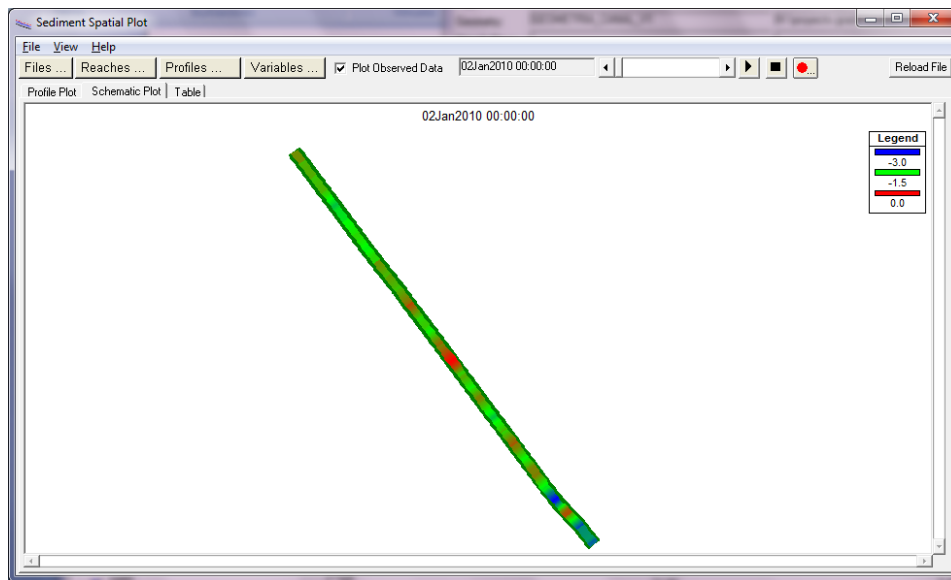
En general para cada una de las condiciones de sedimentos, se presenta el perfil longitudinal de la geometría inicial y final del fondo del canal (la variación de altura del Talweg), se muestra el balance de socavaciones y sedimentaciones, y el transporte acumulado de sedimentos.

#### 5.4.1.1 Toffaleti

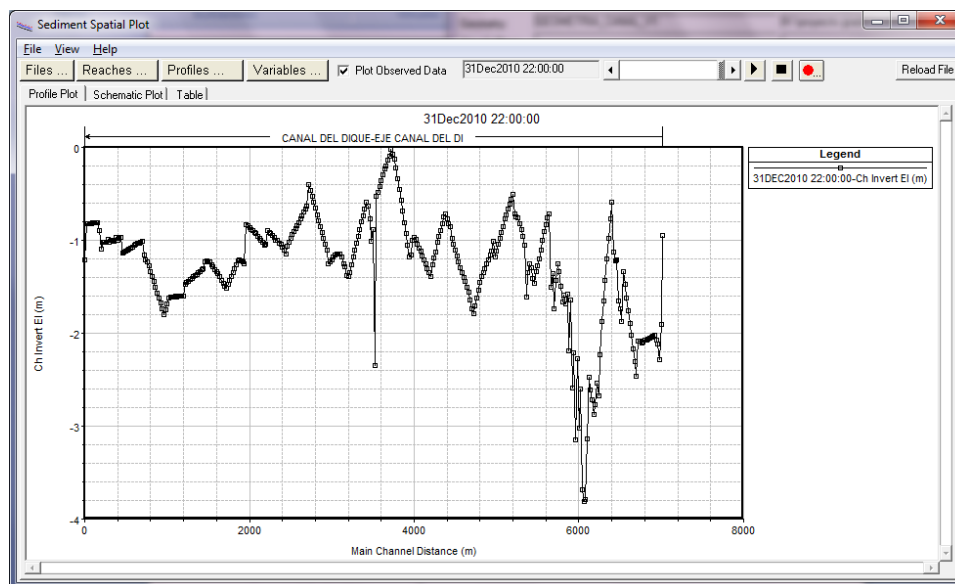
A continuación se presenta el perfil longitudinal de la geometría inicial del fondo del canal.

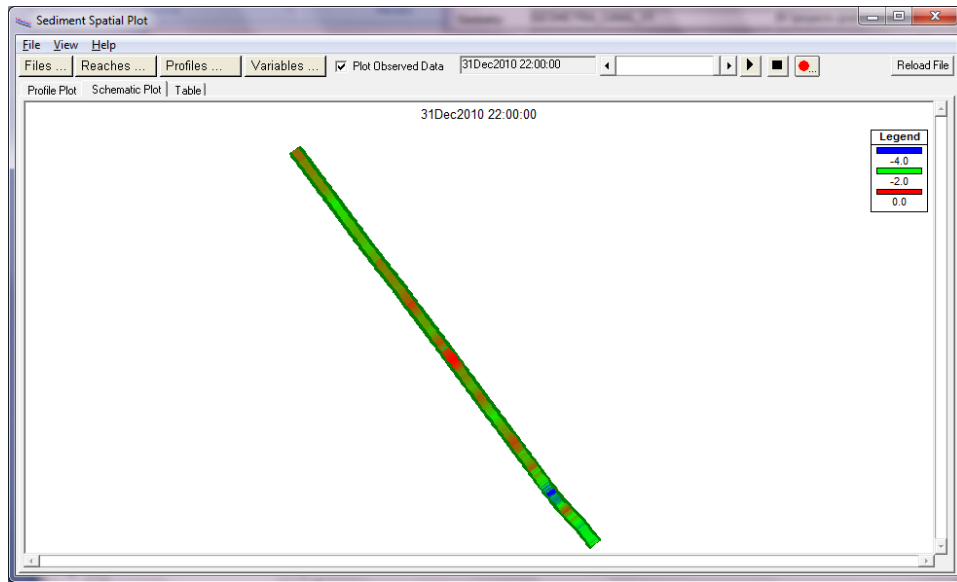


En esta vista de planta se pueden apreciar los rangos de profundidad del lecho del canal en toda su longitud. En general se tiene una profundidad inicial mínima de -3.0 m.s.n.m y máxima de 0.0 m.s.n.m.

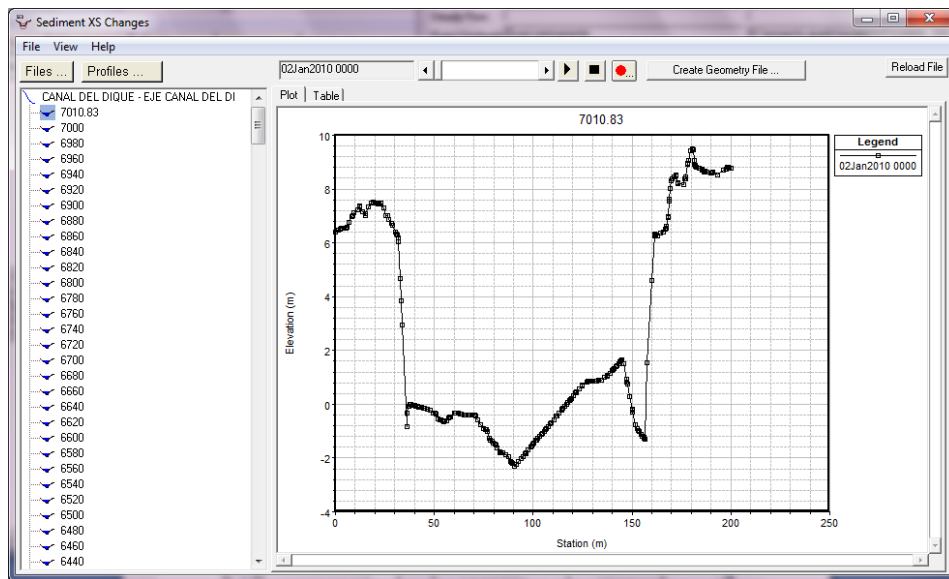


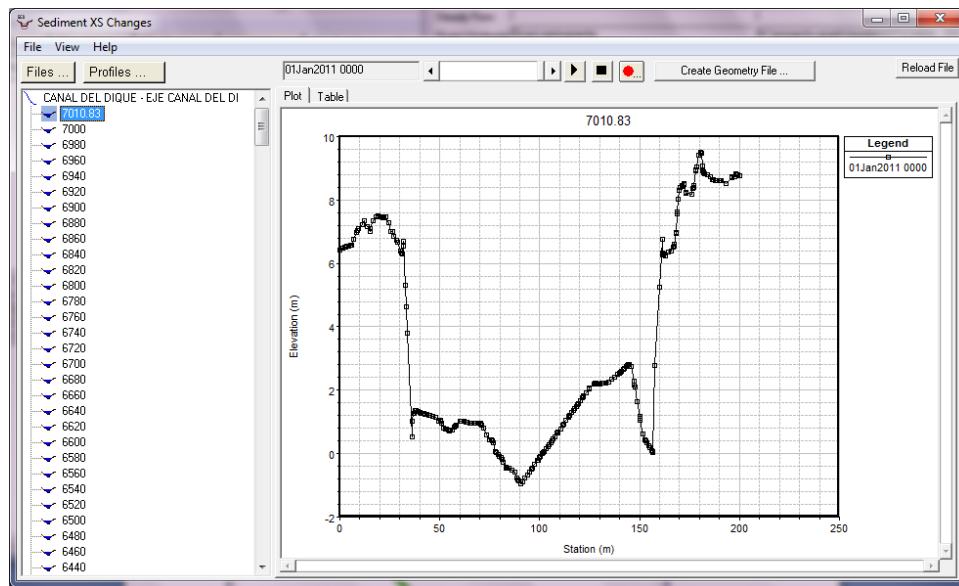
Al final del evento se puede apreciar como entre la sección 7010 y 4000 se presentan procesos de agradación y degradación del lecho, se alcanzan profundidades hasta de -3.8 m.s.n.m. y se mantiene la profundidad máxima de 0.0m.s.n.m. En la sección que se presentó más degradación del fondo del lecho corresponde a la sección 6060, en la cual inicialmente se tenía un nivel de -2.08 m.s.n.m. y finalmente alcanza un nivel de 3.81m.s.n.m, en total el nivel disminuye 1.73 m.





