

EVALUACIÓN DE HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS PARA EL ANÁLISIS DE AMENAZA POR INUNDACIONES

AUTOR

JULIAN DARIO ARBELAEZ SALAZAR

Tesis de grado

Asesor

Ing. MsC Mario Diaz Granados

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL
BOGOTÁ
2010**

A mi Esposa por su constante y oportuno amor.

A mi Padre que desde el cielo nos acompaña

A mi Madre por su amor y tolerancia.

A mis amigos por estar siempre conmigo.

AGRADECIMIENTOS

Al Maestro Mario Díaz-Granados Ortiz por su ejemplo tanto a nivel profesional como personal y a la paciencia y confianza que depositó en mi, mil y mil gracias, por hacer esto posible.

A los ingenieros Oscar Martinez y Juan Carlos Loaiza, por la información suministrada para el desarrollo del proyecto y por su amable colaboración y disposición.

A mi amadísima esposa Carolina quién con su paciencia y amor estuvo siempre a mi lado en todos los momentos difíciles.

A mi cuñada Cristina Salazar quién desde el principio siempre apoyó nuestra iniciativa de estudiar esta maestría.

Al General Oscar Enrique González Peña quien me enseñó el verdadero significado de ascender.

Al ejército Nacional de Colombia, especialmente a la Escuela de Ingenieros Militares por darme la oportunidad de terminar mi Maestría.

A mi amigo Diego Pulgarín quien sufrió a mi lado los últimos días de la ejecución de este proyecto.

A todos aquellos que de una otra forma prestaron su apoyo y colaboración, ya sea profesional o personal para que este proyecto pudiese obtener los resultados esperados.

Muchas gracias.

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	8
2	OBJETIVOS	9
2.1	OBJETIVO GENERAL	9
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
3	MARCO TEÓRICO	10
3.1	INUNDACIÓN	10
3.1.1	Definición	10
3.1.2	Análisis de amenaza por inundaciones	10
3.2	TÉCNICAS DE MODELACIÓN HIDRÁULICA DE INUNDACIONES	12
3.3	MODELOS HIDRÁULICOS IMPLEMENTADOS	15
3.3.1	HEC-RAS 4.0 (Hydrologic Engineering Center-River Analysis System)	15
3.3.2	River2D 0.95	17
4	METODOLOGÍA	21
5	CASO DE ESTUDIO E INFORMACIÓN DISPONIBLE	23
5.1	CARACTERÍSTICAS DEL TRAMO DE ESTUDIO	23
5.2	INFORMACIÓN DISPONIBLE	24
5.2.1	Fotografía satelital del tramo de estudio	24
5.2.2	Información topo-batimétrica	25
5.2.3	Información hidrológica	26
5.2.4	Registro de caudales y curva de calibración	26
5.2.5	Información gráfica de eventos de inundación	29
6	PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	30
6.1	ELABORACIÓN DEL MODELO DIGITAL DEL TERRENO	30
6.2	SELECCIÓN DEL EVENTO DE INUNDACIÓN A MODELAR	33
6.3	RECONSTRUCCIÓN DE LA HUELLA DE INUNDACIÓN A MODELAR ...	33
7	IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS	36
7.1	IMPLEMENTACIÓN MODELO HIDRÁULICO UNIDIMENSIONAL HEC RAS	36
7.1.1	Preprocesamiento en HEC-RAS	37
7.1.2	Modelación en HEC-RAS	37
7.2	IMPLEMENTACIÓN MODELO HIDRÁULICO BIDIMENSIONAL RIVER2D	39
7.2.1	Implementación módulo R2D_Bed	39

7.2.2	Implementación del módulo R2D_Mesh	47
7.2.3	Ejecución del modelo Hidráulico River2D	56
7.2.4	Posprocesamiento de los resultados del modelo Bidimensional River2D	61
8	CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS	69
8.1	Calibración hidrométrica	69
8.1.1	Calibración modelo unidimensional HEC RAS	70
8.2	VALIDACIÓN DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS	77
8.2.1	Validación Modelo Hidráulico Unidimensional	77
8.2.2	Validación modelo hidráulico bidimensional	84
9	RESULTADOS Y ANÁLISIS COMPARATIVO	87
9.1	RESULTADOS DE CALIBRACIÓN	87
9.2	VALIDACIÓN DE LOS MODELOS	88
10	CONCLUSIONES	90
10.1	Respecto a la metodología	90
10.2	Respecto a los modelos	90
11	RECOMENDACIONES	92
12	BIBLIOGRAFÍA	93

LISTAS DE FIGURAS

Figura 3-1	amenaza en términos de profundidad y velocidad del flujo	11
Figura 3-2	Cuadro sinóptico de los principales métodos para el análisis de inundaciones .	11
Figura 3-3	Preprocesamiento y posprocesamiento del modelo hidráulico HEC-RAS	17
Figura 3-4	Estructura y funcionamiento de River2D	18
Figura 4-1	Mapa sinóptico de la información necesaria para la elaboración del análisis de inundaciones	21
Figura 4-2	Diagrama de flujo de la aproximación metodológica propuesta	22
Figura 5-1	Localización general del tramo de estudio	23
Figura 5-2	Control hidráulico-vuelta del Conejo	24
Figura 5-3	Imagen satelital del tramo de estudio	25
Figura 5-4	Información topobatimétrica del tamo de estudio	25
Figura 5-5	Estación limnigráfica de puerto salgar	26
Figura 5-6	Información hidrológica de la estación limnigráfica de Puerto Salgar	27
Figura 5-7	Sección transversal de la estación limnigráfica de Puerto Salgar	27
Figura 5-8	Curva de calibración estación limnigráfica de Puerto Salgar	28
Figura 5-9	Fotografías de los eventos de inundación	29
Figura 5-10	Recolección de información adicional en campo	29
Figura 6-1	Elaboración de curvas de nivel	30
Figura 6-2	Procedimiento de elaboración del modelo digital del terreno	31
Figura 6-3	Modelo digital del terreno del tramo de estudio	31
Figura 6-4	MDT con imagen sobrepuesta	32
Figura 6-5	Comparación de secciones transversales generadas y registradas	32

Figura 6-6 Selección del evento de inundación.....	33
Figura 6-7 Trazado de la huella de inundación	33
Figura 6-8 Georeferenciación de registros fotográficos	34
Figura 6-9 Georeferenciación de los registros fotográficos sobre la imagen satelital.....	34
Figura 6-10 Huella de inundación reconstruida	35
Figura 7-1 Preprocesamiento y posprocesamiento del modelo hidráulico hec-ras	36
Figura 7-2 Preprocesamiento de la información con HEC-GeoRAS	37
Figura 7-3 Modelo hidráulico de 111 secciones transversales.....	38
Figura 7-4 Modelo hidráulico en HEC-RAS.....	38
Figura 7-5 Conversión de curvas de nivel a formato CAD.....	39
Figura 7-6 Curvas en nivel en Arcview	40
Figura 7-7 Conversión de curvas de nivel en puntos.....	40
Figura 7-8 Adición de los atributos ID y coordenadas al archivo plano.	41
Figura 7-9 Archivo plano cargado en R2D_Bed.....	44
Figura 7-10 Modelo Digital del Terreno generado con R2D_Bed.....	44
Figura 7-11 Uso de Breakline para corregir errores de la triangulación.....	45
Figura 7-12 Eliminación de nodo para corrección de triangulación.....	45
Figura 7-13 Configuración de la rugosidad de fondo	46
Figura 7-14 Demarcación de la frontera computacional.....	47
Figura 7-15 Topografía cargada en R2D_Mesh.....	49
Figura 7-16 Discretización de la frontera computacional	50
Figura 7-17 Especificación de las fronteras de entrada y salida de flujo.....	51
Figura 7-18 Fronteras computacionales	52
Figura 7-19 Discretización del espacio computacional	53
Figura 7-20 Triangulación del espacio computacional.....	54
Figura 7-21 Suavizado de la malla computacional.....	55
Figura 7-22 Topografía generada en R2D_Mesh.....	56
Figura 7-23 Modelo River2D.....	57
Figura 7-24 Ventanas para edición de las condiciones de frontera	58
Figura 7-25 Cuadro de diálogo Run Steady	59
Figura 7-26 Extracción de la frontera de inundación. Modelo River2D.	62
Figura 7-27 Importación de archivo en Excel en ARCGIS	62
Figura 7-28 Puntos de la frontera de inundación importados en ARCGIS	63
Figura 7-29 Trazado del polígono de extensión de inundación River2D	64
Figura 7-30 Conversión de Polígono a Raster.....	65
Figura 7-31 Despliegue de la superficie de la lámina de agua en River2D	66
Figura 7-32 Extracción de la información de la superficie de la lámina de agua (River2D)	66
Figura 7-33 Nube de puntos de la Elevación de la lámina de agua	67
Figura 7-34 Generación del TIN de la altura de la lámina de agua	67
Figura 7-35 MDE de zonas inundadas. Modelo River2D.....	68
Figura 8-1 Relación cota de lámina de agua a caudal.....	69
Figura 8-2 Fallas en la estación limnigráfica de Pto Salgar.....	70
Figura 8-3 Modelo hidráulico con 111 secciones transversales.....	71
Figura 8-4 Calibración modelo 111secciones transversales considerando n constante.....	72
Figura 8-5 Calibración rango de caudal entre 500 y 1200 m ³ /s.	72

Figura 8-6 Calibración rango de caudal entre 1200 y 4500 m ³ /s.	73
Figura 8-7 Calibración rango de caudal entre 1200 y 3000 m ³ /s.	73
Figura 8-8 Calibración rango de caudal entre 3500 y 5848 m ³ /s.	74
Figura 8-9 Inestabilidad numérica bajo suposición de n variable	75
Figura 8-10 Modelo hidráulico con 14 secciones transversales.....	75
Figura 8-11 Calibración modelo con 14 secciones transversales	76
Figura 8-12 Medida de desempeño de la calibración	76
Figura 8-13 Aplicación del criterio de bondad y ajuste modelo con 14 secciones transversales	78
Figura 8-14 Extensión de la inundación modelo con 14 secciones transversales	79
Figura 8-15 Modelo 3D de la extensión de la inundación para el modelo de 14 secciones.	80
Figura 8-16 Aplicación del criterio de bondad de ajuste F modelo 111 secciones transversales	81
Figura 8-17 Extensión de la inundación del modelo de 111 secciones transversales.....	82
Figura 8-18 Modelo 3D de la extensión de la inundación para el modelo de 111 secciones.	83
Figura 8-19 Sobrevuelo sobre el modelo tridimensional de la inundación.....	84
Figura 8-20 Aplicación del criterio de bondad de ajuste F. Modelo River2D Ks uniforme	85
Figura 8-21 Modelo 3D de la extensión de la inundación para el modelo bidimensional. ..	86
Figura 9-1 Comparación de áreas de inundación modeladas.	89

LISTA DE TABLAS

Tabla 3-1 Criterios para definir la amenaza de una inundación	10
Tabla 3-2 Descripción general de los tipos de modelos hidráulicos existente.....	13
Tabla 5-1 Principales características del tramo de estudio	23
Tabla 5-2 Características estación limnigráfica de Puerto Salgar	26
Tabla 5-3 Datos recientes de aforos líquidos	28
Tabla 7-1 Selección del espaciamiento adecuado de puntos para MDT	41
Tabla 7-2 Datos de entrada para R2D_Bed.....	42
Tabla 7-3 Condiciones iniciales modelo River2D.....	51
Tabla 7-4 Características de la malla generada.	55
Tabla 8-1 Registro de aforos en la estación puerto salgar	70
Tabla 8-2 Resultados de calibración n variable.....	74
Tabla 8-4 Resultados de F para el modelo de 14 secciones transversales	78
Tabla 8-6 Resultados F para el modelo de 111 secciones transversales	81
Tabla 8-8 Resultados F para el modelo bidimensional River2D. Ks uniforme.	85
Tabla 9-1 Resultados de calibración modelo unidimensional de 111 secciones transversales.	87
Tabla 9-2 Resultados de calibración modelo unidimensional de 14 secciones transversales.	87
Tabla 9-3 Resultados de calibración modelo bidimensional.....	88
Tabla 9-4 Resultados comparativos	88

1 INTRODUCCIÓN

Es bien sabido que las inundaciones son uno de los desastres naturales con la mayor repercusión socioeconómica sobre cualquier población a nivel mundial, y es por tanto que la acción de las entidades encargadas de la atención y prevención de desastres debe encaminarse hacia una adecuada gestión del riesgo, tratando de minimizarlo y manejar sus consecuencias (Instituto Geológico y Minero de España, 2008).

Dado lo anterior, a nivel mundial se han venido desarrollando metodologías para elaborar análisis de amenaza por inundación, en donde la modelación hidráulica tiene un papel importantísimo, ya que permite, a través de su integración con Sistemas de Información Geográfica (SIG), generar mapas de velocidades y profundidades, los cuales son la base para elaborar mapas de amenaza por inundación, que son un insumo base para cualquier proyecto que pretenda evaluar riesgos o amenazas por inundación.

Un requerimiento clave para un análisis de amenaza por inundación es que los modelos hidrodinámicos y los procedimientos para actualizar los mapas de amenaza para cualquier sistema de ríos deben ser flexibles, de tal manera que escenarios adicionales puedan ser fácilmente evaluados dando información sobre pronósticos en una situación de emergencia. Para ello es necesario que se tenga implementada una infraestructura que permita realizar análisis en tiempo real, de tal manera que en una emergencia los escenarios puedan ser calculados y mapificados dentro de las 24 horas de aviso y estén disponibles en formato electrónico de SIG para las entidades encargadas de la atención y prevención de emergencias (Flood Site, 2009).

En Colombia son escasos los estudios detallados sobre modelación de inundaciones y por ende no existen pautas que permitan seleccionar el tipo de modelo hidráulico más aplicable para nuestras condiciones, así como también pautas de selección de información necesaria para su aplicación o sistemas de adquisición de dicha información en nuestro país.

Es por tanto que en este trabajo se planteó una aproximación metodológica para realizar modelaciones de eventos de inundación, a través de la aplicación de dos modelos hidráulicos, uno de tipo unidimensional (HEC-RAS4.0) y otro de tipo bidimensional (River2D V0.95) sobre un tramo del Río Magdalena a la altura de las poblaciones de Puerto Salgar y La Dorada (Colombia).

El objetivo de implementar y comparar los resultados obtenidos por medio de un modelo unidimensional y otro bidimensional radica en darle respuesta a preguntas tales como: ¿Los dos modelos producen los mismos resultados?. Si no, las diferencias se pueden explicar?.

Es por tanto que en este trabajo se evaluó el poder predictivo de los modelos hidráulicos y su integración con SIG a través del análisis de un evento de inundación ocurrido en el año 2008.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la aplicación de herramientas computacionales para el preprocesamiento, modelación y posprocesamiento requerido en un análisis de amenaza por inundaciones teniendo en cuenta aspectos específicos de la información disponible de hidrología y geografía local del sitio, con el fin de dar pautas para el desarrollo de una aproximación metodológica, sin excesivo derroche de recursos, tanto económicos como de información, al análisis de amenaza por inundación en tramos de ríos aluviales.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar las diferentes metodologías y procedimientos propuestos para la elaboración de análisis de amenaza por inundaciones.
- Explorar distintas herramientas informáticas disponibles para la elaboración de modelos digitales del terreno a partir de información topo-batimétrica escasa.
- Evaluar la aplicación de los modelos hidráulicos HEC RAS 4.0 y RIVER2D 0.95 en el análisis de un evento de inundación en el Río Magdalena a su paso por las poblaciones de Puerto Salgar y La Dorada.
- Comparar los resultados obtenidos a partir de la aplicación de los modelos hidráulicos HEC RAS 4.0 y RIVER2D 0.95 en la modelación de un evento de inundación en el Río Magdalena.
- Evaluar la capacidad de integración de los modelos hidráulicos con SIG.
- Desarrollar una aproximación metodológica aplicable, para la elaboración de análisis de amenaza por inundación, encaminada a obtener pautas respecto a la selección apropiada y a la aplicación correcta de modelos unidimensionales y bidimensionales con el fin de modelar las inundaciones.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 INUNDACIÓN

3.1.1 Definición

Una inundación se define como una “sumersión temporal de terrenos normalmente secos, como consecuencia de la aportación inusual y más o menos repentina de una cantidad de agua superior a la que es habitual en una zona determinada” (Aldana Valverde, 2006). Es así como dicho evento puede causar daños tales como: pérdida de vidas humanas, animales, anegamiento de cultivos y destrucción de infraestructura.

Dado lo anterior, la acción de las entidades encargadas de la atención y la prevención de desastres debe encaminarse hacia una adecuada gestión del riesgo relacionado con las inundaciones, tratando de minimizarlo y manejar sus consecuencias. Para ello a nivel mundial se han desarrollado en general tres grupos clásicos de medidas para la gestión del riesgo: medidas predictivas, preventivas y correctivas (Instituto Geológico y Minero de España, 2008).

Todas las medidas, particularmente las preventivas de tipo no estructural, precisan como paso previo y fundamento de la gestión la realización de un análisis de riesgo de inundaciones, lo que supone el estudio pormenorizado de los elementos de riesgo (Instituto Geológico y Minero de España, 2008), lo cual incluye la realización de modelos de tipo hidrológico e hidráulico con el fin de determinar el comportamiento de las corrientes frente a eventos de aumento del caudal y su posterior mapificación, para determinar principalmente las zonas que van a ser anegadas por dicho evento.

3.1.2 Análisis de amenaza por inundaciones

Tal como se planteó en el numeral anterior una inundación genera un inminente riesgo para cualquier sistema expuesto, ya sea éste una población o terrenos cultivados y es por tanto que debe realizarse un análisis de amenaza, lo cual incluye evaluar variables representativas de una inundación tales como: altura de la lámina de agua, velocidad del flujo de agua, tiempo de permanencia de la inundación y aportación de material sólido por efecto de la misma.

Algunos de los criterios que se han tenido en cuenta para realizar un análisis de inundaciones son los propuestos por la American Society of Civil Engineering (ASCE) los cuales se resumen en la Tabla 3-1 y en la Figura 3-1.

AFECTACIÓN	CRITERIO		
	ALTURA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ALTURA (m)*VELOCIDAD (m/s)
Vidas humanas	>1	>1	>0.7
Edificios y estructuras	>3.6	--	>6

Tabla 3-1 Criterios para definir la amenaza de una inundación

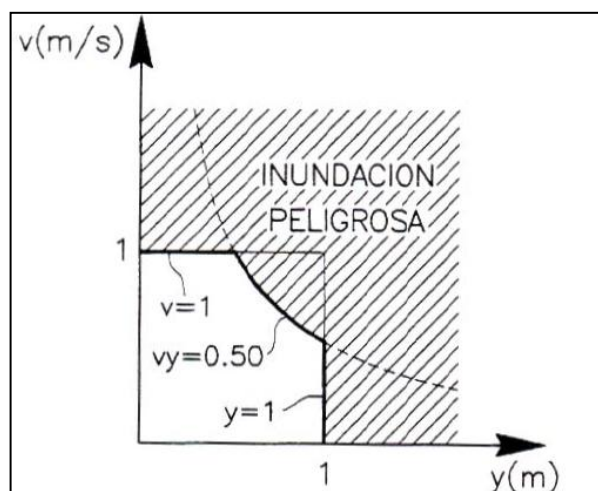


Figura 3-1 amenaza en términos de profundidad y velocidad del flujo¹

Con el fin de determinar los parámetros mencionados anteriormente, a nivel mundial se han empleado de forma combinada y complementaria diferentes métodos para el análisis de inundaciones, que a grandes rasgos pueden agruparse en: métodos históricos y paleohidrológicos, métodos geológicos y geomorfológicos y métodos hidrológicos e hidráulicos (Instituto Geológico y Minero de España, 2008).



Figura 3-2 Cuadro sinóptico de los principales métodos para el análisis de inundaciones

Con los métodos hidrológicos e hidráulicos lo que se pretende es estimar los caudales generados en una cuenca o corriente con el fin de ser transitados sobre el cauce de interés y así poder determinar las velocidades y las alturas de la lámina de agua.

¹ Fuente: (Díaz Granados, 2009)

3.1.2.1 Métodos hidrológicos

Los métodos hidrológicos pueden partir de datos de caudales, aplicando análisis estadístico de los valores máximos, o de los datos de precipitación, mediante modelos hidrometeorológicos de transformación lluvia-escorrentía basados en fórmulas y métodos como el racional, hidrograma unitario, Precipitación Máxima Probable (PMP), onda cinemática entre otros (Instituto Geológico y Minero de España, 2008).

3.1.2.2 Métodos hidráulicos

Estos métodos parten de diferentes aproximaciones al flujo de agua en la naturaleza (unifásico, bifásico, unidimensional, bidimensional, tridimensional, permanente, no permanente), que simplifican las ecuaciones físicas que lo modelan, cuya resolución permite estimar parámetros tales como profundidad, velocidad y energía (Instituto Geológico y Minero de España, 2008).

3.2 TÉCNICAS DE MODELACIÓN HIDRÁULICA DE INUNDACIONES

La primera decisión que se debe tomar cuando se pretende desarrollar un modelo hidráulico de inundaciones es el tipo de modelo a utilizar, para lo cual existen diferentes tipos de modelos según la complejidad espacial de las ecuaciones que soluciona el mismo: unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales (1D, 2D, 3D).

Para la solución de dichos modelos existen diferentes programas computacionales, tanto de distribución gratuita como comerciales.

Luego de seleccionar el tipo de modelo y el programa computacional a utilizar, el modelador necesita decidir la esquematización del modelo (por ejemplo resolución y esquematización de las edificaciones y otras características tales como puentes, etc.) y los procesos tenidos en cuenta (afectación de los vientos, evaporación, etc.).

En la Tabla 3-2 se presentan una variedad de modelos disponibles para realizar la modelación de inundaciones. Dicha tabla presenta claramente cada una de las características que deben ser tenidas en cuenta para la selección apropiada de un modelo hidráulico en particular, tales como la escala del problema, los recursos computacionales disponibles y las necesidades del usuario.

Tal como se puede ver en la Tabla 3-2 los modelos hidráulicos para canales compuestos se dividen en clases de acuerdo a la dimensionalidad de los procesos representados y la adición u omisión de otros procesos del flujo.

MÉTODO	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN	EJEMPLO DE MODELOS	DATOS DE ENTRADA	DATOS DE SALIDA	TIEMPO COMPUTACIONAL (AÑO 2006)
0D	No es físicamente basado	Evalúa la extensión de la inundación y las profundidades de inundación	AgcGIS Delta mapper	MDE (DEM) Altura de lámina de agua aguas arriba Altura de lámina de agua aguas abajo	Extensión de la inundación y profundidad del agua a través de la intersección entre la lámina de agua y el MDE.	Segundos
1D	Soluciona las ecuaciones de Saint Venant 1D	Diseño a escala del modelo, la cual puede ser del orden de 10s a 100s de km dependiendo del tamaño de la cuenca	Mike 11 HEC-RAS SOBEK-CF Infoworks RS (ISIS)	Secciones transversales del cauce ppal y la llanura de inundación. Hidrogramas de caudal aguas arriba. Hidrógrafas de altura aguas abajo.	Profundidad del agua y velocidad media en cada sección transversal. Extensión de la inundación por la intersección de la profundidad del agua simulada con el MDE. Hidrograma de salida aguas abajo.	Minutos
1D+	Enfoque 1D+ con celdas de almacenamiento para la simulación del flujo en las llanuras de inundación	El diseño de la escala del modelo puede ser del orden de 10s a 100s de km dependiendo del tamaño de la cuenca, con potencial de aplicación en escalas mayores si se utilizan datos escasos de secciones transversales	Mike 11 HEC-RAS SOBEK-CF Infoworks RS (ISIS)	Igual a los modelos 1D	Igual a los modelos 1D	Minutos a horas
2D-	Ley de conservación de momentum 2D- para la llanura de inundación	Gran escala de modelación para inundaciones urbanas dependiendo de las dimensiones de las celdas	LISFLOOD-FP	MDE (DEM) Hidrogramas de caudal aguas arriba. Hidrógrafas de altura aguas abajo.	Extensión de la inundación y profundidad del agua. Hidrograma de caudal de salida aguas abajo.	Horas

Tabla 3-2 Descripción general de los tipos de modelos hidráulicos existente²

² Adaptada de (Flood Site, 2009)

MÉTODO	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN	EJEMPLO DE MODELOS	DATOS DE ENTRADA	DATOS DE SALIDA	TIEMPO COMPUTACIONAL (AÑO 2006)
2D NC	Soluciona las ecuaciones de onda poco profunda bidimensionales en la forma no conservativa	Diseño de la escala del modelo del orden de 10s km. Podría tener el potencial para ser usado en modelación de escalas amplias si se aplica con mallas secundarias. No es adecuado para simulaciones de modelos transcríticos y flujos de rompimiento de presas.	TUFLOW	MDE Hidrogramas de caudal aguas arriba. Hidrografas de altura aguas abajo.	Extensión de la inundación Profundidades Velocidades promedio en la vertical en cada nodo computacional Hidrograma de caudal de salida aguas abajo	Horas a días
2D C	Soluciona las ecuaciones de onda poco profunda bidimensionales en la forma conservativa	La misma que 2D NC más la capacidad de modelar exactamente flujos transcríticos, rompimiento de presas y flujos de transientes rápidos	Mike 21 TELEMAC SOBEK-OF Delft-FLS Infoworks	Igual que 2D NC	Igual que 2D NC	Horas a días
2D+	Solución 2D plus para las velocidades en la vertical usando sólo la ecuación de continuidad	Modelación de costas donde los perfiles de velocidad 3D son importantes. Ha sido también aplicado para modelación de ríos en proyectos de investigación	TELEMAC 3D Delft-3D	MDE Hidrogramas de caudal aguas arriba. Distribución de velocidades de entrada. Hidrografas de altura aguas abajo.	Extensión de la inundación Profundidades de la lámina de agua Velocidades u, v y w para cada celda computacional. Hidrograma de caudal de salida aguas abajo.	Días
3D	Solución 3D de las ecuaciones tridimensionales de Navier Stokes y Reynolds promedio	Predicciones tridimensionales de campos de velocidades en los cauces principales y llanuras de inundación	CFX FLUENT PHEONIX	MDE Hidrogramas de caudal aguas arriba. Distribución de velocidades de entrada y distribución de energía cinética turbulenta Hidrografas de altura aguas abajo.	Extensión de la inundación Profundidades de la lámina de agua Velocidades u, v y w, energía cinética turbulenta para cada celda computacional. Hidrograma de caudal de salida aguas abajo.	Días

Tabla 3-2 Descripción general de los tipos de modelos hidráulicos existentes (continuación)³.

³ Adaptada de (Flood Site, 2009).

3.3 MODELOS HIDRÁULICOS IMPLEMENTADOS

3.3.1 HEC-RAS 4.0 (Hydrologic Engineering Center-River Analysis System)

Este Programa desarrollado para Análisis de Ríos es un modelo numérico para flujo unidimensional permanente y no permanente, con transporte de sedimentos y con capacidad para trabajar con flujos mixtos subcrítico y supercrítico. Es un programa de la Nueva Generación desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers, USACE) para remplazar a los clásicos HEC-2, UNET y eventualmente HEC-6 también.

Puede modelar estructuras fluviales como diques, puentes y alcantarillas. La erosión local en pilares de puentes puede ser calculada mediante los procedimientos recomendados por la Administración Federal de Carreteras (Federal Highway Administration, FHWA) de Estados Unidos.

Sin embargo, sus principales limitaciones son asumir lecho rígido y flujo unidireccional, por lo que debe ser aplicado con cautela en ríos aluviales muy erosionables o muy meandriformes; en estos casos puede ser recomendable recurrir a otro tipo de modelo más sofisticado. Este programa está disponible en forma gratuita en la página web del USACE. (www.hec.usace.army.mil).

El modelo permite realizar análisis de flujo unidimensional permanente, no permanente, cálculos hidrodinámicos de lecho móvil y transporte de sedimentos.

HEC RAS resuelve las ecuaciones completas de Saint Venant para flujo no permanente unidimensional en canal abierto:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial \Phi Q}{\partial x_c} + \frac{\partial (1 - \Phi) Q}{\partial x_f} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_c} \left(\frac{\Phi^2 Q^2}{A_c} \right) + \frac{\partial}{\partial x_f} \left(\frac{(1 - \Phi)^2 Q^2}{A_f} \right) + g A_c \left(\frac{\partial z}{\partial x_c} + S_c \right) + g A_f \left(\frac{\partial z}{\partial x_f} + S_f \right) = 0 \quad (3.2)$$

Donde:

$$\Phi = \frac{K_c}{K_c + K_f} \quad (3.3); \quad K = \frac{A^{5/3}}{nP^{2/3}} \quad (3.4)$$

$$S_c = \frac{\Phi^2 Q^2 n_c^2}{R_c^{4/3} A_c^2} \quad (3.5); \quad S_f = \frac{(1 - \Phi)^2 Q^2 n_f^2}{R_f^{4/3} A_f^2} \quad (3.6)$$

Donde Q es el caudal total por el cauce, A (A_c, A_f) las secciones transversales del flujo (en el canal y la llanura de inundación), x_c y x_f son las distancias a lo largo del canal y la llanura de inundación (éstas pueden ser diferentes entre secciones transversales con el fin de representar la sinuosidad del canal), P es el perímetro mojado, R es el radio hidráulico (A/P), n es el valor del coeficiente de Maning y S es la pendiente de la línea de fricción. Φ como se reparte el flujo entre la llanura de inundación y el canal principal de acuerdo a los coeficientes de transporte K_c y K_f .

Con el fin de obtener la solución, todas estas ecuaciones son discretizadas usando el método de diferencias finitas y se resuelven usando el método implícito de los cuatro puntos.

Dentro de las bases teóricas para el cálculo de los perfiles de flujo unidimensionales, éstos son calculados de una sección transversal a la otra resolviendo la ecuación de energía mediante un procedimiento iterativo llamado el método del paso estándar.

$$Z_1 + Y_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + Y_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_e \quad (3.7)$$

Donde h_e es la pérdida de energía de una sección transversal a otra, la cual se calcula así:

$$h_e = L * \bar{S}_f + C \left| \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} - \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} \right| \quad (3.8)$$

Donde L es la longitud promedio ponderada del cauce; C es el coeficiente de expansión y contracción y $\bar{S}_f$ es la pendiente de la línea de fricción.

La longitud del cauce promedio se calcula por medio de:

$$L = \frac{L_{ob} * \bar{Q}_{ob} + L_{ch} * \bar{Q}_{ch} + L_{rob} * \bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{ob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}} \quad (3.9)$$

Donde L_{ob} , L_{ch} y L_{rob} son las longitudes entre secciones transversales en la llanura de inundación izquierda, canal principal y llanura de inundación derecha, respectivamente; $\bar{Q}_{ob}$, $\bar{Q}_{ch}$ y $\bar{Q}_{rob}$ es el promedio aritmético de los caudales entre secciones transversales para la llanura de inundación izquierda, canal principal y llanura de inundación derecha, respectivamente.

3.3.1.1 Integración de HEC-RAS con ArcGIS

Con el fin de lograr la integración de los resultados de HECRAS 4.0 con ARCGIS⁴, el HEC ha desarrollado una extensión para lograr llamada HEC-GeoRAS, la cual provee un conjunto de herramientas para el preprocesamiento de la información (elaboración del MDT), modelación y posprocesamiento de los resultados (generación del MDE de la lámina de agua) con el fin de generar los mapas de inundación.

En la Figura 3-3 se presenta el orden secuencial de los procedimientos desarrollados con el fin de elaborar el mapa de inundación. A continuación se describe de manera resumida cada una de las etapas⁵:

- Preprocesamiento: consiste en generar en ArcGIS el Modelo Digital del Terreno (MDT) del cauce principal y la llanura de inundación, así como definir los coeficientes de rugosidad de los mimos. De otro lado en HEC-RAS se define la

⁴ Conjunto de productos relacionado con los Sistemas de Información Geográfica producido y comercializado por la casa ESRI.

⁵ Para ampliar más información sobre el procedimiento detallado de cada una de las etapas el lector puede remitirse a HEC-GEORAS User's Manual, 2002. (http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/hec-georas_downloads.html)

- discretización computacional (número de secciones transversales), así como las condiciones de frontera y condiciones iniciales.
- Cálculo: consiste en realizar la modelación computacional, calibración, validación y análisis de escenarios.
- Posprocesamiento: esta etapa se realiza en ArcGIS, la cual consisten en elaborar los mapas de la inundación, velocidad del flujo y profundidad con el fin de realizar cualquier tipo de análisis espacial.

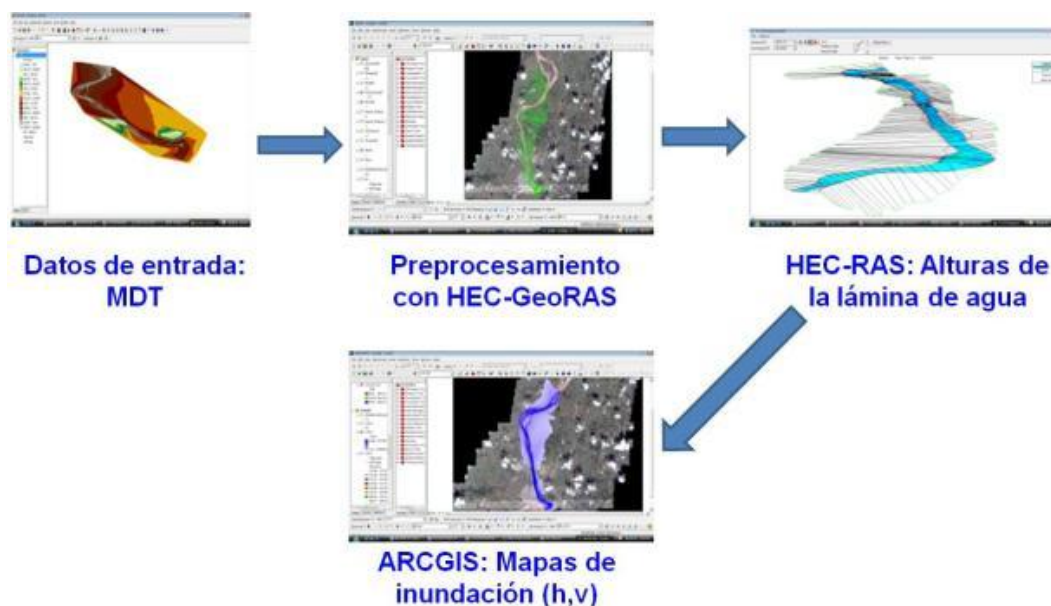


Figura 3-3 Preprocesamiento y posprocesamiento del modelo hidráulico HEC-RAS

3.3.2 River2D 0.95

3.3.2.1 Descripción

Es un modelo hidrodinámico bidimensional de elementos finitos (MEF) promediado en profundidad desarrollado por la Universidad de Alberta en Canadá (River2D User's Manual). Posee características únicas como su capacidad de representar flujo sub- y supercrítico. Algoritmos especiales de agua subterránea permiten una transición gradual entre agua superficial y subterránea en los bordes del río, que evitan quiebres bruscos en las fronteras. Emplea el MEF de Petrov-Galerkin que es numéricamente mucho más estable que el empleado por otros modelos.

El software consta de cuatro módulos complementarios, los cuales son R2D_Bed, R2D_Ice, R2D_Mesh y el River2D, siendo este último el modelo hidráulico propiamente dicho.

En la Figura 3-4 se muestra el esquema del funcionamiento de River2D. Cabe aclarar que la ejecución del programa se realiza de manera secuencial como se muestra en la figura mencionada.

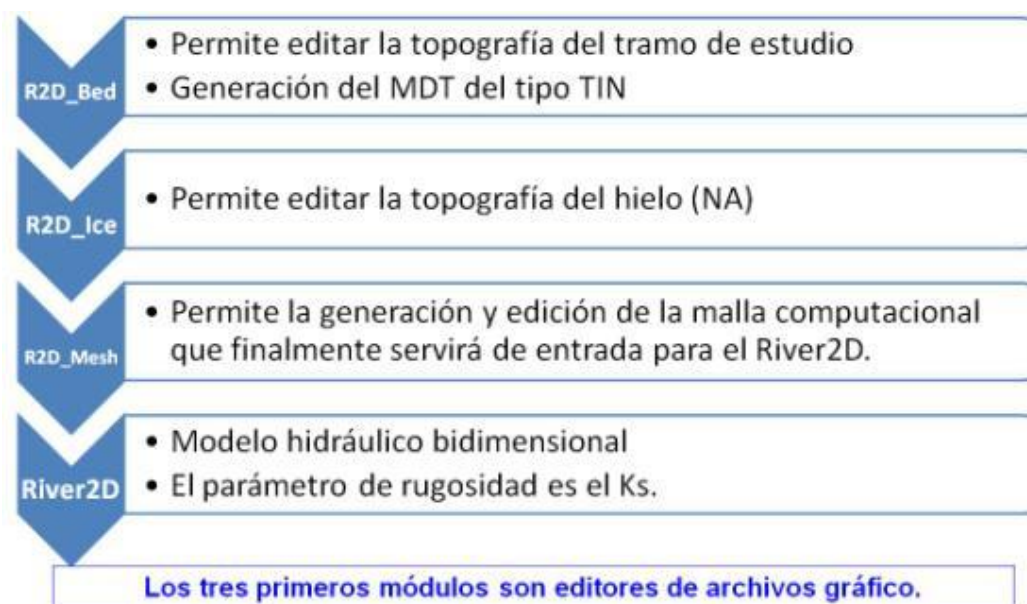


Figura 3-4 Estructura y funcionamiento de River2D⁶

Actualmente el autor de esta herramienta computacional realizó investigaciones para mejorar River2D e incorporó capacidades para transporte de sedimentos y modelación morfológica de ríos, como la migración de meandros. El programa se encuentra en www.river2d.ca y es de libre distribución.

Este modelo está basado en las ecuaciones de Saint-Venant expresadas en forma conservativa, las cuales son un sistema de tres ecuaciones: una de conservación de masa y dos para; componentes del vector de momentum. El modelo ha sido desarrollado para sistemas de ríos naturales con características especiales tales como modelación de transiciones del flujo de supercrítico a subcrítico, coberturas de hielo y área mojadas variables.

