

**UNIVERSIDAD DE CUENCA**



UNIVERSIDAD DE CUENCA  
fundada en 1867

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**“CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE UN  
TRAMO DEL RÍO CALABÍ EN EL SECTOR DE TOMA UTILIZANDO UN  
MODELO MATEMÁTICO”**

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN  
DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DIRECTOR:

**ING. FELIPE EDUARDO CISNEROS ESPINOZA, Ph. D**

AUTORES:

**PATRICIO ARMANDO ESPINOZA MARQUEZ**

**GUSTAVO ENRIQUE VINTIMILLA ROJAS**

**CUENCA-ECUADOR  
OCTUBRE, 2013**



## RESUMEN

El proyecto “Plan de Aprovechamiento y Control del Agua en la Provincia de Los Ríos” (PACALORI) contempla la regularización del potencial hídrico de esta provincia, mediante la implementación de obras hidráulicas para facilitar el uso y distribución del agua. Dentro de estas obras está prevista la derivación del río Calabí mediante una obra de toma directa, ubicada en su margen derecho. Para el diseño óptimo de estas obras dentro del presente estudio se ha planteado la caracterización del comportamiento hidráulico del río Calabí en el sector de toma utilizando un modelo matemático.

La modelización matemática se ha realizado con el programa HEC-RAS y con su extensión HEC-GeoRAS desarrollada para procesar datos georeferenciados. En la elaboración de la geometría del río Calabí se utilizaron 12 secciones transversales levantadas a lo largo del tramo de estudio, para las secciones transversales complementarias se ha utilizado un modelo digital de elevación con cartografía base a escala 1:10000.

En el presente trabajo se ha obtenido un modelo matemático calibrado del tramo del río Calabí que comprende el sector de la toma, mediante el cual se determinó la curva de descarga en el sector de toma y las áreas de inundación para caudales de periodos de retorno de 50 y 100 años, los valores correspondientes a estas áreas fueron 426.78 y 458.73 hectáreas respectivamente.

**Palabras clave:** HEC-RAS, HEC-GeoRAS, Modelo matemático, Río Calabí.



## ABSTRACT

The Project “Plan for the Efficient Use and Water Control in the Province of Los Ríos” (PACALORI) strives for the regularization for the water potential of this province, by implementing hydraulic structures to facilitate the use and distribution of water. Within these structures, a Calabí river bypass through direct intake is expected, located in the right hand margin. For the optimal design of said structures, a hydraulic behavior characterization of the River Calabí in the in the intake sector, has been established in the in the present study, using a mathematical model.

Mathematical modeling has been performed with the software HEC-RAS and its extension HEC-GeoRAS developed to process georeferenced data. In developing the geometry of the Calabí river, 12 cross sections raised along the section being studied were used, for additional cross sections, a digital elevation model with base cartography at a scale of 1:10000 were used.

In this thesis, a calibrated mathematical model of a section of the Calabí river comprised of the intake sector has been obtained, in which the discharge curve in the intake sector and floodplains for flow rates for return periods of 50 and 100 years was determined. These values were 426.78 and 458.73 hectares respectively.

**Keywords:** HEC-RAS, HEC-GeoRAS, Mathematical model, Calabí river.



## CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	1
<b>Lista de Figuras</b> .....	6
<b>Lista de tablas</b> .....	7
<b>Lista de Símbolos</b> .....	8
<b>Agradecimiento</b> .....	13
<b>Dedicatoria</b> .....	14
<b>1. Introducción</b> .....	15
1.1 Antecedentes .....	15
1.2 Objetivo general.....	15
1.3 Objetivos específicos .....	15
1.4 Justificación .....	16
1.5 Alcance.....	16
<b>2. Marco Teórico</b> .....	17
2.1 Hidráulica Fluvial .....	17
2.1.1 Definición .....	17
2.1.2 Corrientes Naturales .....	17
2.1.3 Clasificación de ríos .....	17
2.1.4 Morfología Fluvial .....	17
2.1.5 Geometría Hidráulica .....	19
2.1.6 Caudal Dominante.....	19
2.1.7 Llanuras de Inundación .....	19
2.1.8 Transporte de sedimentos.....	19
2.2 Flujo en Canales Abiertos .....	19
2.2.1 Tipos de flujo en canales abiertos .....	20
2.2.2 Estados del flujo.....	21
2.2.3 Propiedades de los Canales Abiertos .....	22
2.2.4 Principios de Energía en canales abiertos .....	24
2.2.5 Flujo gradualmente variado.....	29
2.3 Modelos matemáticos para el estudio de procesos de flujo .....	33
2.3.1 Modelo matemático HEC-RAS .....	34
2.3.2 Modelo matemático HEC-GeoRAS.....	35
2.4 Obras de toma para aprovechamientos hidráulicos.....	36
2.4.1 Obras de toma superficiales .....	37



<b>3. Materiales y Métodos.....</b>	<b>40</b>
3.1 Descripción general del proyecto PACALORI.....	40
3.2 Ubicación del área de estudio .....	40
3.3 Recopilación de información y procesamiento de datos .....	41
3.4 Modelización en Hec GeoRas .....	42
3.4.1 Preproceso .....	42
3.4.2 Postproceso.....	45
3.5 Modelización en Hec-Ras .....	46
3.5.1 Pantalla principal de Hec-Ras .....	46
3.5.2 Geometría del Cauce .....	46
3.5.3 Simulación de flujo permanente en Hec-Ras.....	47
3.6 Calibración y Validación del Modelo.....	49
3.6.1 Calibración del Modelo .....	49
3.6.2 Condiciones de Frontera .....	50
3.6.3 Validación del Modelo .....	50
3.6.4 Sensibilidad del Modelo.....	50
<b>4. Resultados y Discusión .....</b>	<b>51</b>
4.1 Parámetros geométricos e hidráulicos para el modelo .....	51
4.1.1 Secciones transversales y perfil longitudinal .....	51
4.1.2 Coeficiente de rugosidad y caudales.....	53
4.1.3 Condiciones de Frontera .....	53
4.2 Calibración del modelo .....	53
4.3 Validación del Modelo.....	55
4.4 Curva de descarga en el punto de toma.....	57
4.5 Curva de velocidad en el punto de toma .....	59
4.6 Sensibilidad del modelo.....	60
4.7 Áreas de inundación para caudales de diferentes periodos de retorno.....	61
<b>5. Conclusiones y Recomendaciones .....</b>	<b>63</b>
5.1 Conclusiones.....	63
5.2 Recomendaciones.....	64
<b>6. Referencias .....</b>	<b>65</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>66</b>
Anexo 1 .....	66
Anexo 2 .....	72
Anexo 3 .....	73



Anexo 4 ..... 74

Anexo 5 ..... 80



## Lista de Figuras

Figura 2-1 Clasificación de ríos según su forma. (Arturo Rocha,1998).....	18
Figura 2-2 Curvas comunes de igual velocidad en diferentes secciones de canal. (Ven Te Chow, 1994).....	24
Figura 2-3 Energía de un flujo gradualmente variado en canales abiertos. (Ven Te Chow, 1994) .....	25
Figura 2-4 Curva de energía específica. (Ven Te Chow, 1994) .....	27
Figura 2-5 Caída y Resalto Hidráulico .....	29
Figura 2-6 Deducción de la ecuación del flujo gradualmente variado. (Ven Te Chow, 1994) .....	30
Figura 2-7 Clasificación de los perfiles de flujo en flujo gradualmente variado. (Ven Te Chow, 1994) .....	33
Figura 2-8 Pantalla principal del Hec-Ras.....	34
Figura 2-9 Localización de la obra de toma en un meandro .....	37
Figura 2-10 Esquema de una obra de toma superficial.....	38
Figura 3-1 Ubicación del área de estudio.....	41
Figura 3-2 Menú HEC-GeoRAS.....	42
Figura 3-3 Menú RAS Geometry y Create RAS Layer .....	43
Figura 3-4 Menú Layer Setup .....	44
Figura 3-5 Menú Stream Centerline Attributes .....	44
Figura 3-6 Menú XS Cut Line Attributes .....	45
Figura 3-7 Menú Layer Setup .....	45
Figura 3-8 Menú Inundation Mapping .....	46
Figura 3-9 Menú geometría del cauce .....	47
Figura 3-10 Ingreso de datos simulación para flujo permanente .....	47
Figura 3-11 Condiciones de contorno de flujo permanente .....	48
Figura 3-12 Cálculo del flujo permanente .....	49
Figura 4-1 Secciones transversales río Calabí.....	52
Figura 4-2 Perfil longitudinal del río Calabí.....	52
Figura 4-3 Curvas de descarga para la calibración .....	54
Figura 4-4 Resultado de la calibración en la sección de aforo .....	55
Figura 4-5 Resultados de la validación sección 3 .....	56
Figura 4-6 Resultados de la validación sección 4 .....	57
Figura 4-7 Resultados de la simulación en la sección del punto de toma .....	58
Figura 4-8 Curva de descarga en el punto de toma .....	59
Figura 4-9 Curva de velocidad en el punto de toma.....	59
Figura 4-10 Aumento del coeficiente de rugosidad.....	60
Figura 4-11 Disminución del coeficiente de rugosidad.....	61



## Lista de tablas

<i>Tabla 2-1 Elementos geométricos de secciones de canal. (Ven Te Chow, 1994)</i> .....	23
<i>Tabla 2-2 Tipos de perfiles de flujo en canales prismáticos. (Ven Te Chow, 1994)</i> .....	32
<i>Tabla 4-1 Secciones transversales y estaciones</i> .....	51
<i>Tabla 4-2 Calculo del coeficiente de rugosidad.</i> .....	53
<i>Tabla 4-3 Pendiente de condición de contorno del modelo</i> .....	53
<i>Tabla 4-4 Niveles de agua del modelo y del aforo caudales altos</i> .....	54
<i>Tabla 4-5 Niveles de agua del modelo y del aforo caudales bajos</i> .....	54
<i>Tabla 4-6 Coeficientes de rugosidad utilizados en el modelo</i> .....	55
<i>Tabla 4-7 Caudal y niveles de agua obtenidos con el modelo y medidos en campo</i> .....	56
<i>Tabla 4-8 Datos de caudales con periodos de retorno</i> .....	57
<i>Tabla 4-9 Caudales con periodo de retorno vs Cota de nivel de agua</i> .....	58
<i>Tabla 4-10 Variación del nivel de agua por el aumento del coeficiente de rugosidad</i> .....	60
<i>Tabla 4-11 Variación del nivel de agua por la disminución del coeficiente de rugosidad</i> .....	61
<i>Tabla 4-12 Áreas de inundación</i> .....	62



## Lista de Símbolos

$Fr$	Número de Froude
$y$	Profundidad del flujo
$T$	Ancho Superficial
$P$	Perímetro Mojado
$A$	Área Mojada
$R$	Radio Hidráulico
$D$	Profundidad Hidráulica
$\theta$	Angulo de la pendiente del fondo del canal
$d$	Profundidad del punto por debajo de la superficie del agua
$h_f$	Pérdida de energía
$\alpha$	Coefficiente de velocidad
$E$	Energía específica
$Q$	Caudal
$g$	Aceleración de la gravedad, $9.81 \text{ m/s}^2$
$y_1$	Profundidad de flujo subcrítico
$y_2$	Profundidad de flujo supercrítico
$y_c$	Profundidad crítica
$S_f$	Pendiente de la línea de energía
$S_0$	Pendiente del fondo
$S_w$	Pendiente de la superficie del agua
$n$	Coefficiente de rugosidad



## UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Patricio Armando Espinoza Márquez, autor de la tesis "CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE UN TRAMO DEL RÍO CALABÍ EN EL SECTOR DE TOMA UTILIZANDO UN MODELO MATEMÁTICO", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, octubre de 2013

Patricio Armando Espinoza Márquez  
0104941703

---

*Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999*

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316

e-mail [cdjbv@ucuenca.edu.ec](mailto:cdjbv@ucuenca.edu.ec) casilla No. 1103

Cuenca - Ecuador



## UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Gustavo Enrique Vintimilla Rojas, autor de la tesis "CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE UN TRAMO DEL RÍO CALABÍ EN EL SECTOR DE TOMA UTILIZANDO UN MODELO MATEMÁTICO", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciera de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, octubre de 2013

Gustavo Enrique Vintimilla Rojas  
0301507745

---

*Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999*

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316

e-mail [cdjbv@ucuenca.edu.ec](mailto:cdjbv@ucuenca.edu.ec) casilla No. 1103

Cuenca - Ecuador



## UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Patricio Armando Espinoza Márquez, autor de la tesis "CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE UN TRAMO DEL RÍO CALABÍ EN EL SECTOR DE TOMA UTILIZANDO UN MODELO MATEMÁTICO", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, octubre de 2013

Patricio Armando Espinoza Márquez  
0104941703

---

*Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999*

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316

e-mail cdjbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103

Cuenca - Ecuador



## UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Gustavo Enrique Vintimilla Rojas, autor de la tesis "CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE UN TRAMO DEL RÍO CALABÍ EN EL SECTOR DE TOMA UTILIZANDO UN MODELO MATEMÁTICO", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, octubre de 2013

Gustavo Enrique Vintimilla Rojas  
0301507745

---

*Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999*

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316

e-mail [cdjbv@ucuenca.edu.ec](mailto:cdjbv@ucuenca.edu.ec) casilla No. 1103

Cuenca - Ecuador



## **Agradecimiento**

Queremos extender el más sincero agradecimiento al personal técnico y administrativo del Programa para el Manejo del Agua y el Suelo PROMAS-Universidad de Cuenca, de manera especial a nuestro Director al Ing. Felipe Cisneros PhD. por su valiosa guía y asesoramiento para la realización de la presente tesis.

Patricio Armando Espinoza Márquez.  
Gustavo Enrique Vintimilla Rojas.



## Dedicatoria

A mis padres por ser mi ejemplo a seguir, les dedico con mucho cariño todo mi esfuerzo, por su interminable apoyo y sabios consejos en cada momento de mi vida. Por ser lo más importante que tengo, por enseñarme a luchar por mis metas y nunca dejarme caer, porque por ustedes pude llegar a ser quien soy.

A mis hermanos y amigos por su apoyo incondicional.

Patricio Armando Espinoza Márquez.

A mi familia y amigos por haberme brindado su apoyo incondicional.

Gustavo Enrique Vintimilla Rojas.

## **Capítulo 1**

### **Introducción**

#### **1.1 Antecedentes**

La estación invernal en el litoral ecuatoriano causa grandes estragos a la población de esta región, siendo afectados sectores como los de la salud, vivienda, agricultura, entre otros. Es así que es de vital importancia mantener un adecuado control sobre el agua para garantizar la seguridad de la población y su uso provechoso.

Por tal motivo se plantea el proyecto Plan de Aprovechamiento y Control del Agua en la Provincia en Los Ríos (PACALORI) que ocupa una extensión de 1900 Km<sup>2</sup>, ubicado en la parte central de la cuenca del río Guayas, al Sur de la ciudad de Quevedo, entre los ríos Daule y Catarama. El proyecto se basa fundamentalmente en almacenar agua durante el invierno y utilizarla durante el verano para regar las tierras que no disponen de agua segura y constante.

La planificación del proyecto se basa en regar dos sectores, derivando el agua de cursos de agua principales para su almacenamiento. Los sectores se enuncian a continuación:

Sector 1. Derivación del río Quevedo, Toma en la margen derecha del río Quevedo. Traslase Quevedo-Macul1-Muculillo-Macul2 y Traslase Quevedo-Mocache-Garsas-Mangas Saibas-La Angostura.

Sector 2. Derivación del río Calabí, Toma en la margen derecha del río Calabí. Traslase Calabí-Lechugal2-Aguacatal-Pueblo Viejo y Traslase Calabí-Lechugal2-Chojampe2-Chojampe-Estero Lechugal.

En el sector 2 está prevista la derivación del río Calabí hacia el río Lechugal mediante una obra de toma lateral y conducción, para el diseño óptimo de esta obra es necesaria la caracterización del comportamiento hidráulico del río Calabí en el sector de toma utilizando un modelo matemático.

#### **1.2 Objetivo general**

Caracterizar el comportamiento hidráulico del río Calabí para el diseño de la obra de toma.

#### **1.3 Objetivos específicos**

- Calibrar el modelo hidráulico.
- Analizar diferentes escenarios en el modelo calibrado.
- Construir la curva de descarga en la zona de captación.
- Determinar las áreas de inundación para caudales de diferentes periodos de retorno.

## **1.4 Justificación**

Debido a los problemas de sequías e inundaciones tradicionales que se producen en la provincia de Los Ríos se pretende regular el potencial hídrico de este sector, a través de la implementación de grandes Obras de Infraestructura Hidráulica, que permitan almacenar el agua durante la época de lluvias y usarla durante la época seca.

Dentro del proyecto PACALORI, se contempla la construcción de varias obras, entre las cuales tenemos obras de toma y conducción enfocadas en el almacenamiento y regulación del agua para su posterior utilización.

Para el sector 2 ya mencionado anteriormente, se plantea la derivación del río Calabí hacia el río Lechugal, a través de una obra de toma directa y una conducción mediante un túnel tipo baúl simplificado que trabaja a sección parcialmente llena.

Por tal motivo se requiere la implementación del modelo hidráulico del río Calabí para la determinación de los niveles de agua esperados en el lugar de la toma, insumo necesario para el diseño y construcción de las obras hidráulicas propuestas en el proyecto PACALORI para este sector.

## **1.5 Alcance**

Con la presente investigación se busca obtener un modelo matemático calibrado del tramo del río Calabí que comprende el sector de la toma, el tramo de estudio tiene una longitud aproximada de 15.3 km, con el modelo matemático calibrado se obtendrá la curva de descarga en el sector de toma y se determinará las áreas de inundación para caudales de diferentes periodos de retorno.

Este estudio será realizado a nivel de factibilidad con la información existente hasta esta etapa del proyecto.

## **Capítulo 2**

### **Marco Teórico**

#### **2.1 Hidráulica Fluvial**

##### **2.1.1 Definición**

La Hidráulica Fluvial combina conceptos de Hidrología, Hidráulica General, Geomorfología y Transporte de sedimentos. Estudia el comportamiento hidráulico de los ríos en lo que se refiere a los caudales y niveles medios y extremos, las velocidades de flujo, las variaciones del fondo por socavación y sedimentación, la capacidad de transporte de sedimentos y los ataques contra las márgenes. (Gustavo A. Silva Medina, 2009)

##### **2.1.2 Corrientes Naturales**

Se caracterizan porque su caudal es variable, transportan sedimentos, están sujetas a procesos de erosión, cambian su morfología pudiendo generar inundaciones en las áreas adyacentes.

##### **2.1.3 Clasificación de ríos**

Los ríos pueden ser clasificados en función de diferentes aspectos entre estos tenemos:

Según periodo de Actividad.- Pueden ser perennes, estacionales, transitorios, o alóctonos.

Según su edad.- Se clasifican en jóvenes, maduros y viejos.

Según su geomorfología.- Pueden ser rectos, trezados o meándricos.

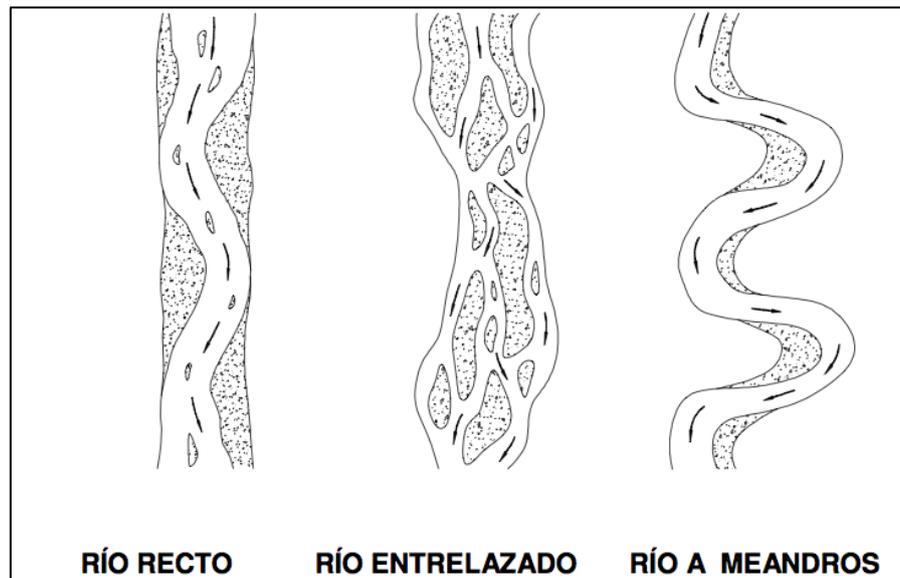
Según sus grados de libertad.- Pueden clasificarse en ríos de uno, dos, o tres grados de libertad.

Por tramos.- Pueden ser de alta montaña, montaña, falda de montaña, intermedio y de planicie.

##### **2.1.4 Morfología Fluvial**

Se encarga del estudio de la variación geométrica de los ríos en sus tres dimensiones: perfil longitudinal, la sección transversal y el alineamiento del canal, y el mecanismo mediante el cual el río ha llegado a estas formas.

El comportamiento fluvial de un río está en función de su topografía y geología. Las formas de un río son tantas como ríos existen, una clasificación para su estudio es la siguiente: Rectos, anastomosado y meándricos. En la Figura 2-1 se puede observar la forma de estos ríos.

**Figura 2-1** Clasificación de ríos según su forma. (Arturo Rocha, 1998)

Ríos Rectos.- Son de sinuosidad baja y de un solo canal. Son muy inestables y suelen transformarse en otro tipo de río, salvo cuando corren siguiendo una falla geológica. Tienen caudal de alta energía y gran capacidad erosiva. Un río recto podría definirse como aquel cuya sinuosidad es tan pequeña que puede despreciarse.

Ríos Anastomosados.- También llamados trenzados o entrelazados, son sistemas multicanalizados. Tienen gran capacidad de transporte y sedimentación. Tienen menor energía que las corrientes rectilíneas, por lo que, al encontrarse con obstáculos, tienden a modificar su trayectoria adecuándose al relieve y a los sedimentos en el fondo del cauce, presentan grandes islas y extensas planicies de inundación.

Los ríos entrelazados son inestables y de comportamiento altamente impredecible. Pueden tener gran cantidad de sólidos que forman islas transitorias.

Ríos Meándricos.- Son de alta sinuosidad y de un solo canal. Su característica principal es la unidad geométrica llamada meandro. Presentan curvas sobre el canal lo que genera dos velocidades distintas en ambas orillas.

Ya que los sedimentos en estos ríos se acumulan debido a la acción del canal principal y de la inundación periódica de las planicies laterales, están asociados a elementos morfológicos como son: el canal principal, bordes naturales, planicies de inundación, lagos laterales y las áreas de desborde.

#### **2.1.4.1 Influencia de la vegetación.**

La vegetación influye en la morfología debido a su acción en el suelo, es el caso de la fijación de las raíces.



### **2.1.5 Geometría Hidráulica**

Si se le permiten todos sus grados de libertad, un río es una corriente de agua que forma su cauce ajustando libremente la anchura, el calado y la planta. El problema de predecir o deducir esta geometría del río ha ocupado a muchos investigadores en Geomorfología. Se cuentan con observaciones relativamente sencillas de las características geométricas de los ríos que sugieren relaciones empíricas entre ellas. Dando un paso más, la pregunta de por qué adopta el río tales formas permanece todavía sin contestación completa. Este es el caso del porqué de los meandros. (Juan P. Martín Vide, 2003).

### **2.1.6 Caudal Dominante**

Debido a que el caudal de un río no es constante, debe emplearse el caudal que da lugar a la geometría hidráulica que se estudia.

Si una geometría es permanente se debe a que ciertos caudales por su frecuencia, magnitud o una combinación de los dos, pueden ser determinantes.

El caudal que llena a rebosar el cauce, es especialmente importante porque es el responsable principal de la forma y dimensiones del mismo.

Este caudal es el que ayuda a dar la forma al cauce principal. Por eso este caudal de cauce lleno se conoce también como caudal formativo o dominante.

### **2.1.7 Llanuras de Inundación**

Son áreas adyacentes al río. Su estudio es importante para conocer la afección que causaría un desbordamiento, como afectaría y si se van a construir obras que se debería tener en cuenta al momento de los diseños.

### **2.1.8 Transporte de sedimentos**

Los sedimentos transportados por un río son producto de la erosión del suelo o por el movimiento de masas como son los desprendimientos, deslizamientos, etc.

La magnitud más importante en el transporte de sedimentos es la velocidad de caída de la partícula.

## **2.2 Flujo en Canales Abiertos**

El flujo en canales abiertos se puede observar en corrientes naturales como en ríos, esteros, arroyos y en una variedad de formaciones geográficas accesibles para el flujo del agua cuyas secciones son irregulares, del mismo modo existen canales artificiales como es el caso de conducciones, acequias, y canales de desagüe con secciones constantes que pueden ser en la mayoría de casos rectangulares, triangulares o trapezoidales.

En el flujo en canales abiertos el líquido fluye por efectos de la gravedad, este se caracteriza por tener una superficie libre y que sobre él solo actúa la presión atmosférica y la presión debida a su propio peso. En canales abiertos la superficie interior varía desde metales pulidos utilizados en canaletas de laboratorio hasta los lechos rugosos e irregulares en ríos. Debido a que la rugosidad varía con la posición de la superficie libre, la selección adecuada de los coeficientes de fricción crea una mayor incertidumbre para el caso de canales abiertos.

## **2.2.1 Tipos de flujo en canales abiertos**

La clasificación del flujo en canales abiertos se hace de acuerdo con el cambio en la profundidad del flujo con respecto al tiempo y al espacio.

