Tabla de Contenido

1. INTRODUCCIÓN....1

1.1 ANTECEDENTES....2

1.2 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO....5

2. OBJETIVO....7

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS....8

3. LOCALIZACIÓN Y SELECCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO....9

4. RECOPILACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE....10

5. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO....11

5.1 INSPECCIÓN Y REVISIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO....17

6. HIDROLOGÍA....27

7. MODELACIÓN HIDRÁULICA....27

7.1 OBJETO....27

7.2 ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE FLUJO....28

7.2.1 Análisis de Modelos Unidimensionales en Régimen Variable....28

7.2.2 Esquemas Numéricos de Modelos Bidimensionales....31

7.2.3 Simplificación de las Ecuaciones de Saint Venant en Dos Dimensiones....34

7.2.4 Clasificación de los Modelos Hidráulicos Bidimensionales Según el Esquema Numérico....36

8. CONSIDERACIONES DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS 1D Y 2D....38

8.1 PARAMETROS PARA LA ELECCIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO....40

8.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MODELOS IBER Y HEC-RAS 4.1....42

9. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS MODELOS UNIDIMENSIONALES (1D) Y BIDIMENSIONALES (2D)....45

9.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD MODELO HEC-RAS....49

9.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO IBER....53

9.3 COMPARACIÓN DE LA SENSIBILIDAD DE LOS MODELOS....57

9.4 LIMITACIONES DE LOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD....58

10. PRODUCCIÓN DE RESULTADOS PARA LOS MODELOS HIDRÁULICOS NO PERMANENTE....59

10.1 MODELO HEC RAS....59
10.1.1 Estabilidad del Modelo Hec-Ras....59
10.1.2 Generación de Mapas de Máximos....65
10.1.3 Generación de los Hidrogramas de Salida para el Modelo Hec-Ras....65
10.1.4 Secciones Transversales Generadas en el Sitio de Proyecto....73

10.2 MODELO IBER....73
10.2.1 Estabilidad del Modelo Iber....74
10.2.2 Generación de Mapas de Máximos....76
10.2.3 Generación de los Hidrogramas de Salida Para el Modelo Iber....76
10.2.4 Secciones Transversales Generadas en el Sitio de Proyecto....84

11. PRODUCCIÓN DE RESULTADOS DE LOS MODELOS HIDRAULICOS PERMANENTE..84

11.1 EXPORTACIÓN DE RESULTADOS DE LOS MODELOS....84
11.1.1 Exportación de Resultados Raster Hec-Ras....84
11.1.2 Exportación de Resultados Raster Iber....85
11.1.3 Generación de Secciones Transversales a Partir de los Datos de Salida Flujo Permanente....85

12. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LOS MODELOS IBER Y HEC RAS FLUJO PERMANENTE....85

12.1 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LOS MODELOS IBER Y HEC RAS FLUJO PERMANENTE CON ESTRUCTURAS DE PASO....85

12.2 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LOS MODELOS IBER Y HEC RAS FLUJO PERMANENTE SIN ESTRUCTURAS DE PASO....87

12.3 REVISIÓN DE LA ZONA INUNDABLE CORRESPONDIENTE A LA SECCIÓN 7....88

13. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LOS MODELOS IBER Y HEC RAS Y HEC-HMS FLUJO NO PERMANENTE....91

13.1 REVISIÓN DEL PASO DEL HIDROGRAMA DE CRECIENTES EN LA SECCIÓN 11....92

13.2 COMPARACIÓN DE HIDROGRAMAS PARA LOS MODELOS HEC-RAS E IBER....97

13.3 HIDROGRAMAS A LO LARGO DE LAS SECCIONES DEL MODELO IBER....104
13.3.1 Hidrogramas Ajustados sin Caudal Base Modelo Iber....104

13.4 HIDROGRAMAS A LO LARGO DE LAS SECCIONES DEL MODELO HEC-RAS 106
13.4.1 Hidrogramas Ajustados Sin Caudal base Modelo Hec-Ras 107
13.5 HIDROGRAMA DE ENTRADA Y SALIDA MODELO HEC-HMS 108
13.6 ANÁLISIS DE LAS ZONAS CON FLUJO BIDIMENSIONAL Y REFLUJOS 109
14. ANÁLISIS DE RESULTADOS MEDIANTE EL MODELO IBER PARA UN TR DE 100 AÑOS EN RÉGIMEN NO PERMANENTE 111
14.1 ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA NO 6 CORRESPONDIENTE A UN PUENTE SOBRE EL RÍO BOGOTÁ 112
14.1.1 Revisión del tipo del Flujo en la Estructura 115
14.1.2 Análisis de los Hidrogramas Aguas Arriba y Sobre el Puente 117
14.2 ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA No 8 CORRESPONDIENTE A UN BOX CULVERT DOBLE EN FLUJO NO PERMANENTE 118
14.3 ANÁLISIS DE ZONAS INUNDABLES PARA FLUJO NO PERMANENTE 120
15. EVENTO HIDROLÓGICO DEL 13 DE MAYO 122
15.1 DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DEL FENÓMENO 122
15.2 CONSECUENCIAS DIRECTAS DEL EVENTO HIDROLÓGICO DEL 13 DE MAYO SOBRE EL MUNICIPIO DE VILLAPINZÓN 125
15.3 ESTIMACIÓN Y MODELACIÓN HIDROLÓGICA DEL EVENTO DEL 13 DE MAYO 130
15.3.1 Hidrograma Registrado en la Estación LG Saucio 130
15.3.2 Análisis del Caudal Pico para las Distribuciones de Frecuencia de la Estación LG Saucio 131
15.3.3 Generación del Modelo Lluvia Escorrentía para el Evento del 13 de Mayo 131
15.4 ESTIMACIÓN Y MODELACIÓN HIDRAULICA DEL EVENTO DEL 13 DE MAYO 137
15.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS 137
15.6 ANÁLISIS DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS RESPECTO AL EVENTO DEL 13 DE MAYO 145
16. CONCLUSIONES 147
17. BIBLIOGRAFÍA 153

LISTA DE IMAGENES

Imagen 1 - Ubicación general del área de estudio. Google Earth.....10
Imagen 2 - Comparación y clasificación del patrón de drenaje de la zona de estudio.....13
Imagen 3 – Detalle de la malla aligerada usada para la modelación mediante Iber 39
Imagen 4 - Variación espacial del coeficiente de Manning a lo largo de una sección transversal típica. 50
Imagen 5 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n-0.01) 50
Imagen 6 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n-0.005) 50
Imagen 7 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n-0.004) 51
Imagen 8 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n-0.003) 51
Imagen 9 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n-0.002) 51
Imagen 10 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n-0.001) 51
Imagen 11 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n+0.001) 51
Imagen 12 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n+0.002) 51
Imagen 13 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n+0.003) 52
Imagen 14 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n+0.004) 52
Imagen 15 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n+0.005) 52
Imagen 16 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n+0.01) 52
Imagen 17– Curva de sensibilidad media modelo Hec-Ras 53
Imagen 18 - Incidencia del tamaño y geometría de las celdas en la rugosidad del sitio de proyecto. 54
Imagen 19 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n-0.01) 54
Imagen 20 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n-0.005) 54
Imagen 21 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n-0.004) 55
Imagen 22 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n-0.003) 55
Imagen 23 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n-0.002) 55
Imagen 24 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n-0.001) 55
Imagen 25 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n+0.001) 55
Imagen 26 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n+0.002) 55
Imagen 27 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n+0.003) 56

Imagen 28 - Valor Medio para el raster de sensibilidad (n+0.004) 56
Imagen 29 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n+0.005) 56
Imagen 30 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n+0.010) 56
Imagen 31 – Curva de sensibilidad media para el modelo Iber 57
Imagen 32 – Comparación curva de sensibilidad media para los modelos Hec-Ras e Iber 57
Imagen 33 - Resultados de simulación inestable de flujo no permanente modelo Hec-Ras.....60
Imagen 34 - Pendiente longitudinal de cauce vuelo LIDAR.....61
Imagen 35 - Asignación del exponente m para estabilidad del modelo.....62
Imagen 36 - Parámetros definitivos para la estabilidad del modelo Hec-Ras.....64
Imagen 37 - Hidrograma resultante para el modelo estabilizado.....65
Imagen 38 - Ubicación en planta de las secciones transversales para la generación de hidrogramas 66
Imagen 39 - Ubicación en planta de las secciones transversales para la generación de hidrogramas 66
Imagen 40 - Hidrograma sección 1 modelo Hec-Ras 67
Imagen 41 - Hidrograma sección 2 modelo Hec-Ras 67
Imagen 42 - Hidrograma sección 3 modelo Hec-Ras 68
Imagen 43 - Hidrograma sección 4 modelo Hec-Ras 68
Imagen 44 - Hidrograma sección 5 modelo Hec-Ras 69
Imagen 45 - Hidrograma sección 6 modelo Hec-Ras 69
Imagen 46 - Hidrograma sección 7 modelo Hec-Ras 70
Imagen 47 - Hidrograma sección 8 modelo Hec-Ras 70
Imagen 48 - Hidrograma sección 9 modelo Hec-Ras 71
Imagen 49 - Hidrograma sección 10 modelo Hec-Ras 71
Imagen 50 - Hidrograma sección 11 modelo Hec-Ras 72
Imagen 51 - Hidrograma sección 12 modelo Hec-Ras 72
Imagen 52 - Hidrograma sección 13 modelo Hec-Ras 73
Imagen 53 – Error producido por la inestabilidad del modelo.....75
Imagen 54 - Ubicación en planta de las secciones transversales para la generación de hidrogramas. 76

Imagen 55 - Ubicación en planta de las secciones transversales para la generación de hidrogramas. 77
Imagen 56 - Hidrograma sección 1 modelo Iber 77
Imagen 57 - Hidrograma sección 2 modelo Iber 78
Imagen 58 - Hidrograma sección 3 modelo Iber 78
Imagen 59 - Hidrograma sección 4 modelo Iber 79
Imagen 60 - Hidrograma sección 5 modelo Iber 79
Imagen 61 - Hidrograma sección 6 modelo Iber 80
Imagen 62 - Hidrograma sección 7 modelo Iber 80
Imagen 63 - Hidrograma sección 8 modelo Iber 81
Imagen 64 - Hidrograma sección 9 modelo Iber 81
Imagen 65 - Hidrograma sección 10 modelo Iber 82
Imagen 66 - Hidrograma sección 11 modelo Iber 82
Imagen 67 - Hidrograma sección 12 modelo Iber 83
Imagen 68 - Hidrograma sección 13 modelo Iber 83
Imagen 69 - Resultados láminas de agua sección transversal 7 para modelaciones Iber y Hec-Ras 88
Imagen 70 - Mancha de inundación resultante para modelos Hec-Ras e Iber 89
Imagen 71 - Sección transversal aguas arriba sobre el giro del cauce 90
Imagen 72 - Resultado Hec-Ras sección en el terraplén 90
Imagen 73 - Resultado Hec-Ras sección sin el terraplén 91
Imagen 74 – Hidrogramas de salida para los modelos He-Ras e Iber 93
Imagen 75 - Comparación entre manchas de inundación sección 11 94
Imagen 76 - Hidrograma sección transversal paralela a sección 11 95
Imagen 77 - Hidrograma ajustado sección transversal 11 96
Imagen 78 - Comparación hidrogramas sección transversal 11 96
Imagen 79 - Comparación hidrogramas sección 1 97
Imagen 80 - Comparación hidrogramas sección 2 98
Imagen 81 - Comparación hidrogramas sección 3 98
Imagen 82 - Comparación hidrogramas sección 4 99
Imagen 83 - Comparación hidrogramas sección 5 99

Imagen 84 - Comparación hidrogramas sección 6 100
Imagen 85 - Comparación hidrogramas sección 7 100
Imagen 86 - Comparación hidrogramas sección 8 101
Imagen 87 - Comparación hidrogramas sección 9 101
Imagen 88 - Comparación hidrogramas sección 10 102
Imagen 89 - Comparación hidrogramas sección 11 102
Imagen 90 - Comparación hidrogramas sección 12 103
Imagen 91 - Comparación hidrogramas sección 13 103
Imagen 92 - Hidrogramas iniciales a lo largo de las secciones del modelo 104
Imagen 93 - Hidrogramas ajustados a lo largo de las secciones del modelo 105
Imagen 94 - Hidrogramas iniciales a lo largo de las secciones del modelo 106
Imagen 95 - Hidrogramas ajustados a lo largo de las secciones del modelo 107
Imagen 96 - Hidrogramas de entrada y salida modelo Hec-Hms 108
Imagen 97 - Vectores de velocidad para las zonas inundables modelación Iber 110
Imagen 98 - Zona de reflujo y estancamiento en crecientes elevadas 110
Imagen 99 - Líneas de corriente a su paso por el meandro en el sitio de proyecto 111
Imagen 100 - Lámina máxima de agua a lo largo de la estructura de paso 6 112
Imagen 101 - Sección longitudinal a lo largo de la estructura 113
Imagen 102 - Sección longitudinal de la lámina de agua al paso por la estructura 113
Imagen 103 - Cargas sobre el puente 115
Imagen 104 - Numerador y denominador de la ecuación 116
Imagen 105 - Determinación de los intervalos en que la estructura se encuentra con flujo anegado 116
Imagen 106 - Evolución del hidrograma a su paso por la estructura 117
Imagen 107 - Mancha de máximos de la lámina de agua en el intervalo de simulación 118
Imagen 108 - Sección longitudinal a lo largo de la estructura 119
Imagen 109 - Perfil de la lámina máxima de agua a lo largo de la estructura 119
Imagen 110 - Zona urbana inundable después del paso de la creciente TR 100 Años 120
Imagen 111 - Estado de las zonas inundables después del paso de la creciente TR 100 Años 122
Imagen 112 - Registros de las estaciones Climatológica Guacheneque y Limnigráfica Saucio 124

Imagen 113 - Hidrograma registrado por la estación Limnigráfica Saucio.....130
Imagen 114 - Hidrograma de salida vs hidrograma registrado para el evento.....134
Imagen 115 - Valores obtenidos de la modelación hasta la estación Limnigráfica Saucio.....135
Imagen 116 - Resultado de la calibración utilizando CN Para la estación Saucio.....136
Imagen 117 - Hidrograma calibrado para el sitio de proyecto 136
Imagen 118 - Resultado de la mancha en la zona de colapso de talud modelo Iber.....138
Imagen 119 - Resultado de la mancha en la zona de colapso de talud modelo Hec-Ras.....139
Imagen 120 – Paso del flujo entre el cauce y la carrera 5 modelo Iber 140
Imagen 121 - Paso del flujo entre el cauce y la carrera 5 modelo Hec-Ras 140
Imagen 122– Resultado de manchas de inundación al paso por la carrera 7 modelo Iber 141
Imagen 123 - Resultado de manchas de inundación al paso por la carrera 7 modelo Hec-Ras.....142
Imagen 124 - Resultado de manchas de inundación al paso por la estación del tren y el centro lúdico modelo Iber.....143
Imagen 125 - Resultado de manchas de inundación al paso por la estación del tren y el centro lúdico modelo Iber.....143
Imagen 126 - Resultado de manchas de inundación al paso por la plaza de mercado modelo Iber 144
Imagen 127 - Resultado de manchas de inundación al paso por la plaza de mercado modelo Hec-Ras.....145

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1 - Resumen General de Láminas de Agua y Anchos Superficiales en las Secciones de los Modelos Régimen Permanente 86
Cuadro 2 - Resumen General de Láminas de Agua y Anchos Superficiales en las Secciones de los Modelos Régimen No Permanente.....92
Cuadro 3 - Volúmenes de los Hidrogramas de Paso en la Sección 11.....93
Cuadro 4 - Parámetros de Salida del Modelo en Régimen no Permanente.....105
Cuadro 5 - Resumen Características Generales Hidrogramas Secciones.....107

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1 - Río Bogotá entrando al municipio de Villapinzón en la Zona Norte. 18
Fotografía 2 - Río Bogotá afectación banca derecha de la vía de acceso. 19
Fotografía 3 - Río Bogotá, afectaciones sobre viviendas y potreros lecheros en la margen derecha del cauce. 19
Fotografía 4 - Río Bogotá, afectaciones sobre viviendas y puentes en las márgenes del cauce. 20
Fotografía 5 - Río Bogotá, afectaciones sobre viviendas en las márgenes del cauce. 20
Fotografía 6 - Río Bogotá, inundaciones en las márgenes del cauce. 21
Fotografía 7 - Río Bogotá, inundaciones y afectaciones en las vías del centro del municipio. 22
Fotografía 8 - Río Bogotá, estación Limnimetrica Villapinzón. 22
Fotografía 9 - Río Bogotá, deslizamientos de las bancas de la vía y afectaciones en las viviendas aledañas. 23
Fotografía 10 - Río Bogotá, socavación y estabilidad en edificaciones que invaden el lecho del cauce. 23
Fotografía 11 - Inundaciones y afectaciones de viviendas en la planicie de inundación del río Bogotá. 24
Fotografía 12– Socavación y erosión de la cimentación de viviendas y edificaciones en el lecho del río Bogotá. 24
Fotografía 13 - Subestación eléctrica y plaza de mercado aledaños al río Bogotá. 25
Fotografía 14 - Curtiembres y depósitos aledaños al lecho del río Bogotá. 25
Fotografía 15 - Socavación lateral y deslizamientos de la banca de la vía férrea municipio de Villapinzon. 26
Fotografía 16 - Tomas de muestras del material granular sector 2 que conforma el lecho del río Bogotá. 26
Fotografía 17 - Tomas de muestras del material granular sector1 que conforma el lecho del río Bogotá. 27
Fotografía 18 – Estado del Punto Bajo en la Carrera Séptima Después de la Creciente del 13 de Mayo 121
Fotografía 19 - Nacimiento del río Bogotá, Páramo de Guacheneque 123

Fotografía 20 - Zona Inundable Estación Saucio 124
Fotografía 21 – Llanuras Inundables Zona Norte del Municipio de Villapinzón.....125
Fotografía 22 - Colapso del Talud de la Vía en la Zona Urbana del Municipio 125
Fotografía 23 - Afectaciones Provocadas por la Creciente del 13 de Mayo.....126
Fotografía 24 - Estado del Río Después de la Creciente del 13 de Mayo.....127
Fotografía 25 - Estado de la Carrera séptima después de la creciente.....127
Fotografía 26 - Efectos de las Altas Presiones sobre los Muros de las Construcciones.....128
Fotografía 27 - Colapso del Talud al Paso del Río.....129
Fotografía 28 - Daño en la Infraestructura Férrea.....129

LISTA DE TABLAS

Número	Título
1.	Características de Localización de las Estaciones Hidroclimatológicas Representativas de la Zona de Estudio. Municipios de Villapinzón y Saucio.
2.	Ajuste Probabilístico - Log Pearson Tipo III Estación Limnigráfica Saucio Estimación Periodo de Retorno Creciente 13 De Mayo.
3.	Precipitación Media Máxima 13 De Mayo De 2011 Subcuencas Zona De Estudio.
4.	Hietogramas de Precipitación Generados para el Evento del 13 de Mayo de 2011.
5.	Estimación del CN para el Evento del 13 de Mayo.
6.	Cálculo de la Precipitación Efectiva en la Zona de Estudio.
7.	Estimación del CN para el Evento en Cada una de las Subcuencas.

LISTA DE GRÁFICAS

Número	Título
1.	Secciones Transversales Representativas para los Modelos en Estudio Régimen Permanente.
2.	Curvas Secciones Transversales Representativas para los Modelos en Estudio Régimen No Permanente.

LISTA DE PLANOS

Número	Título
1.	Localización General del Sitio de Estudio y Ubicación de las Estaciones Hidroclimatológicas.
2.	Mancha Máxima de Inundación Producto de la Modelación No Permanente Modelo Hec-Ras.
3.	Mancha de Velocidades Máximas Producto de la Modelación No Permanente Modelo Hec-Ras.
4.	Mancha de Energías Máximas Producto de la Modelación No Permanente Modelo Hec-Ras.
5.	Mancha Máxima de Inundación Producto de la Modelación No Permanente Modelo IBER.
6.	Mancha de Velocidades Máximas Producto de la Modelación No Permanente Modelo IBER.
7.	Mancha de Energías Máximas Producto de la Modelación No Permanente Modelo IBER.
8.	Mancha Máxima de Inundación Producto de la Modelación Permanente Modelo Hec-Ras.
9.	Mancha de Velocidades Máximas Producto de la Modelación Permanente Modelo Hec-Ras.
10.	Mancha de Energías Máximas Producto de la Modelación Permanente Modelo Hec-Ras.

11. Mancha Máxima de Inundación Producto de la Modelación Permanente Modelo IBER.

12. Mancha de Velocidades Máximas Producto de la Modelación Permanente Modelo IBER.

13. Mancha de Energías Máximas Producto de la Modelación Permanente Modelo IBER.

14. Secciones Generadas en la Zona de Estudio para la Producción y Comparación de Resultados en los Modelos Hidráulicos.

15. Perfiles de Flujo de los Modelos Hec-Ras e Iber, Junto a la Comparación de las Manchas para el Caso de un TR de 100 Años.

16. Comparación Manchas de Inundación Modelos Hec-Ras e Iber Régimen Permanente.

17. Perfiles de Flujo de los Modelos Hec-Ras e Iber, Junto a la Comparación de las Manchas para el Caso Sin Estructuras de un TR de 100 Años.

18. Comparación Manchas de Inundación Modelos Hec-Ras e Iber Régimen Permanente para el Caso Sin Estructuras.

19. Comparación Manchas de Inundación Modelos Hec-Ras e Iber Régimen No Permanente.

20. Vectores de Flujo Para el Modelo Iber del Tramo En Modelación Régimen Permanente.

21. Curvas Isoyetas para el Aguacero del 13 de Mayo en la Zona en Estudio.

22. Distribución Espacial de la Lluvia para el Aguacero del 13 de Mayo en la Zona en Estudio.

23. Mancha de Inundación para el Evento del 13 de Mayo Modelo Hec-Ras.

24. Mancha de Inundación para el Evento del 13 de Mayo Modelo Iber.

25. Comparación Manchas de Inundación para el Evento del 13 de Mayo Modelos Hec-Ras e Iber.

LISTA DE ANEXOS

Número	Título
A.	Información de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, CAR, y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM.
B.	Análisis Hidrológico Y Modelación Mediante Hec-Geohms Y Modelo Hidrológico Hec-Hms
C.	Modelo Hidrológico en Hec-GeoHms ext. ArcGis.
D.	Modelo Hidrológico en HEC-HMS. Método SCS. TR100
E.	Modelación Hidráulica Unidimensional (Hec-Ras)
F.	Modelo Hidráulico en Hec-GeoRas extensión de ArcGis
G.	Modelo Hidráulico Unidimensional 1D en HEC-RAS. TR100
H.	Modelación Hidráulica Bidimensional (IBER)
I.	Modelo Hidráulico 2D en IBER. TR100
J.	Ensayos Granulométricos del Lecho del río Bogotá Zona de Estudio
K.	Modelo Hidrológico en Hec-Hms 13 de Mayo
L.	Modelación Hidráulica Unidimensional 13 de Mayo (HEC-RAS)
M.	Modelación Hidráulica Bidimensional 13 de Mayo (IBER)
N.	Hidrogramas de Salida Modelo HEC-RAS No Permanente
O.	Hidrogramas de Salida Modelo Iber No Permanente

P. Modelo Hidrológico en HEC-HMS Tránsito del Hidrograma Mediante Muskingum TR100

1. INTRODUCCIÓN

El principal objetivo de las modelaciones matemáticas del flujo de agua en ríos es el de estimar los valores de las variables más importantes que actúan en un cauce, mediante la utilización de ecuaciones obtenidas mediante hipótesis. Para que la modelación se aproxime a las características de un caso real, las ecuaciones analíticas y los esquemas numéricos que las resuelven deben capturar la esencia del fenómeno de estudio, y así los esquemas numéricos resuelven el problema que se está analizando.

Los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de herramientas de modelación cada vez más potentes, en donde los cálculos numéricos se realizan de una manera más eficiente, haciendo de la modelación numérica una herramienta clave para la adecuación hidráulica de cauces con problemas de desbordamiento y que producen afectaciones a las poblaciones aledañas.

El uso de modelos unidimensionales desde el inicio de la implementación de herramientas informáticas, para el estudio de las avenidas en ríos y su propagación, ha tenido una aceptación general para la estimación de los principales parámetros presentes en los cauces (velocidad media, niveles de agua, caudales). La modelación se realiza normalmente en un régimen permanente, gradualmente variado y con un fondo fijo. Sin embargo la correcta utilización de estos modelos se restringe a casos donde la evolución temporal no representa gran problema y por lo tanto no es un factor a tener en cuenta, así mismo debe tenerse claridad y criterio para determinar si el flujo es realmente unidimensional. Los esquemas numéricos empleados son relativamente simples, así como eficaces, y pueden considerar cambios de régimen, una relativa complejidad en las secciones de los cauces, así como obras como puentes, compuertas, vertederos, diques, culverts, etc.

En casos en los que se presente un régimen de flujo no permanente, debe recurrirse a ecuaciones de régimen no permanente, gradualmente variado y unidimensional, más conocidas como ecuaciones de Saint Venant en una dimensión. Se han planteado simplificaciones a estas ecuaciones mediante la implementación de esquemas numéricos, dando lugar así a los métodos conocidos hidrológicos, de la onda cinemática y de la onda difusiva. La finalidad de la utilización de las ecuaciones incompletas es la reducción del tiempo de cálculo y de la información necesaria. Sin embargo estas simplificaciones cada vez tienen menos sentido, debido al avance y desarrollo de modelos más completos y facilidades y procesamientos de la información necesaria.

En casos más más como el estudio detallado de llanuras de inundación, los fenómenos hidráulicos son un poco más complejos y las hipótesis de flujo unidimensional resultan no ser tan apropiadas,

alejándose así del comportamiento hidráulico real del sitio en estudio, pues las componentes transversales de la velocidad empiezan a ser importantes. La necesidad de la comprensión de este tipo de casos llevó al desarrollo de esquemas bidimensionales, para lo cual se han desarrollado diferentes tipos de modelos, según el área de enfoque hidráulico y las variables necesarias por estimar.

El uso generalizado de los modelos comerciales y su aceptación para la estimación de crecientes y el estudio de llanuras de inundación, ha generado una amplia confiablidad al momento de diseñar obras de adecuación, cuyo propósito es mitigar y reducir los impactos provocados por las crecientes en las poblaciones que se han establecido en las cercanías de la rivera, donde su grado de vulnerabilidad es alto. Sin embargo estos modelos resultan no ser los más precisos a la hora de estimar llanuras de inundación y obtener mapas de riesgo de la población afectada, debido a la complejidad de la formulación de un escenario que incluya construcciones y calles aledañas con potencial de inundación, y la variabilidad de la rugosidad de la llanura, provocando incertidumbres frente al comportamiento real del cauce. Actualmente en Colombia es ampliamente usado y aceptado el módulo unidimensional del modelo HEC-RAS para el cálculo y estimación de crecientes.

Los avances en materia de investigación han producido esquemas de resolución numérica más novedosos que permiten generar simulaciones en dos y tres dimensiones. Han aparecido modelos comerciales, como el modelo Iber, que incorporan diferentes herramientas para el estudio de casos en los que prima el régimen bidimensional, incluyen modelación de turbulencia.

1.1 ANTECEDENTES

Surgen, naturalmente, inquietudes respecto a las diferencias en la estimación de mapas de inundaciones y las ventajas o desventajas al emplear diferentes filosofías de cálculo. Estas inquietudes son precisamente el objeto del presente trabajo. Para la comparación de metodologías y producción de mapas de inundación se seleccionó un sitio que se encuentra en la cercanía de la población a la rivera de un río, tiene precedentes de inundaciones pasadas, presenta llanuras de inundación, y cuenta con la información topográfica del sitio, imágenes satelitales e información secundaria requerida.

Se analizó la parte alta de la cuenca del río Bogotá donde se encontró que la única cabecera municipal que se encuentra atravesada por este río es Villapinzón, y que la zona rural aguas abajo del municipio presenta inundaciones frecuentes en épocas invernales. En 2011 se presentaron

eventos hidrológicos inusuales en todo el país, que afectaron a una gran cantidad de poblaciones, entre ellas Villapinzón. La afectación resultó ser grande debido a que las construcciones han invadido gran parte de la margen del río a lo largo del municipio y derribó muros y provocó la evacuación masiva de personas de la. Se estimó que el periodo de retorno de la inundación es de aproximadamente 80 años.

Así mismo las zonas rurales aguas abajo del municipio resultaron gravemente perjudicadas por las crecientes, tanto en pérdidas de cultivos como en la evacuación de sus habitantes.

La incertidumbre en la utilización de modelos comerciales para la estimación de zonas inundables y sus parámetros principales disminuye al comparar la estimación con hechos reales, como un evento registrado de determinada magnitud y que haya provocado determinados daños. El testimonio de habitantes de la zona es fundamental para estimar la zona inundada por la creciente estudiada. Así entonces la comparación de metodologías de inundación se encuentra fundamentada con sucesos reales.

El municipio de Villapinzón al ser un caso especial debido a sus altos riesgos frente a inundaciones resulta ser un caso ideal para comparar metodologías de modelación hidráulica, análisis de riesgos, revisión de manchas de inundación y producción de mapas de riesgo, así como también para proponer y examinar diferentes estructuras de mitigación.

Entre 2009 y 2010 se presentaron fuertes afectaciones a nivel nacional, incluyendo la cuenca alta del río Bogotá, a causa del fenómeno del Niño, el cual tuvo su finalización a mediados de 2010. Sin embargo fue a partir de estas fechas que se comenzaron a registrar aumentos inusuales en los regímenes de precipitación a lo largo del territorio nacional y de la parte alta de la cuenca del río Bogotá, esto dio inicio al conocido fenómeno de la Niña, el cual fue mucho más intenso que cualquier otro que le haya antecedido, causando desbordes de ríos y lagunas.

El fenómeno se presentó a lo largo de dos años (2010-2011), de la siguiente manera:

- Temporada Invernal 2010

Para el año 2010 se presentaron precipitaciones inusuales en toda la región, sin embargo el daño se amortiguó debido a que el tiempo de transición entre fenómenos fue mínimo y el suelo, que estaba seco, infiltró una buena parte de la precipitación, así como también los embalses amortiguaron las crecientes, quedando en un nivel alto. La temporada invernal inició en abril de 2010, en este mes los volúmenes de precipitación se duplicaron, respecto a los promedios históricos.

Al ser el régimen bimodal en la parte alta de la cuenca del río Bogotá se presentó una segunda temporada invernal, a finales de noviembre, e inicios de diciembre, donde fuertes aguaceros, provocaron desbordamientos, principalmente en el río Bogotá. Luego se redujo la intensidad de las lluvias finalizando así la época invernal por este año, y dando comienzo a un verano retrasado.

- Temporada Invernal 2011

Esta temporada trajo consigo eventos atípicos que fueron agravados por determinadas situaciones:

- La finalización de la época invernal de 2010 fue tardía, y el verano de los primeros meses de 2011 estuvo marcado por constantes aguaceros, impidiendo que el suelo de las cuencas se autorregulara, y haciendo que se presentaran unas condiciones antecedentes húmedas al llegar la primera época invernal de 2011 y gran parte del agua precipitada escurriera, provocando crecientes más fuertes que las de la época invernal pasada (2010).

- Se presentó la temporada invernal de 2011 en forma prematura, intensificándose en el mes de abril, teniendo una duración más larga de lo que se había esperado. Su acumulado fue muy superior al promedio histórico.

1.2 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

Este estudio se realizó siguiendo lineamientos para el análisis hidrológico e hidráulico, con el fin de abarcar de una manera muy completa el caso en estudio y a partir de esto realizar un análisis detallado de los resultados producto de las modelaciones.

En el Capítulo No. 2, se presentan los objetivos del trabajo a desarrollar.

En el Capítulo No. 3, se incluye la localización general y selección del área de estudio.

En el Capítulo No. 4, se incluye la recopilación y el análisis de la información existe para los estudios del presente trabajo.

En el Capítulo No. 5, se muestra la caracterización de la zona de estudio.

En el Capítulo No. 6, se presenta el estudio de Hidrología para la determinación del caudal máximos instantáneo y los hidrograma de creciente para el periodo de retorno de 100 años, mediante un modelo lluvia – escorrentía de la cuenca alta del río Bogotá en el sector urbano y rural del municipio de Villapinzón, utilizando software de sistemas de información geográfica (Arc-Gis).

En el Capítulo No. 7, se incluyen los análisis de la modelación hidráulica unidimensional y bidimensional del río Bogotá en el sector urbano y rural del municipio de Villapinzón, utilizando los softwares de modelación Hec-Ras e ÍBER. Se determinan los parámetros hidráulicos del río para cada tipo de modelo y se realiza el análisis de los resultados obtenidos por las dos metodologías hidráulicas de modelación seleccionadas.

En el Capítulo No. 8, se presentan las consideraciones de los modelos hidráulicos 1D y 2D con el fin de caracterizar y diferenciar de una manera más clara los modelos hidráulicos.

En el Capítulo No.9 se presentan los análisis de sensibilidad de los modelos hidráulicos unidimensionales (1D) y bidimensionales (2D).

En el Capítulo No. 10, se presenta la producción de resultados para los modelos hidráulicos en régimen no permanente.

En el Capítulo No. 11, se presenta la producción de resultados para los modelos hidráulicos en régimen permanente.

En el Capítulo No. 12, se presenta la comparación de resultados entre los modelos Iber y Hec-Ras en régimen permanente.

En el Capítulo No. 13, se presenta la comparación de resultados entre los modelos Iber, Hec-Ras y Hec-Hms en régimen no permanente.

En el Capítulo No. 14, se presenta el análisis de resultados mediante el modelo Iber para un Tr de 100 años en régimen no permanente.

En el Capítulo No. 15 se realiza el análisis y modelación del evento hidrológico del 13 de mayo.

En el Capítulo No. 16 se realizan las conclusiones del estudio.

En el Capítulo No. 17 se muestra la bibliografía consultada para este trabajo.

2. OBJETIVO

El propósito de este trabajo, es conocer las principales características de los modelos hidráulicos unidimensionales (1D) y bidimensionales (2D), así como sus ventajas y desventajas, tomando como área de estudio el tramo del río Bogotá, que se encuentra en la parte alta de la cuenca en el sector urbano y rural municipio de Villapinzón, departamento de Cundinamarca. Se incluye un análisis hidrológico realizado en sistemas de información geográfica mediante el software Arc-Gis, con el fin de estimar un caudal máximo instantáneo y un hidrograma de creciente en el sitio de estudio que permitirá iguales condiciones de modelación.

La intención de este estudio no es sólo la comparación entre metodologías de modelación hidráulica para el caso Villapinzón, sino también contrastar con un caso real, de un evento de determinada magnitud que causó daños, y que se puede trazar el mapa de la zona inundada y las principales zonas afectadas.

Este estudio tiene como fin analizar la capacidad de la simulación hidráulica de dos modelos matemáticos diferentes, y en situaciones especiales, como lo son la presencia de construcciones y calles, y la presencia de llanuras de inundación, estos modelos utilizan metodologías distintas y se describen a continuación:

- HEC-RAS: Es un modelo matemático de análisis en una dimensión, creado por el cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos, en donde el campo de velocidades es perpendicular a las secciones transversales generadas. Este modelo se encuentra adaptado a la plataforma GIS (ESRI), mediante la extensión HEC-GeoRas, la cual es de gran utilidad para la generación de un modelo digital de terreno, a partir de levantamientos topográficos y batimétricos o vuelos LIDAR, y extraer la información de la geometría necesaria.

- IBER: Es un modelo bidimensional desarrollado por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), que utiliza esquemas numéricos en volúmenes finitos de última generación, y se encuentra adaptado a las características de ríos torrenciales. Éste programa se desarrolló a partir de la integración de tres herramientas numéricas preexistentes. Turbillón es un modelo numérico de flujo de agua en lámina libre desarrollado por el grupo GEAMA de la Universidad de Coruña, Carpa es también un modelo numérico de flujo a superficie libre desarrollado por la Universidad Politécnica de Cataluña y Gid, que es un software de pre y post-proceso desarrollado por el Centro Internacional de Métodos Numéricos de Ingeniería CIMNE. Este programa permite la simulación numérica en 2D de la lámina de agua en un flujo permanente.

Se realiza una comparación entre los dos modelos con el fin de mostrar el desempeño de los modelos en las zonas urbanas, con estructuras de paso, llanuras de inundación, afluentes laterales, flujo no permanente, cambios en la rugosidad, asignación de condiciones iniciales, generación de mapas de riesgo, etc. Los resultados de velocidades, láminas de agua y zonas de inundación son representados y analizados según las características, la filosofía y esquematización numérica de cada programa, con el fin de obtener una mejor interpretación de los resultados.

El modelo HEC-Ras, junto con la aplicación para GIS Hec-GeoRas, es una herramienta útil y sencilla para la generación de mapas de inundación. Esta filosofía de modelación unidimensional produce resultados por el lado de la seguridad, es por esto que han tenido gran aceptación y son de uso general. Sin embargo proporciona buenos resultados sólo si el cauce se encuentra bien definido y el flujo se puede suponer completamente unidimensional. En el caso de calles inundables o planicies, sus resultados son menos confiables.

El modelo IBER da como resultado láminas y velocidades más aceptables debido a que permite simular el movimiento bidimensional del agua, de las inundaciones en centros urbanos. Tiene en cuenta pérdidas de energía por resaltos, estructuras de paso, zonas de recirculación, ondas cruzadas, etc., que no se pueden analizar en detalle en un modelo unidimensional. Sin embargo los tiempos de simulación pueden llegar a ser altos dependiendo de la extensión y complejidad del proyecto, así como del tipo de ordenador usado para la modelación.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estimar el caudal máximo instantáneo y el hidrograma de creciente para el periodo de retorno de 100 años en el sitio de estudio, mediante modelación hidrológica en Hec-Hms y la extensión Hec-GeoHms.

- Realizar la modelación hidráulica en 1D del río Bogotá en el sector urbano y rural del municipio de Villapinzón, a partir del programa Hec-Ras y la extensión Hec-GeoRas.

- Realizar la modelación hidráulica en 2D del río Bogotá en el sector urbano y rural del municipio de Villapinzón, a partir del programa Iber.

- Analizar la sensibilidad de los modelos unidimensionales (1D) y bidimensionales (2D).

- Comparar y analizar los resultados obtenidos en las modelaciones hidráulicas 1D y 2D del río Bogotá en el sector Villapinzón.

3. LOCALIZACIÓN Y SELECCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca Alta del río Bogotá comprende desde su nacimiento en el páramo de Guacheneque y hasta el Puente de la Virgen en Cota. El área de estudio que se ha seleccionado, se encuentra ubicada en el municipio de Villapinzón, departamento de Cundinamarca, Colombia, hace parte de esta la cuenca Alta del río.

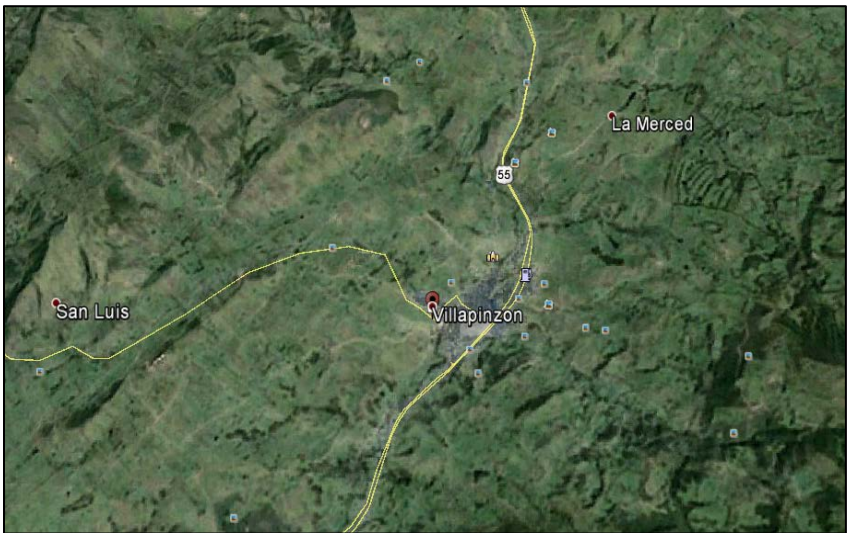
Ésta área de estudio seleccionada, es la misma del trabajo de grado: "Análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo en la cuenca alta del río Bogotá, utilizando modelación hidrológica (Hec-GeoHms) e hidráulica en 1D y 2D (Hec-GeoRas e Iber)" realizado por el Ing. Daniel Vera, el cual hace énfasis en el riesgo presente por la amenaza y la vulnerabilidad a la que se encuentra expuesto el casco urbano del municipio de Villapinzón.

Puntualmente, el sector de estudio, es el área del municipio de Villapinzón que colinda con el río Bogotá. Sus límites al norte del municipio, son los municipios de Ventaquemada, departamento de Boyacá, al noroccidente el municipio de Lenguazaque, departamento de Cundinamarca, al sur los municipios de Chocontá, Tibirita, departamento de Cundinamarca, y Capilla de Tenza, departamento de Boyacá, al oriente los municipios de Turmequé y Umbita, del departamento de Boyacá. La coordenadas medias de la zona de estudios es: 1'068.581,4818 m. Norte y 1'053.688,5056 m. Este y una altura de 2715 metros sobre el nivel del mar.[1]

En la Imagen 1 tomada de Google Earth, se muestra la ubicación general del área de estudio considerada para el presente trabajo.

[1] www.Villapinzon-Cundinamarca.gov.co/Información General.

Imagen 1 - Ubicación general del área de estudio. Google Earth.



Fuente: Google Earth

4. RECOPILACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE

Esta actividad va dirigida a la recopilación de la información, la cual se ha obtenido del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC, del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, y de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, CAR.

La información seleccionada del IGAC, corresponde a planchas cartográficas y mapas de coberturas para el municipio de Villapinzón, de los siguientes documentos:

AÑO	PLANCHA	ESCALA
2007	210	1:100000
1998	209	1:100000
2008	Departamental	1:300000

Así mismo, la información de valores medios mensuales de precipitación máxima en 24 horas y precipitaciones totales diarias para el año 2011, se ha tomado de trece (13) estaciones medidoras de éste parámetro operadas por la CAR y el IDEAM, se describen a continuación. Son las más cercanas y representativas del sitio de estudio:

La estación climatológica ordinaria La Fortuna con una serie de 46 años de registros (1963-2012), la estación climatológica principal Novilleros con una serie de 42 años de registros (1966-2012), la estación climatológica principal Carrizal con una serie de 67 años de registros (1960-2012), la estación climatológica ordinaria Sisga con una serie de 65 años de registros (1919-2012), la estación pluviográfica El Triángulo con una serie de 43 años de registros (1963-2012), la estación pluviográfica El Espino con una serie de 43 años de registros (1961-2012), la estación pluviométrica El Haltillo con una serie de 48 años de registros (1960-2012), la estación pluviométrica Tapias con una serie de 34 años de registros (1960-2000), la estación pluviográfica Alto de Aire con una serie de 23 años de registros (1986-2012), la estación pluviográfica Villapinzón con una serie de 35 años de registros (1959-2012), la estación pluviográfica Saucio con una serie de 28 años de registros (1971-2012), la estación pluviométrica Ventaquemada con una serie de 61 años de registros (1935-2013), y la estación pluviométrica Umbita con una serie de 57 años de registros (1956-2013). En el Anexo No. 1, se presenta la información detalla, correspondiente a cada una de las estaciones mencionadas previamente.