Adicionalmente a la solución hidrodinámica, River2D tiene un módulo de modelación con hielo y un módulo de hábitat de peces. El módulo de hielo modela el flujo bajo una cobertura de hielo con geometría conocida. Esto es importante porque el hielo afecta la hidráulica del flujo por el incremento de la magnitud del esfuerzo cortante en el flujo (Steffler & Blackburn, 2002). El módulo de hábitat de peces está basado en el concepto de Área Útil Ponderada (WUA por sus siglas en inglés), el cual es un concepto usado por la familia de modelos de hábitat de peces PHABSIM. El WUA es calculado de acuerdo a las condiciones de flujo (velocidad, profundidad y sustrato del canal) que las especies de peces prefieren.

Para la discretización espacial River2D usa una malla no estructurada flexible compuesta por elementos triangulares. Los métodos de elementos finitos usados en el modelo están basados en la formulación residual ponderada Streamline Upwind Petrov Galerkin (SUPG) (detalles numéricos del modelo se presentan en Ghannem et al. 1995). Mediante esta

⁶ Adaptada de River2D User's Manual (Steffler & Blackburn, 2002)

técnica, se asegura la estabilidad de la solución bajo todo el rango de condiciones de flujo, incluyendo subcrítico, supercrítico y transicional. Es así como se hace uso de una discretización conservativa completa, lo cual asegura que no se está perdiendo o ganando masa de fluido por encima del dominio modelado. Esto también permite la implementación de las condiciones de frontera como flujo naturales o condiciones forzadas.

Las ecuaciones resueltas por el modelo River2D son la ecuación de continuidad las ecuaciones de conservación de momentum en las direcciones x y y (Steffler and Blackburn 2002). Estas ecuaciones no tienen una solución analítica exacta, pero con condiciones iniciales y de frontera apropiadas pueden ser resueltas usando técnicas numéricas, con el fin de encontrar el caudal y la altura de la lámina de agua en el tiempo y en el espacio.

La ecuación de continuidad es:

$$\frac{\delta h}{\delta t} + \frac{\delta q_x}{\delta x} + \frac{\delta q_y}{\delta y} = 0 \quad (3.10)$$

La ecuación de momentum promediada en la vertical en la dirección x es:

$$\frac{\delta q_x}{\delta t} + \frac{\delta(uq_x)}{\delta x} + \frac{\delta(vq_x)}{\delta y} + \frac{g}{2} \frac{\delta h^2}{\delta x} = gh(S_{ox} - S_{fx}) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\delta(h\tau_{xx})}{\delta x} + \frac{\delta(h\tau_{xy})}{\delta y} \right) \quad (3.11)$$

La ecuación de momentum promediada en la vertical en la dirección y es:

$$\frac{\delta q_y}{\delta t} + \frac{\delta(uq_y)}{\delta x} + \frac{\delta(vq_y)}{\delta y} + \frac{g}{2} \frac{\delta h^2}{\delta y} = gh(S_{oy} - S_{fy}) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\delta(h\tau_{yx})}{\delta x} + \frac{\delta(h\tau_{yy})}{\delta y} \right) \quad (3.12)$$

Donde t = tiempo, h = profundidad del agua; (u,v) = velocidades promedio en las direcciones (x,y) ; $qx = uh$ = caudal en la dirección x por unidad de ancho; $qy = vh$ = caudal en la dirección y por unidad de ancho; (S_{ox}, S_{oy}) = pendiente del lecho en las direcciones (x,y) ; S_{fx} y S_{fy} = son las pendientes de la línea de energía en las respectivas direcciones; $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{yy}$ = componentes del esfuerzo cortante turbulento horizontal; ρ = densidad del agua; y g = aceleración de la gravedad.

Las suposiciones básicas en la ecuación dentro del modelo son (Steffler y Blackburn 2002):

- La distribución de presiones es hidrostática, lo cual limita la precisión en áreas de pendientes fuertes y cambios rápidos en las pendientes del fondo.
- Las velocidades horizontales son constantes en profundidad. No hay información disponible de flujos secundarios y recirculaciones.
- Las fuerzas de Coriolis y de viento son despreciables.

El término de pendiente de fricción depende del esfuerzo cortante de fondo, el cual se asume dependiente de la magnitud y dirección de la velocidad promedio en la vertical. Por ejemplo:

$$S_{fx} = \frac{\tau_{bx}}{\rho gh} = \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{ghC_*^2} u \quad (3.13)$$

Donde τ_{bx} es el esfuerzo cortante en la dirección x y C^* es el coeficiente adimensional de fricción de Chezy, el cual está relacionado a la rugosidad efectiva K_s a través de las siguientes expresiones:

$$C_* = 5.75 \log \left(12 \frac{h}{K_s} \right) ; \frac{h}{K_s} \geq \frac{e^2}{12} \quad (3.14)$$

$$C_* = 2.5 + \frac{30}{e^2} \left(\frac{h}{K_s} \right) ; \frac{h}{K_s} < \frac{e^2}{12} \quad (3.15)$$

Donde $e = 2.7184$; C^* está relacionado con el coeficiente C de Chezy a través de:

$$C_* = \frac{C}{\sqrt{g}} \quad (3.16)$$

El esfuerzo cortante turbulento promediado en la vertical es modelado con el modelo de vorticidad tipo Boussinesq. Por ejemplo:

$$\tau_{xy} = v_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (3.17)$$

Donde v_t coeficiente de vorticidad, el cual está compuesto por tres componentes: una constante, un término generado por el esfuerzo cortante del lecho, y un término generado por el esfuerzo cortante transversal

$$v_t = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \frac{h\sqrt{u^2 + v^2}}{C_*} + \varepsilon_3^2 h^2 \sqrt{2 \frac{\partial u}{\partial x} + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + 2 \frac{\partial v}{\partial y}} \quad (3.18)$$

El valor por defecto para el coeficiente ε_1 es 0. Este coeficiente puede ser usado para estabilizar la solución para flujos poco profundos donde el segundo término en la Ecuación 3.18 puede que no describa adecuadamente v_t en el flujo. Valores razonables para ε_1 pueden ser calculados evaluando el segundo término en la Ecuación 3.18 usando condiciones de flujo promedio (profundidad del flujo promedio y velocidades promedio) para el caso modelado. El valor por defecto para ε_2 es 0.5. Por analogía con los coeficientes de dispersión transversal en ríos, son razonables valores de 0.2 a 1.0. Como la mayoría de la turbulencia en los ríos es generada por esfuerzo cortante de fondo, este término es usualmente el más importante. En flujos de lagos profundos, o en flujos con gradientes de salida de velocidad transversal muy altos, el esfuerzo transversal puede ser el mecanismo de generación de turbulencia dominante. Regiones de recirculaciones fuertes son ejemplos importantes. En este caso, el tercer término, ε_3 , llega a ser importante. Es esencial un modelo de longitud de mezcla 2D (horizontal). La longitud de mezcla es asumida proporcional a la profundidad del flujo. Un valor típico de ε_1 es 0.1, pero este puede ser ajustado por calibración.

En la presente aplicación, se asume que la turbulencia es generada por el lecho, los valores por defecto del modelo que fueron adoptados son $\varepsilon_1 = 0$, $\varepsilon_2 = 0.5$ y $\varepsilon_3 = 0$.

4 METODOLOGÍA

Se pretende analizar desde el punto de vista hidráulico un evento de inundación, motivo por el cual se procede a plantear una metodología que parte de la premisa de no contar con información detallada de los eventos de inundaciones pasadas, tales como fotografías satelitales o aéreas georreferenciadas que muestren claramente la huella de inundación del evento particular.

Dado lo anterior y basado en las metodologías presentadas en numerales anteriores, se hizo uso de los registros históricos, gráficos y levantamiento de información en campo con el fin de obtener una aproximación de la huella de inundación del evento particular a modelar, para comparar espacial e hidráulicamente los resultados obtenidos por los modelos a utilizar.

Dado lo anterior se presenta en la Figura 4-1 un mapa conceptual de la información necesaria para el análisis de un evento de inundación.

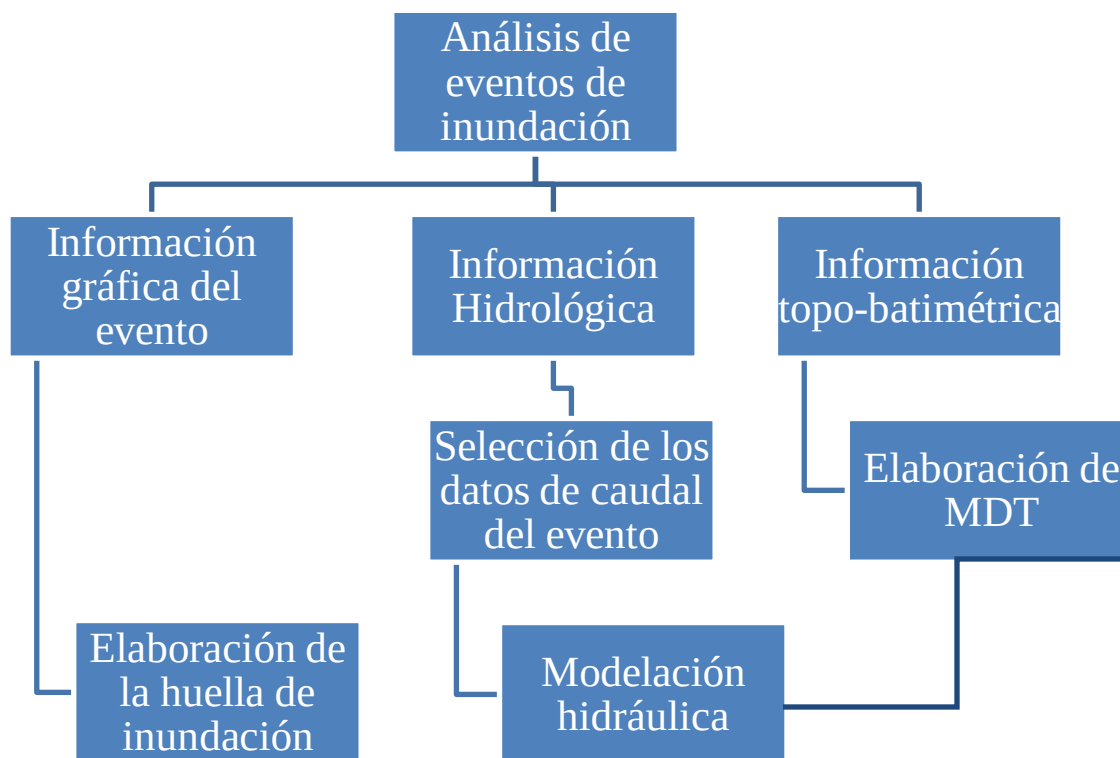


Figura 4-1 Mapa sinóptico de la información necesaria para la elaboración del análisis de inundaciones

Con el fin de lograr la mejor representación del evento de inundación se define la metodología, la cual consiste en realizar el análisis con los dos modelos hidráulicos (unidimensional y bidimensional) y comparar los resultados entre sí y con la huella de inundación reconstruida, tal como se esquematiza en el diagrama de flujo mostrado en la Figura 4-2.

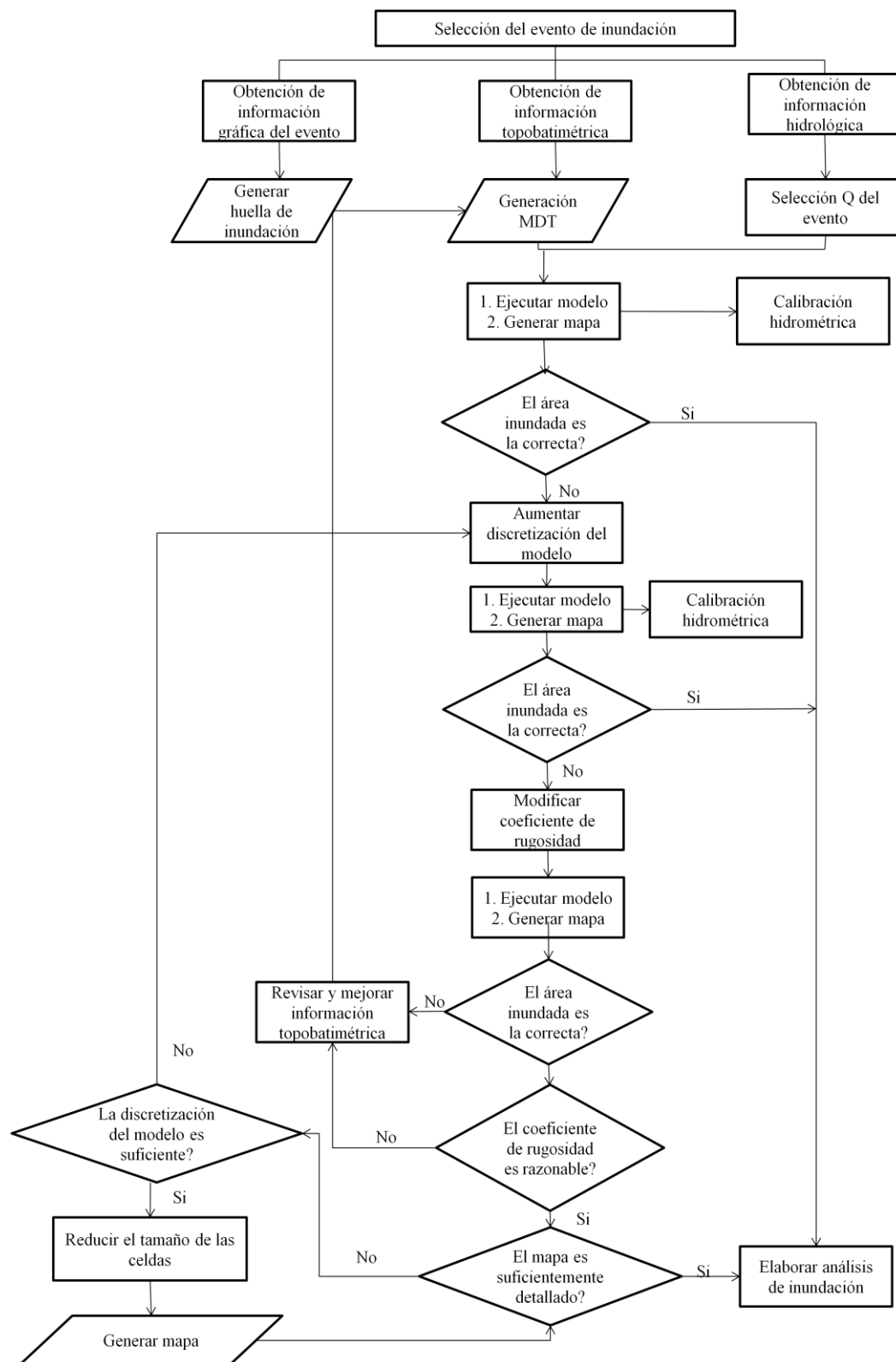


Figura 4-2 Diagrama de flujo de la aproximación metodológica propuesta

5 CASO DE ESTUDIO E INFORMACIÓN DISPONIBLE

Como caso de estudio se seleccionó el Río Magdalena a su paso por los municipios de Puerto Salgar y la Dorada. Debido al régimen bimodal de lluvias en Colombia, el río aumenta su caudal en las épocas de mayo-abril y octubre-noviembre, generando inundaciones en algunos de los barrios de la zona urbana y el anegamiento de cultivos y potreros, lo cual causa pérdida de vidas humanas, animales y por supuesto económicas.

Otra característica a tener en cuenta en la selección del caso de estudio fue la morfología del río, ya que era necesario un tramo con alineamiento con curvas pronunciadas y formaciones que dividieran el flujo en el cauce principal, con el fin de comparar los resultados obtenidos con los modelos unidimensional y bidimensional.

5.1 CARACTERÍSTICAS DEL TRAMO DE ESTUDIO

Este tramo se caracteriza por presentar curvas pronunciadas y algunos islotes en su cauce (Ver Figura 5-1), razón por la cual las características del flujo en el cauce y en la llanura de inundación son de comportamiento bidimensional.

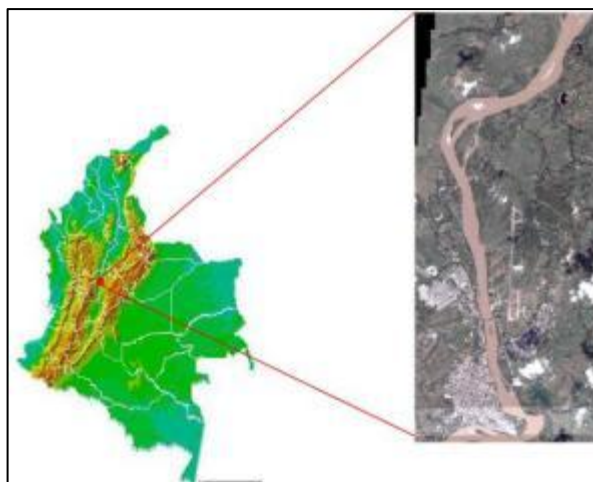


Figura 5-1 Localización general del tramo de estudio

En la Tabla 5-1 se resumen las características más importantes del tramo de estudio.

LONGITUD TRAMO	CAUDAL MEDIO	TIPO DE ESTACIÓN
14784.23 m	1434 m ³ /s	LG Automática

Tabla 5-1 Principales características del tramo de estudio

Este tramo está caracterizado por presentar un importante control hidráulico en su inicio, el cual es una estructura rocosa llamada el Peñón de la Dorada. Esta estructura genera la comúnmente conocida vuelta del Conejo, causante de las inundaciones del municipio de La

Dorada, debido al remanso del flujo causado por un quiebre de aproximadamente noventa grados que realiza el río en este punto (Ver Figura 5-2).

Es importante recalcar que este punto es el que presenta el mayor comportamiento bidimensional del tramo de estudio.

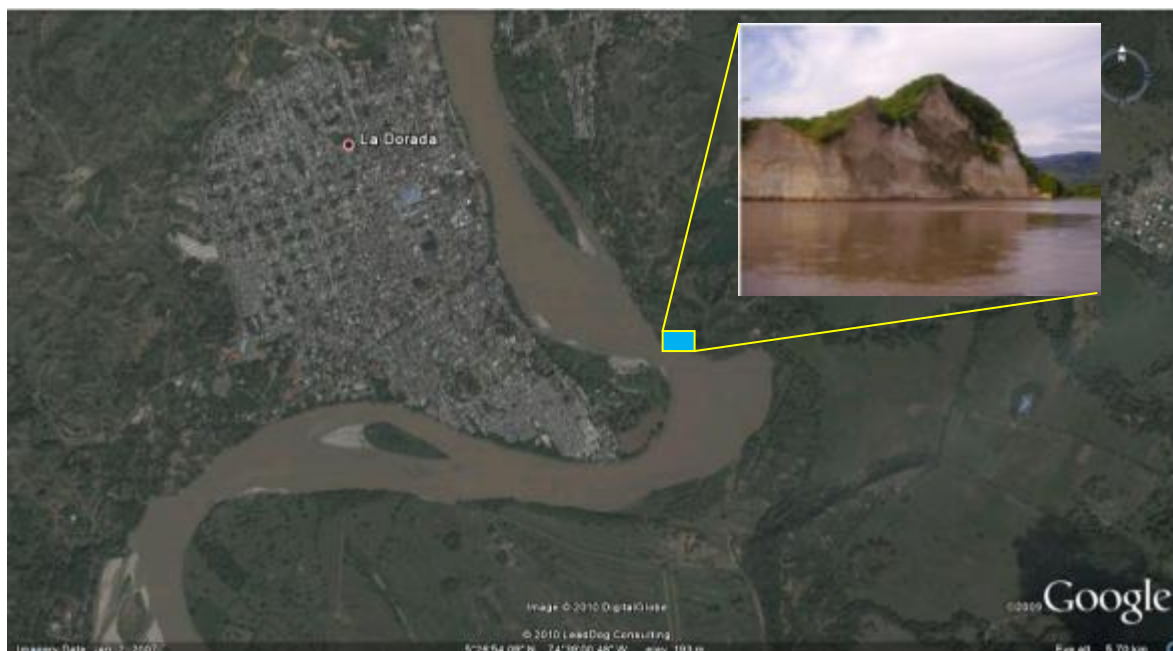


Figura 5-2 Control hidráulico-vuelta del Conejo

5.2 INFORMACIÓN DISPONIBLE

Dado que el Río Magdalena es monitoreado por entidades estatales como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y la Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena (CORMAGDALENA), se procedió a obtener a través de estas entidades la información necesaria para aplicar la metodología al caso de estudio. Adicionalmente se realizó una recopilación de información sobre las inundaciones históricas ocurridas en el río, obteniendo de esta manera algunas fotografías que sirvieron de base para la validación de los resultados obtenidos a través de la modelación.

5.2.1 Fotografía satelital del tramo de estudio

Uno de los aspectos importantes en el análisis de amenaza por inundación es presentar las zonas inundadas lo más detalladamente posible, para lo cual es de vital importancia contar con una referencia gráfica debidamente georreferenciada, ya sea un plano del área de estudio donde se ubiquen los núcleos urbanos o lugares de interés y/o una fotografía satelital o aérea de alta resolución. Es por tanto que para el caso de estudio se obtuvo una fotografía satelital de la empresa Digital Globe debidamente georreferenciada y con una resolución de 1.0 m (Ver Figura 5-3). Dado que la fotografía se encontraba en coordenadas

geográficas, ésta tuvo que ser reproyectada a coordenadas planas al sistema de referencia nacional con origen Bogotá.

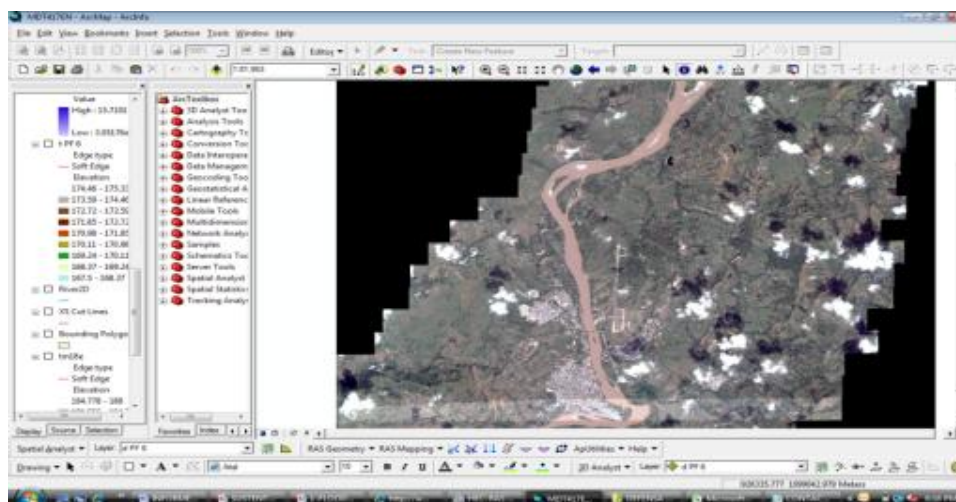


Figura 5-3 Imagen satelital del tramo de estudio

5.2.2 Información topo-batimétrica

La información topobatimétrica fue suministrada por el IDEAM, y fue obtenida en trabajos de campo realizados en el mes de octubre de 2008. Dicha información consiste en 14 secciones transversales separadas cada 1.0 km, las cuales tienen su punto de inicio en la vuelta del Conejo.

Tal como se muestra en la Figura 5-4, estas secciones incluyeron levantamientos batimétricos y levantamiento topográfico de las llanuras de inundación, lo anterior incluye la sección transversal de la estación limnigráfica de Puerto Salgar, para la cual se obtuvo la cota cero de la mira, la cual es de 165.92 m.s.n.m., es decir, el punto que se toma como base para medir la profundidad del río en esta sección transversal.

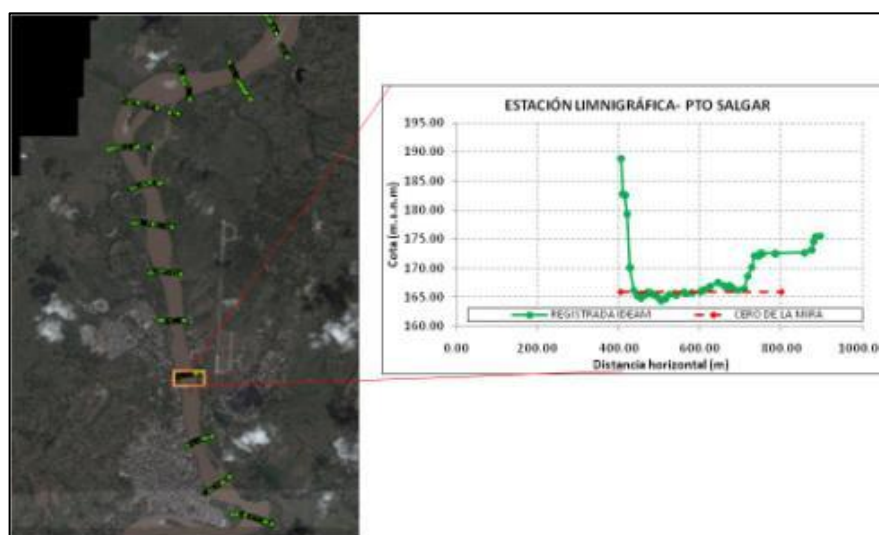


Figura 5-4 Información topobatimétrica del tamo de estudio

5.2.3 Información hidrológica

Para obtener la información hidrológica de la zona de estudio, se recurrió al IDEAM, el cual cuenta con estaciones de tipo limnimétrico y limnigráfico distribuidas a lo largo del Río Magdalena.

En la población de Puerto Salgar el IDEAM actualmente cuenta con una estación de tipo limnigráfica automática (Ver Figura 5-5), la cual registra cada hora el nivel del Río Magdalena, y esta información es enviada en tiempo real a las oficinas del IDEAM en Bogotá.



Figura 5-5 Estación limnigráfica de puerto salgar

Una consideración a tener en cuenta es que tal como puede apreciarse en la Figura 5-5 esta estación se anega en condiciones de inundación.

En la Tabla 5-2 se presentan las principales características de la estación limnigráfica de Puerto Salgar. Cabe resaltar que el Río Magdalena es monitoreado por dicha estación desde el año 1937, aunque los registros de niveles del río sólo se tienen desde el año 1960.

Código	Tipo de estación	Latitud (m)	Longitud (m)	Registro de Niveles (cm)	Registro de caudal líquido QL (m^3/s)
2303701	LG AUTOMATICA	935,087.00	1,095,978.00	De 1960 a 2008	De 1937 a 2008

Tabla 5-2 Características estación limnigráfica de Puerto Salgar

5.2.4 Registro de caudales y curva de calibración

Dadas las características de la estación, se puede contar con información histórica de niveles y caudales del río desde el año 1937, pero cabe aclarar que durante todo su tiempo de operación no ha sido de tipo automática, por tanto no se cuenta con datos continuos desde esta fecha.

Tal como puede apreciarse en la Figura 5-6 la información suministrada por el IDEAM consiste en registros de niveles medios diarios y caudales medios diarios desde el año 1937, aunque, esta información presenta períodos sin registro de caudales y niveles. Como puede apreciarse en dicha gráfica se puede identificar los caudales máximos y mínimos registrados, lo cual facilita la selección del evento de inundación a modelar.

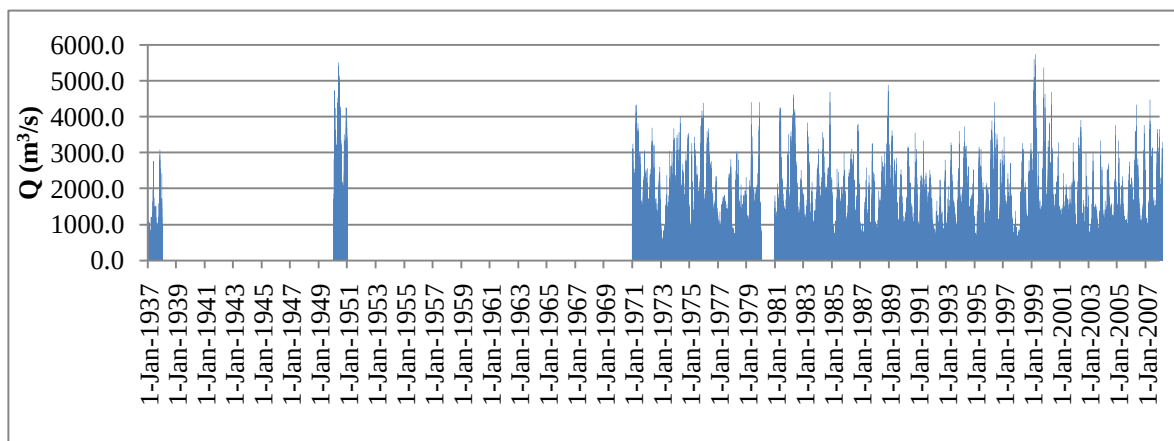


Figura 5-6 Información hidrológica de la estación limnigráfica de Puerto Salgar

Adicionalmente a la información de niveles y caudales, el IDEAM suministró la curva de calibración de la estación, la cual consiste en una curva que relaciona el nivel del Río Magdalena con el caudal que pasa por dicha estación. Así también fue suministrada la cota del cero de la mira respecto al cual se registran los niveles, los cuales sumados a esta cota dan como resultado la cota de la lámina de agua para cada caudal que pase por la estación.

De esta manera, esta información puede ser utilizada para la calibración y validación de los resultados obtenidos por cada uno de los modelos, ya que estos pueden calcular la altura de la lámina de agua en cualquier punto del espacio computacional seleccionado.

Dado lo anterior, en la Figura 5-7 se presenta la sección transversal de la estación limnigráfica de Puerto Salgar, en donde se grafica la cota cero de la mira, la cual tiene un valor de **165.92 m.s.n.m.**

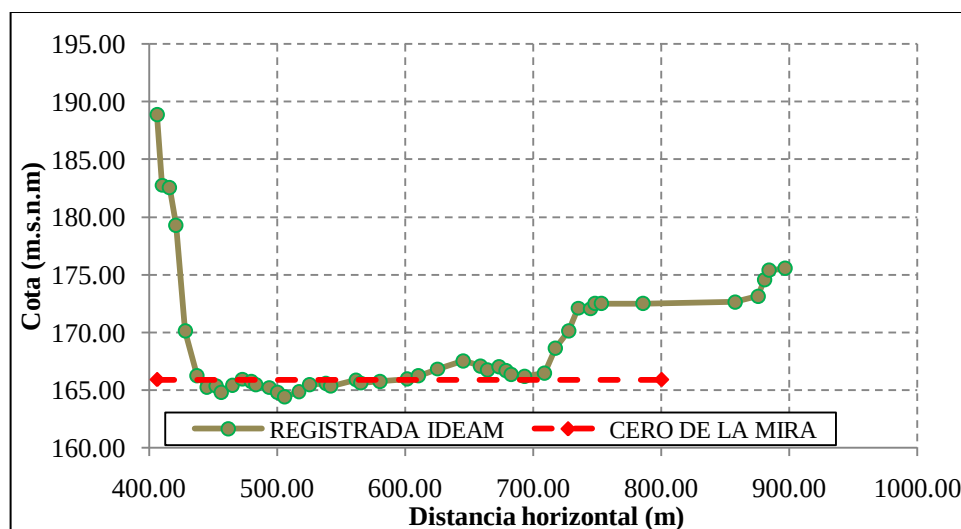


Figura 5-7 Sección transversal de la estación limnigráfica de Puerto Salgar

En la Figura 5-8 se presenta la curva de calibración de la estación limnigráfica de Puerto Salgar, con su respectiva ecuación. Cabe resaltar que al revisar los datos de aforos líquidos

disponibles (Ver Tabla 5-3), se observa que esta ecuación fue desarrollada a partir de valores de caudales por debajo de **3962 m³/s**, lo cual indica que la curva de calibración ha sido extrapolada para caudales por encima de este. Lo anterior puede llevar a inconsistencias en el momento de modelar una inundación producida por un caudal superior a de **3962 m³/s**.

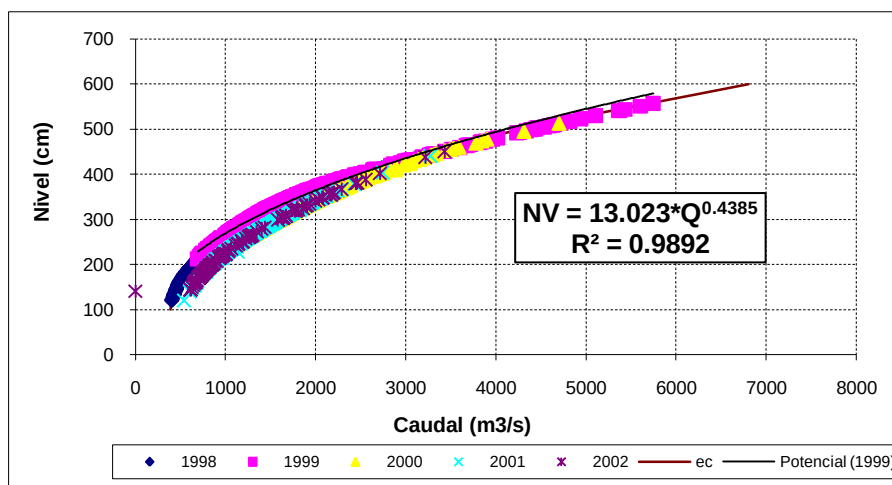


Figura 5-8 Curva de calibración estación limnigráfica de Puerto Salgar

FECHA	Nivel medio	Caudal
mm/dd/aaaa	(cms)	(m ³ /s)
2/15/1998	213	694.477
4/3/1998	367	1,915.430
4/22/1998	358	1,856.107
6/20/1998	304	1,327.211
9/30/1998	255	945.233
11/21/1998	386	2,237.634
3/29/2000	481	3,962.211
6/3/2000	397	2,630.507
9/21/2000	258	1,258.220
12/8/2000	244	1,066.175
9/23/2001	226	800.135
4/24/2002	314	1,489.445
4/24/2002	314	1,489.445
3/27/2003	281	1,133.977
10/2/2003	260	986.437
10/4/2003	222	758.769
10/5/2003	220	700.071
10/12/2003	288	1,253.538

Tabla 5-3 Datos recientes de aforos líquidos

5.2.5 Información gráfica de eventos de inundación

Dado que actualmente una de las metas más importantes en la modelación de una inundación es que el modelo represente muy bien la extensión de ésta, es decir, que anegue los terrenos que en la realidad son inundados por las crecientes asociadas, es primordial obtener información, en lo posible georreferenciada y muy detallada, del evento de inundación a modelar.

Es así como se procedió a obtener a través de diferentes entidades, tales como la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) y la Defensa Civil Colombiana, imágenes en lo posible aéreas que permitieran identificar las zonas anegadas por la inundación.

Por tanto se obtuvieron registros fotográficos aéreos y terrestres de los eventos de inundación más recientes, tal como se puede observar en la Figura 5-9, en donde se presenta un sector del aeropuerto parcialmente inundado (izquierda) y un sector rural ubicado al norte de la cabecera municipal completamente inundado (derecha).



Figura 5-9 Fotografías de los eventos de inundación

Adicionalmente se realizó una visita de campo con el director de la Defensa Civil de Puerto Salgar (Ver Figura 5-10) con el fin de complementar la información gráfica obtenida. Para ello el director de la Defensa Civil indicó los sitios inundados en la creciente de noviembre de 2008, una de las más grandes de las que se tenga información. Dichos sitios fueron georreferenciados con el fin de poderlos ubicar sobre la imagen satelital.



Figura 5-10 Recolección de información adicional en campo

6 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

En este numeral se describen detalladamente los procedimientos llevados a cabo para la implementación de la aproximación metodológica expuesta anteriormente. Inicialmente se realiza la descripción de la elaboración del MDT y su utilización como información básica de entrada para la confección de los modelos hidráulicos.

6.1 ELABORACIÓN DEL MODELO DIGITAL DEL TERRENO

Tal como se describió anteriormente para la elaboración del MDT, se contó con la siguiente información:

- 14 secciones transversales del cauce principal, levantadas conservando un espaciamiento de 1.0 Km aproximadamente.
- Información topográfica de la llanura de inundación que complementa las secciones transversales anteriores.
- Modelo digital del terreno en formato raster con resolución de 30 m, el cual complementa la información faltante en el espacio entre las secciones transversales.

Dado lo anterior, se procedió a generar curvas de nivel espaciadas verticalmente cada 1.0 m a partir de los puntos tomados en las secciones transversales, mediante triangulación con el software Microstation V8. Debido al espaciamiento entre las secciones transversales se obtuvieron curvas de nivel que no representaban adecuadamente la topografía del cauce principal y la llanura de inundación, tal como se ilustra en la Figura 6-1.

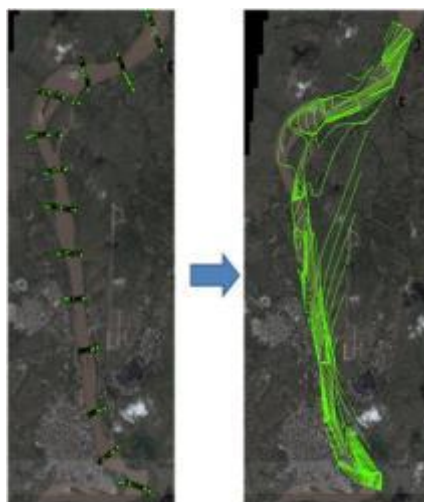


Figura 6-1 Elaboración de curvas de nivel

Por esta razón, las curvas se corrigieron manualmente con el software ARCGIS, usando como base la imagen satelital y el MDT en formato raster de 35 m, cuyo resultado se presenta en la Figura 6-2.

Con las curvas de nivel corregidas se procedió a la generación del Modelo Digital del Terreno (MDT) del tipo Triangulate Irregular Network (TIN). En dicho modelo se puede diferenciar claramente el cauce principal, la llanura de inundación y los controles hidráulicos presentes en el tramo de estudio, tales como los islotes al interior del cauce principal y la llamada peña de Bucamba, la cual es una estructura rocosa que genera la popularmente conocida Vuelta del Conejo (Ver Figura 6-3 y Figura 6-3).