En la sección 7010 se presenta un proceso de agradación del lecho, inicialmente se tiene una profundidad mínima de -2.30 m.s.n.m y al final del evento se tiene una profundidad mínima de -0.95 m.s.n.m, en total el nivel mínimo aumento 1.35m.





En la siguiente figura, se comparan los resultados obtenidos usando la función de transporte de Toffaleti con los valores de la curva de calibración que se definieron como condición de frontera en la sección 7010. Comparando estos valores se obtiene un coeficiente de correlación de 0.95 lo cual indica una buena correlación, con respecto a los valores medidos en el canal. .

Tabla 10. Comparación de resultados Toffaleti(Curva de calibración de entradaVsCurva de calibración de salida)

Curva de calibración de entrada		Curva de calibración de salida		Diferencia
$Q_L$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_S$ (ton/día)	$Q_L$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_S$ (ton/día)	
68	1800	68	464.24	1335.76
122	2300	122	1595.59	704.41
270	7000	270	7613.41	-613.41
370	18000	370	7967.27	10032.73
690	43000	690	24816.99	18183.01
1000	54000	1000	50634.57	3365.43

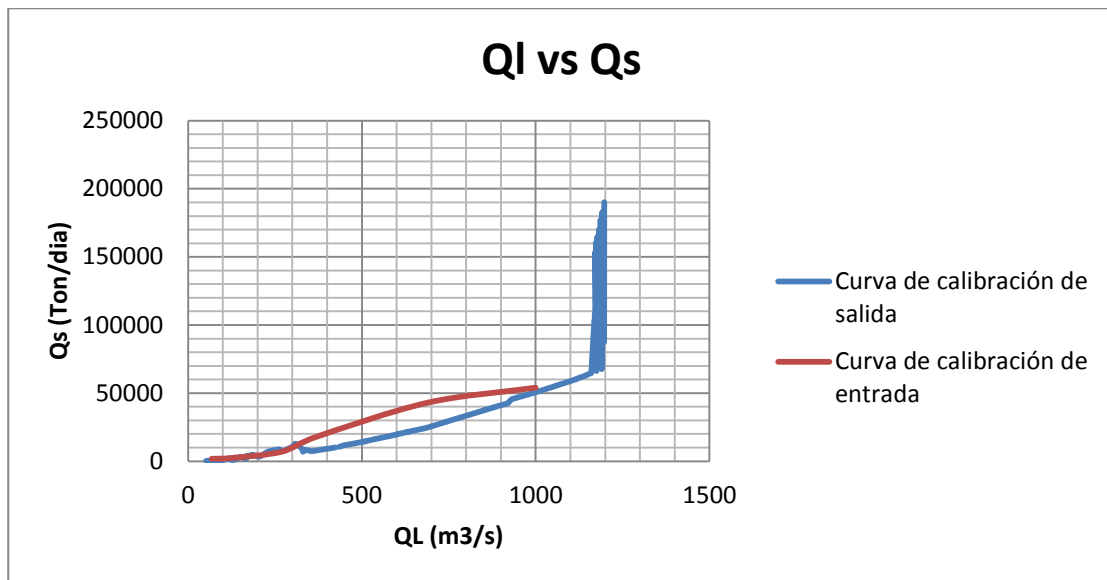
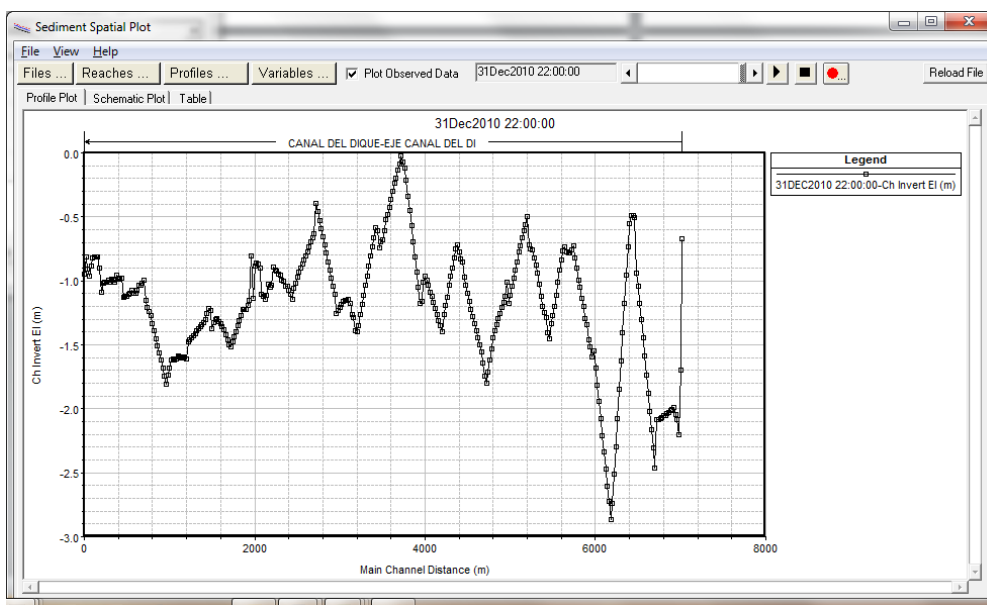


Figura 12. Curva de calibración de ( $Q_s$  vs  $Q_L$ ) Modelo HEC RAS Transporte de sedimentos Toffaletti "Sección 7010"

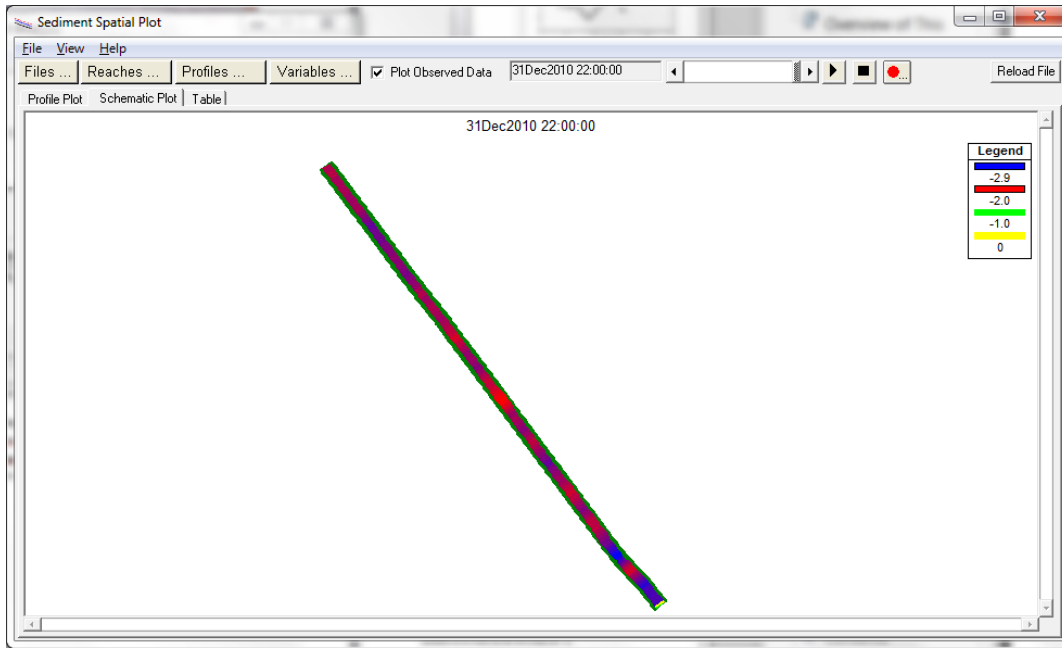
#### 5.4.1.2 Meyer Peter Muller

A continuación se presenta el perfil longitudinal de la geometría final del fondo del canal.