Igualmente los valores de caudales máximos y medios de las estaciones hidrométricas utilizadas y representativas de la zona de estudio corresponden a la estación limnimétrica Villapinzón con una serie de 26 años de registros (1973-2013) y la estación limnigráfica satelital Saucio con una serie de 39 años de registros (1970-2014).

En la Tabla 1 se presenta un resumen de las estaciones utilizadas y sus características: código, tipo de estación, entidad que opera la estación, coordenadas, elevación y subcuenca a la que pertenece.

En el Plano 1, se incluye la localización general y la ubicación de las estaciones representativas de la zona de estudio.

5. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

- Etapa del Río

El Municipio de Villapinzón, zona de proyecto se encuentra en la parte alta de la cuenca del río Bogotá, con una altura media de 2700 m.s.n.m, en una región de tipo montañoso. En cercanías al municipio se encuentra el páramo de Guacheneque, lugar de nacimiento del río Bogotá. El municipio es el lugar de concurrencia de varias quebradas importantes, por lo tanto la zona del río se encuentra en etapa de crecimiento. Las pendientes presentes a lo largo del tramo de estudio son relativamente altas y generan una erosión significativa a lo largo del tramo de estudio, sin embargo a

las afueras del municipio las pendientes tienden a ser menos pronunciadas generando pequeñas zonas de llanuras de inundación.

Aguas arriba y en la zona urbana del municipio se presentan estrechamientos del cauce debido a las altas pendientes y a la presencia de edificaciones invadiendo la ronda hídrica del río. La cuenca es reducida al ser de altitudes elevadas, los caudales presentes son pequeños, sin embargo al presentarse lluvias fuertes los caudales pueden aumentar en forma momentánea y peligrosa. La etapa del río para la zona de proyecto corresponde a la de cauces con régimen torrencial, por lo tanto son esperadas condiciones en las que el régimen es supercrítico.

Debido a las altas pendientes presentes en el cauce (entre 1.5% y 6%) se habla de un río torrencial, en el cual las crecientes extraordinarias resultan ser de una peligrosidad alta, por la alta energía producto de la topografía de la cuenca. Al ocurrir estas crecientes se presenta una alta erosión y transporte de sedimentos de diámetros grandes. Así mismo la vegetación queda definida con la ocurrencia de los eventos hidrológicos ordinarios.

"en la zona montañosa y torrencial, una creciente que se produce sobre una corriente, sin presencia de lodos, se desarrolla en tres fases:

En la fase 1, al comienzo de la creciente en la parte ascendente del hidrograma, se desarrolla un proceso de socavación y profundización del lecho por aguas poco turbias, antes de que la erosión alimente de muchos sedimentos la red hidrográfica

En la fase 2, se presenta la etapa de deposición y relleno aluvial cuando las aguas han alcanzado cuando las aguas han alcanzado su nivel más alto o empiezan a bajar, y en forma paralela la carga sólida llega a sus cantidades máximas.

En la fase 3, al final de la creciente, las aguas relativamente limpias erosionan o arrastran de modo parcial materiales sedimentados con anterioridad; como secuelas se pueden presentar ondas de avenida secundarias que originan a veces terracillas."[2]

[2] Rodríguez Díaz, Héctor A. Hidráulica Fluvial Fundamentos y Aplicaciones, ECI, p. 23.

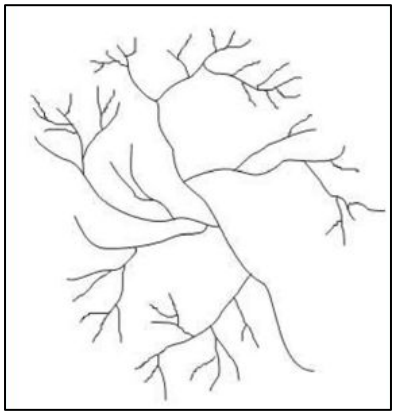
- Patrones de Drenaje de la Zona en Estudio

La precipitación tiende a concentrarse en las zonas topográficamente más bajas, donde conforman canales, ésta escorrentía se incrementa a medida que intercepta nuevos canales, incrementando su caudal. Las formas que adoptan los canales se conocen como los patrones de drenaje de la zona, los cuales están influenciados principalmente por el clima y el relieve. Sin embargo un factor determinante es la geología presente bajo el subsuelo de la región, así como también desempeñan un papel importante el caudal, la precipitación, la permeabilidad del terreno la topografía de las laderas y el área de drenaje.

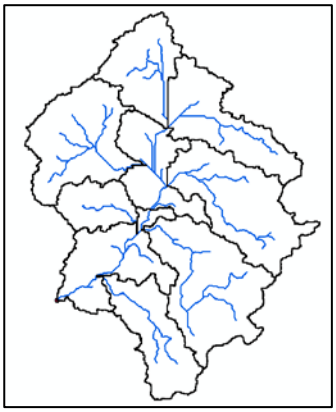
La cuenca alta del río Bogotá se encuentra altamente influenciada por el relieve, predominado un patrón de drenaje del tipo dendrítico, por lo que la composición geológica tiende a ser homogénea para la zona. La caracterización hídrica de la cuenca alta del río Bogotá corresponde a corrientes de agua pequeñas, las cuales son cortas e irregulares, con posibilidad de conexión en cualquier ángulo al cauce principal. La pendiente de las laderas de la zona resulta ser moderada, con una baja permeabilidad debido a la a alta presencia de roca a bajas profundidades, con presencia de regímenes predominantemente bimodales. Las coberturas vegetales en algunas zonas son bajas.

En la Imagen 2, se muestra el patrón de drenaje dendrítico típico junto al patrón de drenaje de la zona en estudio.

Imagen 2 - Comparación y clasificación del patrón de drenaje de la zona de estudio



Patrón de Drenaje Dendrítico



Patrón de Drenaje de la Zona en Estudio

- Forma de la Cuenca

La forma de la cuenca hidrográfica es definida a partir de la configuración que presenta en planta, la determinación de éste parámetro permite evaluar el comportamiento de la escorrentía a lo largo del cauce principal en la parte alta de la cuenca.

Para la determinación de la forma de la cuenca se debe determinar diferentes parámetros específicos entre los que se encuentran la *Elongación (E)*, *Relación de Circularidad (C),* y el índice de *Gravelius o coeficiente de compacidad (K_c).*

- Elongación

La elongación es definida como la relación entre el diámetro de un círculo de área igual al área de la cuenca y la longitud de la cuenca, que es definida como la longitud de una línea recta entre el nacimiento y la desembocadura y cuya dirección es paralela al cauce principal, por lo tanto:

$$E = 1.128\frac{\sqrt{A}}{L}$$

Dónde:
A: Área de la cuenca en estudio.
L: Longitud de la cuenca en estudio.

Así entonces la elongación calculada resulta igual a 1 en caso de ser circular, disminuyendo con el alargamiento.
Para el cálculo de la elongación se tiene:
$A = 112.7\ Km^2$
$L = 13.8\ Km$

$$E = 1.128\frac{\sqrt{112.7}}{13.8} = 0.86$$

En este caso se obtiene entonces que la elongación es 0.86, un valor muy cercano a 1, por lo tanto se trata de una cuenca con poco alargamiento y muy circular.

- Relación de Circularidad

Es el cociente entre el área de la cuenca (A) y la del círculo cuyo perímetro (P) es igual al de la cuenca por lo tanto:

$$C = \frac{4\pi A}{P^2}$$

Para este caso, el valor máximo de la relación es 1 para una cuenca circular y va disminuyendo a medida que la cuenca empieza a alargarse.
Para la cuenca en estudio se tiene:
$A = 112.7\ Km^2$
$P = 38.5\ Km$

$$C = \frac{4\pi A}{P^2} = \frac{4 * \pi * 112.7}{38.5^2} = 0.95$$

Para el caso la relación de circularidad es 0.95, lo cual indica que es una cuenca muy circular y por lo tanto de mayor peligrosidad por crecientes.

- Índice de Gravelius o Coeficiente de Compacidad

Es la relación entre el perímetro (P) de la cuenca y el perímetro de un círculo de igual área (A) a la de la cuenca, viene expresado como:

$$K_c = 0.28\frac{P}{\sqrt{A}}$$

Al acercarse éste índice a la unidad, se tendrá una cuenca de forma circular y con gran tendencia a crecientes. Para cuencas alargadas los valores del índice serán superiores a la unidad indicando una menor tendencia a las crecientes.

El cálculo del índice de Gravelius para la cuenca en estudio se realiza de la siguiente manera:

$$K_c = 0.28\frac{P}{\sqrt{A}} = 0.28\frac{38.5}{\sqrt{112.7}} = 1.015$$

El cálculo del índice de gravelius indica que la cuenca tiene una forma casi circular, al estar tan cercano a la unidad, por lo tanto la zona de estudio corresponde a una zona en donde al presentarse

fuertes precipitaciones homogéneas en todo el área de la cuenca, el tiempo de concentración hasta determinado punto resulta ser muy similar en todas las direcciones, por lo que las crecientes esperadas resultan ser muy fuertes al congregarse las aguas de escorrentía casi al mismo tiempo.

- Zonificación De La Cuenca Hidrográfica

La cuenca del río Bogotá en su parte alta, las pendientes son moderadas o altas, donde se genera más escorrentía, con gran carga de sedimentos debido a las crecientes súbitas con alta energía. En ésta zona el factor determinante en la escorrentía es la pendiente la cual causa una gran aceleración de los procesos de erosión así como una rápida concentración de la escorrentía. Así mismo las coberturas vegetales consisten principalmente de bosques, y en las zonas llanas predominan los pastos de pradera. La zonificación de la cuenca corresponde a la de vertiente.

- Características Morfológicas del Cauce

La determinación de la caracterización morfológica del cauce viene dada por diferentes procesos dinámicos asociados a las variables dependientes, como el caudal líquido (Q_w), la carga de sedimentos (Q_s) y la pendiente longitudinal del cauce (S).

- Clasificación del Cauce.

A partir de los criterios de Schumm (1977), para el cauce en estudio se llegó a la conclusión que es del tipo rocoso, debido a que corresponde a un cauce confinado entre afloramientos rocosos, siendo el material de fondo y las márgenes determinante para la morfología del cauce.

- Patrones del Cauce

"El conocimiento de las formas que adquieren los ríos, las razones por las cuales adoptan cada forma en particular, esto es, el estudio de su dinámica, permiten anticipar los cambios morfológicos generados como resultado de desarrollos urbanos, estudiar la morfología fluvial que los afecta, así como tomar medidas de control de inundaciones para áreas urbanas, o ubicar eficazmente las descargas de los colectores de drenaje en los cursos de agua"[3].

[3] Rodríguez Díaz, Héctor A. Hidráulica Fluvial Fundamentos y Aplicaciones, ECI, p. 73.

Por tanto los diferentes factores que afectan el cauce hacen que éste varíe su forma a lo largo de su vida, los patrones que desarrollan son el reflejo de los diferentes ajustes en los gradientes del canal principal y su sección transversal, en donde la carga de sedimentos, su magnitud y características son determinantes en la parametrización del cauce.

El cauce en estudio resulta tener un patrón recto en la zona urbana y aguas arriba del proyecto, por lo que presenta una sinuosidad baja, sin embargo el principal factor determinante de éste patrón es la urbanización y la invasión de la ronda hídrica, por lo que los procesos erosivos naturales del cauce se ven afectados por la imposición de muros y estructuras en las márgenes del cauce lo que provoca una canalización del mismo. Así mismo la canalización provoca efectos erosivos severos debido a la alta velocidad que se presenta en el cauce a lo largo de los tramos urbanizados.
Aguas abajo de la zona urbanizada se presenta una zona de bajas pendientes en donde se presenta un patrón meándrico, con zonas de alta depositación de sedimentos y una sinuosidad alta.

- Morfología del Cauce en Estudio

Para las cabeceras de las cuencas, donde se desarrollan los ríos en vertiente se cumplen los siguientes procesos:

- Profundización del cauce
- Movimientos en masa sobre laderas
- Erosión hídrica superficial

El río Bogotá en su parte alta de la cuenca se clasifica como un río de altas velocidades, con gran capacidad erosiva y así mismo gran transporte de sedimentos, los cuales son generados en la parte alta del río. Al presentarse unas velocidades relativamente altas, y aunque no se encuentra afectado por la presencia de lechos rocosos que controlen su cauce su cauce se encuentra bien definido.

5.1 INSPECCIÓN Y REVISIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Para la elaboración del presente trabajo, fue necesario la inspección y revisión de la zona de estudio, correspondiente al sector urbano y rural del municipio de Villapinzón, en donde se presentó la creciente del 13 de mayo de 2011, correspondiente a la ola invernal del fenómeno de la Niña 2010-2011 registrada en todo el país, y que causó grandes daños y afectaciones en la población, en viviendas, estructuras, propiedades y cultivos.

La inspección de campo consistió en el reconocimiento de las afectaciones registradas, y evidenciar las condiciones de desarrollo del municipio y el recorrido del río Bogotá que atraviesa el mismo.

El recorrido se inició desde aguas arriba hacia aguas abajo como se observa en la Fotografía 1. En ésta fotografía se muestra el río Bogotá entrando en la parte norte del municipio. Alrededor, se encuentran pequeños caseríos o fincas de producción ganadera, y de acuerdo con la información recopilada en campo, el 13 de mayo día de la creciente ocurrida, se inundaron los potreros por lo que fue necesario que los pobladores, llevaran el ganado a las lomas cercanas, retiradas de las inundaciones.

Fotografía 1 - Río Bogotá entrando al municipio de Villapinzón en la zona norte.

Fuente: Registro Fotográfico Elaboración Propia

En la Fotografía 2, vista desde aguas arriba hacia aguas abajo, se muestra el tramo del río Bogotá, que dañó parte de la vía principal de acceso al municipio, de acuerdo con la información suministrada por los pobladores. Parte de la banca de la vía se socavó y se deslizó. Además, el río se desbordó por la parte izquierda e inundó totalmente la vía hasta los andenes de las viviendas más alejadas y la ciclo ruta. La vía se recuperó con un muro de contención, que conllevó la conformación del terraplén y relleno en material granular. Como se puede apreciar en la imagen, el muro de concreto mantiene la misma elevación de la vía.

Fotografía 2 - Río Bogotá afectación banca derecha de la vía de acceso.

Fuente: Registro Fotográfico Elaboración Propia

En la Fotografía 3, vista desde aguas abajo hacia aguas arriba del río Bogotá, se observan los niveles de lámina de agua alcanzados por la creciente del 13 de mayo de 2011, la cual alcanzó a destrozar viviendas aledañas a la margen del río. Es de resaltar que la viviendas están hechas constructivamente en algunos casos están construidas de madera, polisombra y tejado en zinc, que son materiales poco resistentes a las velocidades que puede tomar el agua, producto del aumento de caudal en la misma sección hidráulica.

Igualmente, en la imagen se presenta un potrero con ganado lechero, justo en la planicie del río Bogotá, siendo un riesgo de pérdida de la fuente de ingreso del núcleo familiar.

Fotografía 3 - Río Bogotá, afectaciones sobre viviendas y potreros lecheros en la margen derecha del cauce.

Fuente: Registro Fotográfico Elaboración Propia

En la Fotografía 4, vista desde aguas arriba hacia aguas abajo del río Bogotá, se observan las viviendas que invaden el lecho del cauce, y un puente realizado de madera, que fue destruido en la creciente del 13 de mayo de 2011. Es de resaltar que, de acuerdo con la información recopilada en campo, el nivel de lámina de agua que tomó el río en este sector es de aproximadamente 4.00 metros, siendo lo normal un nivel promedio igual a 1.00 m.

Fotografía 4 - Río Bogotá, afectaciones sobre viviendas y puentes en las márgenes del cauce.

Fuente: Registro Fotográfico Elaboración Propia

En la Fotografía 5, vista desde aguas abajo hacia aguas arriba del río Bogotá, se observa en la margen izquierda y derecha las viviendas que han invadido el cauce, así como animales, gallinas, vacas y cerdos, que están en las planicies de inundación del río. De acuerdo con hechos relatados por la comunidad, los muros en bloque y las ventanas que colindan con el río, fueron destruidos con la creciente del día 13 de mayo de 2011.

Fotografía 5 - Río Bogotá, afectaciones sobre viviendas en las márgenes del cauce.

Fuente: Registro Fotográfico Elaboración Propia

En la Fotografía 6, vista desde aguas abajo hacia aguas arriba del río Bogotá, se observa en la margen izquierda las viviendas que han invadido el cauce, y los muros en bloque y columnas que colindan con el río, destruidos por la creciente del día 13 de mayo de 2011. Igualmente se desbordó el río en la margen derecha, inundando las viviendas aledañas y dificultando la movilización en este lugar.

Fotografía 6 - Río Bogotá, inundaciones en las márgenes del cauce.

Fuente: Registro Fotográfico Elaboración Propia

En la Fotografía 7, vista desde aguas arriba hacia aguas abajo, se muestra el río Bogotá, el cual dañó parte de la vía, en el centro del municipio. De acuerdo con la información suministrada por los pobladores, parte de la banca de la vía se socavó y se deslizó. Además el río se desbordó por la parte derecha e inundó totalmente las dos vías, izquierda y derecha.

La vía se recuperó con un muro de contención, que conllevó la conformación de relleno en material granular para recuperar la banca. Como se puede apreciar en la imagen, el muro hecho de concreto mantiene la misma elevación de la vía.

Fotografía 7 - Río Bogotá, inundaciones y afectaciones en las vías del centro del municipio.

Fuente: Registro Fotográfico Elaboración Propia

En la Fotografía 8, vista lateralmente, se observa la estación limnimétrica Villapinzón, la cual se encuentra debajo de un puente ubicado en cercanías a la fotografía anterior, en el centro del municipio. La regleta fue destruida por la creciente del 13 de mayo de 2011, por lo que su nivel no fue registrado por el operario de la estación.

Igualmente, las estructuras de puentes o pontones presentes en todo el recorrido, generan un estrechamiento en la sección, debido a que los estribos invaden parte del cauce.

Fotografía 8 - Río Bogotá, estación Limnimétrica Villapinzón.

Fuente: Registro Fotográfico Elaboración Propia

En la Fotografía 9, vista desde aguas abajo hacia aguas arriba, se observan en la margen izquierda, los deslizamientos ocurridos, que afectaron la banca de la vía y que fue reconformada

posteriormente con bolsacretos. Así mismo al otro costado, se presentan viviendas aledañas que invaden el cauce y que fueron inundadas el día 13 de mayo de 2011.

Fotografía 9 - Río Bogotá, deslizamientos de las bancas de la vía y afectaciones en las viviendas aledañas.

Fuente: Registro Fotográfico Elaboración Propia

En la Fotografía 10, vista desde aguas abajo hacia aguas arriba, en la margen derecha, se observa la socavación presente en la cimentación de la edificación, la cual se encuentra en alto riesgo de colapsar, debido a que se encuentra invadiendo el lecho del río, que por el flujo de agua ha erosionado la margen y por ende el suelo que soporta la cimentación de la estructura.

Fotografía 10 - Río Bogotá, socavación y estabilidad en edificaciones que invaden el lecho del cauce.

Fuente: Registro Fotográfico Elaboración Propia

En la Fotografía 11, vista desde aguas arriba hacia aguas abajo, se observa en la margen derecha un conjunto de viviendas que están invadiendo la planicie de inundación del río, y la cual fue cubierta

en su totalidad por la lámina de agua de la creciente del 13 de mayo de 2011, de acuerdo con la información recopilada en campo con la población.

Fotografía 11 - Inundaciones y afectaciones de viviendas en la planicie de inundación del río Bogotá.

Fuente: Registro Fotográfico Elaboración Propia

En la Fotografía 12, vista desde aguas arriba hacia aguas abajo, se observa en la margen derecha, la socavación presente en la cimentación del conjunto de viviendas y edificaciones, las cuales se encuentran en alto riesgo de colapsar por la invasión del río. Esta zona resultó gravemente afectada por la creciente del 13 de mayo de 2011.

Fotografía 12– Socavación y erosión de la cimentación de viviendas y edificaciones en el lecho del río Bogotá.

Fuente: Registro Fotográfico Elaboración Propia

En la Fotografía 13, vista desde aguas arriba hacia aguas abajo, se observa en la parte derecha de la fotografía la plaza de mercado que se inundó, con profundidades que alcanzaron aproximadamente 0.50 m de acuerdo con la información recopilada en campo. El puente sobre el alineamiento del cauce produce represamientos del flujo de agua puesto que gran parte de los

estribos invaden el cauce. En la parte izquierda de la imagen se encuentra la subestación eléctrica del municipio la cual no se alcanzó a inundar en la creciente del 13 de mayo de 2011, pero que se encuentra en alto riesgo de ser afectada.

Fotografía 13 - Subestación eléctrica y plaza de mercado aledaños al río Bogotá.

Fuente: Registro Fotográfico Elaboración Propia

En la Fotografía 14, ya en la parte sur del municipio, saliendo del mismo, vista la imagen desde aguas arriba hacia aguas abajo, se encuentran curtiembres y depósitos de papas. En el momento de la creciente fueron inundados, causando arrastre de la mercancía, utensilios, y curtiembres, de acuerdo con lo mencionado por los habitantes de la zona.

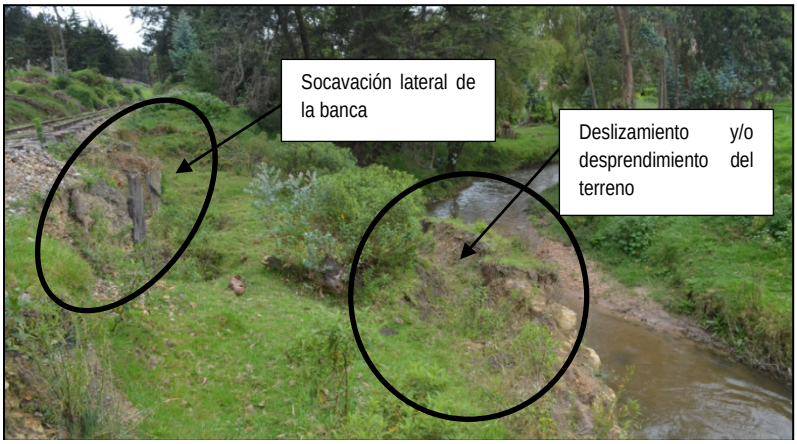
Fotografía 14 - Curtiembres y depósitos aledaños al lecho del río Bogotá.

Fuente: Registro Fotográfico Elaboración Propia

En la Fotografía 15, vista desde aguas abajo hacia aguas arriba, en la parte izquierda de la imagen, se observa que la línea ferroviaria, ha sido socavada y erosionada por la creciente del 13 de mayo

de 2011, que igualmente causó el deslizamiento de la base que conforma el soporte de los rieles férreos.

Fotografía 15 - Socavación lateral y deslizamientos de la banca de la vía férrea municipio de Villapinzón.



Fuente: Registro Fotográfico Elaboración Propia

En la Fotografía 16 y Fotografía 17, se presenta la recolección del material del lecho del río Bogotá, con el fin de realizar el análisis del coeficiente de Manning (n) por el método de Cowan, el cual será necesario en las modelaciones hidráulicas que se realicen. Las tomas de muestras se realizaron a lo largo del río Bogotá, tanto en el sector urbano como en el rural del municipio de Villapinzón. En total se tomaron 5 muestras, que a su vez fueron sectorizados en 5 tramos. Las 5 muestras fueron llevadas al laboratorio de materiales de la Escuela Colombiana de Ingeniería, para su respectiva granulometría.

Fotografía 16 - Tomas de muestras del material granular sector 2 que conforma el lecho del río Bogotá.

Fuente: Registro Fotográfico Elaboración Propia

Fotografía 17 - Tomas de muestras del material granular sector1 que conforma el lecho del río Bogotá.

Fuente: Registro Fotográfico Elaboración Propia

6. HIDROLOGÍA

Para la zona de estudio se realizó un análisis hidroclimatológico, mediante una modelación lluvia escorrentía, calibrada para los caudales picos resultantes de los ajustes a distribuciones estadísticas de máximos en la estación satelital Saucio, que es la de mayor confiabilidad para el estudio. Una vez calibrados los modelos hidrológicos hasta dicha estación se revisaron los caudales pico e hidrogramas en la zona de proyecto, y se realizaron las modelaciones hidráulicas en el sitio de estudio.

El análisis hidroclimatológico para la información existente se realizó junto con el ingeniero Daniel Vera y se presenta en el Anexo B

7. MODELACIÓN HIDRÁULICA

7.1 OBJETO

El presente capítulo, tiene por objeto realizar la modelación hidráulica en una dimensión (1D) y dos dimensiones (2D) de los caudales máximos instantáneos estimados en el capítulo anterior. La zona seleccionada está en el municipio de Villapinzón, y comprende un sector meándrico del río Bogotá extendido, tanto aguas arriba como aguas abajo. Se escogió con el fin de conocer los aspectos hidráulicos de cada uno de los modelos desarrollados, para posteriormente conocer las ventajas de usar un modelo unidimensional y bidimensional, comparar sus resultados para las mismas

condiciones iniciales, en cuanto a sus variaciones de niveles, velocidades, zonas de represamiento en las estructuras, números de Froude, anchos superficiales, y hacer un análisis de sensibilidad de los modelos a cambios en valores de coeficientes de rugosidad.

Es de resaltar, que al realizar las modelaciones hidráulicas de flujo en una y dos dimensiones, se analizarán tanto para flujo permanente como no permanente, identificando las ventajas y desventajas de usar éste tipo de modelos.

7.2 ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE FLUJO

Con el fin de estimar los tiempos de llegada de los caudales pico, las atenuaciones de los hidrogramas, los volúmenes de inundaciones provocados por la avenida y las profundidades de inundación se recurre a los modelos de régimen no permanente, esto genera una gran ventaja al momento de estudiar las consecuencias de las crecientes.

El régimen permanente por otra parte requiere de esquemas de cálculo más sencillos, esto debido a que se ignora una variable independiente, por lo tanto los esquemas de cálculo son mucho más sencillos y el tiempo de cálculo es muy corto, siendo esto una ventaja respecto a los esquemas en régimen no permanente.

Las ecuaciones que describen el régimen no permanente en lámina libre en una dimensión son las ecuaciones de Saint Venant, escritas por primera vez por Barré de Saint Venant en 1871, y que sirven para describir tanto el régimen gradualmente variable, como el rápidamente variable. Estas ecuaciones no se pueden resolver para geometrías reales con métodos analíticos, además el estudio de los fenómenos que describen mediante modelos físicos resulta enormemente complejo y costoso. Por todo ello, y gracias al desarrollo de la informática en las últimas décadas, los esfuerzos han ido encaminados hacia la resolución mediante modelos numéricos.

7.2.1 Análisis de Modelos Unidimensionales en Régimen Variable

El uso de las ecuaciones de Saint Venant como parte del estudio del régimen variable en modelos unidimensionales supondría una gran capacidad de los ordenadores usados para la modelación. Estas ecuaciones surgen a partir de las ecuaciones de promedio de Reynolds, que a su vez provienen de las ecuaciones de Navier-Stokes, al promediar en el tiempo. Las ecuaciones de Navier-

Stokes consisten en las leyes físicas de conservación cantidad de movimiento, para un fluido newtoniano e isotrópico, como el agua.

Para lograr una resolución completa de las ecuaciones de promedio de Reynolds (RANS por sus siglas en inglés Reynolds Averaged Navier Stokes Equation) se debe discretizar el dominio en las 3 dimensiones espaciales, para lo cual se produciría un modelo tridimensional, el cual calcula la distribución de velocidades del agua en cada punto. Sin embargo estos esquemas son de una alta complejidad y requeren de computadores muy potentes para el montaje y modelación, aun así el tiempo de simulación es muy alto. Así entonces para los modelos bidimensionales en ríos, se promedia la componente vertical de la velocidad. Estas ecuaciones son conocidas como las ecuaciones de Saint Venant en 2D. Barré Saint Venant propuso una serie de hipótesis con el fin de suponer un flujo unidimensional, resumiéndolas así:

- La profundidad del agua es pequeña con respecto a las dimensiones longitudinal y transversal.

- El flujo se supone unidimensional. Por lo tanto la velocidad en una sección es perpendicular al plano YZ y constante en toda la sección al igual que la altura de la lámina.

- Se supone régimen gradualmente variable, con lo que se puede hacer la hipótesis de flujo casi paralelo.

- Distribución hidrostática de presiones, velocidades y aceleraciones verticales despreciables.

- El eje del canal se supone rectilíneo, para introducir pérdidas relacionadas con curvas cerradas se deben tener en cuenta como pérdidas de carga localizadas.

- Lecho fijo y no erosionable, la sección geométrica se considera constante.

- Pendiente de fondo moderada.

- Se evalúan las pérdidas por fricción con la ecuación de Manning, igual que en flujo uniforme.

- Fluido incompresible y newtoniano.

Las ecuaciones de Saint Venant para un canal no prismático son:

$$\frac{\partial}{\partial t}U + \frac{\partial}{\partial x}F = H$$

Donde

$$U = \begin{pmatrix} A \\ Q \end{pmatrix}; \quad F = \begin{pmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A} + gI_1 \end{pmatrix}; \; H = \begin{pmatrix} 0 \\ gI_2 + gA(S_0 - S_f) \end{pmatrix}$$

Las variables dependientes son el área de la sección mojada A y el caudal circulante Q. I_1 es la fuerza a la presión del agua en una sección, que puede escribirse como el momento geométrico, o momento de primer orden de la sección respecto a la superficie libre:

$$I_1 = \int_0^h (h - \eta) b(x, \eta) d\eta$$

Donde b es el ancho superficial y h la altura de la lámina. I_2 Es la contribución de las fuerzas de presión del contorno definida como:

$$I_2 = \int_0^h (h - \eta) \frac{\partial b(x, \eta)}{\partial x} d\eta$$

En canales prismáticos, aunque tengan una sección cualquiera, el término I_2 es idénticamente igual a cero, mientras que en canales no prismáticos es distinto de cero.

Si en las ecuaciones unidimensionales para cauces no prismáticos se incorpora la ecuación de continuidad en la del movimiento, se puede obtener otra forma de las mismas ecuaciones, en forma no conservativa, como:

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

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{Q^2}{A}\right) + gA\frac{\partial h}{\partial x} = gA(S_0 - S_f)$$

También existen otras expresiones para la ecuaciones de Saint Venant en forma no conservativa, utilizando por ejemplo las variables (A, u) en lugar de (A, Q), o fusionando la pendiente de fondo y el gradiente de la altura de la lámina en una sola derivada que exprese la variación de la cota de la superficie libre, etc.

7.2.2 Esquemas Numéricos de Modelos Bidimensionales

Existen situaciones para las cuales las condiciones hidrodinámicas en el que los supuestos de flujo unidimensional no son válidos, los campos de velocidades dejan de ser unidireccionales para las secciones del flujo, generando errores en la solución. Para tener en cuenta algunas situaciones, se han desarrollado los esquemas cuasi-bidimensionales, donde el flujo se diferencia entre el canal principal y la llanura de inundación, y se pueden modelar separadamente, manteniendo unas condiciones de compatibilidad para las dos modelaciones. Este procedimiento es válido en el caso de profundidades de lámina bajas, por lo tanto ésta metodología de resolución resulta no ser apropiada para profundidades medias en donde ya no se puede considerar que tanto las secciones del cauce, como las planicies inundables se comportan de manera aislada.

En el caso del flujo tridimensional, donde se calcula la distribución vertical de las componentes de velocidad, los modelos pueden llegar a ser muy complejos al realizar el cálculo de la distribución para cada celda, sin embargo en el caso de modelos bidimensionales se considera que esta distribución tiene un cambio relativamente pequeño en la vertical. Con esta consideración se pueden simplificar las ecuaciones RANS en dos dimensiones, realizando una ponderación de las ecuaciones tridimensionales.

Las principales hipótesis para realizar esta simplificación son:

- Profundidad de la lámina de agua es baja con relación a las otras dimensiones del modelo
- Distribución de presiones hidrostática en la vertical
- Lecho fijo y no erosionable, la sección geométrica se considera constante.
- Flujo incompresible y newtoniano
- Baja pendiente de fondo

Al cumplirse las anteriores hipótesis, las componentes de velocidad y aceleración en el eje vertical (*Z)* son tan bajas que son despreciables con respecto a las componentes longitudinal (*X)* y transversal (*Y)*. También se supone que estas componentes no varían con la coordenada (dimensión) vertical. Es decir, se puede suponer homogeneidad del campo de velocidades con la profundidad.

Por tanto los modelos 2D en ríos suponen componentes de velocidad en las direcciones longitudinal y transversal, las cuales se promedian con la profundidad de la lámina de agua, mientras que en los esquemas unidimensionales, se cuenta únicamente con la componente de velocidad longitudinal que actúa perpendicularmente en la sección transversal.

Las componentes de velocidad se muestran a continuación:

$$u_x = \frac{1}{h}\int_{Z0}^{Zs} \overline{u_x}\, dz \qquad u_y = \frac{1}{h}\int_{Z0}^{Zs} \overline{u_y}\, dz \qquad h = Z_s - Z_0$$

En Dónde:

h : Profundidad de la lámina en el punto del dominio estudiado.

$\overline{u_x}\ y\ \overline{u_y}$: Componentes horizontales de la velocidad tridimensional.

$u_x\ y\ u_y$: Componentes de la velocidad horizontal promediada en profundidad.

Z_0 : Elevación del fondo.

Z_s : Elevación de la superficie de agua.

Los modelos bidimensionales trabajan entonces en dominios en donde están presentes tres variables dependientes para cada punto del dominio: la profundidad de la lámina y las componentes horizontales de la velocidad en *X* y *Y*.

Realizando la integración de las ecuaciones RANS en la profundidad, se obtienen las ecuaciones bidimensionales del flujo en lámina libre, más conocidas como las ecuaciones de Saint Venant bidimensionales completas

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial (hu_x)}{\partial x} + \frac{\partial (hu_y)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial (hu_x)}{\partial t} + \frac{\partial (hu_x{}^2)}{\partial x} + \frac{\partial (hu_x u_y)}{\partial y} = -gh\frac{\partial}{\partial x}(h + z_0) - \frac{\tau_{0x} + \tau_{sx}}{\rho} + fhu_y + \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy})$$

$$\underbrace{\frac{\partial (hu_y)}{\partial t}}_{\text{Aceleración local}} + \underbrace{\frac{\partial (hu_y{}^2)}{\partial x} + \frac{\partial (hu_x u_y)}{\partial y}}_{\text{Aceleración convectiva}} = \underbrace{-gh\frac{\partial}{\partial y}(h + z_0)}_{\text{Fuerzas de presión y gravedad}} - \underbrace{\frac{\tau_{0y} + \tau_{sy}}{\rho}}_{\text{Esfuerzo de fondo y superficie}} + \underbrace{fhu_x}_{\text{Fuerza de coriolis}} + \underbrace{\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy})}_{\text{Esfuerzos efectivos, viscosos y turbulentos términos promediados en la vertical}}$$

Dónde:

τ_0 *y* τ_s son los tensores de esfuerzo de fondo y superficie respectivamente

f El coeficiente de coriolis (tiene en cuenta la rotación de la tierra)

T_{xy} Responde a la expresión:

$$T_{xy} = \frac{1}{h}\int_{z0}^{zs}\left(\rho\nu\left[\frac{\partial \overline{u_x}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u_y}}{\partial x}\right] - \rho\overline{u'_x u'_y} - \rho(\overline{u_x} - u_x)(\overline{u_y} - u_y)\right)dz$$

Donde ν es la viscosidad cinemática, u'_x y u'_y son las fluctuaciones turbulentas de Reynolds de u_x y u_y, mientras que $\overline{u'_x u'_y}$ son la variable promediada según:

$$\bar{u} = \frac{1}{t_2 - t_1}\int_{t1}^{t2} u dt \qquad\qquad u = \bar{u} + u'$$

En su forma más general, las ecuaciones de aguas someras bidimensionales pueden incluir los siguientes efectos:

- Presión hidrostática
- Pendiente del fondo
- Rozamiento del fondo
- Esfuerzos tangenciales viscosas
- Esfuerzos tangenciales turbulentas
- Rozamiento superficial por viento
- Fuerza de Coriolis
- Aportaciones puntuales o distribuidas de caudal

7.2.3 Simplificación de las Ecuaciones de Saint Venant en Dos Dimensiones

Para efectos prácticos en ríos, las ecuaciones de Saint Venant Bidimensionales se pueden simplificar despreciando las fuerzas de Coriolis, las viscosas, las turbulentas y las cortantes producidas por el viento sobre la superficie de la lámina de agua. Sin embargo en zonas costeras la influencia de los esfuerzos cortantes por el viento es alta, y debe ser considerada. Las ecuaciones de Saint Venant bidimensionales simplificadas se describen a continuación:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial (h u_x)}{\partial x} + \frac{\partial (h u_y)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial (h u_x)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left({u_x}^2 + g\frac{h^2}{2}\right) + \frac{\partial}{\partial y}(h u_x u_y) = gh\left(s_{0x} + s_{fx}\right)$$

$$\frac{\partial (h u_y)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left({u_y}^2 + g\frac{h^2}{2}\right) + \frac{\partial}{\partial y}(h u_x u_y) = gh\left(s_{0y} + s_{fy}\right)$$

En las ecuaciones anteriores el modelo de turbulencia no se ha tenido en cuenta, por lo tanto los términos de los esfuerzos cortantes solamente se tienen en cuenta de manera aproximada en el término de la pendiente motriz, junto con los de fondo.

Las ecuaciones de Saint Venant pueden escribirse en forma vectorial, y de forma conservativa como:

$$\frac{\partial}{\partial t}U + \nabla F = H$$

Utilizando esta notación se obtiene un sistema de ecuaciones en derivadas parciales hiperbólico no lineal

Donde U es el vector de variables de flujo. De ahora en adelante las componentes serán $u = u_x$ y $v = u_y$. F es el tensor de flujo y H es el término independiente o fuente, que responden a las expresiones:

$$U = \begin{pmatrix} h \\ hu \\ hv \end{pmatrix} \qquad F = \begin{pmatrix} hu & hv \\ hu^2 + g\frac{h^2}{2} & huv \\ huv & hv^2 + g\frac{h^2}{2} \end{pmatrix} \qquad H = \begin{pmatrix} 0 \\ gh(S_{0x} - S_{fx}) \\ gh(S_{0y} - S_{fy}) \end{pmatrix}$$

Pendiente Motriz de Manning: $S_{fx} = \frac{u\sqrt{u^2+v^2n^2}}{h^{4/3}} \qquad S_{fy} = \frac{v\sqrt{u^2+v^2n^2}}{h^{4/3}}$

U representa la variación temporal local de las variables hidráulicas, masa y cantidad de movimiento. F representa la variación espacial de los flujos de dichas cantidades. H representa la ganancia o pérdida de masa y cantidad de movimiento por unidad de tiempo en un volumen diferencial que se mueve con el fluido. Como la pérdida de masa debe ser nula, la primera componente del vector es igual a cero.

La contribución exterior a la cantidad de movimiento, con las hipótesis realizadas, tiene dos razones: la variación de energía potencial (reflejada en la pendiente de fondo) y las fuerzas de fricción con el contorno (reflejada en la pendiente motriz). Introduciendo la ecuación de continuidad en las ecuaciones del movimiento, se pueden escribir las ecuaciones de Saint Venant en forma no conservativa como:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (hu)}{\partial x} + \frac{\partial (hv)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + g\frac{\partial h}{\partial x} = gh(S_{0x} - S_{fx})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + g\frac{\partial v}{\partial y} = gh(S_{0y} - S_{fy})$$

Las ecuaciones de Saint Venant en forma no conservativa presentan grandes ventajas a la hora de plantear esquemas de resolución con discontinuidades.

7.2.4 Clasificación de los Modelos Hidráulicos Bidimensionales Según el Esquema Numérico

Los esquemas numéricos de los modelos bidimensionales más comúnmente usados se muestran a continuación:

Esquemas clásicos

- Diferencias finitas (Implícitos ADI)

Los esquemas ADI Alternation Direction Implicit o de direcciones alteradas fueron los primeros métodos para las ecuaciones de flujo libre bidimensionales. En estos esquemas, el avance en un incremento de tiempo se divide en dos pasos, para los cuales se resuelven las ecuaciones en sólo una de las direcciones del espacio. En cada incremento de tiempo las ecuaciones se discretizan de manera que dos de ellas quedan implícitas, mientras que la tercera queda explicita, y se obtienen los valores de variables distintas en puntos distintos de la malla de cálculo.

Estos esquemas fueron concebidos para el cálculo hidrodinámico en zonas costeras y están limitados a la modelación de flujo en régimen lento e hidrogramas suaves. Utiliza métodos simplificados en cambios de régimen. Están basados en una malla rectangular y regular (non-staggered grid). Tienen algunos problemas de conservación y los algoritmos de corrección resultan algo confusos.

Los más conocidos con este tipo de esquema de resolución para las ecuaciones de Saint Venant son MIKE21 del Danish Hydraulics Institute, el cual puede considerar, a parte de la pendiente del fondo y las fuerzas de fricción, el efecto de fuerzas como el viento, la fuerza de Coriolis, corrientes inducidas por el oleaje y la evapotranspiración. Y el SOBEK, de Delft Hydraulics, que se basa en un esquema en diferencias finitas basado en una malla rectangular, permite modelar flujo subcrítico y supercrítico y tener en cuenta estructuras especiales como diques, viaductos, pasos bajo vía, azudes, etc.

- Elementos finitos (buena aproximación en contornos)

El método de los elementos finitos resulta no ser muy popular a la hora de resolver las ecuaciones de Saint Venant en dos dimensiones, debido a su complejidad y los costos computacionales. Vreugdenhil (1994) los comparó con distintos métodos de diferencias finitas llegando a la conclusión que para una malla de mil nodos, el método requiere aproximadamente 200 veces más operaciones en cada incremento de tiempo que uno de diferencias finitas. Sin embargo los métodos de elementos finitos tienen ventajas frente a las diferencias finitas, ya que pueden considerar mallas irregulares que se adaptan a los contornos variando también las densidades en las distintas partes del dominio. Tienen problemas de conservación de la masa y utilizan parámetros de estabilización o convergencia.

Algunos de los modelos que utilizan estos esquemas son el BOSS SMS de BOSS International Inc., que incorpora distintos módulos de cálculo como son el RMA-2 y el HIVEL2D, desarrollados por el Waterways Experiment Station Hydraulics Laboratory del U.S. Army Corps of Engineers. En definitiva el SMS es una interface de pre y post proceso para los distintos módulos de cálculo, con capacidad de generación de mallas de elementos finitos a partir de datos suministrados por el usuario o de información topográfica digitalizada. El modelo TELEMAC (Hervouet y Janin, 1994), (Bates, 1995), distribuido también por HR Wallinfgord, que utiliza un código de elementos finitos y viscosidad turbulenta constante, con capacidades de modelación hidrodinámica, dispersión de contaminantes, transporte de sedimentos y calidad de aguas.

- Esquemas en volúmenes finitos (Ecuaciones en forma conservativa) Shock capturing methods.

Los esquemas numéricos basados en volúmenes finitos pueden ser de primer orden o de Alta Resolución, muy desarrollados en los últimos tiempos y con muy buenos resultados.

Trabajan con mallas irregulares adaptadas a los contornos. Son conceptualmente más simples que los mencionados anteriormente y no presentan problemas de convergencia, con lo que son precisos incluso en los cambios de régimen. Los esquemas explícitos en general están sujetos a la condiciones de Courant, mientras que los implícitos son incondicionalmente estables. Si son esquemas conservativos no pierden la masa de agua simulada. Algunos de esos modelos son INFOWORKS desarrollado por Hydraulic Research a través de Wallingford Software, el GUAD2D desarrollado por la ingeniería INCLAM (Ingeniería del agua) junto con la universidad de Zaragoza y el programa IBER motivo de estudio en el presente trabajo desarrollado por el equipo de investigación FLUMEN, del departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Escuela Técnica Superior de Caminos Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Cataluña.