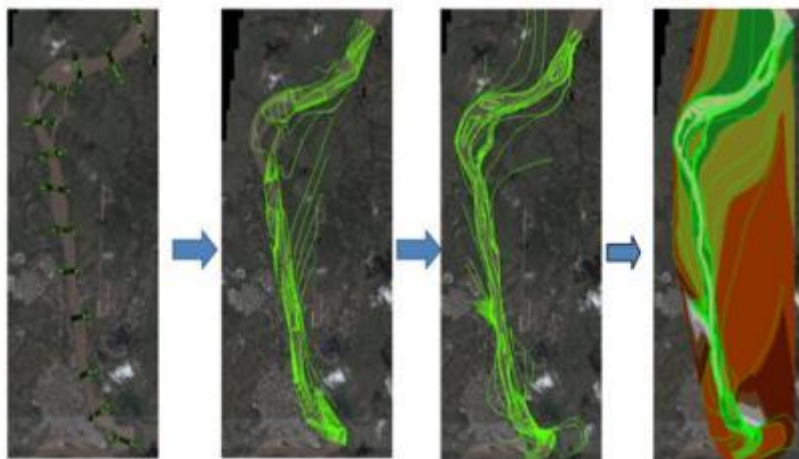


Figura 6-2 Procedimiento de elaboración del modelo digital del terreno

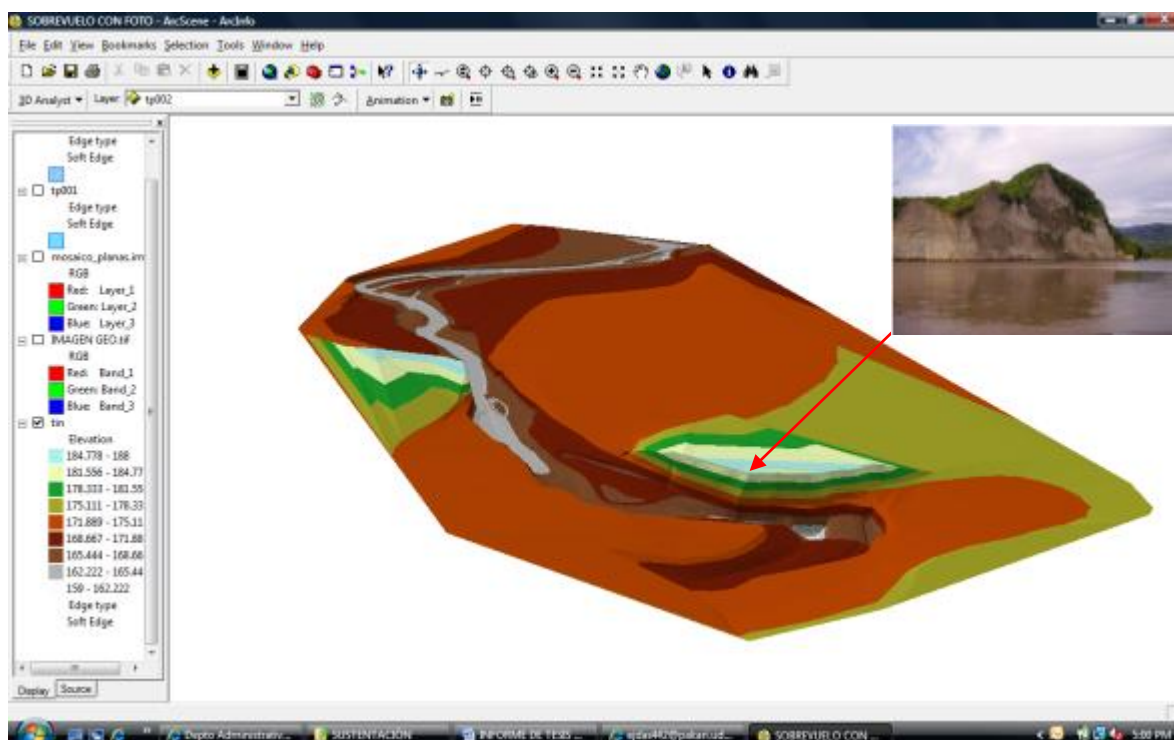


Figura 6-3 Modelo digital del terreno del tramo de estudio.

Con el MDT así obtenido, se procedió a superponer la imagen satelital con el software ARCGIS 9.3 (Ver Figura 6-4), de tal manera que se pudo observar la topografía del tramo

de estudio para detectar errores significativos en el MDT con la validación de la información visual obtenida en campo y la comparación de secciones transversales medidas en campo y generadas con el MDT.

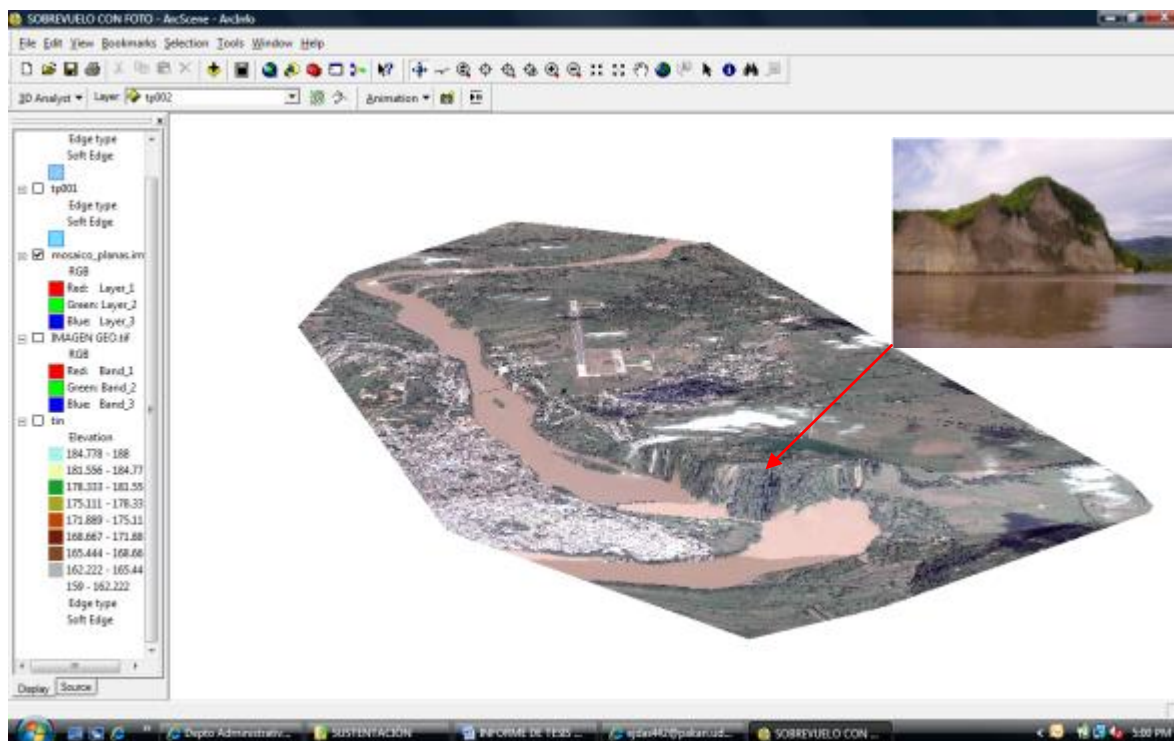


Figura 6-4 MDT con imagen sobrepuesta.

Como se planteó anteriormente, se procedió a realizar la validación del MDT, mediante la comparación de las secciones transversales registradas y modeladas, tal como se puede apreciar en la Figura 6-5, en donde se presenta la sección transversal de la estación limnigráfica generada a partir del MDT y la registrada con los levantamientos topobatimétricos del tramo de estudio.

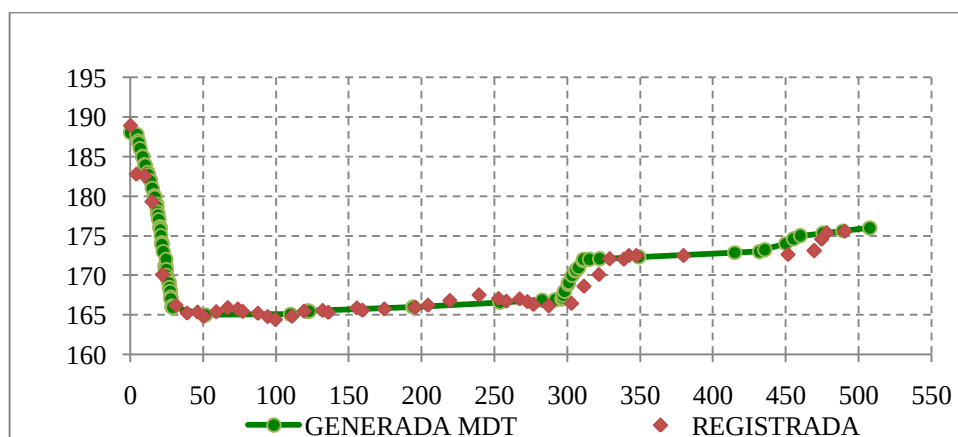


Figura 6-5 Comparación de secciones transversales generadas y registradas

6.2 SELECCIÓN DEL EVENTO DE INUNDACIÓN A MODELAR

Dado que se disponían de registros de caudales medios diarios para el año 2008, año en el cual, según los pobladores de la zona y las entidades encargadas de la atención de desastres, ha sido en el que se presentó la mayor inundación de los últimos tiempos en el río Magdalena, se decidió tomar el evento de inundación de noviembre de 2008, el cual registró un caudal pico de $5848 \text{ m}^3/\text{s}$, tal como se puede apreciar en la Figura 6-6.

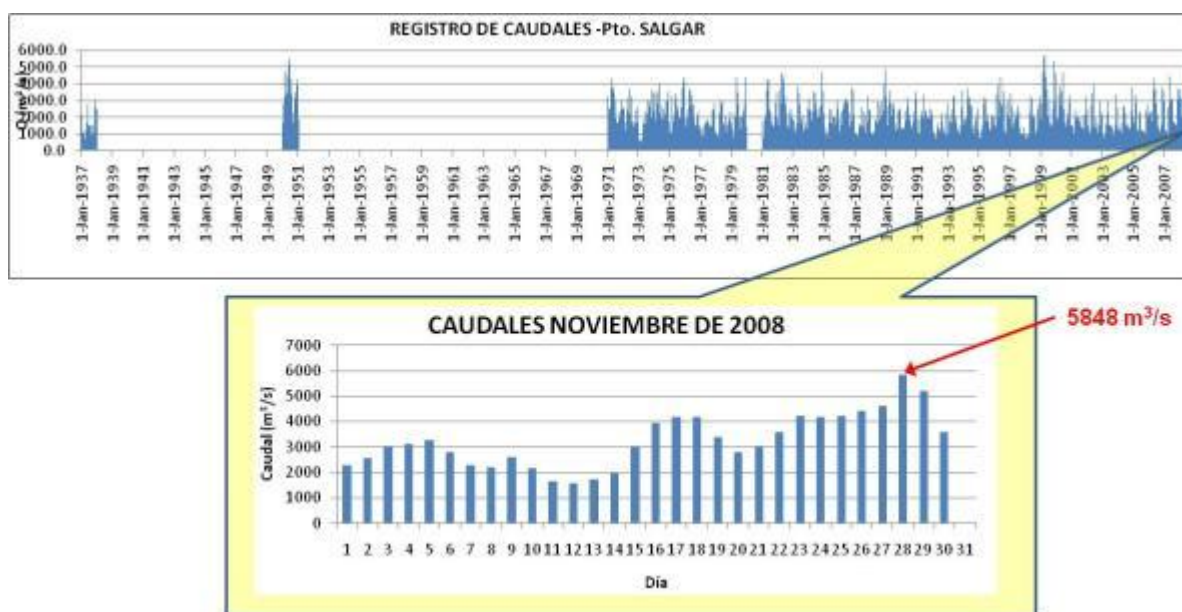


Figura 6-6 Selección del evento de inundación

6.3 RECONSTRUCCIÓN DE LA HUELLA DE INUNDACIÓN A MODELAR

Luego de seleccionar el evento hidrológico de la inundación se procedió a obtener para dicho evento la huella de inundación a partir de los registros gráficos y basado en las últimas actualizaciones de los POT, los cuales contemplan dentro de la demarcación de las zonas de alto riesgo por inundación, los barrios que comúnmente se han visto afectados por las mismas en los últimos años.

Con la ayuda del jefe de la defensa Civil de Puerto Salgar se trazó sobre la fotografía satelital la huella de inundación de noviembre de 2008 (Ver Figura 6-7).



Figura 6-7 Trazado de la huella de inundación

Con el fin de verificar y complementar la información aportada por la Defensa Civil se hizo uso del software Google Earth (Ver Figura 6-8), para referenciar sobre la fotografía satelital el evento de inundación. En dicha figura se puede apreciar un sitio inundado observado en Google Earth (Izquierda) y el registrado por la Fuerza Aérea Colombiana, de tal manera que es posible delimitar las zonas verdaderamente inundadas sobre la fotografía satelital.

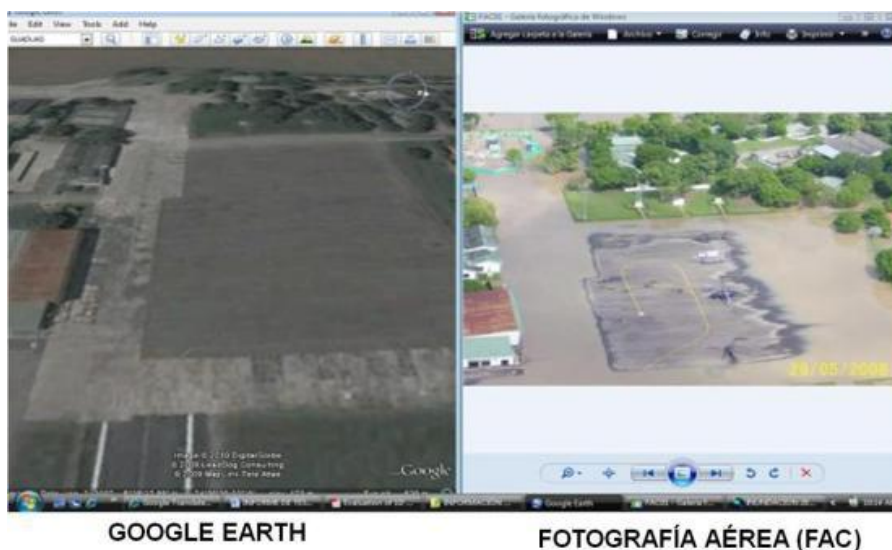


Figura 6-8 Georeferenciación de registros fotográficos

Esta información gráfica fue referenciada en la imagen satelital con el fin de obtener la mejor aproximación de la huella de inundación del evento. Esto se realizó con ArcGIS, logrando georeferenciar la huella de inundación, con el fin de hacer la posterior comparación entre lo modelado y lo registrado (Ver Figura 6-9).



Figura 6-9 Georeferenciación de los registros fotográficos sobre la imagen satelital

Luego de ejecutar todo el procedimiento descrito anteriormente se obtuvo la huella de inundación tal como se muestra en la Figura 6-10.

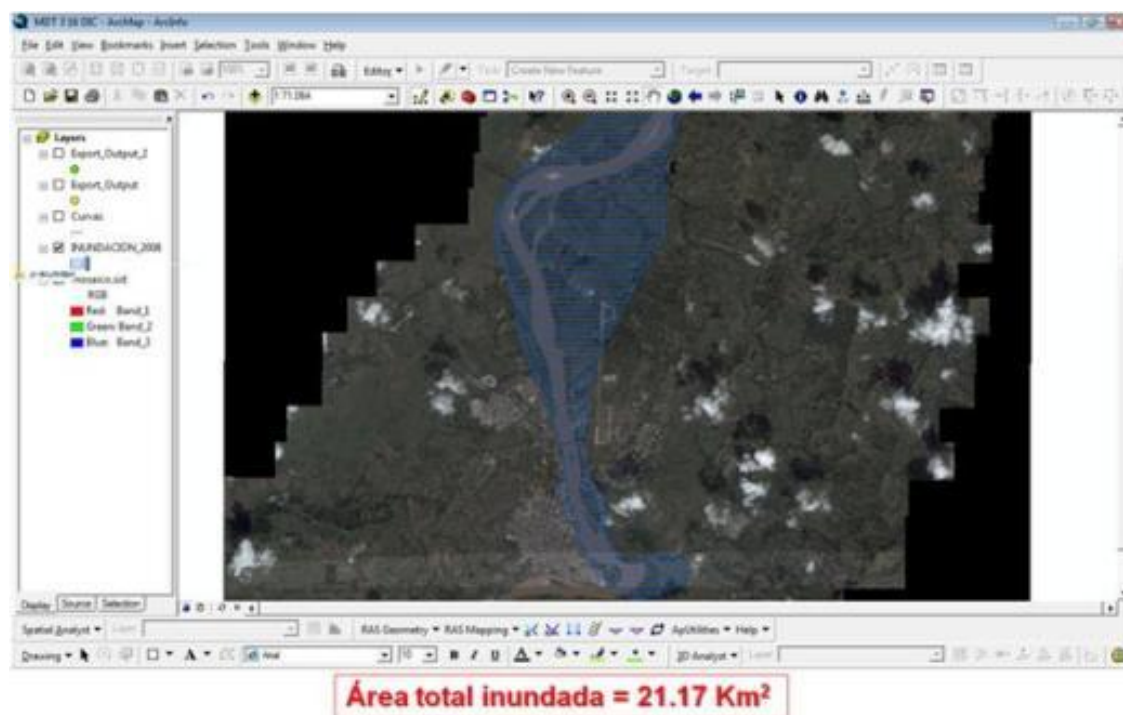


Figura 6-10 Huella de inundación reconstruida

7 IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS

En la implementación de los modelos hidráulicos se pretende dar respuesta a las siguientes preguntas: ¿Un modelo bidimensional produce los mismos resultados que un modelo unidimensional?. Si no es así ¿se pueden explicar las diferencias?. Dado lo anterior en este numeral se describe detalladamente la implementación de los dos modelos hidráulicos para ser evaluados bajo las mismas condiciones.

7.1 IMPLEMENTACIÓN MODELO HIDRÁULICO UNIDIMENSIONAL HEC RAS

En este numeral se hace una breve explicación de la implementación del modelo hidráulico HEC RAS sin dar mayores detalles de la obtención de la información mediante el módulo HEC GeoRAS, el cual se describe detalladamente en su respectivo manual.

El modelo hidráulico HEC-RAS es un modelo de tipo unidimensional y posee una extensión para su integración con ArcGIS llamada HEC-GeoRAS, la cual extrae toda la información geométrica necesaria para la elaboración del modelo hidráulico en la etapa de preprocesamiento, y posteriormente importa los resultados de HEC-RAS en ARCGIS con el fin de elaborar mapas de las distintas variables involucradas dentro del análisis de inundaciones tales como la altura de la lámina de agua y la velocidad.

En la Figura 7-1 se puede apreciar el diagrama de flujo del proceso completo de elaboración del mapa de inundaciones.

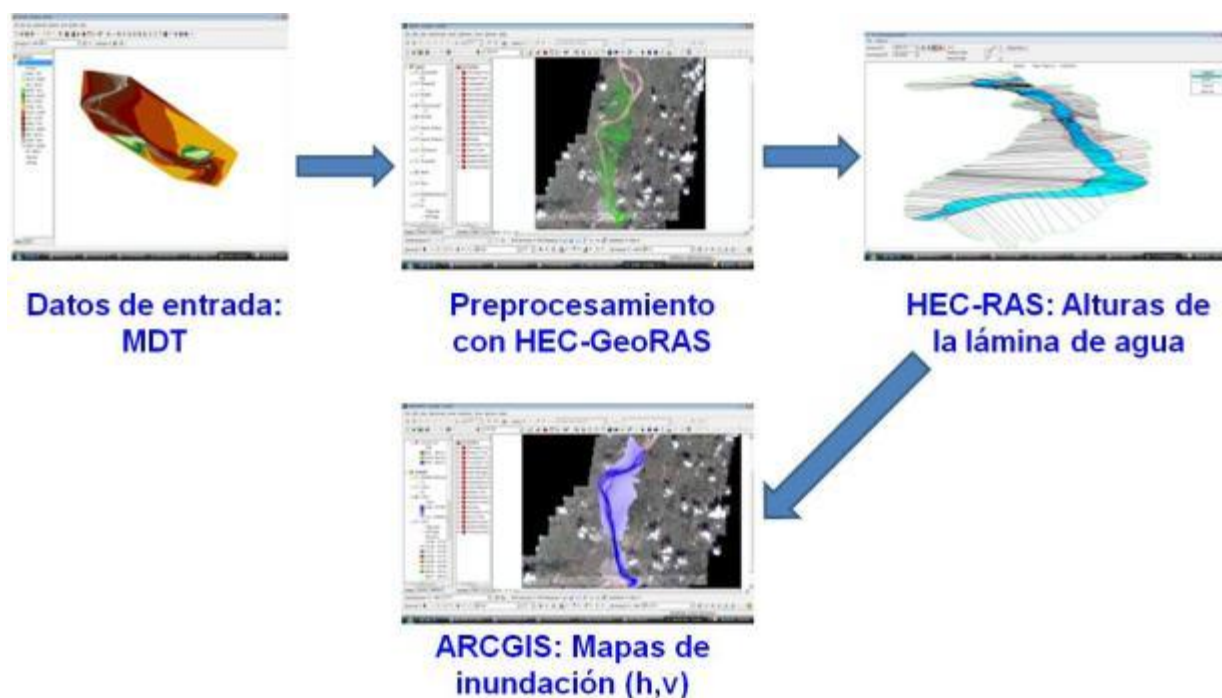


Figura 7-1 Preprocesamiento y posprocesamiento del modelo hidráulico hec-ras

7.1.1 Preprocesamiento en HEC-RAS

El proceso para el preprocesamiento del modelo hidráulico en HEC-RAS consistió en trazar sobre el MDT todas las características necesarias para la ejecución del modelo, las cuales se describen a continuación.

En la Figura 7-2 se presenta de manera secuencial la obtención de la información geométrica en HEC-GeoRAS, tal como la línea central del flujo, las riberas del río, las secciones transversales y otras características adicionales como puentes y obstrucciones al flujo como viviendas.

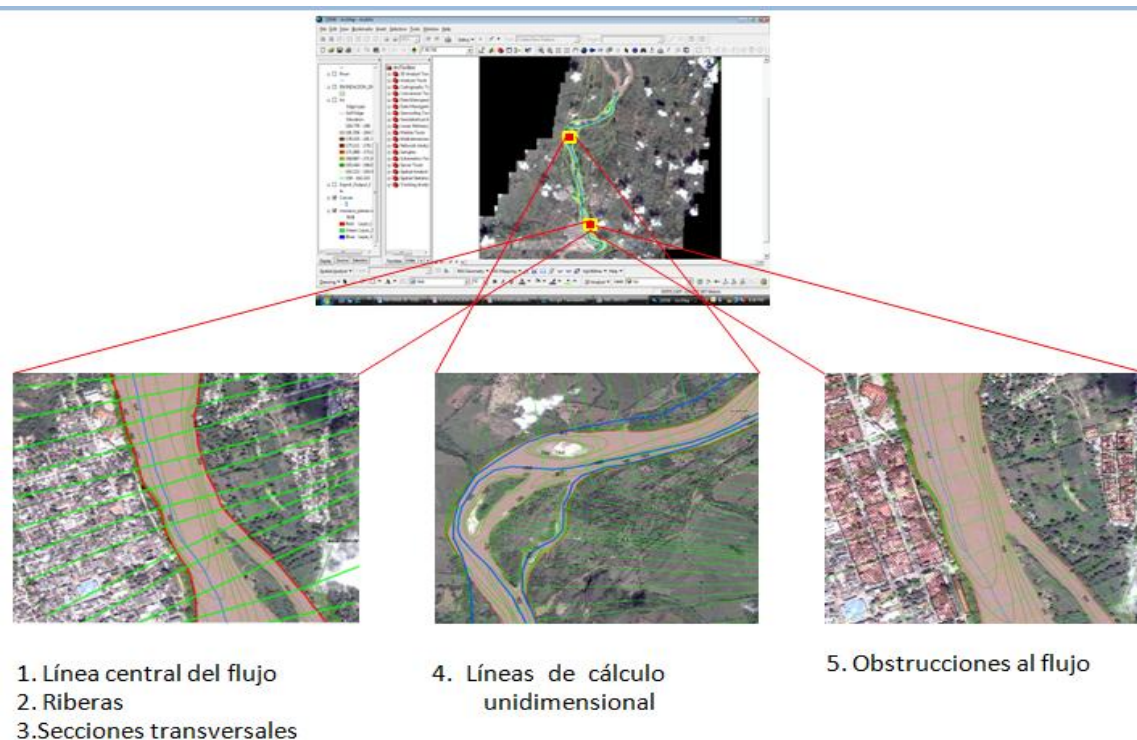


Figura 7-2 Preprocesamiento de la información con HEC-GeoRAS

Luego de realizar el trazado de cada uno de los parámetros en ARCGIS estos se exportan al modelo hidráulico HEC-RAS para realizar el proceso de modelación y calibración.

7.1.2 Modelación en HEC-RAS

Con la barra de herramientas de HEC GeoRAS se realiza la exportación desde ARCGIS al modelo hidráulico HEC-RAS y se complementa la información necesaria para hacer la simulación, la cual comprende caudales y rugosidades del cauce principal y llanuras de inundación, obteniéndose como resultado un modelo como el mostrado en la Figura 7-3, el cual corresponde al modelo de 111 secciones transversales.

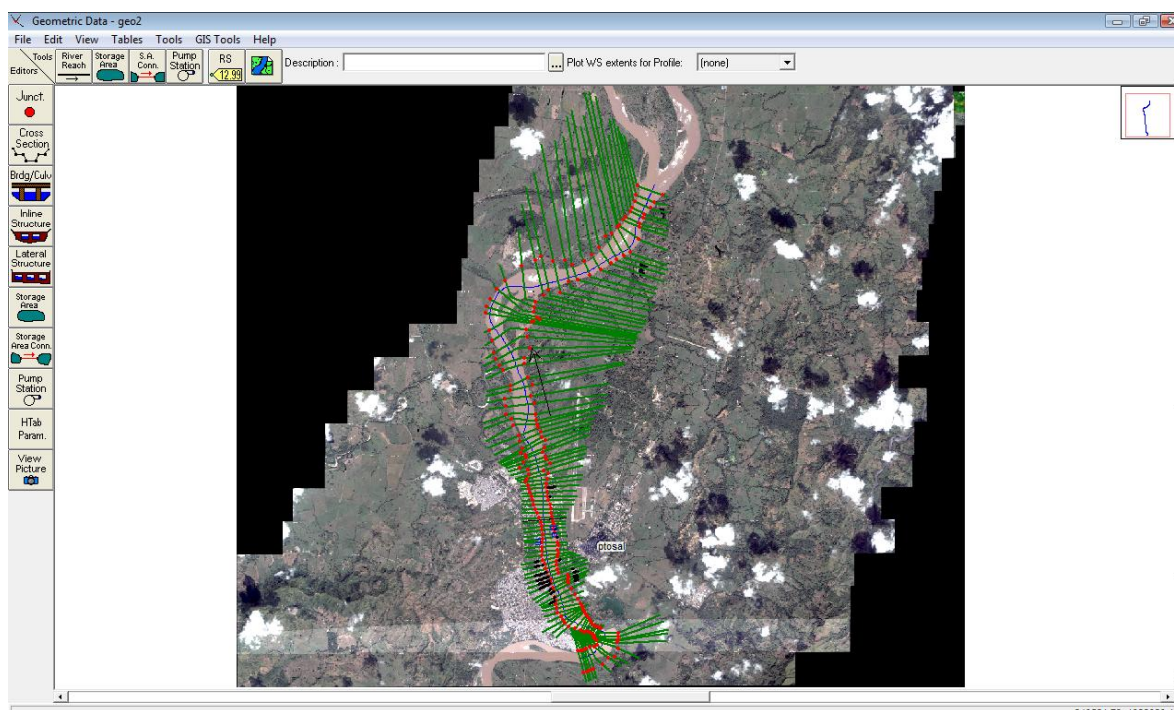


Figura 7-3 Modelo hidráulico de 111 secciones transversales

En la Figura 7-4 se presenta un ejemplo de los resultados gráficos mostrados en HEC RAS para un determinado caudal.

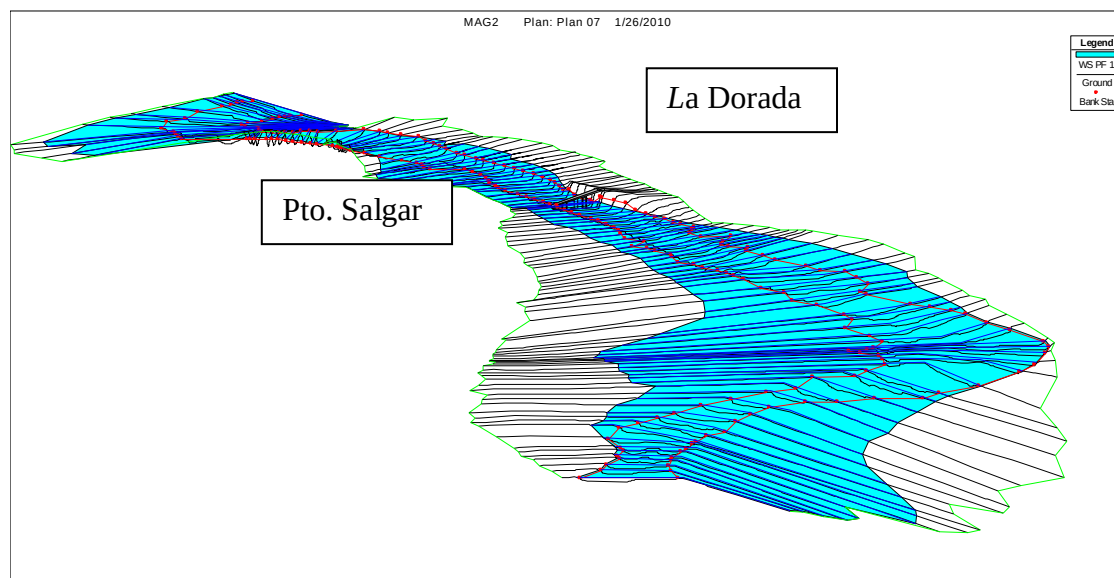


Figura 7-4 Modelo hidráulico en HEC-RAS

7.2 IMPLEMENTACIÓN MODELO HIDRÁULICO BIDIMENSIONAL RIVER2D

Como se mencionó anteriormente, el modelo hidráulico River2D consta de cuatro módulos complementarios, los cuales son R2D_Bed, R2D_Ice, R2D_Mesh y el River2D. Este último es el modelo hidráulico propiamente dicho. Con el fin de implementar el modelo hidráulico, estos cuatro módulos deben ser ejecutados secuencialmente.

7.2.1 Implementación módulo R2D_Bed

Dado que el modelo hidráulico River2D trabaja con el MDT generado por su módulo de edición gráfica R2D_Bed, se debe garantizar que el MDT generado por este módulo sea idéntico al generado en ARCGIS, siendo este último el que usa como base la herramienta de preprocesamiento HEC-GeoRAS para extraer toda la información geométrica del modelo unidimensional.

Para lograr lo anterior se recurrió a la extensión de Arcview 3.1 SantiTools.avx, la cual es una extensión de libre distribución y uso, que puede ser descargada de la página web: <http://arcscripts.esri.com/details.asp?dbid=11583>. Esta extensión permite convertir las curvas de nivel en una sucesión de puntos.

Cabe aclarar que el módulo R2D_Bed posee un manual de usuario donde se describe de manera más detallada procedimientos de obtención de datos y ejecución del modelo, así como una descripción detallada de cada una de las herramientas que este módulo posee. Dicho manual puede ser también libremente descargado de la página de la Universidad de Alberta <http://www.river2d.ualberta.ca/download.htm>.

7.2.1.1 Elaboración del archivo plano R2D_Bed

A partir del MDT obtenido tal como se mencionó en el numeral 6.1 se generaron curvas de nivel cada 1.0 m, las cuales fueron exportadas al formato CAD a través del ArcToolbox, con la herramienta **Conversion Tools - to CAD**, tal como se muestra en la Figura 7-5. Cabe aclarar que el archivo exportado en formato CAD se guarda en la misma ruta donde se encuentra el archivo original en formato .shp de ARCGIS.

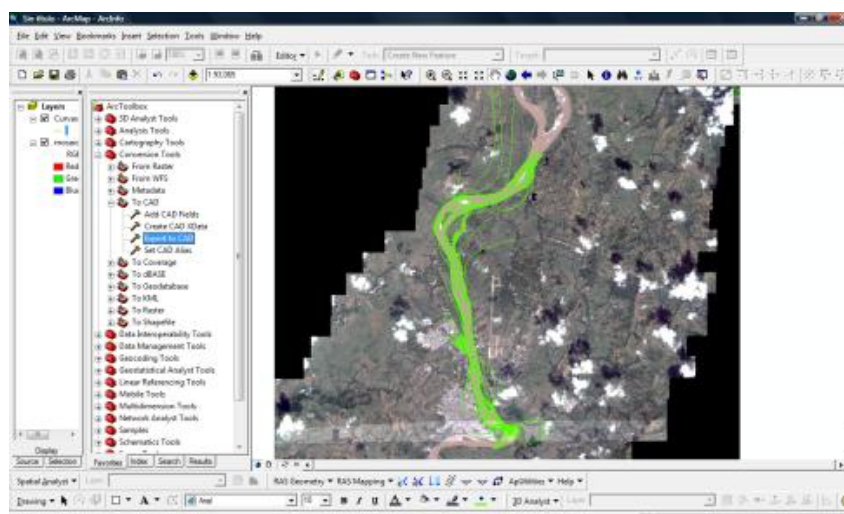


Figura 7-5 Conversión de curvas de nivel a formato CAD.

Este archivo CAD fue posteriormente convertido a formato .dxf en Autocad con el fin de que este pudiera ser leído en Arcview 3.1. Posteriormente se cargó este archivo en formato .dxf en Arcview, lo cual se logra activando la extensión **CadReader** (Ver Figura 7-6).

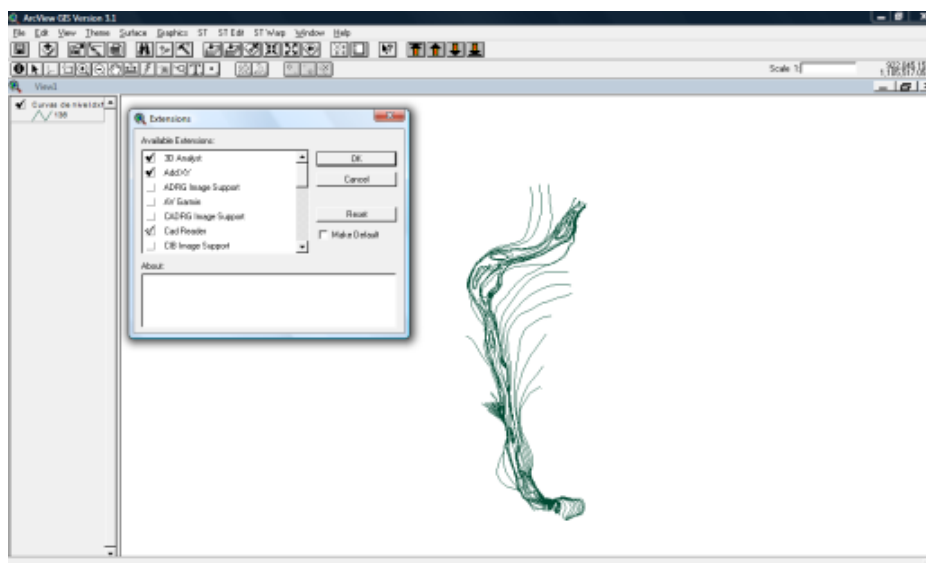


Figura 7-6 Curvas en nivel en Arcview

Para la conversión de las curvas de nivel en una serie de puntos, se procedió a hacer uso de la extensión SantiTools, a través del siguiente procedimiento.

1. Se activa la extensión SantiTools, la cual queda en una pestaña denominada ST.
2. Se convierte con la Herramienta *ST-Shape to point*, la cual pide un espaciamiento entre puntos, que debe ser ingresado en las mismas unidades que se están usando en el shape de curvas de nivel.

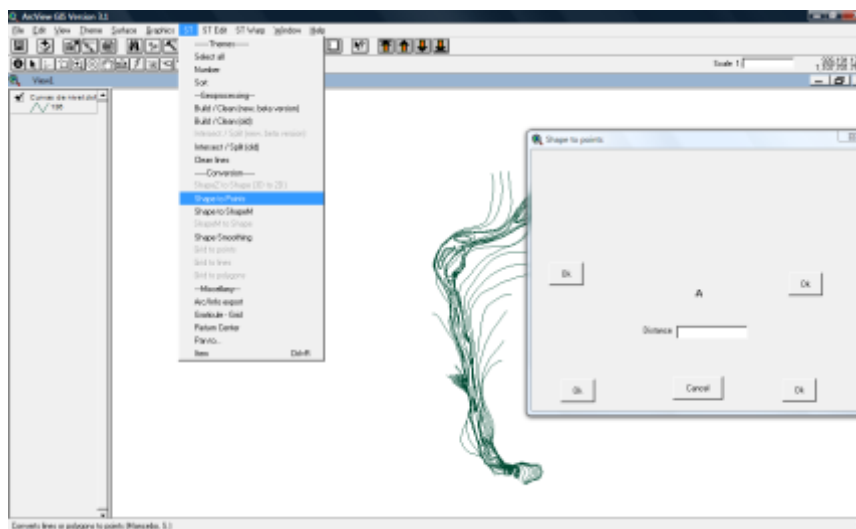
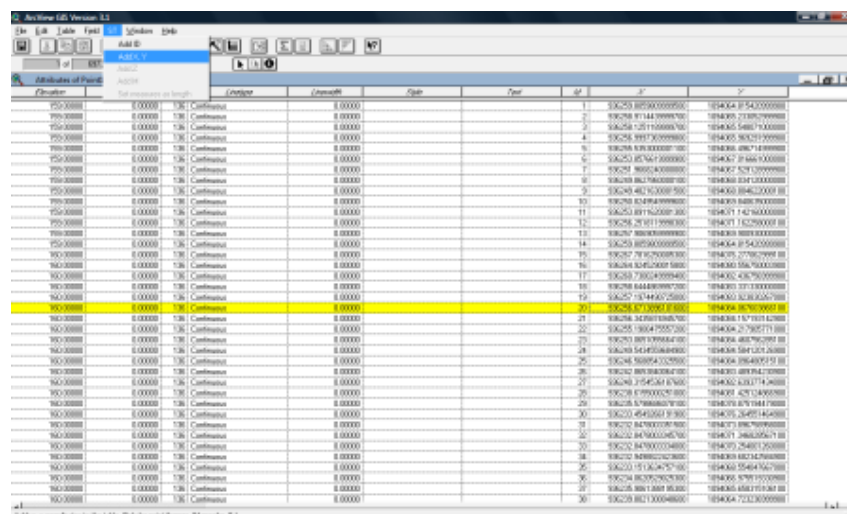


Figura 7-7 Conversión de curvas de nivel en puntos.