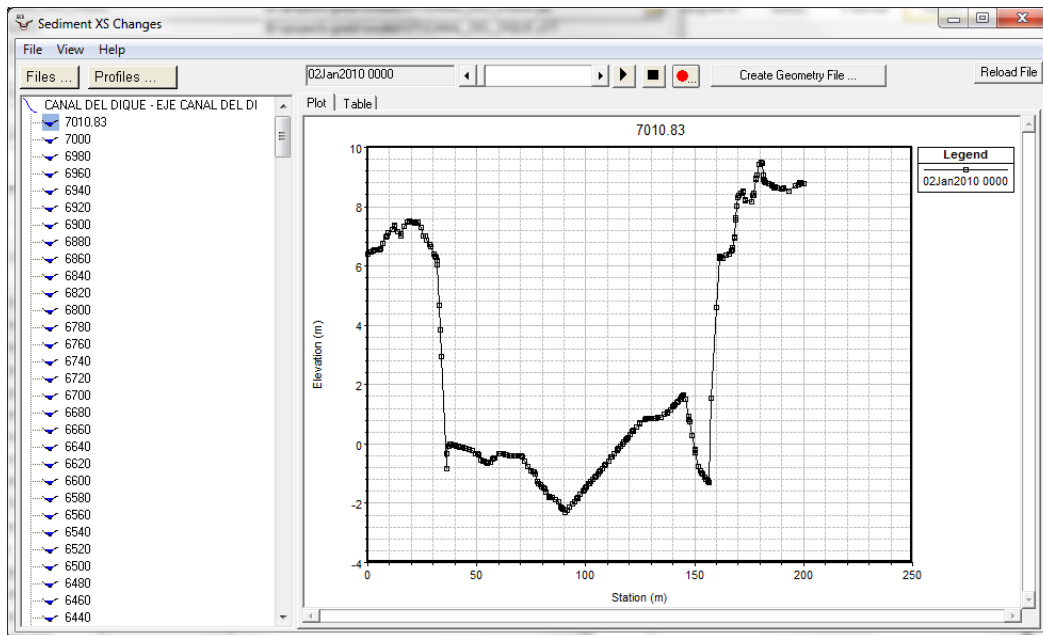


Al final del evento se puede apreciar como en la sección 7010 se presentan procesos de agradación, inicialmente se tiene una cota de fondo de -2.30m.s.n.m y se

agrada el lecho hasta alcanzar una cota de  $-0.67\text{m.s.n.m.}$  En el resto del perfil no se llevan a cabo proceso de agradación y degradación del lecho de considerable magnitud.



En la sección 7010 se presenta un proceso de agradación del lecho, inicialmente se tiene una profundidad mínima de  $-2.30\text{ m.s.n.m.}$





Al final del evento se tiene una profundidad mínima de  $-0.67\text{m.s.n.m}$ , en total el nivel mínimo aumento  $1.63\text{m}$ .

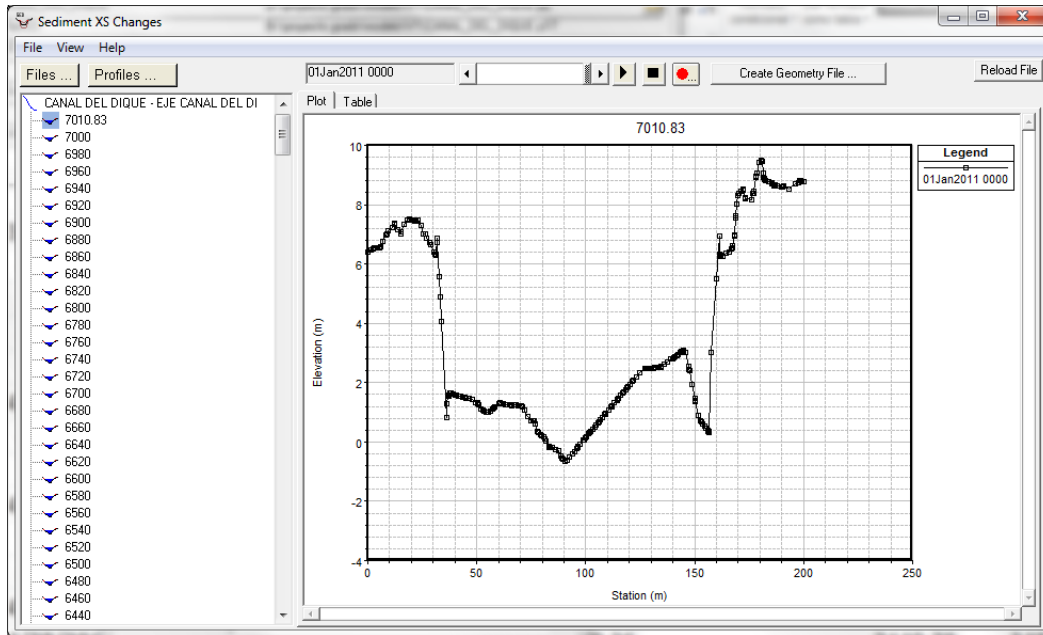


Tabla 11. Comparación de resultados Meyer Peter Müller (Curva de calibración de entrada Vs Curva de calibración de salida)

Curva de calibración de entrada		Curva de calibración de salida		Diferencia
$Q_L$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_S$ (ton/día)	$Q_L$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_S$ (ton/día)	
68	1800	68	26262.7741	24462.7741
122	2300	122	55445.499	53145.499
270	7000	270	64933.4374	57933.4374
370	18000	370	82776.6848	64776.6848
690	43000	690	135732.429	92732.4288
1000	54000	1000	133116.732	79116.7317

En la siguiente figura, se comparan los resultados obtenidos usando la función de transporte de Meyer Peter Müller con los valores de la curva de calibración que se definieron como condición de frontera en la sección 7010. Comparando estos valores se observan grandes diferencias con respecto a los valores medidos desde 24462 ton/día

hasta 79116 ton/día, por lo tanto los valores obtenidos mediante esta función superan los valores medidos.

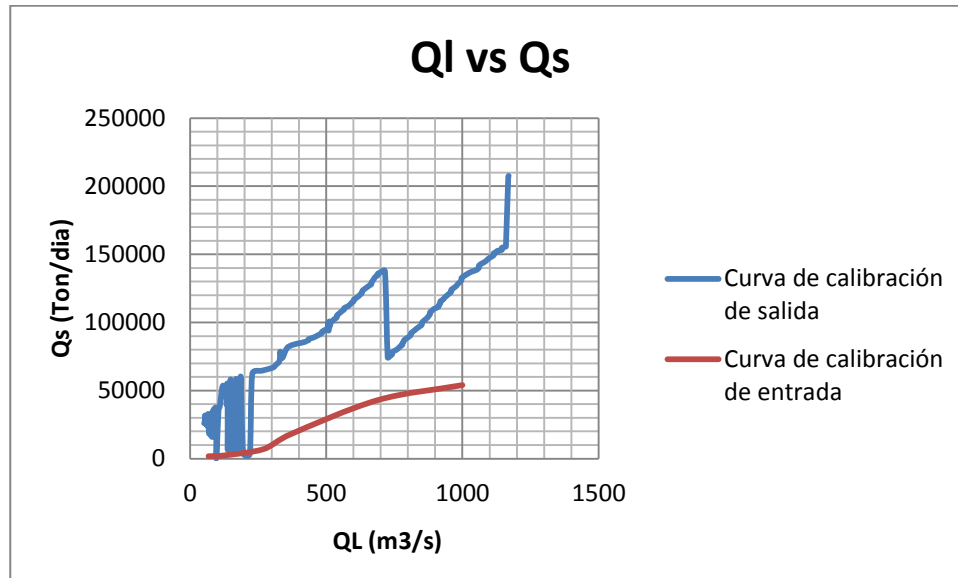
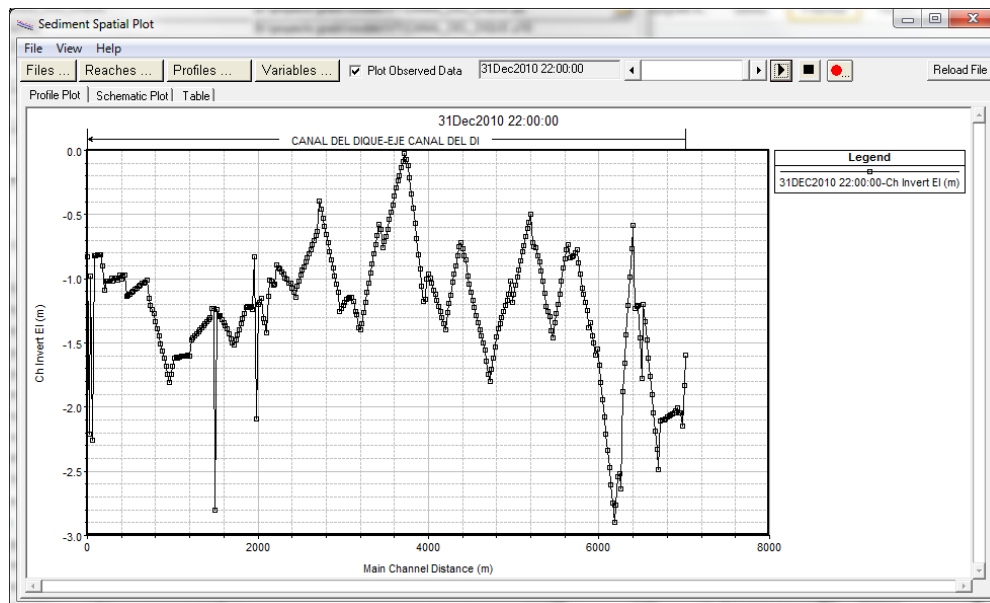