La modelación hidráulica para los modelos 1D y 2D se presenta en los anexos E y H.

8. CONSIDERACIONES DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS 1D Y 2D

En general los modelos unidimensionales resultan ser aceptables en el estudio de cauces naturales, sin embargo existen casos en los que las hipótesis se alejan de la situación real. Los esquemas numéricos en dos dimensiones resultan ser una herramienta muy útil en casos como: estuarios de los ríos, llanuras de inundación, flujo fuera de los cauces, reflujo en obras hidráulicas, rotura de presas, etc.

En todo caso al utilizar los esquemas bidimensionales se presenta el inconveniente de los costos computacionales, sin embargo debido a los avances tecnológicos resulta ser cada vez más accesible y eficaz.

La modelación hidráulica bidimensional se realizará mediante el modelo Iber que tiene las siguientes características:

- Acercamiento mayor a la realidad debido al comportamiento real del flujo en llanuras (Modelación bidimensional)
- Esquemas de Alta Resolución (estabilidad del esquema de cálculo)
- Método de los volúmenes finitos.
- Esquema explicito sujeto a la condición de Courant.
- Capacidad para simular un volumen de agua
- Capacidad para simular las acciones de:
  - Turbulencia
  - Viento
  - Infiltración
  - Abstracción inicial

Las ventajas de la simulación bidimensional mediante el modelo Iber, sobre la simulación unidimensional con el modelo Hec-Ras 4.1 se muestran a continuación:

- Posibilidad de simulación un vaciado de presa puesto que tiene en cuenta el volumen (conservativo)
- Conocimiento de los vectores de flujo y velocidad en las dos componentes horizontales.
- Capacidad de conocer la variación temporal de la profundidad de la lámina y velocidad en cualquier punto del terreno en las coordenadas horizontales.
- Esquemas de Alta resolución
  - 2º Orden en zonas suaves , donde no existan oscilaciones espurias
  - Mayor precisión en cambios de régimen
  - discontinuidades suavizadas
- Convergencia asegurada (esquema explícito)

- Ecuaciones en forma conservativa con ventajas para régimen rápido y cambios de régimen.
- Mallas irregulares adaptadas a los contornos
- Conceptualmente simples
- La calibración del modelo es mucho más sencilla que en el modelo HEC RAS, sin embargo el tiempo de cálculo es mayor.
- Análisis del riesgo asociado a una inundación mucho más confiable respecto a un modelo 1D
- Permite el almacenamiento en zonas y posterior movilización del volumen almacenado

No obstante las limitaciones de IBER están relacionadas con la malla de cálculo.

Las mallas finas, debido a la cantidad de elementos en el dominio requieren un gran tiempo de cálculo, aunque se obtienen resultados más precisos. Una malla de mayor tamaño resultará en menores tiempos aunque con problemas de precisión. Para la modelación se requiere una buena topografía, definición de la rugosidad de la celda y equilibrar la resolución de la malla respecto a la magnitud del proyecto.

Para el caso en estudio la utilización de una malla aligerada mediante la librería RTIN generó disminución en los tiempos de cálculo tanto para flujo permanente, como flujo no permanente en la Imagen 3 se muestra en detalle la malla aligerada del modelo Iber usada para la modelación 2D.

Imagen 3 – Detalle de la malla aligerada usada para la modelación mediante Iber

Fuente: Software Iber

IBER permite elegir el orden de resolución del esquema numérico, un limitador de flujo, con el fin de evitar las oscilaciones espurias.

El descentramiento del flujo convectivo es equivalente desde el punto de vista matemático a añadir un término de difusión (al que generalmente se le llama difusión numérica o artificial) con un coeficiente de difusividad (numérica) proporcional al tamaño de malla. Es por lo tanto conveniente utilizar mallas finas para disminuir el error introducido por la difusión numérica o recurrir a esquemas de orden superior a uno.

Cuando se requiere un orden de precisión elevado con un tamaño de malla que no sea excesivamente fino, es necesario recurrir a esquemas de orden superior. En el módulo hidrodinámico de IBER se consigue aumentar el orden de precisión del esquema de Roe mediante una extensión de orden 2 del flujo numérico, y una limitación TVD (Total Variation Diminishing) del mismo.

El modelo IBER incluye los siguientes limitadores del flujo:

- Minmod (2º orden)
- Superbee (2º orden)
- Van Leer (2º orden)

8.1 PARAMETROS PARA LA ELECCIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO

Se deben tener en cuenta ciertos factores hidrodinámicos y físicos para la elección del modelo de cálculo, en el caso de cauces bien definidos y encausados, es decir de alta montaña en donde no haya presencia de llanuras de inundación, es aceptable el uso de hipótesis de unidimensionalidad. Para los casos en los que se presenten comportamientos evidentemente bidimensionales, como la presencia de llanuras de inundación, bifurcaciones del flujo, etc. Resulta más efectivo el uso de modelos bidimensionales, aunque debe resaltarse que existen casos en los que resulta suficiente el uso de modelos cuasi-bidimensionales, los cuales usan celdas de almacenamiento en los casos de las zonas inundables, y siempre y cuando haya una clara diferenciación entre cauce llanuras de inundación. Para el uso de los modelos cuasi-bidimensionales la correcta calibración requiere experiencia y habilidad del modelador. Por otro lado los modelos bidimensionales requieren topografías detalladas para la obtención de resultados confiables.

Por lo tanto un modelo unidimensional en algunos establece resultados del lado de la seguridad proporcionando valores de velocidad de la lámina y velocidad superiores.

La precisión requerida y los datos recolectados en campo resultan fundamentales para la elección del modelo a usar, en el caso de la estimación de inundaciones. Por lo tanto la elección depende principalmente de la experiencia y habilidad del modelador para detectar el modelo más favorable,

para su posterior calibración, el régimen de flujo a simular, en base al presupuesto y la información obtenida en campo.

- Para la elección del modelo hidráulico se debe establecer principalmente la información base para la modelación, siendo necesaria una topografía muy detallada para los modelos bidimensionales.

- La necesidad de experiencia en el modelo a usar es fundamental con el fin de depurar errores que pueden generar grandes imprecisiones en los resultados de la modelación.

- En el caso de los resultados solicitados por el cliente debe hacerse un análisis muy detallado del caso en estudio, con el fin de establecer el esquema numérico de cálculo. Siendo casos distintos el análisis inundaciones en zonas urbanas y rurales, así como estructuras de canalización.

- En algunos casos, por ejemplo el modelo Isis, existe un límite en el número de nodos de la versión gratuita, por lo que hay una limitación en el tamaño de la zona a simular. Requiriendo entonces el pago de licencias y soporte técnico, que en algunos casos llega a ser de altos costos.
- Un factor determinante en la elección del modelo a usar resulta ser el presupuesto para la consecución de la información base para la modelación, siendo la topografía el parámetro de mayo costo al momento de modelar. En algunos casos debido a la falta de presupuesto, únicamente se pueden realizar levantamientos topográficos por secciones transversales, siendo el modelo Hec-Ras mucho más útil que un modelo 2D.

- En el caso de la calibración y análisis de sensibilidad de los modelos hidráulicos un parámetro importante para la elección del modelo hidráulico, y en el caso de ser un proyecto de gran magnitud, los costos computacionales llegan a ser elevados, viéndose necesaria la ejecución de repetidas simulaciones, con el fin de estimar la sensibilidad de los modelos hidráulicos.

- El almacenamiento de la información de igual forma tiene un papel importante en la selección de un modelo para determinado caso. En el caso de modelos bidimensionales, la transferencia de información vía internet puede ser muy compleja debido al tamaño de los modelos.

Resultan ser muchos los parámetros influyentes en la elección del modelo a usar, sin embargo el más influyente resulta ser la topografía de la zona de estudio, siendo entonces el parámetro más determinante para una óptima modelación y obtención de resultados con una mayor precisión el presupuesto base para la ejecución del proyecto.

8.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MODELOS IBER Y HEC-RAS 4.1

A manera comparativa se resume la caracterización de los modelos hidráulicos Hec-Ras 4.1 e Iber, con el fin de resaltar y diferenciar los modelos con base en los parámetros y esquemas de cálculo.

MODELO	ECUACIONES DE CÁLCULO
HEC-RAS	Ecuaciones completas de Saint Venant en 1D, con células de almacenamiento.
IBER	Ecuaciones completas de Saint Venant en 2D

MODELO	HIPÓTESIS DE FLUJO DEL MODELO
HEC-RAS	Flujo unidimensional (cuasibidimensional)
IBER	Flujo bidimensional

MODELO	RÉGIMEN DE FLUJO ÓPTIMO
HEC-RAS	Ventajas en régimen lento e hidrogramas suaves.
IBER	Ventajas para régimen rápido y cambios de régimen[4].

MODELO	ESQUEMAS DE SEGUNDO ORDEN
HEC-RAS	Esquema de Preissman, posibles oscilaciones espurias
IBER	Esquema es de Alta resolución - 2o Orden en zonas suaves , donde no existan oscilaciones espurias - Mayor precisión en cambios de régimen - Discontinuidades suavizadas

MODELO	CARACTERIZACIÓN DE LAS ECUACIONES DE CÁLCULO
HEC-RAS	Flujo unidimensional
IBER	Flujo bidimensional

MODELO	TIPO DE ESQUEMA DE CÁLCULO
HEC-RAS	Esquema de cálculo implícito, proceso iterativo en cada paso de tiempo.
IBER	Esquema de cálculo explicito, directo y sujeto a la condición de Courant

[4] Flumen. (2012). *IBER, Modelización Bidimensional del Flujo en Lámina Libre en Aguas Poco Profundas, Manual de Referencia Hidráulico.* Pag 39.

MODELO	ESTABILIDAD DEL MODELO
HEC-RAS	A veces presenta inestabilidades en régimen rápido y cambio de régimen.
IBER	Estable en cambios de régimen

MODELO	CONVERGENCIA DEL MODELO
HEC-RAS	Esquema de cálculo implícito, proceso iterativo en cada paso de tiempo.
IBER	Esquema de cálculo explicito, directo y sujeto a la condición de Courant

MODELO	PENDIENTE DE FONDO
HEC-RAS	Óptimo funcionamiento en pendientes pequeñas (menores que 1:10)
IBER	Todo tipo de terrenos debido al ajuste por error cordal[5].(máxima distancia entre el terreno original y la malla de cálculo)

MODELO	ESQUEMA DE CÁLCULO DEL MODELO
HEC-RAS	Diferencias finitas implícitas (Preissman)
IBER	Volúmenes finitos explícitos

MODELO	SIMULACIÓN DE PRESAS
HEC-RAS	Dificultad para expresar el volumen de una presa aguas arriba.
IBER	Posibilidad de simular un vaciado de presa puesto que tiene en cuenta el volumen (conservativo)[6].

MODELO	SENSIBILIDAD EN LA PRESICIÓN
HEC-RAS	La precisión de resultados será más grande mientras menor sea la cantidad de movimiento que se desee simular.
IBER	La precisión de los resultados será mayor cuanto más pequeño sea el intervalo de cálculo.

MODELO	ZONAS DE ALMACENAMIENTO
HEC-RAS	Permite el almacenamiento en zonas y posterior movilización del volumen almacenado
IBER	Permite el almacenamiento en zonas y

[5] E. Bladé, et al. Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos, Rev. int. métodos numér. cálc. diseño ing. 2012, Pag 4.

[6] Ibid, Pag 6.

	posterior movilización del volumen almacenado

MODELO	DISCRETIZACIÓN DEL DOMINIO
HEC-RAS	Secciones transversales, y celdas de almacenamiento
IBER	Mallas estructuradas y no estructuradas adaptadas a la topografía, diferentes tipos de mallas en el modelo.

MODELO	REQUERIMIENTOS DE ESTABILIDAD
HEC-RAS	Problemas de estabilidad donde el flujo sea rápidamente variable. Necesidad del LPI Local Partia Inertia
IBER	Profundidades y velocidades grandes + tamaños de malla pequeños requiere Δt pequeños

MODELO	TIEMPO DE CÁLCULO
HEC-RAS	Bajo, en ambos regímenes de flujo
IBER	Elevado, según la magnitud del proyecto

MODELO	PARÁMETROS DE SALIDA
HEC-RAS	Hidrogramas y limnigramas en las secciones
IBER	Capacidad de conocer la evolución temporal del calado y de la velocidad en cualquier punto del terreno en las coordenadas horizontales

MODELO	ADAPTACIÓN A LA TOPOGRAFÍA
HEC-RAS	En régimen variable los cambios bruscos de sección provocan grandes inestabilidades
IBER	Mallas irregulares adaptadas a los contornos

MODELO	SOFTWARE DE APOYO
HEC-RAS	Están disponibles extensiones de Arc-Gis para facilitar la obtención de la geometría y obtención de mapas de resultados
IBER	Tiene autonomía de funcionamiento para la obtención de la malla necesaria y el posterior mapeado de resultados, siempre y cuando la información se encuentre en el formato adecuado.

MODELO	CALIBRACIÓN
HEC-RAS	Es posible realizar modelizaciones cuasi

	bidimensionales pero requieren de una gran destreza a la hora de acoplar las células con las secciones transversales.
IBER	Uso muy sencillo, fácil calibración. Conceptualmente simples

MODELO	CAPACIDADES ADICIONALES
HEC-RAS	Capacidad de simular lecho móvil y erosión.
IBER	Capacidad de simulación de efectos del viento, turbulencia, infiltración, lecho móvil, erosión etc.

MODELO	VENTAJAS EN LOS RESULTADOS
HEC-RAS	Buenos resultados en tramos largos de ríos
IBER	Buenos resultados en estuarios, tramos cortos de ríos, llanuras de inundación, flujo fuera de cauce, obras hidráulicas. Rotura de presas.

9. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS MODELOS UNIDIMENSIONALES (1D) Y BIDIMENSIONALES (2D)

La modelación hidrodinámica, en lo que corresponde a zonas inundables urbanas, presenta dificultades respecto a la complejidad de la geometría y al desconocimiento de las características de los parámetros (rugosidad) del dominio en estudio. Es por esto que las simplificaciones son tanto necesarias, como indispensables. Para las modelaciones hidrodinámicas, los efectos de la geometría son a menudo integrados en el cálculo de los coeficientes de fricción (Manning), como se mostró en el Anexo E, Capítulo 1.18. Así entonces debe discutirse los efectos de la elección de los coeficientes de rugosidad a lo largo del cauce empleados sobre los resultados.

En los casos en los que fuera necesario realizar una modelación hidrodinámica lo más precisa posible, los costos de la adquisición de la información necesaria (como medidas de campo y toma de muestras), para la modelación podrían ser muy altos. La utilidad de los estudios de sensibilidad viene dada en la determinación de los parámetros físicos más influyentes dentro de la modelación, con el fin de estimar con una mayor precisión los parámetros hidrodinámicos para las modelaciones en las cuales se basan los diseños de obras hidráulicas, disminuyendo así costos de medidas en campo y aumentando la confiabilidad de los modelos.

La sensibilidad de una variable de salida de un modelo, para un parámetro dado, se puede definir como la derivada parcial de esta variable relativa al parámetro. La sensibilidad empírica es calculada generalmente como la diferencia entre dos simulaciones efectuadas con una ligera variación de un parámetro.

La finalidad de los estudios de sensibilidad es asociar un intervalo de confianza entre los resultados de las simulaciones, así como también de estimar la localización de los puntos de medida que permitan mejorar el comportamiento del modelo obteniendo así resultados óptimos. En el caso de las ecuaciones de Saint Venant bidimensionales en régimen fluvial, la sensibilidad se propaga más en la dirección transversal al flujo, que en la dirección longitudinal. Además, las velocidades de flujo longitudinales y la cota de superficie libre de proporcionan información redundante, mientras que las velocidades transversales proporcionan información de distinta naturaleza y así agregan valor a la calibración del modelo.

Se variaron los coeficientes en un rango de 0.01 variando un factor de 0.001

La sensibilidad puede ser expresada en forma matemática considerando la expansión de las series de Taylor para la función explícita.

$$O = f(F_1, F_2, \dots, F_n)$$

El factor O es la variable de salida del modelo. El cambio en el factor O resultante del cambio en un factor F_i viene dado por:

$$f\left(F_i + \Delta F_i, F_{j|j\neq i}\right) = O_0 + \frac{\partial O_0}{\partial F_i}\Delta F_i + \frac{1}{2!}\frac{\partial^2 O_0}{\partial F^2 i}\Delta F^2 i + \cdots$$

En donde O_0 es el valor de O en un nivel específico de F_i. Si los términos no lineares son pequeños en comparación con los términos lineares la ecuación se puede aproximar por:

$$f\left(F_i + \Delta F_i, F_{j|j\neq i}\right) = O_0 + \frac{\partial O_0}{\partial F_i}\Delta F_i$$

Así entonces

$$\Delta O_0 = f\left(F_i + \Delta F_i, F_{j|j\neq i}\right) - O_0 = \left(\frac{\partial O_0}{\partial F_i}\right)\Delta F_i$$

Esta es la ecuación linearizada de sensibilidad, y que será utilizada en el caso en estudio, que por lo tanto mide el cambio en el factor O que resulta de un cambio del factor F_i. La ecuación linearizada de sensibiliiidad se puede extender también en los casos en los que más de un parámetro es cambiado simultáneamente. La ecuación generalizada de sensibilidad es entonces:

$$S = \frac{\partial O_0}{\partial F_i} = \frac{f\left(F_i + \Delta F_i, F_{j|j\neq i}\right) - f(F_1, F_2, \dots, F_n)}{\Delta F_i}$$

- Definición del Parámetro en estudio

Al realizar modelaciones hidráulicas un parámetro que juega un papel fundamental en la estimación de los principales resultados hidrodinámicos es el coeficiente de rugosidad de Manning (n). La importancia de este parámetro radica en su distribución espacial, ya que depende de las condiciones actuales de las coberturas vegetales para las zonas inundables, y la estimación de este parámetro se realiza con base en un análisis de coberturas para la zona en estudio.

La información previa recopilada para el sitio en estudio, como granulometrías del lecho produce buenas estimaciones de los valores reales del coeficiente de rugosidad de Manning a lo largo del cauce. Sin embargo para modelaciones de distintos periodos de retorno, en donde las características de las coberturas de las zonas inundables pueden cambiar, y donde la estimación de los parámetros se realizó mediante un proceso de inspección visual, se puede llegar a propagar considerablemente las incertidumbres en el modelo hidráulico. Por lo tanto este parámetro juega un papel determinante y resulta ser de gran importancia en el análisis de sensibilidad del modelo.

- Análisis de Sensibilidad de la Variable en Estudio

El coeficiente de rugosidad de Manning resulta ser un parámetro fundamental en la modelación hidráulica. Uno de los resultados más importantes es la lámina de agua a lo largo del dominio del modelo.

Para el cálculo de la sensibilidad del modelo respecto al parámetro de rugosidad, el parámetro *n* tomará valores x_i, mientras que la variable de predicción *H* correspondiente a la profundidad de la lámina de agua, tomará los valores de *P*. El índice de sensibilidad SI se calcula de la siguiente manera:

$$SI_i = \frac{dP/dx_i}{x_i}$$

Para el cálculo del gradiente dP/dx_i se realiza mediante la derivación de las ecuaciones del modelo, lo cual es muy complejo, sin embargo se puede calcular de manera numérica realizando ejecuciones del modelo hidráulico realizando variaciones de x_i, es decir del coeficiente de rugosidad.

Con el fin de realizar el cálculo de la sensibilidad se aproximará con diferencias finitas centrales:

$$SI_i = \frac{[P(x_i - \Delta x_i) - P(x_i + \Delta x_i)] / 2\Delta x_i}{x_i}$$

El parámetro Δx_i corresponde a un pequeño incremento en la rugosidad x_i, en este caso es igual a 0.001.

El cálculo de la sensibilidad para los resultados del modelo hidráulico Iber se realizó a partir de los archivos raster de resultados de los modelos hidráulicos para pequeñas variaciones del coeficiente de rugosidad de Manning. Así mismo se produjo el raster de los coeficientes de Manning iniciales para el modelo.

Debido a que lo que se va a analizar es el gradiente de resultado con respecto a la variación del parámetro de Manning, se obtiene un raster de resultados de la variable *P* para la diferencia de pixeles entre los raster de profundidades variando el parámetro, y el raster de profundidades del parámetro inicial.

Una vez obtenido el valor de la variable de resultado *P* se calcula la sensibilidad para cada variación del parámetro mediante la calculadora raster del software ArcGis. El resultado es una matriz de pixeles de tamaño 1 metro para toda la mancha de inundación. Cada pixel tiene un valor de sensibilidad, por lo que se podrían obtener el número de pixeles en gráficos de sensibilidad, con esto el resultado se traduce en funciones de sensibilidad a lo largo del dominio del modelo correspondiente a la mancha de inundación.

Con el fin de obtener una función única de sensibilidad, se calculó el valor absoluto para los raster de sensibilidad, con el fin de tener todos los pixeles en valores positivos. A estos raster se les calculó el promedio con el fin de obtener un valor único de sensibilidad para todo el modelo.

Para el caso de un pixel que provoca un pixel de respuesta el análisis de sensibilidad para este caso se realiza como:

$$SI = \frac{\Delta WS}{\Delta N * N}$$

Dónde

SI : Sensibilidad del pixel respecto a la variación del pixel de rugosidad.

ΔWS: Cambio en el pixel de respuesta, correspondiente a la lámina de agua.

ΔN: Parámetro de cambio del pixel de rugosidad, correspondiente a 0.001 para el caso en estudio.

N: Pixel base, respecto al cual se analiza la sensibilidad.

De donde el cálculo de la variación de la lámina de agua para una sensibilidad dada se calcula como:

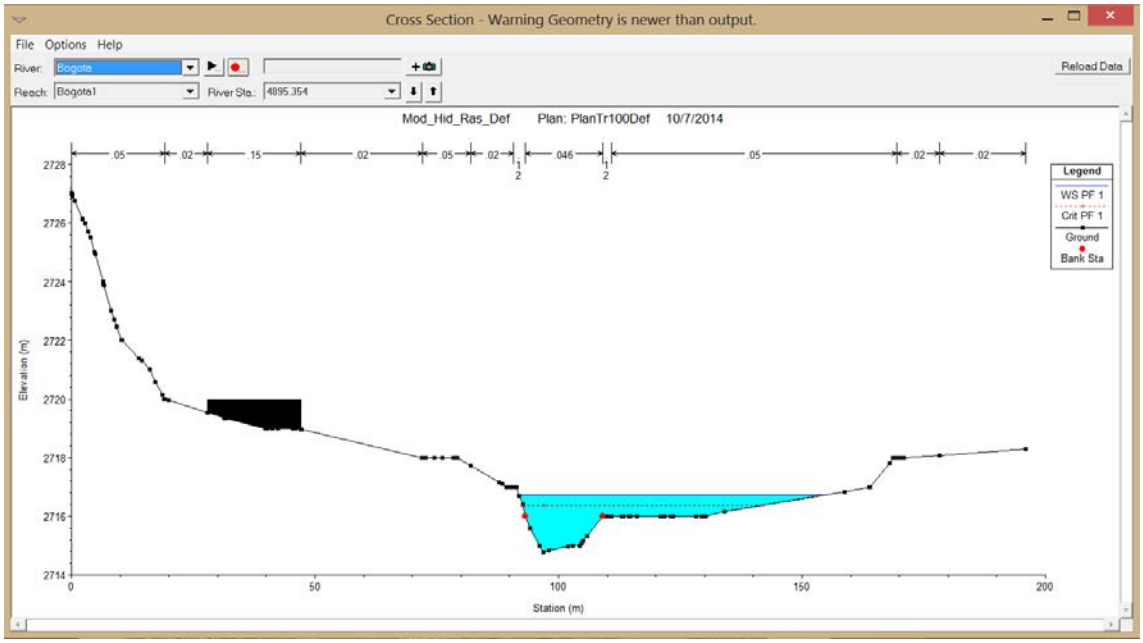
$$\Delta WS = SI * \Delta N * N$$

Si se tiene una sensibilidad calculada para el pixel, por ejemplo de 1.81 para un ΔN de 0.001 y un N de 0.05, el cambio en la lámina de agua resulta ser de 0.00009 m, respecto a la lámina inicial sin variación de N. Por lo tanto el índice de sensibilidad resulta ser un parámetro para revisar la importancia de las variables de entrada en un modelo y el grado de influencia en los valores de salida del modelo.

9.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD MODELO HEC-RAS

Para el modelo Hec-Ras la distribución de la rugosidad se realizó a partir de un archivo raster de coberturas. Así mismo se importaron las secciones transversales, como se mostró en el Anexo E Capítulo 2.15. La influencia del coeficiente de rugosidad en el modelo viene dado en las secciones transversales a las cuales les es asignado el coeficiente, sin embargo, a diferencia del modelo Iber, se puede tener una mayor precisión en la asignación de los coeficientes al modelo, ya que la importación es únicamente dependiente del tamaño de las celdas del raster de rugosidades. En la Imagen 4 se muestra una sección típica en la cual el coeficiente de rugosidad varía espacialmente a lo largo de la sección.

Imagen 4 - Variación espacial del coeficiente de Manning a lo largo de una sección transversal típica.



Fuente: Manual Software Hec-Ras

A continuación se muestran las estadísticas de los raster de valor absoluto, para la obtención de la media espacial de las sensibilidades en el modelo.

Imagen 5 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n-0.01)

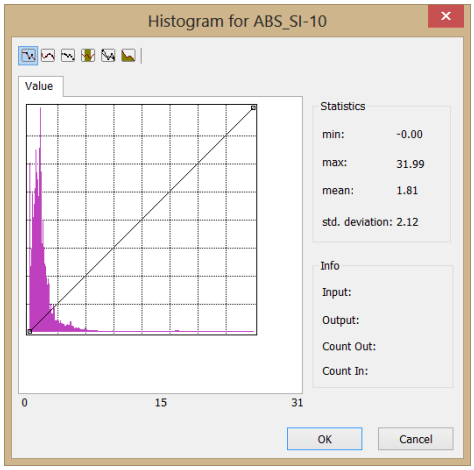


Imagen 6 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n-0.005)

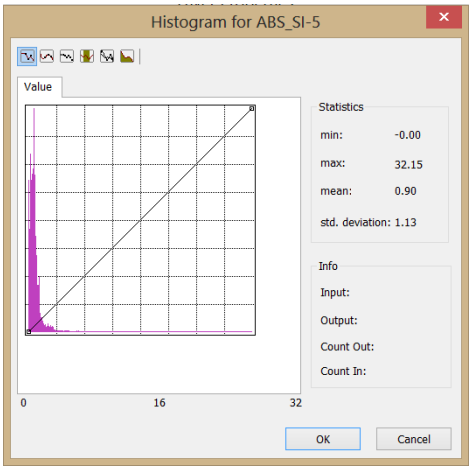


Imagen 7 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n-0.004)

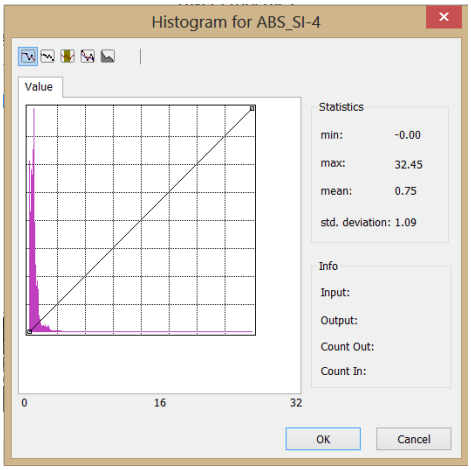


Imagen 8 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n-0.003)

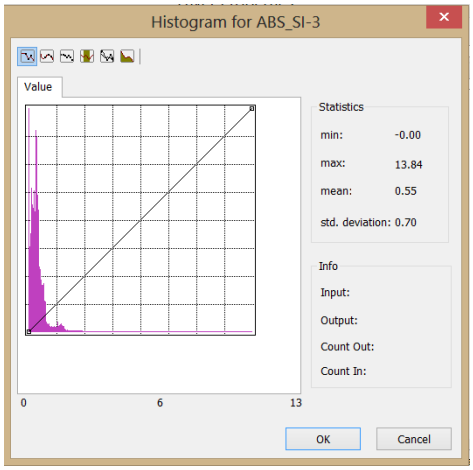


Imagen 9 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n-0.002)

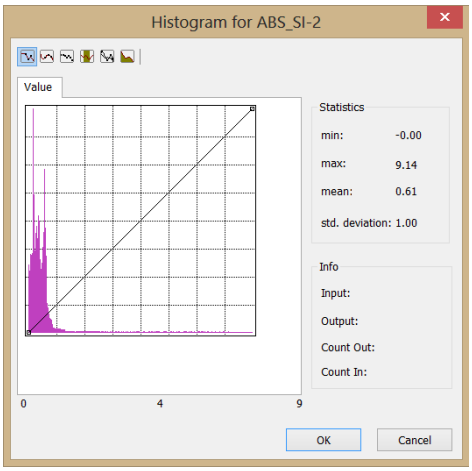


Imagen 10 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n-0.001)

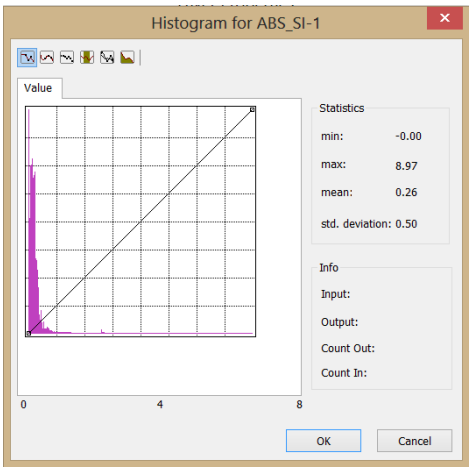


Imagen 11 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n+0.001)

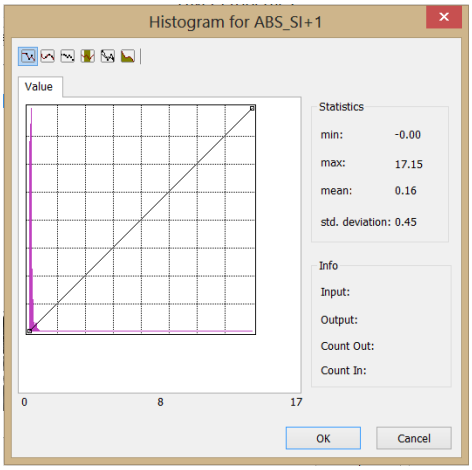


Imagen 12 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n+0.002)

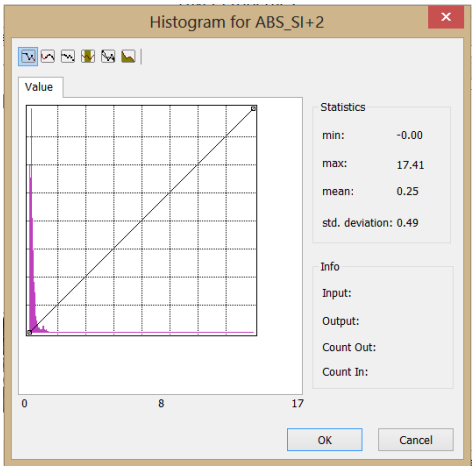


Imagen 13 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n+0.003)

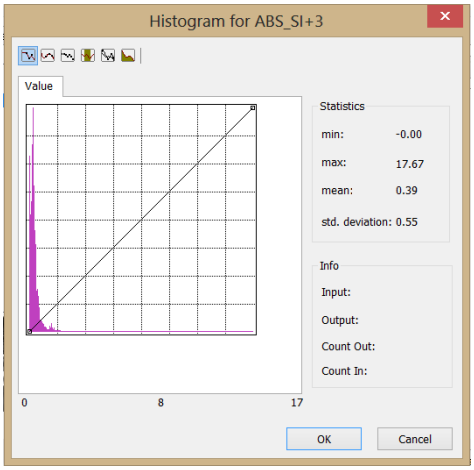


Imagen 14 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n+0.004)

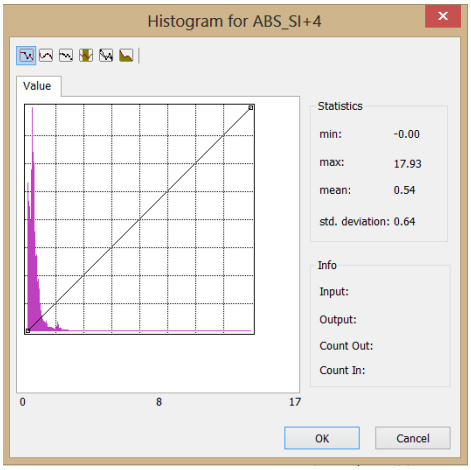


Imagen 15 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n+0.005)

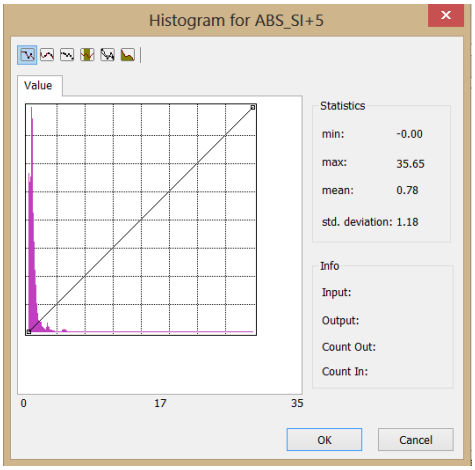
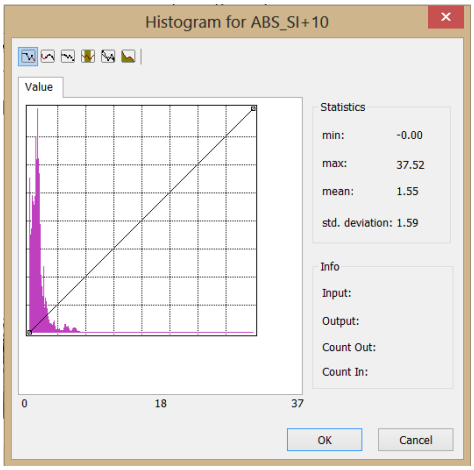


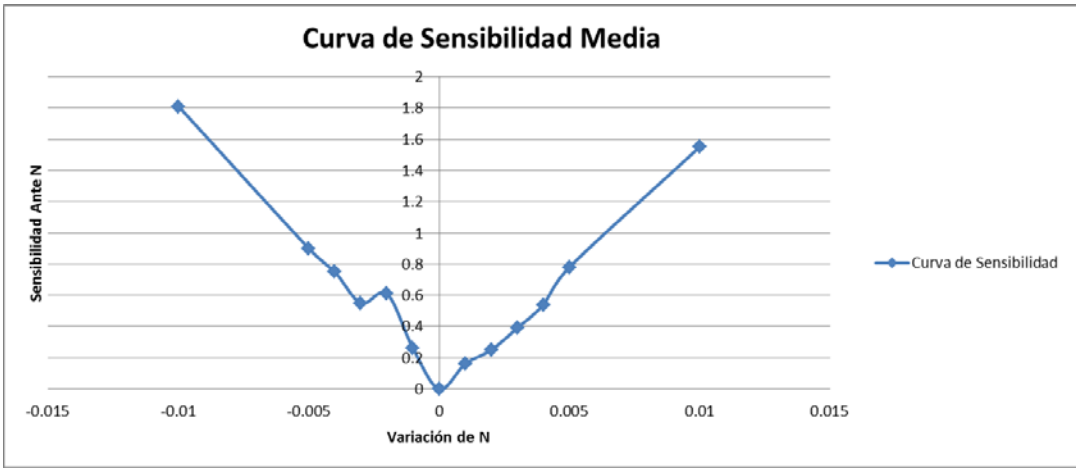
Imagen 16 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n+0.01)



Fuente: Software ArcGis

A partir de los cálculos de la sensibilidad respecto a las variables de cambio, en este caso la rugosidad, se procede a realizar la curva de sensibilidad para el modelo hidráulico Hec-Ras. Esta se realiza en valor absoluto debido a que en algunos pixeles del raster la sensibilidad resulta ser del signo contrario a la de la tendencia general. En la Imagen 17 se muestra la curva de sensibilidad media respecto a la rugosidad del modelo Hec-Ras.

Imagen 17– Curva de sensibilidad media modelo Hec-Ras



Fuente: Software ArcGis

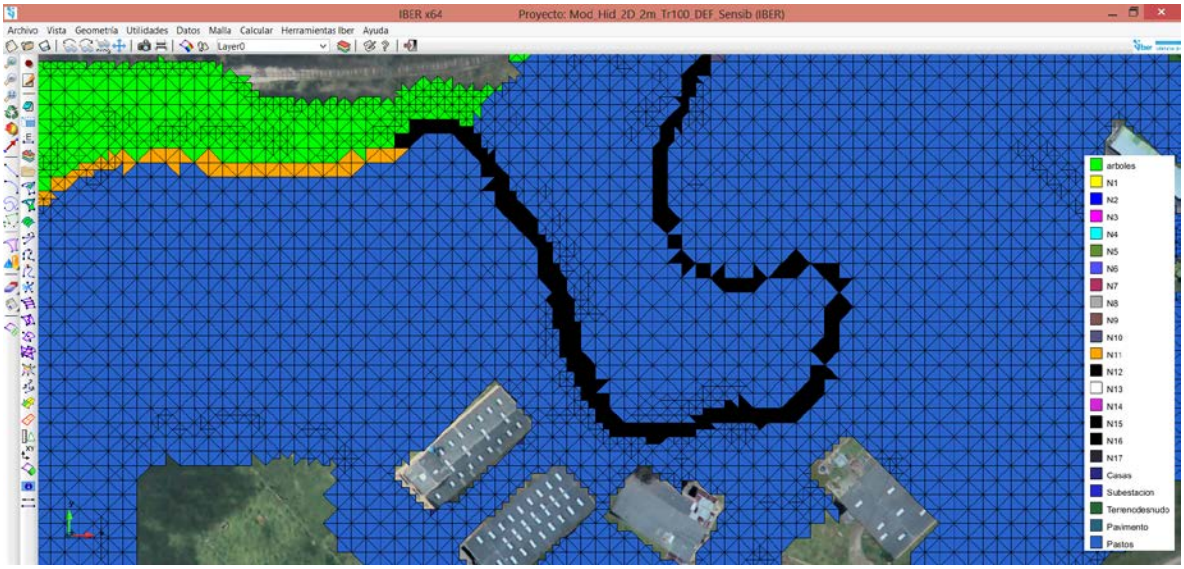
9.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO IBER

Precisión de la Geometría

La geometría desempeña un papel importante, ya que influye directamente en la precisión de los resultados. En este contexto a mayor precisión en la geometría, mayores costos computacionales y por ende mayores tiempos de simulación. Sin embargo al igual que en el modelo Hec Ras con una geometría más precisa se presentan problemas de inestabilidad en el modelo, arrojado resultados erróneos o impidiendo la finalización en la simulación. Para el caso del modelo en estudio, se presentaron problemas de inestabilidad al ejecutar el modelo en flujo no permanente con tamaños de celda de 1 m, por lo que se tuvo que disminuir precisión por mayor estabilidad al aumentar el tamaño de las celdas a 2 m.

La repercusión de los tamaños de celda en las variables que intervienen en el modelo resulta ser alta en el caso de la rugosidad, esto debido a que a cada celda se le importa su correspondiente rugosidad, y al aumentar los tamaños de celda, los límites entre áreas con diferentes rugosidades se vuelven más abruptos al estar ajustados a la geometría de las celdas. En la Imagen 18 se muestra la incidencia del tamaño y geometría de las celdas en la distribución de la rugosidad en el sitio de proyecto.

Imagen 18 - Incidencia del tamaño y geometría de las celdas en la rugosidad del sitio de proyecto.



Fuente: Software Iber

Siendo la rugosidad un parámetro presente en todo el tramo de modelación, y teniendo esta un rango confiable, se realiza un análisis de sensibilidad, con el fin de revisar el comportamiento de los anchos superficiales y las cotas de las láminas de agua al variar ligeramente los parámetros. A continuación se muestran las estadísticas de los raster de valor absoluto, para la obtención de la media espacial de las sensibilidades en el modelo.