3. Luego de realizar la conversión, el shape de puntos debe ser cargado en Arcview y se debe abrir su tabla de atributos, con el fin de que ésta sea complementada con los identificadores ID y sus respectivas coordenadas X y Y, las cuales se adicionan en tres columnas al final de la tabla como se muestra en la Figura 7-8. La coordenada Z se encuentra en la columna *elevation*. Todo lo anterior se logra a través de sus respectivas herramientas ubicadas en la pestaña ST.



The screenshot shows the 'Attribute Table' window in ArcView 3.2a. The table has columns for 'ID', 'X', 'Y', and 'Z'. The data rows show a list of points with their respective coordinates. The 'Z' column represents elevation. The table is titled 'Attributes of Point' and shows a list of points with their respective coordinates.

Figura 7-8 Adición de los atributos ID y coordenadas al archivo plano.

Dentro del proceso descrito anteriormente se realizó un análisis del espaciamiento adecuado de tal manera que se generara el mejor MDT en R2DBed, el cual se explicará en numerales posteriores. Dicho análisis consistió en generar el MDT en R2D_Bed a partir del archivo de puntos con distintos espaciamientos (10 m, 5.0 m y 1.0 m) y evaluar la capacidad de representar el MDT original sin usar muchos recursos del computador. Este proceso se resume en la Tabla 7-1.

Espaciamiento (m)	Generación de MDT	Uso de memoria computacional
10.0	Se generan puntos muy dispersos, por tanto el MDT generado presenta muchas diferencias con el MDT original.	Se generaron 12211 puntos, por lo tanto no usó mucha memoria computacional, y el procesamiento es rápido.
5.0	Representa exactamente MDT original.	Se generaron 66218 puntos. El procesamiento es relativamente rápido.
1.0	Representa exactamente el MDT original.	Se generaron 333388 puntos. El procesamiento es muy lento.

Tabla 7-1 Selección del espaciamiento adecuado de puntos para MDT

De acuerdo con la Tabla 7-1, el espaciamiento entre puntos que mejor MDT genera con un uso de recursos de computador adecuado es de 5.0 m. Cabe aclarar que este resultado es particular para el caso que se trata en este trabajo, dadas las características de la topografía del terreno.

4. La tabla generada en el numeral anterior fue exportada a un archivo plano con el menú *File - Export* y con formato *Delimited Text*. Este es posteriormente abierto con Microsoft Excel y editado de tal manera que queden las siguientes columnas en este orden: ID, coordenada X, coordenada Y y coordenada Z. Adicionalmente con el fin de generar el archivo de entrada para R2D_Bed se adicionan al final las columnas Rugosidad y un código opcional. (Ver Tabla 7-2).

ID	X	Y	Z	Rugosidad	Código
1	936259.806	1094064.82	159	0.1	tin
2	936258.911	1094065.23	159	0.1	tin
3	936258.125	1094065.55	159	0.1	tin
4	936257	1094065.97	159	0.1	tin
5	936255.535	1094066.5	159	0.1	tin
6	936253.858	1094067.02	159	0.1	tin
7	936251.967	1094067.53	159	0.1	tin
8	936249.863	1094068.03	159	0.1	tin
9	936249.482	1094068.81	159	0.1	tin
10	936250.825	1094069.84	159	0.1	tin
11	936253.891	1094071.14	159	0.1	tin
12	936256.252	1094071.16	159	0.1	tin
13	936257.907	1094069.9	159	0.1	tin
14	936259.806	1094064.82	159	0.1	tin
15	936267.782	1094076.28	160	0.1	tin
16	936264.925	1094080.56	160	0.1	tin
17	936260.73	1094082.44	160	0.1	tin
18	936258.645	1094083.33	160	0.1	tin
19	936257.197	1094083.92	160	0.1	tin
20	936256.671	1094084.07	160	0.1	tin

Tabla 7-2 Datos de entrada para R2D_Bed

Algunas características de la información de entrada para el archivo R2D_bed se describen a continuación:

- a) Número de nodo (ID): se asigna un identificador numérico para cada nodo, el cual no debe repetirse, por tanto se asigna el ID numérico secuencial.
- b) Coordenada X, Y y Z: dichas coordenadas están en coordenadas planas, lo cual para el caso de estudio están amarradas a la red geográfica nacional.

- c) Rugosidad: tal como se planteó en numerales anteriores River2D calcula el modelo haciendo uso de la rugosidad efectiva K_s la cual debe ser ingresada en m. El valor inicial puede ser de 0.10 m, el cual es posteriormente variado espacialmente en R2D_bed.
 - d) Código: este código es usado como un parámetro adicional de descripción del nodo, el cual no debe superar los 20 caracteres.
5. Con el fin de complementar el archivo de entrada para R2D_Bed se debe adicionar luego de la última línea de datos el comando “no more nodes”.

ID	X	Y	Z	K_s	Cod
12194	934926.592	1096418.63	187.00	0.1	tin
12195	934925.149	1096409.22	187.00	0.1	tin
12196	934924.175	1096404.92	187.00	0.1	tin
12197	934923.167	1096406.52	187.00	0.1	tin
12198	936485.109	1093820.75	168.00	0.1	tin
12199	936492.343	1093843.23	168.00	0.1	tin
12200	936492.745	1093844.48	168.00	0.1	tin
12201	936493.142	1093845.72	168.00	0.1	tin
12202	936498.476	1093862.29	168.00	0.1	tin
12203	936505.117	1093882.92	168.00	0.1	tin
12204	936516.522	1093918.36	168.00	0.1	tin
12205	936516.681	1093918.86	168.00	0.1	tin
12206	936520.071	1093929.39	168.00	0.1	tin
12207	936471.703	1093783.07	168.04	0.1	tin
12208	936466.821	1093776.98	168.18	0.1	tin
12209	936466.52	1093776.61	168.19	0.1	tin
12210	936460.678	1093769.32	168.36	0.1	tin
12211	936452.141	1093758.67	168.61	0.1	tin
no more nodes.					

6. Luego de organizar el formato de archivo para R2D_Bed, se procede a guardarlo como Texto (MS-DOS) (*.txt). El nombre del archivo debe escribirse “*nombre.bed*”, en donde las comillas le indican a Excel que no guarde el archivo con extensión *.txt, sino *.bed con el fin de que pueda ser directamente leído en R2D_Bed. En este punto el archivo ya está listo para usarse en R2D_Bed.

7.2.1.2 Ejecución de R2D_Bed

En este numeral se explica el procedimiento para la ejecución del editor gráfico del Modelo Digital del Terreno (MDT) R2D_Bed, es decir, la ejecución de los procedimientos de triangulación y depuración del MDT generado, a través de diferentes herramientas que posee R2D_Bed.

1. **Cargar el archivo:** para cargar el archivo plano que contiene la información de cada uno de los nodos se usa la barra de herramientas *File-Open* (Ver Figura 7-9).

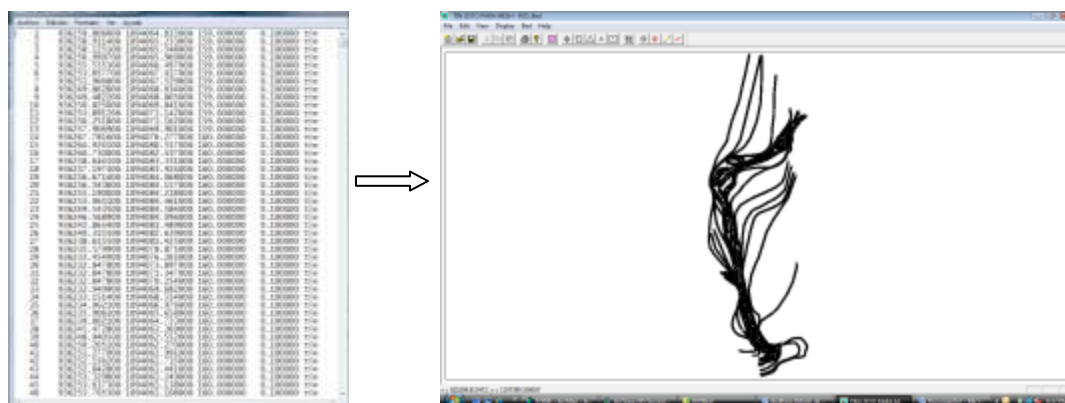


Figura 7-9 Archivo plano cargado en R2D_Bed

2. **Triangulación:** la triangulación se realiza a través de la herramienta *triangulate*, obteniendo de esta manera las curvas de nivel, las cuales son comparadas con las generadas en ARCGIS con el fin de realizar un control de edición del MDT (Ver Figura 7-10).

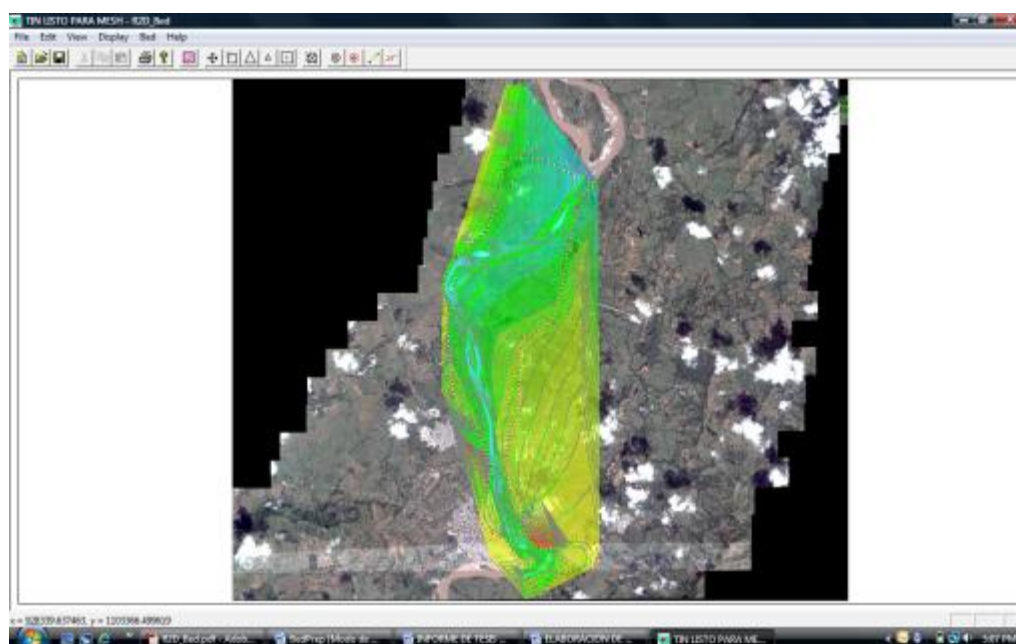


Figura 7-10 Modelo Digital del Terreno generado con R2D_Bed

3. **Depuración:** con el fin de obtener un MDT igual al obtenido en ARCGIS, el cual es el usado en el modelo unidimensional HEC RAS, se hace una depuración de errores en la triangulación a través del trazado de Breaklines, las cuales son líneas que le indican al algoritmo de triangulación de R2D_Bed que interpole linealmente a lo largo de la misma (Ver Figura 7-11).

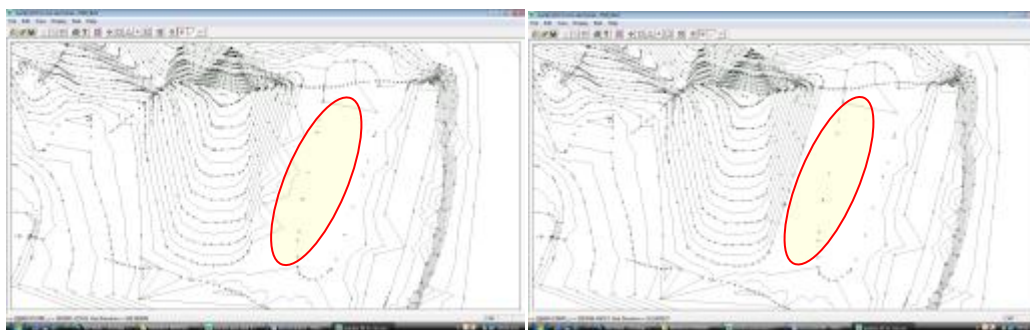


Figura 7-11 Uso de Breakline para corregir errores de la triangulación

Cabe aclarar que las Breaklines se usan preferiblemente para definir lugares que presentan cambios bruscos de cota, especialmente cuando existen obras de encauzamiento. Por tanto es recomendable ubicar las breaklines en la parte superior e inferior de la ribera del río, así como también en el punto más bajo del cauce principal (thalweg).

Dentro de la depuración también se incluye el borrado de nodos que por alguna razón presentan valores de cotas que hace ver el modelo con huecos o sobreelevaciones abruptas que no concuerdan con la topografía del terreno (Ver Figura 7-12).

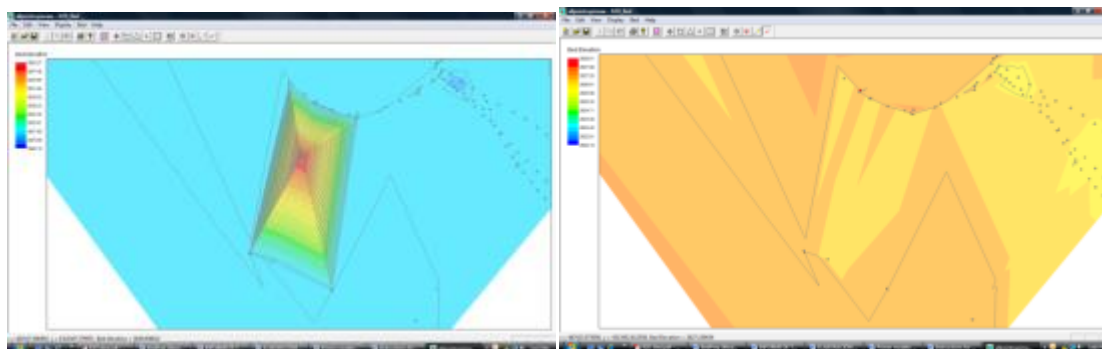


Figura 7-12 Eliminación de nodo para corrección de triangulación

Después de haber eliminado todas las irregularidades de la triangulación, el archivo ya se encuentra preparado para el siguiente paso en el proceso, es decir, la creación de la malla computacional. Sin embargo, antes de esto es posible en R2D_Bed demarcar la frontera computacional, es decir, la porción del terreno en la cual se realizará la modelación hidráulica, con el fin de crear los elementos finitos para hacer los cálculos.

4. **Configuración de la rugosidad de fondo:** la rugosidad de fondo fue establecida tal como se presentó en numerales anteriores a través de la herramienta *\Bed\Set Roughness by Region*. En uno de los modelos se estableció la variación espacial de la rugosidad diferenciando la rugosidad del cauce principal de la rugosidad de la llanura de inundación, tal como se presenta en la Figura 7-13.

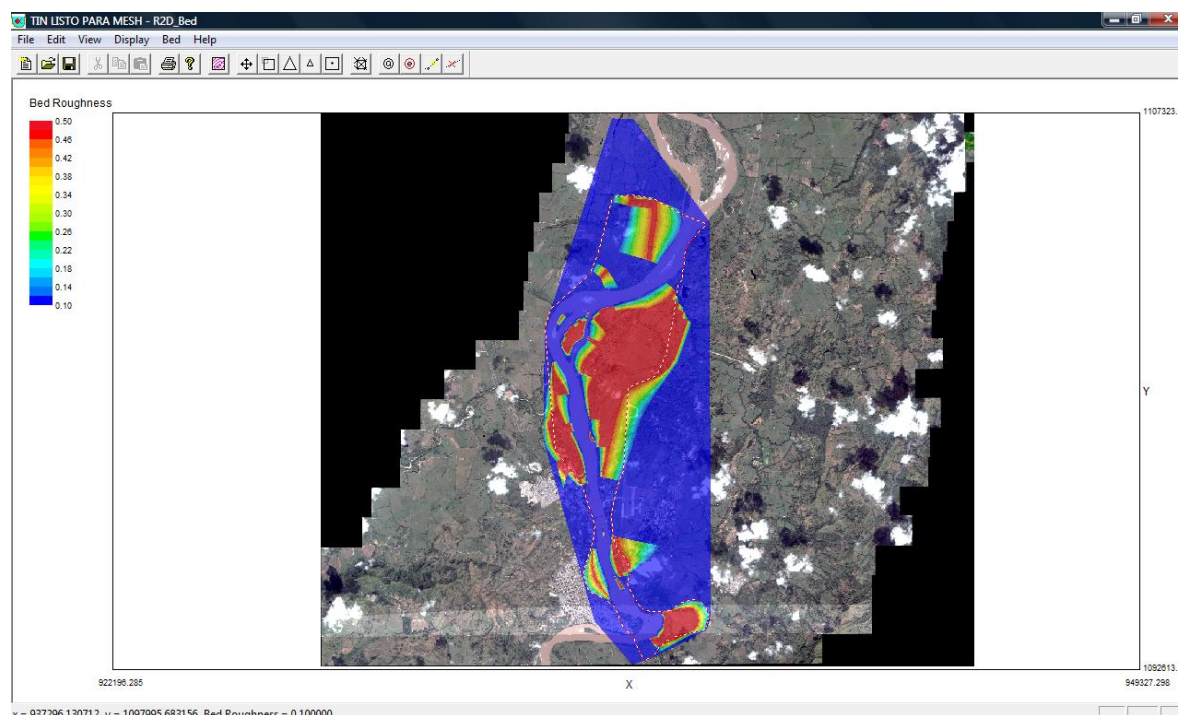


Figura 7-13 Configuración de la rugosidad de fondo

5. **Creación frontera computacional:** para la creación de la frontera computacional se debe tener en cuenta el registro gráfico de la zona de estudio para detallar las zonas que han sido inundadas o que se espera que se inunden con el caudal a ser modelado. En este punto es de gran utilidad utilizar fotografías satelitales o aéreas de la zona de estudio.

Para la creación de la frontera computacional se selecciona la barra de herramientas en el siguiente orden *\Bed\Define Exterior Boundary (ccw)*, en donde ccw indica que el trazado se realiza en la **dirección contraria a la rotación de las manecillas del reloj**, por sus siglas en inglés.

Cabe recordar que en River2D siempre que se traza una frontera computacional, el área a ser calculada o modelada debe estar siempre a la izquierda de dicha frontera, ya sea esta interna (ejm: islotes) o externa (máxima inundación). Por esto en el caso de trazar fronteras computacionales internas, éstas se trazan en la dirección de rotación de las manecillas de reloj.

El trazado se realiza haciendo click sobre los nodos de tal manera que se inicie en un nodo ya sea en la frontera de aguas arriba o aguas abajo y luego de realizar todo el recorrido en la dirección contraria a la rotación de las manecillas del reloj se termina en el mismo nodo donde se empezó el trazado.

En la Figura 7-14 se muestra la frontera computacional trazada (en línea roja) la cual corresponde a la huella de inundación reconstruida en procedimientos anteriores, aunque cabe aclarar que aquí se tomó un poco más amplia con el fin de que se pueda diferenciar hasta que puntos llega la inundación.

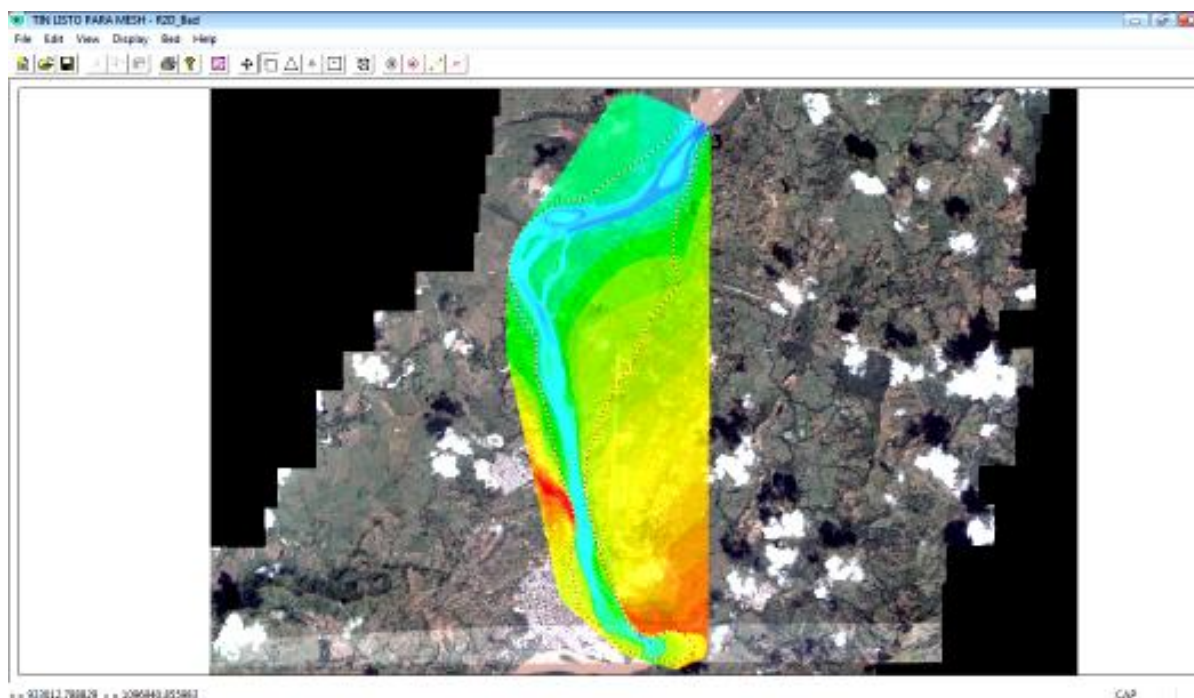


Figura 7-14 Demarcación de la frontera computacional

Cabe aclarar que la demarcación de la frontera computacional no necesariamente debe realizarse en R2D_Bed sino que también puede ejecutarse en R2D_Mesh; esto depende de la elección del usuario.

En este punto el archivo nombrado TIN LISTO PARA MESH.bed ya se encuentra listo para ser utilizado en el siguiente módulo o proceso: la creación de la malla computacional en R2D_Mesh.

7.2.2 Implementación del módulo R2D_Mesh

Tal como se planteó anteriormente, el módulo R2D_Mesh permite la generación y edición de la malla computacional que finalmente servirá de entrada para el modelo hidráulico River2D. Dicha labor se realiza por medio de la discretización espacial de la frontera computacional a través de la generación de una malla no estructurada flexible compuesta por elementos triangulares.

En este numeral se presentan inicialmente algunas recomendaciones respecto a la generación de la malla computacional así como también el proceso detallado del diseño de la malla para el caso de estudio.

7.2.2.1 Algunas recomendaciones

Antes de empezar con la generación de la malla computacional es importante tener en cuenta ciertas recomendaciones, las cuales se describen a continuación.

1. El proceso de elaboración de la malla computacional tiene el objetivo de proveer una alta densidad de nodos en áreas de mucha importancia, mientras que por el contrario, se proveen menores densidades en áreas no tan importantes. Es decir,

áreas tales como riberas del río que poseen altas pendientes o cambios bruscos de cota requerirán una discretización muy fina con el fin de reducir el error en la elevación y así poder modelar el comportamiento del flujo que varía espacialmente en cortas distancias en estas zonas. De otro lado, en zonas como la llanura de inundación, no se requiere que los elementos finitos tengan la misma discretización ya que normalmente ésta se caracteriza por ser de baja pendiente.

2. El número de grados de libertad, es decir, el número de nodos computacionales con tres variables desconocidas por nodo (velocidad en x, y y *profundidad*), está limitado por la capacidad del computador y el tiempo disponible del modelador. Se estimó que es factible un modelo con máximo 100.000 nodos, pues tomó menos de 1 hora en un computador Pentium III (Steffler & Waddle, 2002), aunque cabe aclarar que este concepto de factibilidad es en sí un criterio subjetivo.
3. Una alta densidad de nodos significa contar con una resolución muy fina y gran exactitud, mientras que una baja densidad de nodos significa menor esfuerzo computacional y por ende menor tiempo de cálculo y menor precisión.
4. Una regla empírica es que se requiere un mínimo de 4 celdas o elementos en cada dirección para resolver confiablemente una característica del campo de flujo.
5. Cabe resaltar que el programa tiene básicamente dos modos de generación de malla computacional: una generación uniforme, en donde se realiza un llenado uniforme en todo el espacio de cálculo, y una generación espacialmente variada en donde se puede hacer una diferenciación espacial de una zona a otra, es decir zonas de baja y alta densidad de nodos.
6. Para el caso de una generación de nodos uniforme en el cauce principal se recomienda iniciar con un espaciamiento de 1/5 del ancho del canal.
7. Aunque River2D usa como unidades de longitud el metro, para el proceso de generación de la malla computacional puede ser usado cualquier sistema consistente de unidades.
8. Con el fin evaluar los efectos del diseño de la malla computacional en la solución final, se deben comparar las soluciones obtenidas a partir de varios diseños de mallas. Para esto debe ejecutarse el modelo hidráulico con cada malla y comparar los resultados, con el fin de observar la influencia del espaciamiento entre nodos sobre la solución.

Se concluye por tanto que el diseño de la malla computacional es el “arte negro” de la modelación bidimensional, ya que el objetivo es elaborar una malla suficientemente refinada en áreas importantes manteniendo tiempos razonables de solución.

7.2.2.2 Procedimiento de generación de la malla computacional

El proceso consiste en cargar el archivo *.bed, el cual se genera como se describió anteriormente. Dicho archivo es el Modelo Digital del Terreno en formato TIN, sobre el cual se define la frontera computacional, que consiste en un polígono cerrado externo y normalmente una serie de polígonos internos que representan islotes. Dado que estos islotes

pueden o no ser inundados para el evento a ser modelado, debe analizarse si es necesario trazar la frontera computacional para aislarlos.

Luego la frontera computacional es discretizada dividiendo la misma en un número de puntos de malla o nodos, para posteriormente llenar el interior de la frontera computacional con nodos por medio de varios métodos, los cuales se pueden agrupar en dos categorías: llenado espacialmente variado o llenado uniforme.

Los nodos generados obtienen sus parámetros, tales como cota y el valor de la rugosidad mediante una interpolación lineal sobre el modelo digital del terreno o archivo de entrada *.bed.

Los nodos insertados son posteriormente triangulados las veces que se quiera hasta obtener el patrón de densidad de malla deseado, la cual es posteriormente suavizada por medio del ajuste progresivo de la posición de los nodos y por ende el ajuste de su elevación y rugosidad.

Finalmente la malla generada se emite como el archivo de entrada que contiene toda la información necesaria para ejecutar el modelo hidrodinámico de elementos finitos River2D, cuya extensión es *.cdg.

A continuación se describe el proceso seguido para la obtención de la malla computacional del modelo hidráulico del tramo del Río Magdalena.

1. **Cargar el archivo de topografía *.bed:** dado que la información para los nodos de la malla computacional se toma del archivo de topografía, el primer paso es cargar el archivo *.bed en el módulo de R2D_Mesh, mediante el menú *File-Open Bed File* (Figura 7-15), en donde se busca el archivo generado en el módulo R2D_Bed.

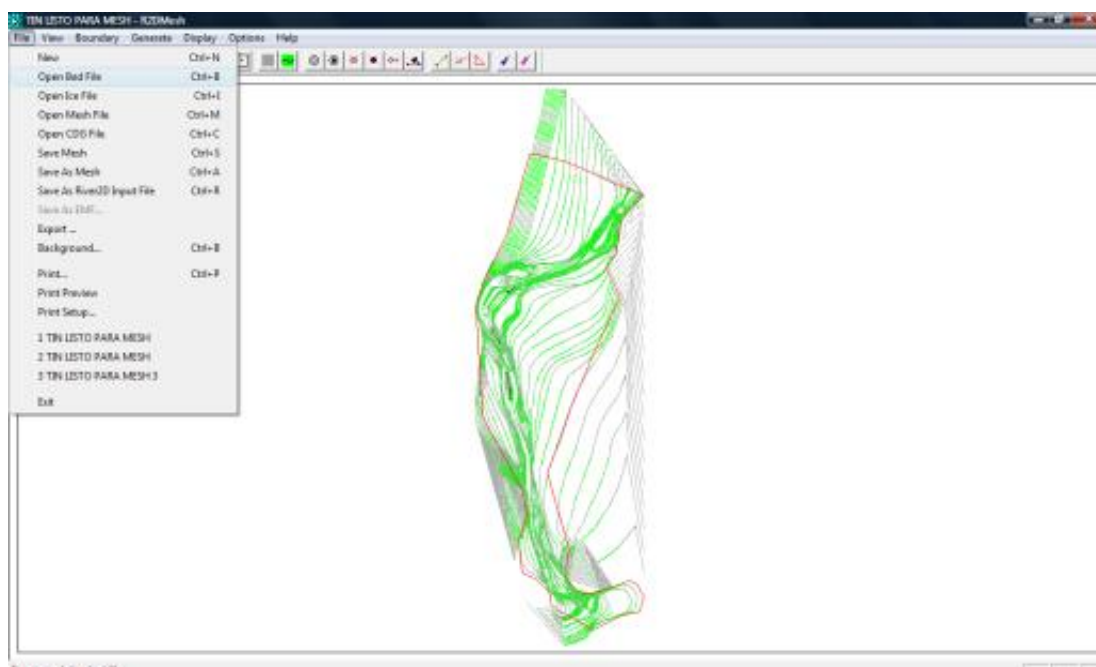


Figura 7-15 Topografía cargada en R2D_Mesh

2. **Discretizar la frontera computacional:** esto se logra con la generación de nodos a lo largo de toda la frontera computacional, usando la herramienta *Generate-Boundary Nodes-Ok*, que le indica al módulo R2D_Mesh que se acepta el espaciamiento por defecto para los nodos (1000 m en el Sistema Internacional (SI), Ver Figura 7-16).

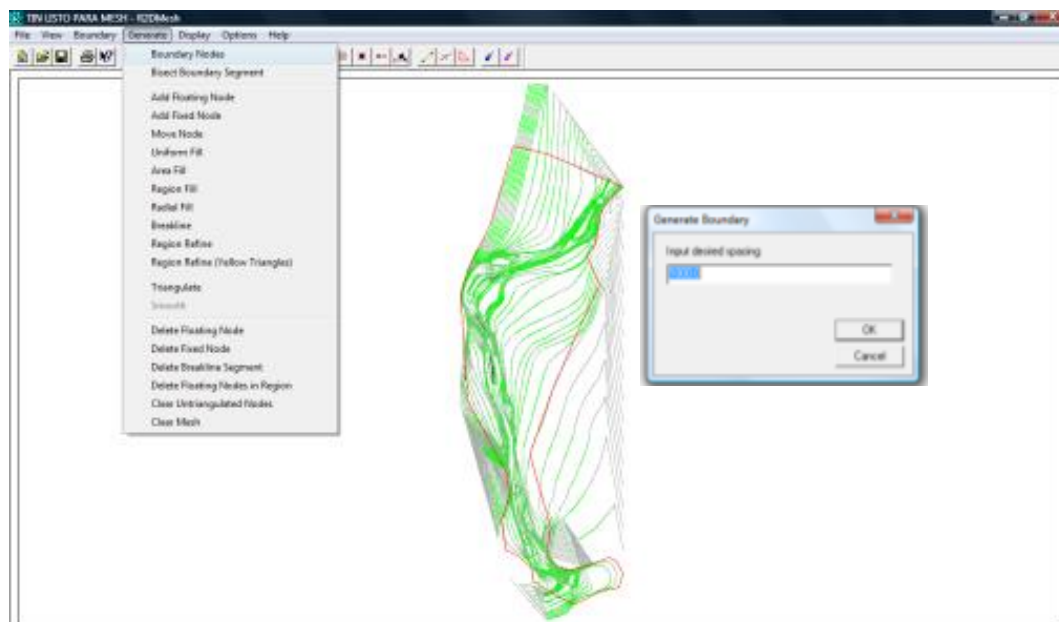


Figura 7-16 Discretización de la frontera computacional

3. **Especificar las condiciones de frontera:** con el fin de definir cuáles son las fronteras de entrada y de salida, R2D_Mesh permite demarcarlas con las herramientas *Boundary/Set inflow by area* y *Boundary/Set outflow by area* respectivamente, así como también la magnitud del caudal y la cota de la lámina de agua.

Tal como se muestra en la Figura 7-17, luego de escoger la herramienta respectiva, se selecciona sobre la frontera computacional (ver recuadro negro en la figura) las fronteras de entrada y salida del flujo, para lo cual R2D_Mesh pide el caudal para la frontera de entrada y la cota de la lámina de agua en la frontera de salida.

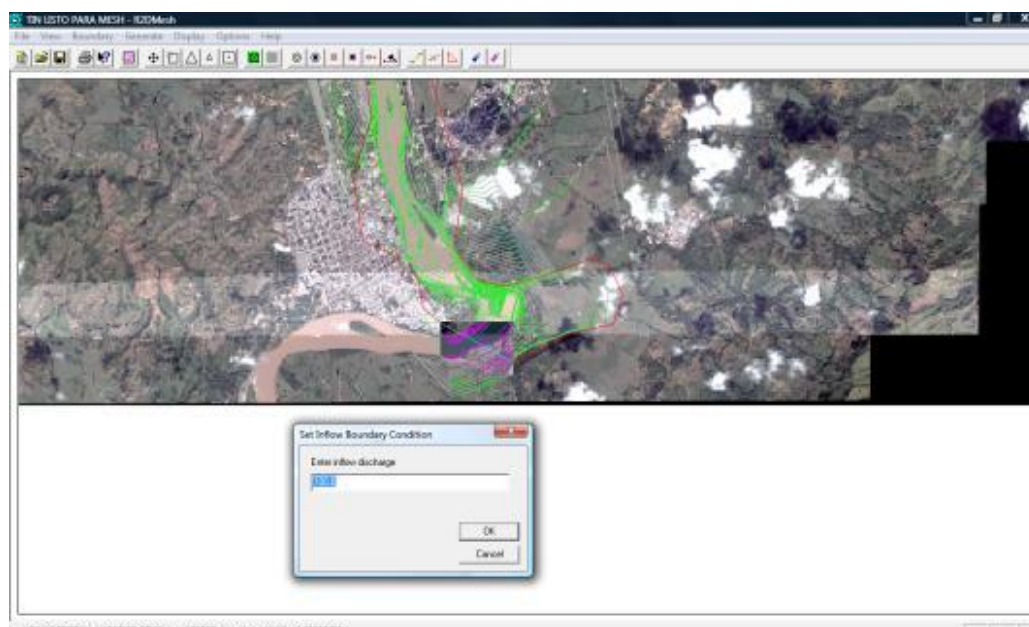


Figura 7-17 Especificación de las fronteras de entrada y salida de flujo.

Es importante resaltar que en este paso se debe tener el valor del caudal a modelar así como también un valor aproximado de la cota de lámina de agua para ese caudal, para lo cual es de gran ayuda contar con una imagen satelital de la zona de estudio o registro gráfico o topográfico de dicho evento.

Para el presente caso el caudal de entrada corresponde al caudal máximo registrado durante el evento y la cota de lámina de agua en la salida se obtuvo del modelo unidimensional HEC RAS, cuyos valores se presentan en la Tabla 7-3.

Caudal (m^3/s)	5848
Cota de lámina de agua en la frontera de salida (msnm)	167.22

Tabla 7-3 Condiciones iniciales modelo River2D

Luego de definir estas fronteras, cada una aparece de un color diferente, tal como se muestra en la Figura 7-18. Cabe resaltar que la frontera de flujo cero que aparece en color rojo, indica que en caso de que el flujo llegase a alcanzar esta frontera, dicho flujo no la atravesará sino que fluirá paralela a la frontera, es decir, esta frontera roja funciona como un “muro vertical”, el cual no permite flujo a través de él.

De otro lado, las fronteras computacionales de entrada y salida deben estar divididas en 20 elementos o más, para lo cual se hace una subdivisión de los elementos ya generados en el numeral 2, por medio de la herramienta *Bisect*, la cual divide el elemento seleccionado en dos partes iguales adicionando un nuevo nodo.