### **2.2.1.1 Flujo Permanente**

En este tipo de flujo se toma al tiempo como criterio. Se dice que el flujo en un canal abierto es permanente si la profundidad del flujo no cambia o puede suponerse constante durante el intervalo de tiempo en consideración.

### **2.2.1.2 Flujo no Permanente**

El flujo no permanente difiere del permanente en que la profundidad del flujo cambia con el tiempo. En la mayor parte de canales abiertos es necesario estudiar el comportamiento del flujo solo bajo condiciones permanentes. Sin embargo el cambio en la condición del flujo con respecto al tiempo es importante, el flujo debe tratarse como no permanente. Las crecientes y oleadas son los casos más comunes de flujo no permanente en donde el nivel del flujo cambia instantáneamente a medida que las ondas pasan y el tiempo es de vital importancia para el diseño de estructuras de control.

### **2.2.1.3 Flujo Uniforme**

Teniendo al espacio como criterio el flujo es uniforme si la profundidad del flujo es constante en cada sección del canal, además si existe o no una variación de la profundidad con respecto al tiempo este puede ser permanente o no permanente. El flujo uniforme permanente es el tipo de flujo fundamental que se considera en la hidráulica de canales abiertos. La profundidad del flujo no cambia durante el intervalo de tiempo bajo consideración.

### **2.2.1.4 Flujo Variado**

Se dice que el flujo es variado si la profundidad de flujo cambia a lo largo del canal, también puede ser permanente o no permanente. Además se clasifica como flujo rápidamente variado o gradualmente variado. El flujo es rápidamente variado si la profundidad del agua cambia de manera abrupta en distancias comparativamente cortas; de otro modo, es gradualmente variado. Un flujo rápidamente variado se produce como fenómenos locales tales como el resalto hidráulico y la caída hidráulica.

## **2.2.2 Estados del flujo**

El estado o comportamiento del flujo en canales abiertos está gobernado básicamente por los efectos de viscosidad y gravedad con relación con las fuerzas inerciales del flujo. El flujo por efectos de la viscosidad puede ser laminar, turbulento y transicional (estado mixto o medio) en relación con la inercia. Así mismo por efectos de la gravedad el flujo puede ser crítico, subcrítico, y supercrítico.

### **2.2.2.1 Numero de Reynolds**

El efecto de la viscosidad con relación a la inercia puede ser representado por el número de Reynolds, es así que el número de Reynolds permite predecir el carácter de flujo laminar o turbulento en ciertos casos. En conductos para valores del número de Reynolds menores a 2000 el flujo será laminar y para valores mayores de 4000 el flujo será turbulento.

### **2.2.2.2 Flujo Laminar**

El flujo es laminar si las fuerzas viscosas son muy fuertes con relación a las fuerzas inerciales. En el flujo laminar, las partículas de agua se mueven en trayectorias suaves definidas o en líneas de corriente, y las capas de fluido con espesor infinitesimal parecen deslizarse sobre capas adyacentes. Es por eso que se presentan en flujos con velocidades bajas o con viscosidades altas.

### **2.2.2.3 Flujo Turbulento**

Existe flujo turbulento cuando las fuerzas viscosas son débiles con relación a las fuerzas inerciales. En este caso la partículas de agua se mueven en trayectorias irregulares, que no son suaves ni fijas pero en conjunto aun si muestra la trayectoria hacia adelante de la corriente.

### **2.2.2.4 Numero de Froude**

El efecto de la gravedad sobre el estado de flujo se representa por la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales, esta relación viene dada por el número de Froude ( $Fr$ ). El número de Froude se usa cuando el estado de flujo se desea clasificar en función de la acción que sobre él ejerce la gravedad. Con base en éste número es posible distinguir el flujo en tres estados: el flujo crítico, el subcrítico y el supercrítico.

### **2.2.2.5 Flujo Crítico**

Este tipo de flujo posee una combinación de fuerzas inerciales y gravitacionales que lo hacen inestable, por lo que es poco recomendable, usarlo en el diseño de estructuras hidráulicas. Para este estado de flujo el número de Froude es igual a 1 y en esta condición no se generan resaltos hidráulicos.

### **2.2.2.6 Flujo Subcrítico**

Cuando las fuerzas inerciales son sobrepasadas en importancia por las gravitacionales el flujo es subcrítico. El flujo tiene velocidad baja y a menudo se lo denomina tranquilo y de corriente lenta, el número de Froude en este estado es menor a 1.

### **2.2.2.7 Flujo supercrítico**

En este estado de flujo las fuerzas inerciales se vuelven dominantes sobre las fuerzas gravitacionales. La velocidad es alta y se denomina normalmente como flujo rápido, ultrarápido y torrencial. Este estado de flujo propicia la formación de resaltos hidráulicos y número de Froude es mayor a 1.

## **2.2.3 Propiedades de los Canales Abiertos**

### **2.2.3.1 Clases de canales abiertos**

Según su origen un canal puede ser natural o artificial. Dentro de los canales naturales que existen en la tierra están los pequeños arroyuelos en montañas, quebradas, ríos y estuarios de mareas. Estos canales son irregulares y sus propiedades hidráulicas pueden determinarse de suposiciones empíricas razonablemente consistentes en las observaciones y experiencias reales, de tal modo que las condiciones de flujo en estos canales se vuelvan manejables mediante tratamiento analítico de la hidráulica teórica.

Los canales artificiales son realizados por el hombre, tales como canales de centrales hidroeléctricas, canales de riego, cunetas de drenaje, entre otros. Se construyen canales o canaletas en laboratorios con fines experimentales ya que las propiedades hidráulicas de estos pueden ser controladas para cumplir determinados requisitos.

La aplicación de las teorías hidráulicas a canales artificiales producirán, por tanto, resultados bastantes similares a las condiciones reales y, por consiguiente, son razonablemente exactos para propósitos prácticos de diseños. (Ven Te Chow, 1994)

### **2.2.3.2 Geometría de los Canales Abiertos**

Las secciones transversales de canales pueden ser consideradas como regulares o irregulares. Una sección regular es aquella cuya forma no varía a lo largo de un canal, mientras que una sección irregular experimenta cambios de geometría.

Los canales artificiales se diseñan comúnmente con secciones de figuras geométricas regulares, la sección más utilizada para canales de tierra sin recubrimiento es la del trapecio porque proveen de las pendientes necesarias para estabilidad. También son frecuentemente utilizadas secciones triangulares para cunetas a lo largo de las carreteras, y secciones rectangulares que se realizan con materiales estables como mampostería debido a que tiene lados verticales. Así también se utiliza la parábola para simular de una manera más aproximada secciones de canales naturales y las secciones circulares son destinadas a su uso en alcantarillas. (Ver Tabla 2-1 ).

### 2.2.3.3 Elementos geométricos de un canal

Los elementos geométricos son muy importantes y se utilizan ampliamente en el cálculo del flujo, pueden ser definidos por completo por la geometría de la sección y la profundidad del flujo. Los elementos geométricos básicos más importantes (Ven Te Chow, 1994) se enuncian a continuación:

*Profundidad del flujo (y)*: Es la distancia vertical desde el punto más bajo de una sección del canal hasta una superficie libre.

*Ancho Superficial (T)*: es el ancho de la sección del canal en la superficie libre.

*Área Mojada (A)*: es el área de la sección transversal del flujo perpendicular a la dirección del flujo.

*Perímetro Mojado (P)*: es la longitud de la línea de intersección de la superficie de canal mojada y de un plano transversal perpendicular a la dirección del flujo.

*Radio Hidráulico (R)*: es la relación del área mojada con respecto a su perímetro mojado.

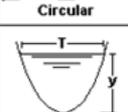
$$R = \frac{A}{P}$$

*Profundidad Hidráulica (D)*: es la relación entre el área mojada y el ancho en la superficie.

$$D = \frac{A}{T}$$

En la Tabla 2-1 se presenta una lista de ecuaciones para los elementos geométricos básicos para cinco de las secciones de canal comúnmente utilizadas.

**Tabla 2-1** Elementos geométricos de secciones de canal. (Ven Te Chow, 1994)

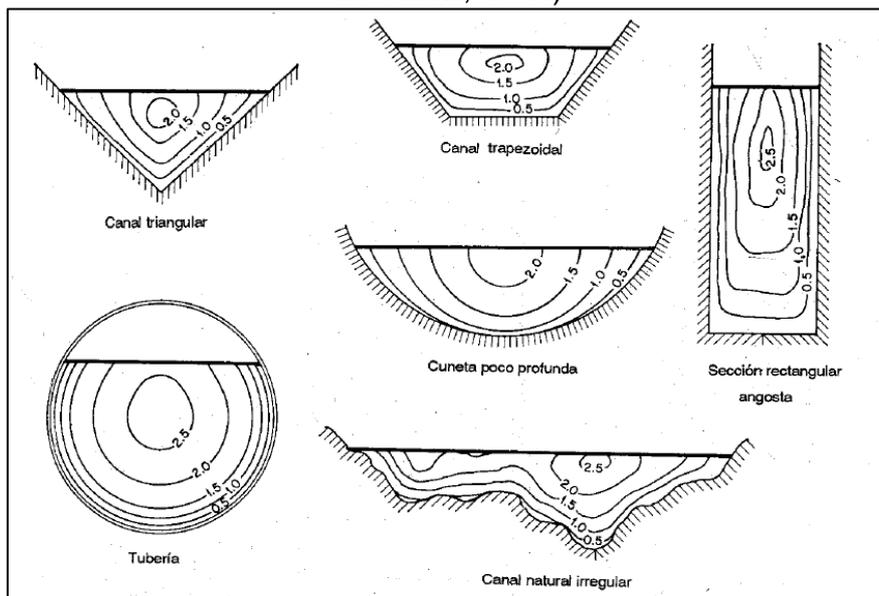
Sección	Área hidráulica A	Perímetro mojado P	Radio hidráulico R	Espejo de agua T
 Rectangular	$by$	$b+2y$	$\frac{by}{b+2y}$	$b$
 Trapezoidal	$(b+zy)y$	$b+2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{(b+zy)y}{b+2y\sqrt{1+z^2}}$	$b+2zy$
 Triangular	$zy^2$	$2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1+z^2}}$	$2zy$
 Circular	$\frac{(\theta - \text{sen}\theta)D^2}{8}$	$\frac{\theta D}{2}$	$(1 - \frac{\text{sen}\theta}{\theta})\frac{D}{4}$	$(\frac{\text{sen}\theta}{2})D$ ó $2\sqrt{y(D-y)}$
 Parabólica	$\frac{2}{3}Ty$	$T + \frac{8y^2}{3T}$	$\frac{2T^2y}{3T+8y^2}$	$\frac{3A}{2y}$

### 2.2.3.4 Distribución y medición de la velocidad

Las velocidades en el caso de canales abiertos, no están uniformemente distribuidas en su sección, la velocidad en las fronteras solidas es cero y normalmente va aumentando con la distancia de la frontera. La distribución de las velocidades en una sección de canal depende también de otros factores, entre ellos la forma inusual de la sección, la presencia de curvas a lo largo del canal y la rugosidad de las paredes del canal. En la Figura 2-2 se muestra la distribución de la velocidad para diferentes secciones de canal.

La velocidad máxima ocurre por debajo de la superficie libre a una distancia de 0.05 a 0.25 de la profundidad. La velocidad promedio a largo de una línea vertical de la sección de un canal se mide por la velocidad a 0.6 de la profundidad y si queremos ser más rigurosos un método más confiable es tomar el promedio de las velocidades a 0.2 y a 0.8 de la profundidad del canal, esto según el Servicio Geológico de los Estados Unidos.

**Figura 2-2** Curvas comunes de igual velocidad en diferentes secciones de canal. (Ven Te Chow, 1994)

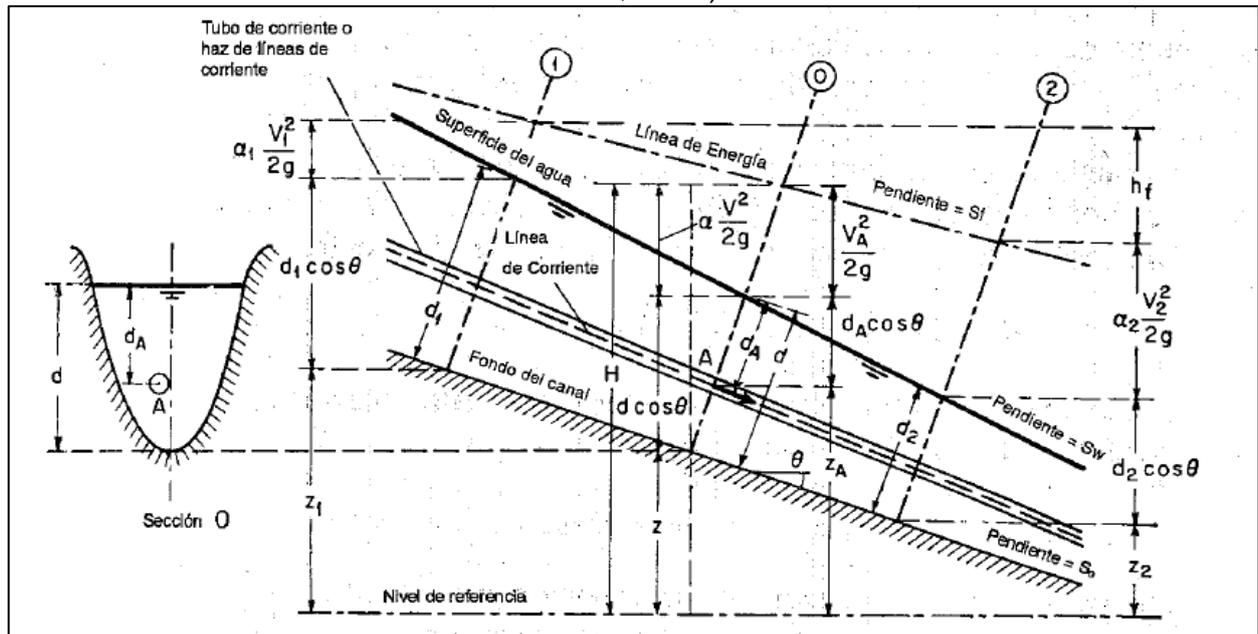


### 2.2.4 Principios de Energía en canales abiertos

#### 2.2.4.1 Energía del flujo en canales abiertos

La energía total del agua de cualquier línea de corriente que pasa a través de una sección de canal puede expresarse como la altura total de agua, que es igual a la suma de la elevación por encima del nivel de referencia, la altura de presión y la altura de velocidad.

**Figura 2-3** Energía de un flujo gradualmente variado en canales abiertos. (Ven Te Chow, 1994)



En la

Figura 2-3 (Ven Te Chow, 1994) se puede observar que con respecto al plano de referencia, la altura total  $H$  de una sección  $O$  que contiene al punto  $A$  en una línea de corriente del flujo de un canal de pendiente alta se puede escribir de la siguiente manera:

$$H = z_A + d_A \cos \theta + \frac{V_A^2}{2g}$$

Dónde:

$z_A$ : Elevación del punto por encima del plano de referencia.

$d_A$ : Profundidad del punto por debajo de la superficie del agua medido a lo largo de la sección del canal.

$\theta$ : Ángulo de la pendiente del fondo del canal.

$V_A^2/2g$ : Altura de la velocidad del flujo en la línea de corriente que pasa a través de la sección.

En general, cada línea de corriente que pasa a través de una sección del canal tendrá una altura de velocidad diferente debido a la distribución no uniforme de las velocidades. Pero para fines prácticos vamos a suponer que las alturas de velocidad para todos los puntos de la sección del canal son iguales, con el fin de tener en cuenta esta distribución, puede utilizarse el coeficiente de energía para corregir ese efecto; por lo tanto la energía total en el canal es:

$$H = z + d \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g}$$

Finalmente para canales con pendientes bajas,  $\theta \approx 0$ , por lo que la energía total en el canal es:

$$H = z + d + \alpha \frac{V^2}{2g}$$

Si se considera un canal prismático con pendiente alta, como el de la

Figura 2-3, la línea que representa la elevación de la altura total del flujo es la línea de energía. La pendiente de esa línea ( $S_f$ ) se conoce como gradiente de energía. La pendiente de la superficie de agua se representa por  $S_w$  y la de fondo por  $S_o$ .

De acuerdo con el principio de conservación de energía, la altura de energía total en la sección 1 localizada aguas arriba debe ser igual a la altura de la energía total en la sección 2 localizada aguas abajo más la pérdida de energía  $h_f$  entre las dos secciones.

$$z_1 + d_1 \cos \theta + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + d_2 \cos \theta + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_f \quad (1)$$

La ecuación anterior es aplicable a flujos paralelos o gradualmente variados. Para un canal de pendiente pequeña es:

$$z_1 + y_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_f \quad (2)$$

Las ecuaciones (1) y (2) son conocidas como ecuación de la energía. Cuando  $h_f=0$  y  $\alpha_1=\alpha_2=1$ , la ecuación de la energía total se convierte en la Ecuación de Bernoulli que resulta ser:

$$z_1 + y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \frac{V_2^2}{2g} = \text{constante}$$

#### 2.2.4.2 Energía Específica

Está definida como la cantidad de energía por unidad de peso en cualquier sección medida con respecto al fondo del canal. Por lo tanto la energía específica ( $z=0$ ) para un canal de pendiente pequeña ( $\theta=0$ ), y  $\alpha=1$ ; es:

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

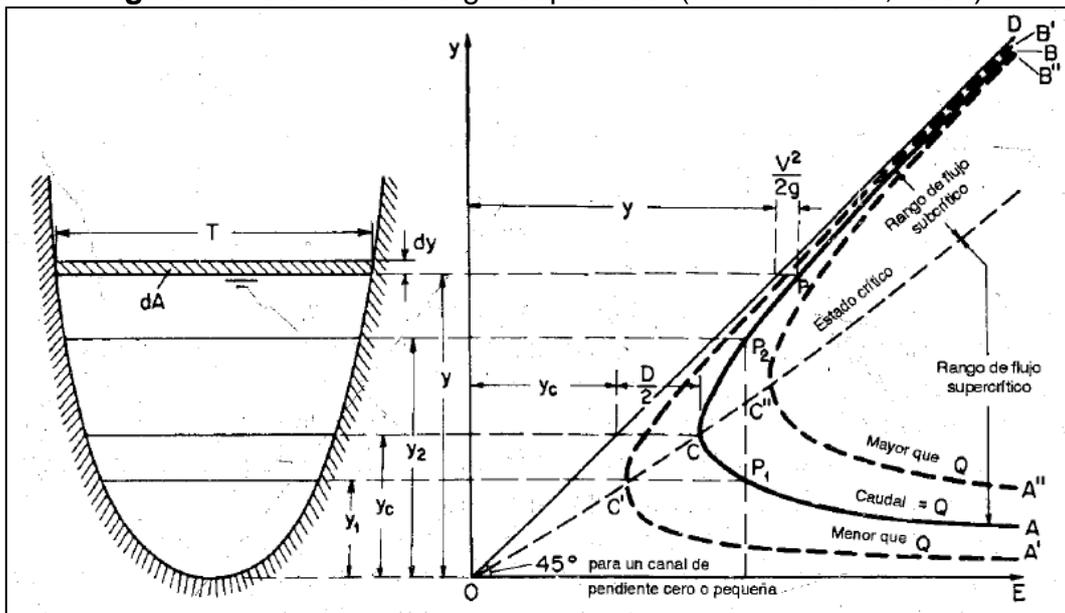
La ecuación anterior indica que la energía específica es igual a la suma de la profundidad del agua más la altura de velocidad. Puede verse que, para una sección de canal y caudal  $Q$  determinados, la energía específica en una sección de canal sólo

está en función de la profundidad de flujo. En términos de caudal la ecuación de la energía específica es:

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

Cuando la profundidad de flujo se gráfica contra la energía para una sección de canal y un caudal determinados, se obtiene una **curva de energía específica**, como se muestra en la Figura 2-4. Esta curva tiene dos ramas, AC y BC. La rama AC se aproxima asintóticamente al eje horizontal hacia la derecha. La rama BC se aproxima a la línea OD a medida que se extiende hacia arriba y hacia la derecha. La línea OD es una línea que pasa a través del origen y tiene un ángulo de inclinación. Para un canal de pendiente alta, el ángulo de inclinación de la línea OD será diferente de 45°. En cualquier punto P de esta curva, la ordenada representa la profundidad y la abscisa representa la energía específica, que es igual a la suma de la altura de presión "y" y la altura de velocidad  $V^2/2g$ . (Ven Te Chow, 1994).

**Figura 2-4** Curva de energía específica. (Ven Te Chow, 1994)



La curva muestra que, para una energía específica determinada, existen dos posibles profundidades, la profundidad baja  $y_1$  y la profundidad alta  $y_2$ . La profundidad baja es la profundidad alterna de la profundidad alta, y viceversa. En el punto C, la energía específica es mínima. Por consiguiente, en el estado crítico es claro que las dos profundidades alternas se convierten en una, la cual es conocida como profundidad crítica  $y_c$ . Cuando la profundidad de flujo es mayor que la profundidad crítica, la velocidad de flujo es menor que la velocidad crítica para un caudal determinado y, por consiguiente, el flujo es subcrítico. Cuando la profundidad de flujo es menor que la profundidad crítica, el flujo es supercrítico. Por tanto,  $y_1$  es la profundidad de un flujo subcrítico y  $y_2$  es la profundidad de un flujo supercrítico. (Ven Te Chow, 1994).

### 2.2.4.3 Fenómenos Locales

Un fenómeno local se produce cuando existe un cambio de estado de flujo subcrítico a supercrítico, y viceversa; manifestándose con cambios de profundidad alta a profundidad baja, o viceversa. Este cambio se produce con rapidez a lo largo de una distancia relativamente corta, y el flujo es rápidamente variado.

Se describen a continuación dos ejemplos de fenómenos locales conocidos como la caída hidráulica y el resalto hidráulico.

#### Caída Hidráulica

Este fenómeno se da frecuentemente en canales cuando existe un cambio rápido de un nivel alto a un nivel bajo generalmente como consecuencia de un cambio brusco de pendiente o de la sección transversal del canal. (Ver Figura 2-5).

En la región de transición de la caída, suele aparecer una curva invertida que conecta las superficies del agua antes y después de dicha caída. El punto de inflexión de la curva, indica la posición aproximada de la profundidad crítica para la cual la energía es mínima y el flujo pasa de ser subcrítico a supercrítico. Cuando existe una discontinuidad en el fondo de un canal plano, ocurre una caída hidráulica especial, conocida como caída libre.

#### Resalto Hidráulico

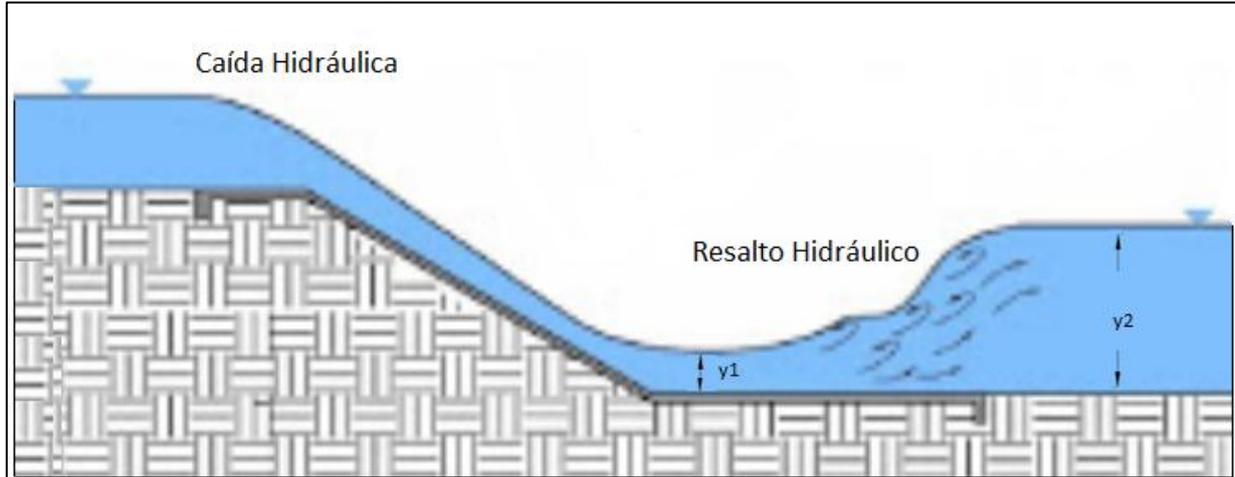
Se conoce como resalto hidráulico al ascenso brusco del nivel del agua que se presenta en un canal abierto a consecuencia del retardo que sufre una corriente de agua que fluye a elevada velocidad. Este fenómeno presenta un estado de fuerzas en equilibrio, en el que tiene lugar un cambio violento del régimen de flujo, de supercrítico a subcrítico.

Se produce una pérdida de energía relativamente grande mediante disipación en el cuerpo turbulento de agua dentro del resalto. La profundidad antes del resalto (profundidad inicial  $y_1$ ) es siempre menor que la profundidad después del resalto (profundidad final  $y_2$ ). (Ver Figura 2-5).

Para flujo supercrítico en un canal horizontal, la energía de flujo se disipa a través de la resistencia a la fuerza de fricción a lo largo del canal, dando como resultado un descenso en la velocidad y un incremento en la profundidad en la dirección del flujo.