Imagen 19 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n-0.01)

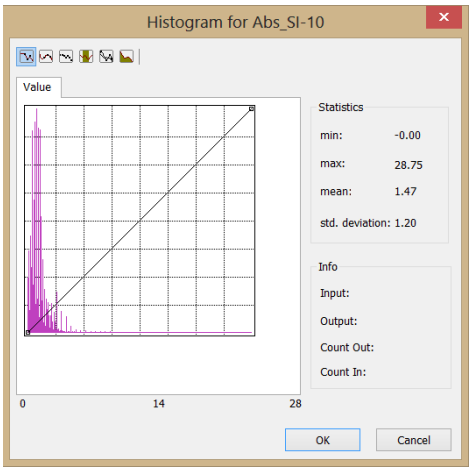


Imagen 20 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n-0.005)

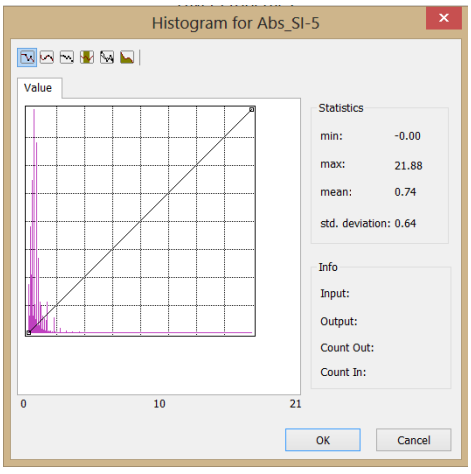


Imagen 21 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n-0.004)

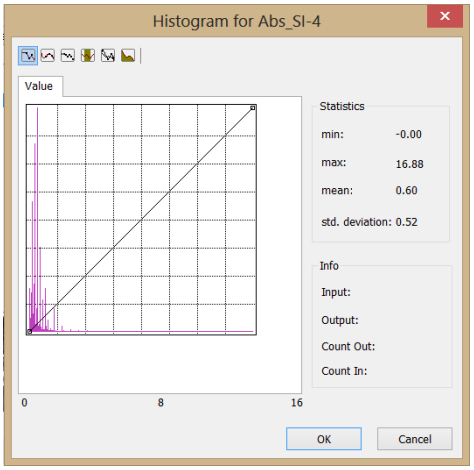


Imagen 22 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n-0.003)

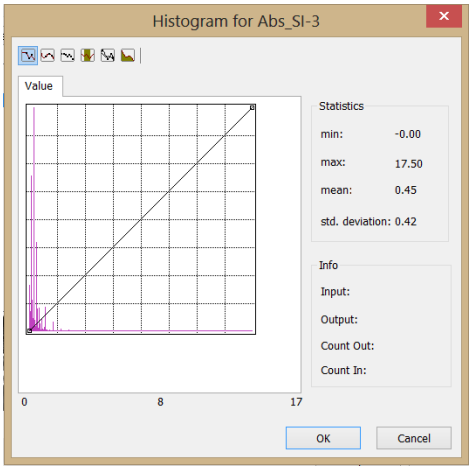


Imagen 23 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n-0.002)

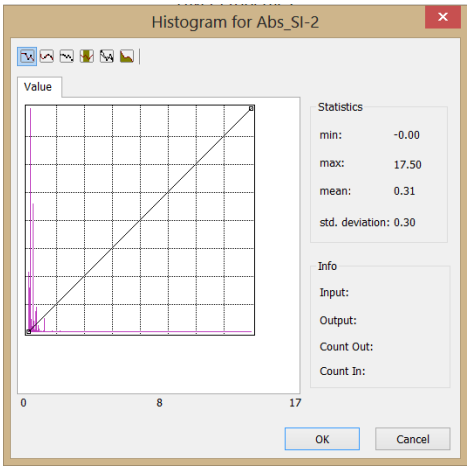


Imagen 24 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n-0.001)

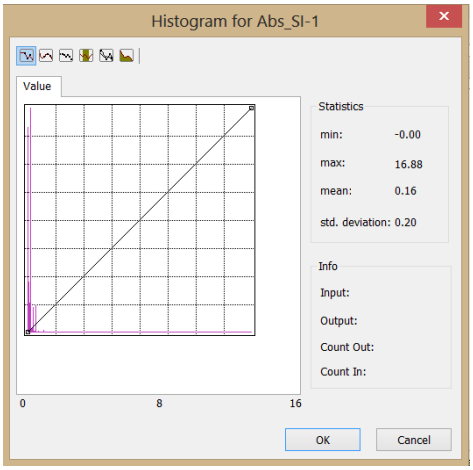


Imagen 25 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n+0.001)

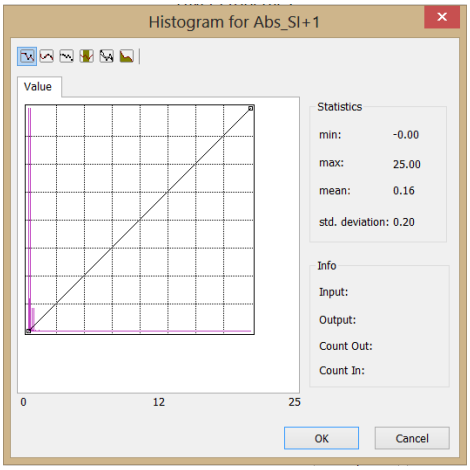


Imagen 26 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n+0.002)

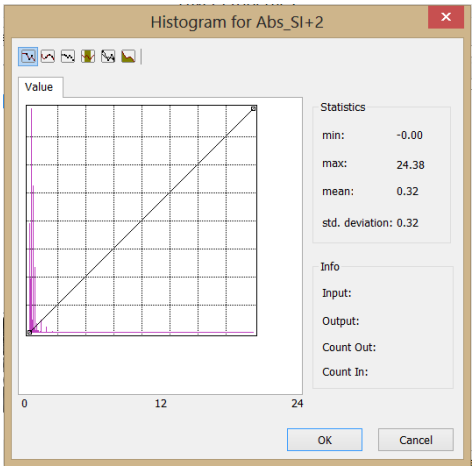


Imagen 27 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n+0.003)

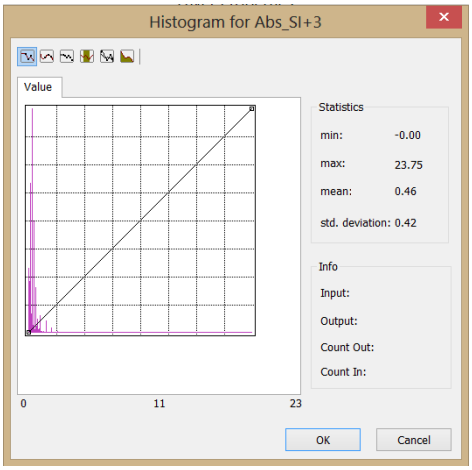


Imagen 28 - Valor Medio para el raster de sensibilidad (n+0.004)

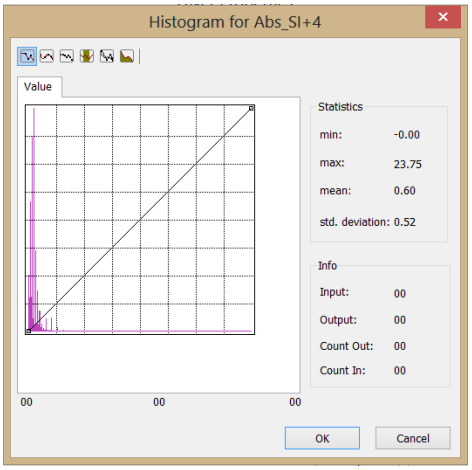


Imagen 29 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n+0.005)

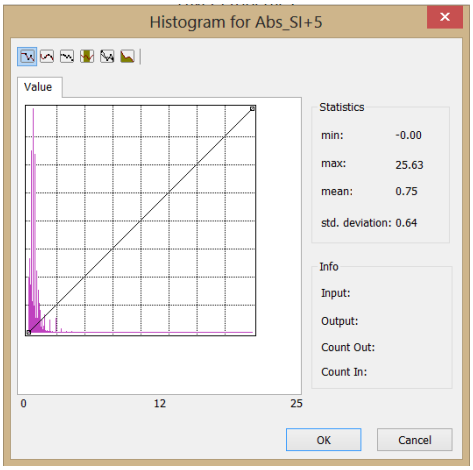
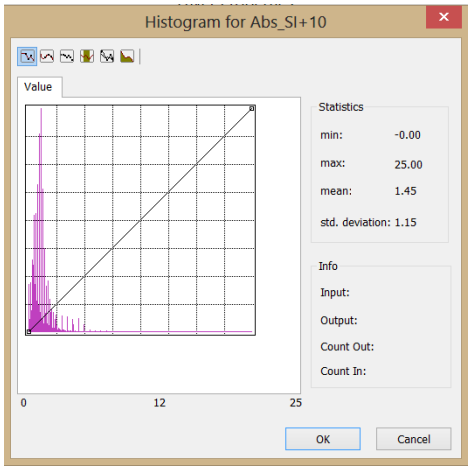


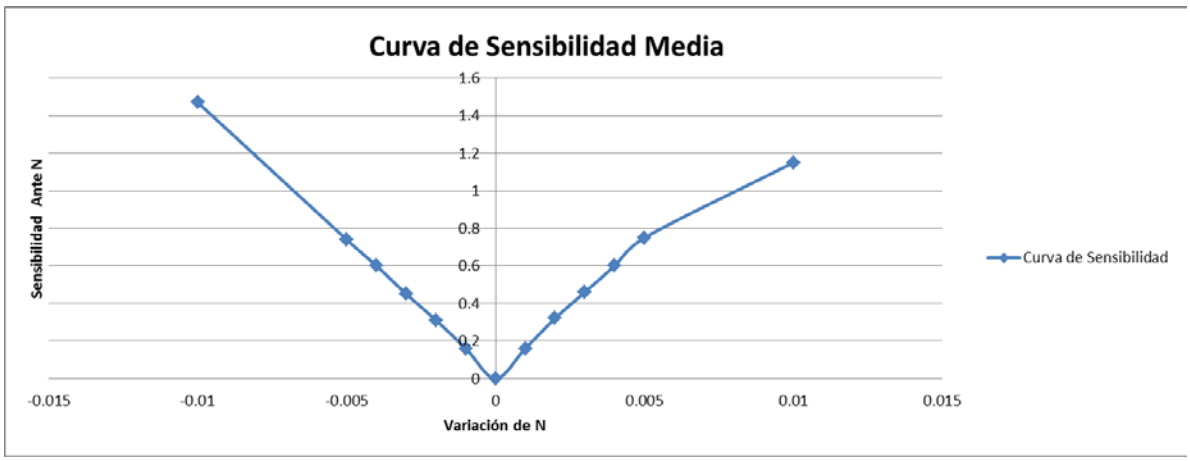
Imagen 30 - Valor medio para el raster de sensibilidad (n+0.010)



Fuente: Software ArcGis

A partir de los resultados de los valores medios de los índices de sensibilidad se obtiene el gráfico de sensibilidad para el parámetro en estudio. En la Imagen 31 se muestra la curva de sensibilidad respecto al parámetro N, en donde los valores se encuentran en valor absoluto.

Imagen 31 – Curva de sensibilidad media para el modelo Iber

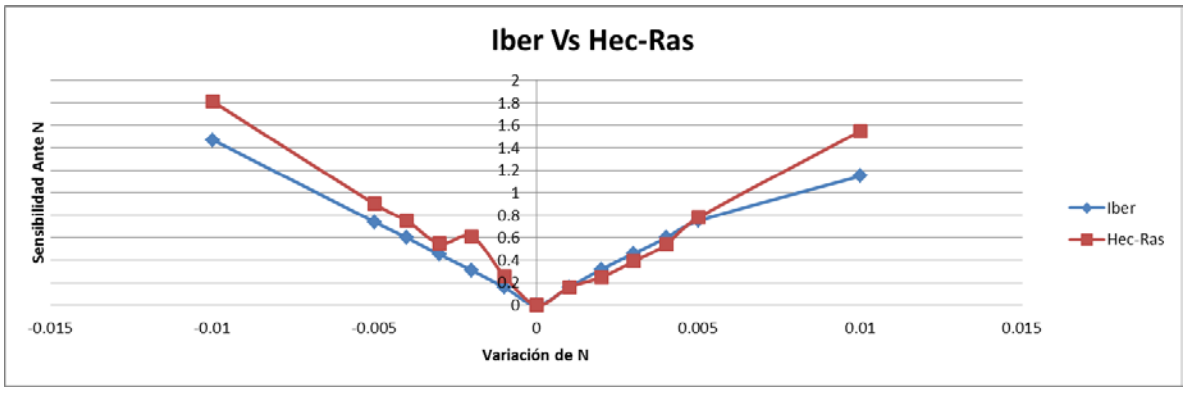


Fuente: Software ArcGis

9.3 COMPARACIÓN DE LA SENSIBILIDAD DE LOS MODELOS

Una vez obtenidas las sensibilidades medias en valor absoluto para los modelos hidráulicos y una vez generadas las curvas de sensibilidad media para los mismos, se compararon los resultados de las curvas, siendo la variación de los parámetros de análisis igual para los dos modelos. El resultado de la comparación de los modelos hidráulicos se muestra en la Imagen 32.

Imagen 32 – Comparación curva de sensibilidad media para los modelos Hec-Ras e Iber



Fuente: Software ArcGis

En este caso el análisis de sensibilidad relativa realizado para los coeficientes de rugosidad arrojó valores muy cercanos para los dos modelos, siendo la rugosidad un parámetro distribuido

espacialmente en el modelo. Sin embargo el modelo Hec-Ras resultó tener una mayor sensibilidad respecto al modelo Iber, reflejándose en láminas de agua más altas para las mismas variaciones de rugosidad que los resultados del modelo Iber. Un análisis de sensibilidad para un modelo bidimensional puede acarrear grandes costos de tiempo y espacio en el ordenador, por lo tanto es necesario establecer inicialmente las posibles variables del modelo en las que se tenga mayor incertidumbre para llevar a cabo sólo un análisis de sensibilidad.

9.4 LIMITACIONES DE LOS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

En general, los análisis de sensibilidad son útiles para todas las fases de modelamiento, como lo son la formulación, calibración y verificación. Así mismo resultan ser útiles para los análisis de error y toma de decisiones a la hora de modelar. Sin embargo existen limitaciones para los análisis de sensibilidad. En primer lugar y tal como en el caso en estudio, los análisis de sensibilidad se realizaron utilizando la ecuación de sensibilidad lineal. Esto resulta ser válido sólo en un rango limitado del parámetro. En el caso de los modelos hidráulicos no lineales, la sensibilidad presenta cambios en determinados rangos de dicho parámetro, es decir, puede variar en mayor o menor proporción dependiendo de los rangos dentro de los que se encuentra el parámetro de estudio. En el caso en estudio y en general, los coeficientes de sensibilidad son calculados utilizando el valor medio de las variables como un punto base. Para el caso de los modelos hidráulicos, y al igual que en los modelos hidrológicos, la sensibilidad en los valores extremos de las condiciones físicas es de gran interés al momento de modelar y diseñar.

En segundo lugar la naturaleza univariada de la sensibilidad resulta ser una segunda limitación. En el caso del modelo hidráulico la sensibilidad de la variable de salida H, el cual corresponde a la profundidad de la lámina de agua, se calculó realizando cambios porcentuales en el parámetro de rugosidad, el cual se encuentra distribuido espacialmente. Por lo tanto la reproducibilidad de los errores asume errores únicamente en la variable de interés, respecto a la cual se realiza el análisis, con base en este hecho se asume que no hay interacción entre las demás variables actuantes en el modelo. Esto resulta no ser verdad debido a que la precisión en la rugosidad, distribuida espacialmente depende directamente, en el caso del modelo Iber, del tamaño de las celdas. Así mismo tampoco se puede asumir que el usuario al momento de ingresar los datos de rugosidad haya cometido errores en determinada variable. Existe una compleja interacción entre las variables de un modelo y por lo tanto no se puede agregar la reproducibilidad de los errores en el modelo. Para el caso de la asignación de la rugosidad a las entidades espaciales, si el usuario comete un error, transformándose en un error estándar en cada una de las variables, el efecto neto resultará no ser la suma de la reproducibilidad de los errores. La naturaleza univariada de la sensibilidad es un factor limitante para grandes errores o desviaciones en las variables.

En tercer lugar la sensibilidad provee una única valoración del efecto en el criterio en la variable dependiente. Idealmente se quisiera tener idea de la distribución de la variable de diseño, para lo cual se puede aproximar a esto usando la ecuación de sensibilidad linearizada con la distribución del

error o variación de la variable independiente o de entrada, sin embargo esto resulta tener una eficiencia limitada, debido a las dos limitaciones anteriores (linearidad e univariado). Un método que eluda las limitaciones de los análisis de sensibilidad debe ser una mejora de los análisis para los métodos de diseño. Esto no implica que la sensibilidad no sea un valor, sino que son necesarias formas más avanzadas de los análisis de sensibilidad. Sin embargo los análisis de sensibilidad lineares y univariados permanecen aún como los métodos aceptados para los estudios de sensibilidad de los modelos en general.

10. PRODUCCIÓN DE RESULTADOS PARA LOS MODELOS HIDRÁULICOS NO PERMANENTE

Una vez realizadas las simulaciones para el régimen no permanente, se encontraron problemas de estabilidad numérica para los modelos, para los cuales hubo que hacer simplificaciones, con el fin de estabilizar los modelos y obtener una mayor precisión en los resultados. Una vez estabilizados los modelos se procedió a generar las secciones transversales para cada raster de resultados y se produjeron los hidrogramas correspondientes a cada modelo, por lo que se abordará el proceso de estabilización y producción de resultados a continuación.

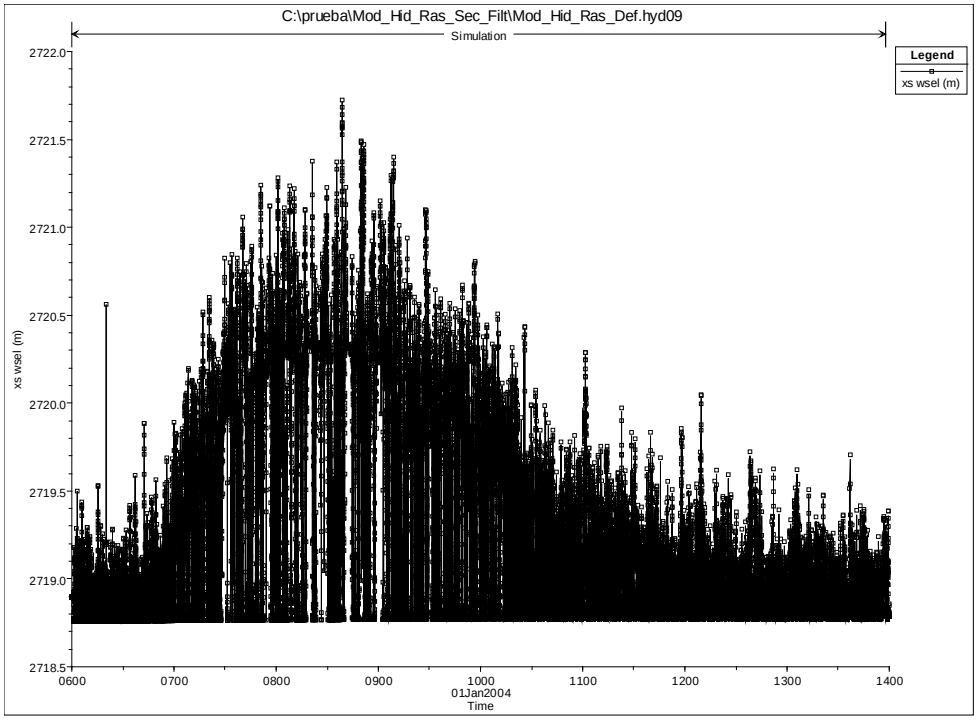
10.1 MODELO HEC RAS

El modelo Hec-Ras permite la visualización de resultados en formato raster (TIF) a partir de la extensión Hec-GeoRas de software ArcGis, por lo tanto la producción de resultados del modelo hidráulico se realiza a través de la exportación de los mismos a Excel, en donde la información es tratada para su visualización, comparación y análisis. En el caso de los Hidrogramas de salida en las secciones de estudio, se realiza la exportación desde el modelo Hec-Ras a Excel, en donde se realiza el tratamiento adecuado para su visualización. En el Anexo N se muestran los archivos que contienen los hidrogramas de salida para las secciones del modelo Hec-Ras para flujo no permanente.

10.1.1 Estabilidad del Modelo Hec-Ras

Una vez realizado el proceso de ingreso de los hidrogramas de entrada y la asignación de las entradas laterales como flujo permanente para las secciones transversales que corresponderían a las quebradas, se realizó la simulación, para la cual se obtuvieron resultados no confiables para la modelación del flujo no permanente, como se muestra en la Imagen 33.

Imagen 33 - Resultados de simulación inestable de flujo no permanente modelo Hec-Ras



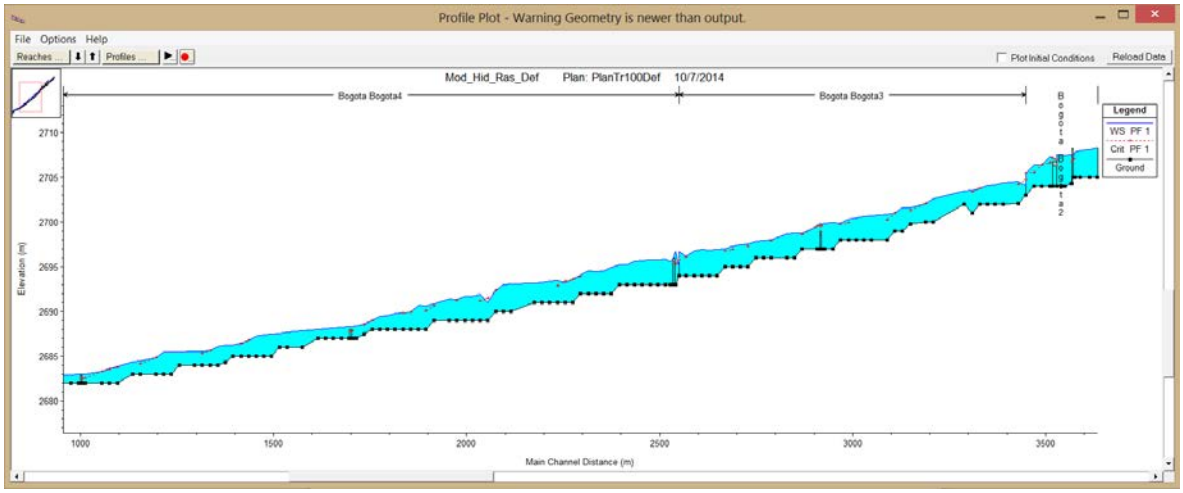
Fuente: Software Hec-Ras

Haciendo una revisión a las características del esquema de Preissman, se observa que las características más influyentes para la estabilidad del modelo son:

- Cambios bruscos de pendiente
- Características de la propia onda de avenida
- Presencia de estructuras complejas (Puentes, Box Culverts, Pasos Entubados, Etc.)

Por lo tanto, dependiendo de la complejidad del modelo se pueden presentar inestabilidades por la presencia de estructuras. Como el objetivo de este trabajo es el de hacer una comparación con el modelo IBER, se decidió realizar la modelación sin estructuras, y no tratar de hacer los ajustes necesarios para modelar con éxito las estructuras con flujo no permanente. Se eliminaron las estructuras de paso, y se volvió a realizar la simulación, con resultados desfavorables. Revisando la pendiente longitudinal para la zona de proyecto se encuentra que debido a la precisión de la topografía, la cual está compuesta por curvas de nivel de 1 m de diferencia de cotas, varias secciones se encuentran sobre una misma curva de nivel, ya que el espaciamiento entre secciones por recomendación de modelación se realizó de 20 m. En la Imagen 34 se muestra la pendiente longitudinal resultante en el modelo Hec-Ras.

Imagen 34 - Pendiente longitudinal de cauce vuelo LIDAR



Fuente: Software Hec-Ras

Se observa que el flujo constantemente se encuentra cambiando de régimen a lo largo del cauce, por caídas en escalones artificiales producto de la precisión vertical de la topografía, lo cual produce inestabilidad en el modelo. Para realizar la modelación en régimen no permanente se deben reducir las caídas por ejemplo aumentando el espaciamiento de las secciones con el fin de producir un perfil más real del cauce y evitar los cruces continuos con el *yc*, que es el mayor causante de la inestabilidad en el modelo. El resultado fue una pendiente más continua a lo largo del modelo, sin embargo la inestabilidad seguía prevaleciendo.

Las modelaciones en régimen mixto pueden llegar a ser muy complejas en un modelo hidráulico con flujo no permanente, debido a que los algoritmos de solución del modelo tienden a ser inestables cuando el flujo pasa por la profundidad crítica. Existen determinados factores que pueden mejorar significativamente la estabilidad numérica del modelo Hec-RAS. Uno de esos parámetros es el exponente m del método Local Partial Inertia (LPI), cuyo fin es reducir los términos de inercia de la ecuación de Saint Venant en los sitios en los que se produce un cambio de régimen de flujo. La asignación del parámetro m se realiza desde el menú Run/Unsteady Flow Analysis/Mixed Flow Options. El factor σ correspondiente al método LPI es calculado a partir de las siguientes condiciones:

$$\sigma = F_T - F_r^{\,m} \qquad (F_r \leq F_T \,; m \geq 1)$$

$$\sigma = 0 \qquad F_r > F_T$$

Dónde:

σ = Factor LPI que multiplica los términos inerciales de la ecuación de momentum.

F_T = Numero de Froude umbral, el valor de este número debe estar en un rango de 1 a 2, siendo 1 el predeterminado del modelo.

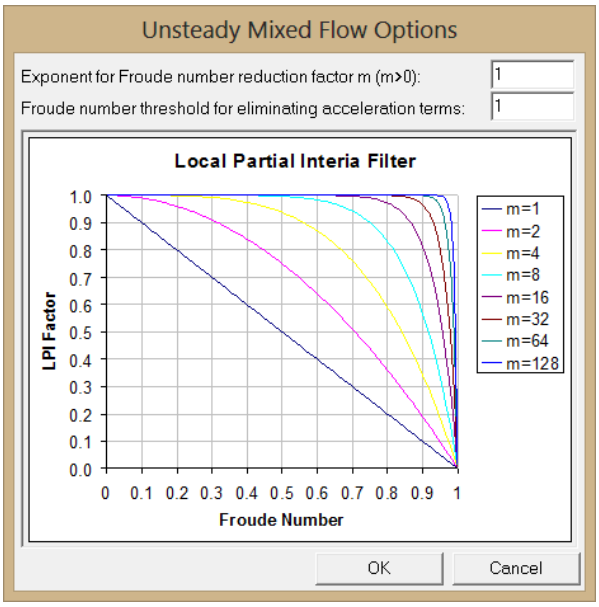
F_r = Numero de Froude

m = Exponente de la ecuación, el cual cambia la forma de la curva , este exponente se encuentra en un rango entre 1 y 128, el valor por defecto es 10.

Cuando se aumenta el valor del número de Froude umbral y del exponente m, se disminuye la estabilidad pero se aumenta la precisión en el modelo, por lo tanto si se asigna un valor para el exponente m = 1 se producirán resultados lo más estable posible en la simulación en régimen no permanente.

En la Imagen 35 se muestra el cuadro para la asignación de exponente m. (manual de referencia 16-3)

Imagen 35 - Asignación del exponente m para estabilidad del modelo



Fuente: Software Hec-Ras

Generalmente en los casos en los que se presenta flujo crítico ocurren problemas de inestabilidad, sin embargo se pueden establecer criterios con el fin de estabilizar el modelo, aunque esto provoque mayores costos computacionales o pérdida de precisión. Así mismo en el Capítulo 8 y 16 del Manual del Usuario de Hec-Ras se pueden encontrar en detalle todos los factores que intervienen en la estabilidad del modelo. A continuación se resumirán los parámetros que fueron más relevantes en la estabilización del modelo en estudio y sus costos o consecuencias en la precisión en la modelación.

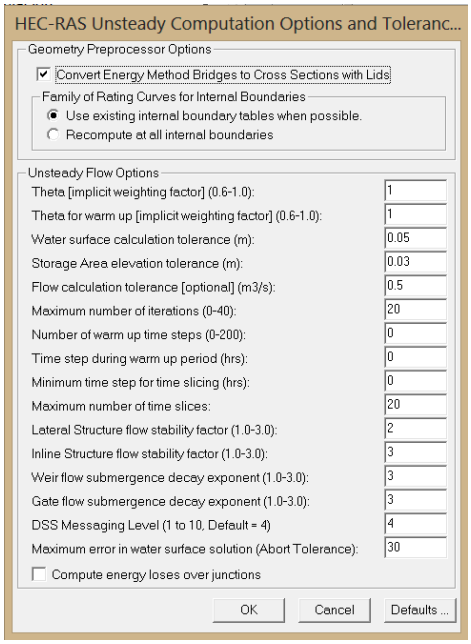
1. Distancia entre secciones transversales: Este parámetro jugó un papel doble en la estabilización del modelo, debido a que aunque la distancia entre secciones fue la recomendada para el ancho del cauce a modelar, el modelo se inestabilizó al cambiar continuamente de régimen de flujo, por lo que se aumentó el ancho entre secciones para

generar una pendiente continua y así mismo se interpolaron para tener mayor estabilidad en el modelo.

2. Intervalo de Cálculo: Este parámetro juega un papel muy importante en la estabilización del modelo, ya que a menor tiempo, mayor estabilidad y mayor tiempo de cálculo, para el caso de estudio el intervalo se redujo a 1 segundo.
3. Periodo de "Warm Up": Consiste en una aproximación a la solución final a partir de una simulación previa en régimen permanente, la cual en el caso de los modelos hidráulicos en régimen no permanente, corresponde a la asignación de un caudal base en régimen permanente, y cuya solución facilita la resoluciones en régimen no permanente.
4. Local Partial Inertia (LPI): El modelo Hec-RAS trae incorporada la metodología para resolver inestabilidades de la onda mediante la herramienta Local Partial Inertia (LPI), el cual se explica en el Anexo E Capítulo 1.5. Este método incluye en su formulación el factor m (Exponent for Froude Number Reduction Factor), en donde un valor de m=1 producirá resultados lo más estables posible, siendo este parámetro de gran importancia para la estabilidad del modelo.
5. Theta Weighting Factor: Este factor de ponderación se aplica a las ecuaciones en diferencia finitas usadas para el cálculo en régimen no permanente para conseguir un modelo más estable. Este parámetro puede encontrarse entre 0.6 y 1. En donde un valor de 1 dará como resultado un modelo lo más estable posible y un valor de 0.6 dará como resultado un modelo con mayor precisión. En el caso de estudio se aplicará un factor de 1 con el fin de tener un modelo lo más robusto posible.
6. Weir and Spillway Submergence Factors: Aunque para el caso de estudio no se presentan vertederos o aliviaderos, vale la pena mencionar este parámetro relacionado con la estabilidad. Cuando un vertedero se encuentro sumergido pueden generarse problemas de estabilidad, sobre todo si se trabaja con grandes caudales, en donde para un valor de 1 la solución es más precisa, al aumentar el valor a 3 se aumenta la estabilidad, pero se disminuye la precisión.

En la Imagen 36 se muestra el cuadro de ajuste de tolerancias usado para la modelación y para la cual se obtuvo resultados estables en la modelación no permanente.

Imagen 36 - Parámetros definitivos para la estabilidad del modelo Hec-Ras



Fuente: Software Hec-Ras

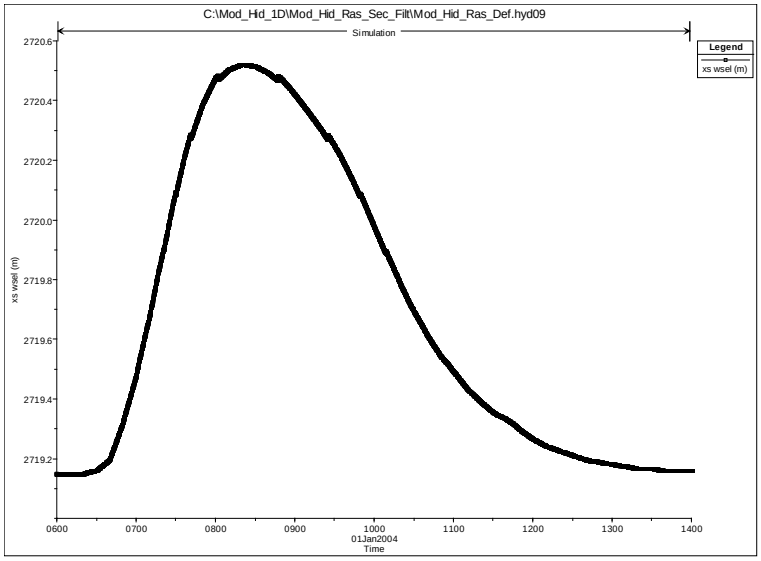
Así mismo se ajustan los siguientes parámetros de cálculo con el fin de conseguir que el programa converja y proporciones resultados lo más preciso posible:

- Tolerancia: 0.005 m
- Intervalo de tiempo de cálculo del programa: 10 minutos
- Iteraciones: 20

El parámetro θ=1, (estabilidad en esquemas de diferencias finitas de Preissman) no se modificó, ya que si el esquema converge sin modificar este parámetro, se obtendrán resultados más precisos.

Como resultado el modelo resultó estable, aunque hubo costos relacionados con la precisión en los resultados de la simulación. El resultado del hidrograma para una sección se muestra en la Imagen 37.

Imagen 37 - Hidrograma resultante para el modelo estabilizado



Fuente: Software Hec-Ras

10.1.2 Generación de Mapas de Máximos

A partir de las herramientas de exportación del modelo Hec-Ras se exportaron los resultados máximos al software Arc-Gis. A través de la extensión Hec-GeoRas y la herramienta Mapper se transformaron los resultados a formato raster realizando la extrapolación de la lámina de agua al contorno del terreno generando las manchas inundables.

Así mismo en el Plano 2 se muestra la mancha máxima de inundación producto de la modelación no permanente.

En el Plano 3 se muestra la mancha de velocidades máximas producto de la modelación no permanente.

En el Plano 4 se muestra la mancha de energías máximas producto de la modelación no permanente.

10.1.3 Generación de los Hidrogramas de Salida para el Modelo Hec-Ras

Para la producción de los hidrogramas de salida se tuvieron en cuenta 13 secciones transversales, para las cuales se obtuvieron los resultados del hidrograma durante el tiempo de simulación. La ubicación en planta de las secciones transversales se muestra en la Imagen 38 y la Imagen 39.

Imagen 38 - Ubicación en planta de las secciones transversales para la generación de hidrogramas

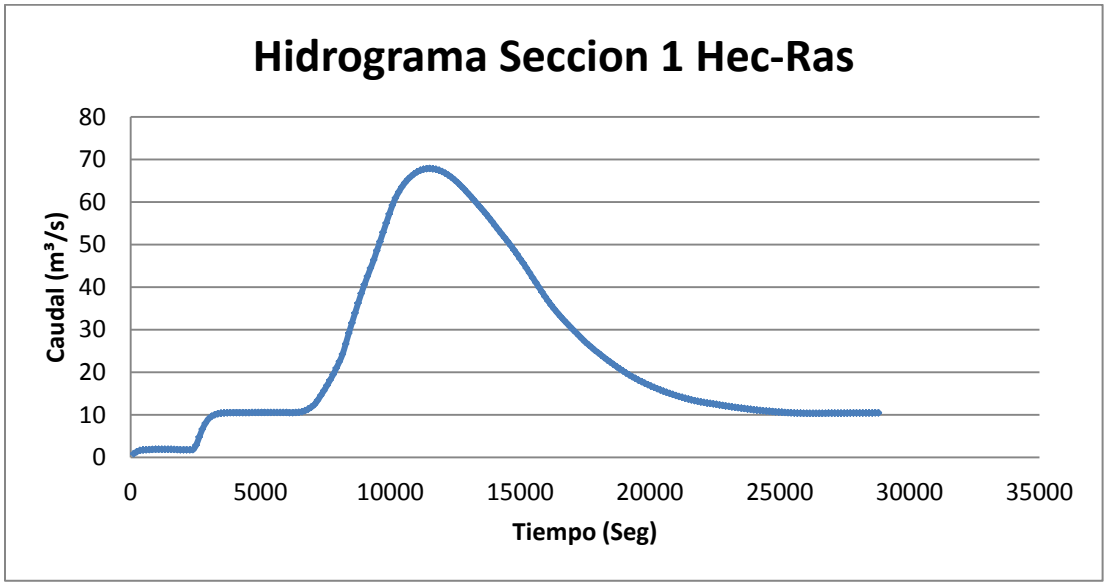
Fuente: Software Arc-Gis

Imagen 39 - Ubicación en planta de las secciones transversales para la generación de hidrogramas

Fuente: Software Arc-Gis

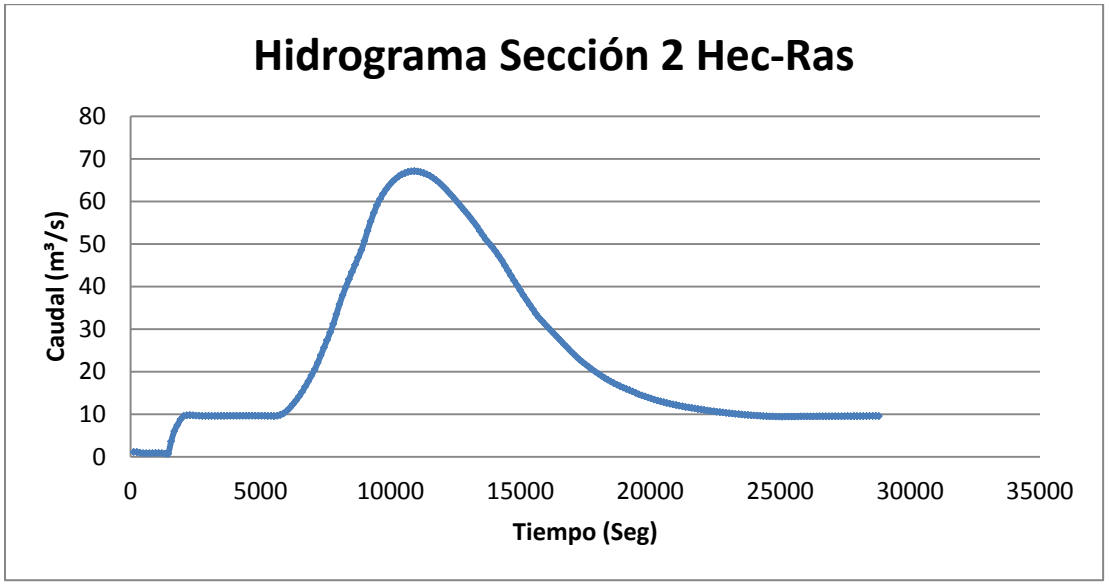
Una vez establecidas las secciones para la generación de hidrogramas, se procede a encontrar los caudales en el tiempo de simulación. La producción de los hidrogramas de salida se realiza directamente desde el software Hec-Ras. Los resultados de la simulación se muestran a continuación. Igualmente en el Anexo N se muestran los hidrogramas de salida del modelo Hec-Ras.