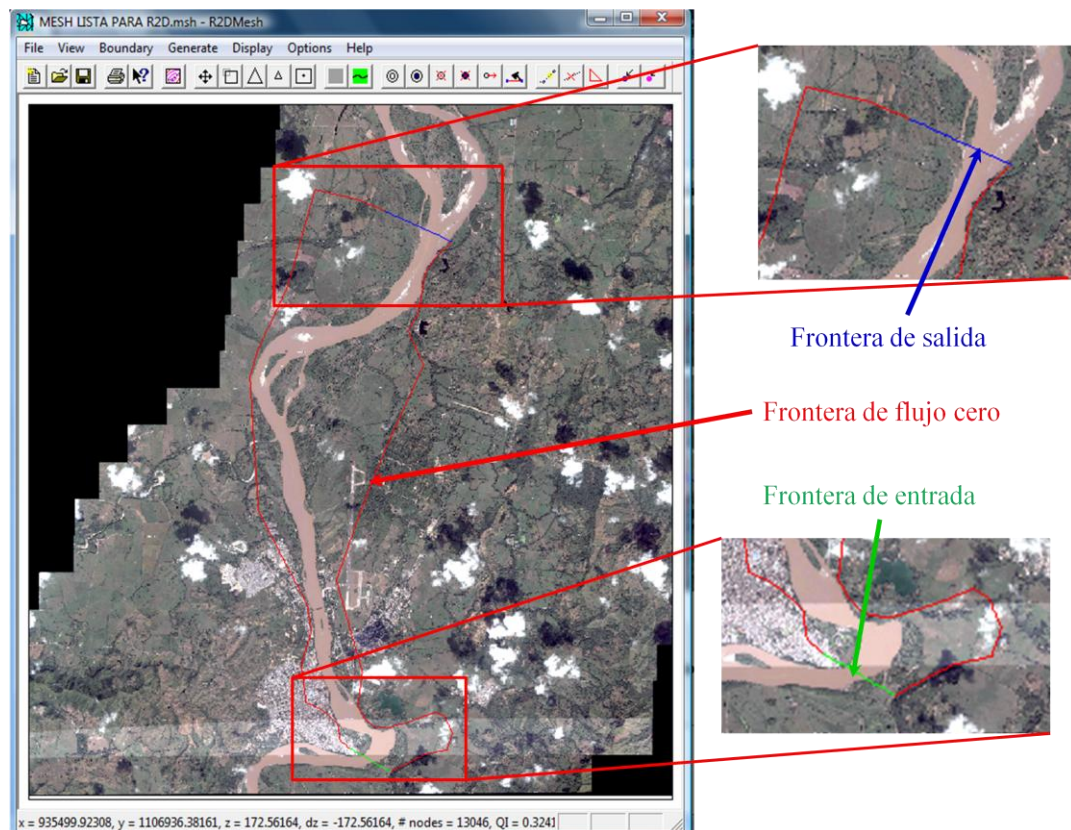


Figura 7-18 Fronteras computacionales

Hasta este punto ya se tiene la frontera computacional demarcada, así como también las condiciones iniciales en las fronteras de entrada y salida de flujo. A continuación se presenta el proceso de discretización espacial del espacio computacional con elementos finitos triangulares.

4. **Llenado del espacio computacional con nodos:** como se mencionó en las recomendaciones, el diseño de la malla computacional es el “arte negro” de la modelación y por tanto R2D_Mesh posee distintas herramientas ubicadas en el menú *Generate*, las cuales son: *Uniform Fill*, *Area Fill*, *Region Fill* y *radial Fill*, que permiten hacer la discretización espacial del espacio computacional.

- **Uniform Fill:** ésta es la forma más sencilla de discretización, pues como su nombre lo indica permite hacer un llenado uniforme del espacio computacional. Para esto se debe ingresar el espaciamiento y posteriormente el ángulo. Dicho espaciamiento se usa para ubicar los nodos equidistantes por medio de un patrón de triángulos equiláteros. El ángulo (entre 0° y 90°) es medido respecto al eje horizontal x (Ver Figura 7-19).

Al hacer uso de esta herramienta es recomendable que el espaciamiento sea de $1/5$ del ancho del canal.

Debido a que la zona del caso de estudio presenta una topografía considerablemente plana y a que la extensión espacial del modelo es relativamente grande se procedió a seleccionar como espaciamiento 40 m y como ángulo 0° , generando por tanto una malla de 13046 nodos, tal como se presenta en la Figura 7-19.

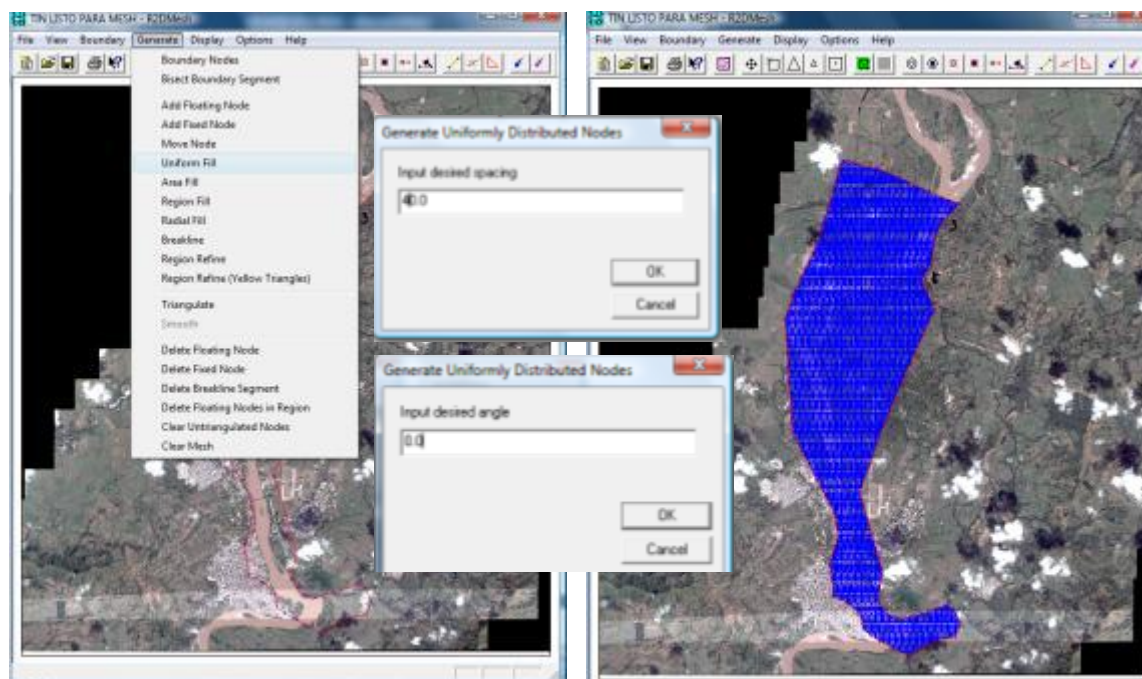


Figura 7-19 Discretización del espacio computacional

5. **Adicionar breaklines:** con el fin de corregir los posibles errores en la interpolación de la triangulación, en R2D_Mesh también se pueden adicionar breaklines de tal manera que se realice una interpolación lineal a lo largo de las mismas, ya que tal como se planteó anteriormente los nodos generados para la triangulación obtienen sus parámetros del archivo de entrada de R2D_Bed.
6. **Triangulación de la malla de puntos:** con los nodos generados ya es posible hacer la triangulación para generar los elementos finitos triangulares. Dicha triangulación consiste en unir los nodos por medio de líneas de tal manera que se generen triángulos lo más equiláteros posible. En este proceso los nodos de la malla computacional obtienen sus parámetros de coordenadas (x,y,z) y su rugosidad por medio de interpolación lineal con las líneas generadas en la triangulación.

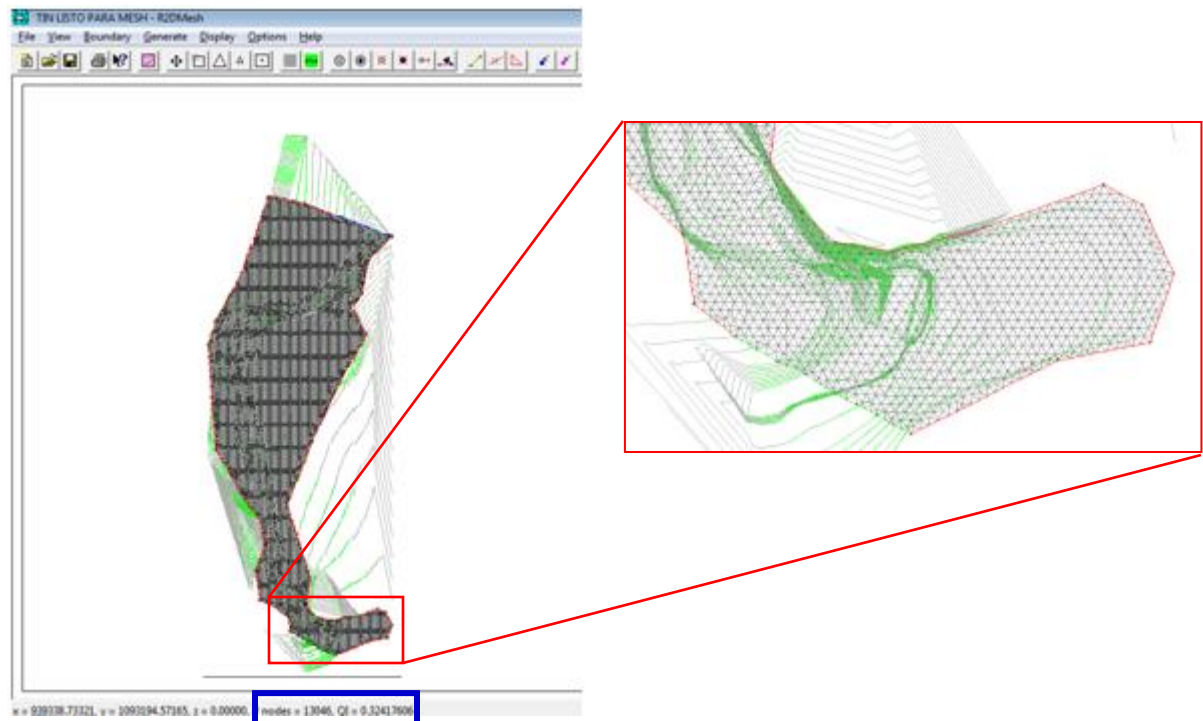


Figura 7-20 Triangulación del espacio computacional

Dependiendo de la ubicación de los nodos, el resultado de la triangulación puede ser más o menos aceptable, por tanto R2D_Mesh tiene una medida de la calidad de la malla generada. Dicha medida aparece en la barra de estado denominada QI (por sus siglas en inglés), la cual es calculada para todos los triángulos generados por medio de la Ecuación 7.1:

$$QI = \frac{\frac{\text{Área del triángulo}}{\text{Área del círculo circunscrito}}}{\frac{\text{Área del triángulo equilátero}}{\text{Área del círculo circunscrito}}} \quad (7.1)$$

Por tanto este índice varía entre 0 y 1, para lo cual una malla ideal corresponde a una malla donde todos sus triángulos son equiláteros, es decir $QI=1.0$. Pero en las mallas reales el indicador QI siempre es menor que 1.0. Típicamente los valores aceptables se encuentran entre 0.15 y 0.5.

7. **Suavizado de la malla:** Si al hacer la triangulación no se obtiene un valor de QI aceptable, se debe suavizar la malla computacional, para obtener triángulos más regulares en cuanto a su forma y una transición gradual entre triángulos de diferentes tamaños. Esta herramienta mueve cada nodo a una posición más central respecto a sus nodos vecinos, mejorando considerablemente la calidad de los elementos generados, tal como se muestra en la Figura 7-21.

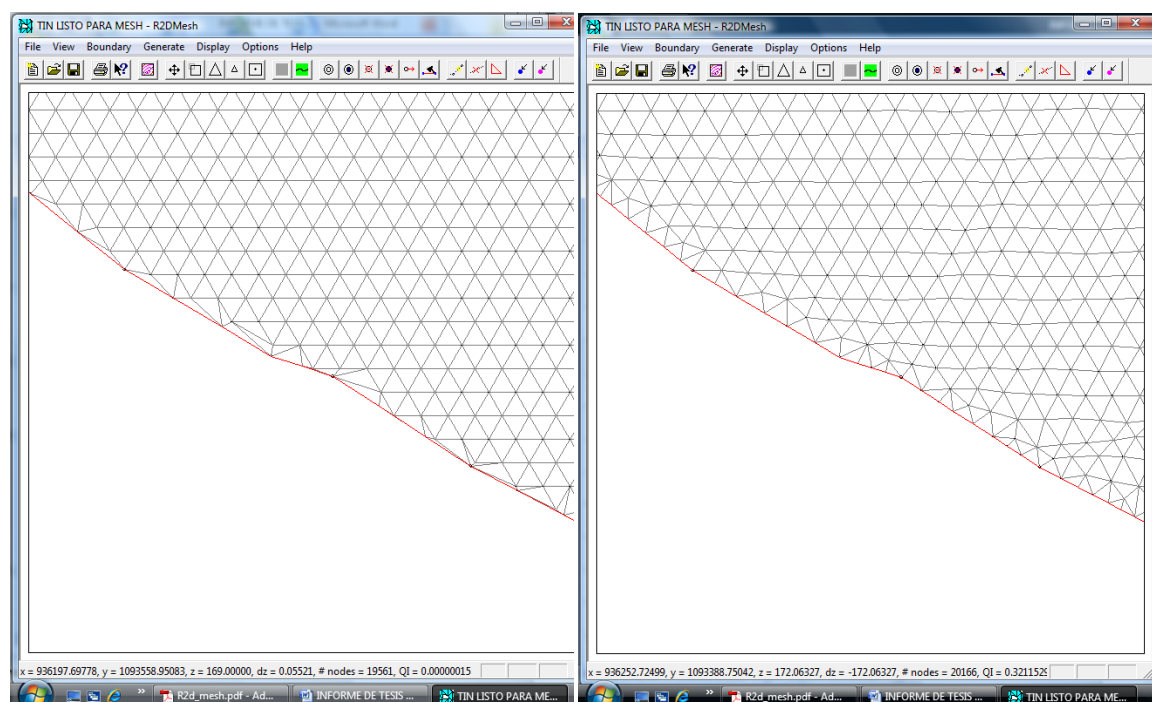


Figura 7-21 Suavizado de la malla computacional

Para el caso de estudio se logró obtener una malla con un $QI=0.3241$. Cabe aclarar que el QI que aparece en la barra de estado corresponde al triángulo con el menor QI de todos los triángulos generados, el cual es resaltado en color rojo al interior de la malla computacional.

Un resumen de las características de la malla obtenida se presenta en la Tabla 7-4.

# de nodos	13046
# de elementos	25411
QI	0.3241

Tabla 7-4 Características de la malla generada.

8. **Evaluar la topografía generada:** otra manera de realizar un control de calidad de la malla computacional generada es observar la topografía generada por medio de la triangulación de la malla computacional. Dicha topografía debe ser muy similar a la topografía generada en R2D_Bed pero sólo está limitada a la zona computacional demarcada, tal como se muestra en la Figura 7-22.

En caso de encontrar errores considerables, debe realizarse una corrección, ya sea por medio de adición de nuevos nodos o breaklines en las zonas donde se presenten, haciendo nuevamente el proceso de triangulación.

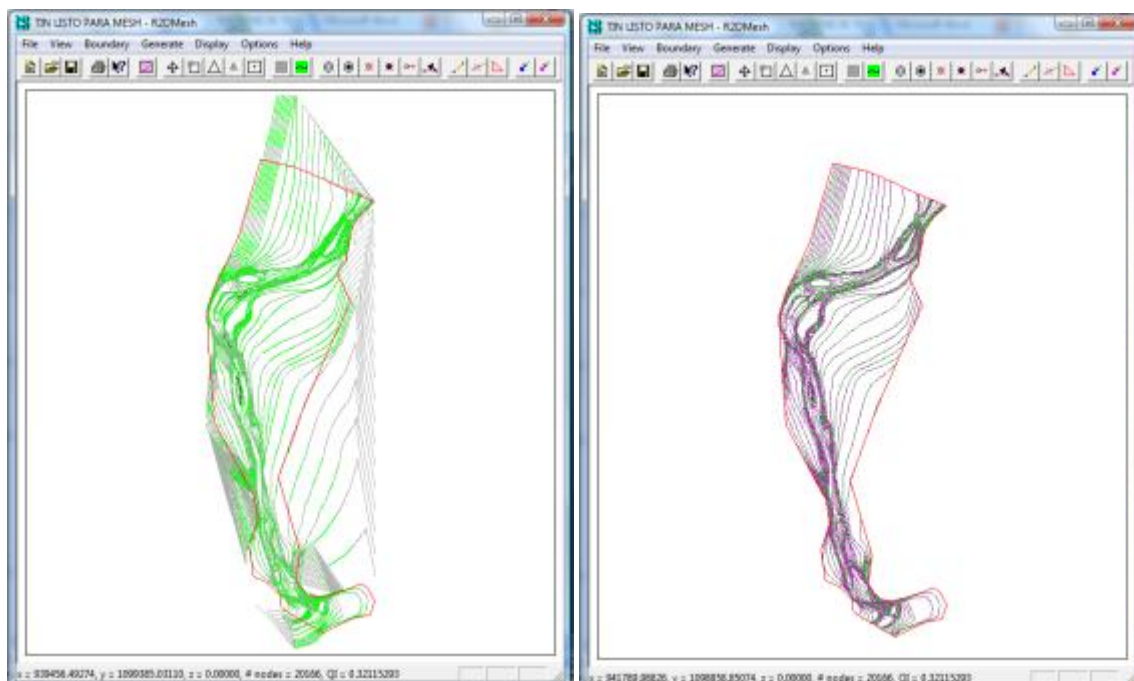


Figura 7-22 Topografía generada en R2D_Mesh

9. **Generar el archivo de entrada para River2D:** Cuando se obtiene una malla computacional aceptable, ésta se puede guardar de dos formas: como un archivo de R2D_Mesh o como el archivo de entrada para River2D, usando los comandos “Save as a Mesh” (*.mesh) o “Save As River2D Input File” (*.cdg) respectivamente.

Si se guarda como *.cdg el módulo R2D_Mesh preguntará por la cota de lámina de agua en la frontera de entrada, el cual es solo un valor estimado por el usuario ya que el modelo hidráulico River2D debe calcularla. Este valor es solo usado como condición inicial, el cual para el caso de estudio fue tomado del modelo hidráulico unidimensional HEC RAS (175.5 msnm).

7.2.3 Ejecución del modelo Hidráulico River2D

El archivo *.cdg contiene toda la información necesaria para hacer la simulación hidrodinámica en River2D. Esta información incluye la malla computacional, la cual es definida en términos de los nodos computacionales y su conectividad en formato Triangulated Irregular Network (TIN). Cada nodo computacional está representado por una línea en el archivo *.cdg y contiene el número del nodo, las coordenadas (x, y, z), y la rugosidad.

Adicionalmente todas las líneas tienen información respecto a las condiciones iniciales requeridas en el proceso de solución iterativo de River2D. Esta información corresponde a la intensidad de flujo en la dirección x, la intensidad de flujo en la dirección y la altura de la lámina de agua. Dicha altura es suministrada por R2D_Mesh en cada nodo con base en la cota de la lámina de agua en la frontera de salida y la cota de lámina de agua en la frontera de entrada dadas por el usuario.

Cabe aclarar que si el archivo *.cdg se vuelve a guardar luego de realizar una corrida, los resultados de la misma son tomados como condiciones iniciales para las siguientes ejecuciones del modelo.

En este numeral se describe detalladamente la implementación del modelo hidráulico y las consideraciones tenidas en la obtención de la solución hidrodinámica de estado estable.

1. **Cargar el archivo de entrada:** al ejecutar River2D se debe cargar el archivo de entrada generado en R2D_Mesh por medio del comando *File/Open*, y seleccionar el archivo con extensión .cdg. En este momento aparecen dos fronteras distintas: la frontera computacional (de color rojo) y el borde del agua. Esta última representa la frontera entre las áreas secas y las áreas cubiertas por agua. Dicha frontera se obtiene con base en la cota de lámina de agua de la frontera de entrada y salida.

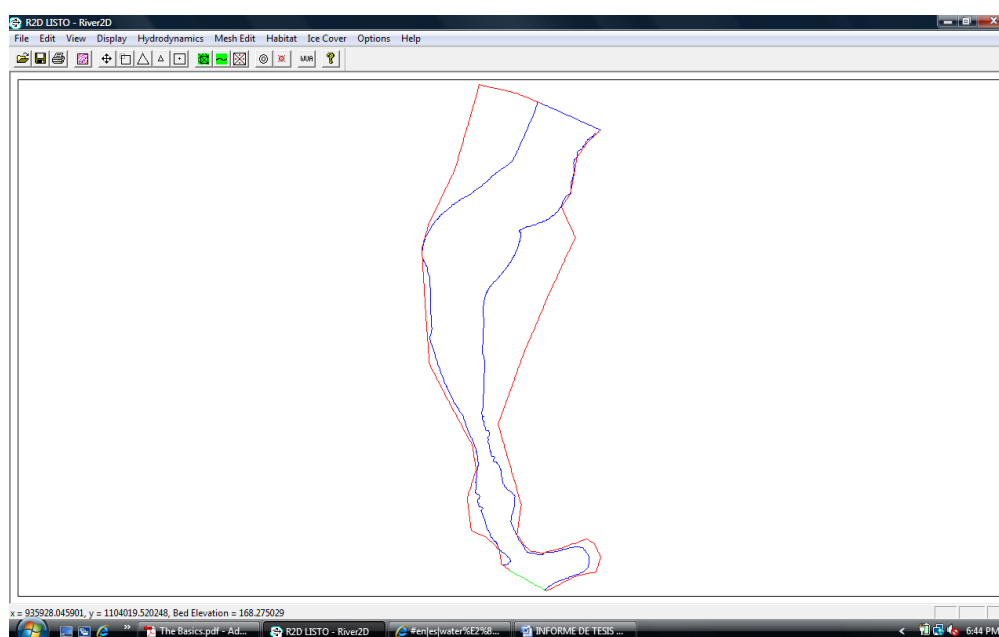


Figura 7-23 Modelo River2D

2. **Configurar las condiciones de frontera:** para verificar las condiciones de frontera y realizar posibles ajustes en las mismas se hace uso del comando *Hydrodynamics/Edit Flow Boundary* y se selecciona con el mouse la frontera a editar, punto en el cual aparece una ventana tal como se muestra en la Figura 7-24.

En la Figura 7-24 cada frontera posee varias opciones para las condiciones de frontera, así como también información de la forma como está definida ésta. La información incluye un nodo de inicio, un nodo final, tipo de frontera de flujo (entrada o salida) e información relevante asociada al tipo de frontera (caudal total para la frontera de entrada).

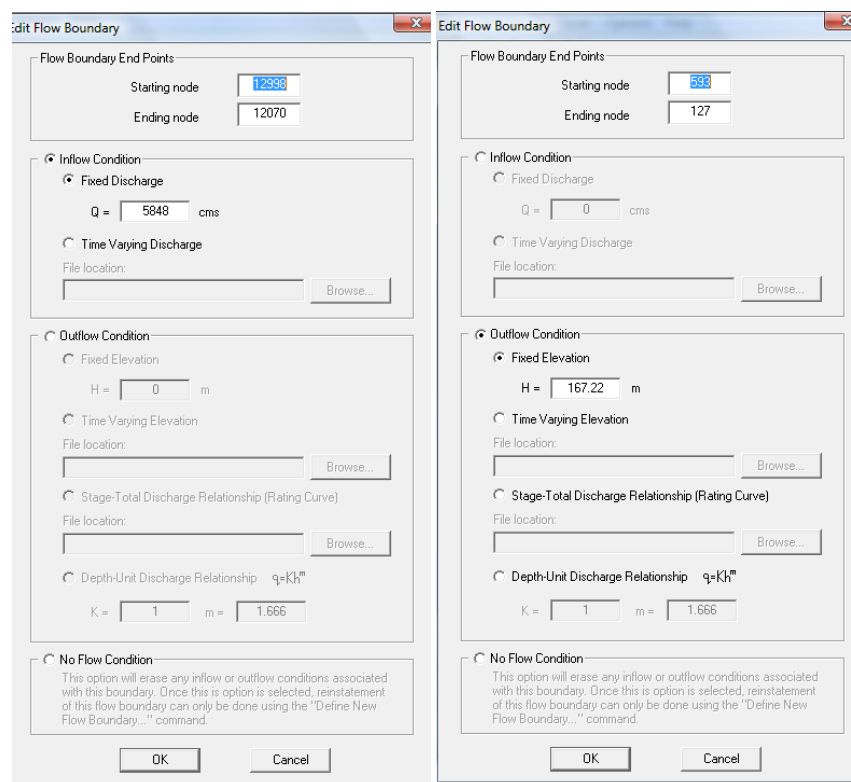


Figura 7-24 Ventanas para edición de las condiciones de frontera

En la Figura 7-24 puede verse claramente que pueden especificarse condiciones de frontera diferentes dependiendo del análisis. Es así como en la frontera de entrada puede especificarse un caudal fijo o un hidrograma donde el caudal varía con el tiempo.

Del mismo modo las condiciones de la frontera de salida pueden configurarse con una cota de lámina de agua constante, una curva de variación de la cota respecto al tiempo, una curva de calibración que relaciona el caudal con la altura de la lámina de agua, una relación de la forma $q=Kh^m$ o una condición frontera donde el flujo es cero.

Para el caso de estudio se tienen como condiciones de frontera las mostradas en la Figura 7-24, las cuales son un caudal de entrada de $5848 \text{ m}^3/\text{s}$ y una cota fija de lámina de agua igual a 167.22 msnm . Lo anterior debido a que el análisis que se va a realizar es en estado de flujo permanente o flujo estable, en donde las características del flujo no varían respecto al tiempo.

- Ejecución del modelo hidrodinámico:** con el fin de obtener una solución en estado estable se debe ejecutar el modelo por medio del comando *Hydrodynamics/Run Steady Flow*, para el cual aparece el cuadro de diálogo que se muestra en la Figura 7-25.

Cabe aclarar en este punto que en el análisis de flujo permanente el proceso usado para llegar a la convergencia es un pseudo-transiente y por tanto las iteraciones son

moderadas por incrementos de tiempo y por ello se usa un tiempo final para finalizar la simulación, el cual es seleccionado por el usuario según el nivel de precisión deseado, tal como se presenta a continuación.

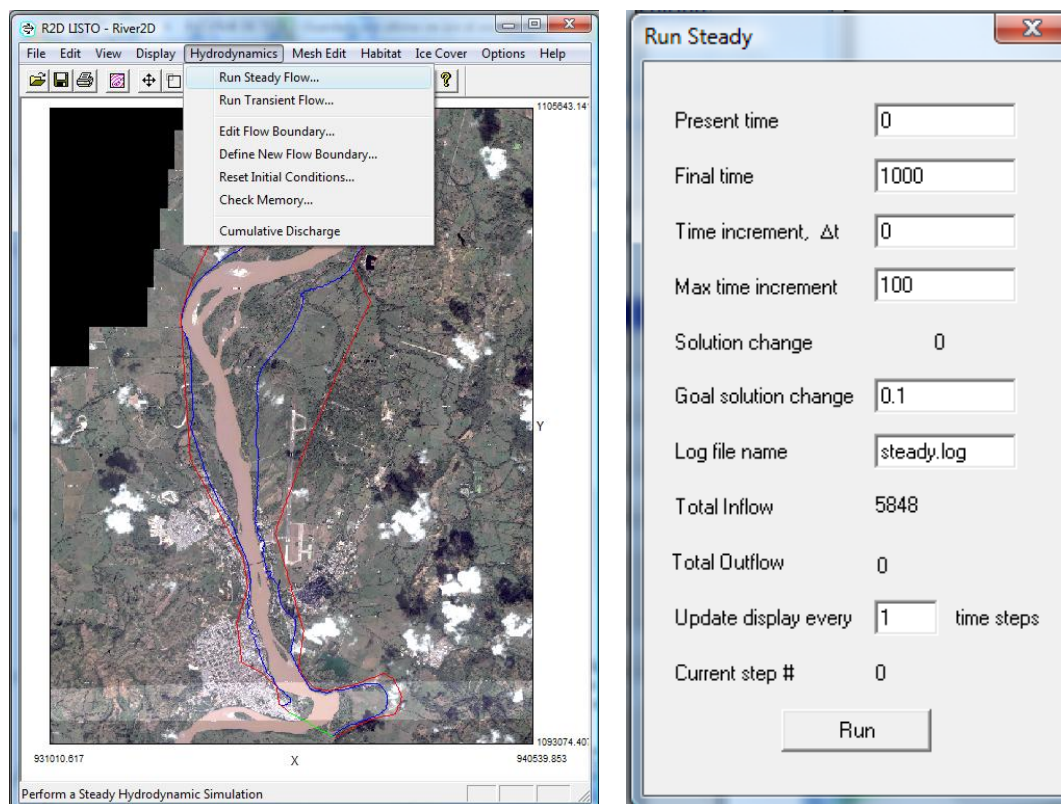


Figura 7-25 Cuadro de diálogo Run Steady

El cuadro de diálogo de ejecución de River2D contiene una lista de valores, algunos de los cuales son datos de entrada que deben ser ingresados por el usuario (casillas en blanco), mientras que los otros reportan valores asociados con el desempeño del modelo y su convergencia, tal como se detalla a continuación.

La casilla “**Present Time**” es el punto en pseudo tiempo para el cual la solución está actualmente ejecutándose o se ha parado. Este valor puede ser reiniciado después de la ejecución de una simulación.

La casilla “**Final time**” es el tiempo en el cual la ejecución del modelo hidrodinámico deberá parar. Esta casilla puede incrementarse gradualmente a medida que el modelo llega a este tiempo final pero no ha alcanzado la convergencia.

La casilla “**Time Increment**” es el tamaño del paso de tiempo que está corriendo al momento de hacer la modelación, el cual puede ser ajustado en el inicio de la corrida. Si este es muy grande, el programa automáticamente lo ajustará disminuyéndolo. En el transcurso de las iteraciones este parámetro se incrementa constantemente. Ocasionalmente, este decrece dramáticamente y entonces empieza a crecer de nuevo. Si esto pasa frecuentemente, puede indicar que existe un problema con las condiciones de frontera y/o

con la malla computacional, que puede ser por ejemplo que un nodo pasa de inundado a seco en cada iteración.

El parámetro “**Max Time Increment**” es especificado por el usuario para permitir tamaños grandes de paso de una iteración a otra. Dicho valor es una medida de control en el proceso de convergencia.

La casilla “**Solution change**” es el cambio total relativo en la solución de las variables en la última iteración. La magnitud de este valor relativo al objetivo de la solución (Goal Solution Change) gobernará la rapidez con la que aumenta el incremento de tiempo (Time Increment). Sólo cuando se alcanza el incremento de tiempo máximo (Max Time Increment), el cambio en la solución (Solution Change), debería decrecer en cada iteración. Cuando ésta llega a ser lo suficientemente pequeña (**Solution Change = 0.00001 aproximadamente**), se puede considerar que la solución ha llegado a la convergencia.

“**Goal Solution Change**” es el objetivo especificado por el usuario relativo al cambio en la solución total. Cuanto mayor sea este valor, mayor es el incremento de tiempo que será usado y se espera que sea menor el número de iteraciones requeridas para alcanzar el estado estable o flujo permanente. Sin embargo, es más probable que surjan inestabilidades no lineales, que llevan a episodios más frecuentes de reducción del paso del tiempo seguido por incrementos graduales.

Dado lo anterior se recomiendan algunos pasos para estabilizar la solución (**Solution Change >0.00001**):

1. Cambiar el tipo de Jacobiano de analítico a numérico. Esto se logra por medio del comando *Options/Solver Options*.
2. Cambiar la difusividad de remolino.
3. Refinar la malla computacional en el área problema. Esto se logra por medio de la adición de nuevos nodos con el comando *Mesh Edit*.
4. Relocalizar o revisar la frontera de salida.

La casilla “**Log File Name**” es el nombre del archivo de texto en donde se escribe un registro de la ejecución del programa. Dicho registro incluye el tiempo, el incremento de tiempo y el cambio en la solución para cada iteración. Si una iteración es rechazada, se registra información adicional que puede ayudar a localizar el problema. El “Log File” nunca se sobrescribe y este reside en el mismo directorio que el archivo *.cdg.

“**Total Inflow**” y “**Total Outflow**” son las casillas que registran el caudal de entrada y salida del modelo respectivamente. Una característica de la condición de estado estable o flujo permanente es que estos dos valores deberían ser iguales. En la práctica, debido a errores de aproximación, puede que no sean exactamente iguales. En su lugar, habrá una ligera diferencia (relativo al caudal total) entre estos dos valores. El progreso de la solución hacia el estado estable puede ser observado mediante el seguimiento de estos números. Nótese que en algunos casos el caudal total que se mueve a través del modelo podría no ser igual a el caudal total especificado en la frontera de entrada. Cuando esto ocurre, es debido

generalmente a la localización de la frontera aguas abajo o a que la turbulencia de remolino puede causar entradas adicionales de caudal.

"**Update display every ____ time steps**" se usa para especificar cada cuánto se actualiza la imagen. Ya que el proceso de actualización de la imagen en la pantalla utiliza tiempo de procesamiento del computador, esta casilla puede usarse para limitar el número de veces que se redibuja la solución en la pantalla.

"**Current step #**" realiza un seguimiento del número de iteraciones desde el inicio de la última ejecución.

Luego de que todos estos parámetros han sido establecidos, al presionar el botón "Run" iniciará el proceso de solución. Mientras el modelo está corriendo, el botón cambiará su texto por "Stop", lo cual permite que el usuario detenga el proceso de solución cuando lo desee. Cuando el botón cambia su texto a "Stopping" y las casillas vuelven a estar en blanco quiere decir que el proceso de solución a terminado, no indicando con esto que el modelo a llegado a la convergencia. Es por tanto que se deben revisar lo parámetros de control, los cuales, como se explicó anteriormente son que el caudal de entrada sea máximo un 2% diferente al caudal de salida, así como también que el cambio en la solución (Solution Change) sea menor que 0.00001.

7.2.4 Posprocesamiento de los resultados del modelo Bidimensional River2D

Con el fin de poder realizar el análisis comparativo se procedió a realizar el posprocesamiento de los resultados del modelo bidimensional haciendo uso del algebra de mapas del programa ArcGIS 9.3.

7.2.4.1 Creación del Raster Extensión de inundación

Dado que uno de los resultados comparativos más importantes dentro del presente trabajo es la extensión de la inundación, ésta se extrae con el comando *Display/Dump Water Edge to csv file*, la cual exporta la frontera de inundación en un archivo plano, tal como se puede apreciar en la Figura 7-26.

En dicho archivo aparecen 4 columnas, las cuales contienen las coordenadas x y y de la frontera de inundación. Las dos primeras columnas corresponden a la frontera de la margen izquierda (mirando hacia aguas abajo), mientras que las dos siguientes corresponden a las coordenadas x y y de la margen derecha.

Esta información debe ser ubicada en un archivo en Excel con sólo dos columnas encabezadas por las letras x y y , con el fin de que estos puntos puedan ser importados en ARCGIS por medio de la herramienta *Tools/Add XY Data*, tal como se muestra en la Figura 7-27. En este procedimiento, en la ventana **Add XY Data** se selecciona el archivo que contiene la información y posteriormente se selecciona la hoja donde se encuentra dicha información, punto en el cual luego de presionar el botón *Add* se adicionan en los campos de la ventana **Add XY Data** los encabezados de las columnas x y y , lo cual le indica a ARCGIS en cuál columna de la hoja se encuentran las coordenadas de cada punto sobre la frontera de inundación.

Luego de aceptar por medio del botón OK estos puntos son dibujados en la pantalla en sus respectivas coordenadas, tal como se muestra en la Figura 7-28.

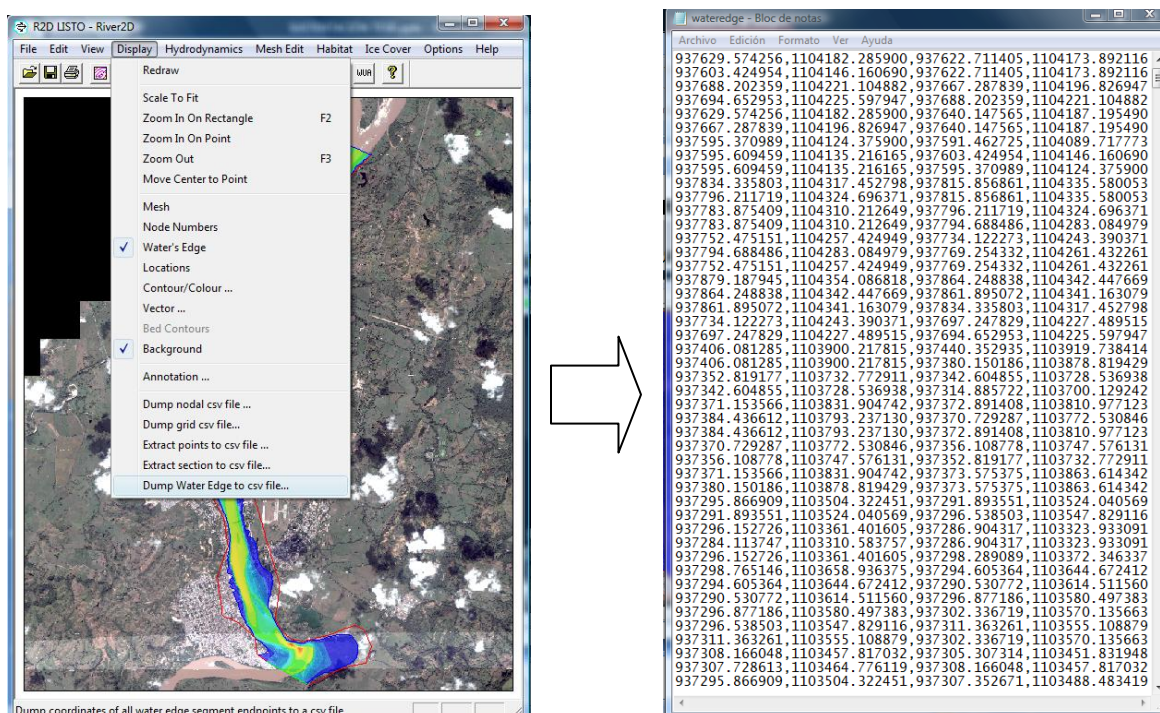


Figura 7-26 Extracción de la frontera de inundación. Modelo River2D.