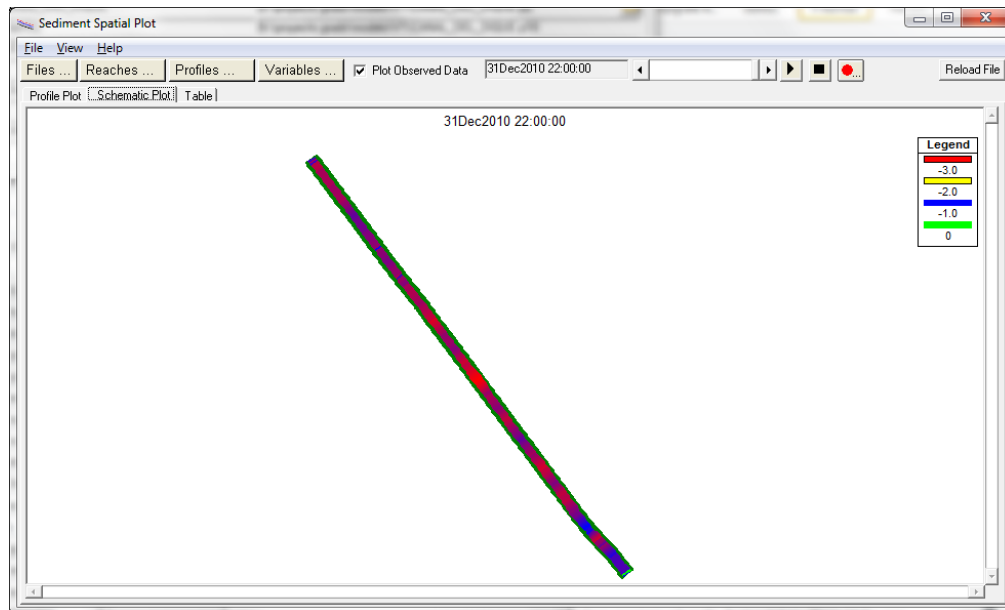
Figura 13. Curva de calibración de ( $Q_S$  vs  $Q_L$ ) Modelo HEC RAS Transporte de sedimentos Meyer Peter Müller “Sección 7010”

#### 5.4.1.3 Yang

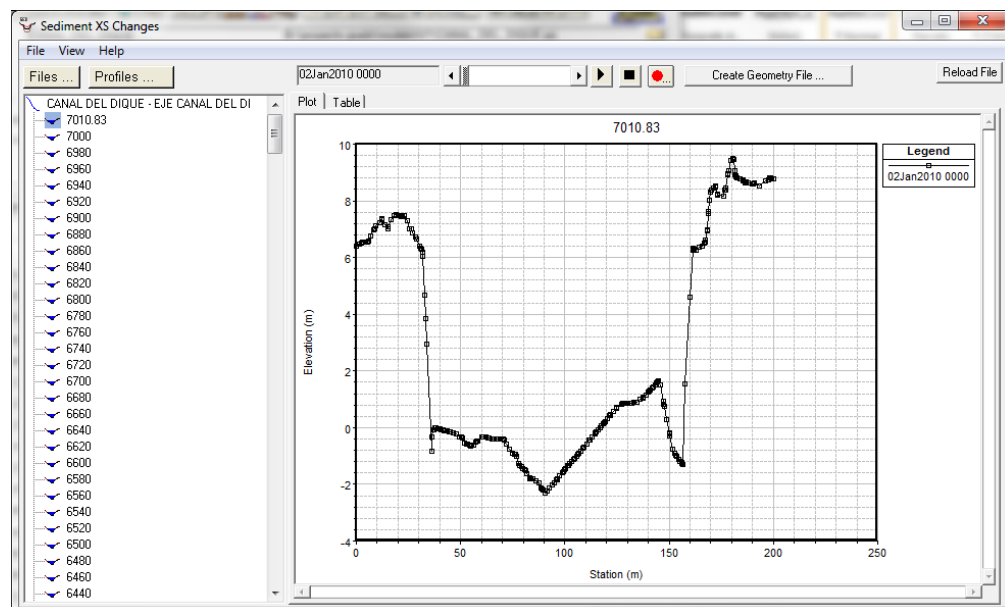
A continuación se presenta el perfil longitudinal de la geometría final del fondo del canal.



Al final del evento se puede apreciar como en la sección 7010 se presentan procesos de agradación, inicialmente se tiene una cota de fondo de  $-2.30\text{m.s.n.m}$  y se agrada el lecho hasta alcanzar una cota de  $-1.60\text{ m.s.n.m}$ . Entre las abscisas  $K0+000$  Y  $K2+000$  predominan los procesos de degradación del lecho.



En la sección 7010 se presenta un proceso de agradación del lecho, inicialmente se tiene una profundidad mínima de  $-2.30\text{ m.s.n.m}$ .



Al final del evento se tiene una profundidad mínima de -1.60 m.s.n.m, en total el nivel mínimo aumento 0.70 m

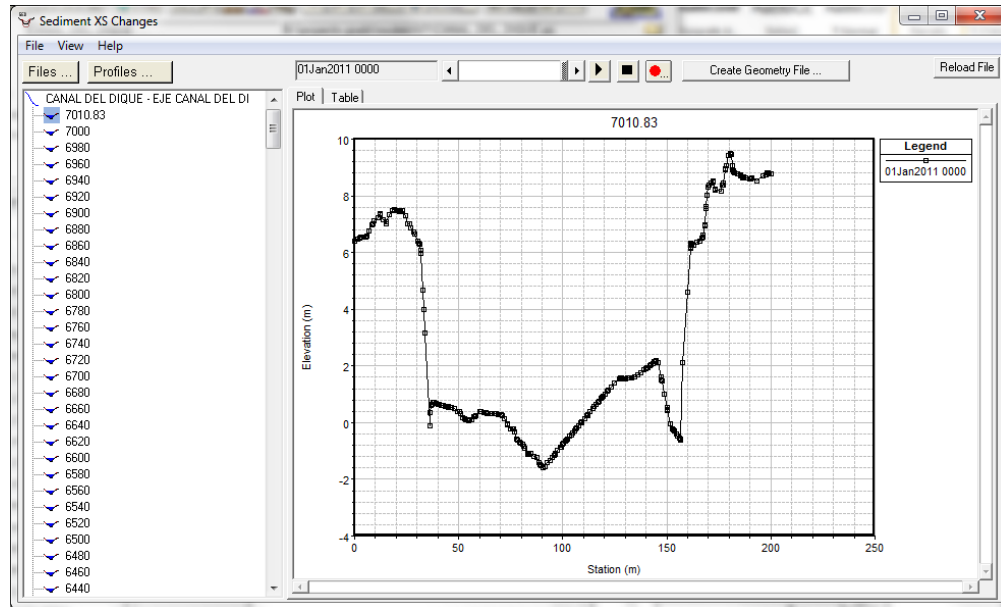


Tabla 12. Comparación de resultados Yang (Curva de calibración de entrada Vs Curva de calibración de salida)

Curva de calibración de entrada		Curva de calibración de salida		Diferencia
$Q_L$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_S$ (ton/día)	$Q_L$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_S$ (ton/día)	
68	1800	68	4757.80	2957.80
122	2300	122	28497.41	26197.41
270	7000	270	122863.04	115863.04
370	18000	370	227951.64	209951.64
690	43000	690	874204.79	831204.79
1000	54000	1000	1917140.38	1863140.38

En la siguiente figura, se comparan los resultados obtenidos usando la función de transporte de Yang con los valores de la curva de calibración que se definieron como condición de frontera en la sección 7010. Comparando estos valores se observan grandes diferencias con respecto a los valores medidos desde 22,957 ton/día hasta 1'863,140 ton/día, por lo tanto los valores obtenidos mediante esta función superan los valores medidos.

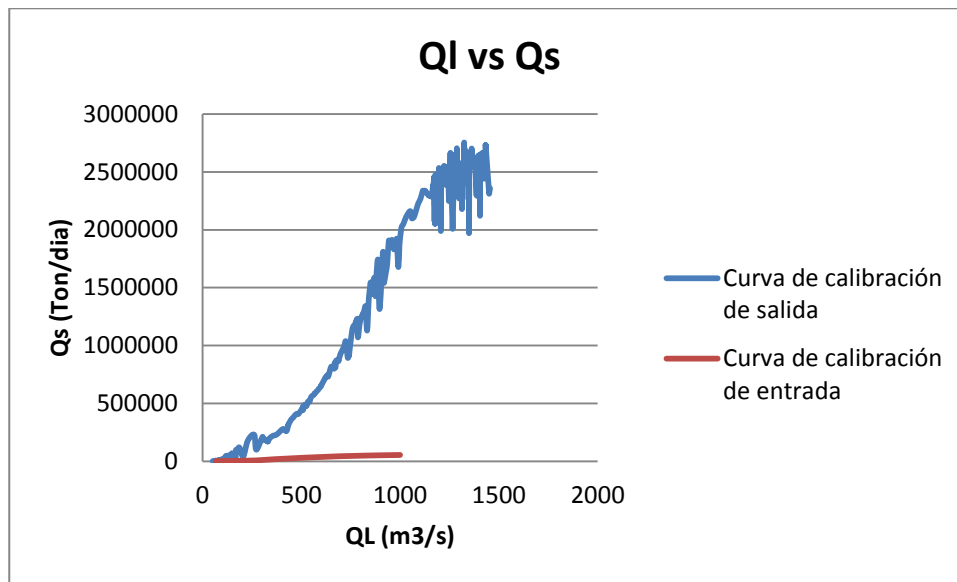
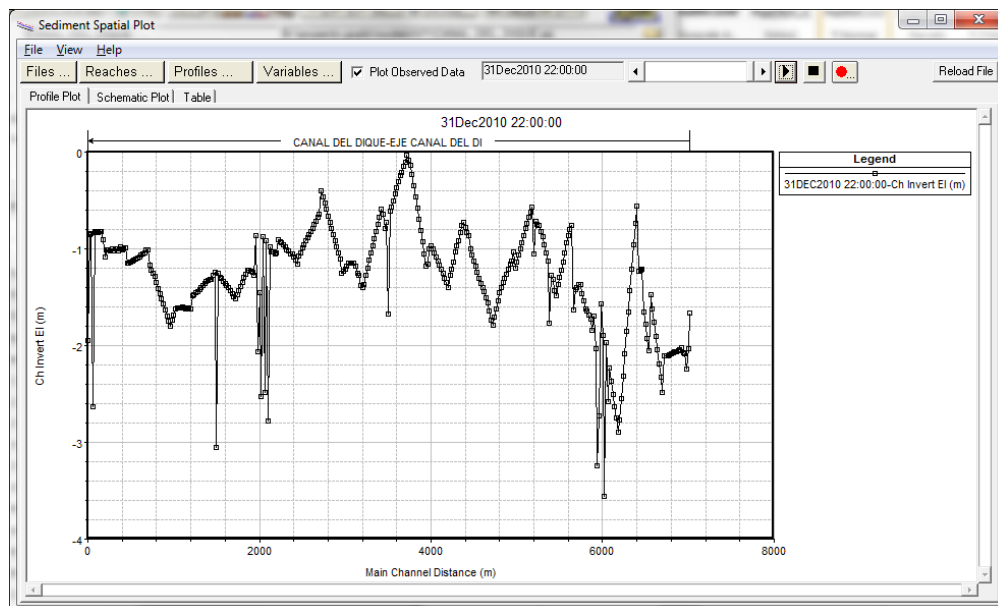