Imagen 40 - Hidrograma sección 1 modelo Hec-Ras



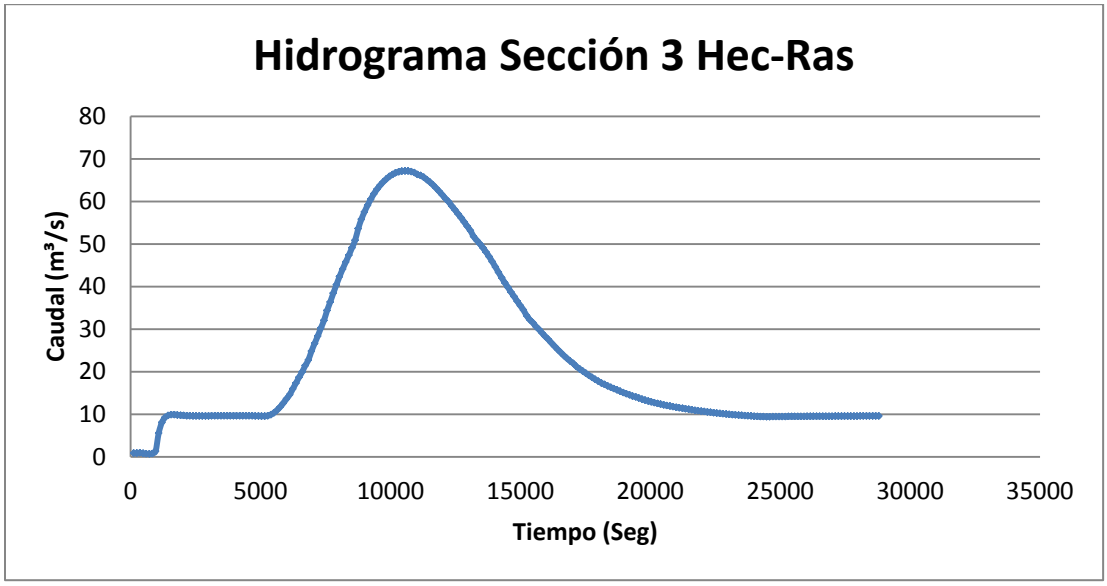
Fuente: Software Hec-Ras

Imagen 41 - Hidrograma sección 2 modelo Hec-Ras



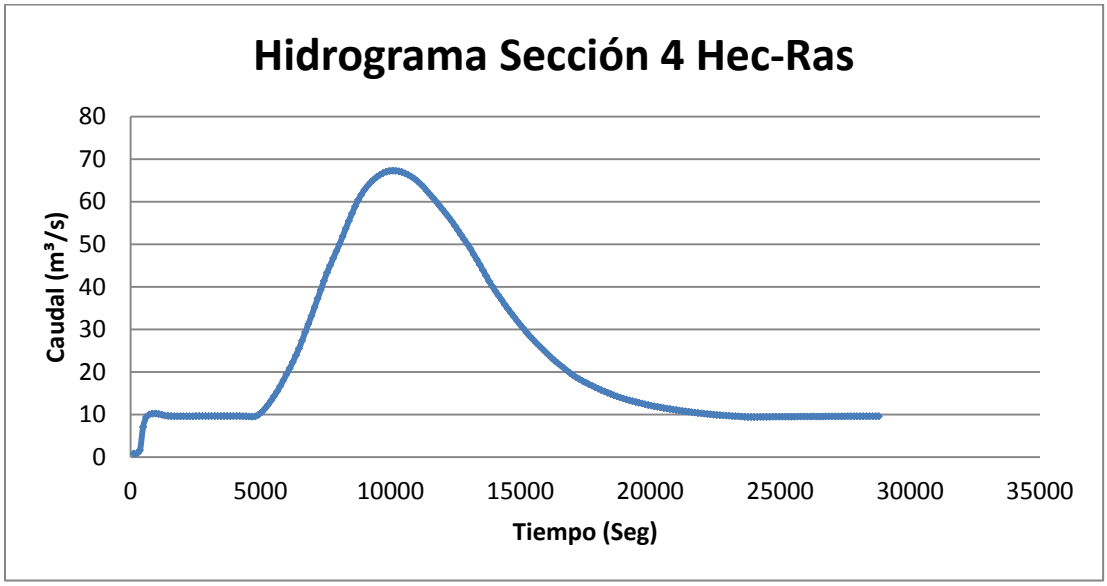
Fuente: Software Hec-Ras

Imagen 42 - Hidrograma sección 3 modelo Hec-Ras



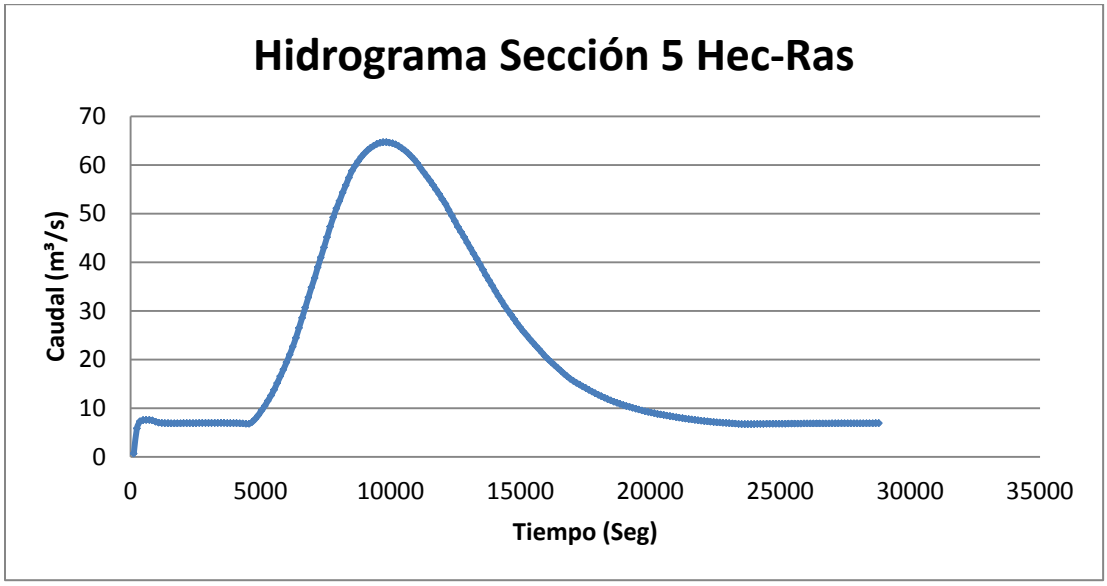
Fuente: Software Hec-Ras

Imagen 43 - Hidrograma sección 4 modelo Hec-Ras



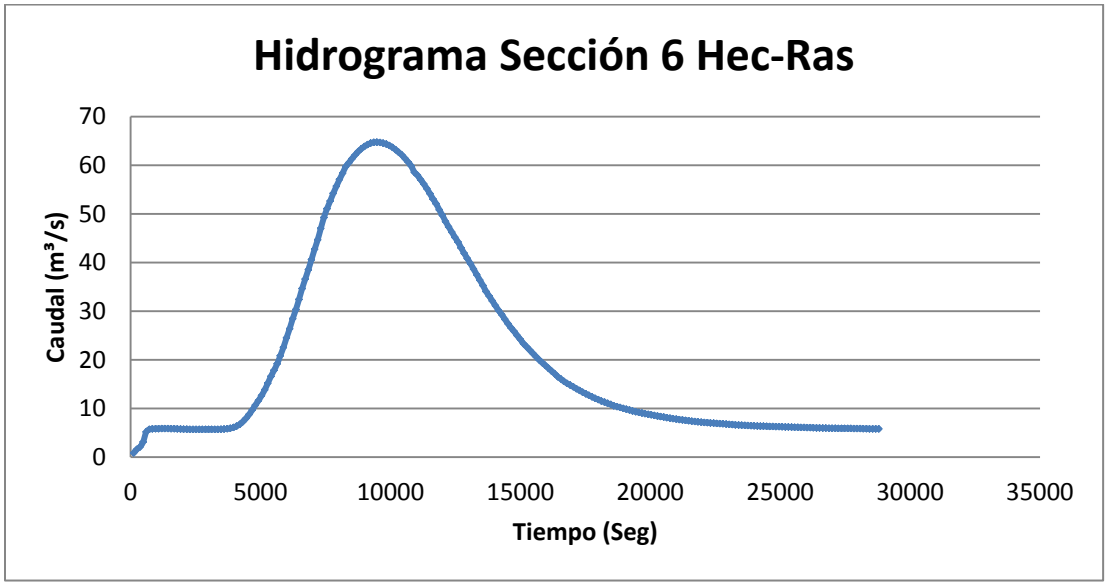
Fuente: Software Hec-Ras

Imagen 44 - Hidrograma sección 5 modelo Hec-Ras



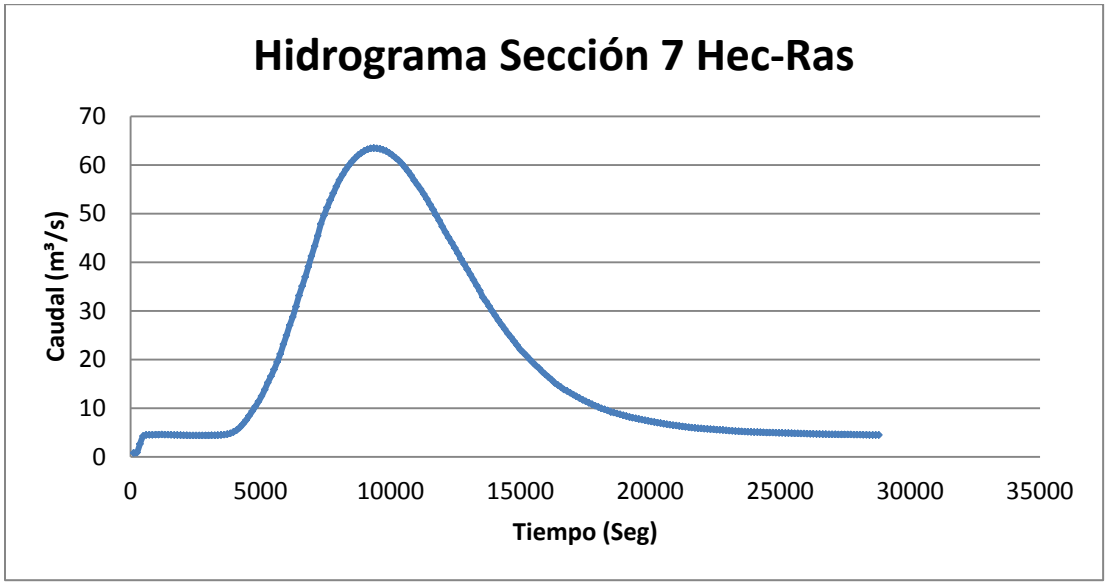
Fuente: Software Hec-Ras

Imagen 45 - Hidrograma sección 6 modelo Hec-Ras



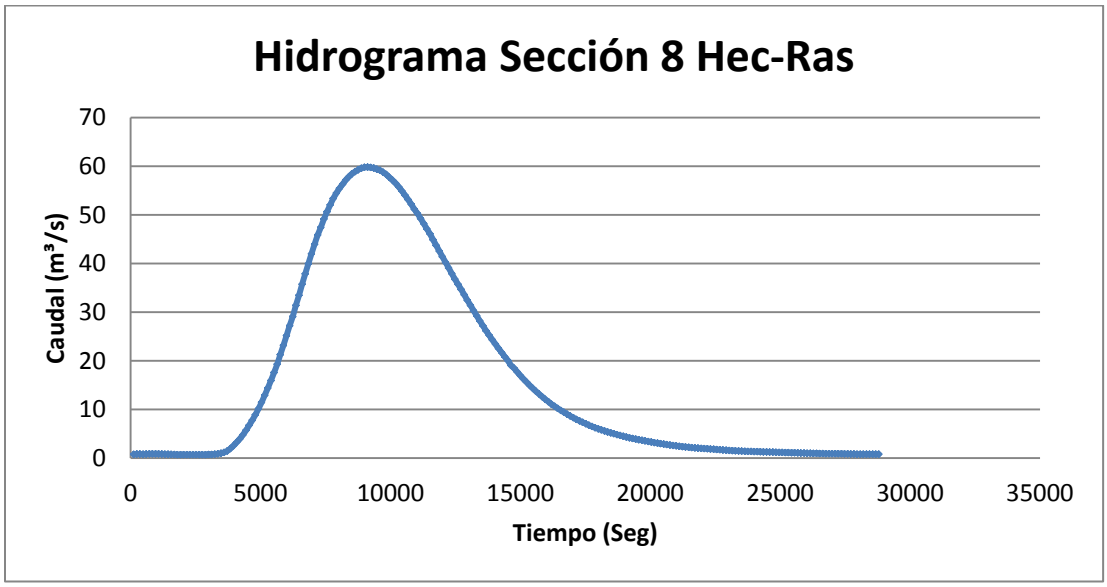
Fuente: Software Hec-Ras

Imagen 46 - Hidrograma sección 7 modelo Hec-Ras



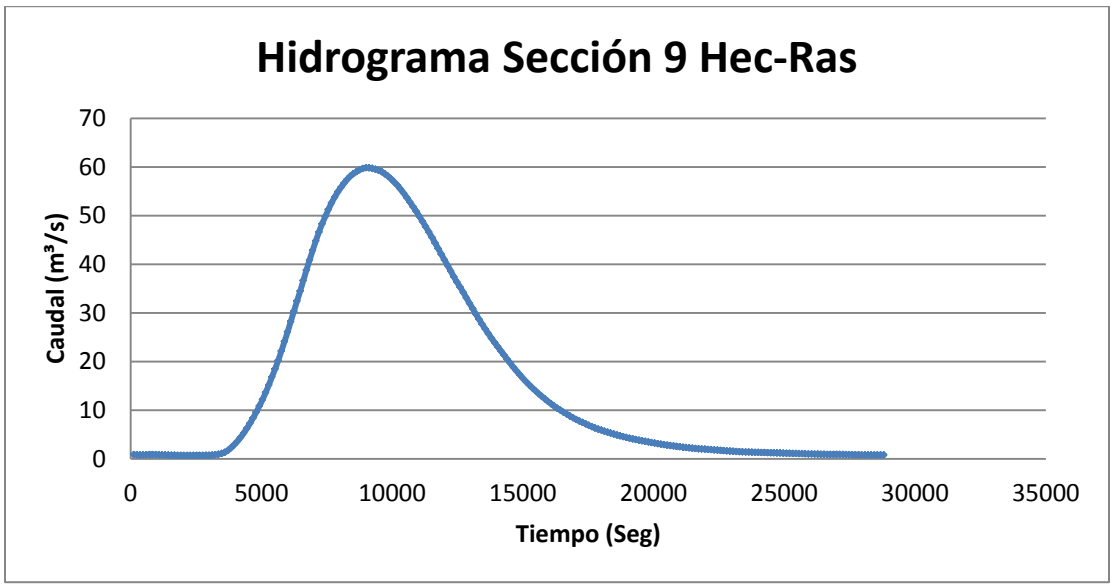
Fuente: Software Hec-Ras

Imagen 47 - Hidrograma sección 8 modelo Hec-Ras



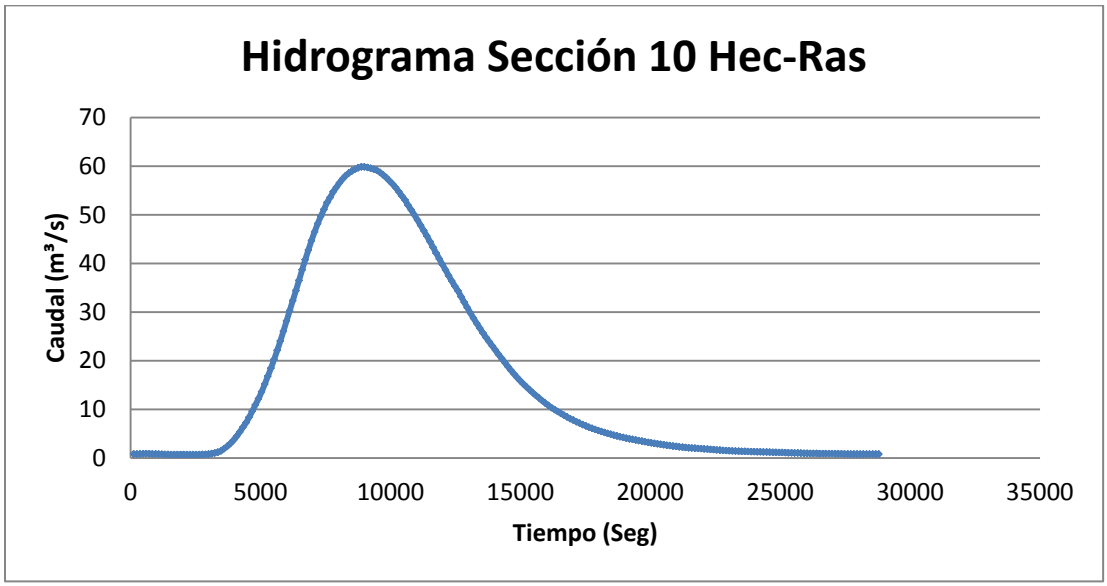
Fuente: Software Hec-Ras

Imagen 48 - Hidrograma sección 9 modelo Hec-Ras



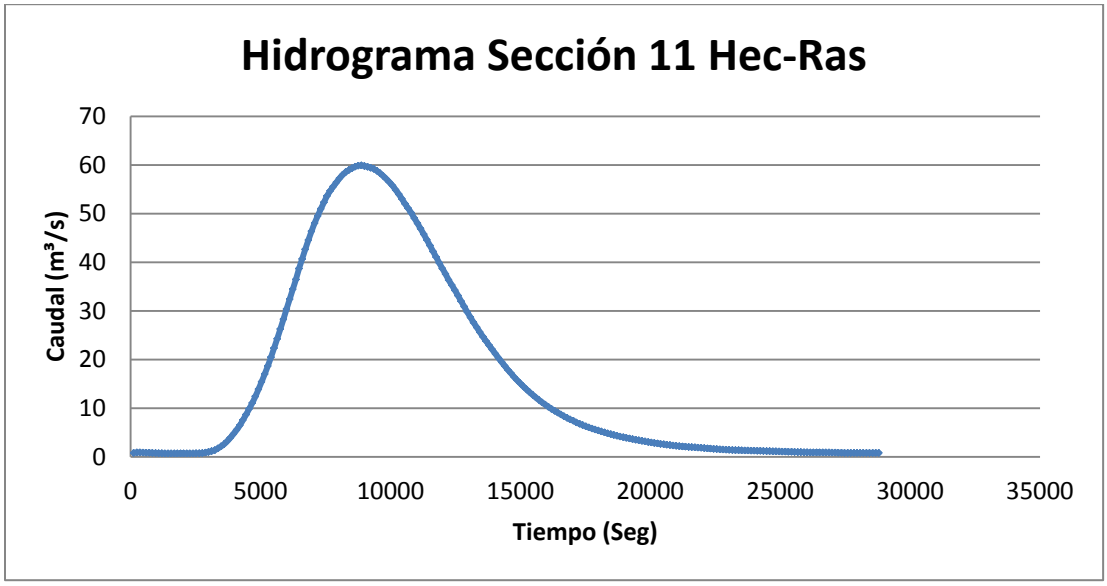
Fuente: Software Hec-Ras

Imagen 49 - Hidrograma sección 10 modelo Hec-Ras



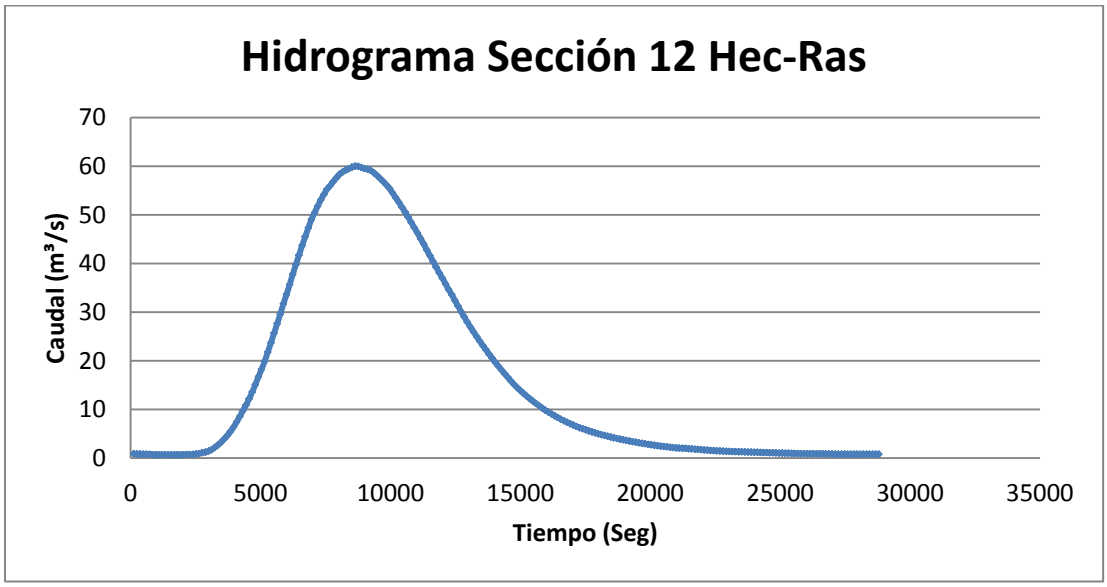
Fuente: Software Hec-Ras

Imagen 50 - Hidrograma sección 11 modelo Hec-Ras



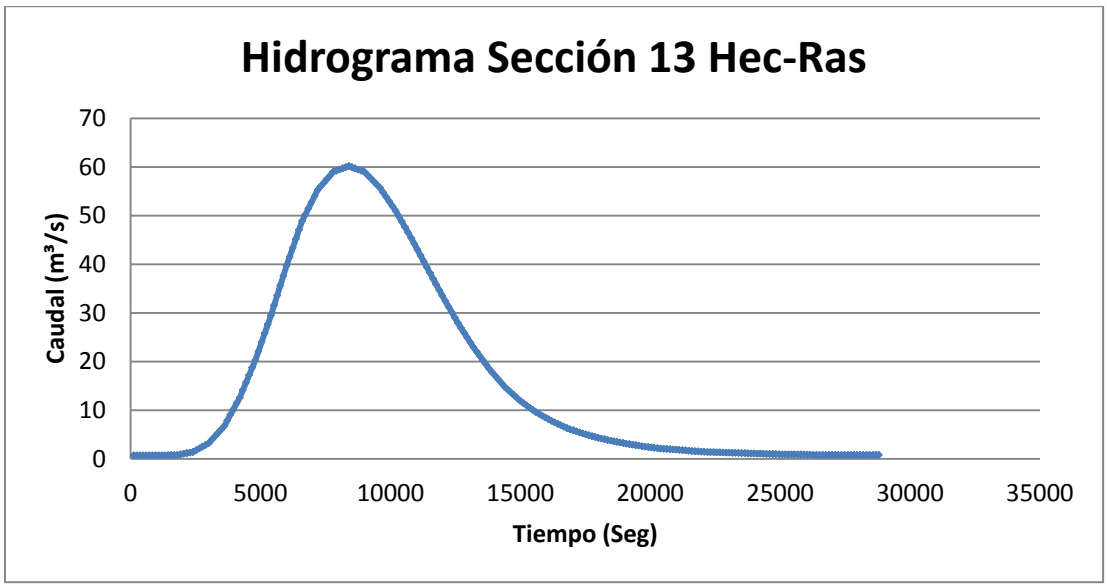
Fuente: Software Hec-Ras

Imagen 51 - Hidrograma sección 12 modelo Hec-Ras



Fuente: Software Hec-Ras

Imagen 52 - Hidrograma sección 13 modelo Hec-Ras



Fuente: Software Hec-Ras

10.1.4 Secciones Transversales Generadas en el Sitio de Proyecto

Una vez estabilizado el modelo Hec-RAS se procede a generar las secciones transversales y la lámina de agua a lo largo del tramo de modelación. En este caso se establecieron 22 secciones representativas a lo largo del modelo para las cuales se establecieron las láminas de agua medias de los modelos. Estas secciones se muestran en la Gráfica 2

En el Plano 14 se muestran las secciones transversales generadas para la comparación de los parámetros hidráulicos.

10.2 MODELO IBER

El modelo Iber tiene la funcionalidad de la exportación directa de resultados en formato raster tipo matriz (ASCII), que consiste en un archivo del tipo texto con la posición, valor y tamaño de las celdas de salida, el cual puede ser transformado mediante el software ArcGis a formato raster (TIF). Al igual que los resultados del modelo Hec-Ras, estos pueden ser exportados a Excel, para la producción de los hidrogramas de salida, la generación manual de secciones y en general para su tratamiento, visualización y análisis. En el Anexo O se muestran los archivos que contienen los hidrogramas de salida para las secciones del modelo Iber para flujo no permanente.

10.2.1 Estabilidad del Modelo Iber

La modelación inicial se realizó para flujo permanente, pero aunque los costos computacionales son relativamente altos los resultados son muy estables. Sin embargo la modelación con flujo no permanente tiene costos computacionales aún más altos y la estabilidad por la condición de Courant restringe los incrementos de tiempo a valores pequeños.

Inicialmente la modelación se realizó mediante una malla RTIN (Red Irregular de Triángulos Rectángulos), la cual generó tamaños que varían entre 1 y 6 metros de lado adaptándose a la topografía de la zona. Los modelos resultaron estables en régimen permanente debido a las simplificaciones que el flujo permanente lleva consigo, sin embargo al adaptarlos para el flujo no permanente se empezaron a tener problemas de estabilidad, debido a que la condición de Courant (CFL) limita el intervalo de tiempo de cómputo por la siguiente condición:

$$\Delta t_{CFL} = CFL \frac{\Delta x}{U + \sqrt{g.h}}$$

Dónde

Δx: Tamaño de la malla de cálculo

U: Velocidad del agua

g: Aceleración gravitacional

h: Atura de la lámina

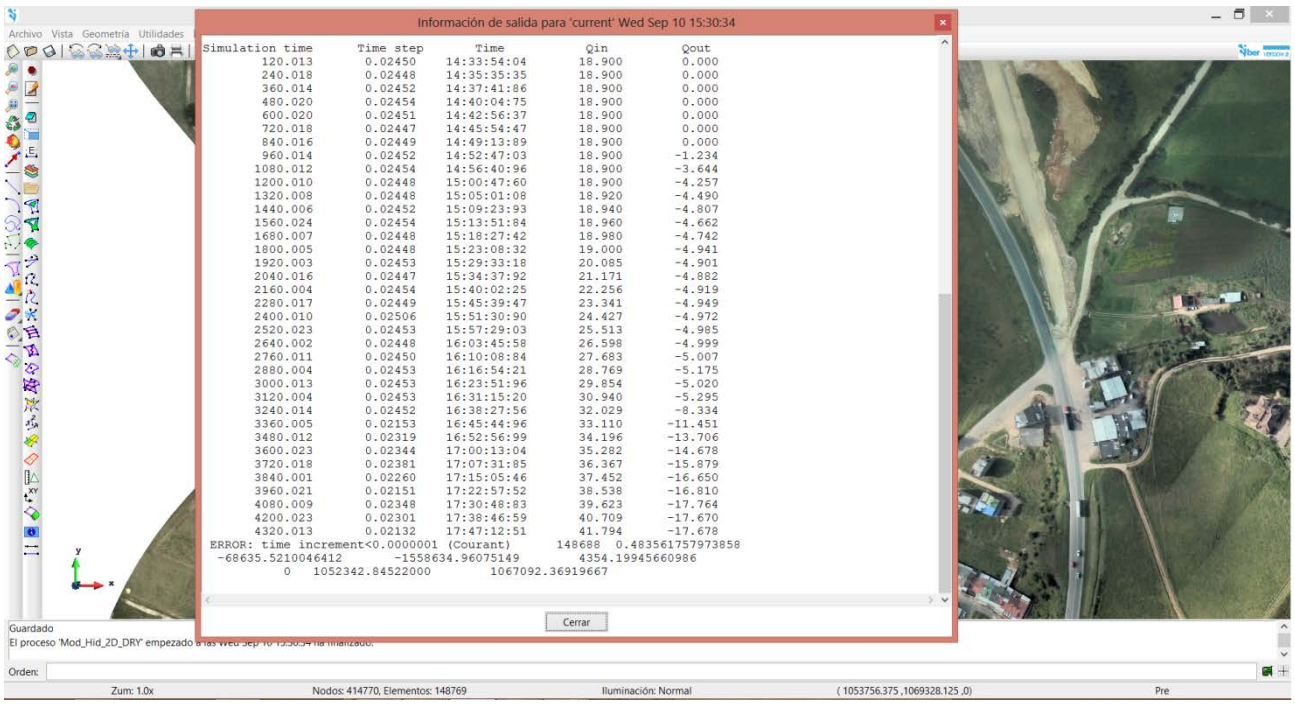
CFL: Parámetro que debe ser menor a 1 ($CFL \leq 1$)

Por lo tanto el paso de tiempo de integración temporal viene dado por:

- Δt menor cuanto menor sea el tamaño de la malla Δx
- Δt menor cuanto mayor sea la velocidad U
- Δt menor cuanto mayor sea la altura de la lámina h

Al realizar la modelación para flujo no permanente se presentaron problemas de estabilidad los cuales se intentaron arreglar imponiendo una condición más restrictiva. El modelo Iber contempla un CFL de 0.45 que resultó en inestabilidad para el modelo, por lo que se disminuyó a 0.3 siendo esta condición más restrictiva. Así mismo se disminuyó el incremento de tiempo máximo a 0.1 s. sin embargo el modelo resultó inestable para las condiciones dadas, apareciendo el error que se muestra en la Imagen 53.

Imagen 53 – Error producido por la inestabilidad del modelo



Fuente: Software IBER

Debido a que al intentar imponer la condición de Courant (CFL) más restrictiva no se logró estabilizar el modelo, se dedujo entonces que la estabilidad se encontraba ligada al ancho de las celdas. Por lo tanto se realizó una segunda modelación para la cual se estableció un tamaño mínimo de celda de 2 m, y posteriormente se aligeró el modelo mediante el proceso realizado en el Anexo H, Capítulo 1.16.

Se asignaron las condiciones de entrada correspondientes al hidrograma de 8 horas de duración de un periodo de retorno de 100 años. Para los afluentes se asignó flujo permanente, con el fin de simplificar el modelo.

Una vez terminado el proceso de cálculo con éxito se procede al postproceso, en donde se muestran los resultados de la modelación.

10.2.2 Generación de Mapas de Máximos

Para la generación de las manchas de máximos Iber tiene herramientas para la exportación en formato raster del tipo ASCII de los máximos valores en las celdas a lo largo de toda la simulación, para su posterior conversión y tratamiento mediante el software ArcGis. A partir de estos raster de resultados se puede realizar el análisis de riesgos para la población.

Los resultados de la modelación de flujo no permanente de la máxima inundación, las velocidades máximas y energía máxima se presentan en los planos 5, 6 y 7 respectivamente.

10.2.3 Generación de los Hidrogramas de Salida Para el Modelo Iber

Las secciones transversales para analizar los hidrogramas de salida se generaron mediante el mismo modelo Iber.

Se seleccionaron 13 secciones representativas a lo largo del sitio de proyecto, como se muestra en la Imagen 54 e Imagen 55.

Imagen 54 - Ubicación en planta de las secciones transversales para la generación de hidrogramas.

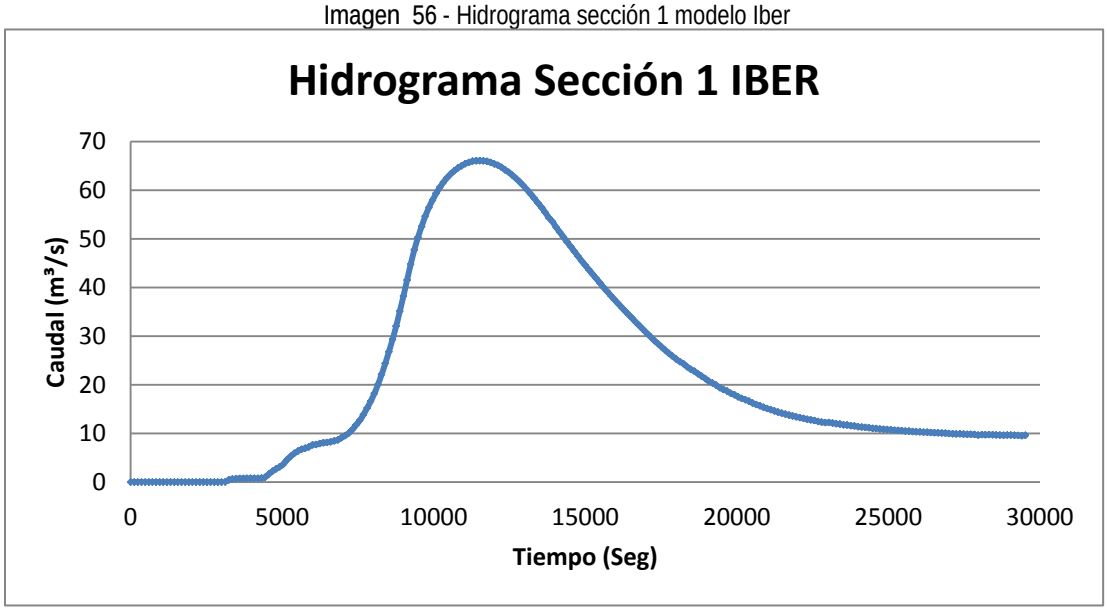
Fuente: Software Arc-Gis

Imagen 55 - Ubicación en planta de las secciones transversales para la generación de hidrogramas.

Fuente: Software Arc-Gis

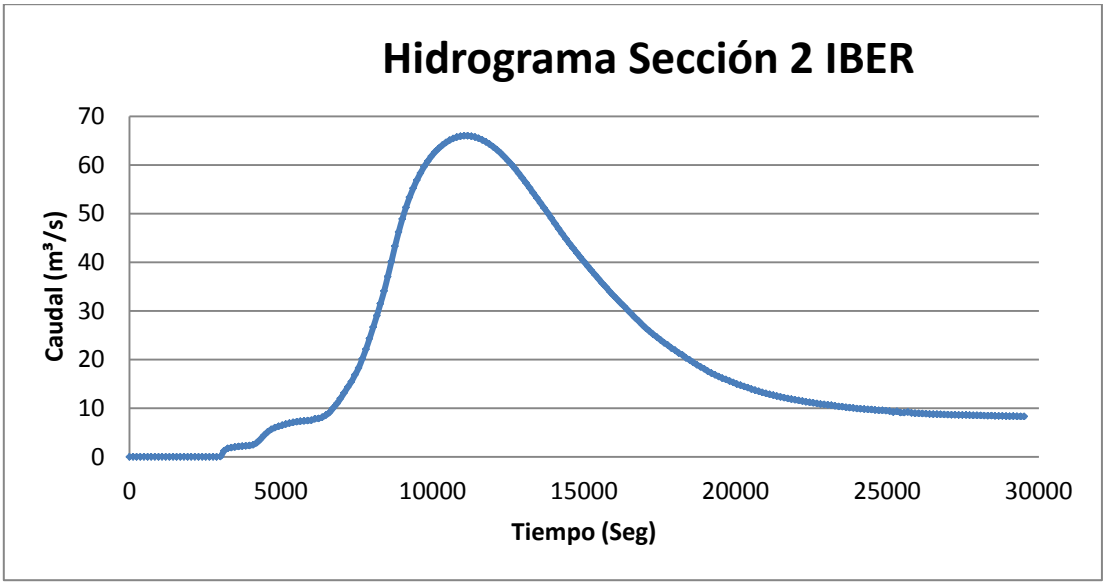
Los resultados de la simulación se muestran a continuación.