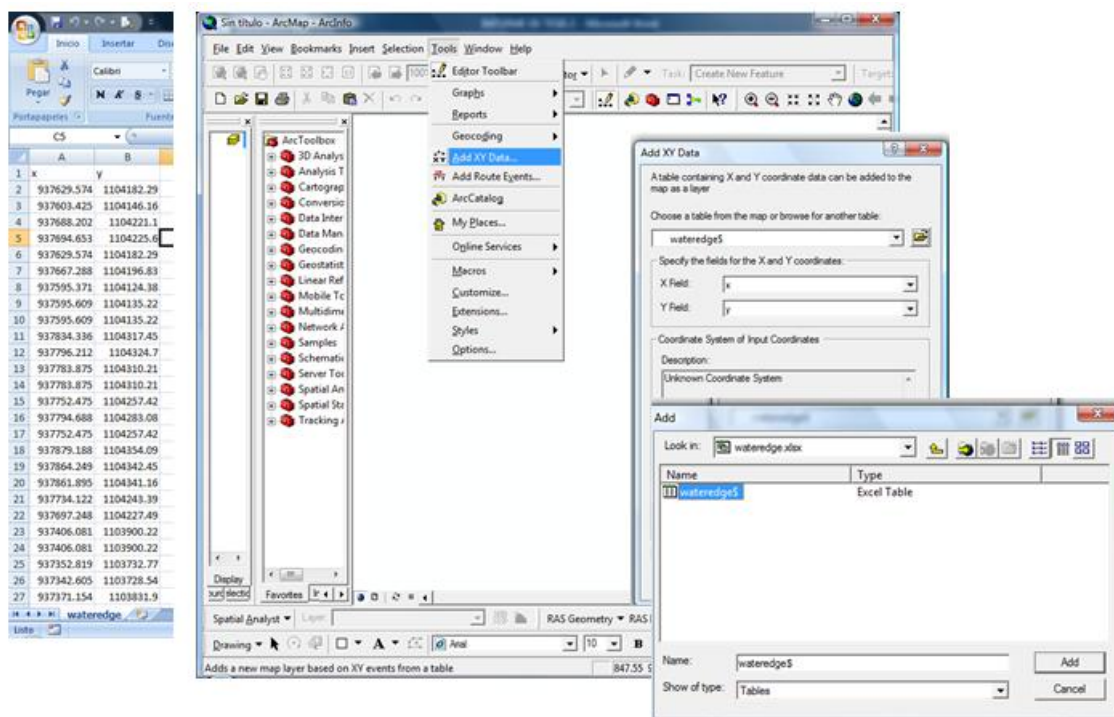


Figura 7-27 Importación de archivo en Excel en ARCGIS

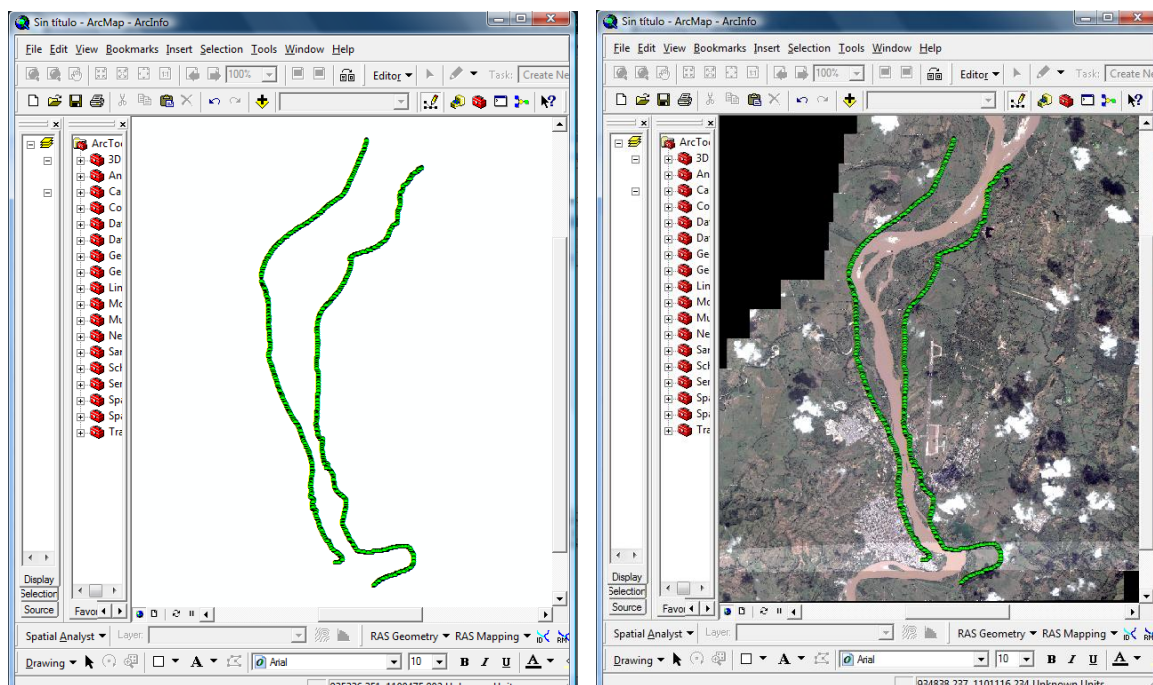


Figura 7-28 Puntos de la frontera de inundación importados en ARCGIS

La frontera computacional así importada debe ser convertida en un polígono y luego en una cobertura tipo Raster, con el fin de poder realizar análisis comparativos de resultados por medio del traslape entre la extensión de inundación generada por el modelo unidimensional y la registrada para el evento de inundación analizado en el presente trabajo. Para esto se generó con *ArcCatalog* un **nuevo shape** del tipo **polígono**, guardándose en la misma ruta de trabajo.

Dicho shape debe ser cargado en ArcGIS con el fin de iniciar el proceso de trazado del polígono de la frontera computacional. En este paso inicia una tarea dispendiosa según el nivel de precisión deseado, el cual para el caso de estudio es alto, dado que se debe trazar el polígono sobre cada punto de la frontera iniciando en la margen izquierda y terminando en el mismo punto donde se inició. Este proceso se muestra paso a paso en la Figura 7-29.

Dado que el análisis comparativo se realiza por medio de píxeles, el polígono generado con el procedimiento anterior debe ser convertido a un archivo tipo **Raster** por medio del **ArcToolBox** de ArcGIS con el comando *Conversion/Polygon to Raster* (Ver Figura 7-30), con un tamaño de pixel de 10 m para el presente caso.

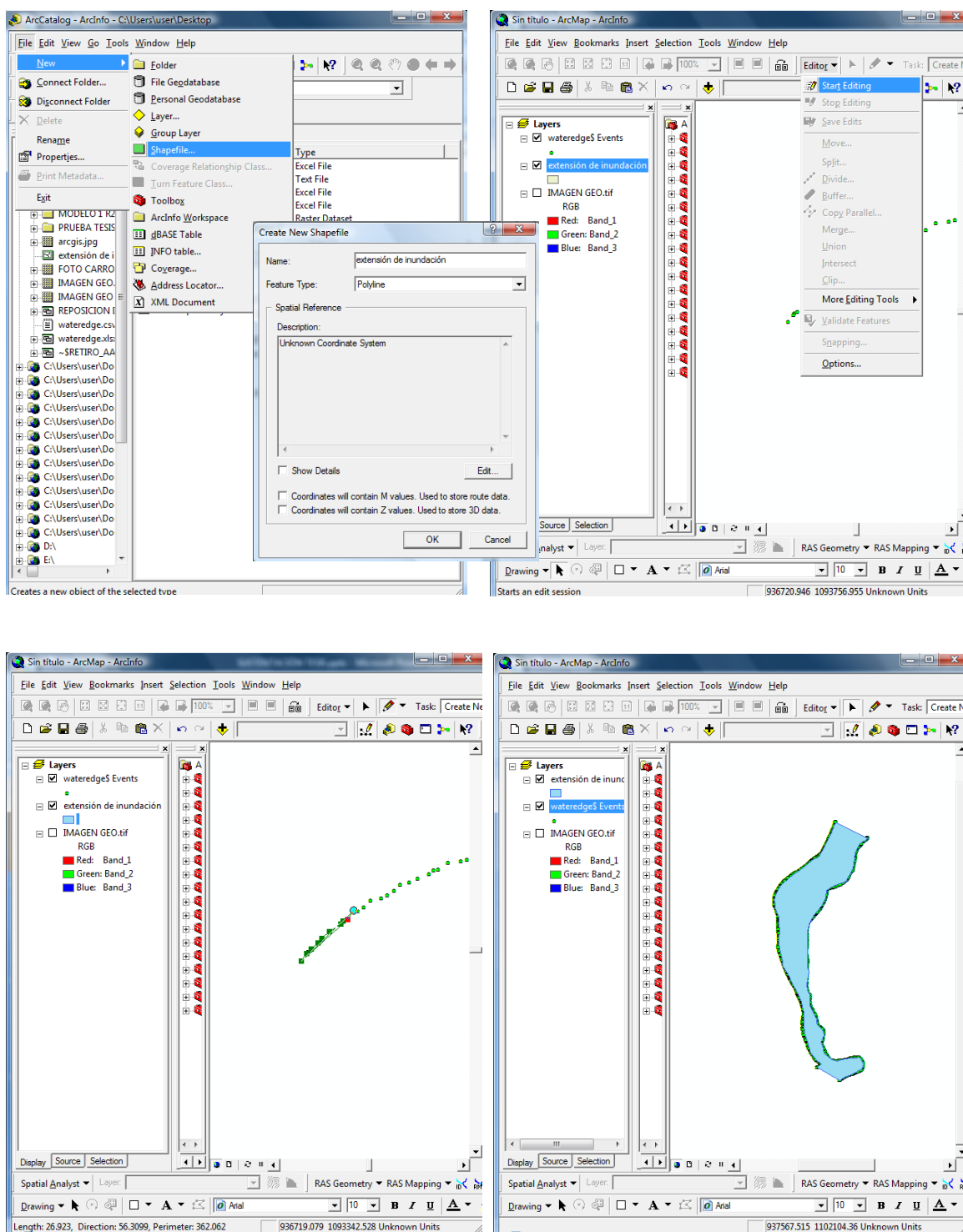


Figura 7-29 Trazado del polígono de extensión de inundación River2D

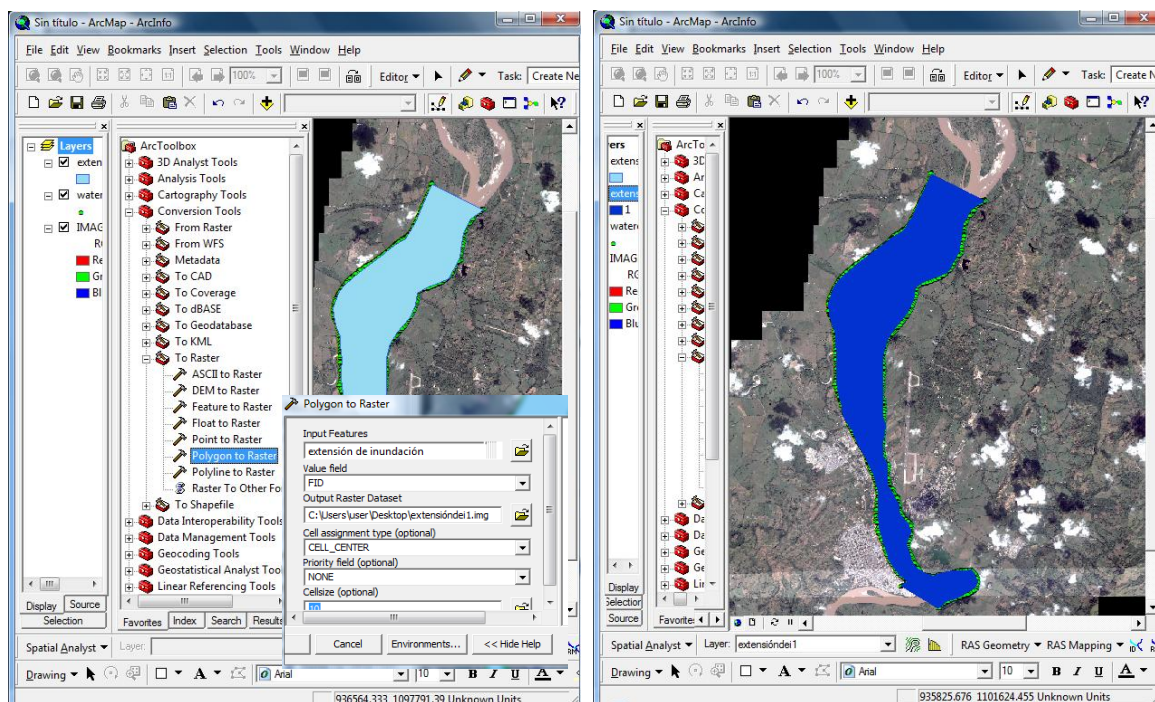


Figura 7-30 Conversión de Polígono a Raster

7.2.4.2 Creación de la superficie de elevación de la lámina de agua

A partir de los resultados obtenidos en River2D se puede también obtener un Modelo Digital de Elevación (MDE) de la superficie de la lámina de agua en ArcGIS con el fin de que éste sea sobrepuesto con el MDT, y de esta manera tener un Modelo Digital que muestre en 3D las zonas inundadas.

Para lo anterior debe desplegarse en River2D la Elevación de la Superficie de la Lámina de Agua (WSE por sus siglas en inglés) por medio del comando *Display/Contour/Color* (Ver Figura 7-31). Esto con el fin de que al hacer uso de la herramienta de extracción de información de nodos, se obtenga la información de la cota de la lámina de agua, ya que con ésta es con la cual se genera el MDE de la superficie de la lámina de agua en ArcGIS.

Lo anterior se logra al exportar la información de los nodos a través del comando *Display/Dump nodal csv file*, con el cual se genera un archivo de texto con la siguiente información por línea: ID, coordenada X, coordenada Y y las Cotas de la superficie de la lámina de agua (WSE), en donde cada línea corresponde a un nodo. Por tanto para el caso de estudio aparecen 13046 líneas respectivamente.

Luego de generar el archivo, éste debe ser abierto en Excel y se debe colocar el encabezado de ID, X, Y y WSE a cada columna de datos respectivamente, con el fin de que éste sea cargado tal como se explicó en el numeral anterior.

Cuando este archivo es cargado en ArcGIS debe ser convertido a **shape** para que pueda ser transformado y manipulado, lo cual se logra por medio del comando *Data/Export Data* y se guarda como archivo *.shp (Ver Figura 7-33).

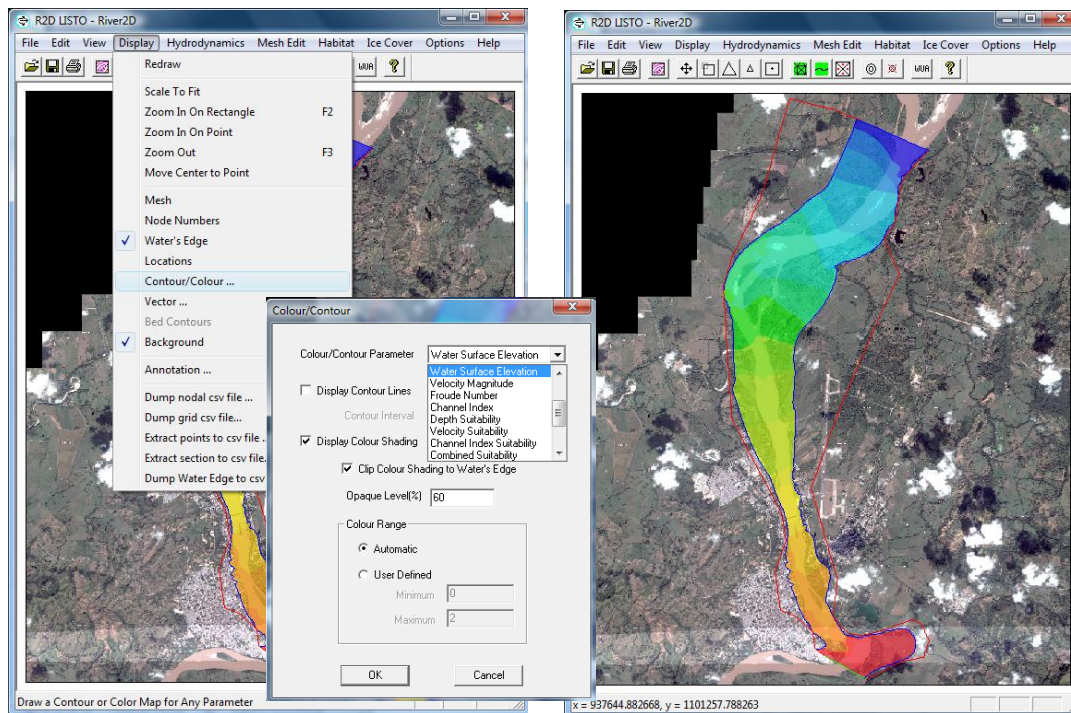


Figura 7-31 Despliegue de la superficie de la lámina de agua en River2D

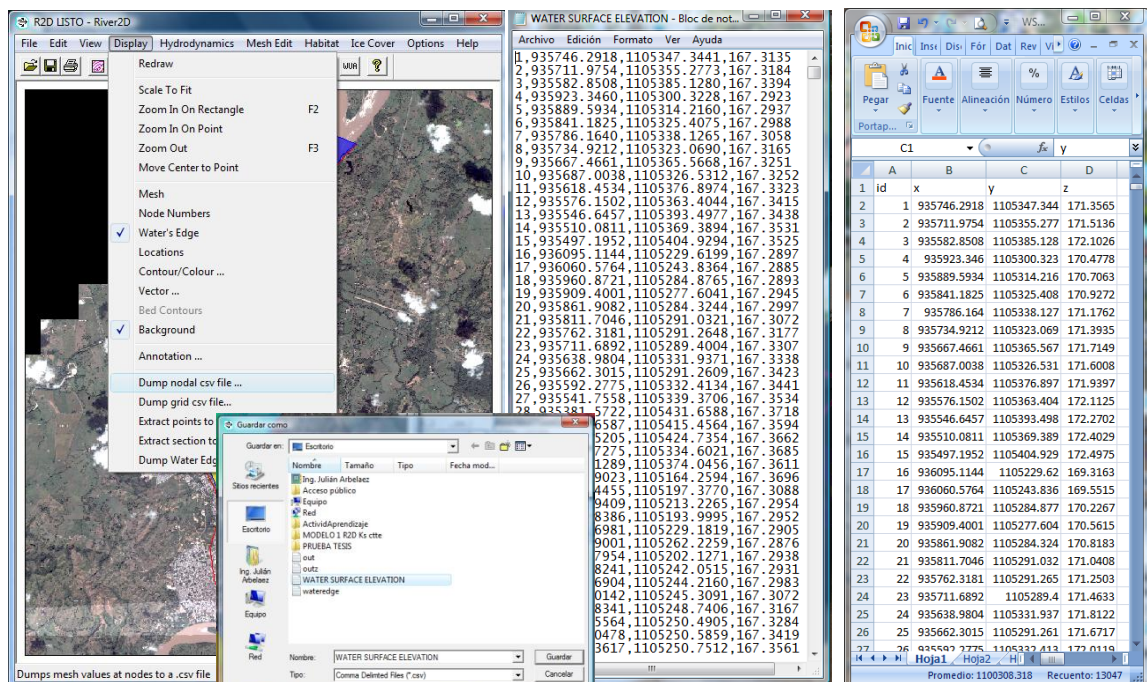


Figura 7-32 Extracción de la información de la superficie de la lámina de agua (River2D)

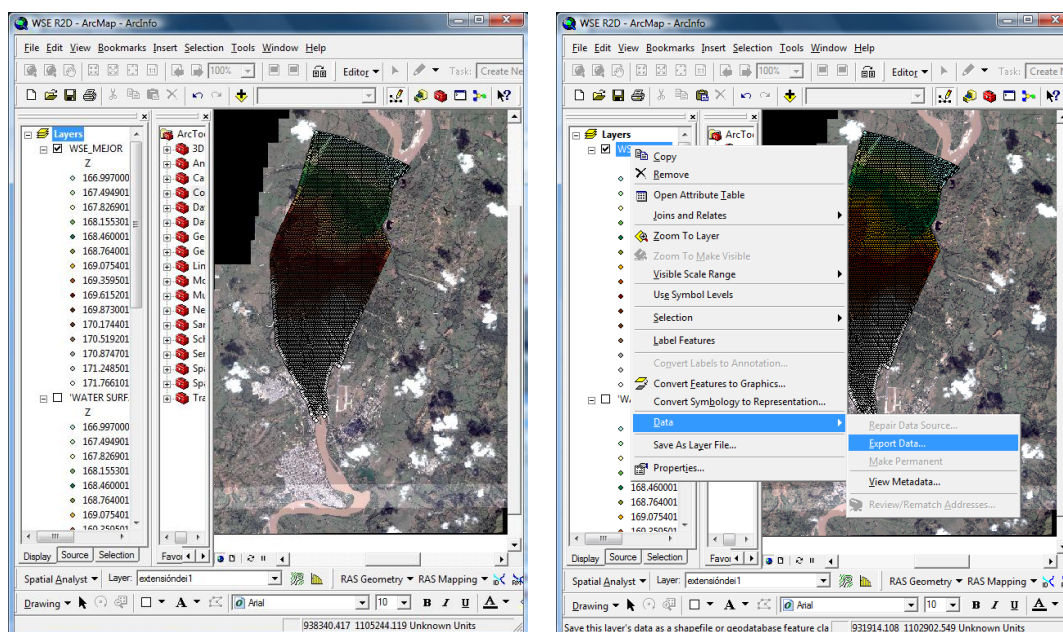


Figura 7-33 Nube de puntos de la Elevación de la lámina de agua

Luego de realizar la conversión con esta nube de puntos ya convertida a shape se procede a generar el Modelo Digital de Elevación (MDE) de la lámina de agua en formato TIN, lo cual se logra por medio del *Toolbox 3D Analyst/Create/Modify TIN/Create TIN from features*. En este punto se selecciona en ArcGIS el archivo de la nube de puntos y posteriormente se selecciona como campo de datos para la elaboración del MDE la cota de la lámina de agua, la cual para el presente caso es z (Ver Figura 7-34).

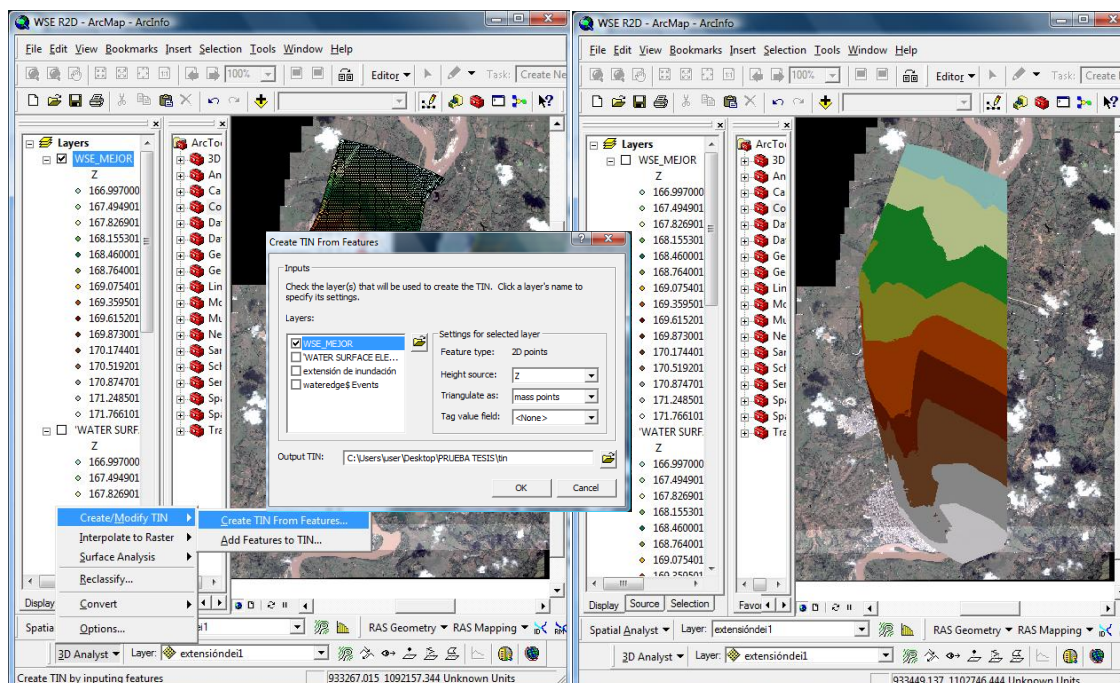


Figura 7-34 Generación del TIN de la altura de la lámina de agua

En la Figura 7-34 se presenta el MDE de la altura de la lámina de agua generado en ARCGIS clasificado por colores. Con el fin de observar en 3D las zonas inundadas se debe hacer uso del complemento ArcScene, en el cual debe ser cargado el MDE con la fotografía sobrepuesta, así como también el MDE de la cota de la lámina de agua, tal como se presenta en la Figura 7-35. En dicha figura puede verse que al cruzar el MDT con el MDE de la cota de la lámina de agua se muestran inundadas unas zonas por las cuales el flujo no pasa, lo cual es debido a que se presenta una diferencia entre el MDT generado en ArcGIS y el MDT generado por el módulo R2D_Bed.

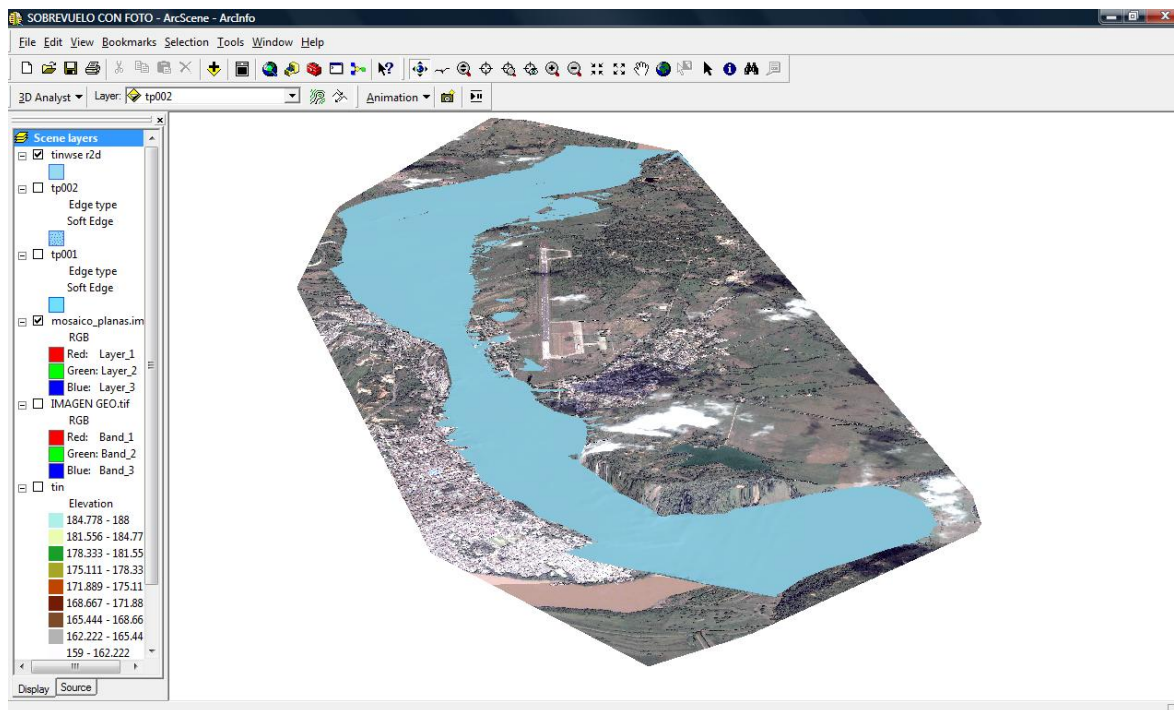


Figura 7-35 MDE de zonas inundadas. Modelo River2D

Lo anterior debe ser tratado con cuidado, ya que puede llevar a conclusiones erróneas en el momento de realizar un análisis de amenaza por inundaciones. Por tanto el proceso de generación del MDT es un paso que debe ser cuidadosamente elaborado y evaluado al momento de realizar este tipo de trabajos.

8 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS

Con el fin de comparar los resultados entre los modelos, cada uno de ellos fue calibrado, es decir, se determinaron los coeficientes de rugosidad respectivos para cada modelo haciendo uso de la curva de calibración de la estación limnigráfica de Puerto Salgar. De otro lado para llevar a cabo el proceso de validación se usó un indicador de la extensión de la llanura de inundación, el cual compara la extensión de inundación modelada respecto a la registrada.

En este numeral se describe detalladamente el proceso de calibración y validación de los modelos hidráulicos.

8.1 CALIBRACIÓN HIDROMÉTRICA

Debido a que no se contó con información del perfil de la lámina de agua a lo largo del tramo de estudio, se decidió realizar la calibración hidrométrica utilizando la relación cota de lámina de agua vs. caudal existente en la estación limnigráfica de Puerto Salgar, la cual se muestra en la Figura 8-1. Dicha curva está elaborada para caudales entre 800 y 6000 m^3/s . La cota del cero de la mira es de 165.92 m.s.n.m.

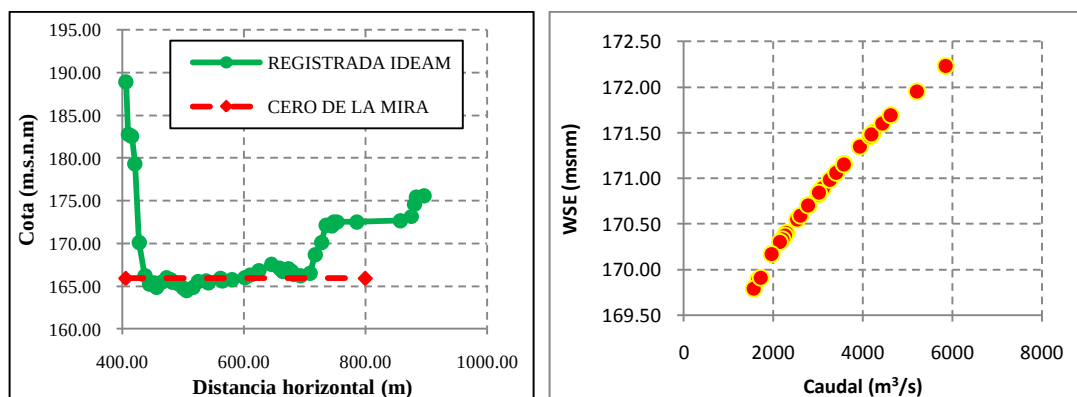


Figura 8-1 Relación cota de lámina de agua a caudal

Cabe aclarar que los aforos registrados en el IDEAM para la elaboración de la gráfica anterior presentan un caudal máximo de **3962.11 m^3/s** , tal como se muestra en la Tabla 8-1, lo cual indica que el caudal a modelar hace parte de los datos extrapolados de la relación caudal cota de lámina de agua. Por tanto es muy probable que existan errores en cuanto a la magnitud del caudal, ya que tal como se puede apreciar en la Figura 8-2, en los eventos en que se presentaron las inundaciones más intensas (finales de mayo de 2008, ver Figura 8-2) la estación queda fuera de servicio.

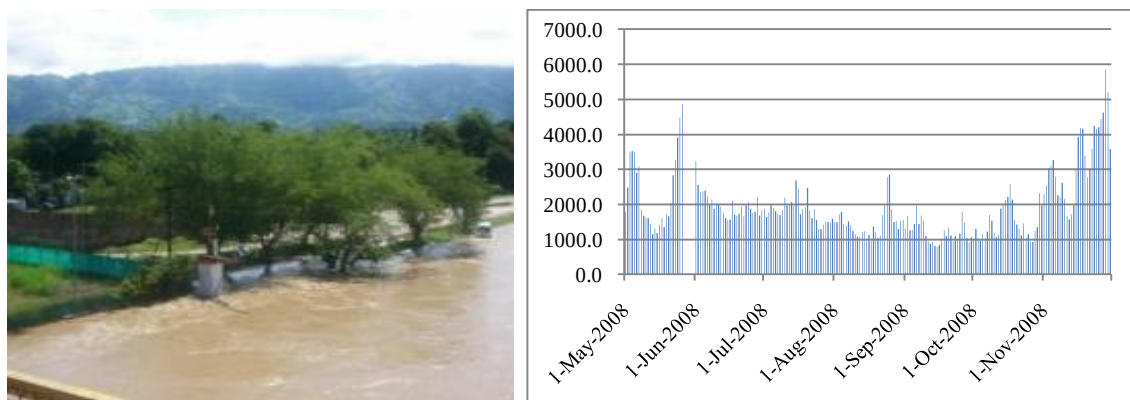


Figura 8-2 Fallas en la estación limnigráfica de Pto Salgar

FECHA	DE	PROCESO	:	3/8/2004	ESTACION	:	2303701	PTO	SALGAR			
LATITUD	528 N	TIPO	EST	LG	DEPTO	CUNDINAMA	FECHA-INST/	1936-ENE				
LONGITUD	7440 W	ENTIDAD	1 IDEAM	MUNICIPIO	PUERTO	SALGAR	FECHA-SUSPENSION					
ELEVACION	168 m,s,n,m	REGIONAL	10 TOLIMA	CORRIENTE	MAGDALENA							
No.	FECHA	NIVEL	ANCHO	AREA	PROFUNDIDAD	VELOCIDAD	CAUDAL	PERIMETRO	RADIO	FACTOR	FACTOR	FACTOR
	aaaaammdd	MEDIO	SECCION	SECCION	MEDIA	MEDIA	TOTAL	MOJADO	HIDRA	GEOMET	HIDRA	CONVER
		(cms)	(mts)	(m2)	(mts)	(m/s)	(m3/s)	(mts)	(mts)			
137	2/15/1998	213	270.950	596.829	2.202	1.163	694.477	272.152	2.192	1.688	0.688	0.000
138	4/3/1998	367	275.300	1,023.194	3.716	1.872	1,915.430	276.985	3.694	2.390	0.783	0.876
139	4/22/1998	358	275.000	950.377	3.455	1.953	1,856.107	276.839	3.432	2.276	0.858	0.884
140	6/20/1998	304	275.200	829.693	3.014	1.599	1,327.211	277.142	2.993	2.077	0.769	0.875
141	9/30/1998	255	273.400	672.209	2.458	1.406	945.233	275.515	2.439	1.812	0.775	0.847
142	11/21/1998	386	275.000	1,030.461	3.747	2.171	2,237.634	277.088	3.718	2.400	0.904	0.897
143	3/29/2000	481	275.600	1,546.944	5.613	2.561	3,962.211	278.572	5.553	3.136	0.816	0.938
144	6/3/2000	397	276.300	1,203.547	4.355	2.185	2,630.507	279.245	4.310	2.648	0.825	0.873
145	9/21/2000	258	273.900	815.500	2.977	1.542	1,258.220	276.659	2.947	2.056	0.750	0.920
146	12/8/2000	244	272.500	736.547	2.702	1.447	1,066.175	274.472	2.683	1.931	0.749	0.888
147	9/23/2001	226	270.200	624.305	2.310	1.281	800.135	271.491	2.299	1.742	0.735	0.885
148	4/24/2002	314	274.600	912.092	3.321	1.632	1,489.445	277.270	3.289	2.212	0.737	0.860
149	4/24/2002	314	274.600	912.092	3.321	1.632	1,489.445	277.270	3.289	2.212	0.737	0.850
150	3/27/2003	281	274.700	816.500	2.972	1.388	1,133.977	276.197	2.956	2.060	0.673	0.850
151	10/2/2003	260	273.100	720.861	2.639	1.368	986.437	274.351	2.627	1.904	0.718	0.850
152	10/4/2003	222	270.600	628.696	2.323	1.206	758.769	271.896	2.312	1.749	0.689	0.850
153	10/5/2003	220	300.000	637.840	2.126	1.097	700.071	300.140	2.125	1.653	0.663	0.850
154	10/12/2003	288	272.500	837.908	3.074	1.496	1,253.538	273.891	3.059	2.107	0.710	0.850

Tabla 8-1 Registro de aforos en la estación puerto salgar

8.1.1 Calibración modelo unidimensional HEC RAS

La calibración del modelo hidráulico HEC RAS se realizó de manera manual y por tanto con el fin de hacer el problema de calibración tratable, el coeficiente de rugosidad se limitó a un valor para el cauce principal y otro para la llanura de inundación, es decir, que estos valores se consideraron constantes a lo largo del tramo de estudio.

Cabe aclarar que el modelo hidráulico HEC RAS utiliza la ecuación de Manning para calcular las pérdidas de energía de una sección a otra, y es bien sabido que el coeficiente de rugosidad n de Manning involucra no solo las pérdidas generadas por la rugosidad de fondo sino también que incluye los efectos causados por las curvaturas del alineamiento del río. Del mismo modo es claro que este coeficiente no es constante en todo el rango de profundidades, sino que varía en función de la profundidad, siendo éste por tanto una dificultad en la modelación hidráulica unidimensional con HEC RAS.

Dado que se elaboraron dos modelos hidráulicos unidimensionales en HEC RAS, cada uno con distinto número de secciones transversales, a continuación se presenta el resultado de calibración para cada uno de ellos.

8.1.1.1 Modelo Hidráulico con 111 secciones transversales

Como se planteó en la implementación de los modelos hidráulicos, con el fin de observar la influencia del número y espaciamiento de las secciones transversales en el modelo hidráulico unidimensional, se elaboró un modelo con 111 secciones transversales (Ver Figura 8-3), las cuales tienen un espaciamiento aproximado de 100 m, con lo cual se obtiene una alta resolución espacial y por ende una buena exactitud respecto a la estimación de la extensión de la inundación.