Figura 14. Curva de calibración de ( $Q_s$  vs  $Q_L$ ) Transporte de sedimentos Yang "Sección 7010"

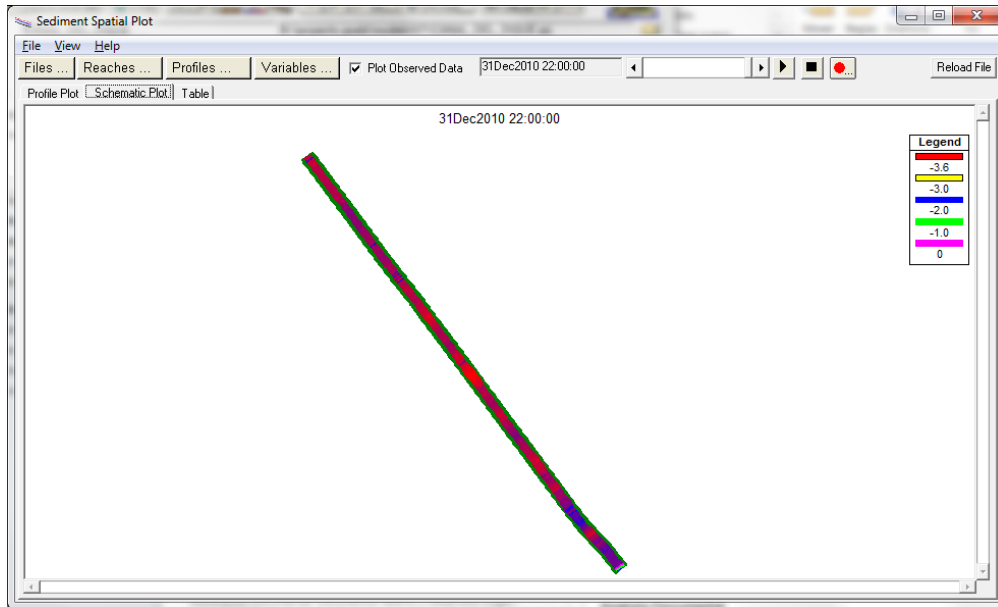
#### 5.4.1.4 Ackers White

A continuación se presenta el perfil longitudinal de la geometría final del fondo del canal.

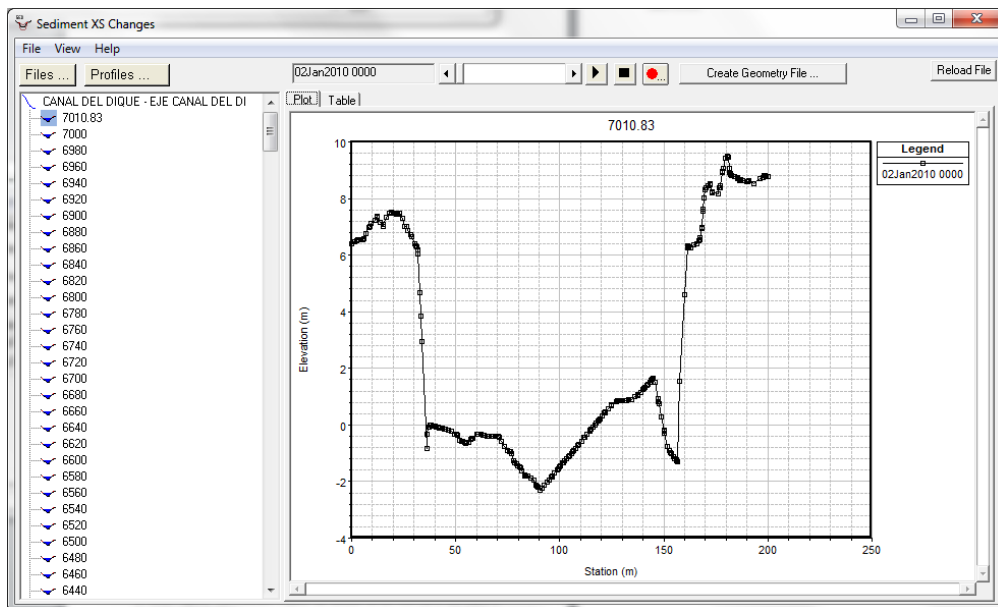


Al final del evento se puede apreciar como en la sección 7010 se presentan procesos de agradación, inicialmente se tiene una cota de fondo de -2.30m.s.n.m y se

agrada el lecho hasta alcanzar una cota de -1.67 m.s.n.m. Entre las abscisas K0+000 a K2+000 y K5+600 a K7+000 predominan los procesos de degradación del lecho.



En la sección 7010 se presenta un proceso de agradación del lecho, inicialmente se tiene una profundidad mínima de -2.30 m.s.n.m.



Al final del evento se tiene una profundidad mínima de -1.67 m.s.n.m, en total el nivel mínimo aumento 0.63m

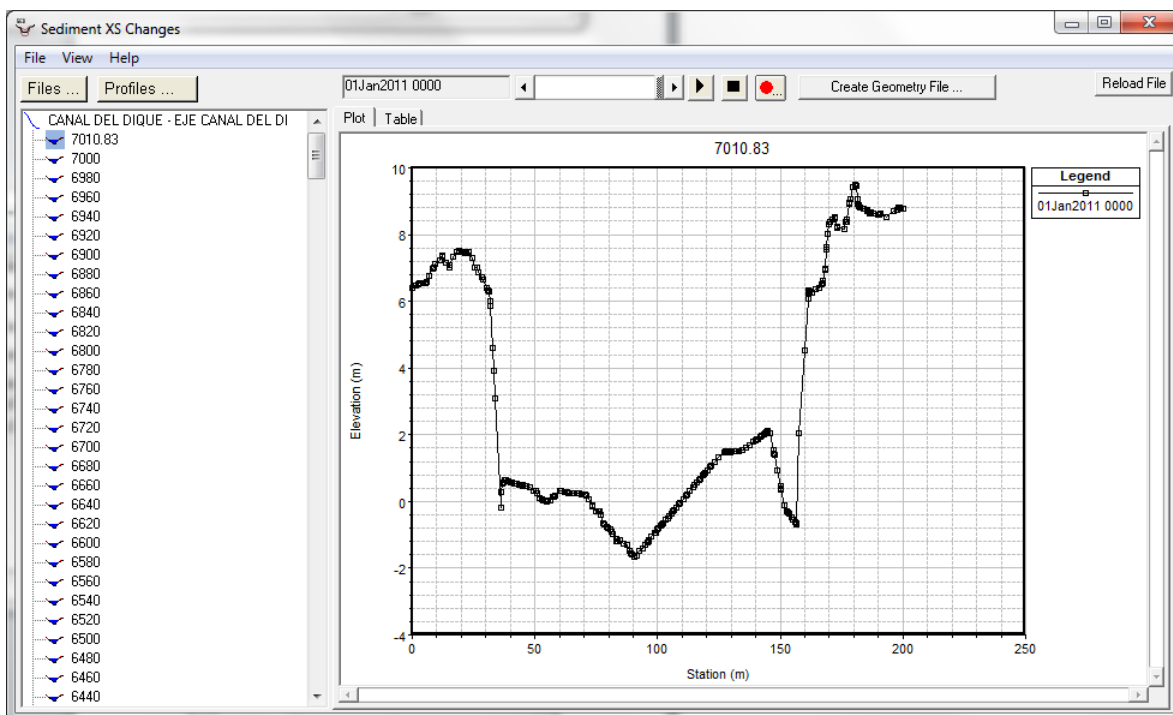


Tabla 13. Comparación de resultados Ackers White (Curva de calibración de entrada Vs Curva de calibración de salida)

Curva de calibración de entrada		Curva de calibración de salida		Diferencia
$Q_L$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_S$ (ton/día)	$Q_L$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_S$ (ton/día)	$Q_S$ (ton/día)
68	1800	68	2.44E+17	2.44E+17
122	2300	122	3.30E+25	3.30E+25
270	7000	270	4.66E+31	4.66E+31
370	18000	370	4.76E+34	4.76E+34
690	43000	690	940.19	-42059.81
1000	54000	1000	1905.48	-52094.53

En las siguientes figuras, se comparan los resultados obtenidos usando la función de transporte de Ackers White con los valores de la curva de calibración que se definieron como condición de frontera en la sección 7010. Comparando estos valores se observan grandes diferencias con respecto a los valores medidos de  $4.76 \times 10^{34}$  ton/día hasta los valores de  $Q_L$  menores a  $500 \text{ m}^3/\text{s}$ .