Imagen 56 - Hidrograma sección 1 modelo Iber



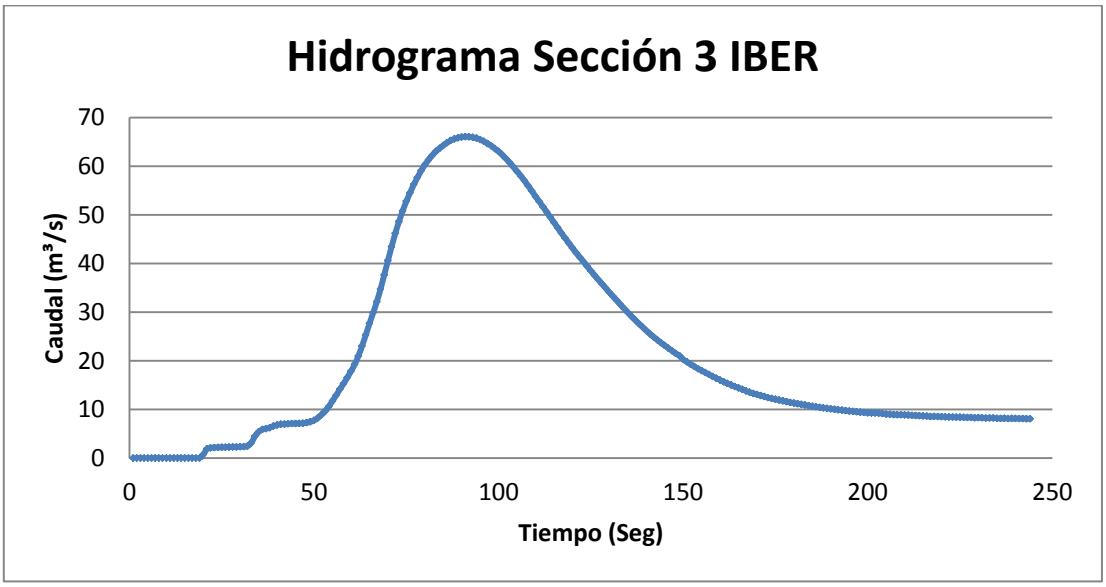
Fuente: Software IBER

Imagen 57 - Hidrograma sección 2 modelo Iber



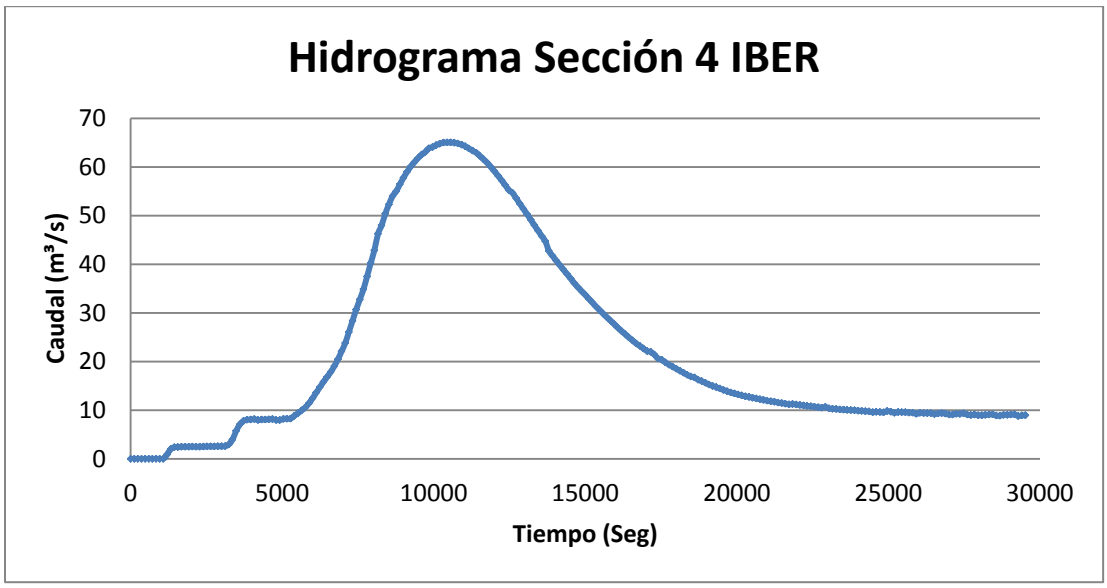
Fuente: Software IBER

Imagen 58 - Hidrograma sección 3 modelo Iber



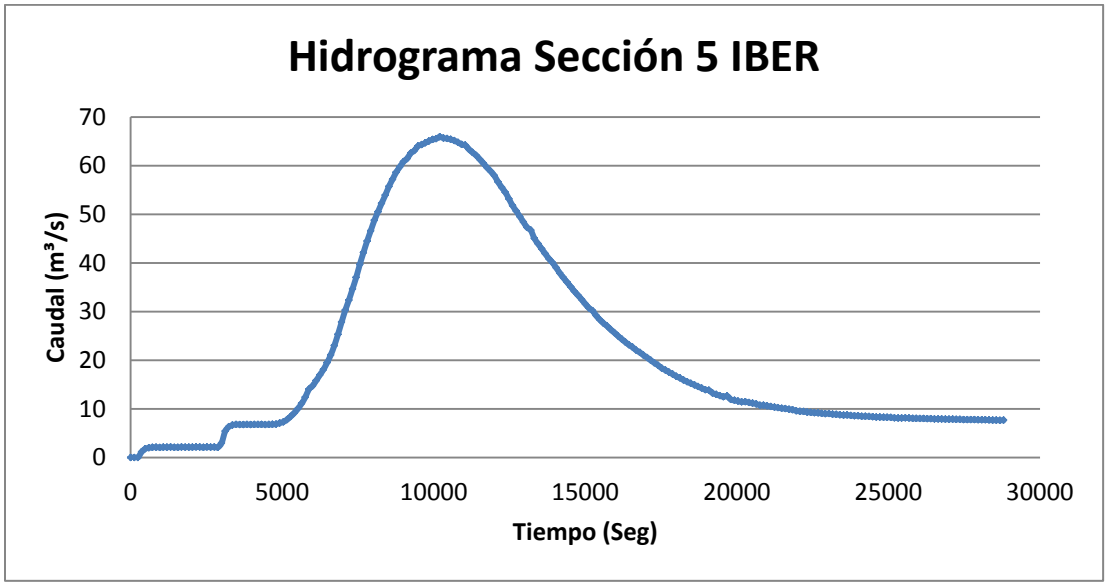
Fuente: Software IBER

Imagen 59 - Hidrograma sección 4 modelo Iber



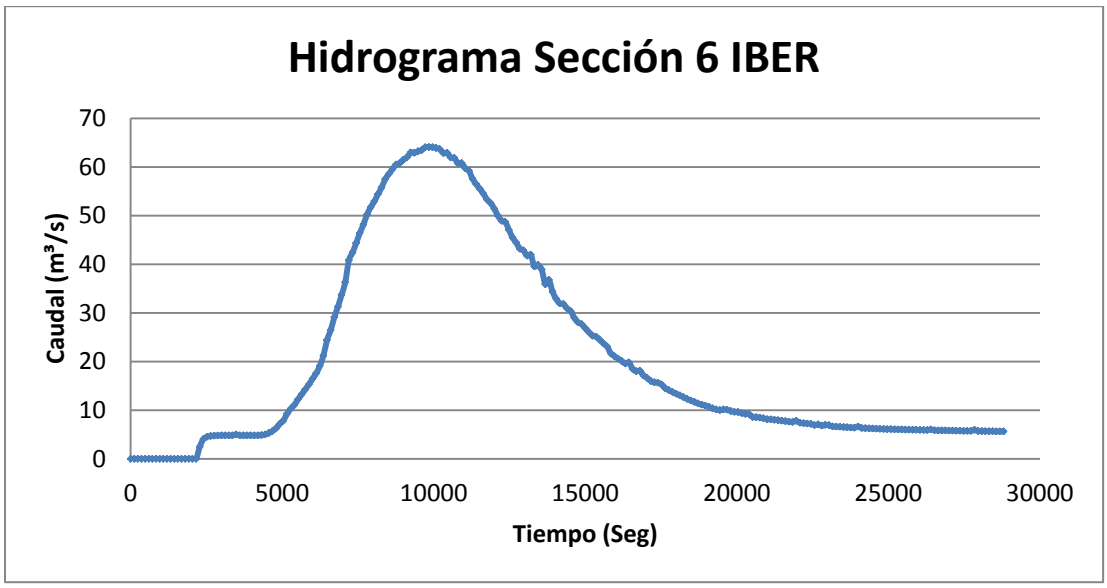
Fuente: Software IBER

Imagen 60 - Hidrograma sección 5 modelo Iber



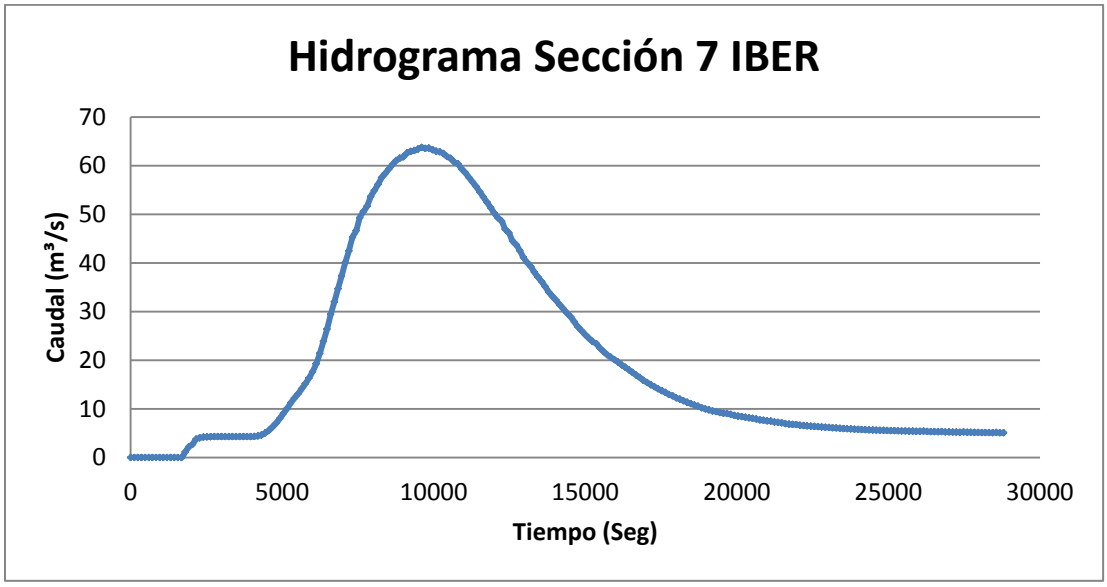
Fuente: Software IBER

Imagen 61 - Hidrograma sección 6 modelo Iber



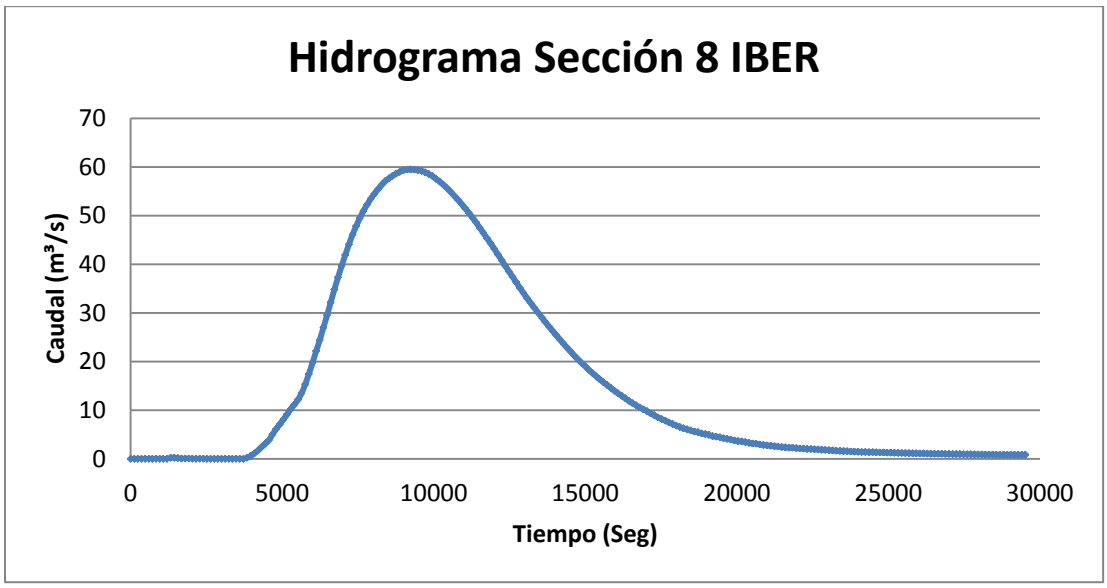
Fuente: Software IBER

Imagen 62 - Hidrograma sección 7 modelo Iber



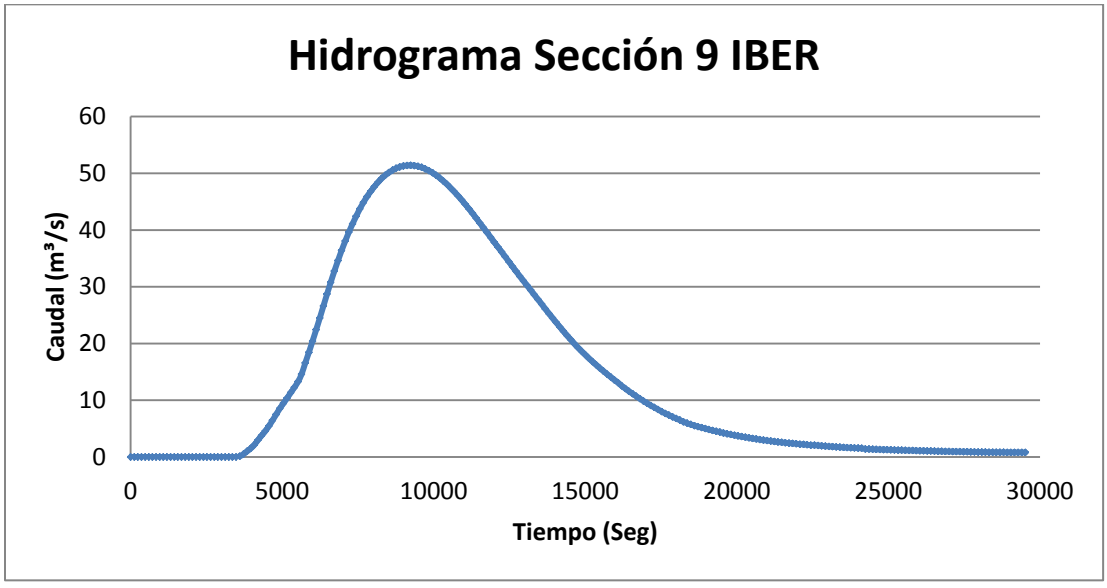
Fuente: Software IBER

Imagen 63 - Hidrograma sección 8 modelo Iber



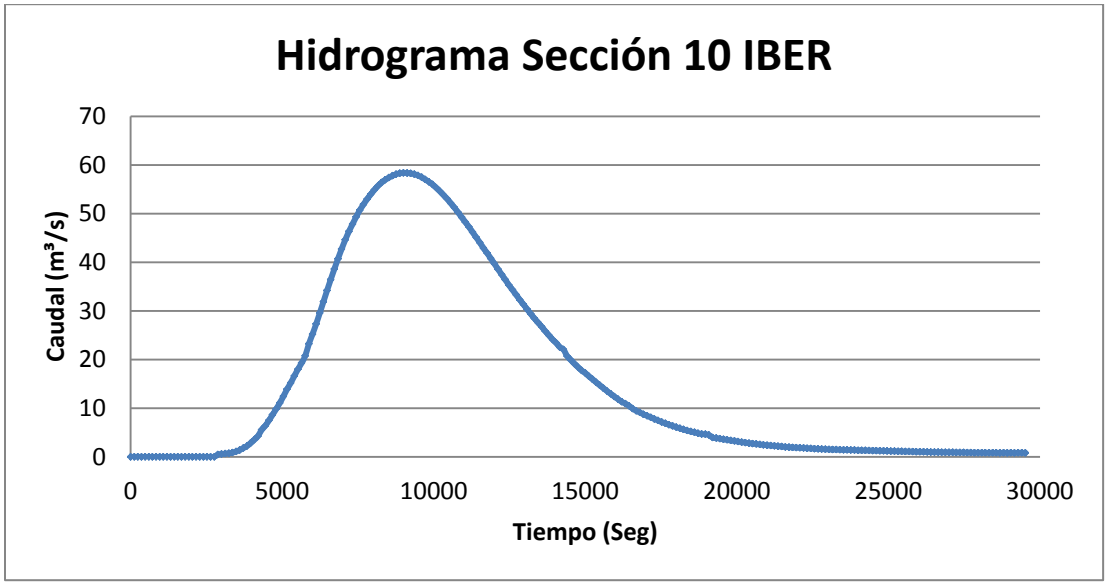
Fuente: Software IBER

Imagen 64 - Hidrograma sección 9 modelo Iber



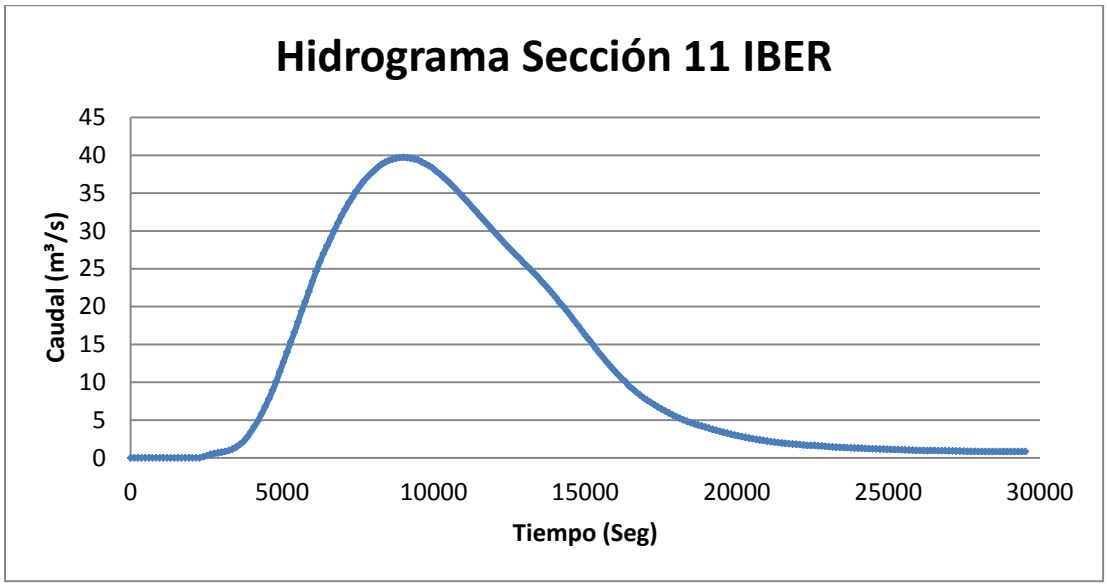
Fuente: Software IBER

Imagen 65 - Hidrograma sección 10 modelo Iber



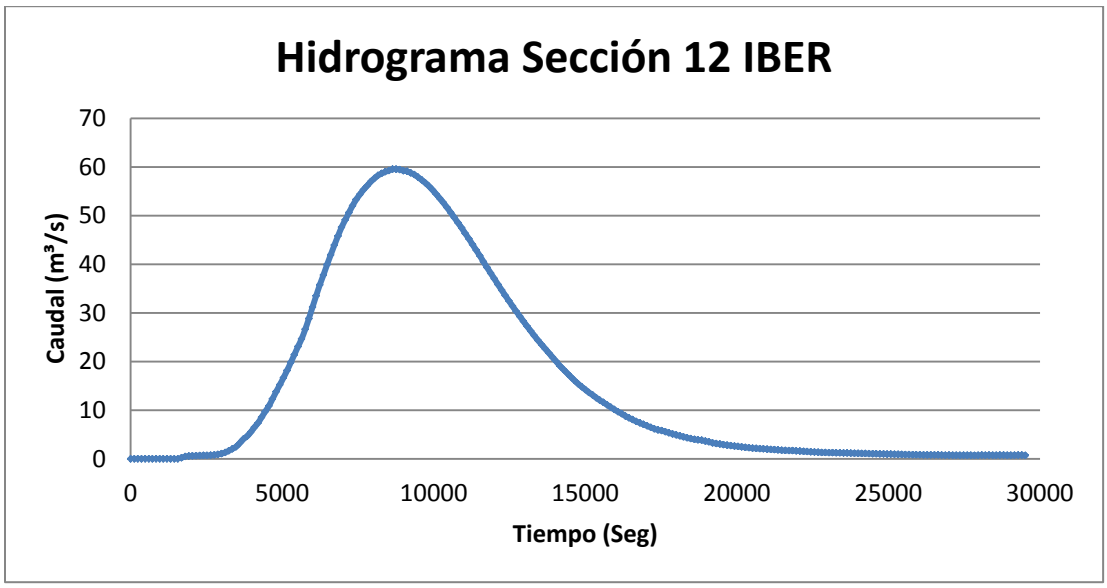
Fuente: Software IBER

Imagen 66 - Hidrograma sección 11 modelo Iber



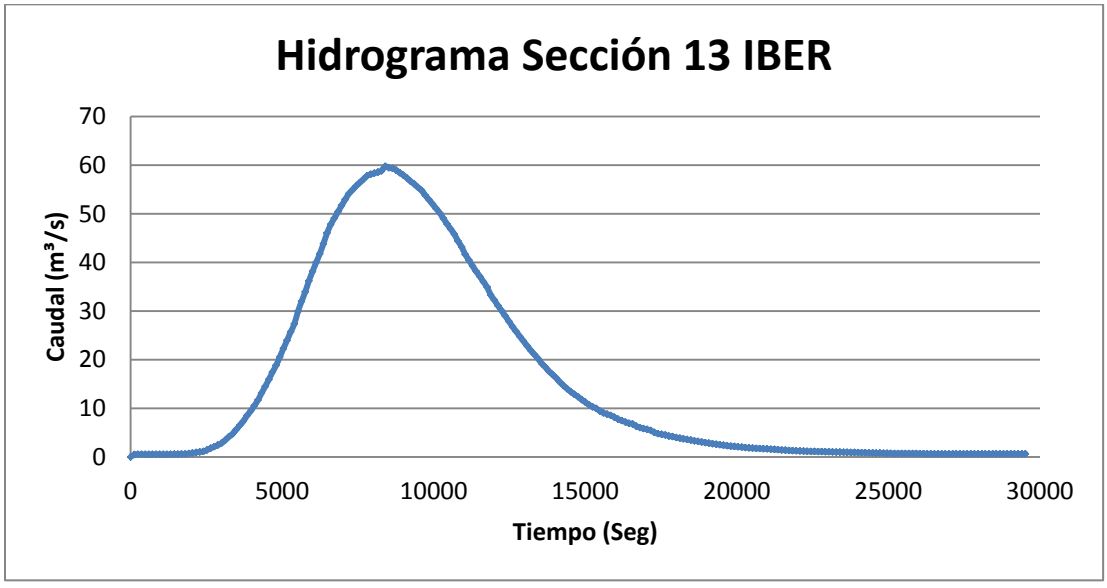
Fuente: Software IBER

Imagen 67 - Hidrograma sección 12 modelo Iber



Fuente: Software IBER

Imagen 68 - Hidrograma sección 13 modelo Iber



Fuente: Software IBER

10.2.4 Secciones Transversales Generadas en el Sitio de Proyecto

Una vez estabilizado el modelo Iber, se generan las secciones transversales y la lámina de agua a lo largo del tramo de modelación. En este caso se establecieron 22 secciones representativas a lo largo del modelo para las cuales se establecieron las láminas de agua medias de los modelos. Estas secciones se muestran en la Gráfica 2

De igual forma que para el modelo Hec-Ras, en el Plano 14 se muestran las secciones transversales generadas para la comparación de los parámetros hidráulicos.

11. PRODUCCIÓN DE RESULTADOS DE LOS MODELOS HIDRAULICOS PERMANENTE

Una vez realizadas las simulaciones para los modelos 1D y 2D se exportaron los archivos raster de manchas de inundación resultado de las modelaciones para el periodo de retorno de 100 años al software ArcGis para su visualización y procesamiento. A continuación se explica cómo se exportan los resultados.

11.1 EXPORTACIÓN DE RESULTADOS DE LOS MODELOS

11.1.1 Exportación de Resultados Raster Hec-Ras

La exportación se realiza mediante la herramienta Gis Export para lo cual se seleccionan los perfiles y parámetros a exportar. En el software ArcGis se importa y se establece la superficie sobre la cual se extenderá la mancha. Para el momento de la exportación de resultados ya se ha tenido en cuenta hidráulicamente la influencia de las construcciones (casas), por lo tanto las láminas corresponden a las condiciones hidrodinámicas del caso en estudio. La mancha de inundación producto de la importación, que no tiene incluidas las construcciones será uniforme.

La superficie de salida del raster no afecta los resultados al cruzarse con las construcciones y su borde corresponde a la cota del terreno coincidente con la lámina de agua.

En los Planos 8, 9 y 10 se muestran la mancha máxima de inundación, las velocidades máximas y las energías máximas resultado de la modelación con flujo permanente.

11.1.2 Exportación de Resultados Raster Iber

La exportación de resultados se realiza mediante Herramientas Iber seleccionando las variables de salida, que en este caso serán los raster de máximas láminas de agua. Al haberse previamente agujereado la superficie del terreno, con construcciones representadas como paredes de altura infinita, y por donde no hay paso de agua, los archivos raster de salida corresponden a las condiciones reales del sitio de proyecto. Los raster de salida por lo tanto serán áreas de las zonas en las que realmente hay un flujo de agua, sin cruzarse con las construcciones existentes.

En los planos 11, 12 y 12 se muestran las manchas de inundación, de velocidades máximas y de energías máximas producto de la modelación con flujo permanente.

11.1.3 Generación de Secciones Transversales a Partir de los Datos de Salida Flujo Permanente

Con los raster de salida para los modelos 1D y 2D se generan las secciones transversales mediante el software ArcGis. Con el fin de realizar la comparación de láminas en las mismas secciones y poder tener unos resultados más verídicos para los modelos se utilizó la extensión 3D Analyst seleccionando 22 secciones representativas, con las superficies correspondientes a las láminas de agua y la topografía del lecho. En el Plano 14 se muestran las secciones generadas para la comparación de resultados en los modelos.

12. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LOS MODELOS IBER Y HEC RAS FLUJO PERMANENTE

Las secciones transversales y las láminas de agua generadas para cada modelo, fueron exportadas a Excel con el fin de facilitar el tratamiento de datos y su visualización.

12.1 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LOS MODELOS IBER Y HEC RAS FLUJO PERMANENTE CON ESTRUCTURAS DE PASO

En la Gráfica 1 se muestra el resumen de los gráficos de las secciones transversales junto con su cota de lámina de agua para los dos modelos, en orden ascendente de aguas abajo hacia aguas arriba para el caso de la modelación con estructuras de paso. En el Cuadro 1 se muestra el resumen de las secciones transversales y su cota de lámina de agua para los dos modelos.

Cuadro 1 - Resumen general de láminas de agua y anchos superficiales en las secciones de los modelos régimen permanente

	Cota Lámina IBER (m.s.n.m)	Ancho Superficial IBER (m)	Cota Lámina HEC-RAS (m.s.n.m)	Ancho Superficial HEC-RAS (m)
Sección 1	2677.66	53.70	2677.64	55.73
Sección 2	2678.81	46.40	2678.71	46.92
Sección 3	2680.22	80.00	2680.22	80.00
Sección 4	2681.08	153.58	2681.28	156.84
Sección 5	2682.97	151.01	2682.91	122.65
Sección 6	2685.46	121.18	2685.47	122.25
Sección 7	2686.21	33.38	2686.19	87.21
Sección 8	2688.13	124.51	2688.05	120.25
Sección 9	2691.93	43.36	2691.70	40.34
Sección 10	2695.47	15.87	2695.19	69.24
Sección 11	2697.81	47.42	2696.99	23.27
Sección 12	2700.38	27.44	2700.32	25.65
Sección 13	2702.43	15.50	2702.04	12.40
Sección 14	2704.48	28.80	2704.17	27.77
Sección 15	2709.77	12.01	2708.72	49.11
Sección 16	2710.55	61.70	2709.70	50.13
Sección 17	2712.97	72.48	2712.02	98.43
Sección 18	2713.78	39.72	2713.03	45.41
Sección 19	2715.21	62.32	2714.67	65.75
Sección 20	2715.87	75.44	2715.32	66.30
Sección 21	2717.03	67.29	2716.59	27.33
Sección 22	2719.64	56.12	2719.86	65.48

En las secciones a la salida de los modelos, corresponden a las condiciones de frontera establecidas como flujo normal, con la pendiente estimada de acuerdo con el terreno.

Las diferencias entre las cotas de las láminas de los modelos se hicieron más evidentes en las zonas correspondientes a las inmediaciones del municipio, sin embargo en estos casos el flujo resulta no tener comportamiento bidimensional debido al confinamiento del mismo. Estas zonas están afectadas por la influencia de las estructuras de paso, las cuales al paso de la creciente generan remansos con efectos bidimensionales evidentes que al estar modelados mediante filosofías diferentes, generan la variación de las láminas en lo que corresponde a la zona urbana del municipio.

Así mismo, revisando el perfil longitudinal de la lámina de agua, se observa que en general el valor más alto es el del modelo Iber. Realizando un análisis porcentual se encuentra que en un 75.4% del cauce, la lámina resultante del modelo Iber está sobre la lámina del modelo Hec-Ras. Esto quiere

decir que el modelo Iber, para este caso va por el lado de la seguridad. En el Plano 15 se muestran los perfiles de flujo de los modelos Hec-Ras e Iber, y las manchas para el caso de un periodo de retorno de 100 años con estructuras y en el plano 16 los resultados de las manchas de inundación resultado de las modelaciones en flujo permanente con estructuras para los dos modelos.

12.2 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LOS MODELOS IBER Y HEC RAS FLUJO PERMANENTE SIN ESTRUCTURAS DE PASO

Se realizaron las modelaciones, en este caso sin estructuras de paso para el sitio en estudio con el fin de verificar la influencia de las mismas en el comportamiento de la lámina de agua tanto en la zona urbana, como en la rural. Para este caso se mantuvieron las mismas condiciones de frontera y se modeló para un TR de 100 años.

Se observó que la variación de los anchos superficiales en la zona rural, donde el flujo no se encuentra confinado, fue mínima debido a la poca influencia de las estructuras de paso para estas zonas donde priman las condiciones de llanuras inundables. En el caso de las zonas urbanas los efectos en los anchos superficiales resultaron ser nulos debido al confinamiento del flujo.

Respecto a los perfiles de flujo, se presentó una variación local en la lámina de agua en los sitios donde se encontraban las estructuras de paso, disminuyendo las profundidades de lámina en forma leve. La disminución en la lámina de agua fue consecuente en los dos modelos y se mantuvo la diferencia entre láminas cercanas al metro que se presentaba inicialmente para los modelos con estructuras. Realizando un análisis porcentual se encuentra que la lámina de agua del modelo Iber se encuentra un 78% del perfil sobre la lámina del modelo Hec-Ras, siendo mínima la diferencia entre modelos para el caso de la zona rural y significativamente mayor para la zona urbana. En este caso y al igual que el caso del modelamiento con estructuras, para las zonas rurales se pueden utilizar tanto modelos unidimensionales como bidimensionales para el análisis y modelación, primando el uso del modelo Hec-Ras por simplicidad y bajos costos computacionales. Para el caso de las zonas urbanas se recomienda el uso de modelos bidimensionales debido a la complejidad de la topografía, puntos bajos y estructuras aledañas.

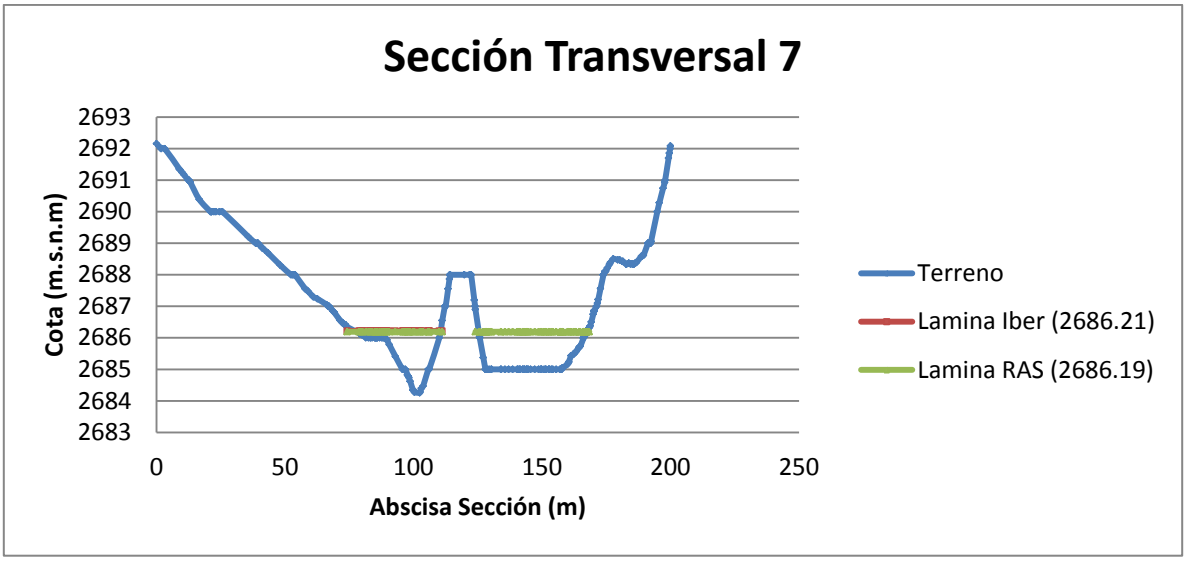
En el Plano 17 se muestran los perfiles de flujo de los modelos Hec-Ras e Iber, y las manchas para el caso de un periodo de retorno de 100 años con estructuras y en el plano 18 los resultados de las manchas de inundación resultado de las modelaciones en flujo permanente con estructuras para los dos modelos.

12.3 REVISIÓN DE LA ZONA INUNDABLE CORRESPONDIENTE A LA SECCIÓN 7

La sección 7 resulta ser llamativa para el análisis de resultados debido que hay una zona en la cual el modelo HEC-RAS genera una zona inundable apreciable, mientras que el modelo Iber no la genera. Partiendo del hecho de que la superficie del terreno es la misma para los dos modelos se deduce entonces que uno de los dos modelos resulta no ser acertado para determinadas condiciones de modelación.

En la Imagen 69 se muestra la comparación entre resultados de láminas de agua de los dos modelos para la sección 7, la cual cruza la zona inundable en la que los dos modelos difieren.

Imagen 69 - Resultados láminas de agua sección transversal 7 para modelaciones Iber y Hec-Ras

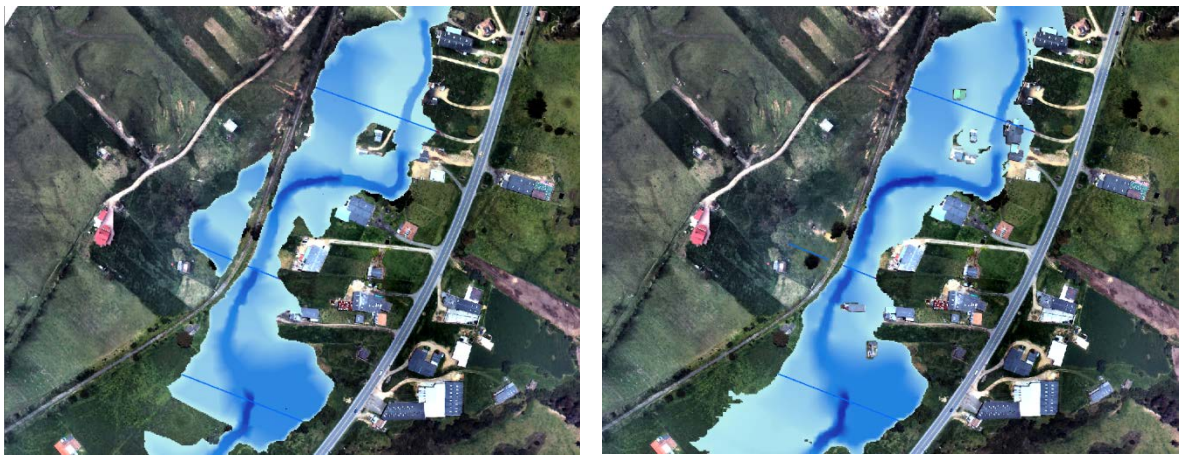


Fuente: Software Hec-Ras e Iber

Se observa que para esta sección la lámina de agua para la modelación en Hec-Ras ocupa ambas zonas inundables, mientras que Iber ocupa sólo el cauce principal.

En la Imagen 70 se muestran las manchas de inundación resultantes para la modelación Hec-Ras e Iber en la zona de interés.

Imagen 70 - Mancha de inundación resultante para modelos Hec-Ras e Iber



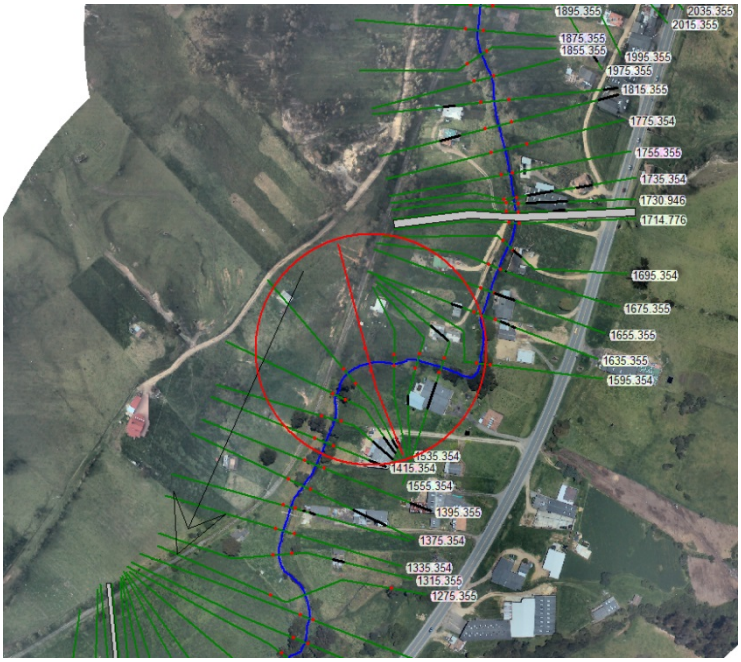
Resultado Hec-Ras Resultado Iber

Fuente: Software Hec-Ras e Iber

La zona del terraplén para la sección corresponde a la vía férrea, mientras que la pequeña zona que toma el modelo Hec-Ras como inundable corresponde a una zona profunda y cerrada, en la que el agua si puede empozarse.

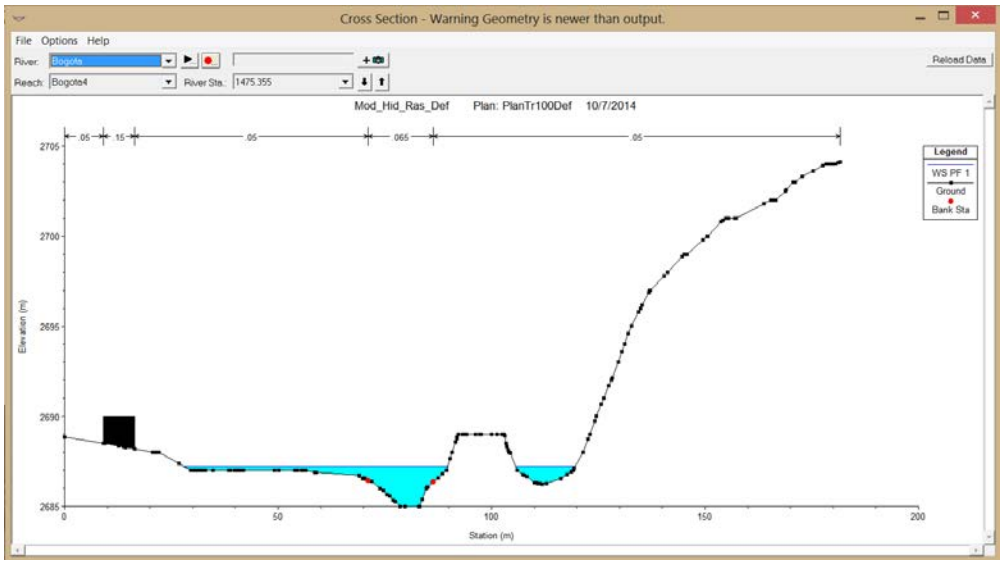
Al realizar una revisión de la superficie en la zona de estudio, ésta corresponde al terraplén de la vía férrea, y al revisar la superficie de la malla generada por Iber, esta es continua en el modelo. Esto conlleva a la revisión de las secciones transversales en el modelo Hec-Ras. Se observó que las secciones transversales a su paso por la zona inundables reflejaban el comportamiento real del cauce, es decir, el terraplén de la vía férrea. Sin embargo, observando las secciones, el río da un giro cercano a los 80°, por lo que en el modelo en Hec-Ras no se representa el terraplén, sino una planicie. Esto se muestra en planta en la Imagen 71 y en las secciones transversales aguas abajo del giro en la Imagen 72 (con terraplén) y aguas arriba en la Imagen 73 (sin terraplén).

Imagen 71 - Sección transversal aguas arriba sobre el giro del cauce



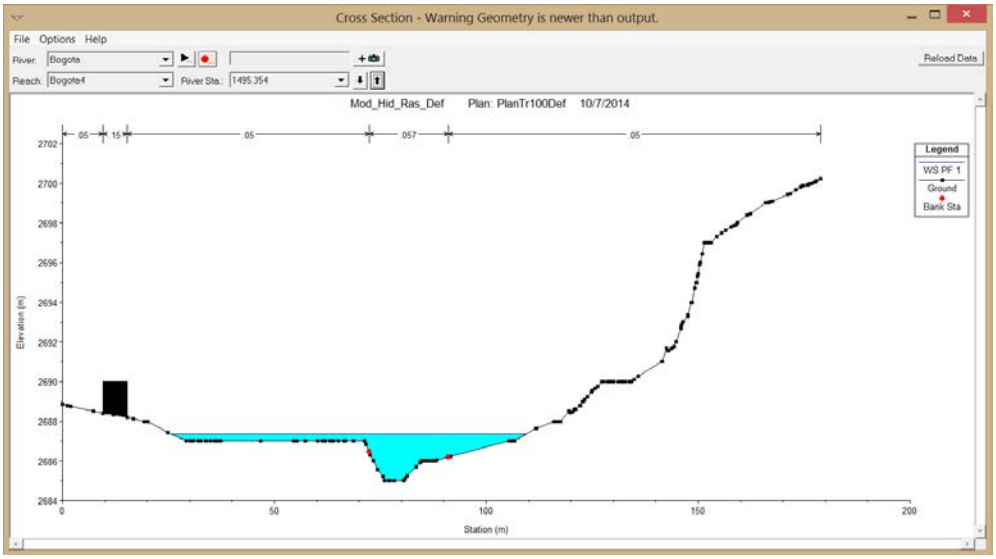
Fuente: Software Hec-Ras

Imagen 72 - Resultado Hec-Ras sección en el terraplén



Fuente: Software Hec-Ras

Imagen 73 - Resultado Hec-Ras sección sin el terraplén



Fuente: Software Hec-Ras

Se concluye entonces que el modelo Hec-Ras supuso el terraplén como una zona inundable abierta, es decir, que el terraplén terminó y dio paso a una llanura. El modelo Iber por otro lado, al trabajar con celdas, creó un un terraplén continuo, donde la simulación para ese caudal no alcanzó a sobrepasar el terraplén e inundar la zona baja. Por lo tanto en el modelo Hec-Ras debe prestarse especial atención a las zonas donde el cauce presenta giros abruptos, debido a que las secciones transversales pueden no reproducir la situación real y generar resultados erróneos de láminas de inundación. En este caso, por ejemplo es necesario confinar la sección con flujo mediante un dique.

13. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LOS MODELOS IBER Y HEC RAS Y HEC-HMS FLUJO NO PERMANENTE

En el caso de flujo no permanente, en donde los tiempos de cómputo fueron elevados, debido a un hidrograma de larga duración, los modelos tuvieron problemas de estabilidad numérica fue necesario realizar simplificaciones, cuyos costos fueron la pérdida de precisión de resultados, como se mostró en el Capítulo 10.1.1 para el modelo Hec-Ras y en el Capítulo 10.2.1 para el modelo Iber.

Las variables de comparación en este caso son varias, siendo las principales las láminas de agua, los hidrogramas y los tiempos de recorrido de los hidrogramas.

Se consideraron las mismas secciones que para flujo permanente, en donde se establecieron 22 secciones representativas a lo largo del tramo en estudio, para las cuales se obtuvieron los resultados que se encuentran resumidos en el Cuadro 2.

En la Gráfica 2 se muestra el resumen de los gráficos de las secciones transversales junto con su cota de lámina de agua para los dos modelos.

Cuadro 2 - Resumen general de láminas de agua y anchos superficiales en las secciones de los modelos régimen no permanente

	Cota Lámina IBER (m.s.n.m)	Ancho Superficial IBER (m)	Cota Lámina HEC-RAS (m.s.n.m)	Ancho Superficial HEC-RAS (m)
Sección 1	2677.65	53.70	2677.54	49.65
Sección 2	2678.81	44.96	2678.71	46.87
Sección 3	2680.22	80.00	2680.17	74.00
Sección 4	2681.08	151.39	2681.59	178.62
Sección 5	2682.97	150.00	2682.67	116.00
Sección 6	2685.45	121.18	2685.51	121.18
Sección 7	2686.20	32.30	2686.16	87.21
Sección 8	2688.13	124.51	2688.17	122.38
Sección 9	2691.92	41.77	2691.92	42.40
Sección 10	2695.45	15.87	2694.82	64.07
Sección 11	2697.67	45.75	2696.95	22.66
Sección 12	2700.30	27.16	2700.33	25.65
Sección 13	2702.41	15.50	2702.04	12.40
Sección 14	2704.47	28.80	2704.19	27.77
Sección 15	2708.48	12.01	2708.08	36.07
Sección 16	2710.29	61.70	2710.32	74.02
Sección 17	2712.96	72.48	2711.14	74.03
Sección 18	2713.76	39.72	2712.99	11.84
Sección 19	2715.19	62.32	2713.63	33.85
Sección 20	2715.86	75.44	2715.23	66.08
Sección 21	2717.04	67.29	2717.25	70.40
Sección 22	2719.64	56.12	2719.61	56.41

En el Plano 19 se muestra la comparación de las manchas de inundación de los modelos hidráulicos para flujo no permanente.

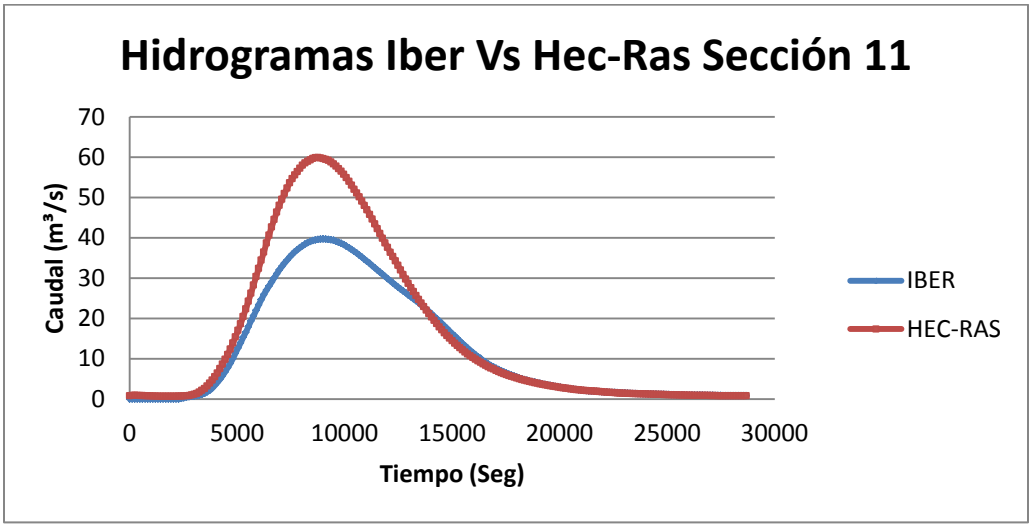
13.1 REVISIÓN DEL PASO DEL HIDROGRAMA DE CRECIENTES EN LA SECCIÓN 11

Realizadas las modelaciones para régimen no permanente sin estructuras se realizaron las comparaciones entre los hidrogramas para los dos modelos, los cuales se muestran en el Capítulo 11.3.2. Sin embargo en la sección 11 hay una diferencia muy notoria entre hidrogramas. Esta

sección está en la zona urbana del municipio y se presenta una restricción del flujo debido a las construcciones existentes, causando constricción del área lateral del flujo, generando altas presiones hidrostáticas, altas velocidades, y elevadas láminas de agua.

La comparación entre los hidrogramas correspondientes a la sección transversal 7 se muestra en la Imagen 74 en donde se observa una clara diferencia entre los mismos.

Imagen 74 – Hidrogramas de salida para los modelos He-Ras e Iber



Fuente: Software Hec-Ras e Iber

Calculando los volúmenes de los dos hidrogramas para los modelos Hec-Ras e Iber, se obtiene una gran diferencia entre volúmenes, como se muestra en el Cuadro 3.

Cuadro 3 - Volúmenes de los hidrogramas de paso en la sección 11

	Volumen (m^3)
Hec-Ras	467256.74
Iber	357686.76

Se observa entonces que la diferencia entre volúmenes para los dos hidrogramas es de 109569.98 m^3 significativamente más alta que en las demás secciones. Así mismo los caudales pico son de 59.91 m^3/s para el modelo Hec-Ras, y de 39.71 m^3/s para el modelo Iber.

Haciendo una revisión general de las manchas de inundación se observa una diferencia importante entre las manchas de los dos modelos, la cual se muestra en la Imagen 75.

Imagen 75 - Comparación entre manchas de inundación sección 11

Resultados Iber

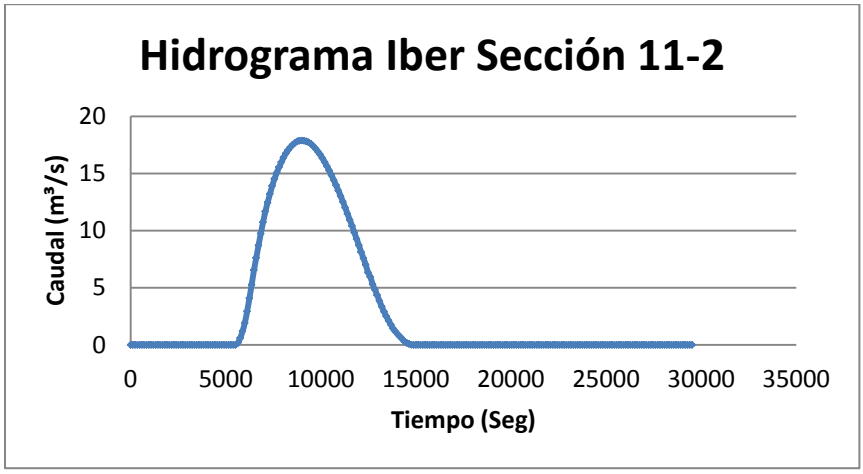
Resultados Hec-Ras

Fuente: Software Hec-Ras e Iber

Debe recalcarse que hidráulicamente se tuvo en cuenta la presencia de las construcciones en el modelo Hec-Ras, sin embargo al realizarse la exportación al software ArcGis, la lámina se superpone con la superficie topográfica del modelo. Debido a que esta no tiene las construcciones, la lámina de agua se extiende a una determinada cota hasta cruzarse con la misma cota del terreno, generando la mancha de inundación.

Se muestra entonces que la mancha producida por el modelo Iber se subdivide en dos tramos a su paso por la zona urbana, por lo tanto el hidrograma así mismo se subdivide en dos partes, mientras que para el modelo Hec-Ras el hidrograma pasa únicamente por la sección del cauce principal. Generando una nueva sección en el modelo Iber para la zona correspondiente a la calle paralela al cauce principal y por donde según el modelo hay un flujo significativo de agua, se procede a generar el hidrograma integrando el volumen para esta sección a lo largo del tiempo de simulación. El resultado de la integración es el hidrograma que se muestra en la Imagen 76.

Imagen 76 - Hidrograma sección transversal paralela a sección 11



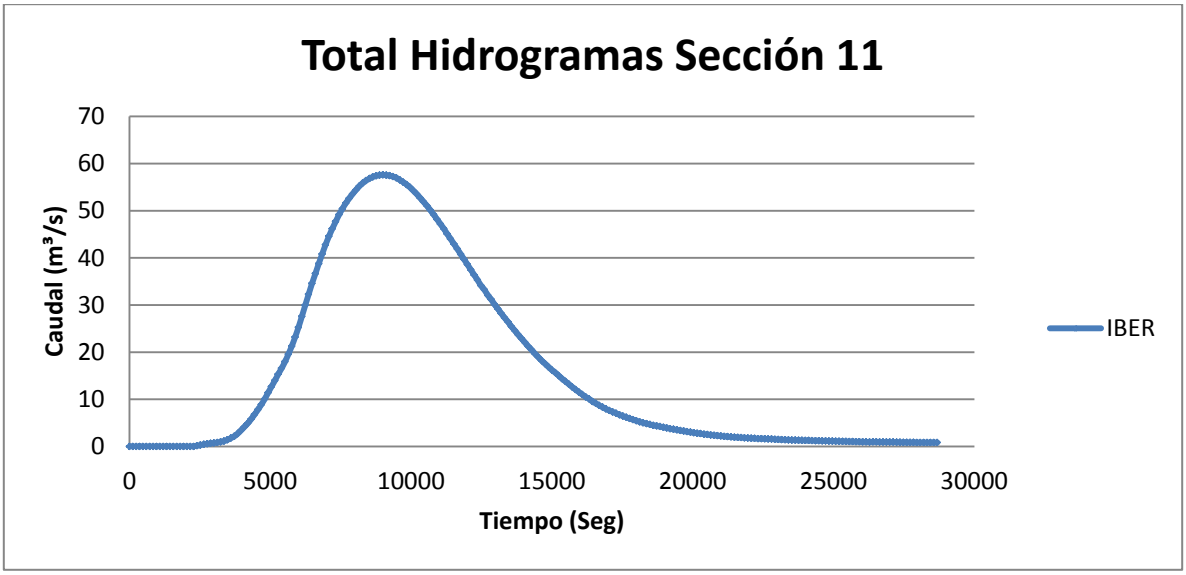
Fuente: Software Iber

Este hidrograma tiene un volumen de 90816.58 m³, que es significativamente alto. Por lo tanto el hidrograma de la creciente se subdividió al paso por la zona urbana en donde la presencia de las construcciones generó un canal artificial para el paso de la creciente.

En visitas de campo a la zona de proyecto, se corroboró, por testimonios de los habitantes de la población, que al momento de la creciente del 13 de mayo de 2011 el río efectivamente pasó por la zona urbana, presentando láminas cercanas a los 50 cms, por lo que este efecto resulta ser real para las crecientes de periodos de retorno elevados.

Con el fin de obtener el hidrograma total de la creciente a su paso por este tramo se sumaron los hidrogramas del cauce, y de la zona urbana. El resultado de la suma de los hidrogramas se muestra en la Imagen 77.

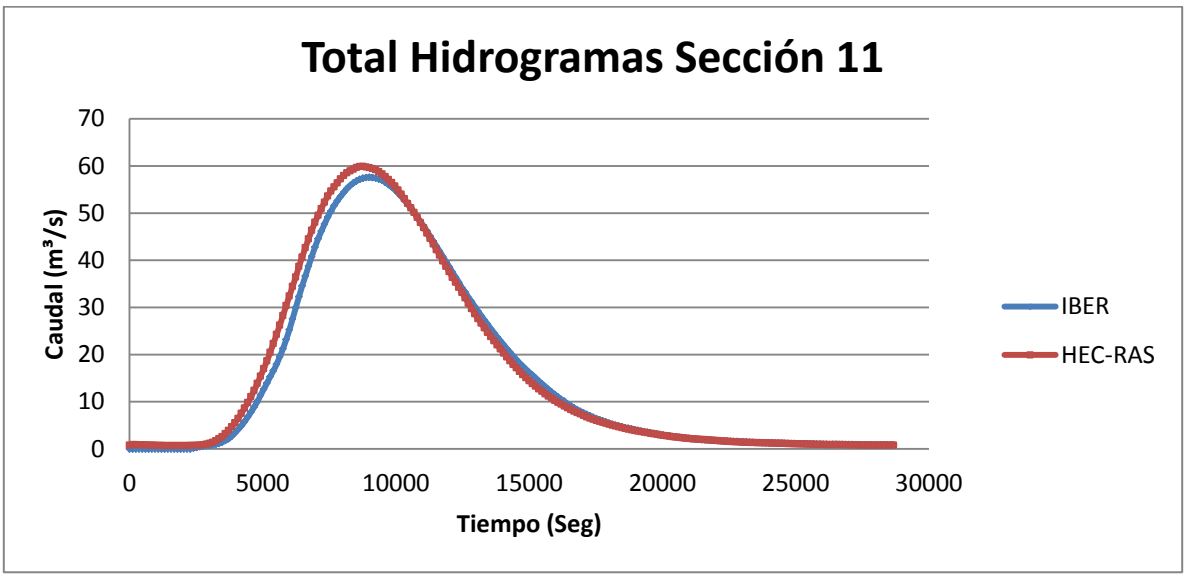
Imagen 77 - Hidrograma ajustado sección transversal 11



Fuente: Software Iber

Para este hidrograma el volumen es de 448503 m³ siendo más acertado para el paso de la creciente. La diferencia entre volúmenes de los hidrogramas para los dos modelos es de 18000 m³. Así mismo el pico en este caso es de 57.6 m³/s, el cual es muy similar al pico del modelo Hec-Ras, el cual fue de 59.9. La nueva comparación entre hidrogramas para la sección en estudio se muestra en la Imagen 78.

Imagen 78 - Comparación hidrogramas sección transversal 11



Fuente: Software Hec-Ras e Iber

El modelo Hec-Ras, al ser unidimensional presenta como dato de salida la velocidad media, la cual es perpendicular a la sección. Hidráulicamente se puede subdividir el flujo para el cual la lámina es la misma, pero no ocurre esto con los hidrogramas, donde la salida es un único hidrograma para la sección.