Un resalto hidráulico se producirá si el número de Froude  $F_1$ , la profundidad inicial  $y_1$  y la profundidad final  $y_2$ , satisfacen la siguiente ecuación:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)$$

**Figura 2-5** Caída y Resalto Hidráulico

El resalto hidráulico tiene muchos usos prácticos en hidráulica, entre los cuales se pueden mencionar los siguientes, según Ven Te Chow, 1994:

1. Disipar la energía del agua que fluye sobre presas, vertederos y otras estructuras y prevenir la erosión aguas abajo.
2. Aumentar el nivel de agua aguas abajo de una canaleta de medición y mantener un nivel alto del agua en el canal de irrigación o de cualquier estructura para distribución de agua.
3. Incrementar el peso sobre la zona de aguas abajo de una estructura de mampostería y reducir la presión hacia arriba bajo dicha estructura, aumentando la profundidad del agua en su zona de agua abajo.
4. Aumentar el caudal por debajo de una compuerta deslizante manteniendo alejada la profundidad de aguas abajo, debido a que la altura efectiva se reducirá si la profundidad de aguas abajo ahoga el resalto.
5. Para indicar condiciones especiales de flujo, como la existencia de flujo supercrítico o la presencia de una sección de control, de tal manera que puede localizarse una estación de aforo.
6. Mezclar químicos utilizados para la purificación de agua y casos similares.
7. Airear el agua en sistemas de suministros urbanos.
8. Remover bolsas de aire

### 2.2.5 Flujo gradualmente variado

Un flujo gradualmente variado constituye una clase del flujo permanente no uniforme, consiste en una variación continua de la profundidad, la pendiente del fondo, la rugosidad, el área y el radio hidráulico a lo largo de la conducción.

Este tipo de flujo es característico encontrarlo aguas arriba y aguas abajo junto a obras de infraestructura hidráulica, como presas, compuertas, vertederos y en muchas otras.

Para llegar a desarrollar un análisis práctico en este tipo de flujo se adoptan las siguientes hipótesis:

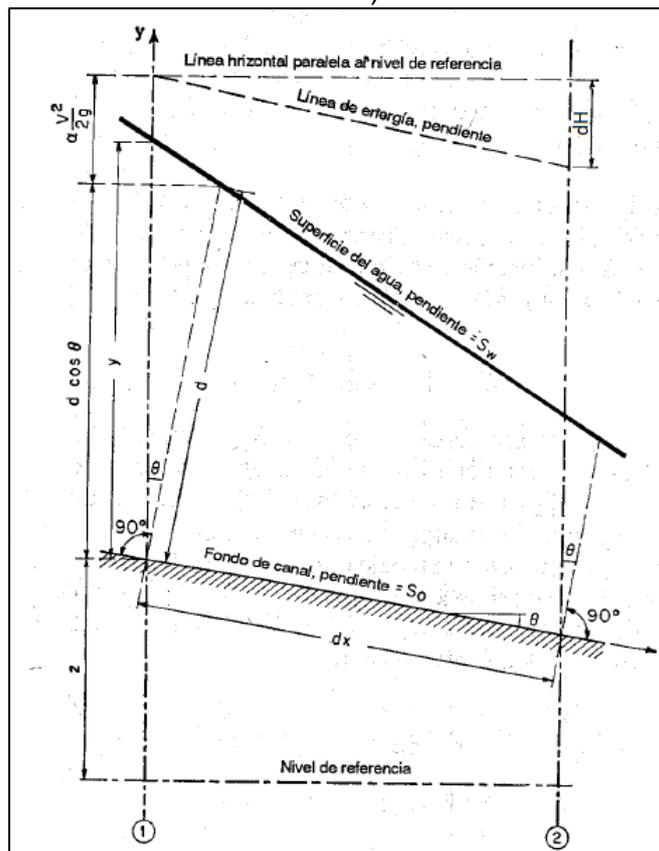
1. El flujo es permanente. (Flujo constante en el tiempo).
2. En cada sección del canal, la distribución de presiones es hidrostática. (Las líneas de corriente son paralelas).
3. La pendiente del canal es pequeña y uniforme.
4. El canal es prismático. (La forma y la alineación no varían).
5. El coeficiente de rugosidad es constante e independiente de la profundidad.
6. Se permite el uso de las mismas fórmulas del flujo uniforme, considerando únicamente que la pérdida de energía por fricción es la más importante.

### 2.2.5.1 Ecuación diferencial del flujo gradualmente variado

En la Figura 2-6 la altura de la línea de energía en la sección aguas arriba, con respecto a la línea de referencia es:

$$H = z + d \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g}$$

Figura 2-6 Deducción de la ecuación del flujo gradualmente variado. (Ven Te Chow, 1994)



$H$ ,  $z$ ,  $d$  y  $\theta$  se muestran en la Figura 2-6,  $\alpha$  es el coeficiente de energía y  $v$  es la velocidad media del flujo a través de la sección.

Se asume que  $\theta$  y  $\alpha$  son constantes en el tramo del canal.

Tomando el fondo del canal como el eje  $x$  y derivando la ecuación anterior con respecto a  $x$  se obtiene:

$$\frac{dH}{dx} = \frac{dz}{dx} + \frac{dd}{dx} \cos\theta + \alpha \frac{d(V^2/2g)}{dx}$$

$S_f$ : Pendiente de la línea de energía, el signo negativo se interpreta como la pérdida de energía que existe en el sentido del flujo.

$$S_f = -\frac{dH}{dx}$$

$S_o$ : Pendiente del fondo, ( $\theta$  pequeño). El signo se debe a que  $z$  disminuye a medida que  $x$  aumenta en el sentido del flujo.

$$S_o = -\frac{dz}{dx} = \tan\theta = \text{sen}\theta$$

$S_w$ : Pendiente de la superficie del agua.

$$S_w = -\frac{dd}{dx}$$

Sustituyendo las expresiones anteriores en la ecuación y resolviendo para  $S_w$  se tiene:

$$S_w = \frac{S_o - S_f}{\cos\theta + \alpha \frac{d}{dd} \left( \frac{V^2}{2g} \right)}$$

Esta ecuación representa la pendiente de la superficie de agua con respecto al fondo del canal y se conoce como la *ecuación dinámica del flujo gradualmente variado*.

Para la mayoría de los problemas de canales la pendiente es pequeña por lo tanto para pendientes pequeñas  $\cos\theta \approx 1$ ,  $d \approx y$ ,  $dd/dx \approx dy/dx$  y la ecuación puede escribirse:

$$S_w = \frac{S_o - S_f}{1 + \alpha \frac{d}{dy} \left( \frac{V^2}{2g} \right)}$$

### 2.2.5.2 Tipos de perfiles de flujo

Los criterios básicos que se toman en cuenta para clasificar los diferentes tipos de flujo son la profundidad y la pendiente.

De acuerdo a la profundidad se determinan tres zonas:

Zona 1: sobre la profundidad normal (en pendiente subcrítica) o sobre la crítica (en pendiente supercrítica).

Zona 2: Entre las profundidades crítica y normal.

Zona 3: Bajo la profundidad crítica (en pendiente subcrítica) o bajo la profundidad normal (en pendiente supercrítica).

De acuerdo a la pendiente se consideran los siguientes:

- H: Horizontal.
- M: Moderada o subcrítica.
- C: Crítica
- S: Pronunciada o supercrítica.
- A: Adversa.

Estos dos criterios permiten hacer la clasificación como H2, H3; M1, M2, M3; C1, C2, C3; S1, S2, S3; A2 y A3, donde la letra se refiere a la pendiente y el número a la zona de profundidad. La clasificación anterior se resumen en la Tabla 2-2.

**Tabla 2-2** Tipos de perfiles de flujo en canales prismáticos. (Ven Te Chow, 1994)

Pendiente del canal	Designación de perfil			Relación relativa de $y$ a $y_N$ y $y_c$	Tipo de curva	Tipo de flujo	
	Zona 1	Zona 2	Zona 3				
Suave $0 < S_o < S_c$	M1	M2		$y > y_N > y_c$	Remanso	Subcrítico	
					$y_N > y > y_c$	Caída	Subcrítico
				M3	$y_N > y_c > y$	Remanso	Supercrítico
Crítica $S_o = S_c > 0$	C1	C2		$y > y_c = y_N$	Remanso	Subcrítico	
					$y_c = y = y_N$	Paralela al fondo del canal	Uniforme-crítico
				C3	$y_c = y_N > y$	Remanso	Supercrítico
Fuerte $S_o > S_c > 0$	S1	S2		$y > y_c > y_N$	Remanso	Subcrítico	
					$y_c > y > y_N$	Caída	Supercrítico
				S3	$y_c > y_N > y$	Remanso	Supercrítico
Horizontal $S_o = 0$	Ninguna	H2		$y_N > y > y_c$	Caída	Subcrítico	
				H3	$y_N > y_c > y$	Remanso	Supercrítico
Adversa $S_o < 0$	Ninguna	A2		$y_N^* > y > y_c$	Caída	Subcrítico	
				A3	$y_N^* > y_c > y$	Remanso	Supercrítico

Para poder ilustrar de mejor manera la clasificación de los tipos de perfiles en flujo gradualmente variado (Ven Te Chow, 1994) se presenta la Figura 2-7, de cada grupo de perfiles.

**Figura 2-7** Clasificación de los perfiles de flujo en flujo gradualmente variado. (Ven Te Chow, 1994)

	Zona 1 $y > y_n; v > v_c$	Zona 2 $y_n \geq y \geq y_c; v_c \geq v \geq v_n$	Zona 3 $y < y_n; v < v_c$
Pendiente Horizontal $S_0 = 0; y_n > y_c$	Ninguno	Caída-subcrítico	Remanso-supercrítico
Pendiente Moderada $0 < S_0 < S_c; y_n > y_c$	Remanso-subcrítico	Caída-subcrítico	Remanso-supercrítico
Pendiente crítica $S_0 = S_c > 0; y_n = y_c$	Remanso-subcrítico	Crítico	Remanso-supercrítico
Pendiente pronunciada $S_0 > S_c > 0; y_n < y_c$	Remanso-subcrítico	Caída-supercrítico	Remanso-supercrítico
Pendiente Adversa $S_0 < 0$	Ninguno	Caída-subcrítico	Remanso-supercrítico

### 2.3 Modelos matemáticos para el estudio de procesos de flujo

Los modelos matemáticos para el estudio del flujo de agua en un río son utilizados para intentar conocer los valores que toman las variables hidráulicas (calado, velocidades, caudal, etc.) a partir de la resolución por métodos numéricos de ecuaciones obtenidas con una serie de hipótesis. La modelización matemática es una aproximación a la realidad, que ha ido evolucionado paralelamente a la capacidad de los ordenadores, al desarrollo del cálculo numérico en general y al desarrollo de la modelación numérica en áreas de conocimiento próximas.

Para obtener valores de las velocidades y niveles de agua se usan mayoritariamente modelos unidimensionales en régimen gradualmente variado y fondo fijo. Estos pueden ser una herramienta suficiente para estudios donde la evolución temporal no sea un factor a tener en cuenta y el flujo sea eminentemente unidimensional. Este tipo de modelos se basan en esquemas numéricos relativamente simples pero eficaces, pueden considerar cambios de régimen, cauces con geometrías complejas y con

llanuras de inundación y singularidades tales como azudes, puentes, pasos bajo vía, etc.

Si el proceso a estudiar es claramente no permanente se debe acudir a las ecuaciones unidimensionales del régimen gradualmente variable o ecuaciones de Saint Venant. Para intentar resolver estas ecuaciones se han utilizado en el pasado gran cantidad de esquemas numéricos distintos, algunos de ellos con las ecuaciones completas y muchos otros con distintas simplificaciones que desprecian los términos con menor contribución, dando lugar a los métodos conocidos como métodos hidrológicos. La razón para no utilizar las ecuaciones completas, es poder reducir el tiempo de cálculo.

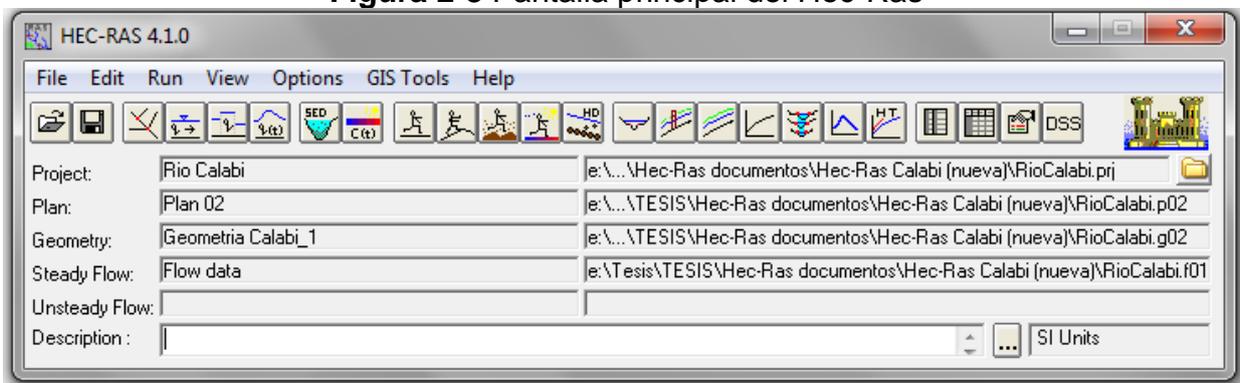
Con la aparición de los modelos comerciales los problemas hidráulicos a estudiar se lo realiza con herramientas relativamente sencillas de utilizar. Algunas se han popularizado en gran manera resolviendo problemas hidráulicos como la propagación de avenidas en ríos, valores de las velocidades y niveles de agua.

### 2.3.1 Modelo matemático HEC-RAS

Los modelos que permiten estudiar cauces fluviales mediante la aproximación unidimensional y régimen permanente gradualmente variado son los más extensamente utilizados por su sencillez y amplia difusión. Entre ellos destaca el modelo *HEC-RAS* del Hydraulic Engineering Center (HEC) del U.S. Army Corps of Engineers. Este modelo ha ido evolucionando con el tiempo y aumentando sus capacidades, de manera que permite representar ríos con cambios de régimen, secciones compuestas irregulares, puentes, pasos bajo vías, uniones, etc. A su vez, posee cómodas interfaces gráficas para representar la geometría y ver los resultados, comparando distintas hipótesis de funcionamiento, y realizar informes.

HEC-RAS es un programa de uso libre, desarrollado por el Hydrologic Engineering Center del USACE ([www.hec.usace.army.mil](http://www.hec.usace.army.mil)). El programa permite calcular redes fluviales y permite considerar elementos especiales como puentes, azudes, compuertas, tubos, etc. El estudio para un río determinado se llama un *proyecto*, y en cada proyecto puede haber diversos *planes*, siendo cada plan una combinación de una geometría determinada con unas condiciones de flujo dadas (caudales y condición de contorno).

Figura 2-8 Pantalla principal del Hec-Ras



El programa permite el cálculo unidimensional por diferencias finitas utilizando el método del pasó estándar para flujo permanente de la superficie libre de agua para

uno o red de causas de las siguientes capacidades: métodos de balance y/o continuidad en confluencias y separación de causas; modelamiento de flujo de canales en puentes, alcantarillas, estructuras en línea (presas, aliviaderos, vertederos), estructuras laterales (vertederos laterales, áreas de almacenamiento); socavación en puentes ocasionados por pilares, estribos y contracciones; modelamiento de flujo no permanente; transporte de sedimentos, modificación de causas y calidad de aguas.

Las hipótesis que se tienen en cuenta para la validez de las ecuaciones unidimensionales del régimen gradualmente variable son las siguientes:

- El flujo es unidimensional: el calado y la velocidad varían sólo en la dirección horizontal en cualquier sección y transversal perpendicular al eje del cauce.
- El flujo varía gradualmente a lo largo del canal, lo que implica que la distribución de presiones es hidrostática y que las aceleraciones verticales son despreciables.
- El eje del cauce es una línea recta.
- La pendiente del fondo es pequeña y el lecho es fijo, lo que implica que no hay erosión ni sedimentación.
- Los coeficientes de resistencia para flujo uniforme permanentemente turbulento son aplicables, por ejemplo, se utiliza la ecuación de Manning para describir el efecto de la resistencia.
- El fluido es incompresible y de densidad constante.

### 2.3.2 Modelo matemático HEC-GeoRAS

HEC-GeoRAS es un conjunto de herramientas y utilidades para procesar datos georeferenciados en ArcGis desarrollada conjuntamente por el Hydrologic Engineering Center (HEC) del United States Army Corps of Engineers y el Environmental System Research Institute (ESRI). La interface permite preparar los datos geométricos para luego ser importados al HEC-RAS, luego los datos obtenidos en el HEC-RAS pueden ser visualizados en ArcGis.

Básicamente HEC-GeoRAS crea un archivo para importar a HEC-RAS con datos de geometría del terreno incluyendo cauce del río, secciones transversales, puentes, alcantarillas, zonas de almacenamiento, etc. Posteriormente los resultados obtenidos de calados y velocidades se exportan desde HEC-RAS a ArcGis y pueden ser procesados para obtener mapas de inundación y riesgo.

El proceso consta de 3 pasos:

- Preproceso: El trabajo previo con ArcGis, genera un archivo de importación para HEC-RAS con la información geométrica. Se utiliza el menú RAS Geometry.
- La modelización en HEC-RAS y generación del archivo para ArcGis.
- Postproceso: Genera los resultados finales para ser visualizados en ArcGis. Se utiliza el menú RAS Mapping.

## 2.4 Obras de toma para aprovechamientos hidráulicos

Una obra de toma es un conjunto de estructuras que se construyen con el objeto de extraer el agua de forma controlada para ser aprovechada en sistemas de conducción, riego, agua potable, etc. La obra de toma es la estructura con la cual se tomarán decisiones respecto a la disposición de los demás componentes de una obra en general.

### Consideraciones principales para el diseño de una obra de toma o bocatoma

- Asegurar la derivación permanente del caudal de diseño.
- Captar el mínimo de sólidos y disponer de medios adecuados para su evacuación.
- Proveer un sistema adecuado que permita el paso de las avenidas que tienen gran cantidad de sólidos y material flotante.
- Estar ubicada en un lugar que presente condiciones favorables desde el punto de vista de funcionamiento hidráulico y de facilidades de construcción.
- Presentar aguas abajo suficiente capacidad de transporte para evitar sedimentación.

Normalmente las obras de toma deben tener un dique que cierre el cauce del río y que eleve el nivel del agua hasta una cota determinada, para asegurar un buen funcionamiento y cumplir con las condiciones de diseño.

Cuando se dan casos especiales en donde el caudal mínimo del río excede apreciablemente al de captación y el cauce es profundo, es posible suprimir las obras de cierre (azud) y construir directamente la captación en la orilla, teniendo en cuenta: la mínima profundidad del río, la cantidad de sedimentos que transporta y la invariabilidad del cauce.

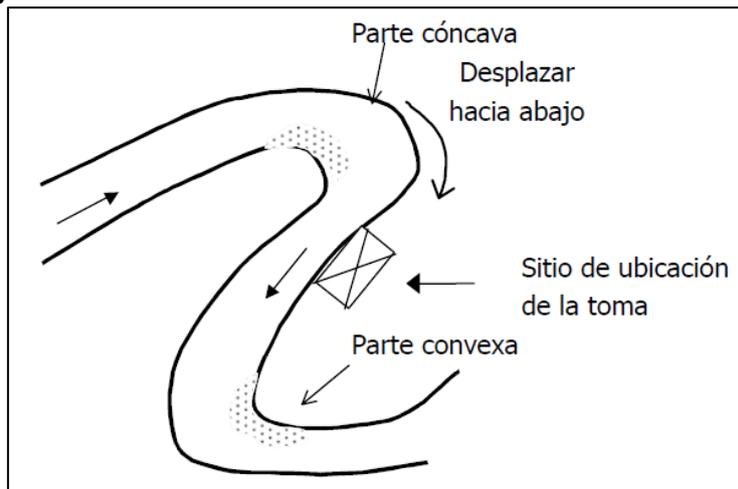
### Ubicación de la obra de toma

Se recomienda por conveniencia ubicar la bocatoma en tramos rectilíneos del río, localizando el eje de la misma para que forme un ángulo de 60-90 grados con la dirección de la corriente.

Si existen meandros y curvas se debe ubicar la bocatoma en donde termina la concavidad (zona de barranco) y comienza la parte convexa (zona de playa). Ver Figura 2-9.

La disposición de un terreno plano es ideal para situar el desripador y la transición entre el vertedero del desripador y la conducción.

En el lugar donde se implantará la obra de toma se deben evitar los riesgos de que durante las avenidas entren arenas y piedras, y que no formen bancos de arena frente a la bocatoma que impidan o hagan difícil la derivación o captación.

**Figura 2-9** Localización de la obra de toma en un meandro

### Formas de captación

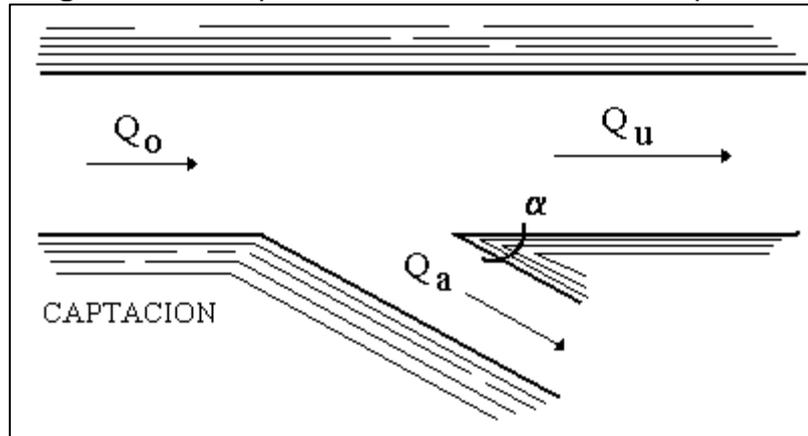
La captación del agua para su posterior uso y distribución puede ser de diversas formas entre las cuales tenemos las siguientes:

- 1) *Por Almacenamiento*. Cuando por la corriente que se usará no transita agua suficiente durante el periodo de sequía o estiaje como para suplir la demanda y es necesario almacenarla en un embalse durante el invierno para soltarla o distribuirla después en la época de verano.
- 2) *Por Derivación*. Cuando la fuente que se usará lleva un caudal suficiente durante el periodo de demanda y esta puede ser suplida en su totalidad.
- 3) *Por Bombeo del subsuelo*. Cuando se dispone de una capa freática de buen almacenamiento, suficiente para satisfacer la demanda y cuya recuperación puede lograrse con facilidad.

#### **2.4.1 Obras de toma superficiales**

Las obras de toma superficiales tienen por objetivo desviar el agua del cauce natural de un río hacia los sistemas de conducción. La utilización del agua a través de la obra de toma tendrá consecuencias sobre el curso natural en cuanto a su morfología, régimen de escurrimiento, nivel de aguas subterráneas, etc. Por lo tanto, es necesario tener conocimiento previo de las características y condiciones que ofrece el río o quebrada que se piensa aprovechar. Un esquema general de una toma superficial se presenta en la Figura 2-10.

Dentro de las obras de toma superficiales tenemos varios tipos, entre las cuales tenemos las obras de toma de derivación directa, que serán descritas a continuación.

**Figura 2-10** Esquema de una obra de toma superficial

#### 2.4.1.1 Obras de toma de derivación directa

Este tipo de obras de toma son de las más antiguas y son usadas aun como alternativa primaria para el riego de parcelas aledañas al río o quebrada. El diseño más rudimentario consiste en una simple apertura en el curso natural, orientando el flujo hacia el sistema de conducción (normalmente un canal).

El agua captada por medio de derivación directa puede ser por derivación directa lateral y frontal, estas se describen a continuación:

- *Derivación Directa Lateral.* Es aquella en la cual el río presenta en su perfil transversal, una altura de agua suficiente como para provocar el paso del agua hacia la obra sin represarla y consta de: Una bocatoma o estructura de compuertas que permite la admisión del agua, y una transición al canal o tubería de derivación que conduce a la zona del proyecto.
- *Derivación Directa Frontal.* Cuando el agua en la sección transversal de toma no tiene altura suficiente para funcionar como derivación directa lateral, se procura encauzar las aguas hacia la bocatoma colocándola directamente frente a la corriente, en ocasiones ayudándose con un espolón direccional conformado por el mismo material del río; esta derivación consta de las mismas estructuras que la anterior.

Las tomas por derivación directa deben cumplir con las siguientes condiciones:

- Con cualquier profundidad del río deben captar una cantidad de agua prácticamente constante.
- Deben impedir hasta donde sea posible la entrada de material sólido y flotante a la conducción, y hacer que éste siga por el río.
- Satisfacer todas las condiciones de seguridad necesarias.

#### 2.4.1.2 Obra de toma de derivación directa en ríos

La forma de captar agua de una corriente superficial, mediante una toma directa, varía según el volumen de agua por captar y las características de la corriente, es decir, el régimen de escurrimiento, que puede ser del tipo permanente o variable, su caudal en épocas de sequías y durante avenidas, velocidad, pendiente del cauce, topografía de



la zona de captación, constitución geológica del suelo, material de arrastre, niveles de agua máximo y mínimo en el cauce, y naturaleza del lecho del río.

La mayor parte del agua consumida por el hombre es extraída de los ríos y utilizada aprovechando la fuerza de la gravedad por medio de captaciones ubicadas a suficiente altura sobre el sitio de consumo, para que el agua corra por su propio peso.

Las tomas por derivación directa captan el agua que viene por el río sin ningún almacenamiento, o sea que no hay regulación y se aprovecha el caudal que hay en un momento dado. El agua se capta directamente mediante un canal lateral, es más económico tratándose de ríos relativamente grandes. Se evita la construcción de un dique costoso y en general su construcción es sencilla.