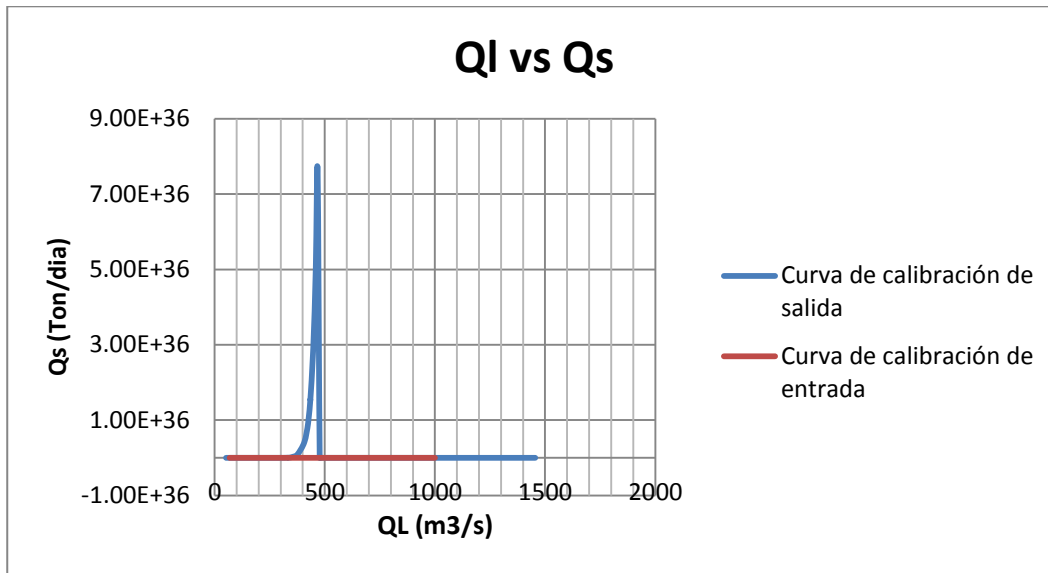


Figura 15. Curva de calibración de ( $Q_s$  vs  $Q_L$ ) Transporte de sedimentos Ackers White "Sección 7010"

A partir del  $Q_L$  mayor a 500 m<sup>3</sup>/s, se obtienen valores por debajo de las condiciones de frontera, en general no se ajusta la función de transporte utilizada a los valores medidos.

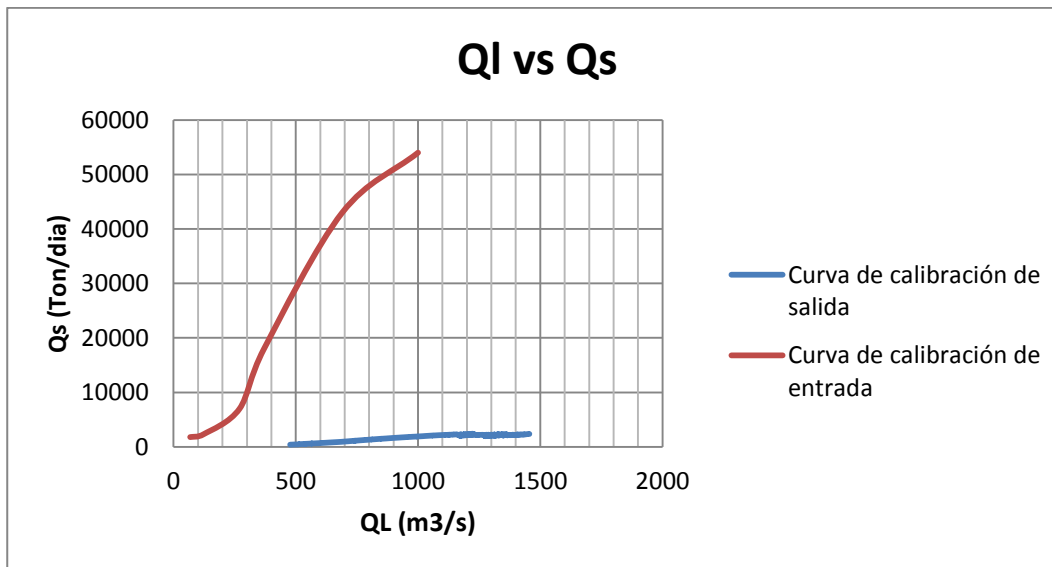
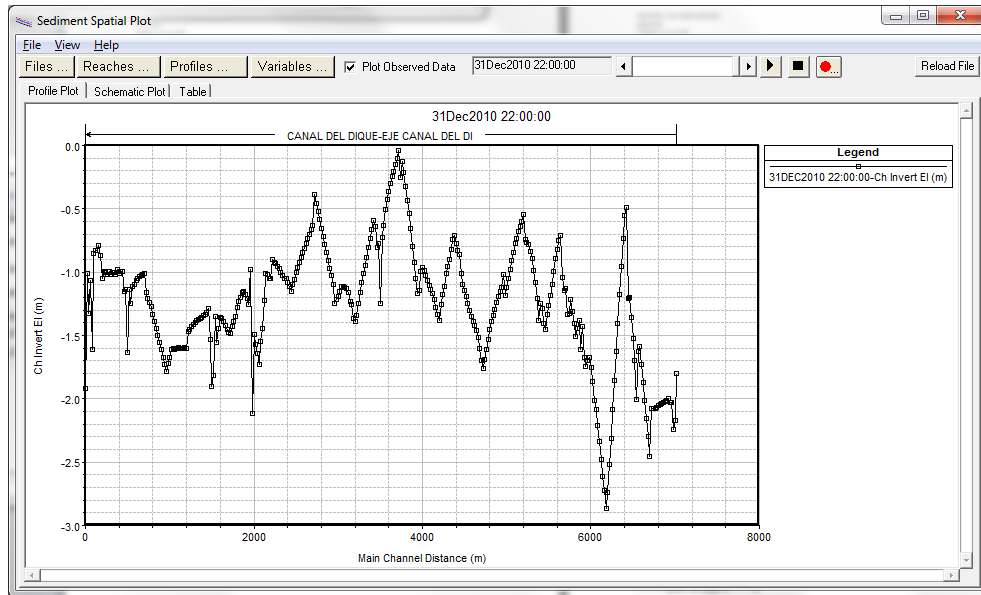


Figura 16. Curva de calibración de ( $Q_s$  vs  $Q_L$ ) Transporte de sedimentos Ackers White "Sección 7010"