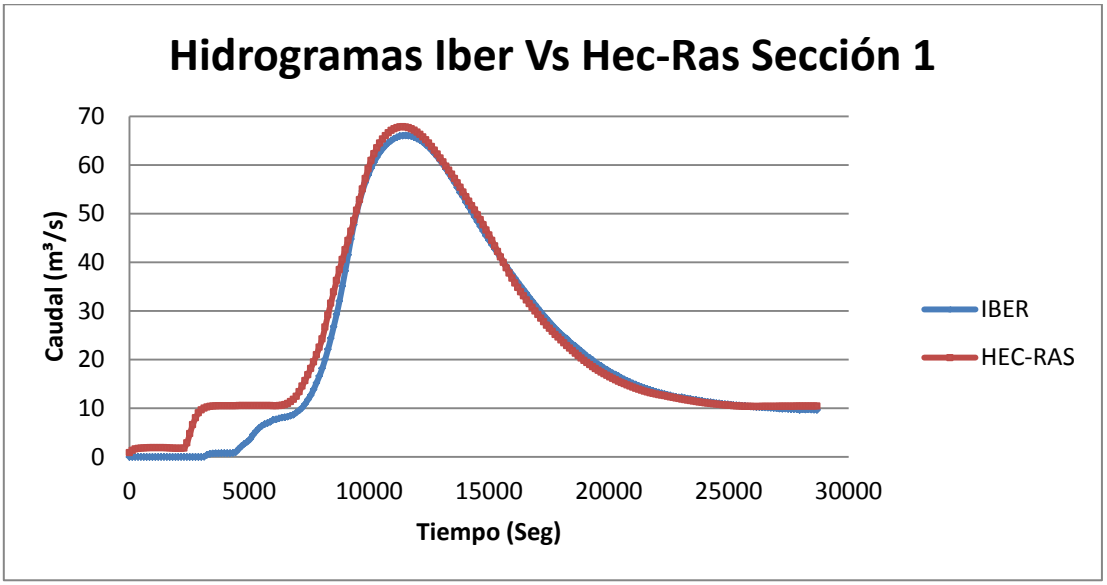
El modelo Iber, al trabajar con celdas permite la subdivisión del flujo y de los hidrogramas a su paso por una bifurcación. Permitiendo conocer el hidrograma y su caudal pico por tramos urbanos que se convierten en canales artificiales al paso de la creciente. Si se quisiera recrear el efecto del paso de la creciente en la zona urbana, se tendría que generar un alineamiento paralelo en el modelo Hec-RAS, con sección rectangular, de la misma manera que ocurre en los ríos a su paso por llanuras, donde el flujo se subdivide en ramales. El problema sería más complejo en el modelo Hec-Ras si se quisiera estudiar el efecto de una creciente en una red urbana, donde el flujo se subdivide a lo largo de las calles y carreras.

13.2 COMPARACIÓN DE HIDROGRAMAS PARA LOS MODELOS HEC-RAS E IBER

Se realizó la comparación de los picos y volúmenes para los modelos hidráulicos 1D y 2D con el fin de establecer las diferencias entre los mismos.

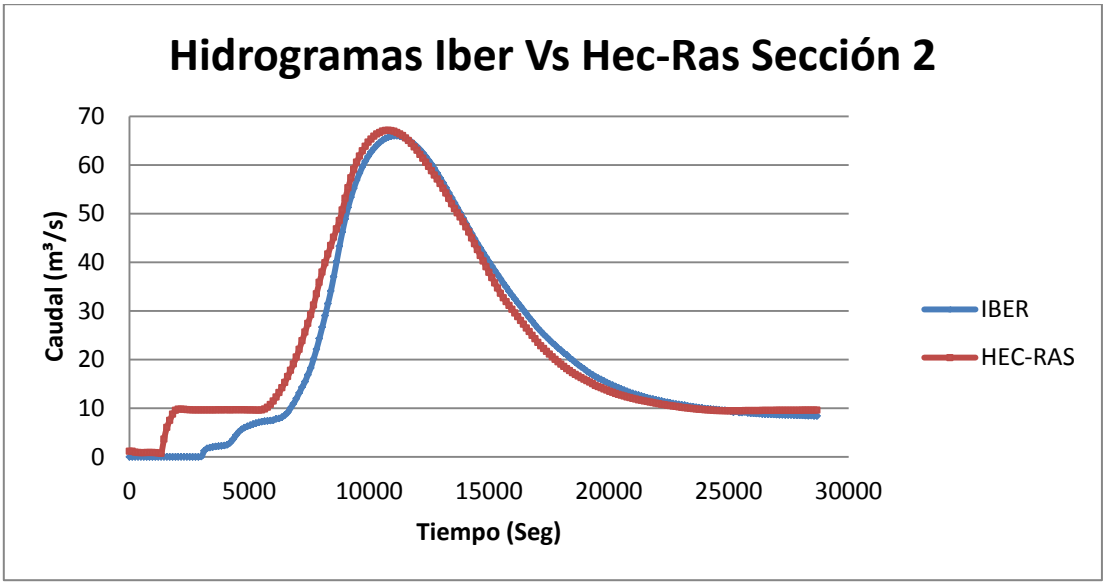
A continuación se muestran los hidrogramas sección a sección para los modelos hidráulicos 1D y 2D.

Imagen 79 - Comparación hidrogramas sección 1



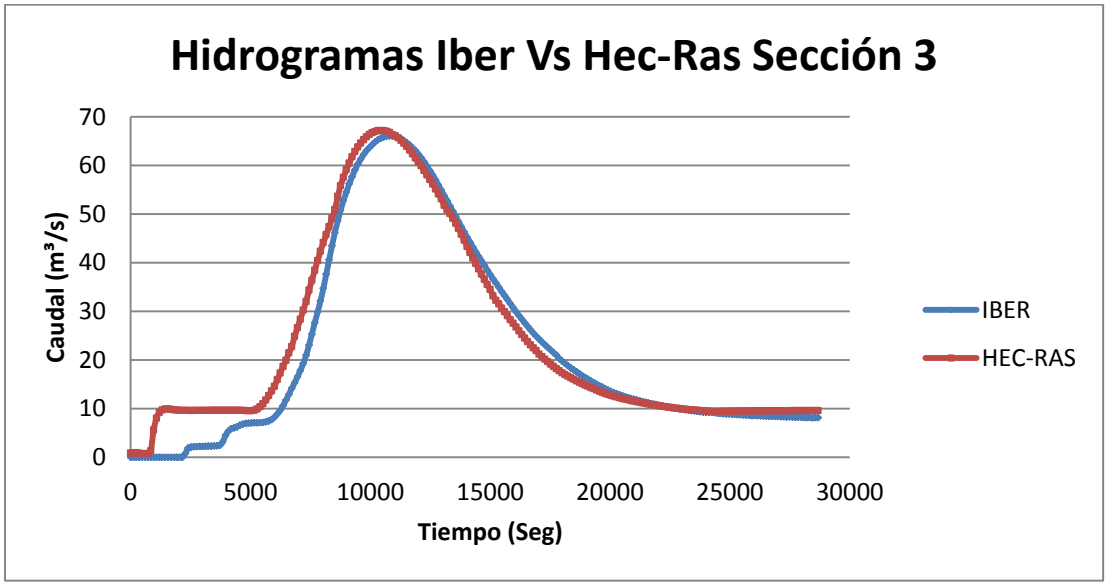
Fuente: Software Hec-Ras e Iber

Imagen 80 - Comparación hidrogramas sección 2



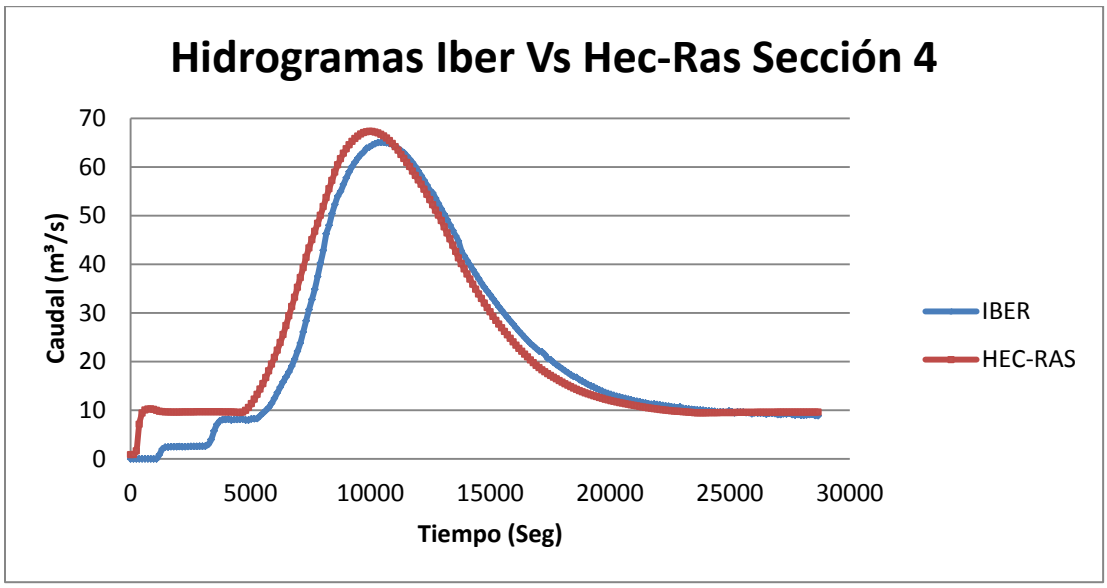
Fuente: Software Hec-Ras e Iber

Imagen 81 - Comparación hidrogramas sección 3



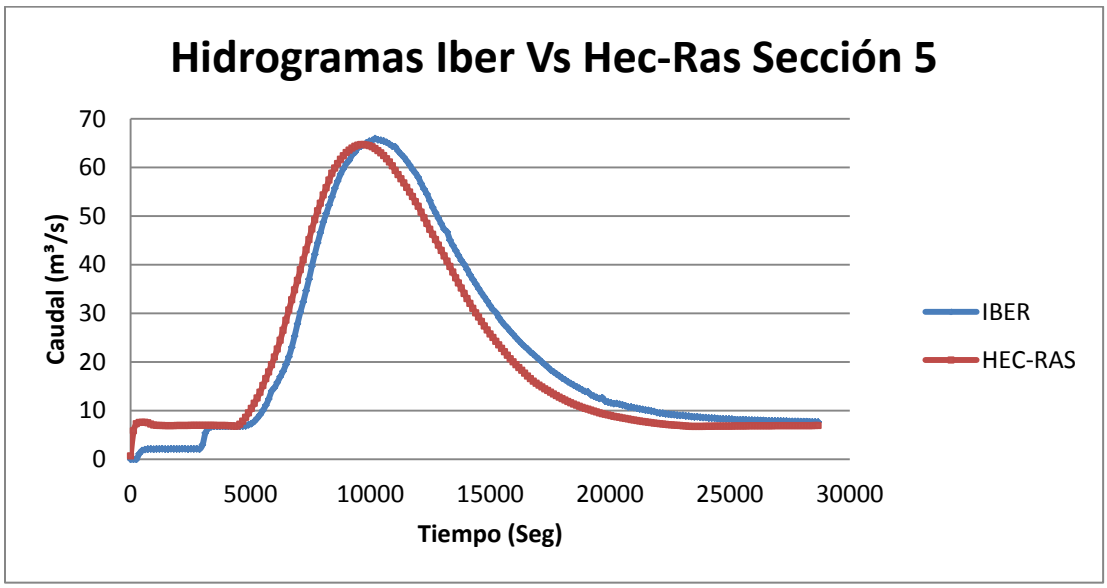
Fuente: Software Hec-Ras e Iber

Imagen 82 - Comparación hidrogramas sección 4



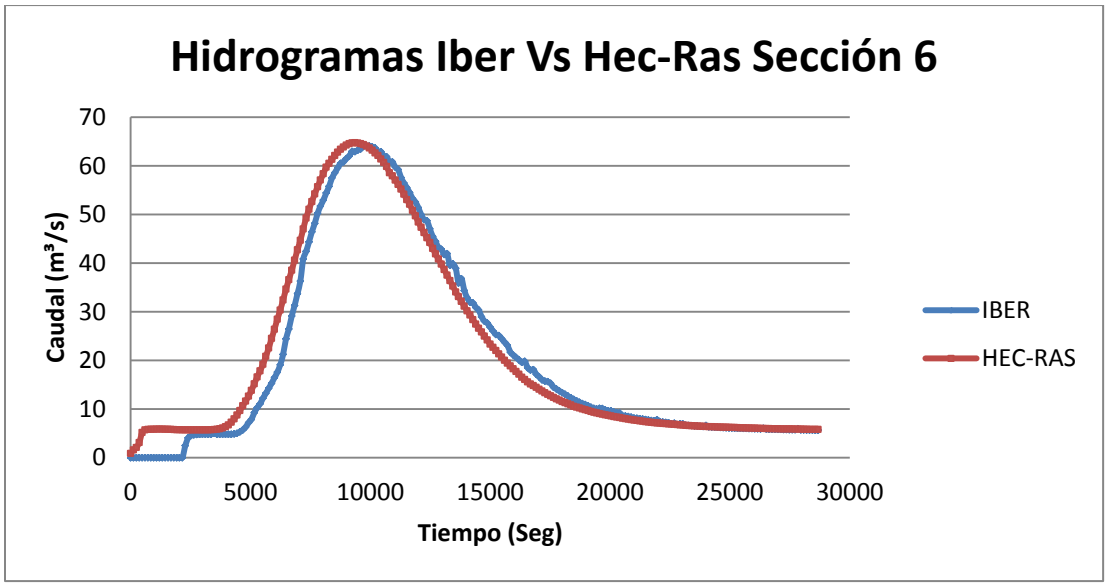
Fuente: Software Hec-Ras e Iber

Imagen 83 - Comparación hidrogramas sección 5



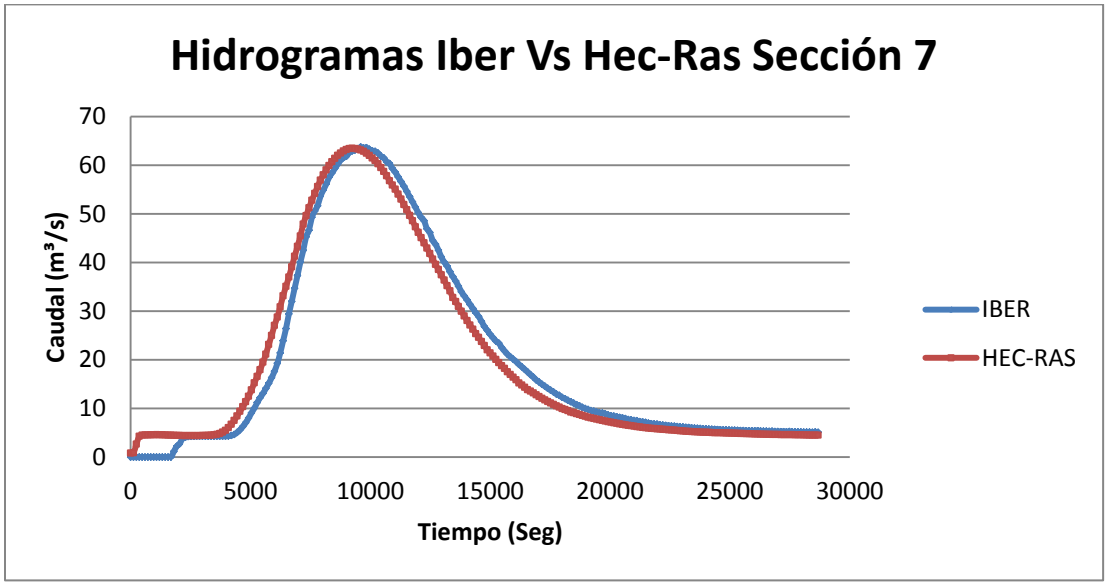
Fuente: Software Hec-Ras e Iber

Imagen 84 - Comparación hidrogramas sección 6



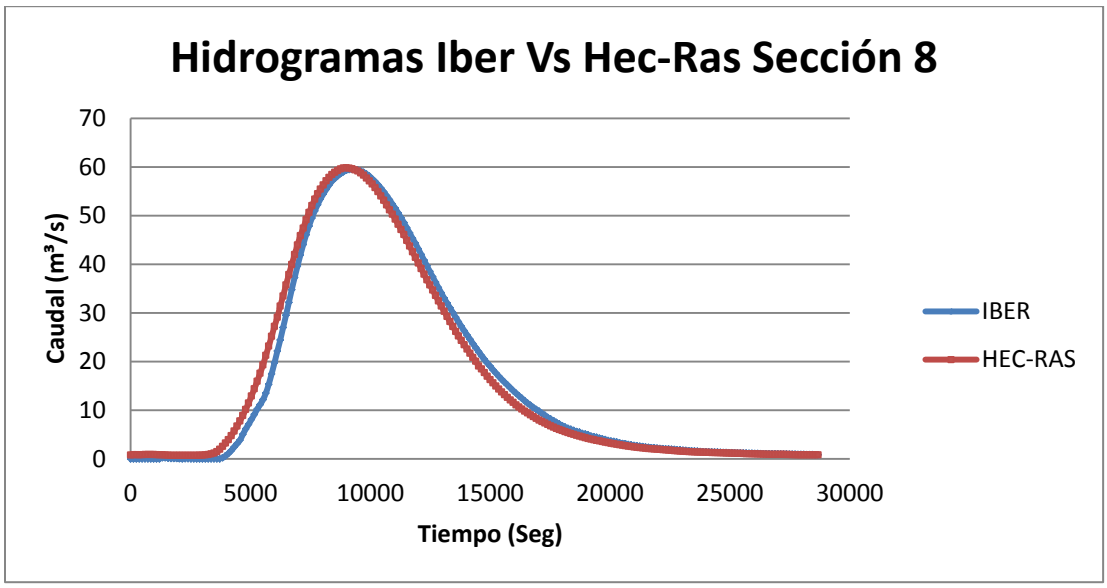
Fuente: Software Hec-Ras e Iber

Imagen 85 - Comparación hidrogramas sección 7



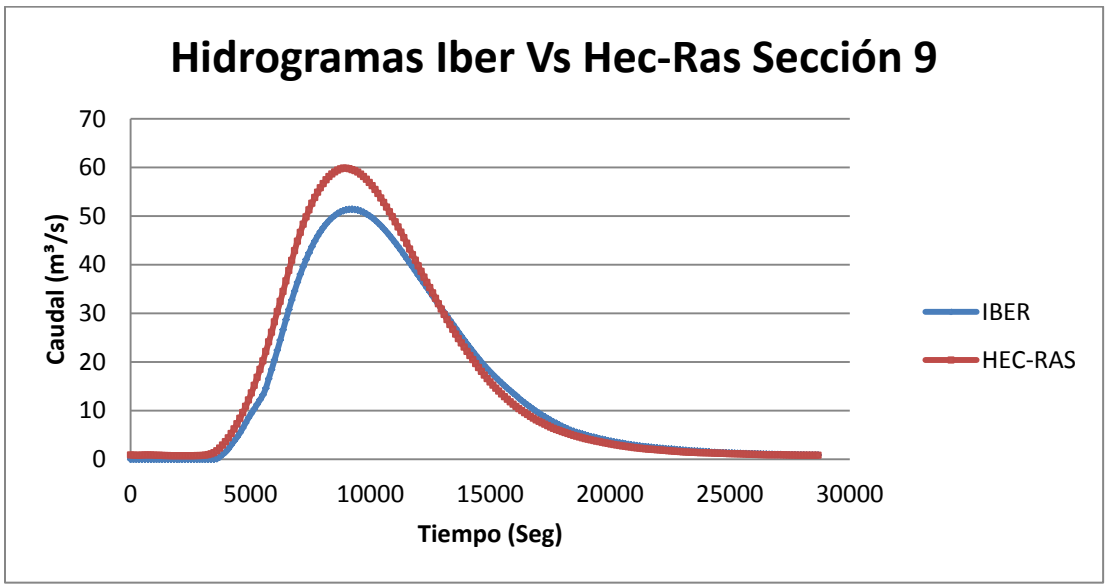
Fuente: Software Hec-Ras e Iber

Imagen 86 - Comparación hidrogramas sección 8



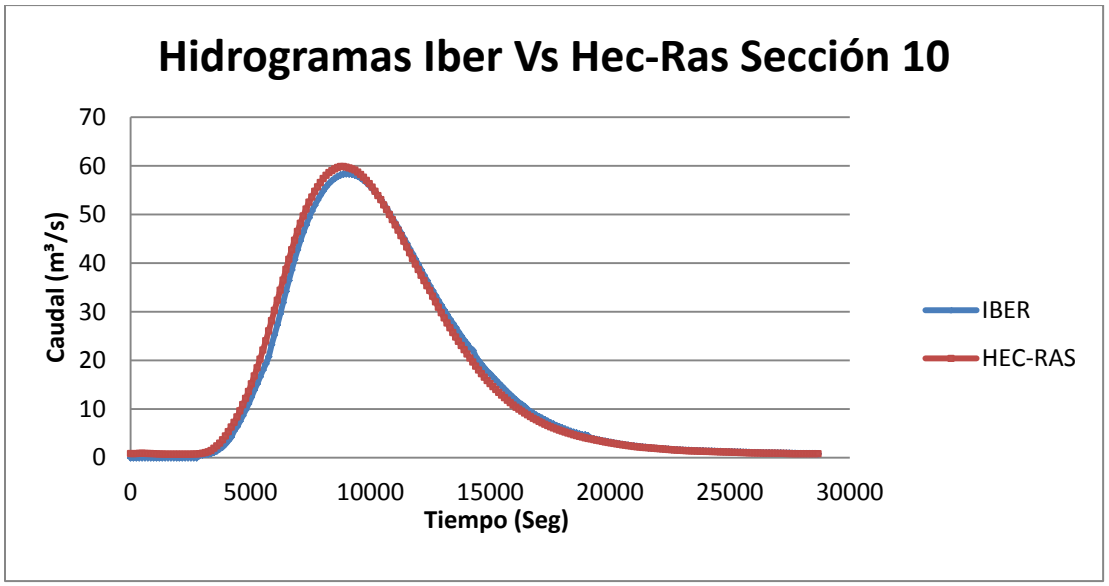
Fuente: Software Hec-Ras e Iber

Imagen 87 - Comparación hidrogramas sección 9



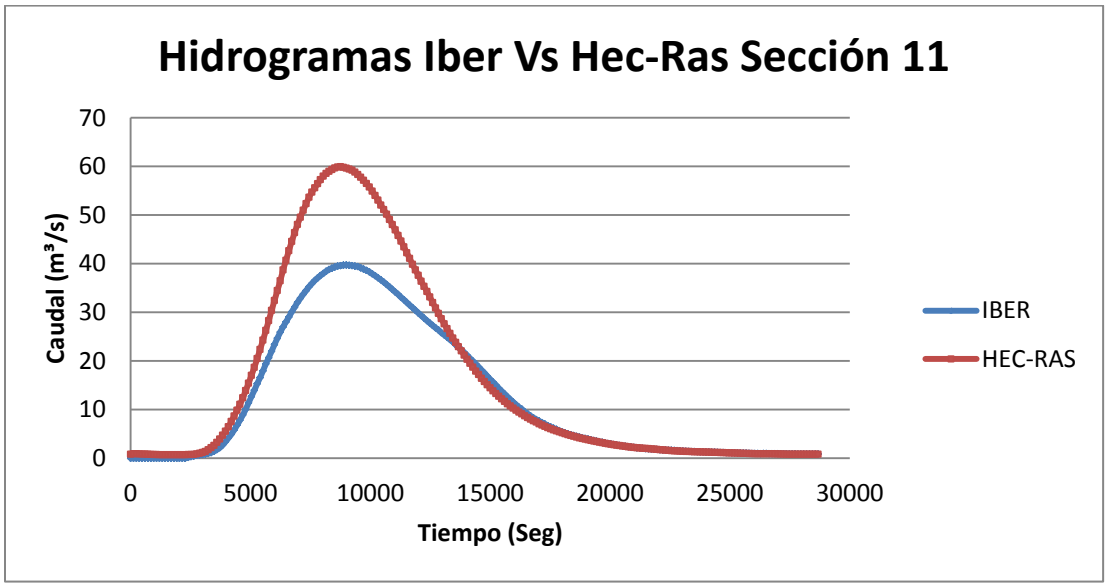
Fuente: Software Hec-Ras e Iber

Imagen 88 - Comparación hidrogramas sección 10



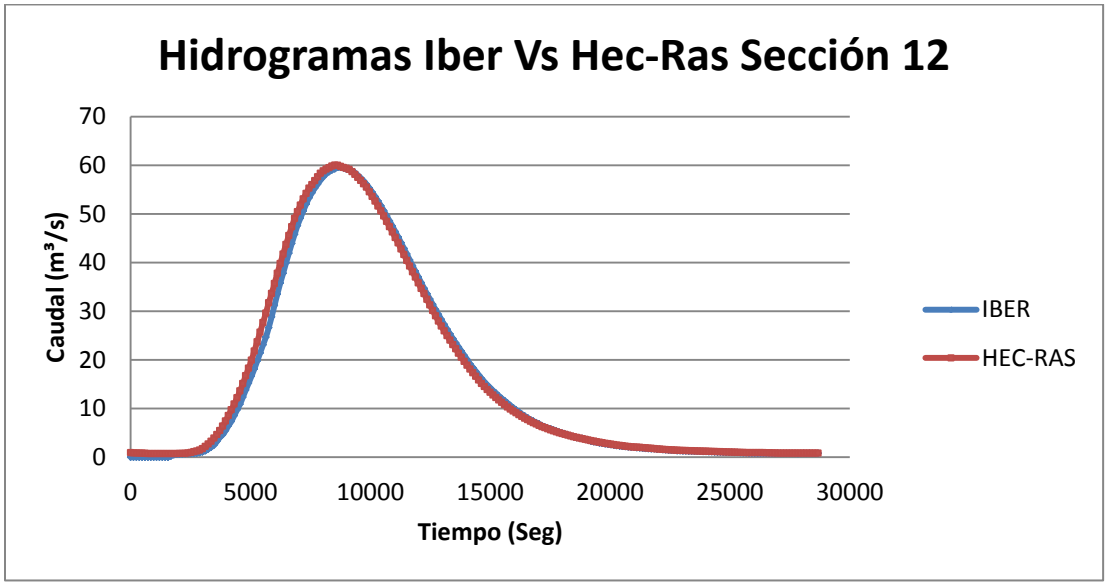
Fuente: Software Hec-Ras e Iber

Imagen 89 - Comparación hidrogramas sección 11



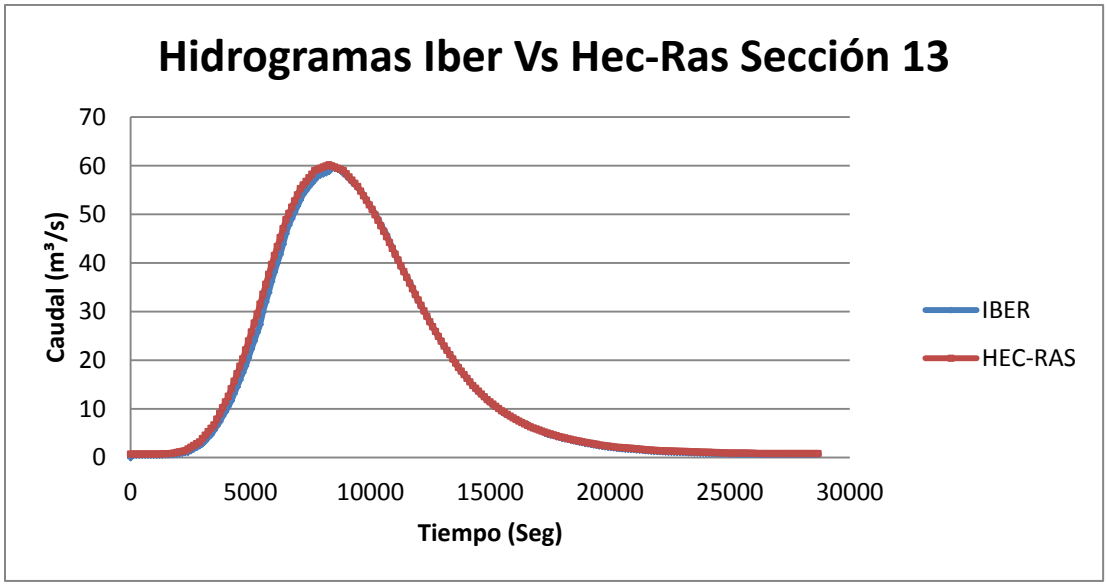
Fuente: Software Hec-Ras e Iber

Imagen 90 - Comparación hidrogramas sección 12



Fuente: Software Hec-Ras e Iber

Imagen 91 - Comparación hidrogramas sección 13

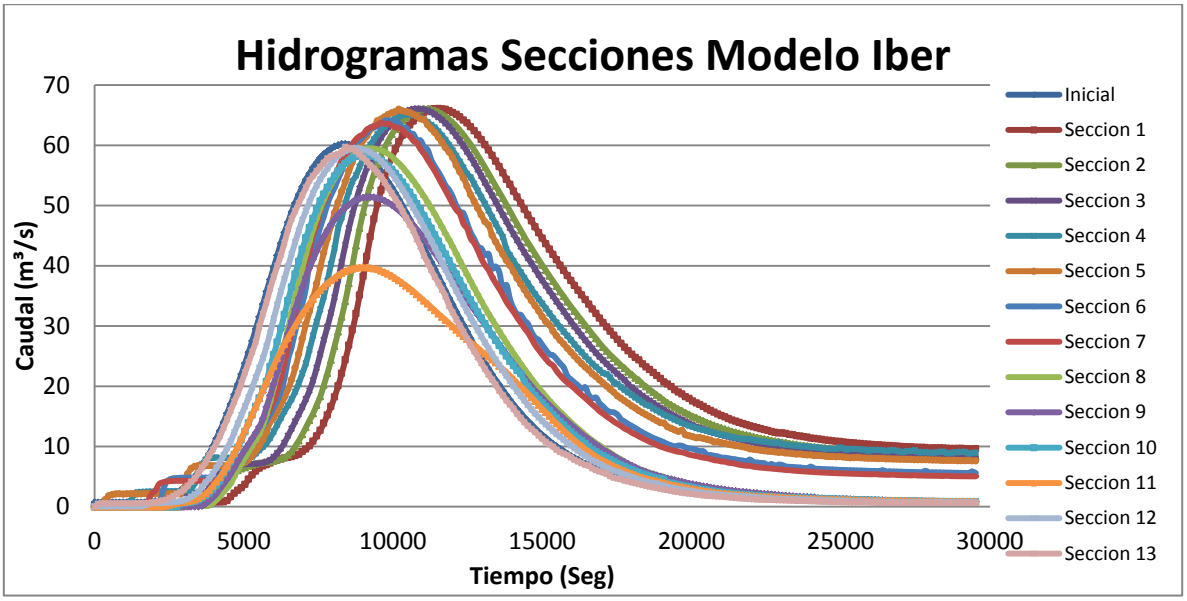


Fuente: Software Hec-Ras e Iber

13.3 HIDROGRAMAS A LO LARGO DE LAS SECCIONES DEL MODELO IBER

Se realizó de igual manera la comparación entre hidrogramas para el modelo Iber, para lo cual se obtuvo la Imagen 92.

Imagen 92 - Hidrogramas iniciales a lo largo de las secciones del modelo



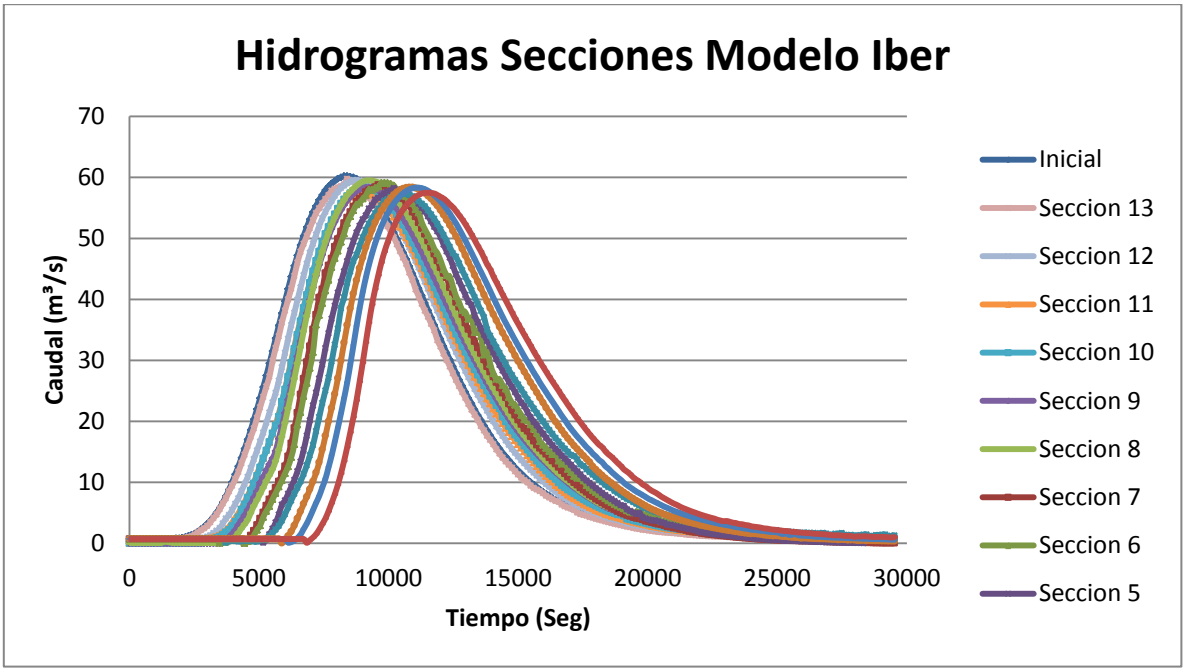
Fuente: Software Iber

En el caso del modelo Iber debe tenerse en cuenta que los hidrogramas generados no tienen en cuenta el flujo que ha pasado por las calles, por lo que algunos picos resultan ser menores. Así mismo los hidrogramas de aguas arriba, que tienen un flujo base inicial de 0.7 m^3/s son más bajos que los de aguas abajo, debido a los caudales aportantes de las quebradas. A continuación se generará el tránsito del hidrograma de entrada sin los flujos base de las quebradas, con el fin de observar la atenuación aproximada del hidrograma a la salida.

13.3.1 Hidrogramas Ajustados sin Caudal Base Modelo Iber

A continuación se presentan simulaciones sin el flujo base y los hidrogramas totales teniendo en cuenta el flujo por canales paralelos, con el fin de observar más claramente la atenuación del pico así como tiempo de recorrido de la onda. En la Imagen 93 se muestran los hidrogramas ajustados en las secciones de estudio del modelo.

Imagen 93 - Hidrogramas ajustados a lo largo de las secciones del modelo



Fuente: Software Iber

A partir de los hidrogramas ajustados se procedió a generar el resumen de los principales resultados del flujo no permanente en la simulación, como se muestra en la Cuadro 4.

Cuadro 4 - Parámetros de salida del modelo en régimen no permanente

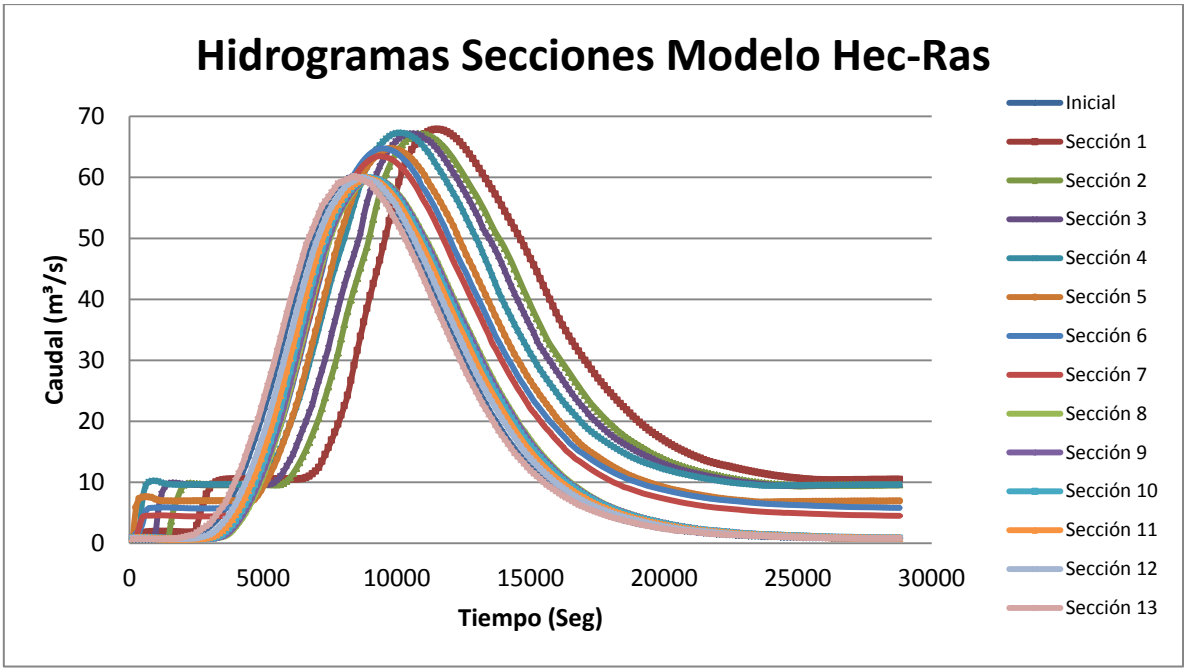
	Caudal Pico (m³/s)	Tiempo al Pico (s)
Sección 1	57.48	11520
Sección 2	58.31	11160
Sección 3	58.38	10800
Sección 4	57.37	10560
Sección 5	58.25	10200
Sección 6	59.11	9840
Sección 7	58.75	9600
Sección 8	59.51	9240
Sección 9	58.34	9240
Sección 10	58.38	9000
Sección 11	57.60	9000
Sección 12	59.56	8760
Sección 13	60.20	8400

A partir de los resultados del modelo Iber se observa que la atenuación que sufrió el pico en el tránsito a lo largo del modelo fue de 2.72 m³/s, lo cual resulta ser un valor relativamente alto de atenuación. Así mismo se observa que el tiempo de recorrido del pico de la onda fue de 3120 segundos, correspondiente a 52 minutos entre el pico del hidrograma de entrada y el pico del hidrograma de salida.

13.4 HIDROGRAMAS A LO LARGO DE LAS SECCIONES DEL MODELO HEC-RAS

Con el modelo estabilizado y con las simplificaciones necesarias, se generaron los hidrogramas a lo largo del modelo para su análisis. Los hidrogramas de salida del modelo se muestran en la Imagen 94.

Imagen 94 - Hidrogramas iniciales a lo largo de las secciones del modelo



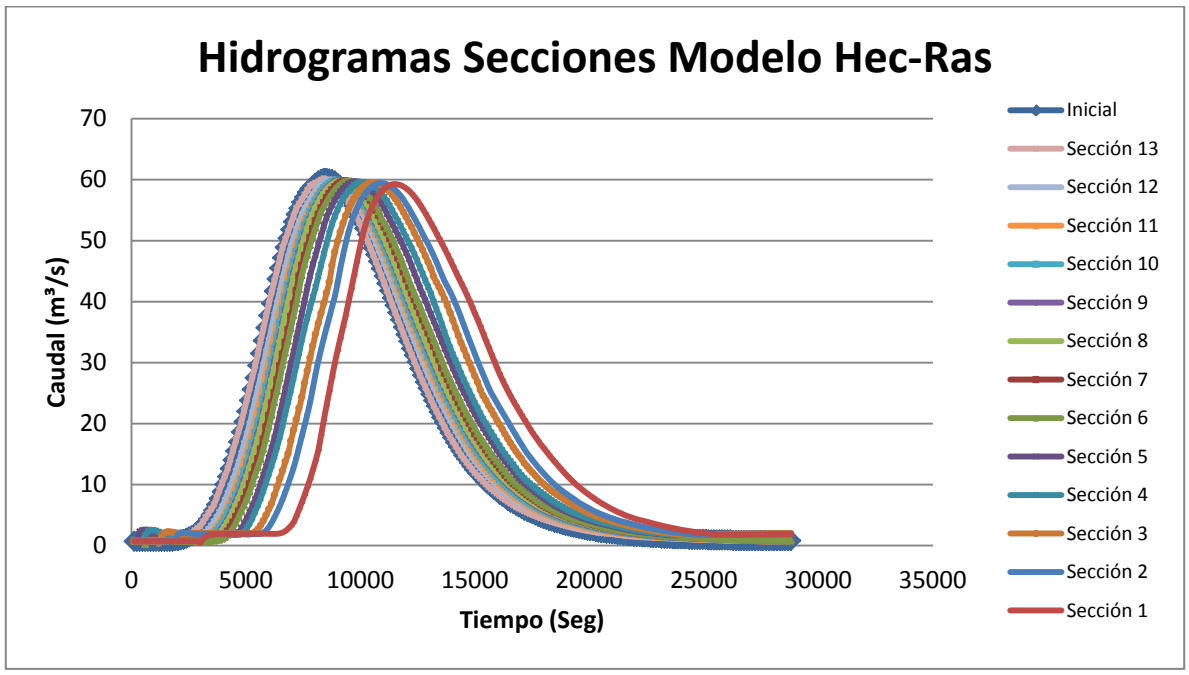
Fuente: Software Hec-Ras

Al igual que en el modelo Iber, para el modelo Hec-Ras se tuvieron en cuenta los flujos laterales de las quebradas, haciendo que el pico de los hidrogramas aguas abajo de las quebradas aumentara respecto al hidrograma inicial de entrada

13.4.1 Hidrogramas Ajustados Sin Caudal base Modelo Hec-Ras

A continuación se presentan las simulaciones sin los caudales base para las secciones reanversales seleccionadas en la Imagen 95 y en el Cuadro 5.

Imagen 95 - Hidrogramas ajustados a lo largo de las secciones del modelo



Fuente: Software Hec-Ras

Cuadro 5 - Resumen características generales hidrogramas secciones

	Caudal Pico (m³/s)	Tiempo al Pico (s)
Sección 1	59.28	11520
Sección 2	59.42	10920
Sección 3	59.48	10560
Sección 4	59.63	10080
Sección 5	59.70	9840
Sección 6	59.75	9480
Sección 7	59.78	9360
Sección 8	59.84	9120
Sección 9	59.85	9000
Sección 10	59.88	8880
Sección 11	59.91	8880
Sección 12	60.01	8640
Sección 13	60.20	8400

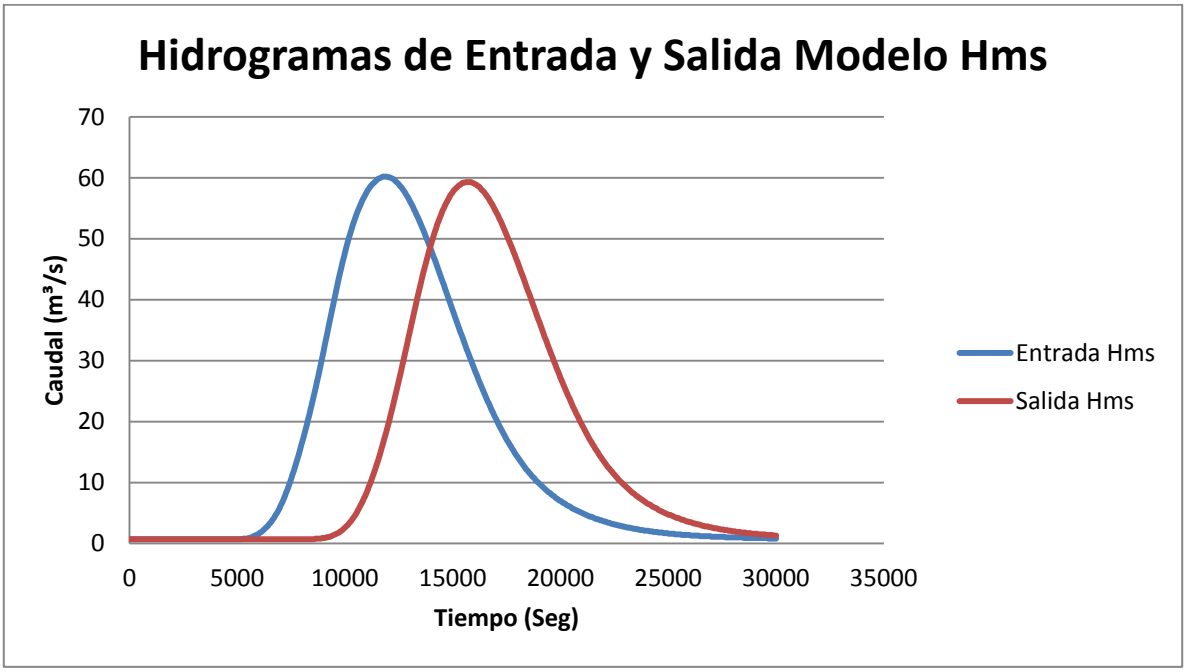
A partir de los parámetros de salida del modelo Iber se observa que la atenuación que sufrió el pico en el tránsito a lo largo del modelo fue de 0.92 m³/s, lo cual resulta ser un valor menor de atenuación. Así mismo se observa que el tiempo de recorrido del pico de la onda fue de 3120 segundos, correspondiente a 52 minutos entre el pico del hidrograma de entrada y el pico del hidrograma de salida y resultó ser el mismo tiempo del modelo Iber.