Las tomas sin azud (presa) tienen muchos inconvenientes, y por lo cual la mayoría de obras de toma tienen un dique que cierra el cauce del río y eleva el agua hasta una cota determinada.

Para que el funcionamiento de una captación directa sin ninguna obra en el cauce sea satisfactorio, el río debe reunir o cumplir las siguientes condiciones:

1. El río sea de llanura. Para asegurar un servicio interrumpido el caudal del río debe ser bastante mayor que el caudal de derivación (caudal de diseño para el canal) y se debe tener la seguridad que la profundidad del río en el sitio de la toma no disminuya respecto a cierta cota mínima.

2. El río debe tener el cauce estable y las orillas firmes, para evitar sedimentos y erosiones que puedan inutilizar las obras de toma.

## **Capítulo 3**

### **Materiales y Métodos**

#### **3.1 Descripción general del proyecto PACALORI**

El aprovechamiento y el control de los recursos hídricos en el Ecuador son manejados por la SENAGUA, por medio de nueve demarcaciones hidrográficas, una de las más importantes lo constituye la Demarcación Hidrográfica de la Cuenca del río Guayas (DHG) que abarca una superficie aproximada de 44.600 km<sup>2</sup>. Dentro de esta demarcación se encuentra la provincia de Santa Elena y la cuenca del río Guayas. En la parte central de la cuenca del río Guayas se ubica la provincia de Los Ríos cubriendo una extensión de 7.176 km<sup>2</sup> y que cuenta con un sistema hidrográfico fluvial conformado principalmente por los ríos Vinces y Babahoyo.

La cuenca del río Guayas se caracteriza por tener agua en abundancia pero con un desequilibrio natural en su distribución anual, el 80% de las lluvias se dan entre enero y mayo mientras que 20% restante entre julio y diciembre. Por este motivo se producen grandes inundaciones en los periodos húmedos contrastando con sequias extremas en los periodos secos. Al encontrarse dentro de la cuenca del río Guayas la provincia de Los Ríos tiene un comportamiento similar, la distribución del agua es inequitativa y no se puede garantizar su suministro para proyectos destinados a riego y potabilización.

Para generar soluciones a los problemas de sequias e inundaciones; y garantizar un acceso equitativo del agua para la provincia de Los Ríos en marzo del 2008 se aprobó el proyecto Plan de Aprovechamiento y Control del Agua en la Provincia de Los Ríos PACALORI, que a través de la implementación de grandes obras de infraestructura hidráulica, permitirá almacenar el agua durante la época de lluvias y usarla durante la época seca.

El área del proyecto está delimitada por los ríos Calabí, Quevedo y Macul, constituye aproximadamente 1900 km<sup>2</sup>, y está ubicado en el centro de la provincia de Los Ríos.

#### **3.2 Ubicación del área de estudio**

Dentro del proyecto PACALORI se tiene planificado regar dos sectores, derivando el agua de cursos de agua principales para su almacenamiento, el área de estudio está ubicada al este y se encuentra dentro del sector 2. La derivación del agua será desde la margen derecha del río Calabí hacia el río Lechugal mediante una obra de toma lateral y conducción. La ubicación del área de estudio se muestra en la Figura 3-1.



La información geográfica, corresponde a un modelo digital de elevación, elaborado a partir de una cartografía 1:10000 del año 1979. El modelo digital fue elaborado por el departamento de geomática del PROMAS – Universidad de Cuenca.

El trazo del eje del río se lo realizó basándose principalmente en las curvas de nivel, complementándose con la herramienta hydrology que esta implementada en el programa ArcGis y con observaciones directas en campo.

Las secciones transversales complementarias fueron obtenidas a partir del modelo digital de elevación cada 250 m y con un ancho de 500 m generadas con la extensión HEC-GeoRAS. Para la actualización de las secciones se utilizó la herramienta Update Elevations que consta dentro del paquete del Hec-GeoRas.

Dentro de la información hidrológica se disponen de datos de aforos líquidos realizados al final del tramo de estudio con caudales y niveles de agua desde enero hasta octubre de 2013. Los aforos fueron realizados por el departamento de hidrología del PROMAS – Universidad de Cuenca. (Ver Anexo 3).

Estos datos se utilizaron en la calibración del modelo, la metodología empleada en la calibración se explica en el capítulo 3.6.

La información hidráulica consta de la ubicación y tipo de toma y del caudal a derivar. Datos elaborados por el departamento de hidrología del PROMAS – Universidad de Cuenca.

Estos datos se implementaron al modelo para determinar las características hidráulicas del tramo del río en estudio.

### 3.4 Modelización en Hec GeoRas

La geometría del río se implementó por medio de la extensión HEC-GeoRAS desarrollada para procesar datos georeferenciados. Para la presente investigación se utilizó HEC-GeoRAS 4.3.93 y ArcGis 10.1.

#### 3.4.1 Preproceso

Para poder instalar HEC-GeoRAS se debe seguir los siguientes pasos:

- Instalar ArcGis y activar las extensiones 3D Analyst y Spatial Analyst para las operaciones de post-proceso de datos.
- Instalar HEC-GeoRAS. El menú de HEC-GeoRAS se muestra en la Figura 3-2.

**Figura 3-2 Menú HEC-GeoRAS**

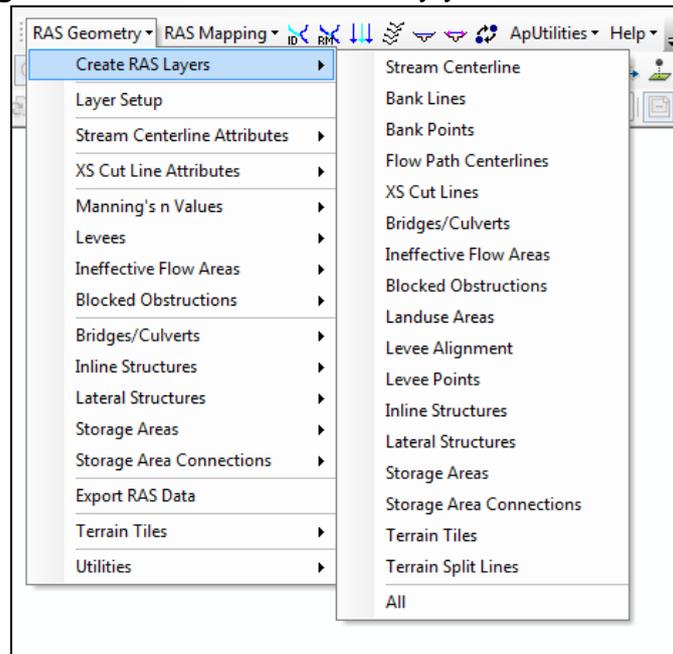


Los pasos a seguir a través de HEC-GeoRAS son los siguientes:

- Antes de utilizar el menú Hec-GeoRAS se debe cargar el modelo digital en el ArcGis sobre el que se va a trabajar.
- En el menú desplegable RAS Geometry se muestran las herramientas en el orden que se deben utilizar. En la Figura 3-3 se observa este menú.

Los menús que no se mencionan no fueron utilizados en este trabajo.

**Figura 3-3** Menú RAS Geometry y Create RAS Layer



*Create RAS Layers:* Crea las capas o shapes de geometría (vacíos).

*Layer Setup:* Especifica los temas para el fichero de importación.

*Stream Centerline Attributes:* Añade topología y atributos al cauce del río.

*XS Cut Line Attributes:* Añade topología y atributos a las secciones transversales.

*Export RAS Data:* Crea el archivo de importación para HEC-RAS.

Create RAS Layer: Es el primer menú a utilizar y el orden en el que aparecen las herramientas es en el que se va a utilizar. En la Figura 3-3 se puede observar las opciones de este menú.

Stream Centerline: Crea un fichero vectorial en el que se digitalizará el eje del río. Se digitaliza de agua arriba hacia aguas abajo.

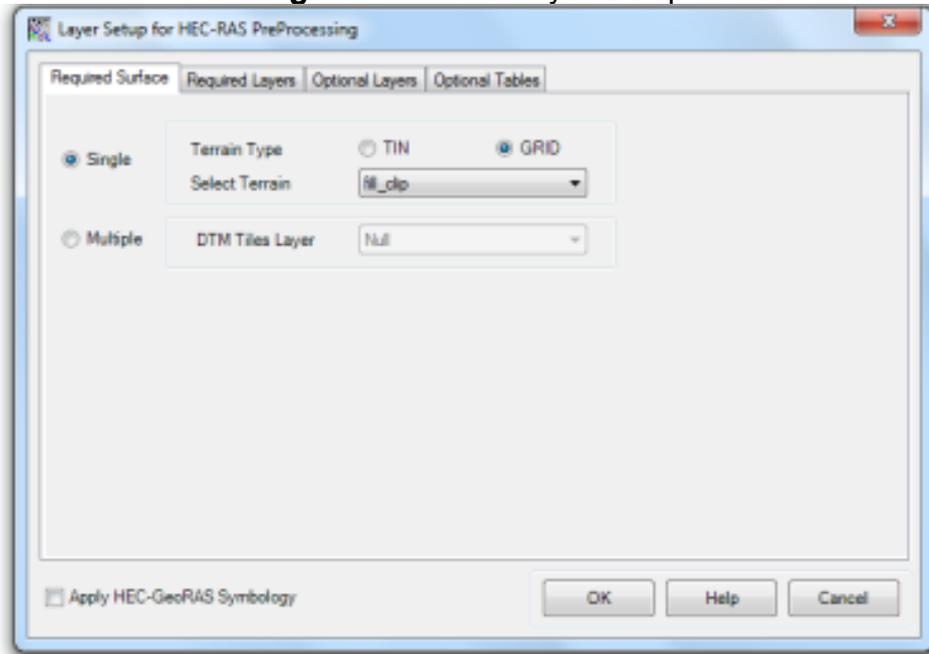
Flow Path Centerlines: Crea un fichero vectorial en el que se digitaliza la trayectoria del flujo. Se lo realiza de aguas arriba hacia aguas abajo.

XS Cut Lines: Se genera un fichero en el cual crearemos las secciones transversales. Las secciones se crean de izquierda a derecha, solo deben cortar una vez al eje y no

se pueden cortar entre ellas. Si se desea realizar automáticamente existe la herramienta Construct XS Cut Lines

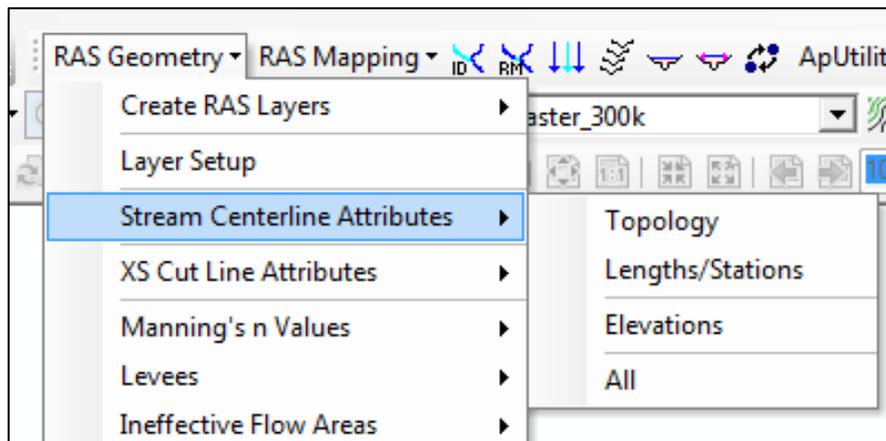
- En el menú Layer Setup se asigna el modelo digital del terreno con el que se trabaja, en la Figura 3-4 se muestra este menú.

**Figura 3-4** Menú Layer Setup



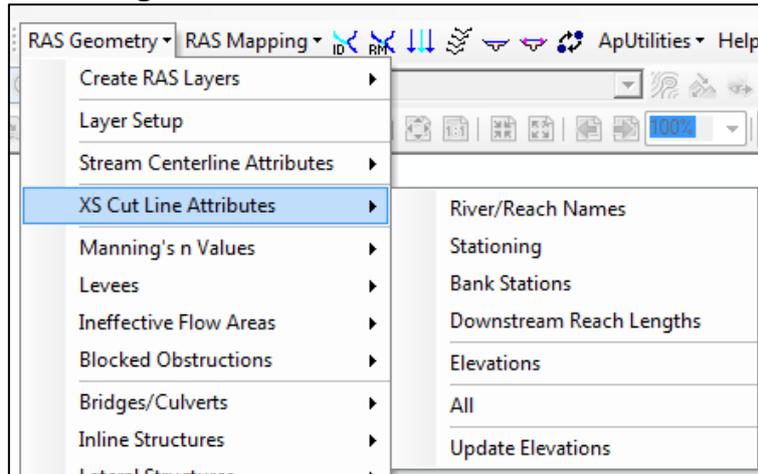
- En el menú Stream Centerline Attributes se utilizan las herramientas Topology y Length/Stations. El programa calcula automáticamente los datos necesarios. La Figura 3-5 muestra este menú.

**Figura 3-5** Menú Stream Centerline Attributes



- En el menu XS Cut Line Attributes se utilizó las herramientas River/Reach Names, Stationing, Downstream Reach Lengths, Elevations y Update Elevations. El programa calcula automáticamente los datos necesarios. En la Figura 3-6 se puede observar este menú.

**Figura 3-6** Menú XS Cut Line Attributes

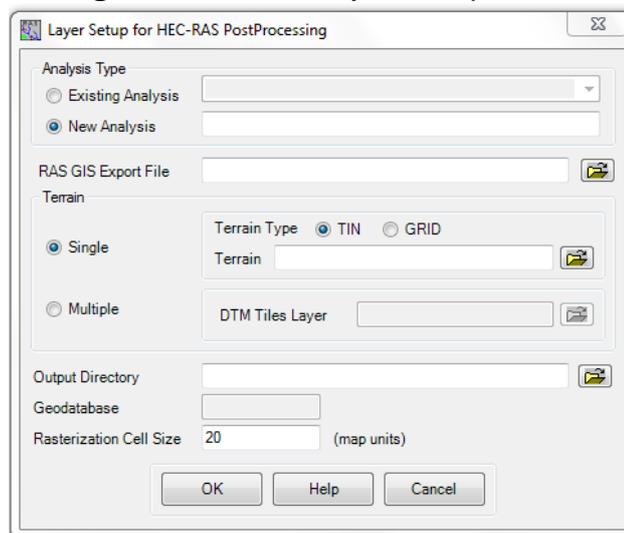


- Por último se crea el fichero que se carga en el HEC-RAS con la opción Export RAS Data.

### 3.4.2 Postproceso

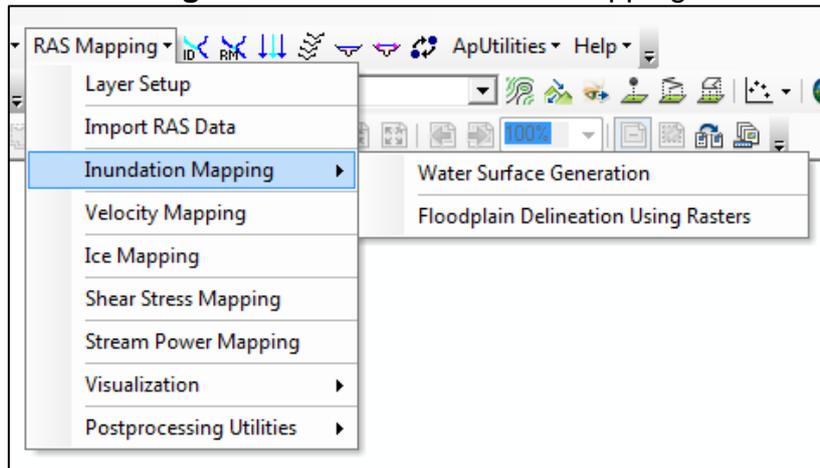
- Luego de trabajar con HEC-RAS se genera un archivo de exportación con la opción File/Export GIS Data. Con este archivo se trabaja nuevamente en ArcGis con HEC-GeoRAS.
- Para poder trabajar en ArcGis primero se debe convertir el archivo de exportación de HEC-RAS con la herramienta del HEC-GeoRAS llamada Convert RAS Export SDF to XML.
- Se utiliza el menú RAS Mapping para generar las áreas de inundación. En la Figura 3-2 se observa este menú.
- Se utiliza el menú Layer Setup en el cual se escoge el tipo de análisis, se carga el archivo convertido del HEC-RAS y el archivo del modelo digital de elevación. En la Figura 3-7 se observa este menú.

**Figura 3-7** Menú Layer Setup



- Luego se utiliza la opción Import RAS Data con lo cual se generan nuevas capas.
- Por último se utiliza la opción Water Surface Generation y Floodplain Delineation Using Raster del menú Inundation Mapping con lo cual se generan las áreas de inundación. En la Figura 3-8 se muestra este menú.

**Figura 3-8** Menú Inundation Mapping



### 3.5 Modelización en Hec-Ras

La modelización hidráulica del río se la realizó con el programa *HEC-RAS 4.1.0* del Hydraulic Engineering Center (HEC) del U.S. Army Corps of Engineers. Para realizar dicha modelización se sigue la siguiente metodología.

#### 3.5.1 Pantalla principal de Hec-Ras

En la pantalla principal de Hec-Ras (Ver Figura 2-8) aparecen las siguientes opciones:

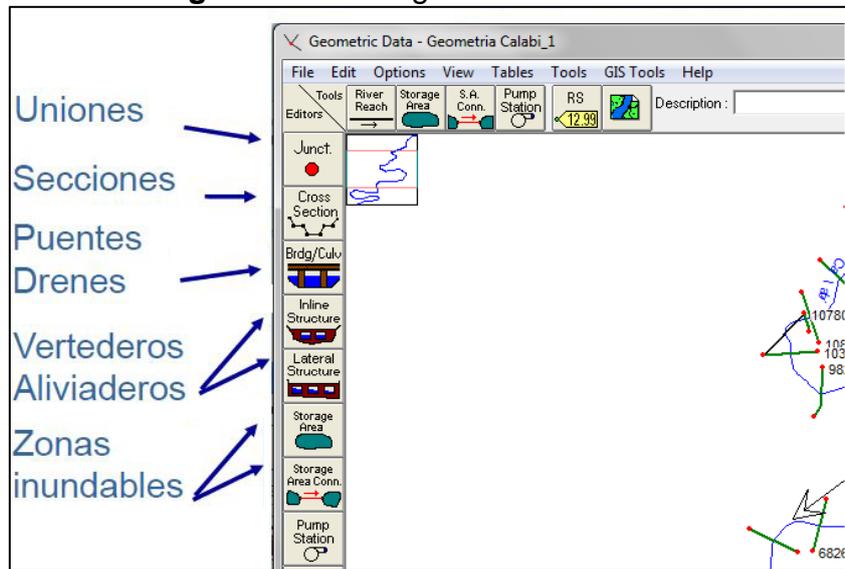
-  Ingreso de la geometría del sistema a modelizar.
-  Entrada de datos para simulación de flujo permanente.
-  Entrada de datos para simulación de flujo no permanente.
-  Cálculo del flujo permanente.
-  Cálculo del flujo no permanente.
-  Salida de resultados: secciones, perfiles longitudinales, curva de descarga (Q vs. H), vista 3D, hidrogramas y tablas.

#### 3.5.2 Geometría del Cauce

El primer paso es establecer la geometría del cauce. Hec-Ras pide como dato de entrada una línea simbólica que representa un tramo del río en el cual se defina el

nombre del río y el nombre del tramo que se está modelizando. Utilizando el icono de geometría ya indicado, el programa muestra la siguiente pantalla. (Ver Figura 3-9).

**Figura 3-9** Menú geometría del cauce



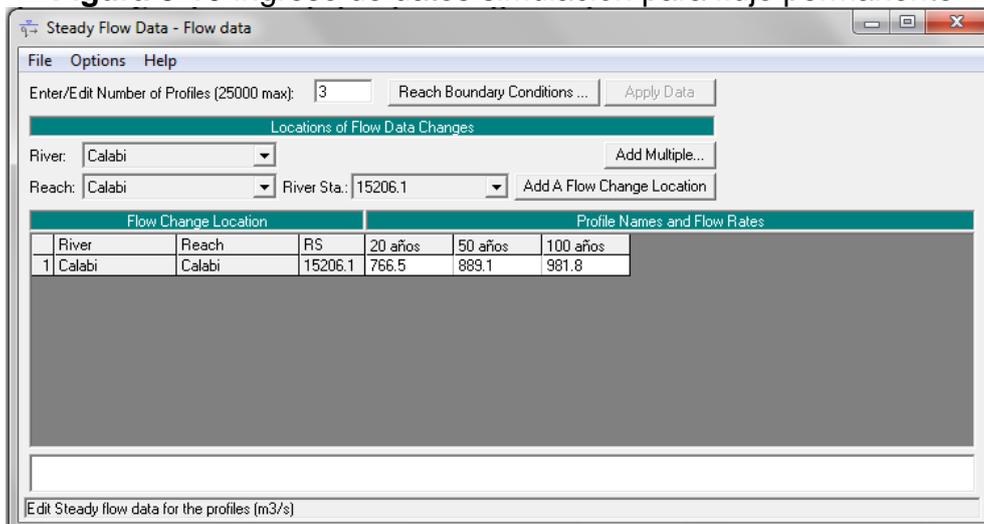
Dentro de las opciones del ingreso de la geometría se puede ingresar las secciones transversales del río a modelizar, estructuras laterales y en línea como puentes, drenajes, vertederos, culverts (alcantarillas), aliviaderos, etc.

En este estudio el ingreso de los datos geométricos se lo realizó con el uso del programa Hec-GeoRas exportándose el archivo generado al Hec-Ras, como ya se mencionó en el tema anterior.

### 3.5.3 Simulación de flujo permanente en Hec-Ras

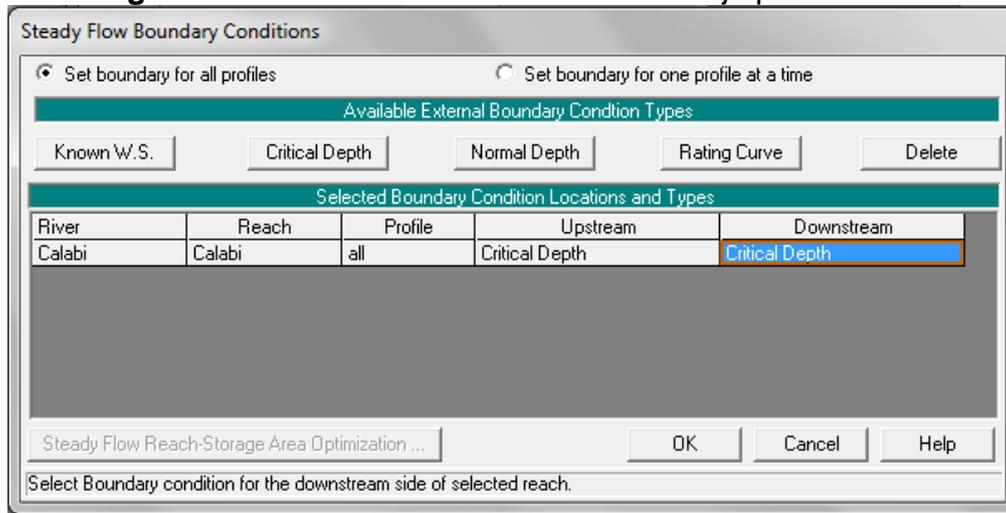
Con la geometría ingresada se regresa al menú principal y se utiliza la herramienta - para el ingreso de los datos de flujo permanente, el cual nos llevara al siguiente cuadro de dialogo mostrado en la Figura 3-10.

**Figura 3-10** Ingreso de datos simulación para flujo permanente



En el botón Enter/edit number of profiles se ingresa la cantidad de perfiles a ensayar. Luego de ingresar la cantidad de perfiles a ensayar se ingresan las condiciones de contorno, esto se hace utilizando la herramienta Reach Boundary Conditions, la cual muestra el siguiente cuadro de dialogo (Ver Figura 3-11).

**Figura 3-11** Condiciones de contorno de flujo permanente

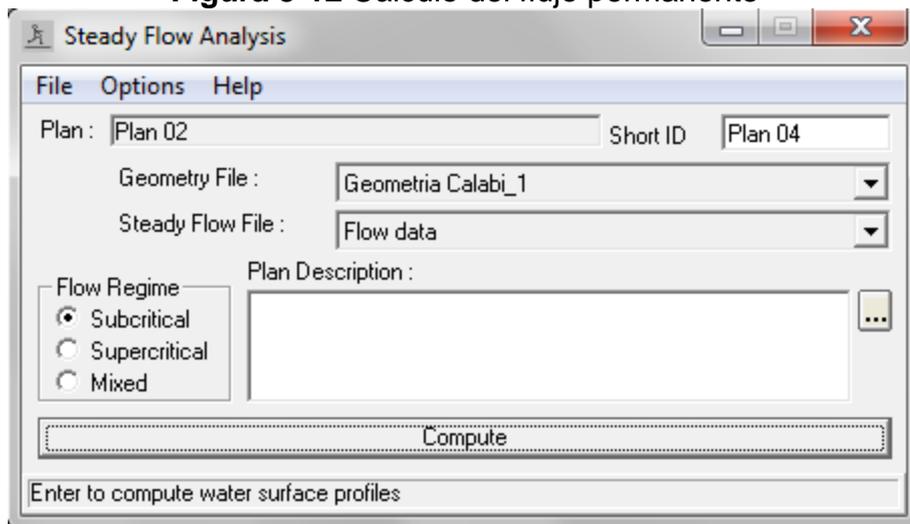


Las condiciones de contorno se necesitan para establecer la superficie de agua inicial en el extremo del sistema, aguas arriba y aguas abajo del sistema a modelizar. Si la modelización se hace con un régimen subcrítico solo se utiliza la condición de borde de aguas abajo, en cambio si la modelización se ejecuta con régimen supercrítico se ocupa la condición de borde de aguas arriba, al modelizar como régimen mixto ocupa ambas.