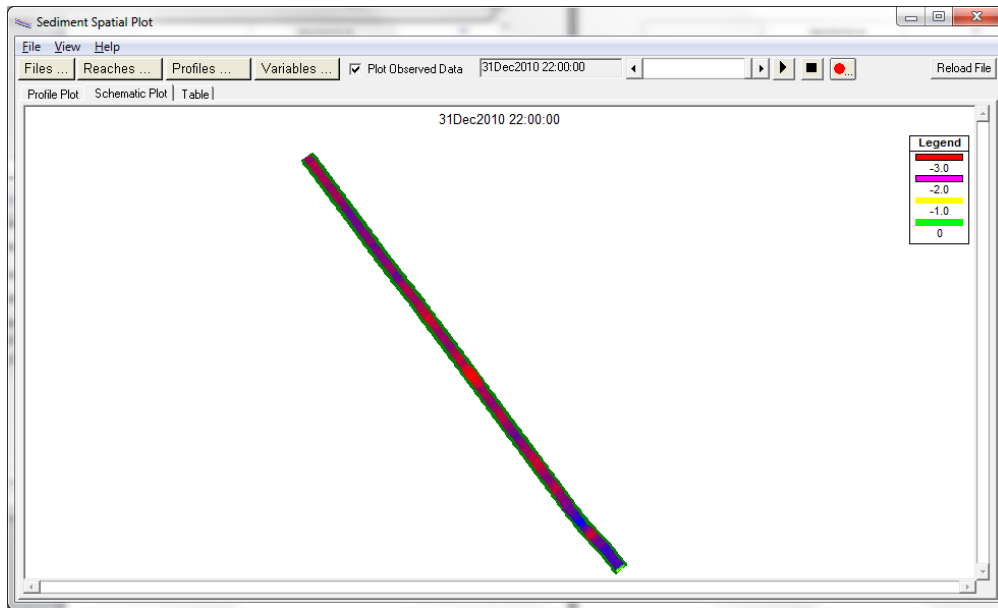


### 5.4.1.5 England Hansen

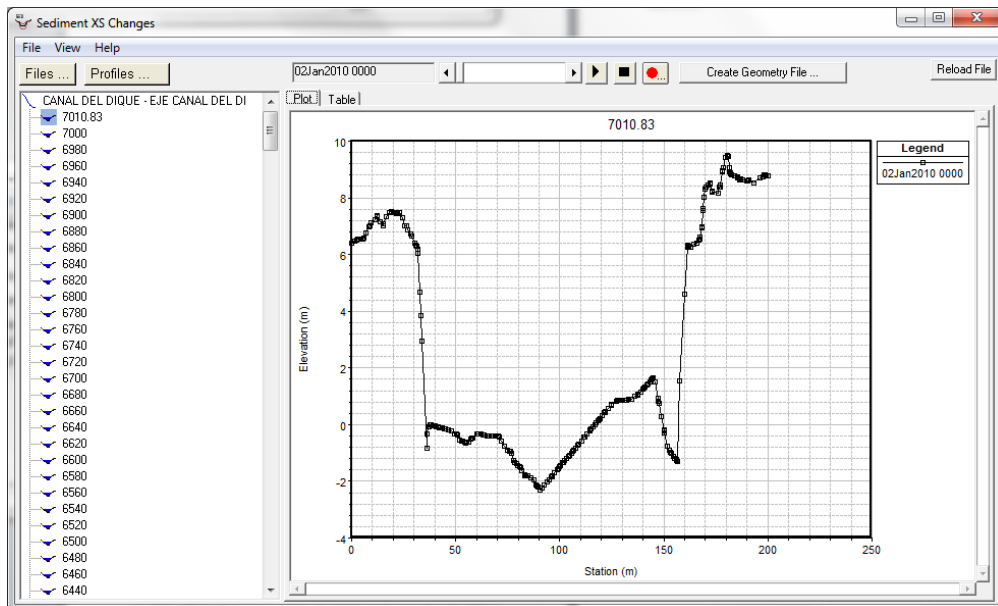
A continuación se presenta el perfil longitudinal de la geometría final del fondo del canal.



Al final del evento se puede apreciar como en la sección 7010 se presentan procesos de agradación, inicialmente se tiene una cota de fondo de -2.30m.s.n.m y se agrada el lecho hasta alcanzar una cota de -1.80 m.s.n.m. En general en toda la longitud del canal se presentan procesos de degradación del lecho, a comparación de las otras funciones de transporte utilizadas, ésta es la que ha modificado en mayor proporción el fondo del canal.



En la sección 7010 se presenta un proceso de agradación del lecho, inicialmente se tiene una profundidad mínima de -2.30 m.s.n.m.



Al final del evento se tiene una profundidad mínima de -1.80 m.s.n.m, en total el nivel mínimo aumento 0.50 m.

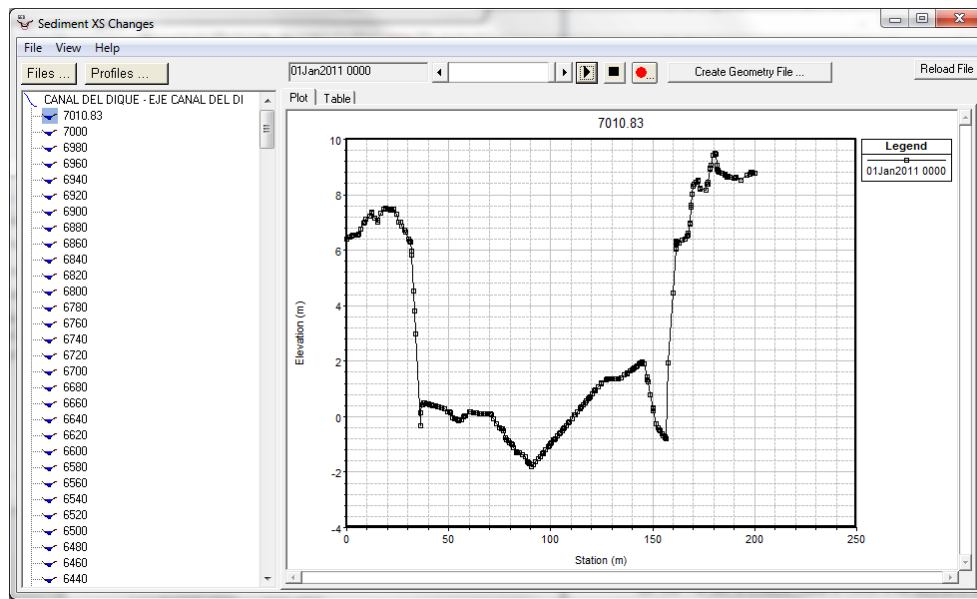


Tabla 14. Comparación de resultados England Hansen (Curva de calibración de entrada Vs Curva de calibración de salida)

Curva de calibración de entrada		Curva de calibración de salida		Diferencia
$Q_L$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_S$ (ton/día)	$Q_L$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_S$ (ton/día)	$Q_S$ (ton/día)
68	1800	68	154.75	-1645.25
122	2300	122	531.86	-1768.14
270	7000	270	2537.80	-4462.20
370	18000	370	2655.76	-15344.24
690	43000	690	8272.33	-34727.67
1000	54000	1000	16878.19	-37121.81

En la siguiente figura, se comparan los resultados obtenidos usando la función de transporte de England Hansen con los valores de la curva de calibración que se definieron como condición de frontera en la sección 7010. Comparando estos valores se observan grandes diferencias con respecto a los valores medidos desde 1,645 ton/día hasta 37,121 ton/día, por lo tanto los valores obtenidos mediante esta función, están por debajo de los valores medidos.

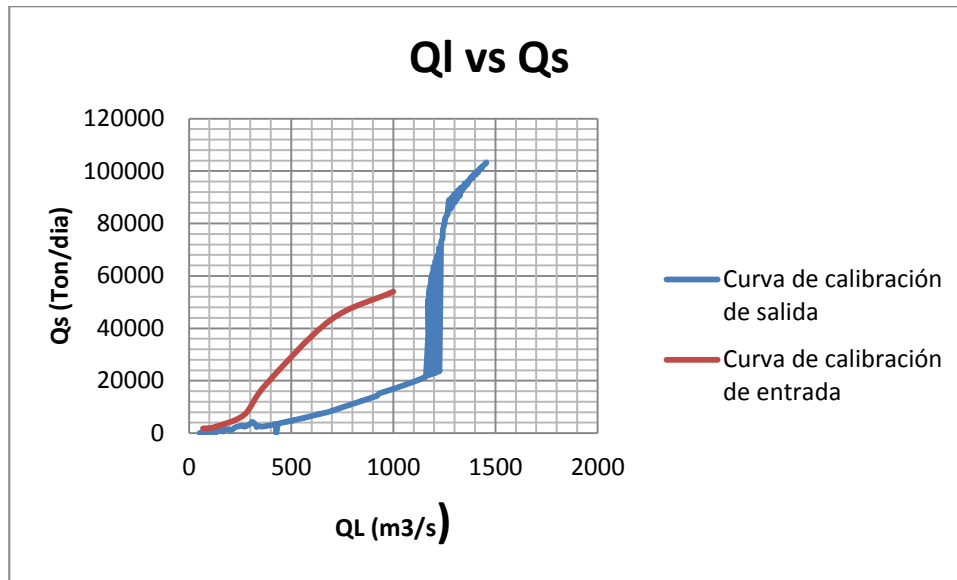


Figura 17. Curva de calibración de ( $Q_s$  vs  $Q_L$ ) Transporte de sedimentos England Hansen "Sección 7010"

#### 5.4.1.6 Caudal Líquido Vs Caudal solido

En la siguiente gráfica se han excluido los valores obtenidos mediante la función de Ackers desde  $Q_L = 0 \text{ m}^3/\text{s}$  hasta  $Q_L = 500 \text{ m}^3/\text{s}$  ya que se presentan con respecto a los valores medidos de  $4.76 \times 10^{34} \text{ ton/día}$  hasta los valores de  $Q_L$  menores a  $500 \text{ m}^3/\text{s}$ , desde este valor en adelante la función toma valores menores a los medidos.