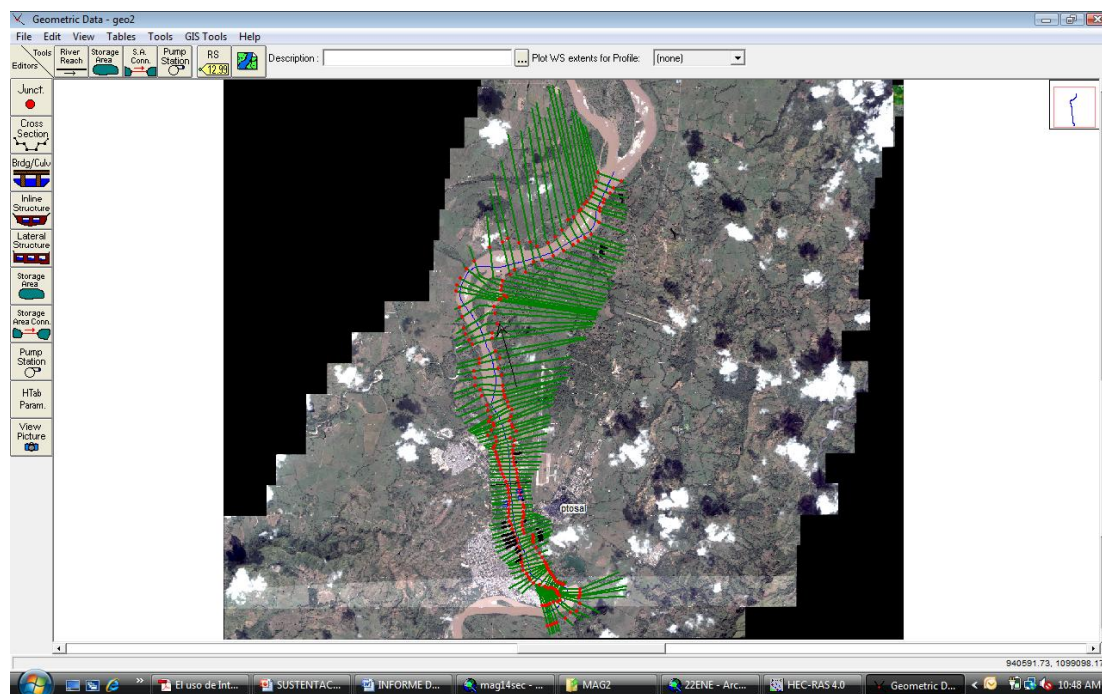


Figura 8-3 Modelo hidráulico con 111 secciones transversales

Inicialmente se hizo una calibración considerando un valor de n de Manning constante para todo el rango de caudales y por ende para todo el rango de profundidades, pero tal como se puede apreciar en la Figura 8-4, a partir de un caudal de $2000 \text{ m}^3/\text{s}$, todos los escenarios planteados se alejan notablemente de lo registrado. Dado lo anterior se procedió clasificar un n de Manning variable para cada rango de caudales.

Se planteó por tanto separar los rangos de caudales y de esta manera obtener un n de Manning variable según la profundidad del flujo, lo cual es de gran ayuda en la elaboración del modelo hidráulico HEC RAS, ya que este permite ingresar una tabla de variación del n de Manning respecto a la profundidad.

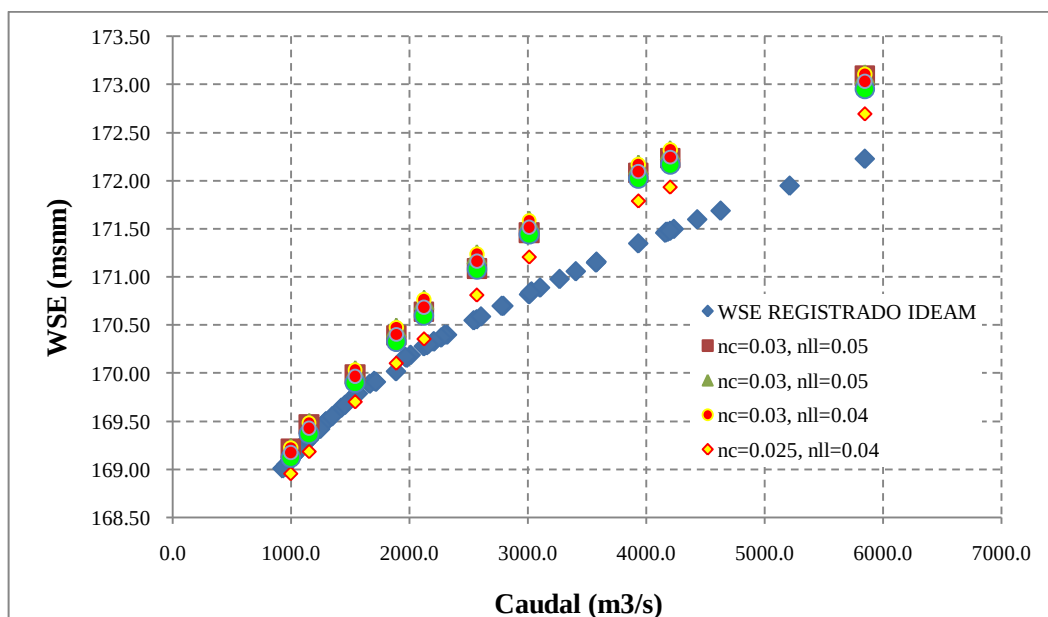


Figura 8-4 Calibración modelo 111secciones transversales considerando n constante

Como resultado de este proceso se encontraron tres rangos de caudales, como se describen a continuación:

1. Rango de $500 \text{ m}^3/\text{s}$ a $1200 \text{ m}^3/\text{s}$: este rango corresponde a alturas de lámina de agua respecto al cero de la mira de 2.28 m a 3.48 m (Ver Figura 8-5). Tal como se puede apreciar. El valor del n de Manning que más ajusta los datos es de 0.028.

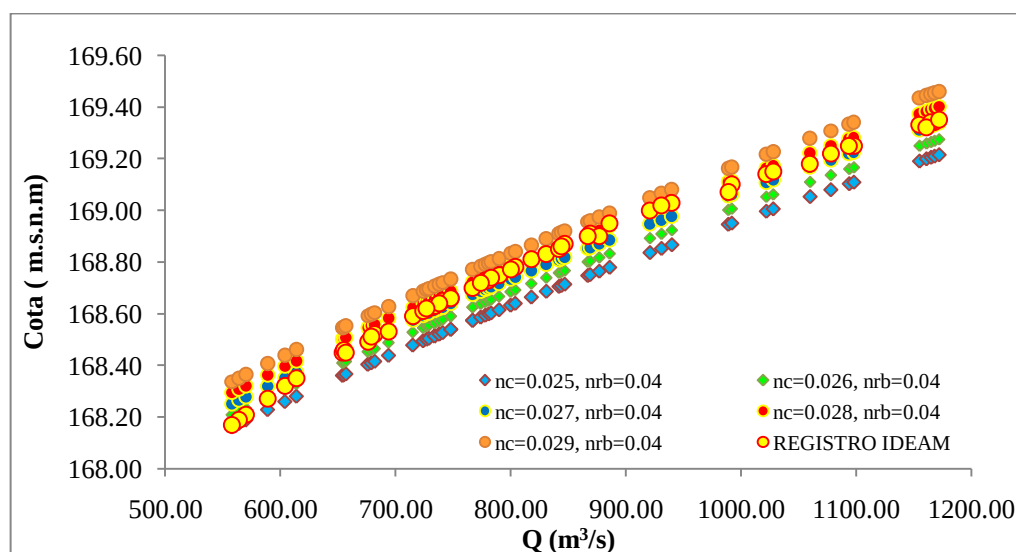


Figura 8-5 Calibración rango de caudal entre 500 y $1200 \text{ m}^3/\text{s}$.

2. Rango de caudales entre 1200 a $4500 \text{ m}^3/\text{s}$: este rango corresponde alturas de lámina de agua respecto al cero de la mira 3.48 m a 5.7 m. Como se puede apreciar en la Figura 8-6, valor de n de Manning que más se ajusta a partir de un caudal de $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ es 0.02.

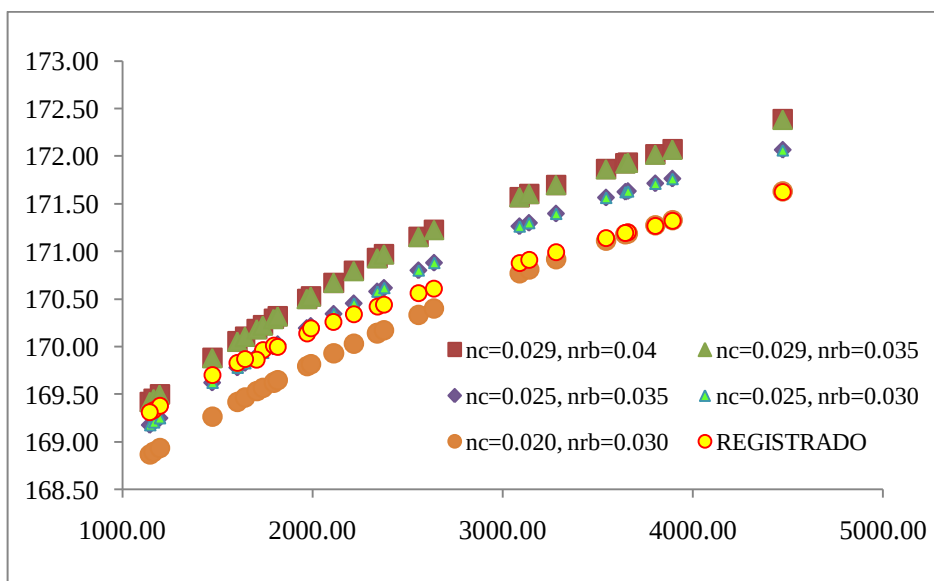


Figura 8-6 Calibración rango de caudal entre 1200 y 4500 m³/s.

Dado que para caudales entre 1200 y 3000 m³/s no se ajusta un único valor n de Manning se procedió a verificar dicho rango tal como se muestra en la Figura 8-7, pero sin encontrar resultado satisfactorio alguno.

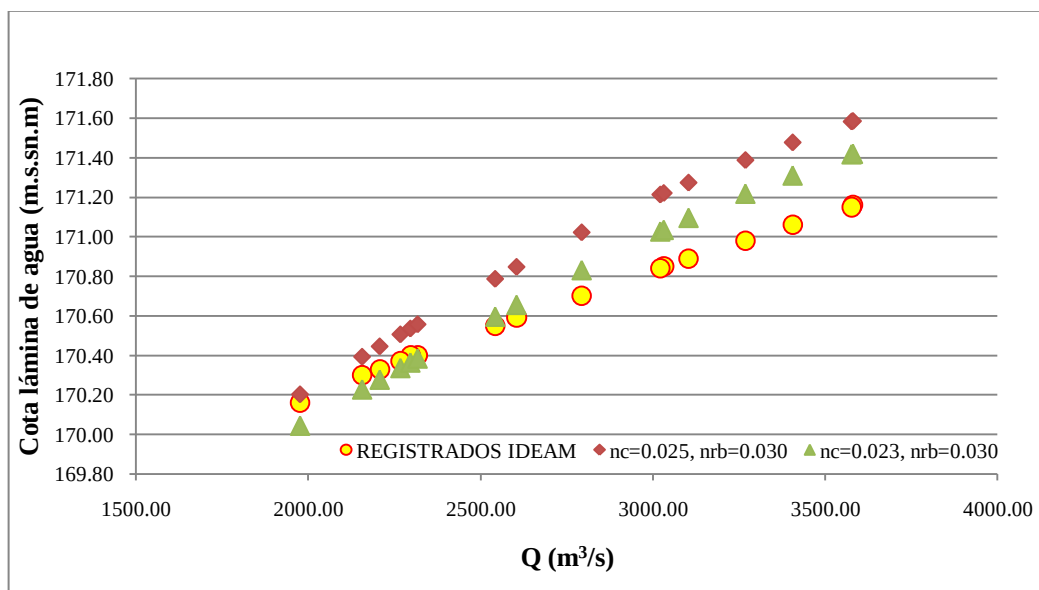


Figura 8-7 Calibración rango de caudal entre 1200 y 3000 m³/s.

3. Rango de caudales entre 3500 a 5848 m³/s: este rango corresponde alturas de lámina de agua respecto al cero de la mira 5.22 m a 6.3 m (Ver Figura 8-8). El valor de n de Manning que más se ajusta a partir de un caudal de 3500 m³/s es 0.02 para el canal principal y 0.03 para la llanura de inundación.

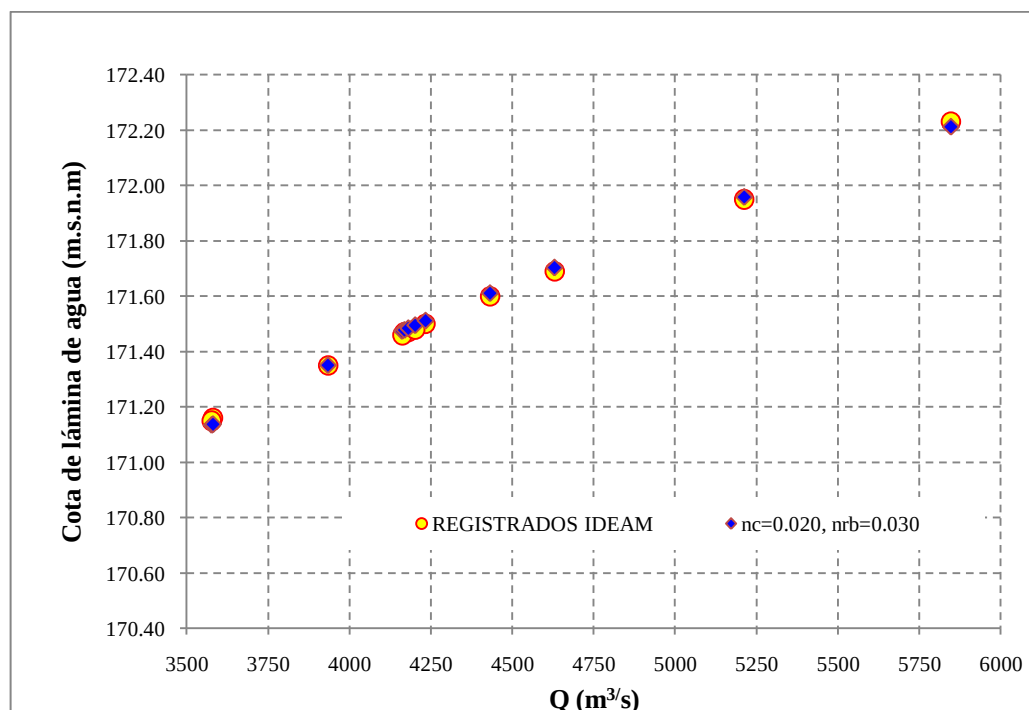


Figura 8-8 Calibración rango de caudal entre 3500 y 5848 m³/s.

De acuerdo con los resultados anteriores para el caso del modelo con 111 secciones transversales no se puede determinar un valor de n de Manning único para todo el rango de caudales que se pueden presentar en el tramo de estudio. Por tanto en la Tabla 8-2 se presenta el resumen de valores de n de Manning para los rangos de caudal analizados.

Rango de caudales (m³/s)	n de Manning
500 – 1200	0.028
1200 - 3500	0.023-0.025
3500 - 6000	Cauce = 0.020 Llanura de inundación =0.03

Tabla 8-2 Resultados de calibración n variable

Dada esta variación del n de Manning con el caudal y por ende con la altura de lámina de agua, se procedió a evaluar el modelo hidráulico obteniéndose una inestabilidad numérica como se muestra en la Figura 8-9.

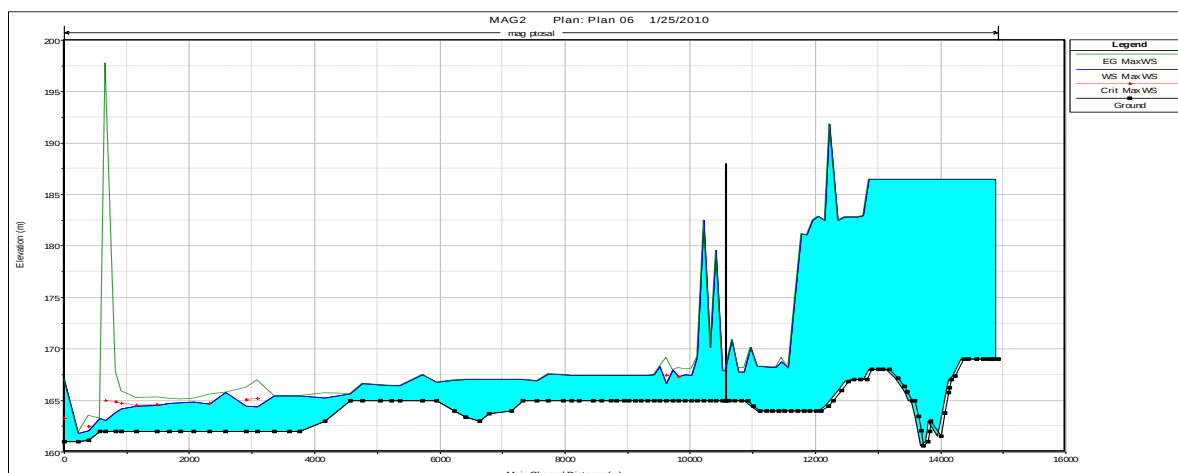


Figura 8-9 Inestabilidad numérica bajo suposición de n variable

Debido a esta inestabilidad y dado que el interés es evaluar el evento de inundación para el caudal de $5848 \text{ m}^3/\text{s}$ se decidió tomar como valores de n de Manning los encontrados para el rango de caudales entre 3500 y $6000 \text{ m}^3/\text{s}$ (Ver Tabla 8-2).

8.1.1.2 Modelo Hidráulico con 14 secciones transversales

De otro lado se elaboró un modelo hidráulico unidimensional con 14 secciones transversales (Ver Figura 8-10), las cuales tienen un espaciamiento aproximado de 1000 m. Dichas secciones transversales fueron levantadas por una comisión del IDEAM en el segundo semestre del año 2008. Es importante aclarar que como se planteó en el numeral 6.1, estas 14 secciones transversales hicieron parte de la información utilizada para la elaboración del MDT a partir del cual se elaboró el modelo hidráulico de 111 secciones transversales así como también el modelo bidimensional.

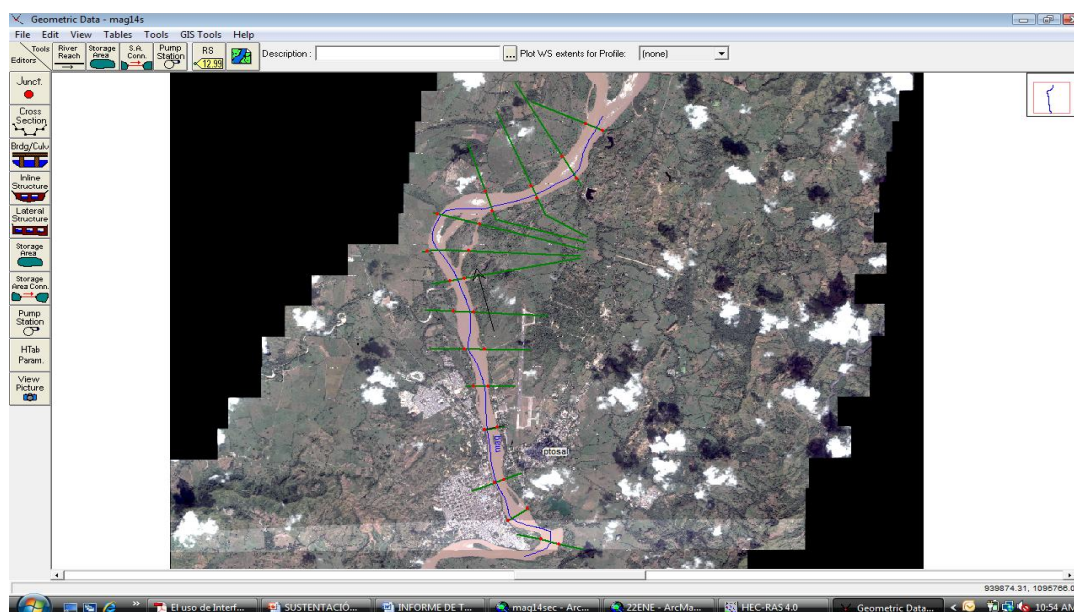


Figura 8-10 Modelo hidráulico con 14 secciones transversales

El proceso de calibración de este modelo se llevó a cabo para todo el rango de caudales, y a diferencia de la calibración del modelo de 111 secciones transversales, se obtuvo un valor de n de Manning constante para todo el rango de caudales.

Como puede apreciarse en la Figura 8-11, el n de Manning que presentó el mejor ajuste a las cotas de lámina de agua registradas fue **0.022** para el cauce principal. Lo anterior puede verificarse al observar la gráfica de medida de desempeño (Ver Figura 8-12) que relaciona el coeficiente de determinación R^2 con el valor del n de Manning.

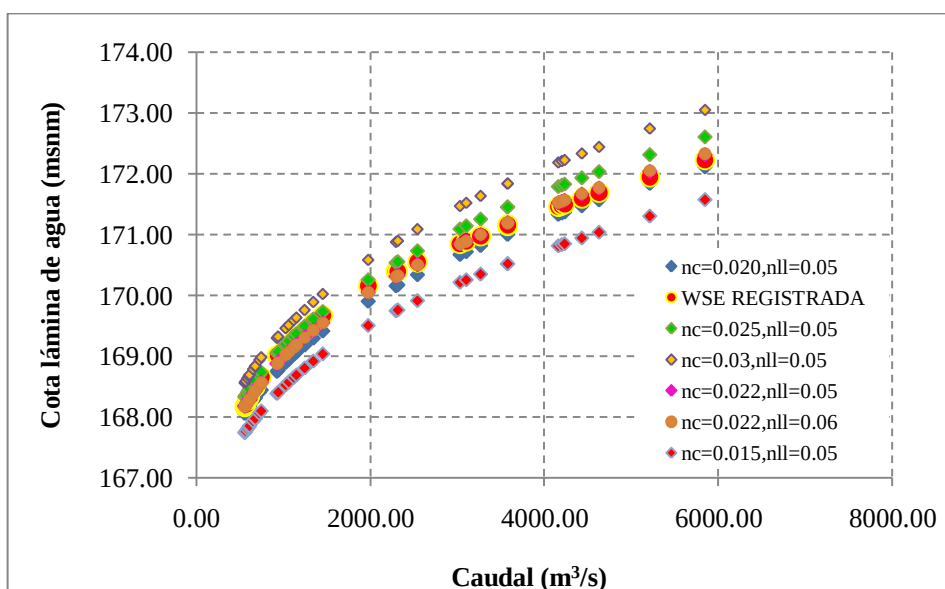


Figura 8-11 Calibración modelo con 14 secciones transversales

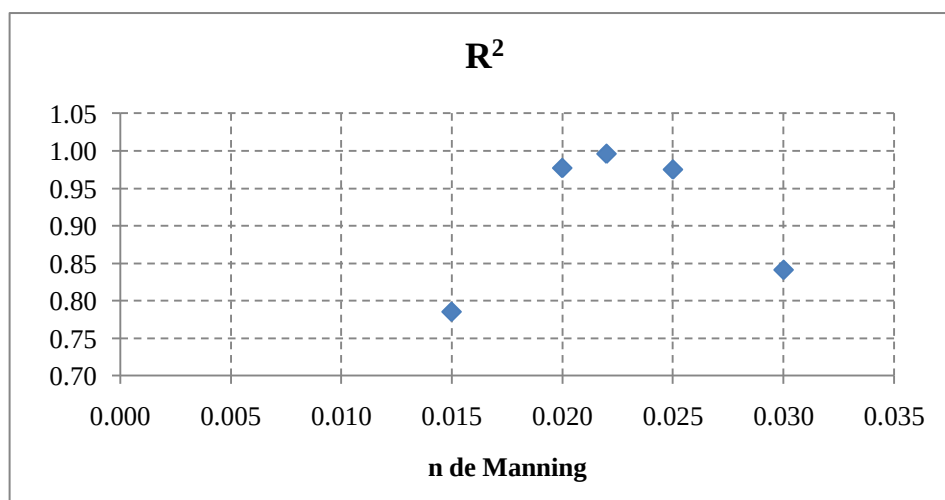


Figura 8-12 Medida de desempeño de la calibración

Se puede evidenciar en este proceso de calibración que el número de secciones transversales influye sobre el valor del coeficiente de rugosidad n de Manning y por tanto es de esperarse que también influya en la representación gráfica de la extensión de inundación, lo cual es verificado en el proceso de validación que se presenta en el siguiente numeral.

8.2 VALIDACIÓN DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS

La evaluación de la capacidad de los modelos para explicar la extensión de la inundación se realizó mediante la comparación de la huella de inundación reconstruida (Ver numeral 6.3), y la generada con los modelos hidráulicos. Se aplicó del siguiente criterio de bondad de ajuste, el cual ha sido aplicado con buenos resultados en otros estudios de calibración (Horrit & Bates, 2002):

$$F = \frac{Num(S_{mod} \cap S_{obs})}{Num(S_{mod} \cup S_{obs})} \times 100$$

Donde:

S_{mod} es el conjunto del dominio de las subregiones (pixeles, elementos o celdas) que han sido determinados como inundados en el modelo.

S_{obs} es el conjunto del dominio de las subregiones (pixeles, elementos o celdas) que han sido observados como inundados en la imagen satelital.

$Num(*)$ denota el número de miembros del conjunto.

Dado lo anterior F varía entre 0, para un modelo donde no hubo traslape entre lo modelado y lo observado de áreas inundadas y 100 para un modelo donde esto coincide perfectamente.

8.2.1 Validación Modelo Hidráulico Unidimensional

Para la aplicación del criterio de bondad de ajuste F se hizo uso del algebra de mapas del programa ArcGIS 9.3, con el módulo HEC GeoRAS, el cual exporta los resultados de HEC RAS al programa ARCGIS en formato Raster con el fin de realizar las operaciones de intersección y unión que requiere la aplicación del criterio de bondad de ajuste.

8.2.1.1 Modelo con 14 secciones transversales

Los resultados gráficos obtenidos para el modelo con 14 secciones transversales se presentan en la Figura 8-13. En dicha tabla se aprecia claramente que la extensión modelada queda exactamente embebida en la extensión de inundación registrada.

Lo anterior indica que en la elaboración de este modelo el espacio computacional seleccionado por medio de las secciones transversales, fue inferior que lo requerido para realizar el análisis, es decir, solo se está haciendo uso de la información levantada por el IDEAM, esto con el fin de mostrar que esta información es insuficiente para realizar un buen análisis de inundaciones.

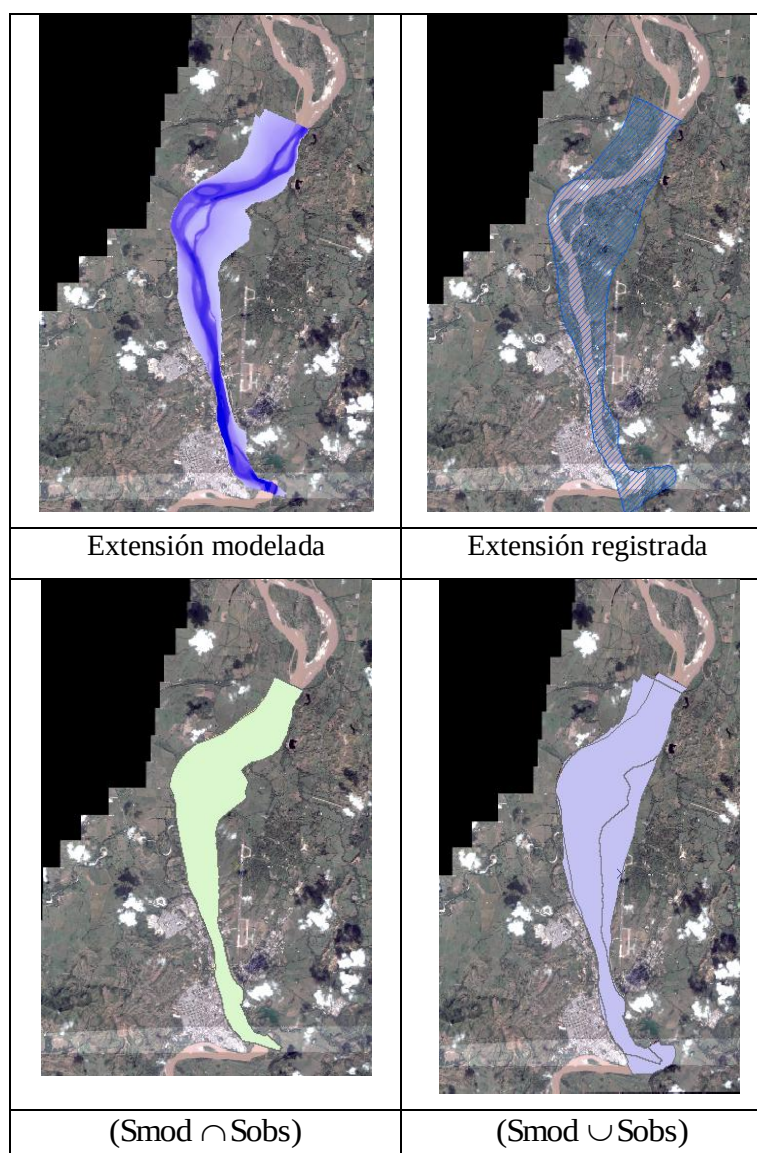


Figura 8-13 Aplicación del criterio de bondad y ajuste modelo con 14 secciones transversales

El resultado numérico luego de aplicar el criterio de bondad de ajuste F , el cual indica el número de pixeles registrados como inundados que fueron perfectamente modelados por el modelo de 14 secciones transversales se presenta en la Tabla 8-3.

$Num (S_{mod} \cap S_{obs})$	$Num (S_{mod} \cup S_{obs})$
442897	484992
$F = 91.3\%$	

Tabla 8-3 Resultados de F para el modelo de 14 secciones transversales

Tal como se puede apreciar en la Tabla 8-3 el número de pixeles interceptados, es decir el número de pixeles que se registraron como inundados y fueron efectivamente modelados como inundados es muy cercano a lo registrado. Pero este valor no se puede tomar como

absoluto para realizar el análisis comparativo, ya que tal como se puede apreciar en la Figura 8-14 la frontera de inundación modelada y registrada no coincide apreciablemente, por tanto el hecho de que se haya alcanzado un valor de F por encima del 90% radica en que tal como se expresó anteriormente, la extensión modelada quedó perfectamente embebida al interior de la extensión de inundación registrada.

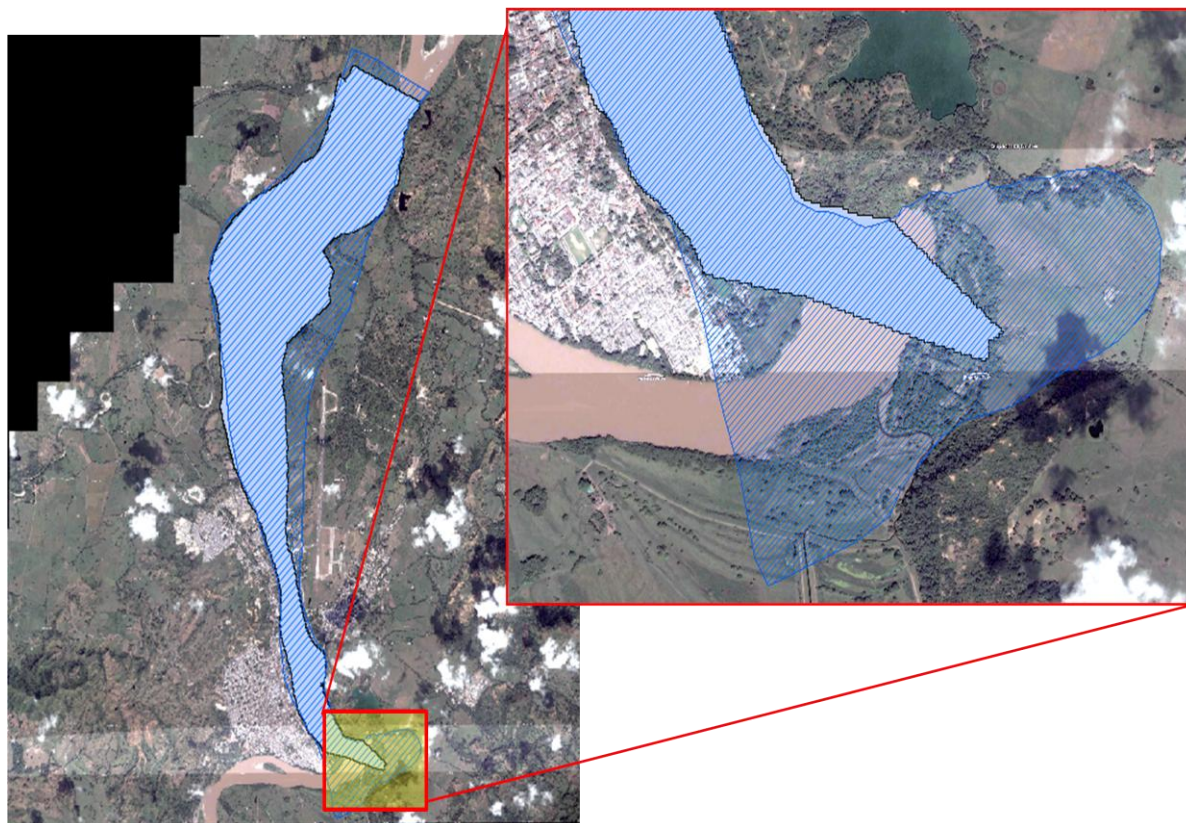


Figura 8-14 Extensión de la inundación modelo con 14 secciones transversales

Con el fin de observar una imagen en 3D de la extensión de la inundación se presenta en la Figura 8-15 el resultado del modelo de 14 secciones transversales sobre el Modelo Digital del Terreno en la parte superior de la figura. Adicionalmente en la parte inferior se presenta el MDT con la imagen satelital sobrepuesta y el MDE del evento de inundación modelado, de tal manera que puede observarse claramente cuales son las áreas inundadas.

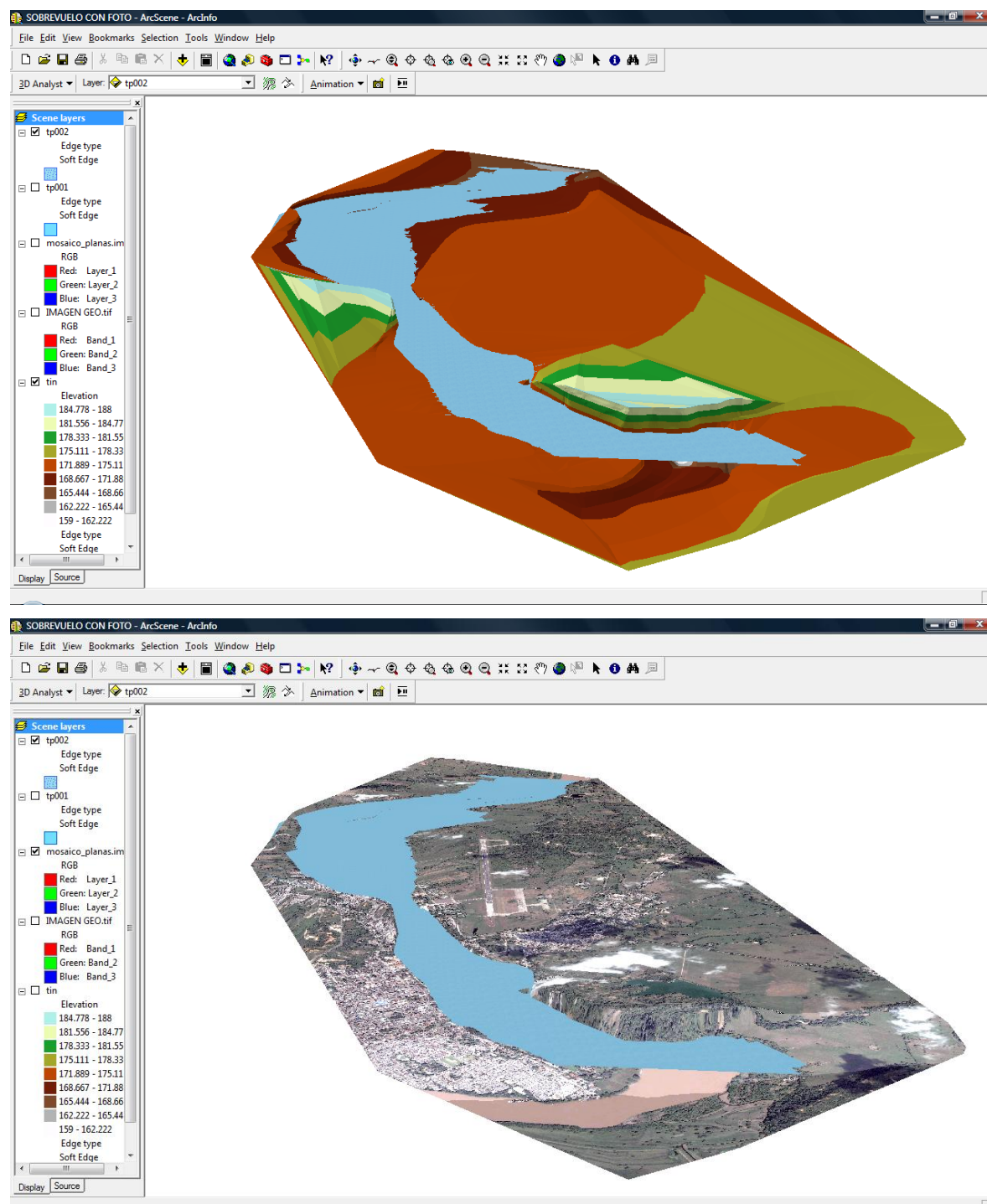


Figura 8-15 Modelo 3D de la extensión de la inundación para el modelo de 14 secciones.

8.2.1.2 Modelo con 111 secciones transversales

Los resultados gráficos obtenidos para el modelo con 111 secciones transversales se presentan en la Figura 8-16. En dicha figura se puede apreciar que el modelo presenta una inundación más extensa que la registrada, lo cual es resultado del trazado de las secciones

transversales, ya que en la frontera de salida se presenta una desviación del flujo en sentido noroccidente. Lo anterior no implica que este modelo no represente bien la extensión de inundación registrada sino que el espacio computacional seleccionado por medio de las secciones transversales fue más extenso que lo requerido para realizar el análisis.