En el cuadro de dialogo *Steady Flow Boundary Conditions* muestra varias opciones para definir condiciones de frontera como se observa en la Figura 3-11. Para ingresar las condiciones de frontera para un determinado régimen de flujo, se selecciona la celda vacía correspondiente.

La opción *Know Water Surface (Know W. S.)* es utilizada si se conoce el nivel de agua en alguna sección transversal, *Critical Depth* ingresa la altura crítica como borde esta opción no requiere de otros datos adicionales. *Normal Depth* es útil cuando se presenta un flujo que se aproxime al uniforme. El valor a ingresar es la pendiente de la línea de energía en una sección transversal. Los valores que usualmente se utilizan para realizar la calibración son cercanos o iguales a la pendiente del flujo normal. Por último se tiene la opción *Rating Curve* es la curva de gasto conocida en una sección de control, esto quiere decir que es una sección transversal con una relación de calado y caudal fija.

Finalmente ingresadas las condiciones de contorno se hace correr el modelo utilizando la herramienta para el cálculo del flujo permanente mostrado anteriormente, se escoge el régimen de flujo a modelar y se presiona el botón *Compute*. Ver Figura 3-12.

**Figura 3-12** Cálculo del flujo permanente

Una vez que el programa se ha ejecutado se pueden obtener los diferentes datos de salida como perfiles longitudinales, curvas de descarga (H vs. Q), hidrogramas, gráficas de velocidades y tablas.

### 3.6 Calibración y Validación del Modelo

#### 3.6.1 Calibración del Modelo

El procedimiento para la calibración consiste en variar el coeficiente de rugosidad “n” de Manning del cauce y las riberas de manera que los niveles de agua simulados coincidan con los niveles aforados. Se utilizaron dos coeficientes de rugosidad uno para caudales altos y otro para caudales bajos debido a que “cuando el agua es poco profunda, las irregularidades del fondo del canal quedan expuestas y sus efectos se vuelven pronunciados”. (Ven Te Chow, 1994).

Para una primera aproximación del coeficiente de rugosidad se despejó este de la fórmula de Manning utilizando como datos el caudal, el área y el perímetro mojado obtenidos de los aforos realizados y la pendiente se obtuvo en función de las secciones levantadas cerca del punto de aforo. La variación del coeficiente de rugosidad para la calibración no puede diferir en gran medida del valor despejado de la fórmula. La fórmula a utilizarse es la siguiente:

$$Q = \frac{A^{5/3} S^{1/2}}{n P^{2/3}}$$

Dónde:

- Q: Caudal del agua en m<sup>3</sup>/s.
- A: Área mojada en m<sup>2</sup>.
- P: Perímetro mojado en m.
- S: Pendiente de la línea de agua en m/m.
- n: Coeficiente de rugosidad de Manning .



### **3.6.2 Condiciones de Frontera**

Para el análisis con flujo permanente se utilizó como condiciones de frontera aguas arriba y aguas abajo será la pendiente media del río.

### **3.6.3 Validación del Modelo**

Para la validación se utilizaron 4 de las secciones levantadas, ya que estas contienen datos del calado de agua y debido a que fueron realizadas el mismo día se considera que la variación del caudal no es significativa, por lo tanto se ingresó en el modelo ya calibrado el caudal para obtener el calado de la primera sección y se verificó que el calado en la demás secciones no varié demasiado con los niveles medidos, con esto se validó el modelo.

Con el modelo matemático ya calibrado y validado se realizó las simulaciones necesarias para obtener los datos de interés.

### **3.6.4 Sensibilidad del Modelo**

Para determinar la sensibilidad del modelo se varía el coeficiente de rugosidad y se observa el cambio del nivel de agua en el punto de toma.

## Capítulo 4

### Resultados y Discusión

#### 4.1 Parámetros geométricos e hidráulicos para el modelo

##### 4.1.1 Secciones transversales y perfil longitudinal

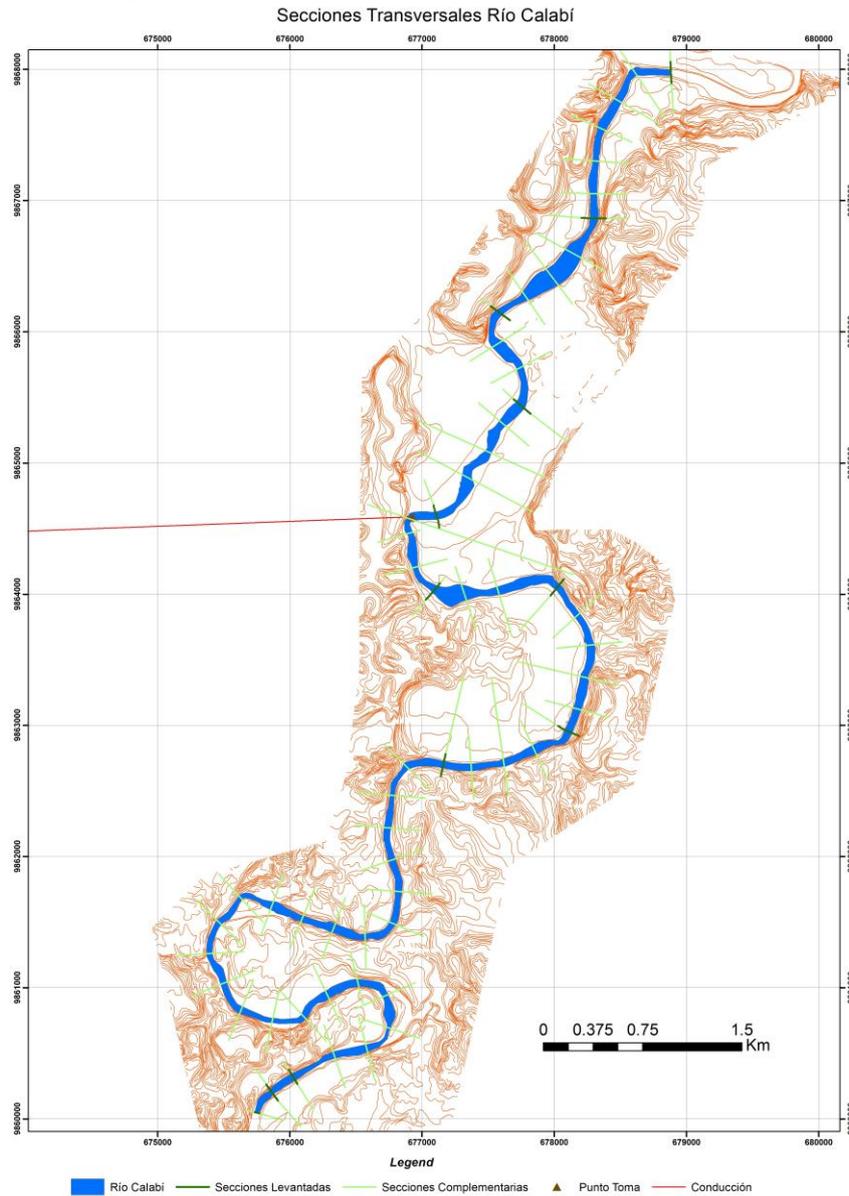
En la Tabla 4-1 se muestran las estaciones de cada una de las secciones transversales medidas desde aguas abajo hacia aguas arriba. Las gráficas de dichas secciones se muestran en el Anexo 1.

**Tabla 4-1** Secciones transversales y estaciones

Sección	Estación	Cota de fondo
1	15027.75	47.87
2	13559.75	46.25
3	12518.07	46.06
4	11695.11	45.14
5	10588.83	45.08
Toma	10379.001	44.86
6	9767.066	43.91
7	8762.794	40.72
8	7565.127	41.81
9	6537.188	41.21
10	398.705	35.57
11	198.985	35.1
12	0	34.41

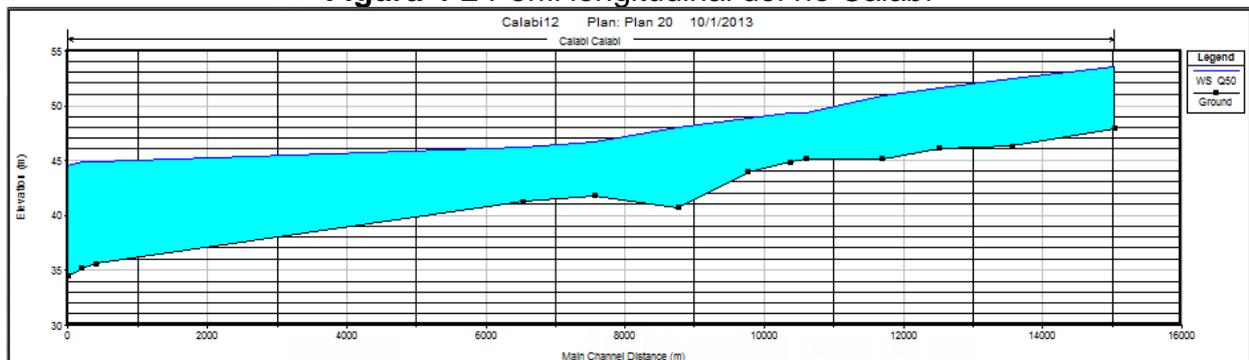
La cota mostrada en la Tabla 4-1 corresponde al punto más bajo de cada una de las secciones. En la Figura 4-1 se muestra el río Calabí con las secciones levantadas y las secciones complementarias.

**Figura 4-1** Secciones transversales río Calabí



El perfil longitudinal del tramo del río Calabí se muestra en la Figura 4-2.

**Figura 4-2** Perfil longitudinal del río Calabí



### 4.1.2 Coeficiente de rugosidad y caudales

El cálculo del coeficiente de rugosidad aplicando la fórmula de Manning para los caudales medidos en el aforo realizado en el sector de Quinsaloma (Ver Anexo 3) se muestran en la Tabla 4-2. El coeficiente de rugosidad determinado fue de 0.035 obtenido del promedio de los coeficientes de rugosidad para los caudales más altos.

**Tabla 4-2** Calculo del coeficiente de rugosidad.

Coeficiente de rugosidad de Manning						
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Cota Agua (m)	Perímetro (m)	Área (m)	S	n	Promedio
72.8	4.15	28.640	68.974	0.0035	0.101	
315.35	5.15	32.556	91.588	0.0035	0.034	0.035
186.75	4.75	27.957	65.177	0.0035	0.036	
49.78	3.0	23.289	40.113	0.0035	0.066	
34.47	3.2	23.576	41.551	0.0035	0.089	
17.61	2.3	20.211	26.622	0.0035	0.107	
11.95	2.5	20.069	26.043	0.0035	0.153	

### 4.1.3 Condiciones de Frontera

La simulación fue realizada a régimen permanente y para estado de flujo mixto, como condiciones de frontera se establecieron el calado normal tanto aguas arriba como aguas abajo que corresponden a la pendiente media del río. La pendiente media del río se la determinó utilizando la sección inicial y la final, el cálculo se muestra en la Tabla 4-3.

**Tabla 4-3** Pendiente de condición de contorno del modelo

Sección	Estación	Cota	Pendiente
1	15027.74	47.87	0.00088
12	0	34.64	

## 4.2 Calibración del modelo

La calibración del modelo se realizó comparando las alturas de agua del modelo y los calados medidos en la sección de aforo, los resultados para caudales altos se presenta en la Tabla 4-4 y para caudales bajos en Tabla 4-5. Para todos los casos analizados el coeficiente de rugosidad para los márgenes fue de 0.06 ya que este valor es utilizado para ríos con fondo muy irregular y con vegetación.

**Tabla 4-4** Niveles de agua del modelo y del aforo caudales altos

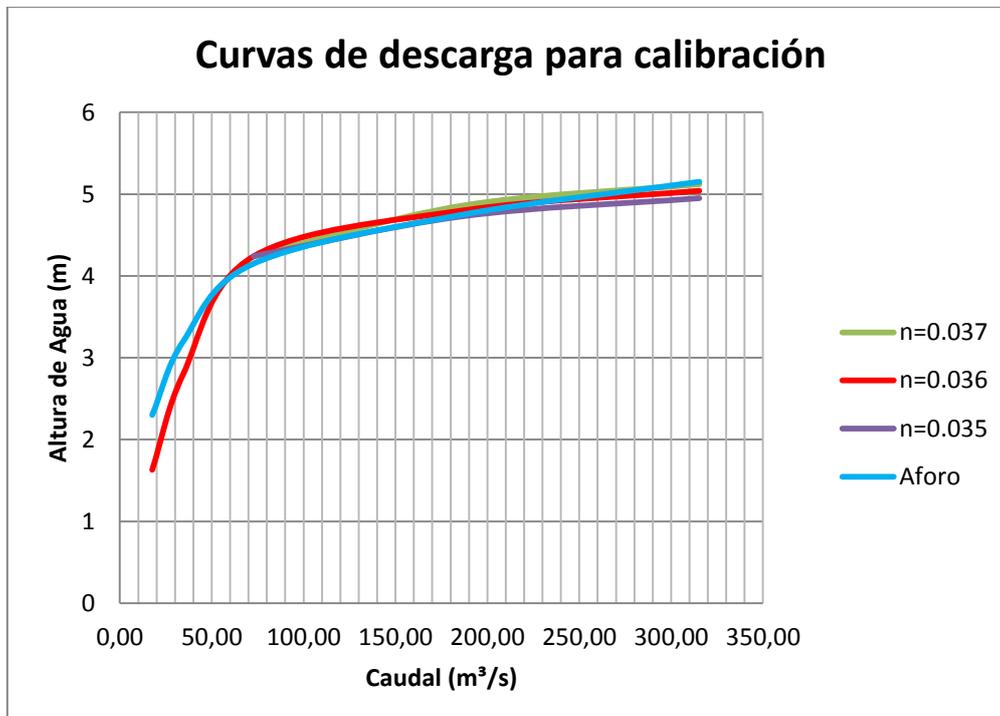
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Altura media de agua (m)				Altura Aforo	Diferencia de Nivel
	n=0.033	n=0.035	n=0.036	n=0.037		
315.35	4.77	4.95	5.04	5.12	5.15	-0.11
186.75	4.59	4.73	4.8	4.86	4.75	0.05

**Tabla 4-5** Niveles de agua del modelo y del aforo caudales bajos

Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Altura media de agua (m)				Altura Aforo	Diferencia de Nivel
	n=0.06	n=0.065	n=0.07			
72.8	4.24	4.41	4.57	4.15	0.09	
34.47	2.8	2.92	3.03	3.2	-0.4	
17.61	1.63	1.72	1.8	2.3	-0.67	

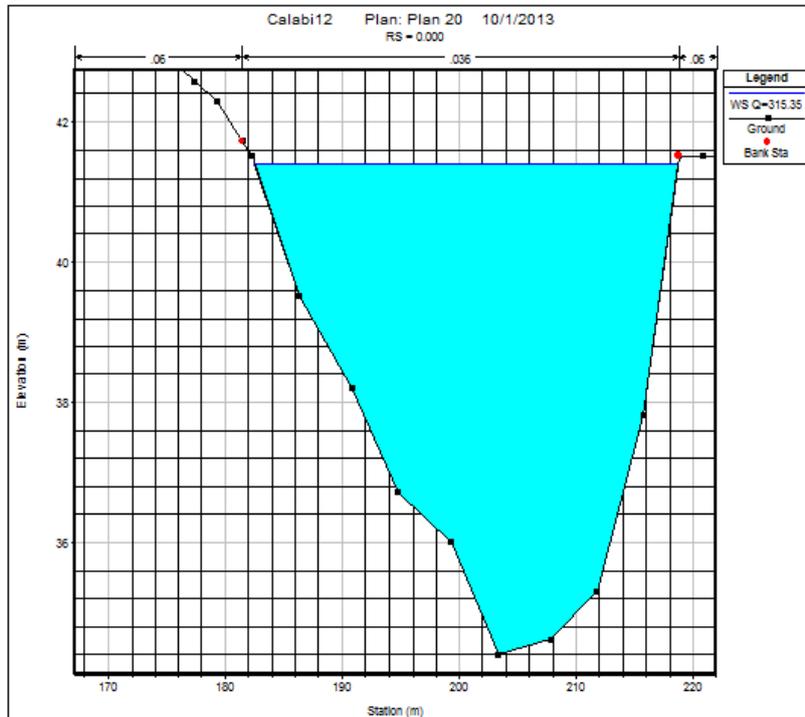
En la Figura 4-3 se muestra que el valor de  $n=0.036$  es el más cercano a la tendencia que sigue la curva de descarga en el lugar de aforo para los caudales altos y para los caudales bajos el valor más cercano es de  $n=0.06$  para el coeficiente de rugosidad por lo tanto se toman estos valores para la modelización matemática.

**Figura 4-3** Curvas de descarga para la calibración



En la Figura 4-4 se presentan los resultados obtenidos en el HEC-RAS luego de la calibración para la sección de aforo en Quinsaloma, la simulación que se muestra es para el caudal de 315.35 m<sup>3</sup>/s.

**Figura 4-4** Resultado de la calibración en la sección de aforo



Q = 315.35 m<sup>3</sup>/s, Nivel HEC-RAS: 5.04 m, Nivel Medido: 5.15 m, Diferencia Nivel: 0.11 m

Los coeficientes de rugosidad calculados y utilizados en el modelo para caudales altos se resumen en la Tabla 4-6.

**Tabla 4-6** Coeficientes de rugosidad utilizados en el modelo.

Fórmula Manning	Cauce	Margen Izq.	Margen Der.
0.035	0.036	0.06	0.06

Como se puede observar en la tabla anterior el valor de coeficiente de rugosidad escogido no difiere en gran medida del calculado, lo que muestra que el modelo matemático calibrado es una aceptable representación de las condiciones reales del río.

### 4.3 Validación del Modelo

Para la validación como se dijo anteriormente se utilizaron secciones transversales levantadas en un mismo día, ya que se cuenta con datos de cotas de niveles de agua medidos con variaciones de caudal no significativas. El caudal utilizado en la

validación y las cotas de niveles de agua calculados por el modelo y las medidas en campo se muestran en la Tabla 4-7.

**Tabla 4-7** Caudal y niveles de agua obtenidos con el modelo y medidos en campo

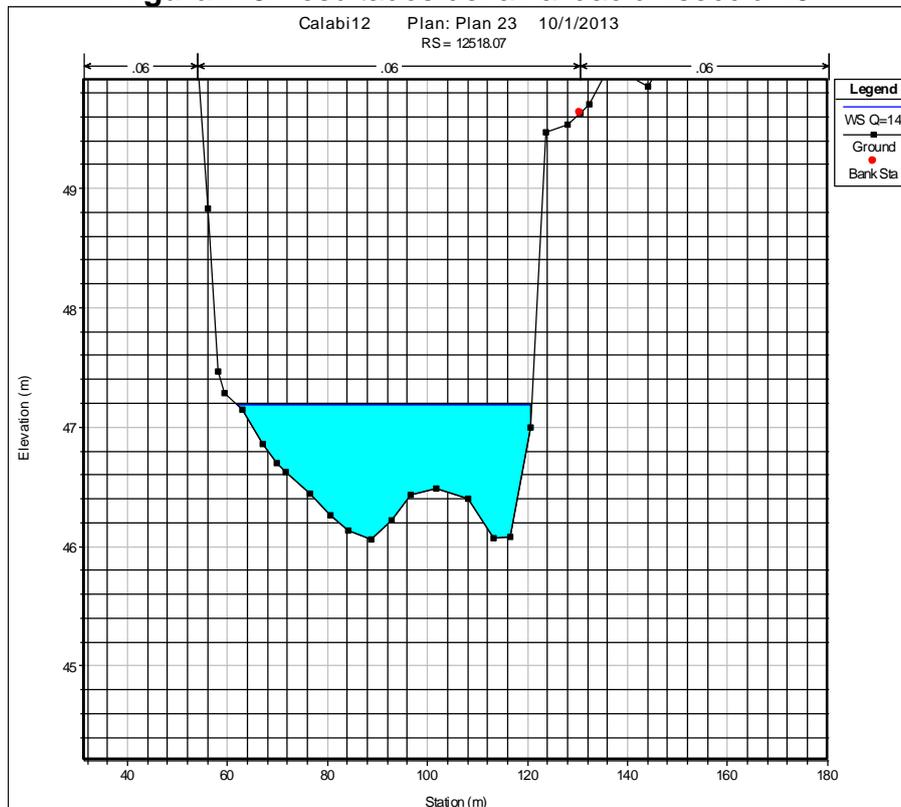
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Coeficiente Rugosidad	Sección	Cota Agua (msnm)		Diferencia de cota
			Medida	Hec-Ras	
14	0.06	3	47.23	47.19	-0.04
		4	46.66	46.74	0.08
		6	44.68	44.53	-0.15
		7	43.15	43.10	-0.05

Como se observa en la Tabla 4-7 la diferencia de cotas de agua medidas en comparación con las determinadas por el modelo difieren en valores que van del orden de -0.15 m hasta los +0.08 m, debido a que las diferencias de cotas son pequeñas el modelo queda validado.

Se realizó la validación solo para caudales bajos debido a que no existe información de niveles de agua para caudales altos.

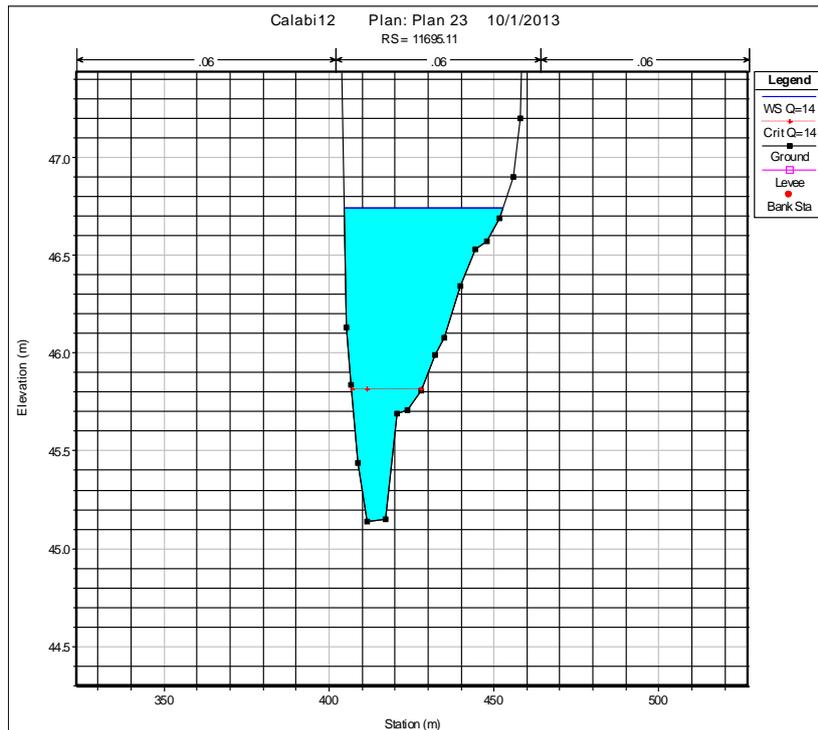
Dos de las secciones utilizadas en la validación se muestran en las siguientes figuras (Ver Figura 4-5 y Figura 4-6), aquí se puede observar los caudales y cotas del nivel de agua simulados.

**Figura 4-5** Resultados de la validación sección 3



Q = 14 m<sup>3</sup>/s, Cota Medida: 47.23 msnm, Cota HEC-RAS: 47.19 msnm, Diferencia Cotas: -0.04 m

**Figura 4-6** Resultados de la validación sección 4



Q = 14 m<sup>3</sup>/s, Cota Medida: 44.66 msnm, Cota HEC-RAS: 46.74 msnm, Diferencia Cotas: 0.08 m

#### 4.4 Curva de descarga en el punto de toma

Para la simulación de escenarios en HEC-RAS se utilizaron el caudal ecológico, el caudal medio de verano, el caudal medio de invierno y los caudales con periodos de retorno de 50, 100, 200 y 500 años estos datos fueron proporcionados por el departamento de hidrología del PROMAS, y se muestran en la Tabla 4-8.