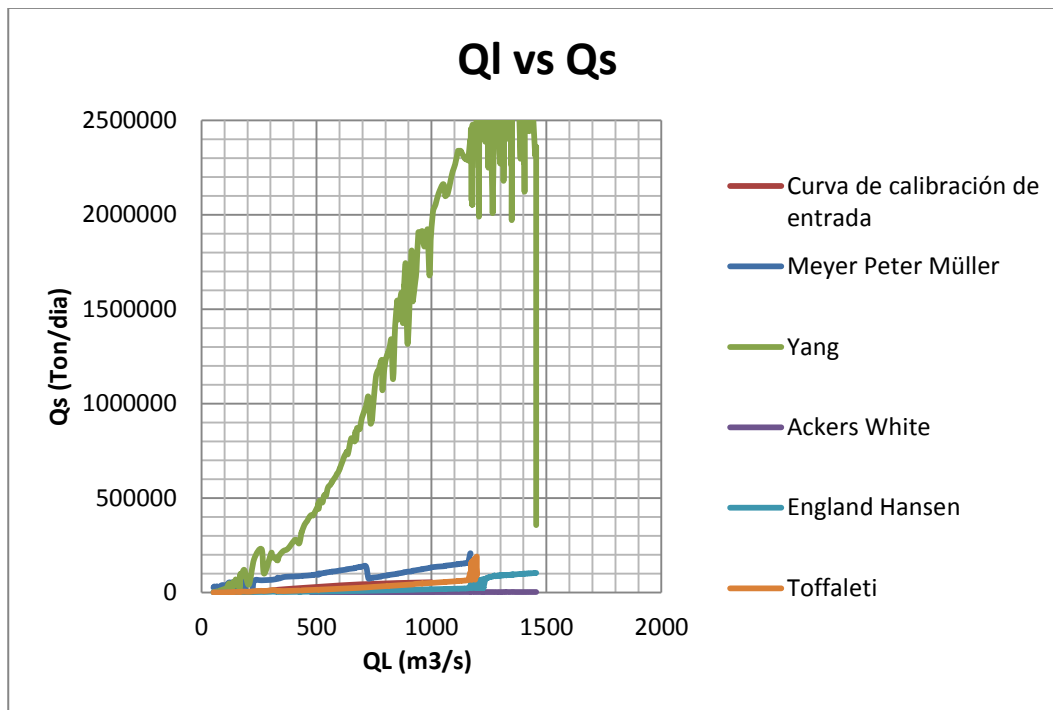


Figura 18. Comparación ( $Q_s$  vs  $Q_L$ ) para las funciones de transporte de sedimentos “Sección 7010”

Analizando los resultados obtenidos se pueden observar diferencias considerablemente grandes entre las funciones de transporte utilizadas

England Hansen y Ackers White muestran progresiones muy subestimadas respecto a los valores medidos, y respecto a las otras funciones de transporte de sedimentos. A continuación se muestra la nueva curva de caudales descartando las formulaciones de Yang y Ackers, donde de una forma más clara se observa que los datos obtenidos por Toffaleti están más cerca de los datos medidos en comparación con las otras funciones.

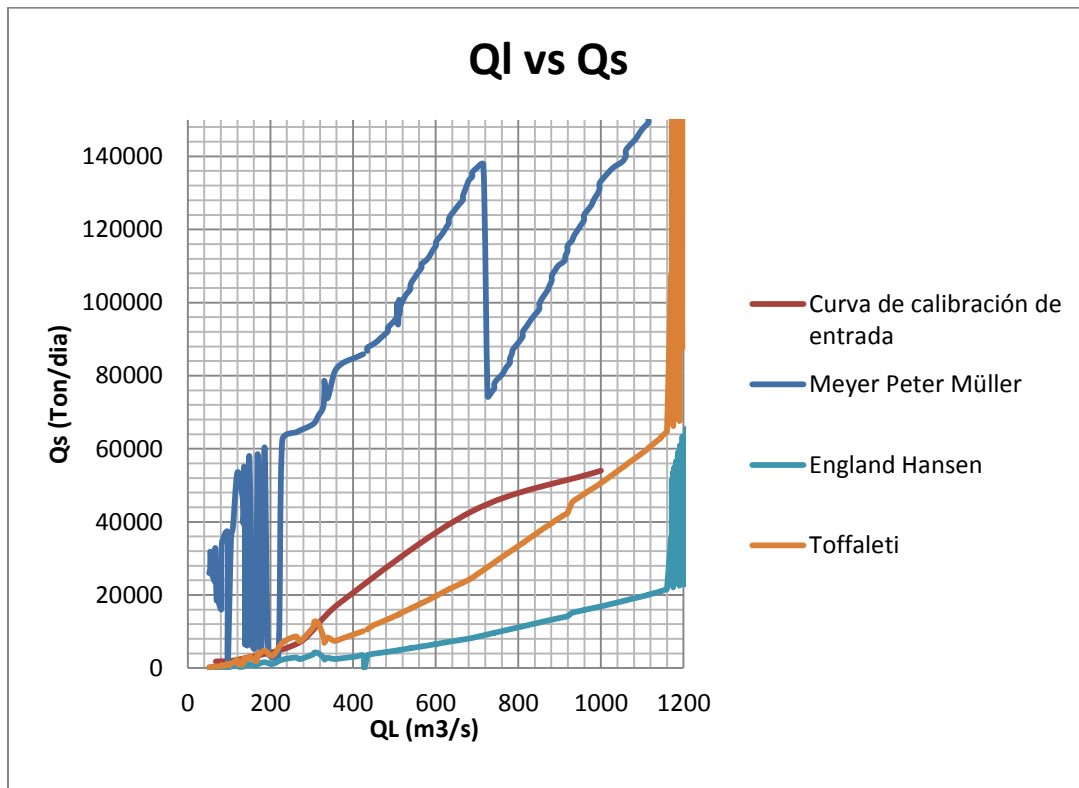


Figura 19. Comparación ( $Q_s$  vs  $Q_L$ ) para las funciones de transporte de sedimentos "Sección 7010"

## 6 CONCLUSIONES

Los niveles calculados con el modelo HECRAS representan adecuadamente los respectivos niveles registrados, tal como se muestra en los análisis realizados.

Para la simulación de flujo permanente, se llevó a cabo un análisis en régimen de flujo subcrítico, el coeficiente de correlación correspondiente a los niveles obtenidos de HEC RAS y los datos de la estación Calamar es 0.99988, lo cual indica que los datos obtenidos como resultado, representan adecuadamente los datos medidos en la estación de Calamar, con un coeficiente de rugosidad de 0.025 en el canal y en las bancas un valor de 0.01.

Para las condiciones de flujo no permanente, se comparan los resultados obtenidos en la sección aguas abajo ya que las condiciones de frontera se establecieron sólo aguas arriba, el coeficiente de correlación correspondiente a los niveles obtenidos de HEC RAS en la sección aguas abajo “sección-0” y los datos de la estación INCORA-K7 es 0.99894, lo cual indica que los datos obtenidos como resultado, representan adecuadamente los datos medidos en la estación de INCORA-K7.

El coeficiente de correlación correspondiente a los caudales obtenidos de HEC RAS en la sección aguas abajo “sección-0” y los datos de la estación INCORA-K7 es 0.99266, por lo tanto también se tiene una, representación adecuada de los datos medidos en la estación de INCORA-K7. De acuerdo con los resultados de flujo en el canal obtenidos del modelo HEC-RAS, para los meses entre Enero a Junio, los datos siguen la misma tendencia y son muy similares, a partir de Julio los datos obtenidos se alejan de los datos medidos en la estación debido a que la curva de calibración no contempló los niveles hasta el periodo 2010, sólo para el periodo 1967-2000, pero comparado con otras alternativas de condiciones de frontera, ésta alternativa es la más adecuada ya que se obtienen coeficientes de correlación tanto para caudales y niveles más cercanos a 1. en la “sección 0”.

Se calculó el transporte de sedimentos en un tramo de 7 km aplicando distintas funciones de transporte de sedimentos con el objetivo de establecer cuál de ellas presenta un mejor ajuste a partir de mediciones de campo. Se observa una tendencia a degradación del lecho del canal para el tramo de estudio.

Para la modelación de transporte de sedimentos, al final del evento se puede apreciar como entre la sección 7010 y 4000 se llevan cabo la mayor parte del transporte de sedimentos, se alcanzan profundidades hasta de -3.8 m.s.n.m. y se mantiene la profundidad máxima de 0.0 m.s.n.m.

Comparando las curvas de caudales obtenidas mediante las diferentes funciones de transporte, se observa que por lo general los valores medios para cada una de las ecuaciones, se encuentran más alejados entre sí, a medida que aumenta el caudal líquido, concretamente a partir del entorno de los 1000 m<sup>3</sup>/s. En cuanto a Yang y Meller, muestran valores superiores a la media, frente a England, que arrojan valores inferiores a los medidos, únicamente Toffaleti mantiene valores en el entorno de ambas desviaciones típicas, situándose como la formulación más próxima a los valores medidos en campo.



## 7 BIBLIOGRAFÍA BÁSICA:

1. CHOW, V.T; D.R MAIDMENT & L.W MAYS. Hidrología Aplicada. McGraw-Hill, 580 pp.
2. MONSALVE, Germán. Hidrología en la Ingeniería. Escuela Colombiana de Ingeniería, 383 pp.
3. SILVA, Gustavo. Hidrología Básica. Universidad Nacional de Colombia. 239 pp.
4. Coormagdalena, [www.cormagdalena.com.co](http://www.cormagdalena.com.co).
5. Wu, Weiming. Computational Ryver Dynamics. Taylor & Francis Group. 489 pp.
6. HEC RAS, release notes, US Army Corps Of Engineers, 21 pp.
7. HEC RAS 4.1, User's Manual, US Army Corps Of Engineers, 790 pp.
8. HEC RAS 4.1, Applications Guide, US Army Corps Of Engineers, 351 pp.
9. HEC RAS 4.1, Hydraulic Reference Manual, US Army Corps Of Engineers, 417 pp.
10. Alvarado Ortega, M., Anaya Herazo, H., Castro Escobar, R., Castro Martínez, G., Caicedo Reyes, J., Corredor Romero, H., y otros. (2008). *Río Magdalena Navegación Marítima y Fluvial (1986-2008)*. (M. A. Ortega, Ed.) Barranquilla, Colombia: Ediciones Uninorte.

**ANEXO 1- MODELO HEC RAS**