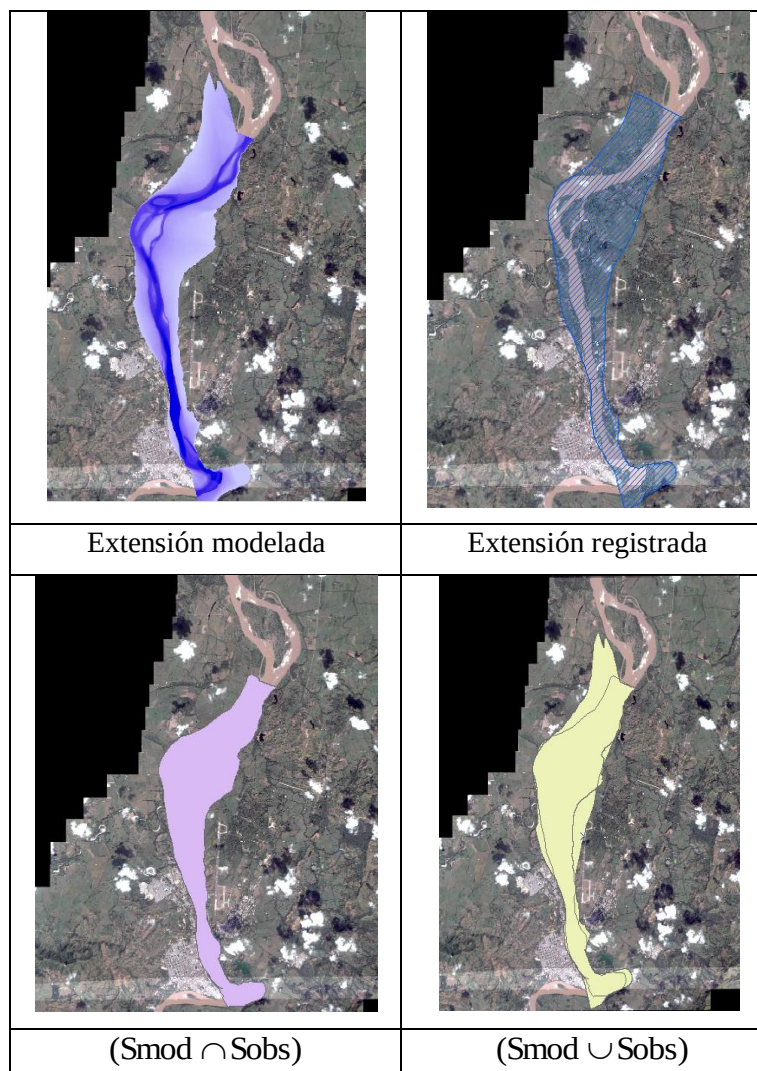


Figura 8-16 Aplicación del criterio de bondad de ajuste F modelo 111 secciones transversales

El resultado numérico luego de aplicar el criterio de bondad de ajuste F , se presenta en la Tabla 8-4.

$Num (S_{mod} \cap S_{obs})$	$Num (S_{mod} \cup S_{obs})$
510761	576126
$F = 89 \%$	

Tabla 8-4 Resultados F para el modelo de 111 secciones transversales

Tal como se puede apreciar en la Tabla 8-4 el número de píxeles interceptados, es decir el número de píxeles que se registraron como inundados y fueron efectivamente modelados como inundados es bastante alto, y como se puede apreciar en la Figura 8-17 la extensión de la inundación es prácticamente la misma. El hecho de que no se haya alcanzado un valor de F por encima del 90% radica en el extremo noroccidental del resultado del modelo, ya que debido a que se trazaron las secciones transversales por fuera de la extensión de inundación registrada hacia aguas abajo, el flujo se extendió hacia este sector quedando por fuera de la frontera de salida registrada.

Lo anterior se puede ver más claramente en la Figura 8-17, en el extremo noroccidental de la imagen resaltado por el recuadro amarillo.

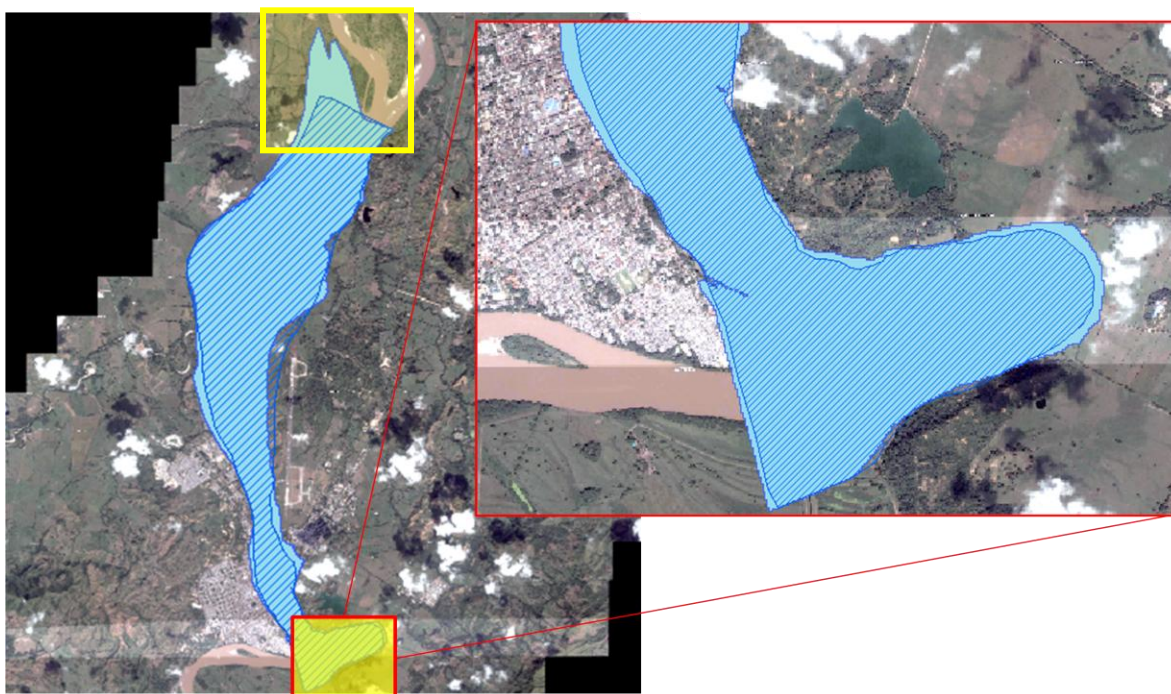


Figura 8-17 Extensión de la inundación del modelo de 111 secciones transversales.

Con el fin de observar una imagen en 3D de la extensión de la inundación se presenta en la Figura 8-18 el resultado del modelo de 111 secciones transversales sobre el Modelo Digital del Terreno en la parte superior de la figura. Adicionalmente en la parte inferior se presenta el MDT con la imagen satelital sobrepuesta y el MDE del evento de inundación modelado, de tal manera que puede observarse claramente cuáles son las áreas inundadas.

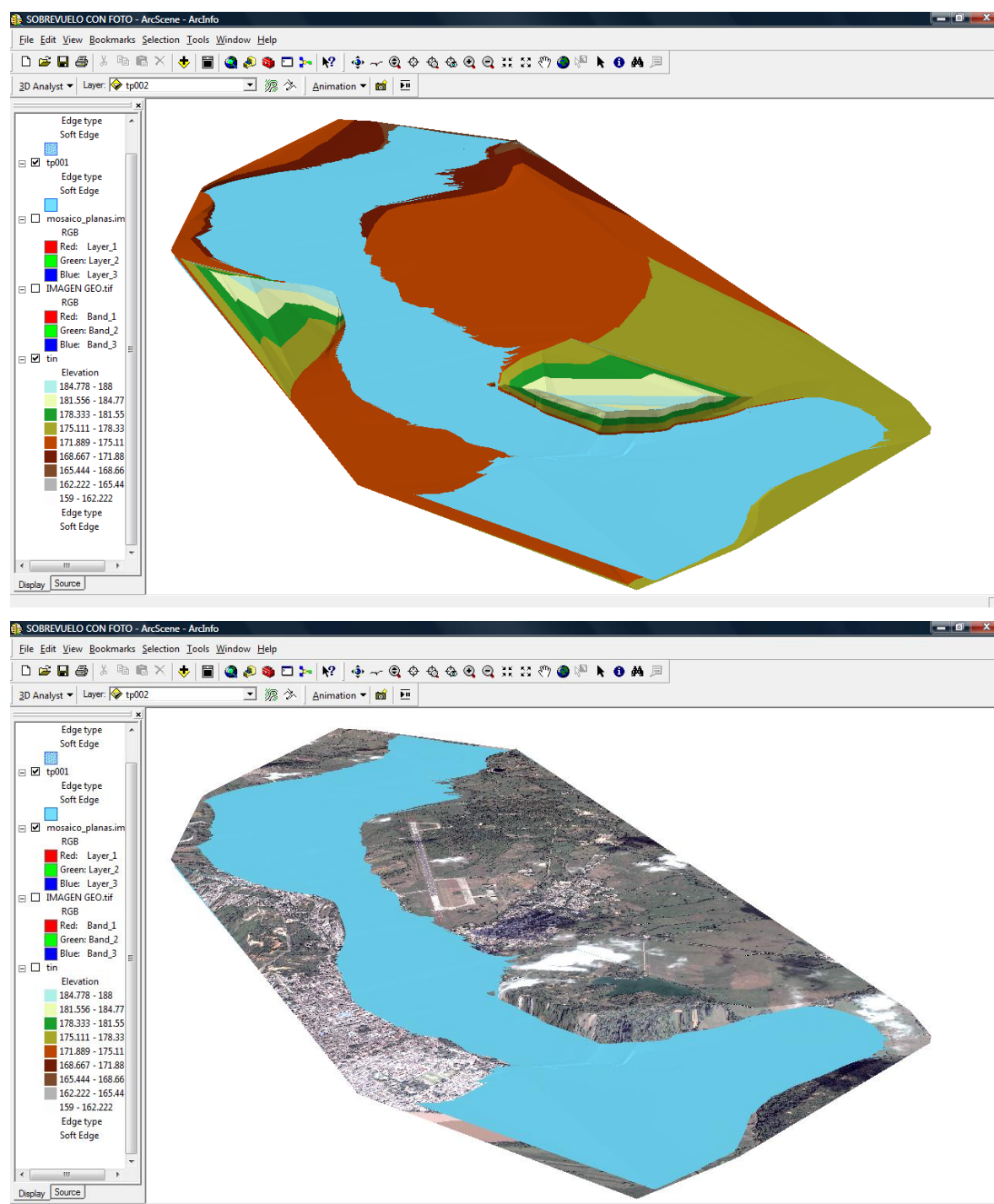


Figura 8-18 Modelo 3D de la extensión de la inundación para el modelo de 111 secciones.

En este punto cabe resaltar una de las herramientas que tiene ARCGIS, y es la posibilidad de realizar sobrevuelos sobre el modelo tridimensional y así poder identificar posibles errores, ya sea en el MDT o en el modelo hidráulico (Ver Figura 8-19).

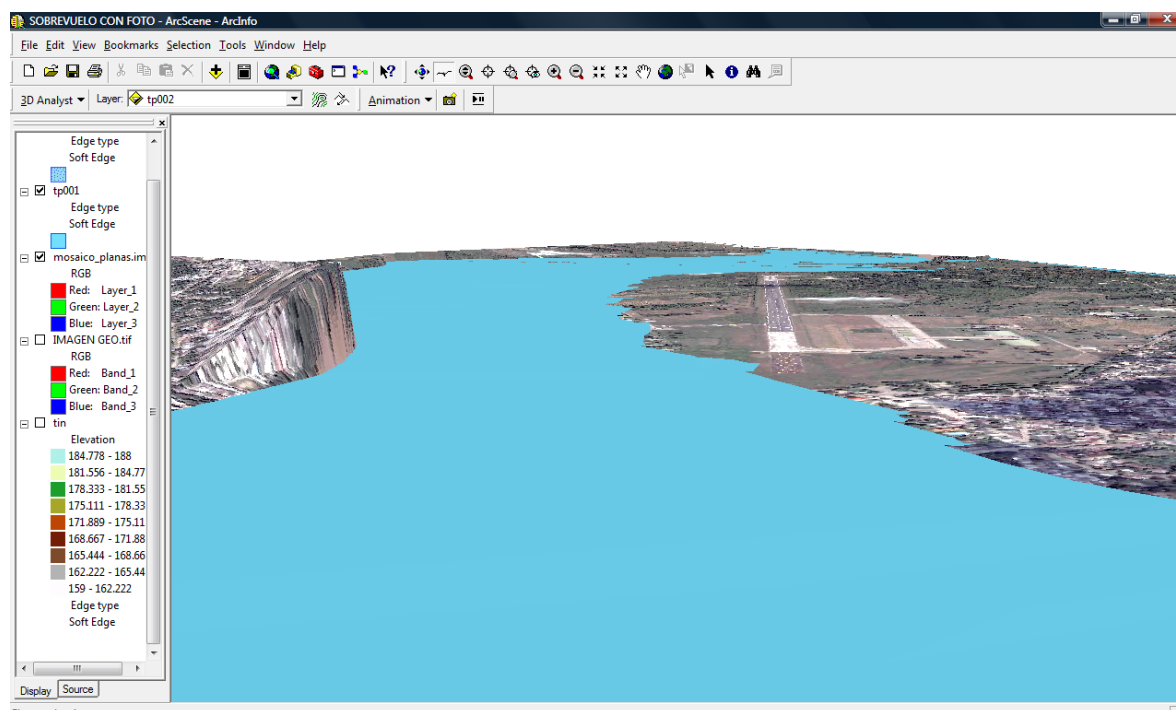


Figura 8-19 Sobrevuelo sobre el modelo tridimensional de la inundación.

8.2.2 Validación modelo hidráulico bidimensional

Como ya se explicó los resultados fueron exportados a ArcGIS en donde fueron procesados para obtener el MDE de la cota de la lámina de agua en formato raster, y así comparar los píxeles modelados como inundados y aplicar el criterio de bondad de ajuste F.

8.2.2.1 Modelo hidráulico bidimensional con Ks uniformemente distribuido

Los resultados gráficos obtenidos para el modelo bidimensional River2D con rugosidad uniformemente distribuida se presentan en la Figura 8-20. En dicha tabla se puede apreciar el grado de ajuste que se logró obtener con el modelo bidimensional River2D, ya que toda la extensión de inundación modelada quedó embebida en la extensión de inundación registrada, presentándose una diferencia en la zona norte del aeropuerto, lo cual puede ser debido al hecho de que el MDT generado por el módulo R2D_Bed es distinto al generado en ArcGIS.

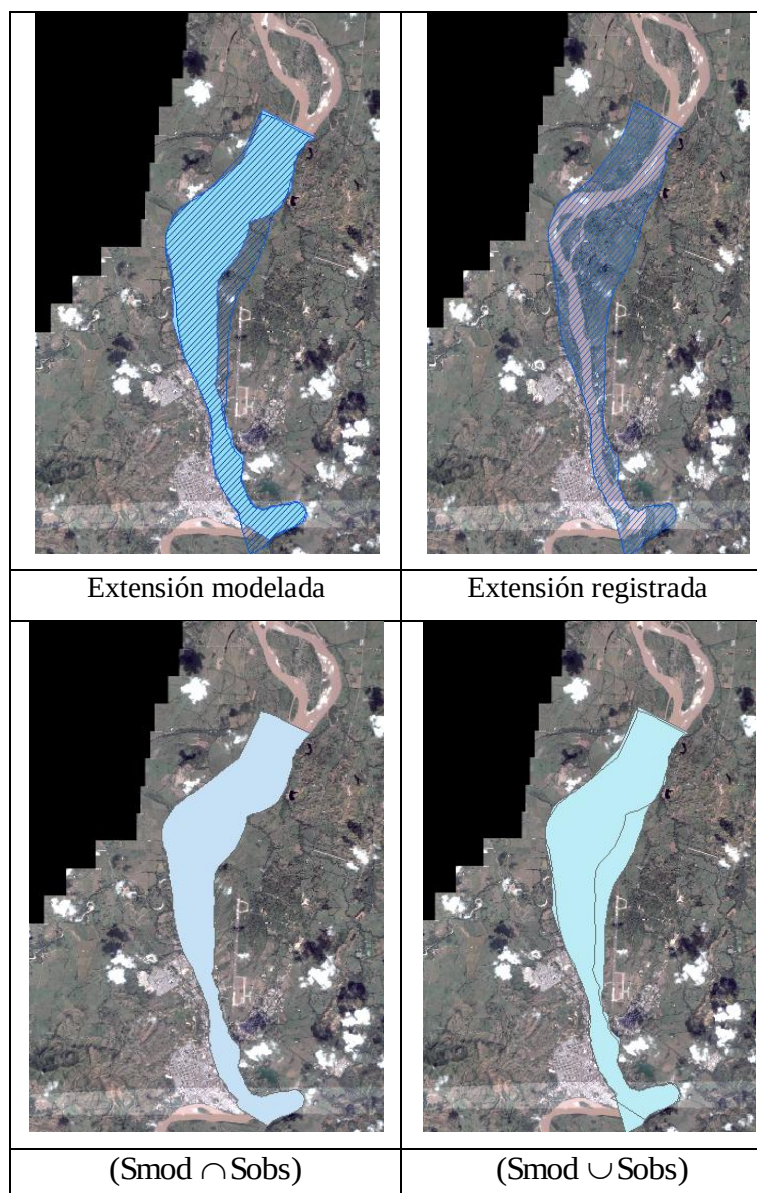


Figura 8-20 Aplicación del criterio de bondad de ajuste F. Modelo River2D Ks uniforme

El resultado numérico luego de aplicar el criterio de bondad de ajuste F, se presenta en la Tabla 8-5.

<i>Num (Smod ∩ Sobs)</i>	<i>Num (Smod ∪ Sobs)</i>
494001	555057
F =0.89 %	

Tabla 8-5 Resultados F para el modelo bidimensional River2D. Ks uniforme.

Con el fin de observar una imagen en 3D de la extensión de la inundación se presenta en la Figura 8-21 el resultado del modelo bidimensional con rugosidad uniformemente distribuida sobre el MDT en la parte superior de la figura. Adicionalmente en la parte

inferior se presenta el MDT con la imagen satelital sobrepuesta y el MDE del evento de inundación modelado, de tal manera que puede observarse claramente cuales son las áreas inundadas.

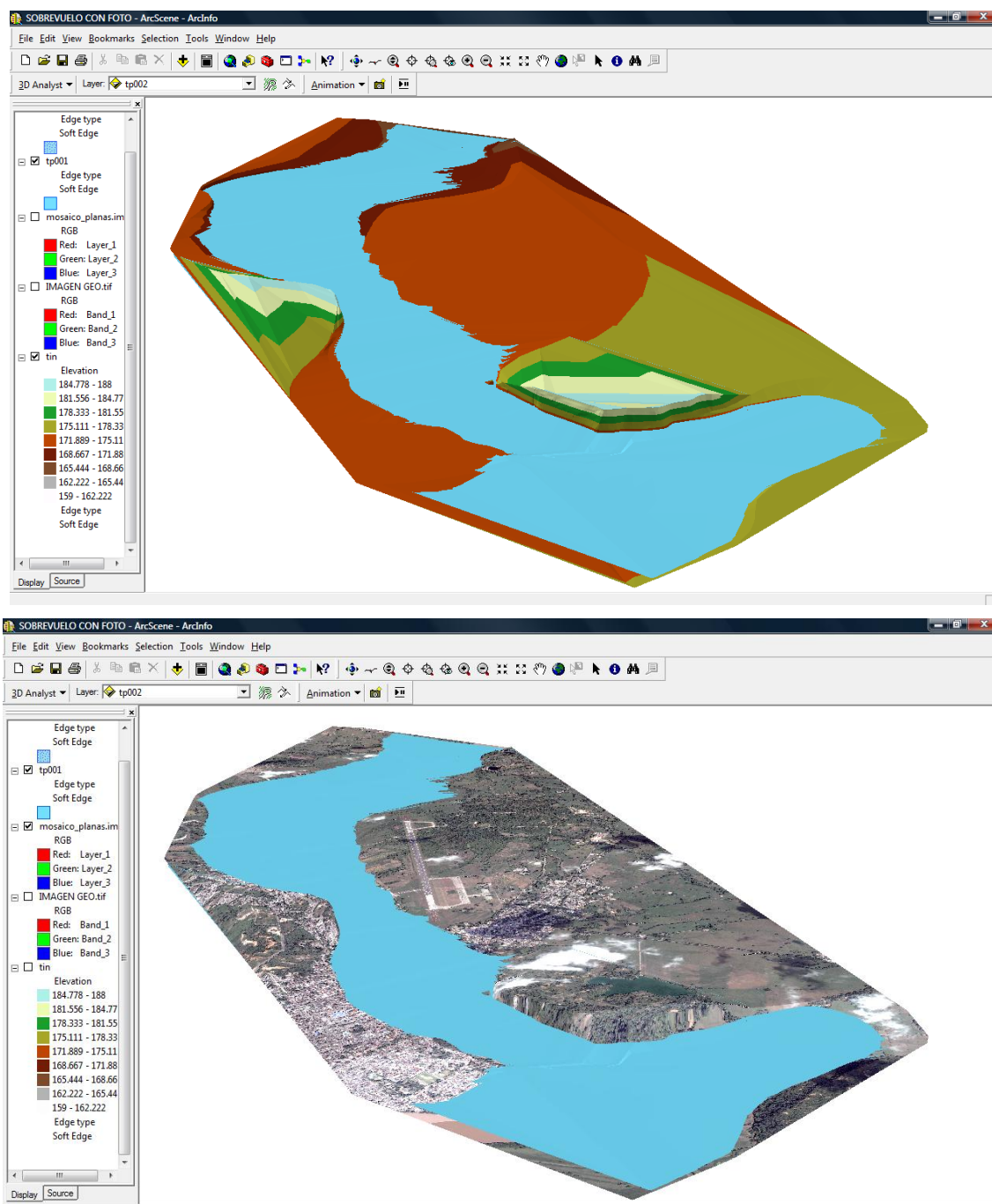


Figura 8-21 Modelo 3D de la extensión de la inundación para el modelo bidimensional.

9 RESULTADOS Y ANÁLISIS COMPARATIVO

En este numeral se presentan de manera detallada y en resumen los resultados obtenidos de la aplicación de la aproximación metodológica propuesta para cada uno de los modelos, en donde inicialmente se muestra la influencia de la discretización del modelo sobre la calibración, así como también los resultados de la aplicación del criterio de bondad de ajuste.

9.1 RESULTADOS DE CALIBRACIÓN

En cuanto a la calibración de los modelos unidimensionales se evidenció una gran influencia de la discretización espacial del modelo sobre el valor del coeficiente de rugosidad n de Manning. Tal como se puede apreciar en la Tabla 9-1 para que el modelo de 111 secciones transversales representara detalladamente la curva de calibración de la estación limnigráfica de Puerto Salgar fue necesaria la utilización de la variación del n de Manning con la profundidad y por ende con el caudal, encontrándose de esta manera 3 rangos de variación del n de Manning.

RANGO DE CAUDAL (m^3/s)	n DE MANNING
500 – 1500	0.027-0.028
1500 - 3500	0.023-0.024
3500 - 6000	Cauce = 0.020 Llanura de inundación = 0.05

Tabla 9-1 Resultados de calibración modelo unidimensional de 111 secciones transversales.

Para el caso del modelo de 14 secciones transversales se encontró que para su calibración sólo se requería el uso de un solo valor de n de Manning para todo el rango de caudales, lo cual permite concluir que el número de secciones transversales tiene una alta influencia en el proceso de calibración y modelación. El resultado de la calibración se presenta en la Tabla 9-2, en donde el valor de n para el cauce principal es de 0.022 y el valor para la llanura de inundación es de 0.05.

RANGO DE CAUDAL (m^3/s)	n DE MANNING
500 – 6000	$n_c = 0.022$, $n_{ll} = 0.05$

Tabla 9-2 Resultados de calibración modelo unidimensional de 14 secciones transversales.

Cabe resaltar que para el modelo de inundación de 111 secciones transversales se usó el n de Manning obtenido para el rango de caudales más altos correspondiente a 0.020 para el cauce principal y 0.05 para la llanura de inundación.

De otro lado para el caso del modelo de 14 secciones transversales se utilizó el valor de 0.022 para el cauce principal y 0.05 para la llanura de inundación.

Debido al requerimiento de tiempo computacional el modelo bidimensional fue verificado sólo para la cota de lámina de agua correspondiente al caudal de inundación modelado de $5848 \text{ m}^3/\text{s}$, con un coeficiente de rugosidad de fondo para el cauce principal de 0.10 m, tanto para el modelo con K_s uniformemente distribuido como para el modelo con K_s espacialmente variado, en donde en este último se hizo uso de un K_s de 0.5 m para las llanuras de inundación.

Registrada	Modelo 1 (K_s uniforme)	Modelo 2 (K_s variado)
172.23 mm.s.n.m	172.40 msnm	172.46 m.s.n.m

Tabla 9-3 Resultados de calibración modelo bidimensional

Como se puede apreciar en la Tabla 9-3 la variabilidad espacial del factor de fricción K_s no influye en gran medida en los resultados y por ende se obtiene un modelo que representa muy bien el evento de inundación registrado.

9.2 VALIDACIÓN DE LOS MODELOS

En la Tabla 9-4 se presentan de manera resumida los valores del factor F para cada uno de los modelos elaborados, tanto para el caso unidimensional como para el caso bidimensional.

Modelo	F
Modelo HEC-RAS: 111 secciones transversales	83.8%
Modelo HEC-RAS: 14 secciones transversales	91.3%
Modelo River2d: K_s uniforme	89.4%
Modelo River2d: K_s espacialmente variado	94.1%

Tabla 9-4 Resultados comparativos

Es importante recalcar el buen ajuste obtenido a través de los cuatro modelos, aunque aparentemente el modelo de menor ajuste fue el modelo unidimensional de 111 secciones transversales, tal como se explicó anteriormente esto se debió a que el espacio computacional quedó por fuera de la inundación registrada.

Con el fin de observar gráficamente el resultado del factor F se presentan en la Figura 9-1 las áreas de inundación modeladas y su comparación con el área registrada, para cada uno de los modelos hidráulicos.

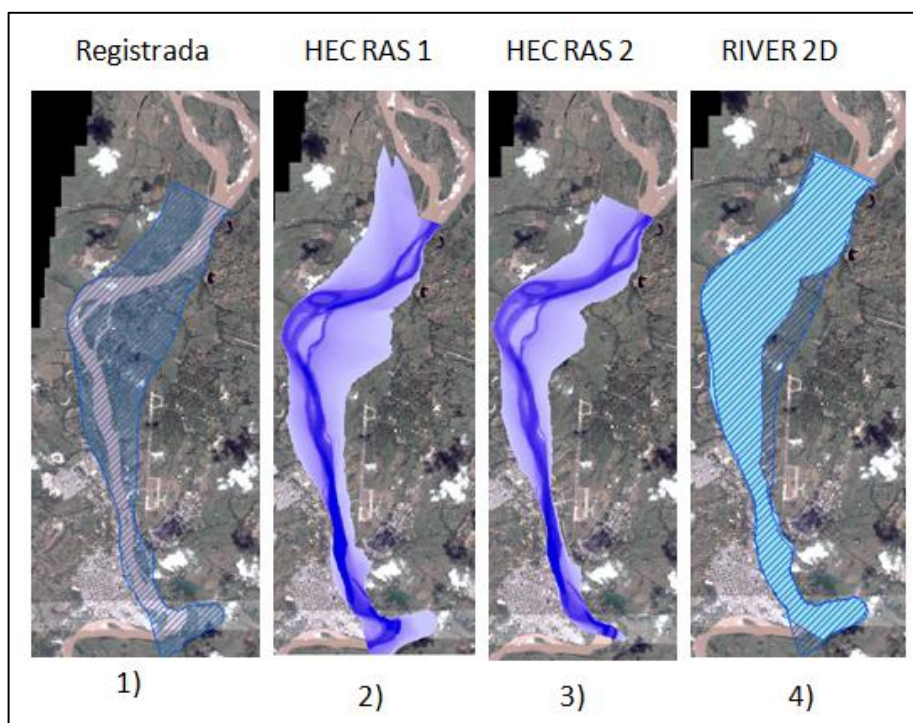


Figura 9-1 Comparación de áreas de inundación modeladas.

En la Tabla 9-4 puede verse claramente que el modelo unidimensional de 111 secciones transversales aunque presentó un ajuste 7.5% menor que el modelo con 14 secciones, gráficamente presenta un mejor ajuste al trazado de la inundación registrada.

El menor valor en el ajuste puede explicarse con el hecho de que el denominador del indicador fue mayor en el primer modelo, debido al trazado de las secciones transversales, las cuales estuvieron por fuera del área que fue registrada como inundada. Lo anterior implica que para cualquier modelo se debe tener cuidado al enmarcar la frontera computacional dentro del área registrada a modelar, con el fin de lograr una buena aplicación del indicador de extensión de inundación F .

De otro lado al observar los resultados de los modelos bidimensionales, la diferencia en resultados radica en que al aumentarse la rugosidad de la llanura de inundación la lámina de agua tiende a aumentar y por ende el área inundada es más extensa al ocupar lugares topográficamente más elevados.

Paralelamente al realizar un análisis comparativo entre los modelos unidimensionales y bidimensionales, estos son similares en forma, pero estos últimos son más extensos debido a procesos hidráulicos, tales como intercambio de momentum entre el canal y la llanura de inundación (Horrit & Bates, 2002).

10 CONCLUSIONES

10.1 RESPECTO A LA METODOLOGÍA

De acuerdo con varios autores y a los resultados de este trabajo se concluye que aunque los modelos unidimensionales son computacionalmente muy eficientes ellos sufren de un número de inconvenientes cuando se aplican a modelación de inundaciones, tales como la incapacidad de simular la difusión lateral de las ondas de crecida, la discretización de la topografía como secciones transversales en lugar de una superficie y la subjetividad de la localización y orientación de las secciones trasversales.

La información de tipo gráfica e histórica es un importante insumo para realizar análisis de amenaza por inundación, ya que permite calibrar y validar tanto los modelos digitales del terreno como los modelos hidráulicos.

El factor de extensión de inundación (F) aunque es un parámetro exigente en cuanto a disponer de información gráfica georreferenciada de eventos pasados, es un buen parámetro para realizar el proceso de calibración y validación de cualquier modelo hidráulico que pretenda realizar análisis de amenaza por inundación,.

Para una correcta aplicación del factor F en cualquier tipo de modelo, se debe garantizar que la frontera computacional esté dentro de la región de la cual se tiene información histórica de la extensión de la inundación, es decir, en el momento de trazar la frontera computacional debe tenerse como fondo la información gráfica del evento de inundación a modelar.

El uso adecuado y responsable de herramientas de procesamiento de información geográfica, combinadas con la aplicación de modelos hidráulicos, correctamente calibrados y validados, brinda a los planeadores de nuestras ciudades información valiosa y oportuna para la implementación de medidas que tiendan a reducir el impacto que generan las inundaciones sobre la población.

Deben realizarse otros trabajos tendientes a validar la aproximación metodológica planteada, extendiendo el estudio hacia otros tipos de corrientes y eventos de inundación en distintas regiones del país.

10.2 RESPECTO A LOS MODELOS

Se comprobó que los dos modelos computacionales evaluados, River 2D y HEC RAS 4.0 son apropiados para modelar inundaciones y ambos pueden ser fácilmente integrados con ArcGIS con el fin de representar los resultados de manera gráfica y poder realizar análisis espaciales tendientes a la generación de mapas de amenaza de inundación.

Para el caso del modelo unidimensional HEC-RAS se encontró que el número y espaciado entre secciones transversales es un factor que influye tanto en el proceso de calibración como en la presentación de resultados, ya que mientras mayor es el número de secciones transversales mayor es la precisión y resolución de la extensión de la inundación.

Dado lo anterior para realizar modelación de inundaciones de buena precisión con el modelo unidimensional HEC-RAS, se deben obtener suficientes secciones transversales que permitan detallar muy bien las características geométricas del cauce, con el fin de obtener un MDE (Modelo Digital de Elevaciones) de la superficie del agua que al ser introducido al MDT (Modelo Digital del Terreno) represente detalladamente el evento modelado.

El modelo bidimensional River2D permite modelar con mayor precisión el comportamiento del flujo en la llanura de inundación, ya que el modelo unidimensional HEC-RAS asume que el flujo sobre esta es paralelo al cauce principal, lo cual no es cierto en la mayoría de los casos.

Respecto a la calibración el modelo bidimensional River2D es más parsimonioso que el modelo HEC RAS, esto debido a que dentro de la formulación matemática del primero el coeficiente de rugosidad solo tiene en cuenta la rugosidad de fondo, a diferencia del modelo HEC-RAS el cual tiene en cuenta fenómenos tales como alineamiento del canal. Adicionalmente, tal como se ha comprobado en este y otros trabajos el coeficiente de rugosidad de este último depende del número de secciones transversales utilizadas.

Respecto a la integración con ArcGIS, el modelo hidráulico unidimensional HEC-RAS presenta una mejor integración con ARCGIS, ya que tiene su propio módulo de integración llamado HEC-GeoRAS, aunque el modelo hidráulico bidimensional River2D permite exportar los resultados en archivos planos los cuales pueden ser fácilmente cargados y posprocesados en ARCGIS con el fin de elaborar el MDE de la cota de lámina de agua.

De acuerdo con la revisión bibliográfica y los resultados obtenidos, los modelos bidimensionales pueden ser más apropiados en casos donde sean muy significativos procesos hidráulicos tales como intercambio de momentum turbulento entre el canal y la llanura de inundación y rios que no presentan alineamiento recto.

La efectividad de cualquier modelo hidráulico computacional, especialmente enfocado al análisis de amenaza por inundaciones radica en proveer suficiente refinamiento en áreas importantes manteniendo tiempos razonables de solución.

Los modelos hidráulicos de libre distribución son una herramienta de alta confiabilidad para la realización de análisis de amenaza por inundaciones, ya que no están interesados en mostrar resultados de eficiencia y despliegue gráfico con el fin de generar ventas, sino que dada su característica libre son constantemente evaluados a nivel mundial y lo que puede garantizar que son numéricamente más estables.

11 RECOMENDACIONES

Tal como se pudo apreciar en este trabajo para una adecuada utilización e interpretación del parámetro F, se debe garantizar que la región a modelar coincida con la región de la cual se tiene información de la extensión de la inundación.

Para la adecuada aplicación de la aproximación metodológica, es importante recopilar la máxima cantidad de información antes, durante y después de un evento de inundación, con el fin que cada día se produzcan mejores modelos y por ende mejores mapas de amenaza por inundación.

Para realizar la simulación con River2D es mejor empezar a realizar las simulaciones con caudales bajos, y posteriormente con caudales altos, ya que esto garantiza mayor rapidez en el proceso de convergencia.

El proceso de obtención de una adecuada representación de la topografía, es decir, el Modelo Digital del Terreno, es quizá el aspecto más crítico, difícil y que consume más tiempo en el ejercicio de la modelación bidimensional, por tanto es recomendable utilizar metodologías para la obtención del mismo lo más precisas posibles, tales como el LIDAR (Light Detection And Ranging) o la restitución fotogramétrica complementada con batimetrías del cauce detalladas.

Con el fin de poder realizar trabajos futuros se recomienda investigar sobre los siguientes tópicos:

Para modelos unidimensionales:

- Se debe desarrollar una estimación más exacta de la interacción entre el canal principal y la llanura de inundación.
- Adecuada modelación de bifurcaciones y confluencias
- Desarrollar técnicas apropiadas para el trazado e interpolación requerida de las secciones transversales para ríos de geometrías complejas.

Para modelos bidimensionales:

- Desarrollar el concepto de flujo en medios porosos para simplificar la modelación del flujo en llanuras de inundación en donde estén involucradas áreas urbanas,

Dada la variabilidad morfodinámica de algunos ríos durante un evento de inundación se recomienda realizar trabajos considerando un modelo de lecho móvil tal como el River2D Morphology, de tal manera que se pueda evidenciar la influencia de la dinámica del río sobre el modelo.

Las inundaciones son una característica permanente del ambiente, en donde la sociedad humana debe aprender a aceptarla, entenderla y sobrellevarla. Es por tanto que la aproximación metodológica descrita en este trabajo pretende permitir un mejor entendimiento de la extensión y características de las inundaciones con el fin de poder tomar mejores decisiones respecto al uso y administración de las llanuras de inundación.

12 BIBLIOGRAFÍA

- Aldana Valverde, A. L. (2006). El problema de las inundaciones. *Jornadas Prohimet* (pp. Peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo). Brasil: Prohimet.
- Díaz Granados, M. (2009). Memorias del curso Hidráulica de Ríos. Bogotá : Universidad de los Andes.
- Flood Site. (2009, Febrero 01). *Flood inundation modelling. Model choice and proper application*. Retrieved Agosto 24, 2009, from Flood Site: www.floodsite.net
- Garzón, H. G. (2006). La importancia de la escala y los elementos representables en la cartografía geomorfológica fluvial. In I. G. España, *Mapas de Peligrosidad de Avenidas e Inundaciones* (pp. 159-168). Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- González Blandón, J. (2005). *Desarrollo y aplicación de un modelo hidrológico de niveles en el río magdalena. Tramo girardot –puerto berrio*. Bogotá: Tesis Universidad de los Andes.
- Horrit, M., & Bates, P. (2002). Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. *Journal of Hydrology* , 87-99.
- Hydrologic Engineering Center. (2002). *Hec-GeoRAS User's Manual*. New York: US Army Corps of Engineers.
- Instituto Geológico y Minero de España. (2008). *Mapas de peligrosidad de avenidas e inundación: Métodos, experiencia y aplicación*. Madrid : Ministerio de ciencia e innovación.
- Instituto Geológico y Minero de España. (2008). *Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía Metodológica para su elaboración*. Madrid: Ministerio de Ciencia e innovación.
- Steffler, P. M., & Blackburn, J. (2002). *River2D: Two-dimensional depth averaged model of river hydrodynamics and fish habitat. Introduction to depth averaged modeling and user's manual*. Edmonton: Universidad de Alberta.
- Steffler, P., & Waddle, T. (2002). *R2D_Mesh: Introduction to Mesh Generation and User's Manual*. Canadá: Universidad de Alberta.
- Universidad de Alberta. (Introduction to Depth Averaged Modeling and User's Manual). *River2D*. Canadá: Universidad de Alberta.