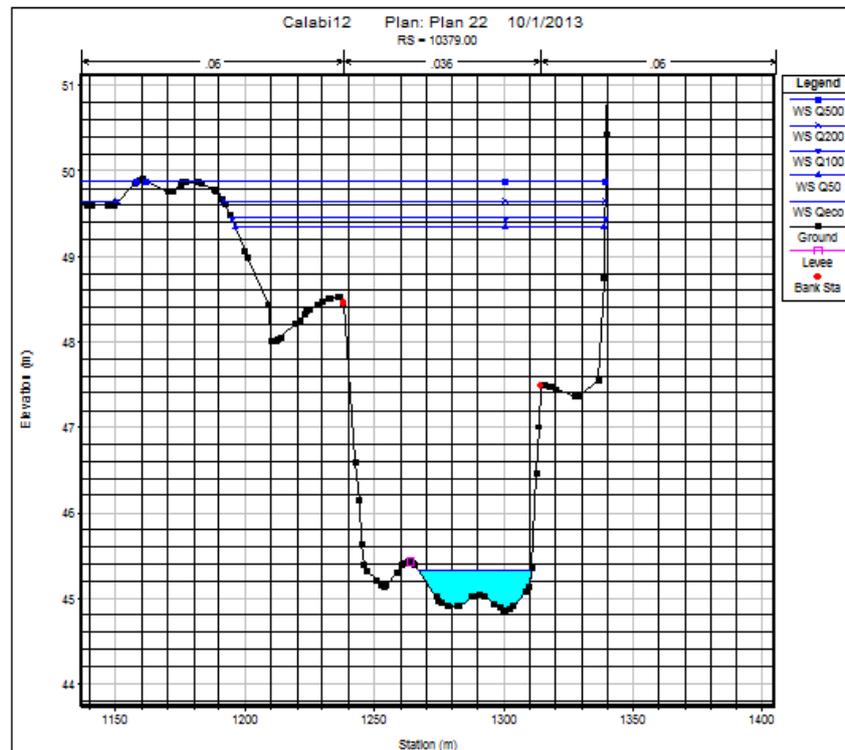
**Tabla 4-8** Datos de caudales con periodos de retorno

Descripción	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
Qecológico	4.31
Qmedverano	7.85
Qmedinvierno	73.07
Q50	848.52
Q100	934.55
Q200	1021.11
Q500	1134.27

Elaboración: PROMAS-UNIVERSIDAD DE CUENCA, 2013.

En la Figura 4-7 se muestran los niveles de agua obtenidos de la simulación en HEC-RAS para diferentes caudales.

**Figura 4-7** Resultados de la simulación en la sección del punto de toma



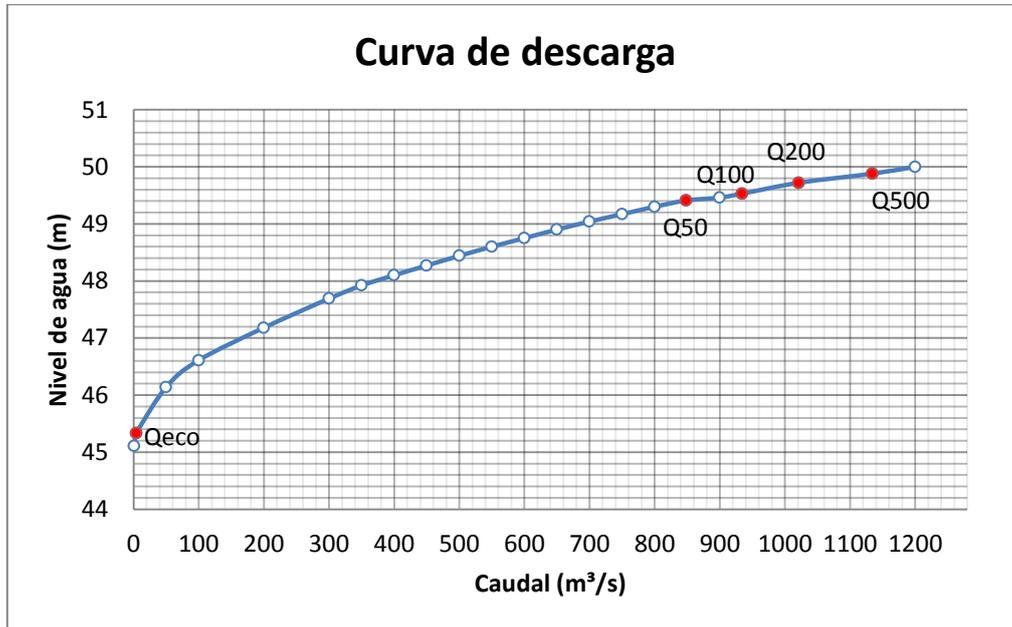
En la Tabla 4-9 se presenta las cotas de nivel de agua para el caudal ecológico, el caudal medio de verano, el caudal medio de invierno y para los caudales con periodo de retorno de 50, 100, 200 y 500 años.

**Tabla 4-9** Caudales con periodo de retorno vs Cota de nivel de agua

Descripción	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Cota Nivel de Agua (m)
Qecológico	4.31	45.45
Qmedverano	7.85	45.59
Qmedinvierno	73.07	46.68
Q50	848.52	49.41
Q100	934.55	49.53
Q200	1021.11	49.72
Q500	1134.27	49.88

La curva de descarga en el punto de toma obtenida mediante el modelo matemático se presenta a continuación en la Figura 4-8.

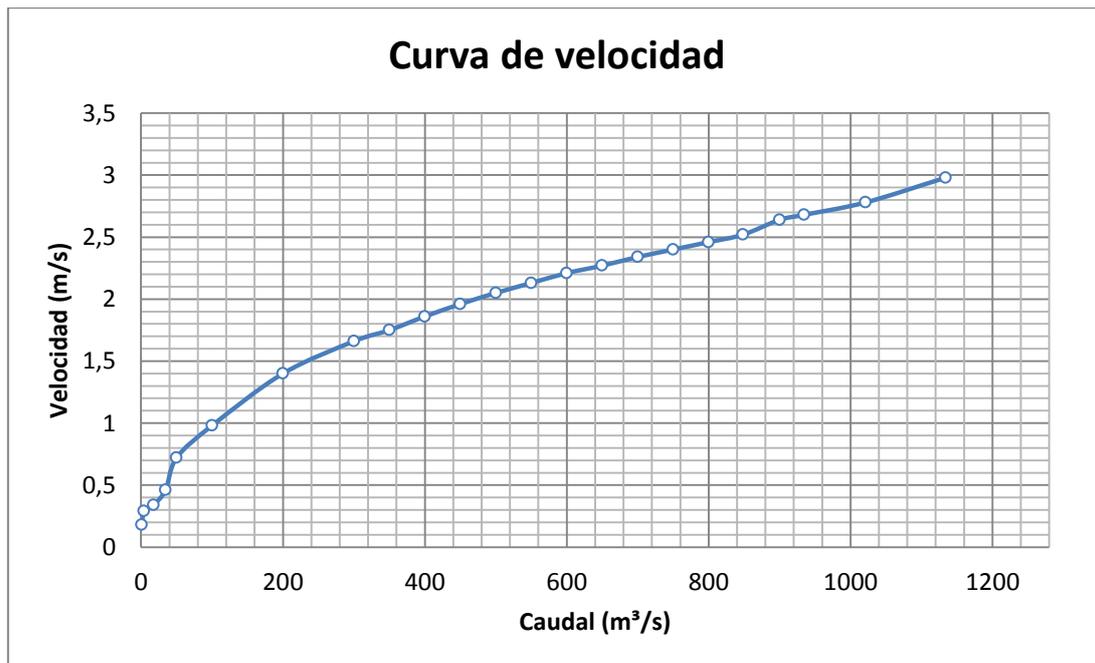
**Figura 4-8** Curva de descarga en el punto de toma



#### 4.5 Curva de velocidad en el punto de toma

La curva de velocidad en el punto de toma obtenida mediante el modelo matemático se presenta a continuación en la Figura 4-9.

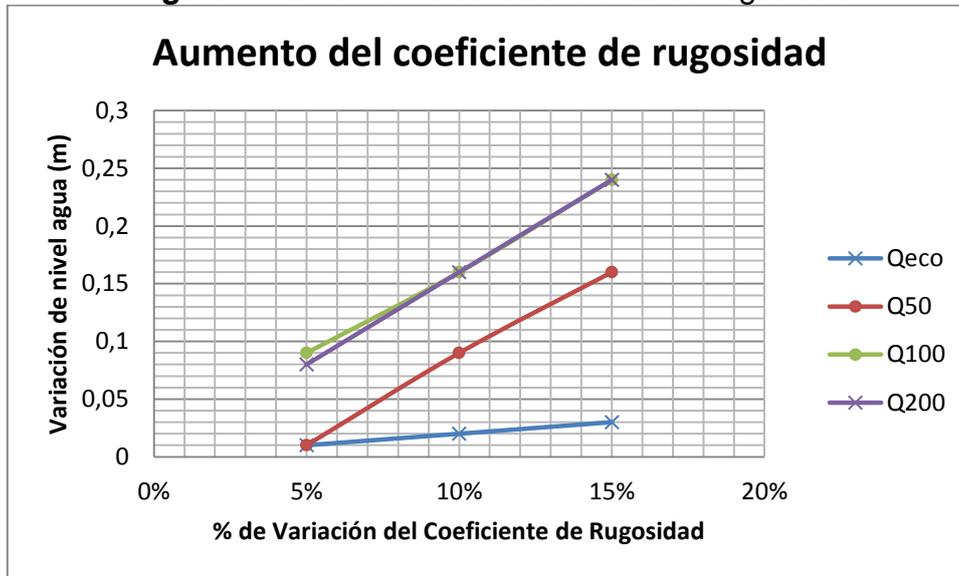
**Figura 4-9** Curva de velocidad en el punto de toma



### 4.6 Sensibilidad del modelo

La sensibilidad del modelo se la determinó variando el coeficiente de rugosidad. Los porcentajes de variación utilizados fueron  $\pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$  y  $\pm 15\%$ . Los resultados obtenidos para los diferentes caudales simulados se presentan en las siguientes figuras (Ver Figura 4-10 y Figura 4-11).

**Figura 4-10** Aumento del coeficiente de rugosidad



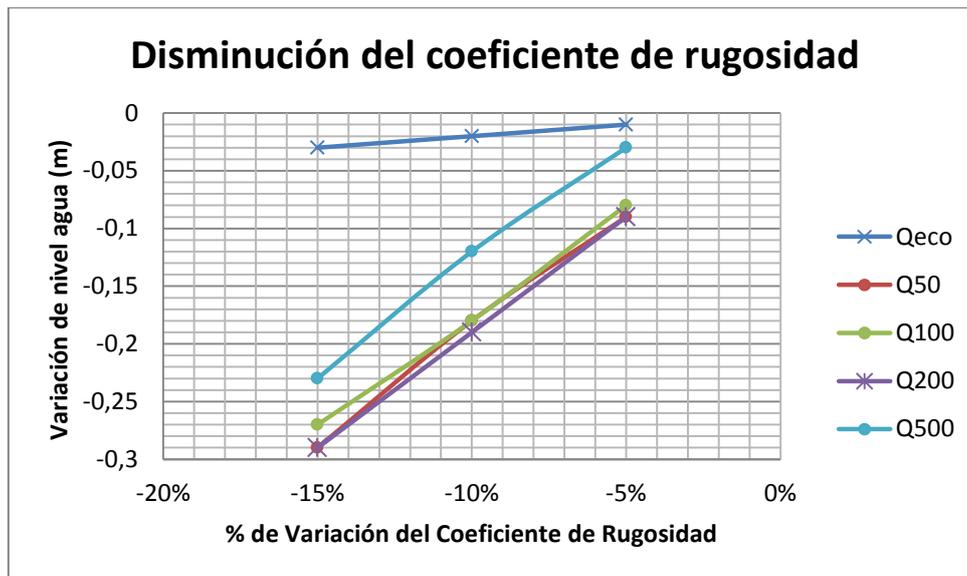
Como se observa en la Figura 4-10 el aumento del coeficiente de rugosidad para el caudal ecológico causan pequeñas variaciones, mientras que para caudales más altos las variaciones aumentan, estos resultados se muestran en la Tabla 4-10.

**Tabla 4-10** Variación del nivel de agua por el aumento del coeficiente de rugosidad

% de variación	Variación de los niveles de agua (m)				
	Qeco	Q50	Q100	Q200	Q500
5%	0.01	0.01	0.09	0.08	0.06
10%	0.02	0.09	0.16	0.16	0.11
15%	0.03	0.16	0.24	0.24	0.16

En la Figura 4-11 se observa que la disminución del coeficiente de rugosidad produce variaciones mínimas para el nivel de agua del caudal ecológico pero para caudales altos las variaciones del nivel de agua aumentan, estos resultados se muestran en la Tabla 4-11.

**Figura 4-11** Disminución del coeficiente de rugosidad



**Tabla 4-11** Variación del nivel de agua por la disminución del coeficiente de rugosidad

% de variación	Variación de los niveles de agua (m)				
	Qeco	Q50	Q100	Q200	Q500
-5%	-0.01	-0.09	-0.08	-0.09	-0.03
-10%	-0.02	-0.18	-0.18	-0.19	-0.12
-15%	-0.03	-0.29	-0.27	-0.29	-0.23

Si se varía el coeficiente de rugosidad en porcentajes tanto positivos como negativos no se producen grandes diferencias en el nivel de agua, a excepción del caudal para un periodo de retorno de 50 años, para el cual la diferencia del nivel de agua es significativa para porcentajes de variación negativos que positivos.

#### 4.7 Áreas de inundación para caudales de diferentes periodos de retorno

Se determinaron las áreas de inundación para caudales con periodos de retorno de 50 y 100 años. Para determinar las áreas de inundación se tuvo que extender la longitud de las secciones transversales medidas en campo utilizando el modelo digital de elevación. Debido a la diferencia de cotas existentes entre las secciones levantadas y las del modelo digital (Ver Anexo 1), se realizó un ajuste de cotas. Las secciones ajustadas se muestran en el Anexo 4.

El área de las zonas afectadas por la inundación se obtuvo restando el área de flujo total del río menos el área de influencia del río, estos resultados se muestran en la Tabla 4-12.



**Tabla 4-12** Áreas de inundación

Áreas	Unidad	Períodos de Retorno	
		T=50 anos	T=100 anos
Área Total	ha	516.315	548.269
Influencia del río	ha	89.531	89.531
Zona Afectada	ha	426.784	458.738

En el Anexo 5 se muestra el mapa de las áreas de inundación para los periodos de retorno de 50 y 100 años.



## Capítulo 5

### Conclusiones y Recomendaciones

#### 5.1 Conclusiones

- El programa HEC-RAS utilizado en la modelización matemática del río Calabí muestra una simulación de flujo lo suficientemente cercano a la realidad siendo su uso posible para los intereses del proyecto.
- El uso de la extensión HEC-GeoRAS es de mucha ayuda ya que automatiza la implementación de la geometría del modelo.
- La calibración del modelo hidráulico se la realizó variando el coeficiente de rugosidad “n” de Manning hasta obtener niveles de agua semejantes a los aforados, el modelo quedó calibrado con un valor de 0.036 obteniendo diferencias del nivel de agua entre lo modelizado y lo aforado de 0.11 y 0.05 m para caudales de 315.35 y 186.75 m<sup>3</sup>/s respectivamente.
- La validación del modelo se lo realizó comparando los niveles de agua en 4 secciones dando diferencias de 0.02, 0.12, 0.04 y 0.01 m. Debido a que las variaciones son pequeñas se consideró validado el modelo.
- La curva de descarga se la obtuvo en el punto de toma dando como resultados cotas de nivel de agua de 45.33, 49.41, 49.53, 49.72 y 49.72 m.s.n.m. para el caudal ecológico y caudales con periodos de retorno de 50, 100, 200 y 500 años respectivamente.
- Las velocidades en el punto de toma son de 0.27, 2.52, 2.68, 2.78 y 2.98 m/s para el caudal ecológico y caudales con periodos de retorno de 50, 100, 200 y 500 años respectivamente.
- El modelo presenta variaciones del nivel de agua de hasta 0.19 m si el coeficiente de rugosidad varía hasta un 10%, aumentando la variación del nivel de agua hasta 0.29 m si se llega a un 15%, estas variaciones son mínimas para el caudal ecológico ya que máximo llega a 0.03 m si se varía hasta un 15% el coeficiente de rugosidad.
- Se obtuvo las áreas de inundación para caudales con periodos de retorno de 50 y 100 años dando como resultados áreas de 426.784 y 458.738 ha respectivamente.

## 5.2 Recomendaciones

- Dentro del programa HEC-RAS además del coeficiente “n” de Manning se tienen coeficientes de pérdidas por expansiones y contracciones. Se podrían utilizar estos parámetros como complemento de la calibración siempre y cuando exista información de campo confiable para poder tener rangos de variación adecuados.
- Para una mejor caracterización del comportamiento hidráulico de un río se requiere que las secciones transversales sean realizadas a intervalos más cortos. Además de realizar aforos simultáneos cuando estos van a ser utilizados para la calibración de los modelos matemáticos.
- Para el análisis de las áreas de inundación es recomendable utilizar software que trabaje en 2 dimensiones ya que el modelo HEC-RAS al trabajar en 1 dimensión da resultados precisos en el cauce principal del río pero es menos preciso al analizar el flujo de desbordamiento.
- Para la siguiente etapa del proyecto se recomienda utilizar un modelo digital de elevación con topografía actual.



## Capítulo 6 Referencias

Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Bogotá: Mc GRAW - HILL- IINTERAMERICANA S.A.

Chow V. T., D. R. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogotá: Mc GRAW-HILL.

Cea, Luis y Ernest, Bladé. *Modelización matemática en lecho fijo del flujo en ríos*. [http://iberaula.es/public/files/file\\_1\\_6\\_Modelizacin%20matemtica%20en%20lecho%20fijo%20de%20fl.pdf](http://iberaula.es/public/files/file_1_6_Modelizacin%20matemtica%20en%20lecho%20fijo%20de%20fl.pdf)

French, R. H. (1988). *Open - Channel Hydraulics*. McGraw-Hill.

García Vélez, José Luis. Capítulo VI Obras de captación. <http://www.tecnaingenieros.com/ingenioacademico/images/pdf/capitulo%20VI.pdf>

Irwin Pizano, Susan (2002). Obras hidráulicas en laderas andinas. [http://www.fluidos.eia.edu.co/hidr65idráulicaiculosos/interesantes/laderas\\_andinas/](http://www.fluidos.eia.edu.co/hidr65idráulicaiculosos/interesantes/laderas_andinas/)

Martín Vide, Juan P. (2003). *Ingeniería de ríos*. Alfaomega Grupo Editor.

Rocha Felices, Arturo (1998). *Introducción a la Hidráulica Fluvial*. Universidad Nacional de Ingeniería - Facultad de Ingeniería Civil.

Silva Medina, Gustavo A. *Notas de Ingeniería Hidráulica*. <http://www.geocities.com/gsilvam/>

Streeter, V. L. (1970). *Mecánica de los Fluidos*. México: McGRAW-HILL.

U. S. Army Corps of Engineers. (Febrero de 2011). HEC-GeoRAS, GIS Tools for Support of HEC RAS using ArcGIS. *User's Manual*.

U.S. Army Corps of Engineers. (Enero de 2010). HEC-RAS River Analysis System. *User's Manual*. [www.hec.usage.army.mil](http://www.hec.usage.army.mil).

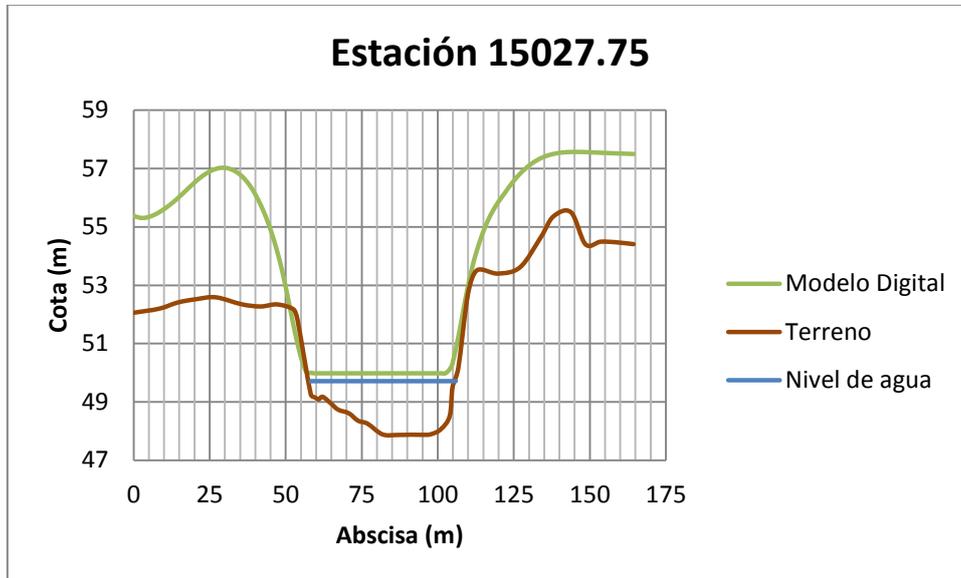
U.S. Army Corps of Engineers. (Enero de 2010). HEC-RAS River Analysis System. *Applications Guide*. [www.hec.usage.army.mil](http://www.hec.usage.army.mil).

## Anexos

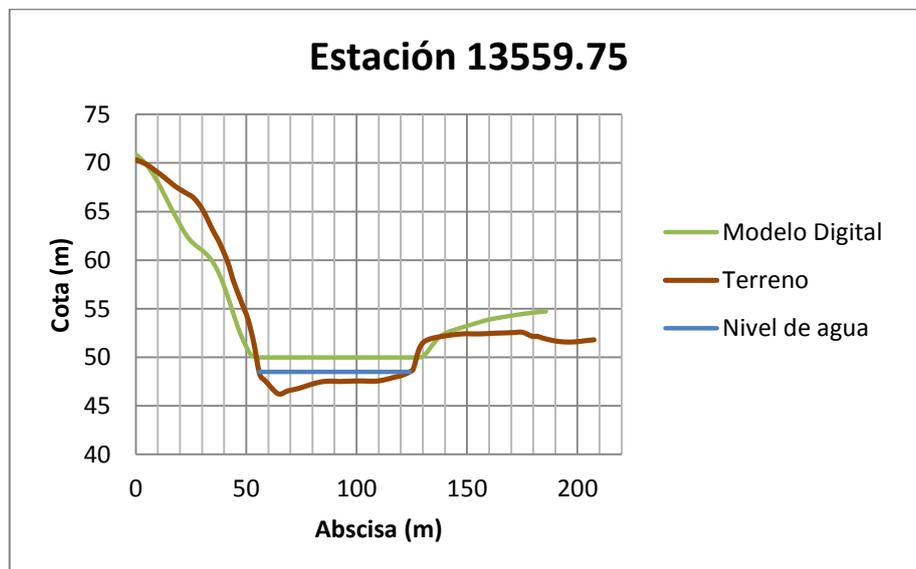
### Anexo 1

Gráficas de las secciones levantadas en campo y modelo digital de elevación.

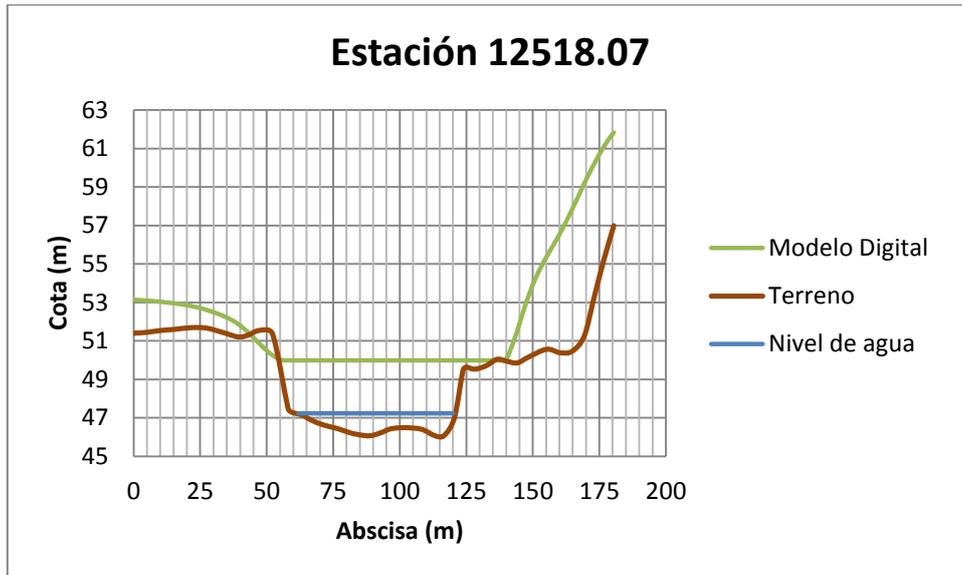
Sección 1: Estación 15027.75



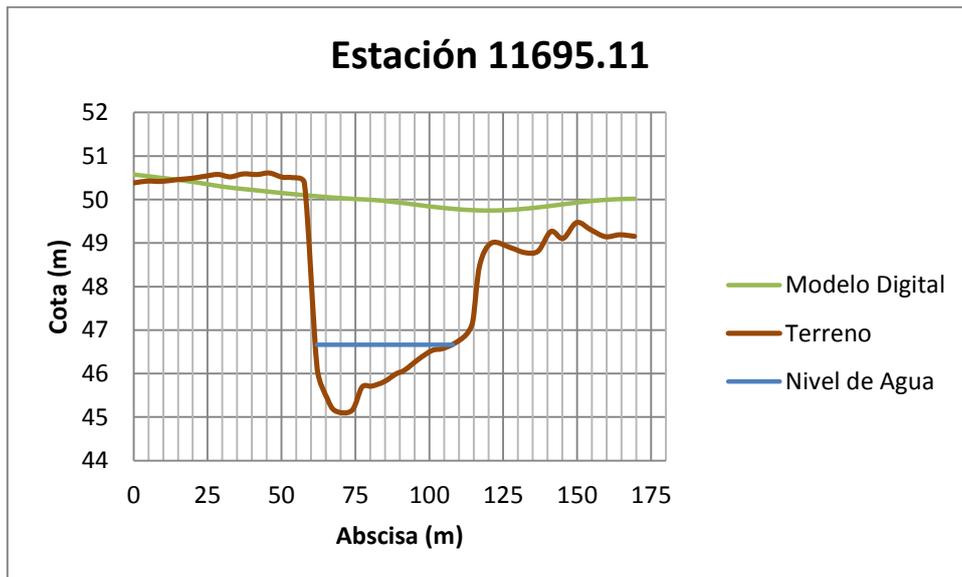
Sección 2: Estación 13559.75



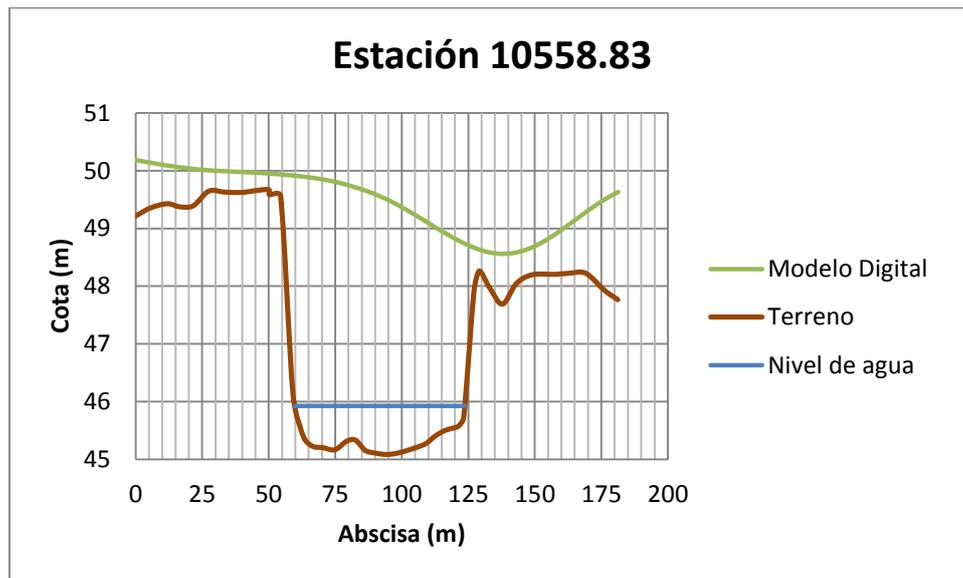
Sección 3: Estación 12518.07



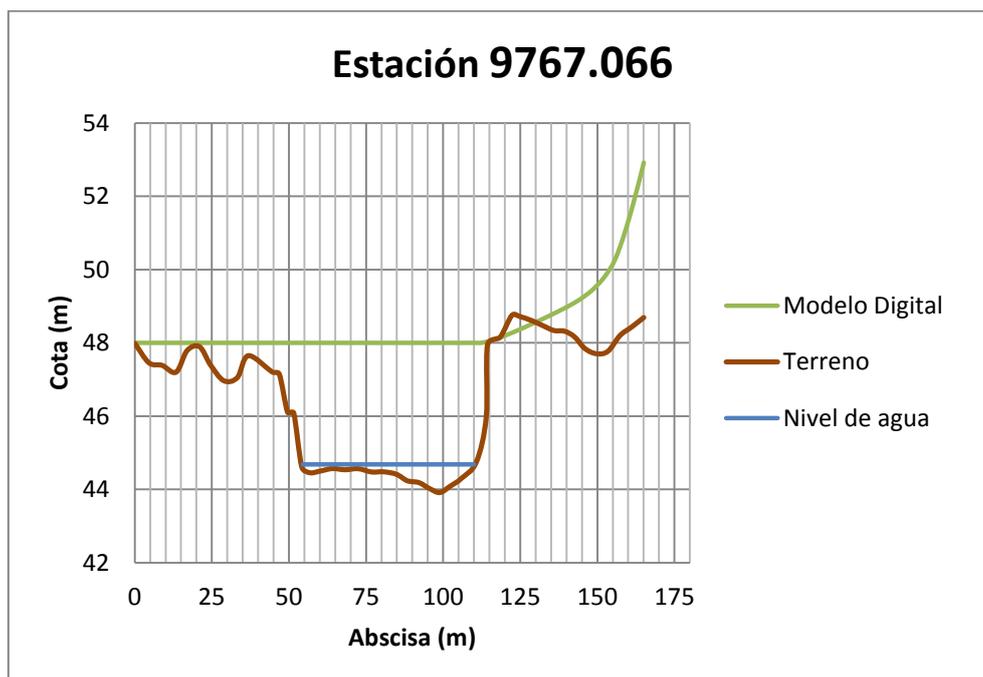
Sección 4: Estación 11695.11



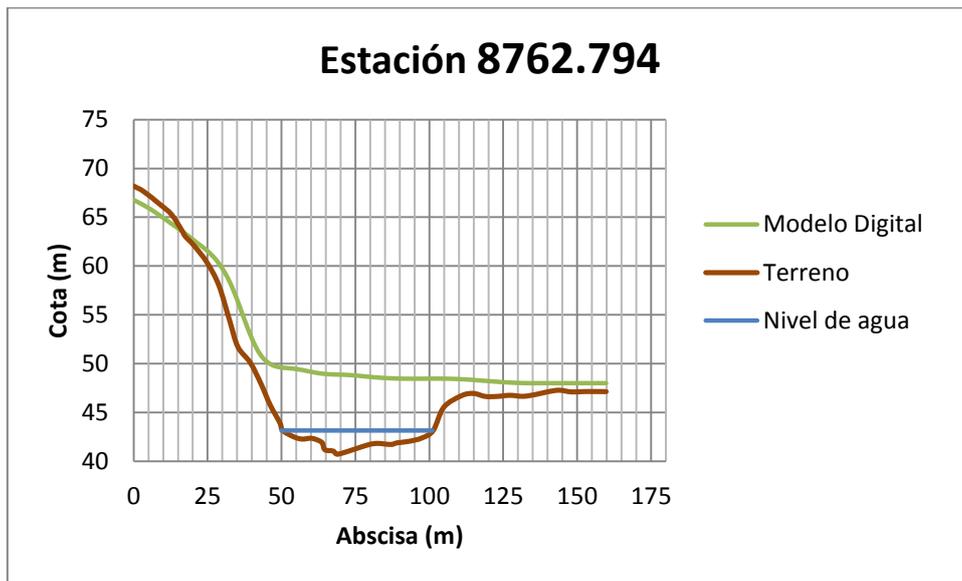
Sección 5: Estación 10558.83



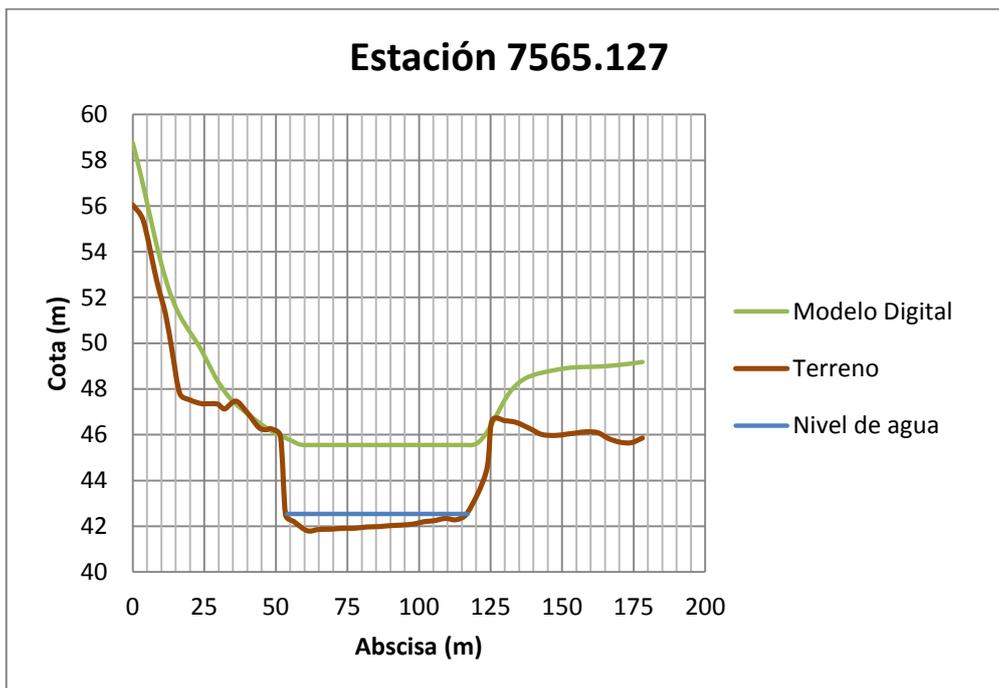
Sección 6: Estación 9767.066



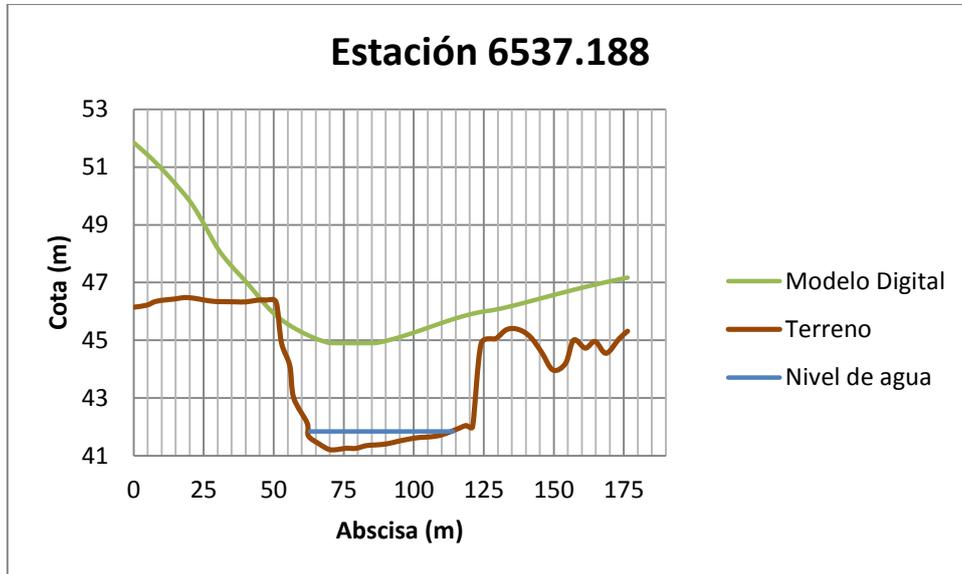
Sección 7: Estación 8762.794



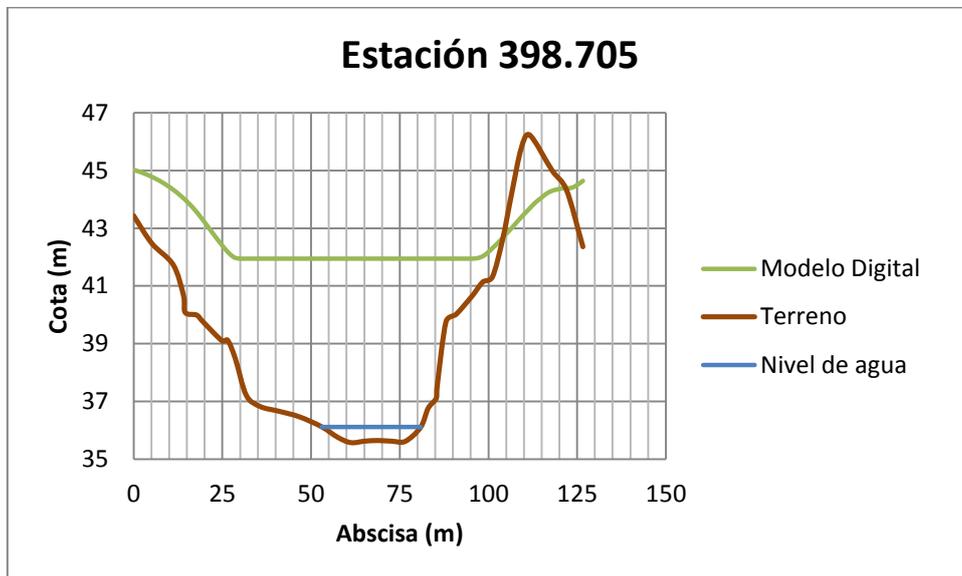
Sección 8: Estación 7565.127



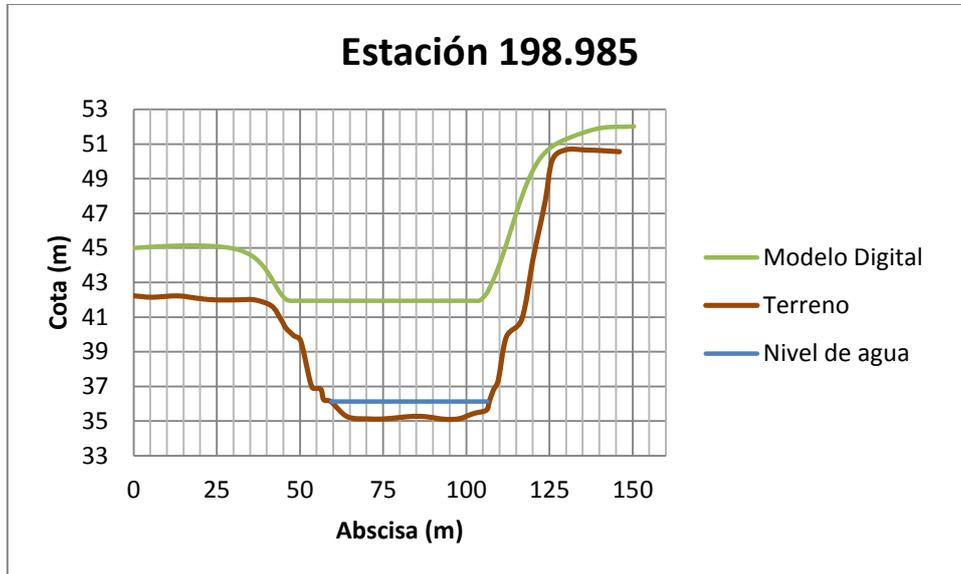
Sección 9: Estación 6537.188



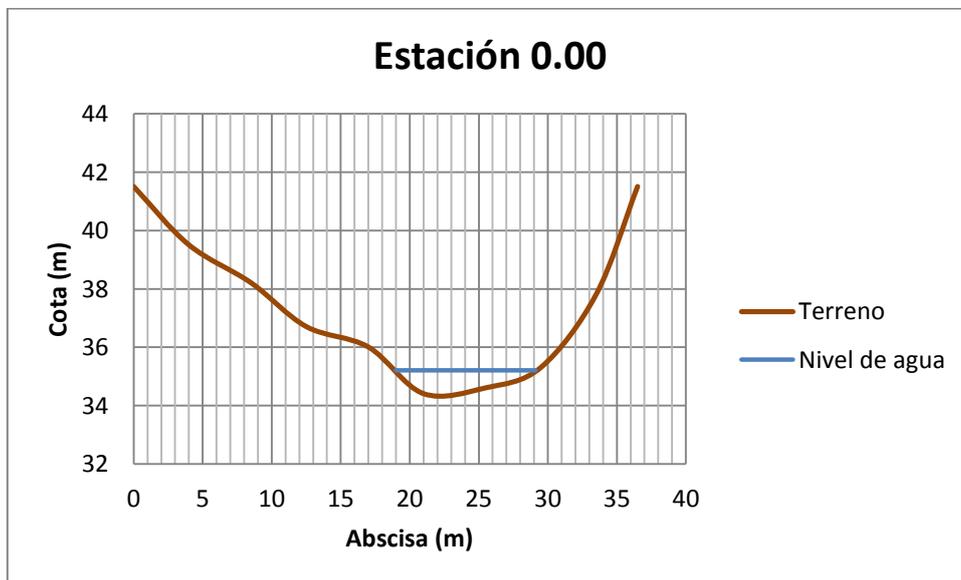
Sección 10: Estación 398.705



Sección 11: Estación 198.895

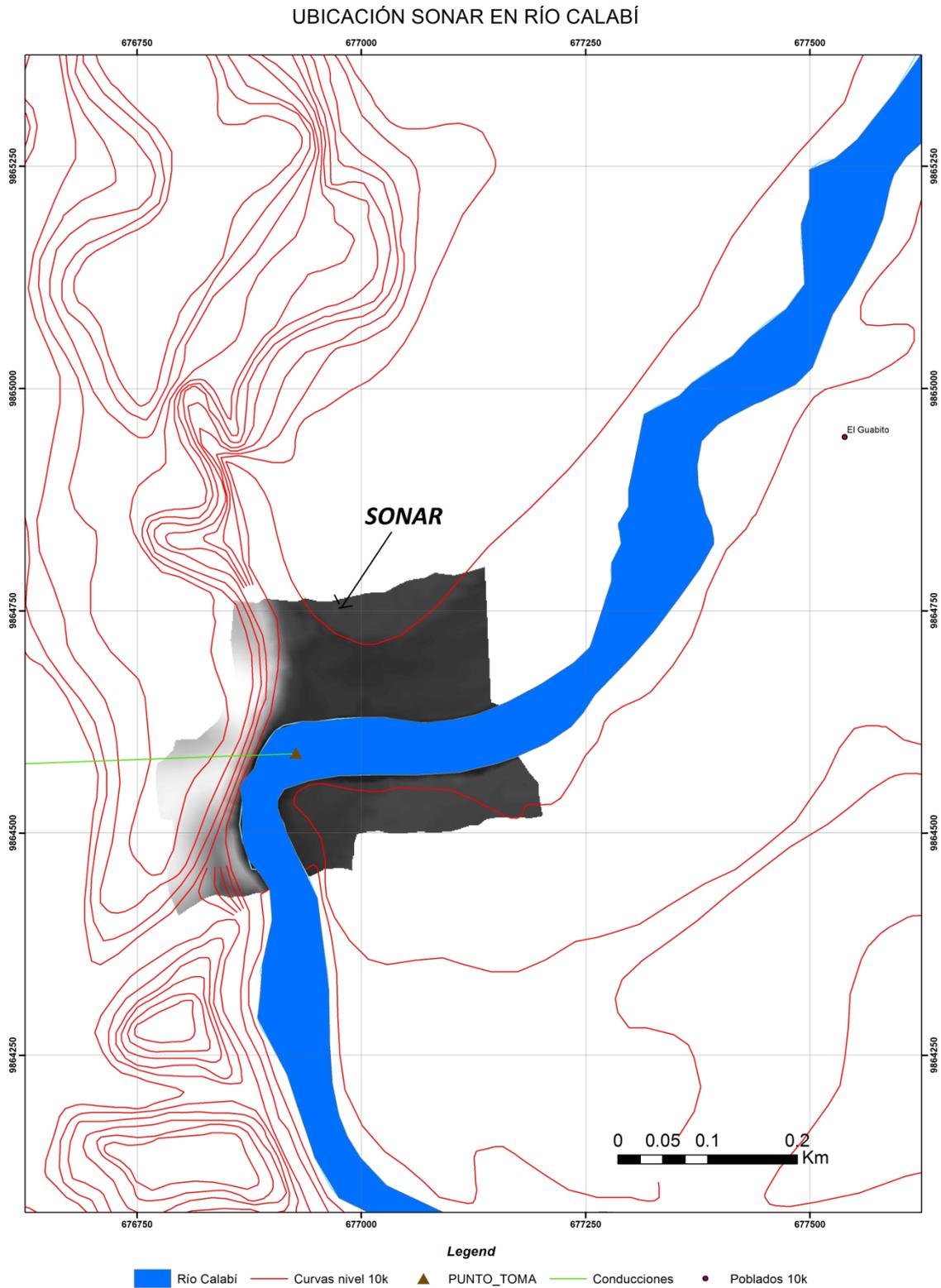


Sección 12: Estación 0.00



## Anexo 2

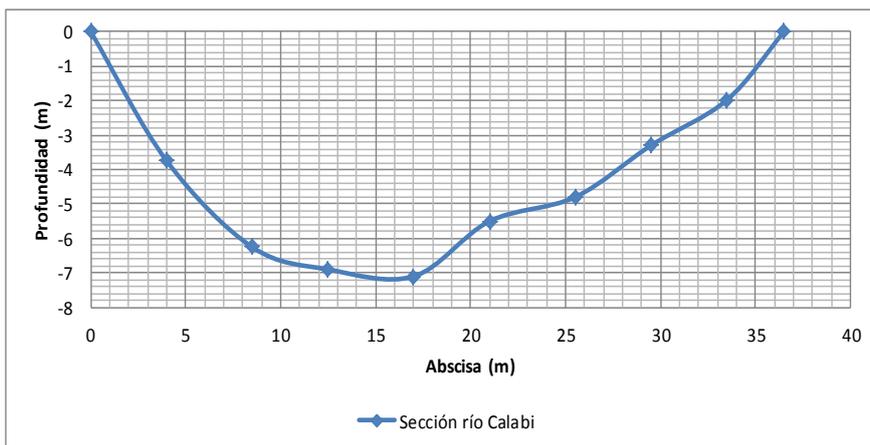
Ubicación del levantamiento de la superficie del río Calabí en sector de la toma, mediante un sonar.



### Anexo 3

Aforos mensuales del río Calabí realizados en Quinsaloma por el departamento de hidrología del PROMAS.

Aforo del río Calabí en Quinsaloma			
# Aforo	Fecha	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Nivel (m)
1	23/01/2013	72.80	4.15
3	18/03/2013	315.35	5.15
4	16/04/2013	186.75	4.75
5	14/05/2013	49.78	3.00
6	12/06/2013	34.47	3.20
7	10/07/2014	17.61	2.30
8	7/08/2015	11.95	2.50
9	7/09/2016	7.95	2.40
10	7/10/2017	7.91	2.55

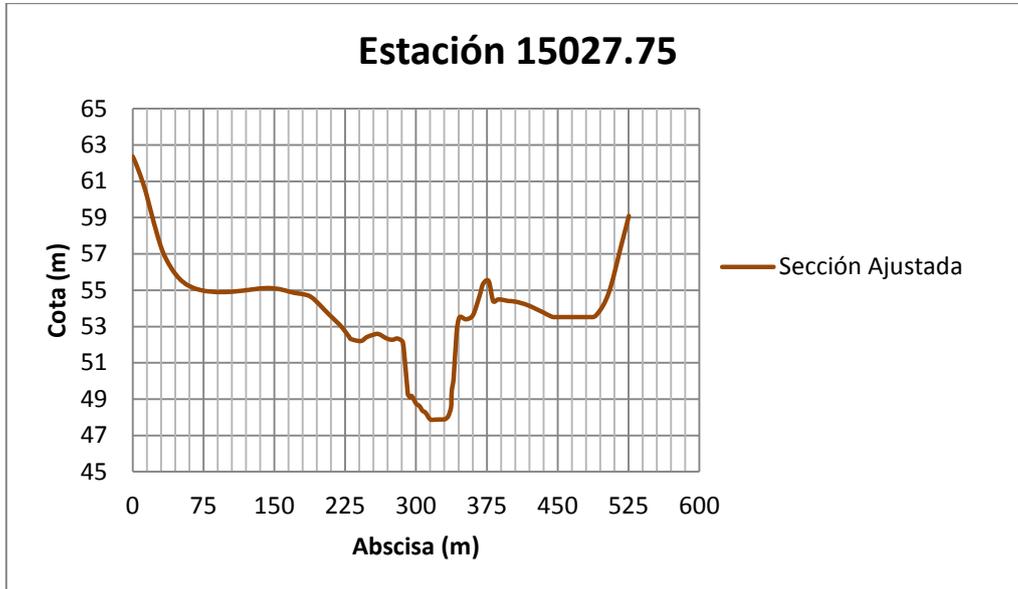


Elaboración: PROMAS Universidad de Cuenca, 2013

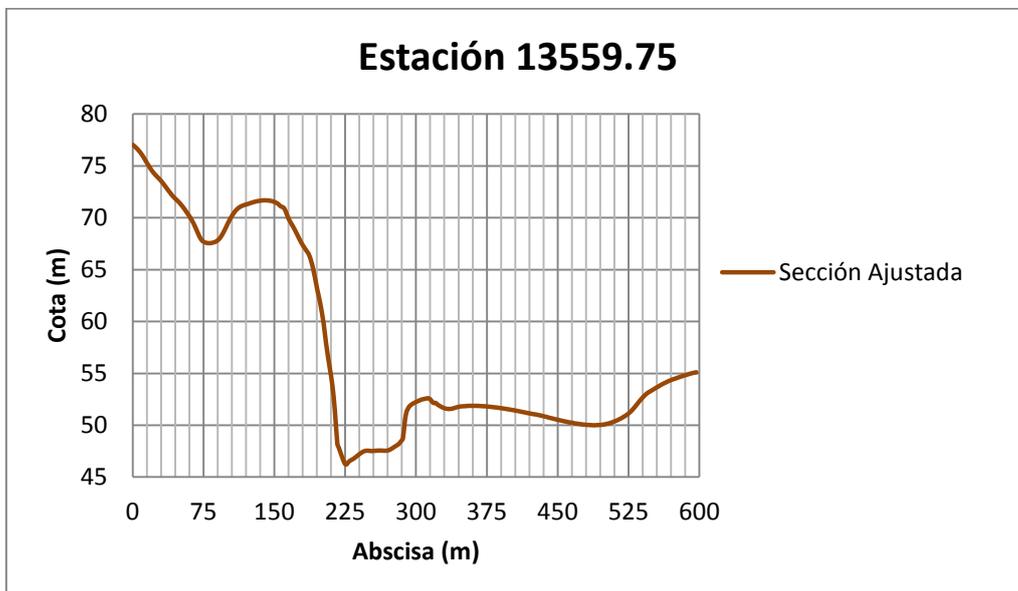
## Anexo 4

Gráficas de las secciones ajustadas.

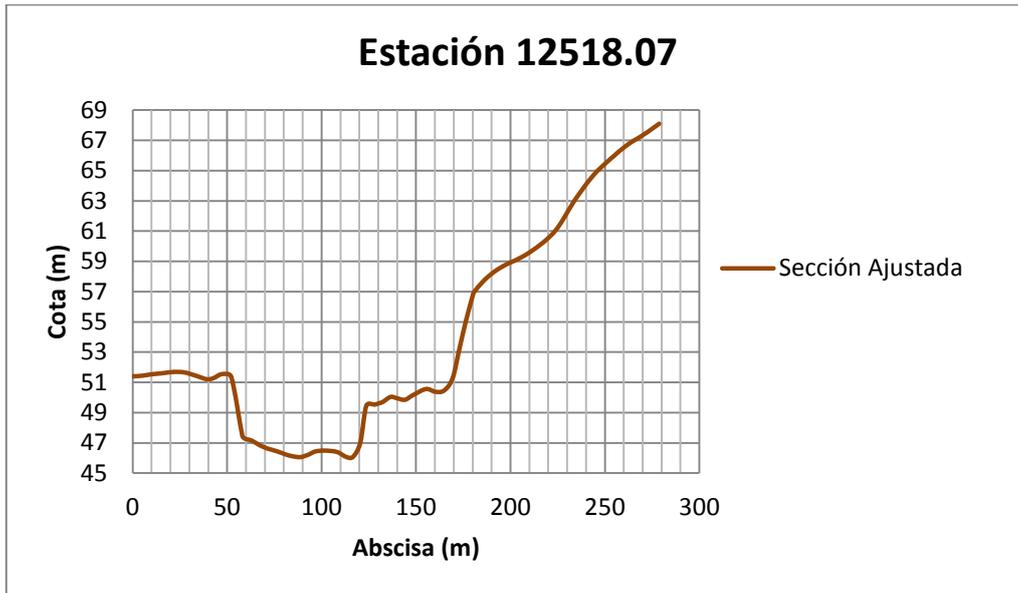
Sección 1: Estación 15027.75



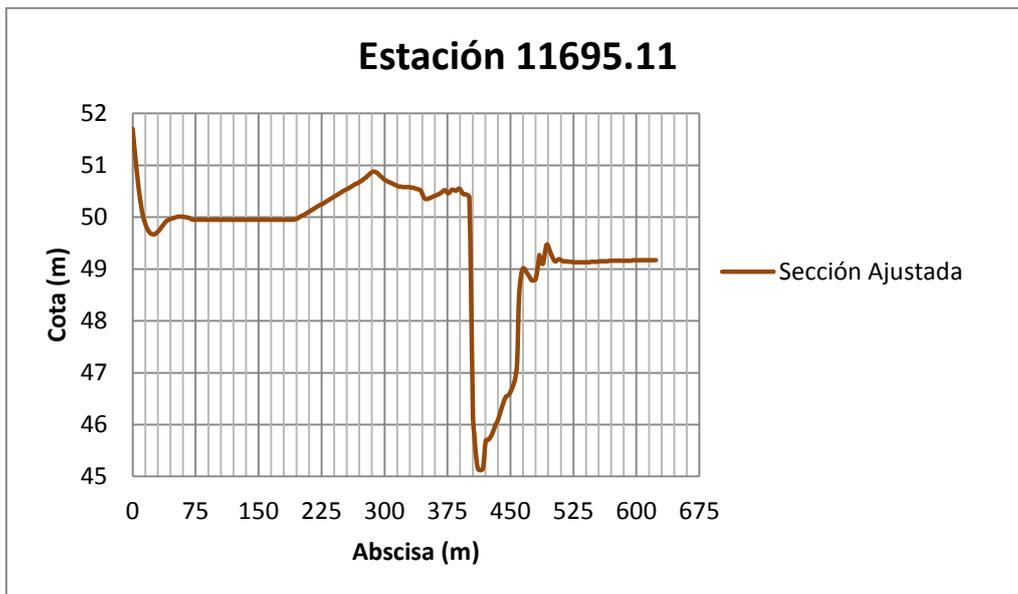
Sección 2: Estación 13559.75



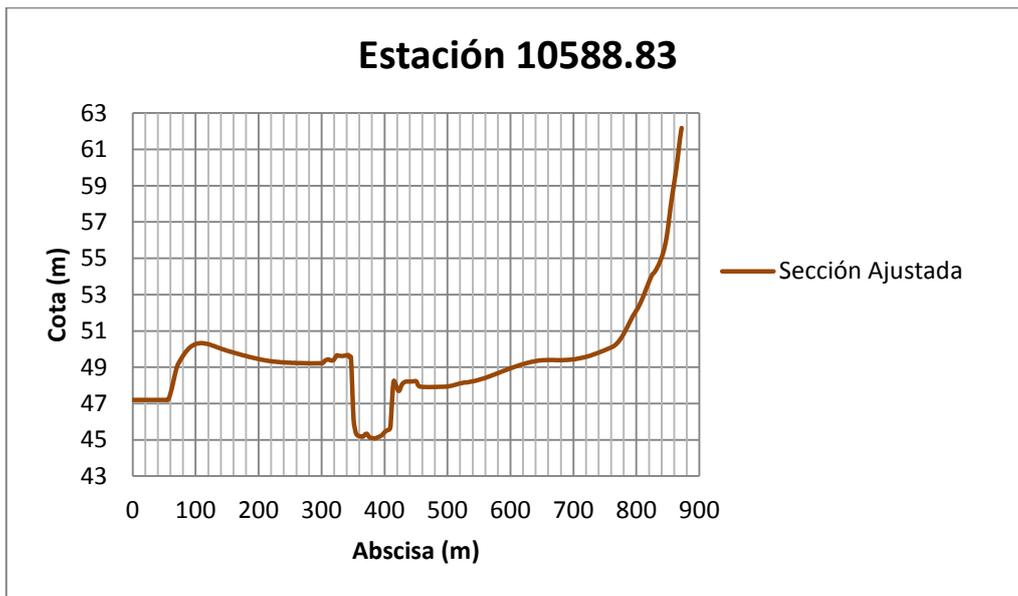
Sección 3: Estación 12518.07



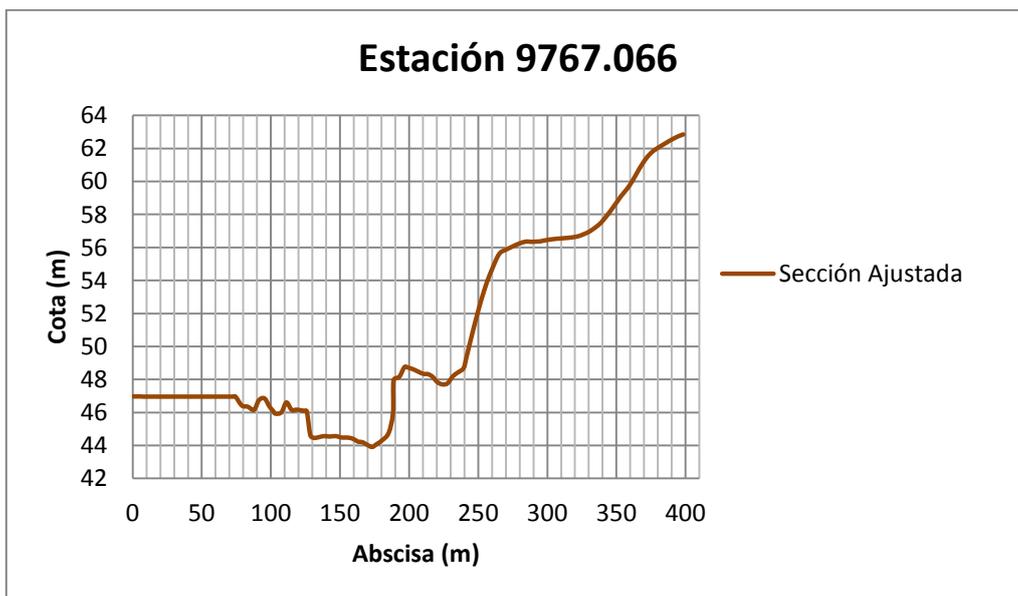
Sección 4: Estación 11695.11



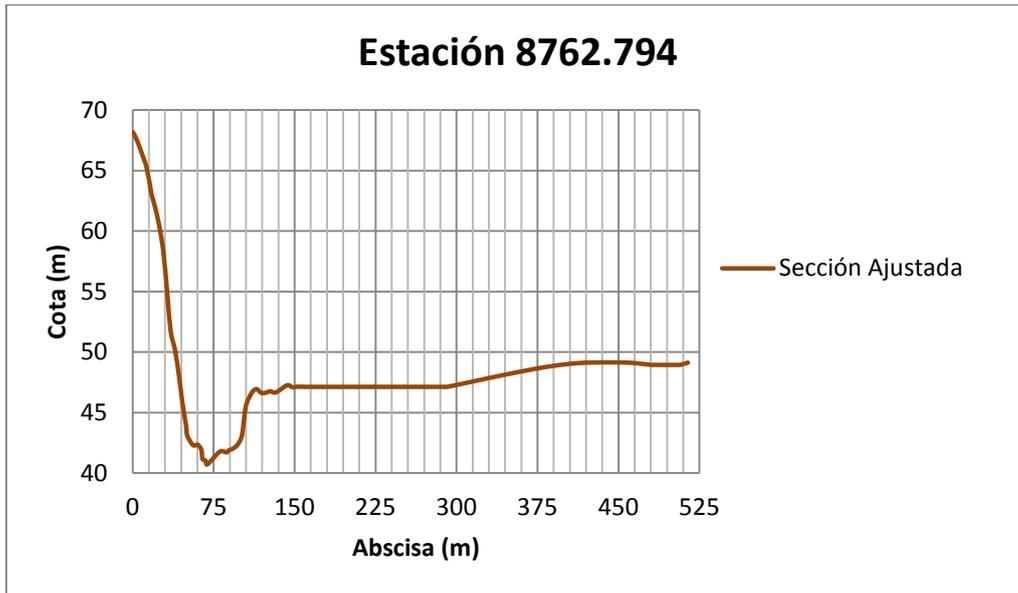
Sección 5: Estación 10558.83



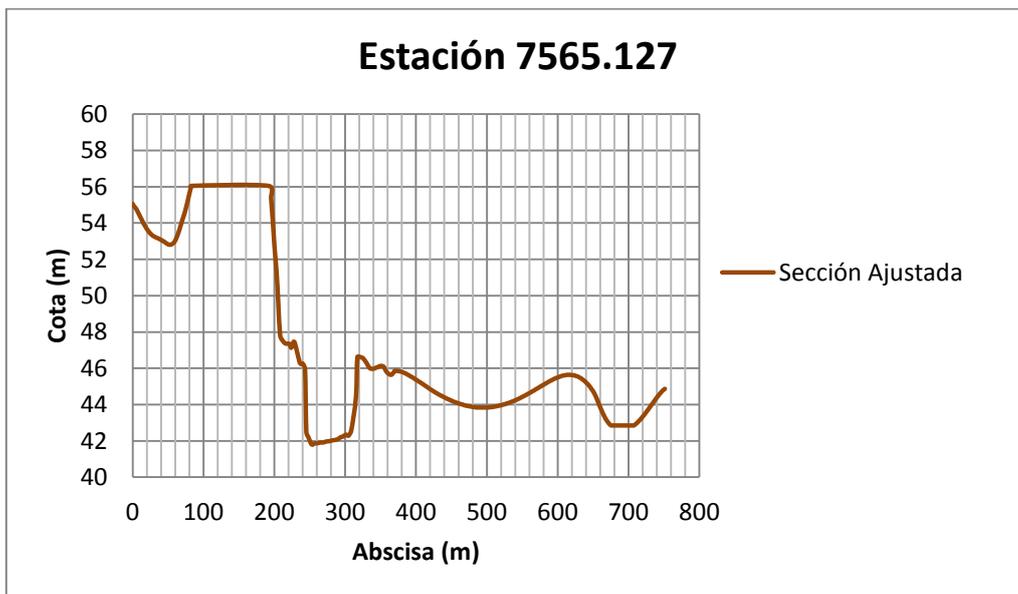
Sección 6: Estación 9767.066



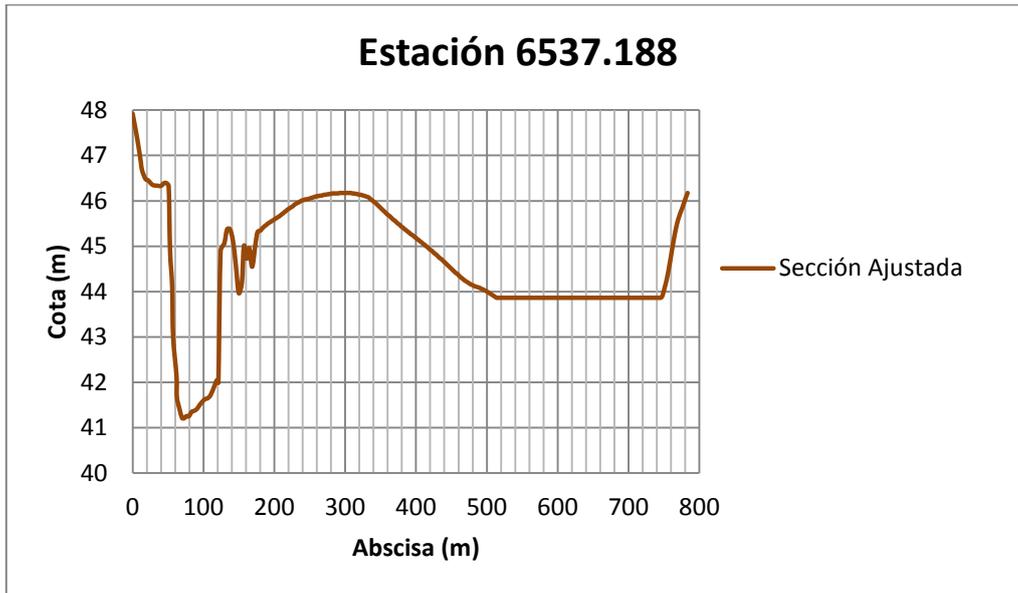
Sección 7: Estación 8762.794



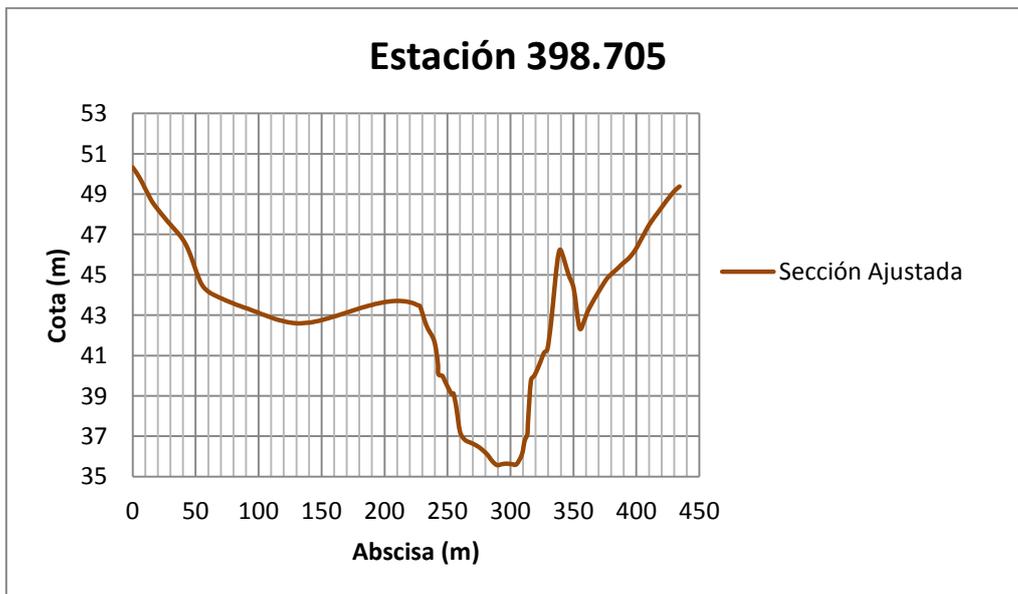
Sección 8: Estación 7565.127



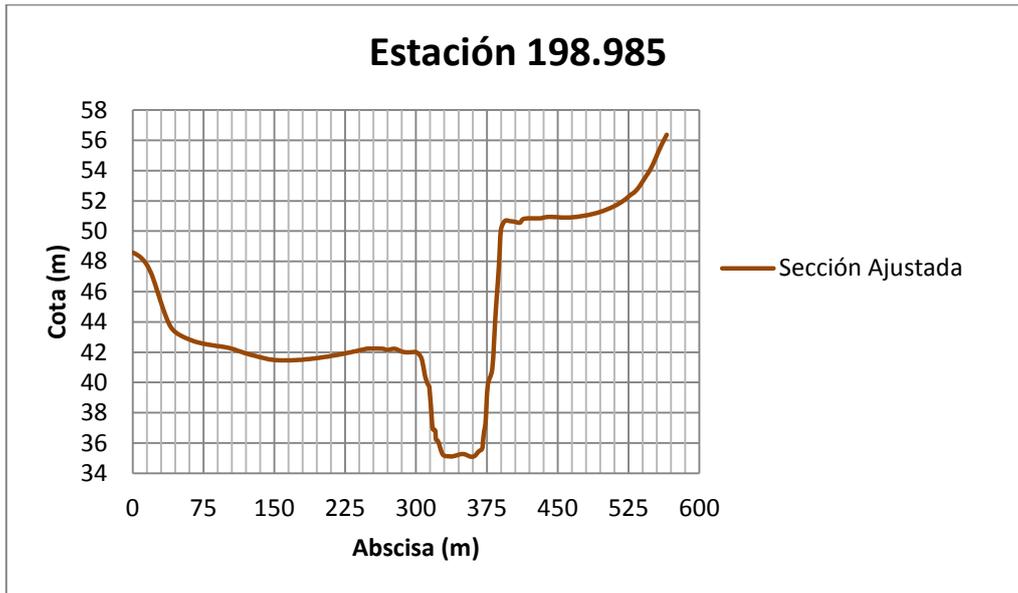
Sección 9: Estación 6537.188



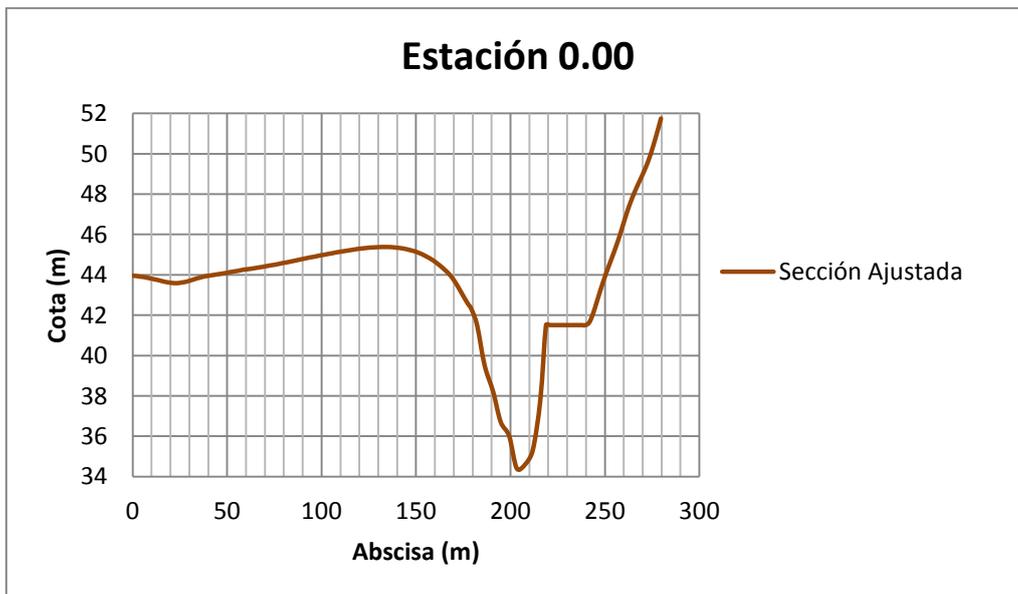
Sección 10: Estación 398.705



Sección 11: Estación 198.895



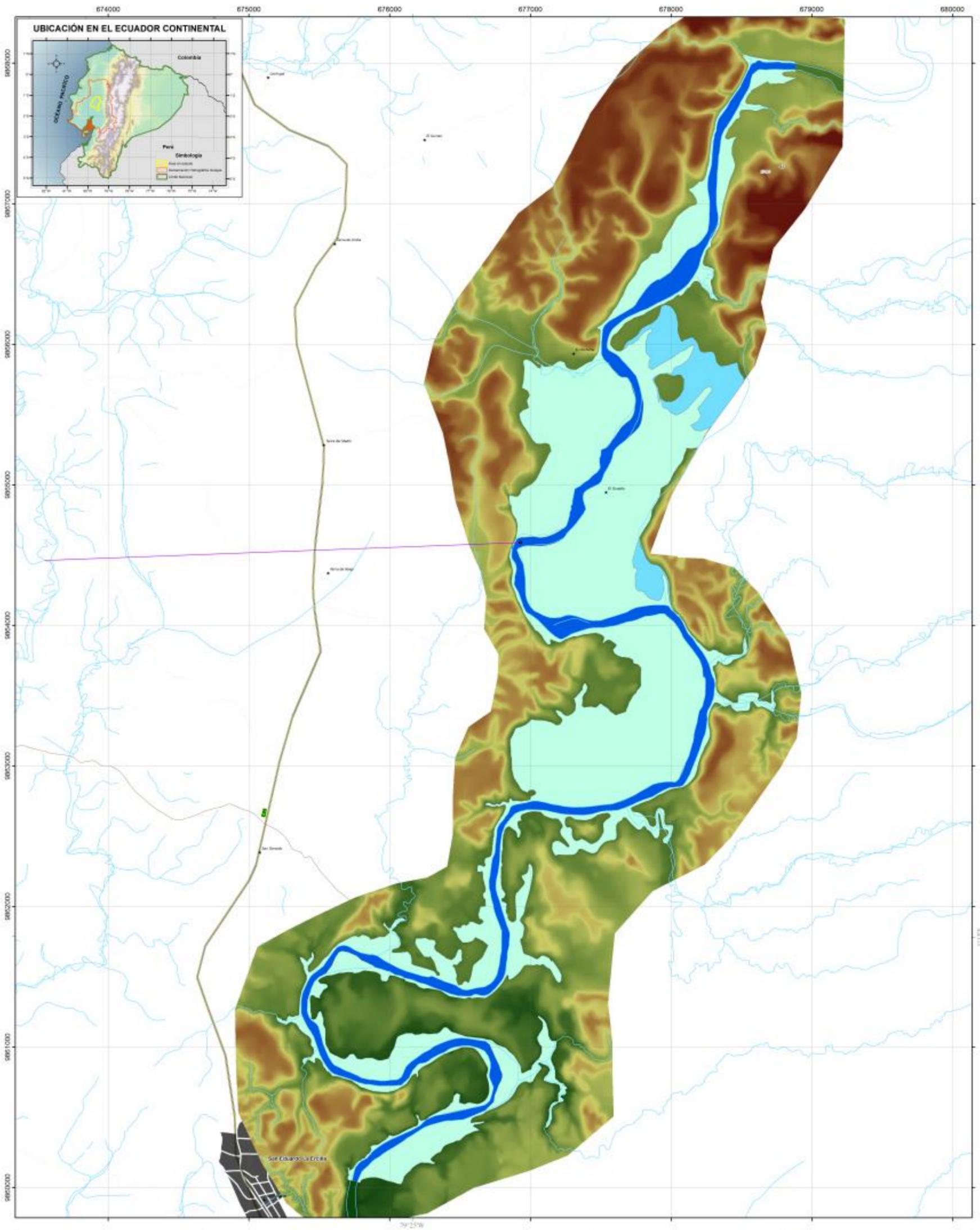
Sección 12: Estación 0.00





## **Anexo 5**

Mapa con las áreas de inundación para caudales con periodos de retorno de 50 y 100 años.



**LEYENDA TEMÁTICA**

- Punto Tonia
- Conducción
- Río Cobalí
- Inundación para T=50 años
- Inundación para T=100 años

Áreas	Unidad	Períodos de Retorno	
		T=50 años	T=100 años
Área Total	ha	538.325	540.268
Influencia del río	ha	89.531	89.531
Zona Afectada	ha	428.784	450.738

**SÍMBOLOS CONVENCIONALES**

- Poblados
- Zona edificada
- Autopista
- Vía Colectora
- Conexión entre Cabezeras
- Conexión Secundaria
- Vía Secundaria
- Ríos

**ESCALAS Y PROYECCIÓN**

Escala de impresión: 1:12.000

Escala Gráfica: 0 250 500 Metros

Elipsoides: Sistema Geodésico Mundial 1984 (WGS84)  
 Datum: 1.000 metros, UTM, Zona 17 Sur  
 Proyección: Unidad de Transformación de Altimetría  
 Datum Horizontal: Nivel Medio del Mar  
 Datum Horizontal: Sistema Geodésico Mundial 1984 (WGS84)

**REVISIONES**

Nº	Fecha	Observación

Secretaría Nacional del Agua / Demarcación Hidrográfica Guayas

Proyecto: **Plan de aprovechamiento y control del agua en la provincia de Los Ríos**

Ejecutor:

Asesor:

Convenio: Área de Inundación para Períodos de Retorno de 50 y 100 años. Archivo: C:\Data\Graficos\Mapa\_11\_11\_Guayas\_Rio\_Cobalí\_50\_100

Fecha: 03/09/2013