13.5 HIDROGRAMA DE ENTRADA Y SALIDA MODELO HEC-HMS

Con el hidrograma de entrada obtenido del modelo Hec-Hms, y al igual que en los modelos hidráulicos, se realizó el tránsito del hidrograma de entrada utilizando el modelo Hec-Hms mediante el método de Muskingum en donde se establecieron los parámetros de tránsito de manera similar a lo realizado en el Anexo B, Capítulo 1.8.7, es decir se tomó X=0.1. El parámetro K se ajustó utilizando parámetros de salida del modelo Hec-Ras en donde se realizó la suma de los tiempos de viaje (Travel Time) a lo largo de la modelación, resultando en un valor de 1.06 Horas. Este valor se asignó al parámetro K del modelo de Muskingum y se realizó el transito mediante Hec-Hms. Al igual que los modelos hidráulicos se utilizó un flujo base de 0.7 m³/s.

Una vez ejecutado el modelo sin flujo base, se procedió a comparar el hidrograma de entrada y salida en el tramo de modelación. La comparación entre los hidrogramas de entrada y salida para el tramo en modelación se muestra en la Imagen 96

Imagen 96 - Hidrogramas de entrada y salida modelo Hec-Hms



Fuente: Software Hec-Hms

Con los resultados del tránsito mediante el método de Muskingum, se encuentra que la atenuación sufrida por el pico del hidrograma a la salida del tramo en modelación es de 0.9 m^3/s, similar al modelo Hec-Ras.

El tiempo de recorrido del pico de la onda fue de 3840 segundos, correspondiente a 64 minutos, 12 minutos por encima de los resultados de los modelos Hec-Ras e Iber.

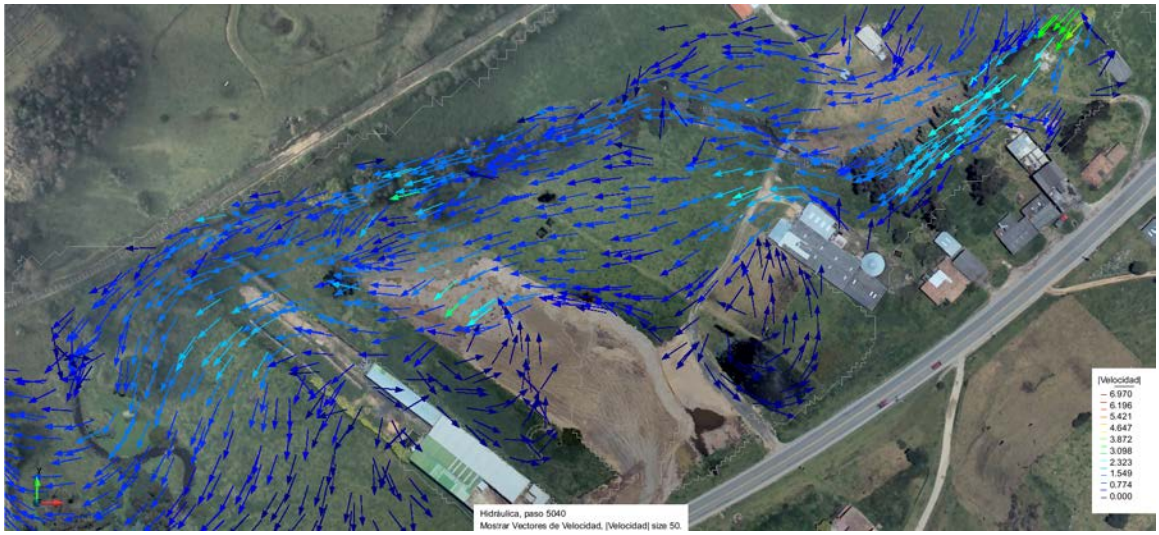
Para el modelo Hec-Hms se realizó de igual forma una calibración respecto al valor pico del hidrograma de salida del modelo Hec-Ras con el fin de estimar los parámetros ajustados para la modelación Hms. El caudal pico de salida del modelo Hec-Ras fue de 59.3 m^3/s, mientras que el caudal pico del modelo Hec-Hms fue de 59.28 m^3/s resultando una diferencia entre picos de 0.02 m^3/s. Al realizar la optimización para los dos parámetros el valor optimizado del parámetro K resultó ser el mismo: 1.06 horas. Para el caso del parámetro X el valor optimizado resultó ser de 0.0, con lo cual se aumentó la atenuación del pico.

En el Anexo P, se presenta la modelación hidrológica y tránsito del hidrograma mediante el método de Muskingum en la cuenca alta del río Bogotá en Hec-Hms para 100 años de periodo de retorno.

13.6 ANÁLISIS DE LAS ZONAS CON FLUJO BIDIMENSIONAL Y REFLUJOS

Las láminas de agua para los modelos Hec-RAS e IBER en régimen permanente resultan ser muy similares para la zona rural, aguas abajo en las zonas de pequeñas llanuras de inundación, en las que el flujo tiene una marcada tendencia a la bidimensionalidad. Aunque no se logra ver claramente el efecto de la bidimensionalidad del flujo en estas zonas, si se puede detallar una marcada tendencia de los vectores en direcciones distintas a la las líneas de corriente principales del cauce, principalmente en las zonas de reflujo, correspondientes a zonas inundables con accidentes topográficos que generan una desviación del flujo. Respecto a la lámina de agua en las pequeñas llanuras, debe tenerse en cuenta que estas se encuentran cerca al tramo final de modelación, para lo cual se establecieron unas condiciones de salida iguales para los dos modelos por lo tanto esto resulta ser influyente en los niveles de la lámina de agua en los modelos. Los vectores de las direcciones de reflujo del modelo Iber muestran el comportamiento bidimensional de las zonas inundables. En la Imagen 97 se muestran los vectores de velocidad para las zonas inundables en la modelación en Iber.

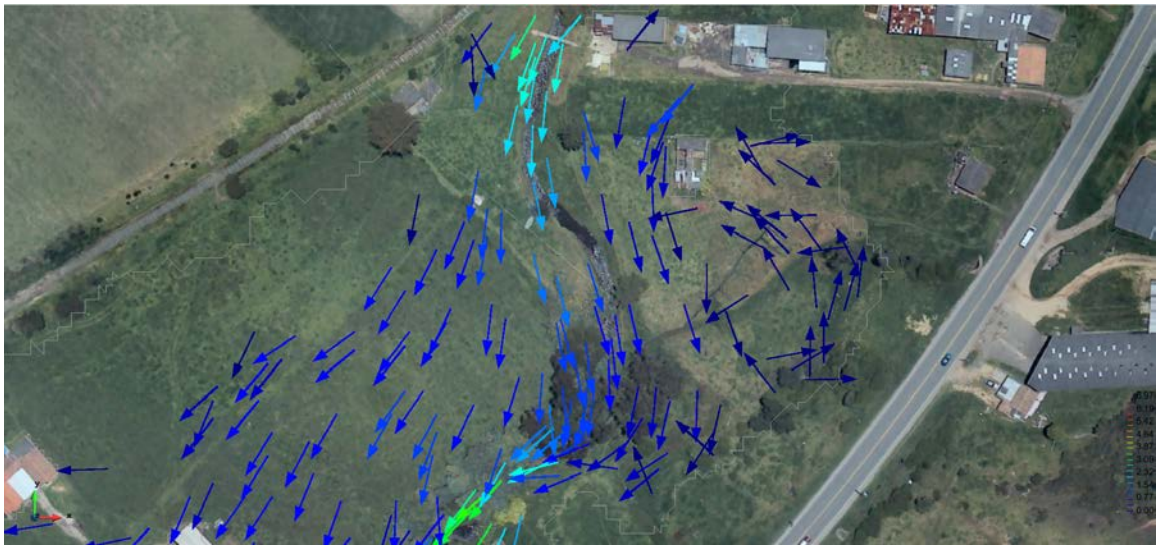
Imagen 97 - Vectores de velocidad para las zonas inundables modelación Iber



Fuente: Software Iber

En el caso de los caudales altos, correspondientes a periodos de retorno elevados, y en zonas de llanuras inundables, las condiciones hidrodinámicas presentan un cambio significativo, debido al cambio de las condiciones del lecho del cauce, dentro de las que se encuentran puntos bajos, coberturas vegetales, lo que ocasiona mayor resistencia del flujo, y diferentes tipos de obstáculos, como construcciones u obras de paso, las cuales pueden generar zonas de reflujo o remansos peligrosos. En la Imagen 98 se muestra una zona de reflujo y posible estancamiento después de crecientes elevadas.

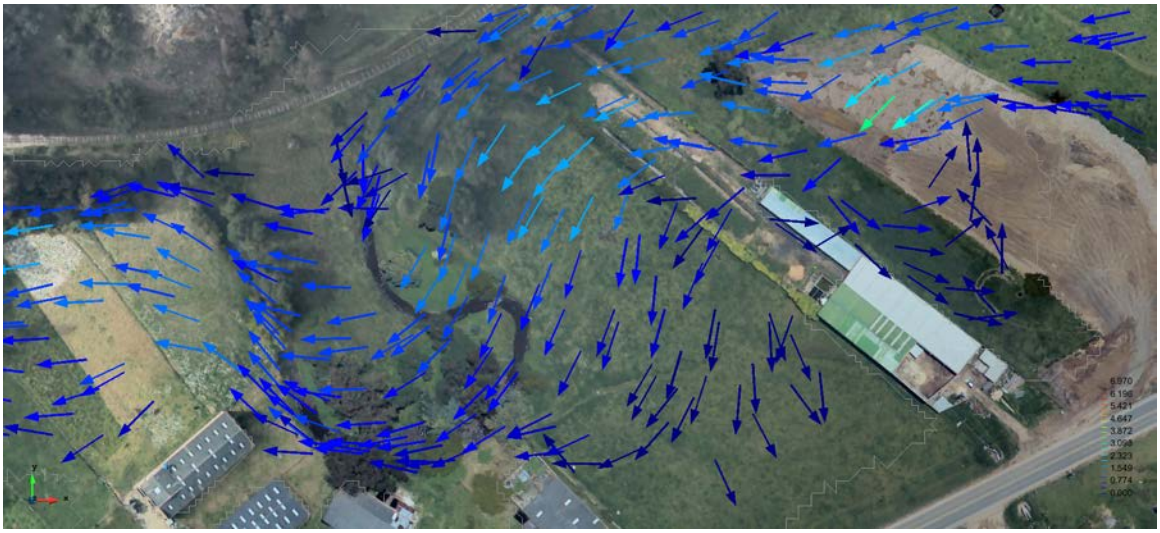
Imagen 98 - Zona de reflujo y estancamiento en crecientes elevadas



Fuente: Software Iber

Para el meandro ubicado en la zona final del proyecto, en situaciones de caudales bajos periodos de retorno, el flujo se mantiene dentro del cauce principal, las líneas de corriente se mantienen paralelas al eje del cauce. Sin embargo cuando se presentan caudales elevados, correspondientes a periodos de retorno altos, las líneas de corriente tienden a mantener la dirección principal de drenaje, pero se presenta también una tendencia hacia las zonas de puntos bajos, por lo que la trayectoria del flujo pierde las hipótesis de unidimensionalidad. En estos casos es fundamental el estudio de las zonas de estancamiento, en donde las pérdidas económicas por la muerte de los cultivos puedan ser muy altas debido a la duración del estancamiento del flujo. Esta situación se puede agudizar si se presentan crecientes continuas, como en periodos de fenómeno de la niña. En la Imagen 99 se muestra las líneas de corriente a su paso por el meandro en la zona de proyecto.

Imagen 99 - Líneas de corriente a su paso por el meandro en el sitio de proyecto



Fuente: Software Iber

En el Plano 20 se muestran los vectores de flujo para la el tramo en modelación.

14. ANÁLISIS DE RESULTADOS MEDIANTE EL MODELO IBER PARA UN TR DE 100 AÑOS EN RÉGIMEN NO PERMANENTE.

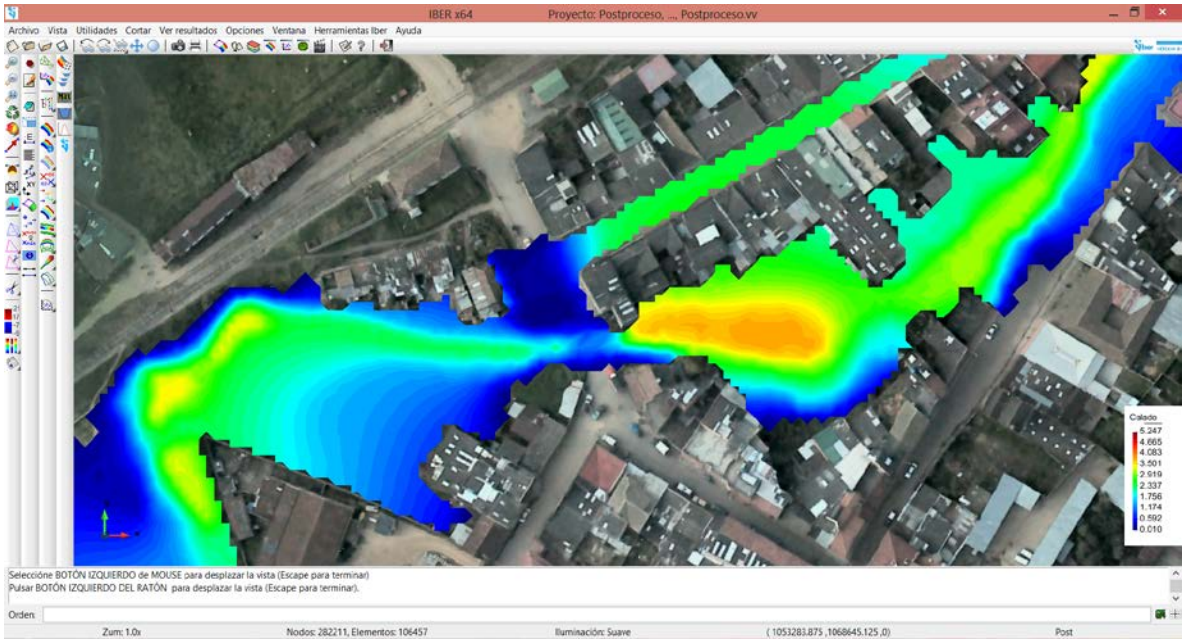
Como se explicó anteriormente, no se desarrolló un modelo de flujo no permanente en Hec-Ras con estructuras de paso. Por consiguiente, en esta sección solamente se presentarán los resultados del modelo Iber para las condiciones de flujo no permanente con estructuras.

14.1 ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA NO 6 CORRESPONDIENTE A UN PUENTE SOBRE EL RÍO BOGOTÁ

Para el análisis de las estructuras de paso como lo son los puentes se utilizaron los resultados correspondientes a los máximos de la simulación, los cuales son las envolventes temporales de los valores máximos de las variables seleccionadas.

En este caso se analizará la estructura 6 correspondiente a un puente sobre el río Bogotá, para la cual se muestra su mapa de máximos en la Imagen 100.

Imagen 100 - Lámina máxima de agua a lo largo de la estructura de paso 6



Fuente: Software Iber

En este caso se observa claramente la posible insuficiencia hidráulica de la estructura, al haber una significativa diferencia de elevaciones antes y después de la estructura, por lo que se ve necesario estudiar el flujo a su paso por la estructura.

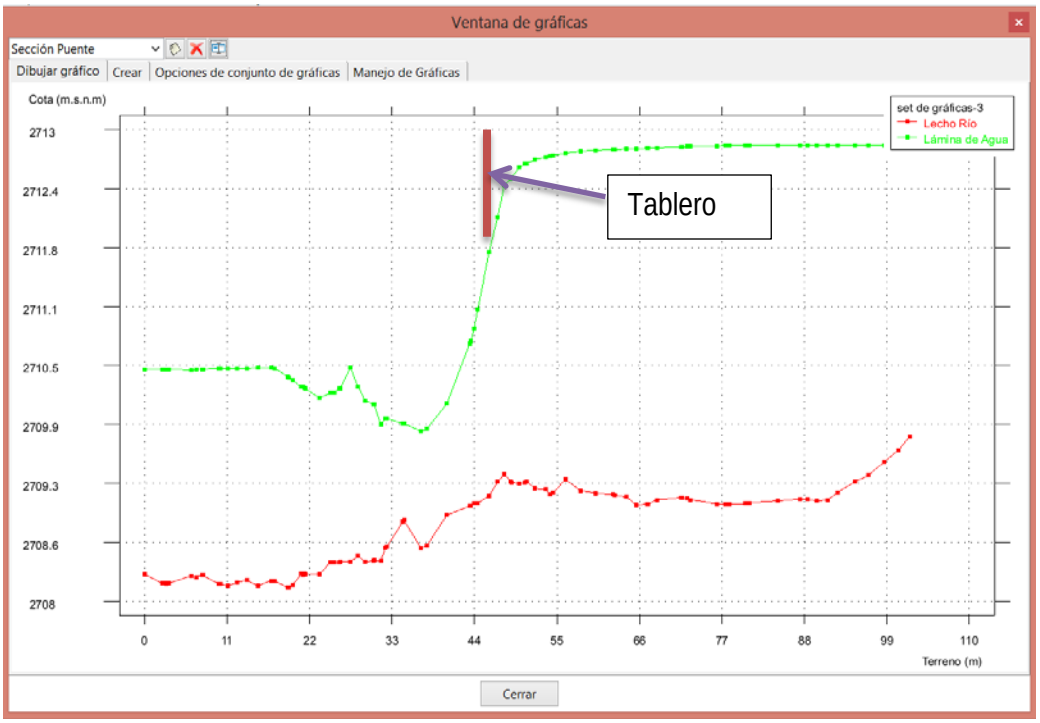
Con el fin de analizar el flujo se realiza un corte a lo largo de la estructura sobre el cauce principal, como se muestra en la Imagen 101.

Imagen 101 - Sección longitudinal a lo largo de la estructura

Fuente: Software Iber

El resultado de los máximos a su paso por la estructura se muestra en la Imagen 102

Imagen 102 - Sección longitudinal de la lámina de agua al paso por la estructura



Fuente: Software Iber

Se observa entonces que se trata de un flujo a presión bajo tablero no anegado, debido a que la lámina al entrar en contacto con la estructura se presuriza hacia aguas abajo y funciona en forma similar a la descarga bajo una compuerta, por tanto la estructura genera un remanso del flujo hacia a aguas arriba. Así entonces, aunque el flujo no sobrepasa la estructura, si provoca un remanso hacia aguas arriba, como se evidencia en el Plano 5 para la zona de la estructura.

En los resultados de la modelación se puede también observar la formación de un resalto, debido a que la restricción induce flujo supercrítico, para aguas abajo el flujo continua en régimen subcrítico.

Para la revisión hidráulica de la estructura deben tenerse en cuenta dos variables:

- Cota de aguas arriba (Z_U) en relación a la cota inferior del tablero con el fin de determinar cuando entra en carga el puente.
- La relación ($Z_D - Z_B$)/ ($Z_U - Z_B$) con el fin de definir el tipo de flujo a presión una vez el puente entra en carga (anegado, no anegado, en transición).

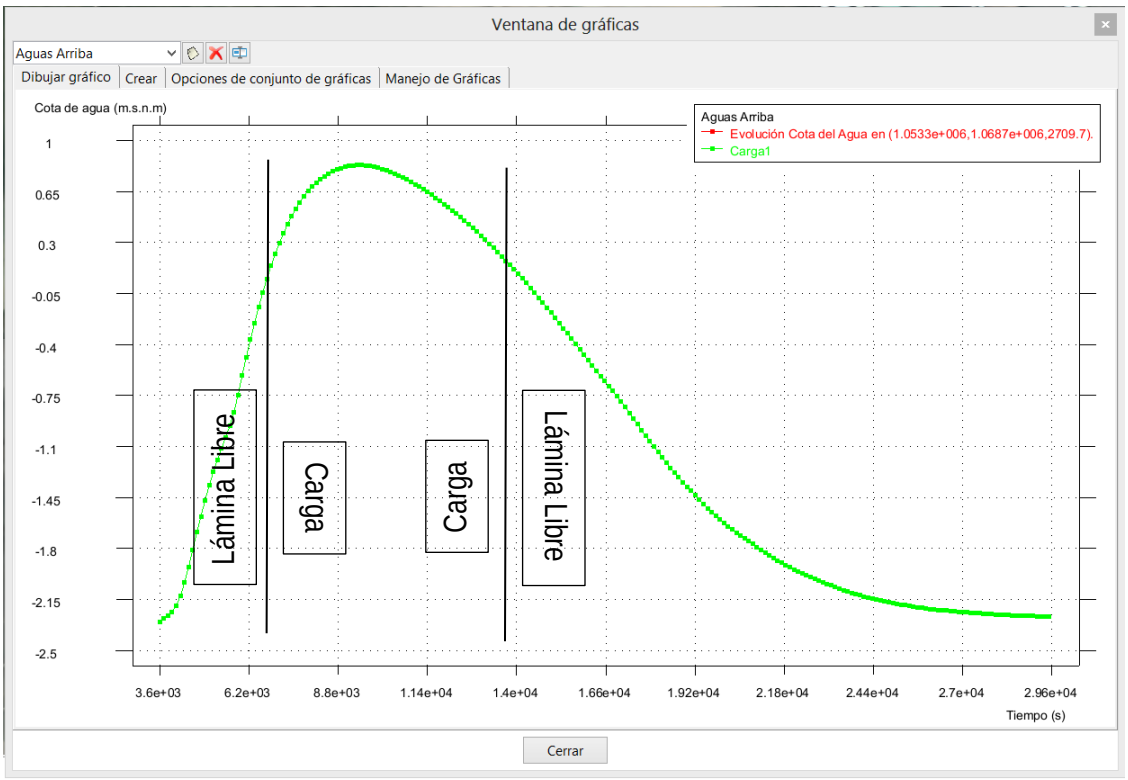
En donde

- Z_D = Cota de agua del elemento aguas abajo
- Z_B = Cota de fondo del elemento aguas abajo

Así entonces se le resta a la evolución de la cota de la lámina de agua la cota inferior del tablero correspondiente a 2712 m.s.n.m

El resultado se muestra en la Imagen 103.

Imagen 103 - Cargas sobre el puente



Fuente: Software Iber

Se concluye entonces que el puente entra en carga entre el segundo 6720 y el segundo 14280

14.1.1 Revisión del tipo del Flujo en la Estructura

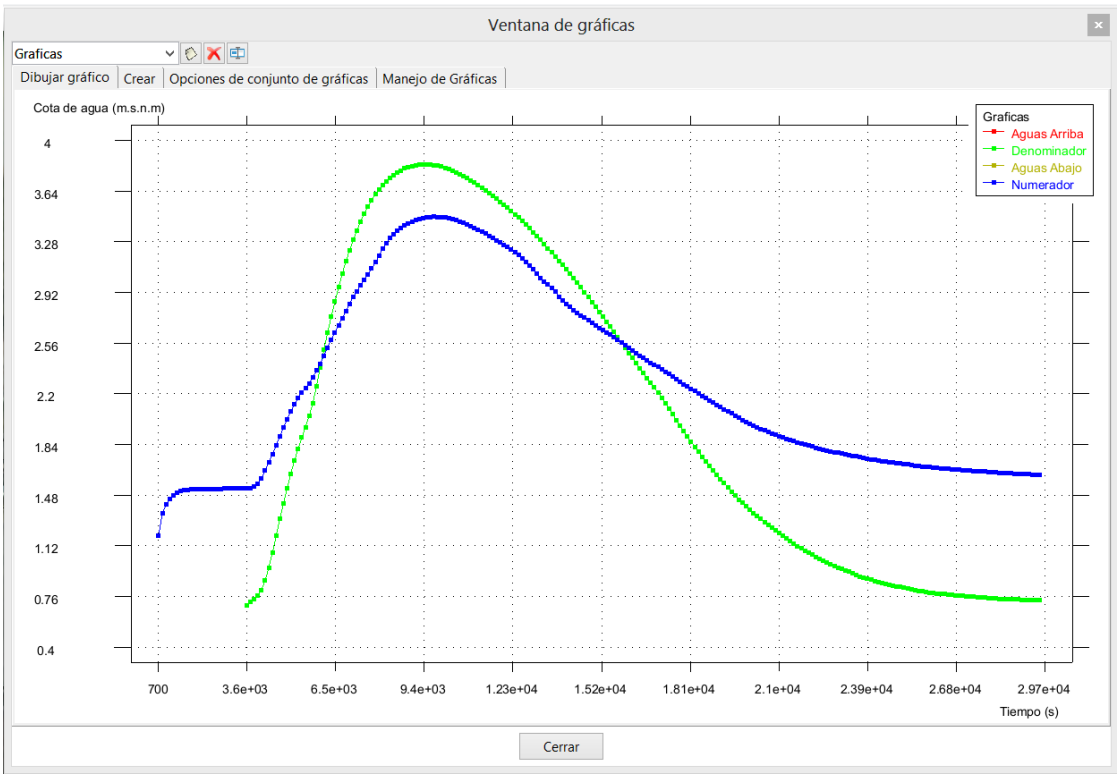
Se revisa entonces el tipo de flujo que ocurre en la estructura en el intervalo de tiempo en que entra en carga, para lo cual se revisa la relación $(Z_D - Z_B)/(Z_U - Z_B)$

Para el cálculo del numerador se realiza la resta de la lámina aguas abajo menos la cota del fondo, correspondiente a 2708.3 para aguas abajo.

Así mismo para el denominador se realiza la resta de la lámina aguas arriba menos la cota de fondo correspondiente a 2709.8 para aguas arriba

El resultado para el numerador y denominador se muestra en la Imagen 104.

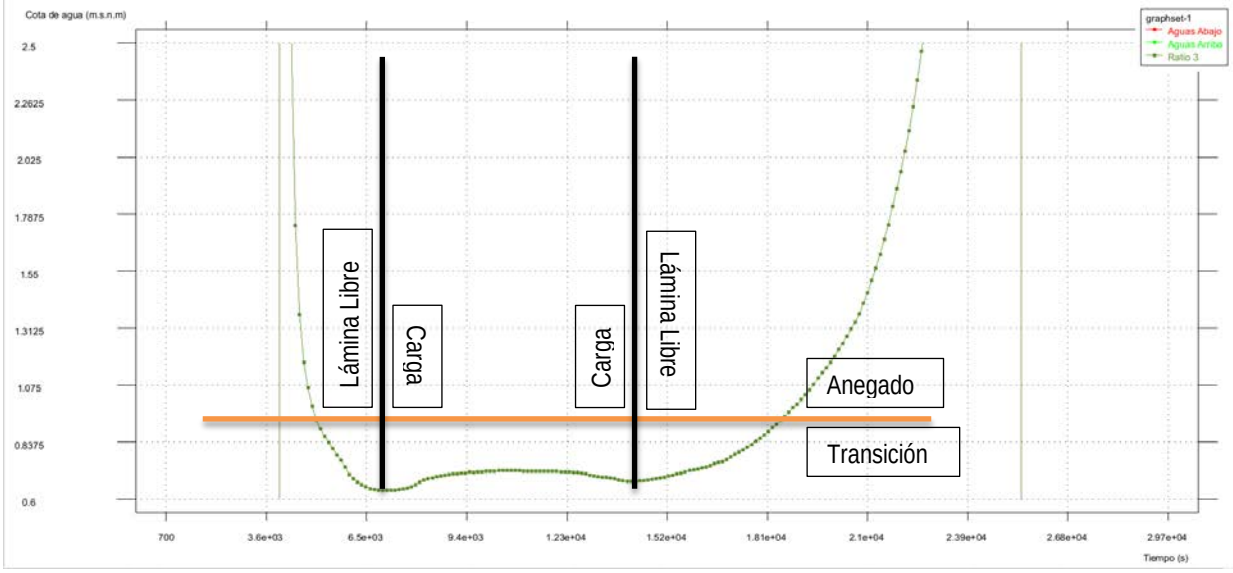
Imagen 104 - Numerador y denominador de la ecuación



Fuente: Software Iber

Habiendo calculado las gráficas correspondientes al numerador y denominador se prosigue a calcular la relación $(Z_D - Z_B)/ (Z_U - Z_B)$, en la Imagen 105 se muestra el resultado.

Imagen 105 - Determinación de los intervalos en que la estructura se encuentra con flujo anegado



Fuente: Software Iber

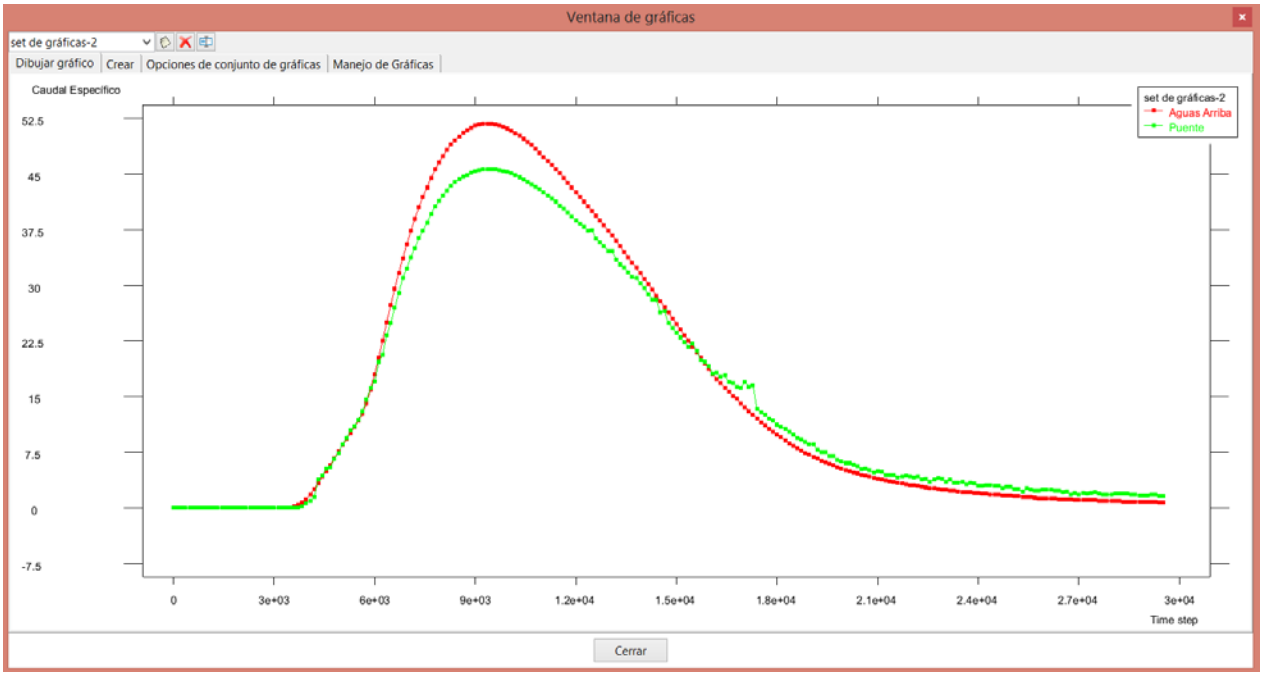
A partir de la gráfica se concluye que hay un cambio de régimen entre anegado y no anegado entre los segundos 5520 y 17400, por lo tanto una gran parte del flujo que se encuentra en carga entre los segundos 6720 y 14280 se encuentra en transición, el tiempo fuera de este rango corresponde a lámina libre en transición.

14.1.2 Análisis de los Hidrogramas Aguas Arriba y Sobre el Puente

Con el fin de revisar la afectación del hidrograma a su paso por la estructura se realizan dos secciones transversales hacia aguas arriba y sobre el puente, para posteriormente compararlas.

En la Imagen 106 se muestra la evolución del hidrograma a su paso por el puente.

Imagen 106 - Evolución del hidrograma a su paso por la estructura



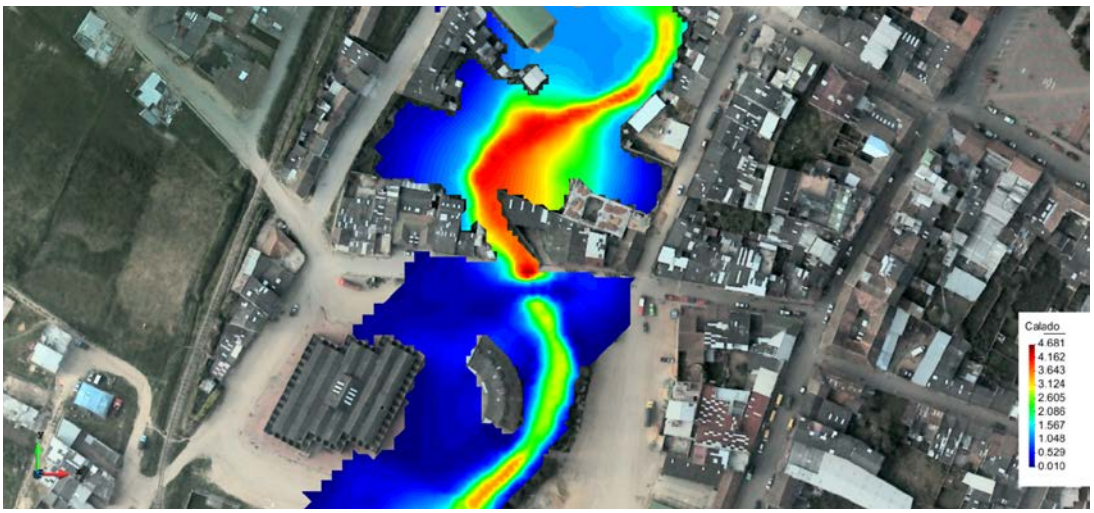
Fuente: Software Iber

La diferencia en los picos de los dos hidrogramas corresponde a la atenuación del hidrograma provocada por el remanso sobre que se generó a su paso por el puente y al paso de flujo a presión bajo el puente.

14.2 ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA No 8 CORRESPONDIENTE A UN BOX CULVERT DOBLE EN FLUJO NO PERMANENTE

Para el sitio en estudio se insertaron dos tipos de estructuras, la primera los puentes, analizados anteriormente y box culverts en las zonas de cruces de quebradas con la vía y un box culvert doble, en lo que correspondería a la estructura 8. La mancha de los máximos de la lámina de agua a lo largo del intervalo de tiempo de muestra en la Imagen 107.

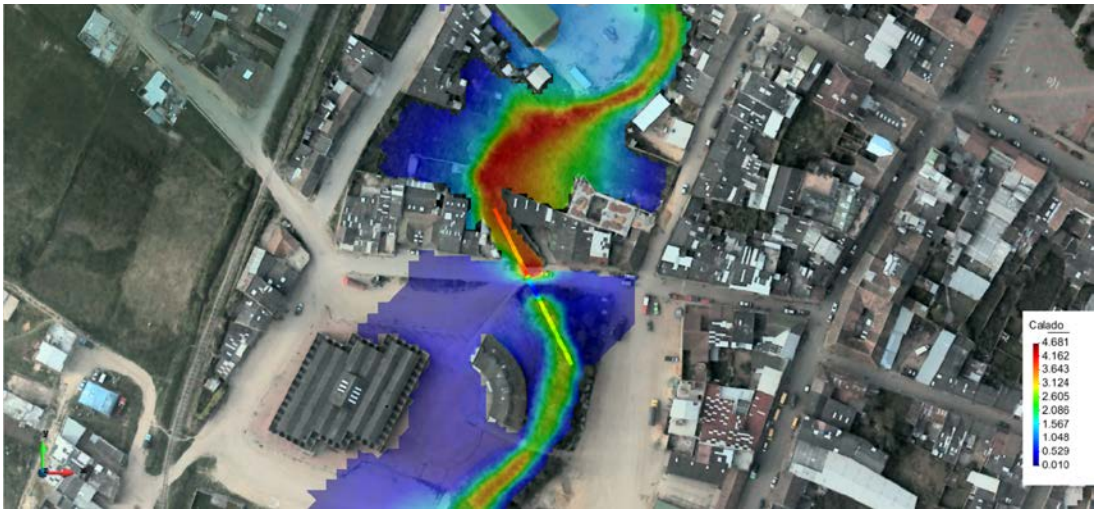
Imagen 107 - Mancha de máximos de la lámina de agua en el intervalo de simulación



Fuente: Software Iber

En este caso se observa un evidente colapso del box culvert para la creciente de un periodo de retorno de 100 años, el cual se debe principalmente a la baja capacidad de drenaje de la estructura, dado que las dimensiones de la estructura resultaron ser insuficientes, lo cual ocasiona un colapso de la misma al paso del hidrograma de crecientes. Con el fin de observar el fenómeno con mayor detalle se trazó una sección longitudinal a lo largo del río, como se muestra en la Imagen 108.

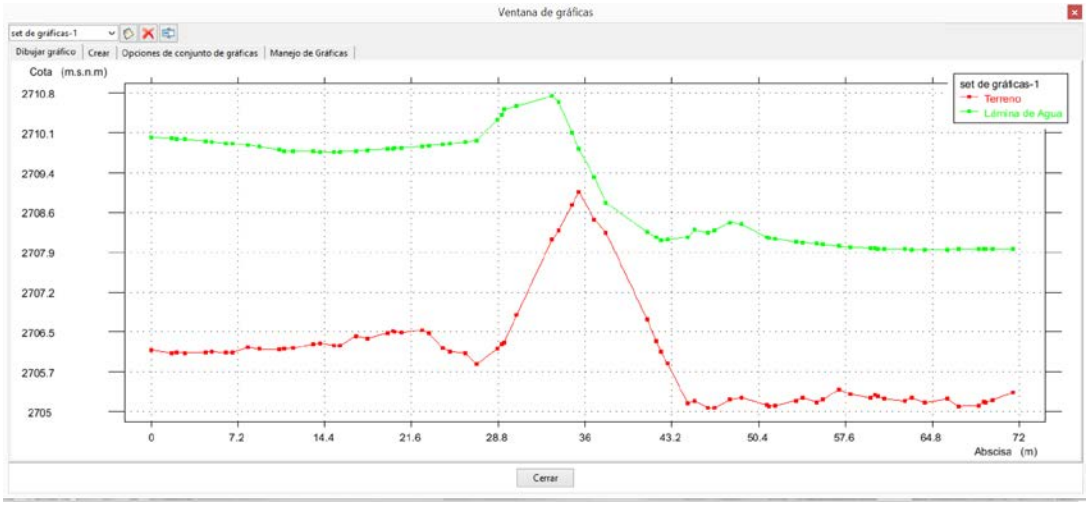
Imagen 108 - Sección longitudinal a lo largo de la estructura



Fuente: Software Iber

El resultado de la generación del perfil longitudinal se muestra en la Imagen 109.

Imagen 109 - Perfil de la lámina máxima de agua a lo largo de la estructura



Fuente: Software Iber

En este caso se observa que la capacidad de la estructura se ve sobrepasada al llegar el caudal máximo, generando con esto un remanso hacia aguas arriba, el cual se evidencia en la Imagen 109. Aguas arriba la lámina máxima de agua sobrepasa los cuatro metros de profundidad y aguas abajo la estructura se encuentra completamente sumergida, ya que la lámina de agua alcanza los 3 metros de altura. En este caso se presentan dos flujos: a presión en la estructura, y a superficie libre sobre la estructura. Para un periodo de retorno de 100 años, el agua alcanza la calzada de la vía, inundando las calles circundantes.

La estructura de paso correspondiente al Box Culvert doble presenta una gran susceptibilidad a los caudales correspondientes a periodos de retorno altos, y al colapsar puede generar remansos peligrosos hacia aguas arriba de la estructura, produciendo elevadas presiones sobre las paredes de las construcciones existentes y eventualmente su derrumbe. El colapso de la estructura provoca, por otro lado, una mayor afectación en la zona urbana del municipio al expandir la lámina de agua, causando la evacuación de las viviendas afectadas.

14.3 ANÁLISIS DE ZONAS INUNDABLES PARA FLUJO NO PERMANENTE

En los análisis para flujo no permanente resulta importante realizar las revisiones de las zonas inundables en el sitio de estudio, las cuales corresponden a puntos bajos en donde el agua tiende a estancarse después del paso de las crecientes. En el caso de estudio del municipio, para la zona urbana existe un sector de especial atención debido a la acumulación de agua después de las crecientes de altos periodos de retorno, debido a que resulta ser un punto bajo.

El punto bajo se encuentra en la carrera séptima del municipio, a una cuadra de la estación limnimétrica Villapinzón y se encuentra paralela al cauce a su paso por la zona urbana. Para la modelación realizada con el hidrograma calibrado para un pico de 100 años de periodo de retorno, se estableció una duración del hidrograma de aproximadamente 8 horas, y se revisaron las condiciones del modelo después de la creciente en los instantes finales de la simulación correspondientes a los segundos 29500.

El resultado de la zona de análisis después de la creciente de muestra en la Imagen 110.

Imagen 110 - Zona urbana inundable después del paso de la creciente TR 100 Años

Fuente: Software Iber

A partir del modelo Iber para flujo no permanente se observa que después de la creciente, en donde el río vuelve a tener el caudal base, la carrera séptima resulta ser un punto bajo dentro de la zona urbana del municipio, en donde los niveles más altos llegan a los 1.3 metros de altura, generando una presión hidrostática alta para las viviendas.

En la creciente del 13 de mayo de 2011, según testimonios de los habitantes de la zona y propietarios de viviendas en la cuadra, el nivel de agua después de la creciente llegó a los 1.4 metros, valor que se obtuvo tomando medidas desde el suelo hasta la mancha aun visible. Sin embargo el problema se agudizó al momento en que el nivel del río recobró sus niveles normales, ya que esto produjo una diferencia de presiones en las casas ubicadas entre la carrera séptima y el río, lo que provocó la rotura de puertas y ventanas, así como el arrastre de bienes muebles y enseres en las propiedades al devolverse el agua hacia el cauce. En la Fotografía 18 se muestra el estado de la carrera séptima después de la creciente del 13 de Mayo.

Fotografía 18 – Estado del punto bajo en la carrera séptima después de la creciente del 13 de mayo

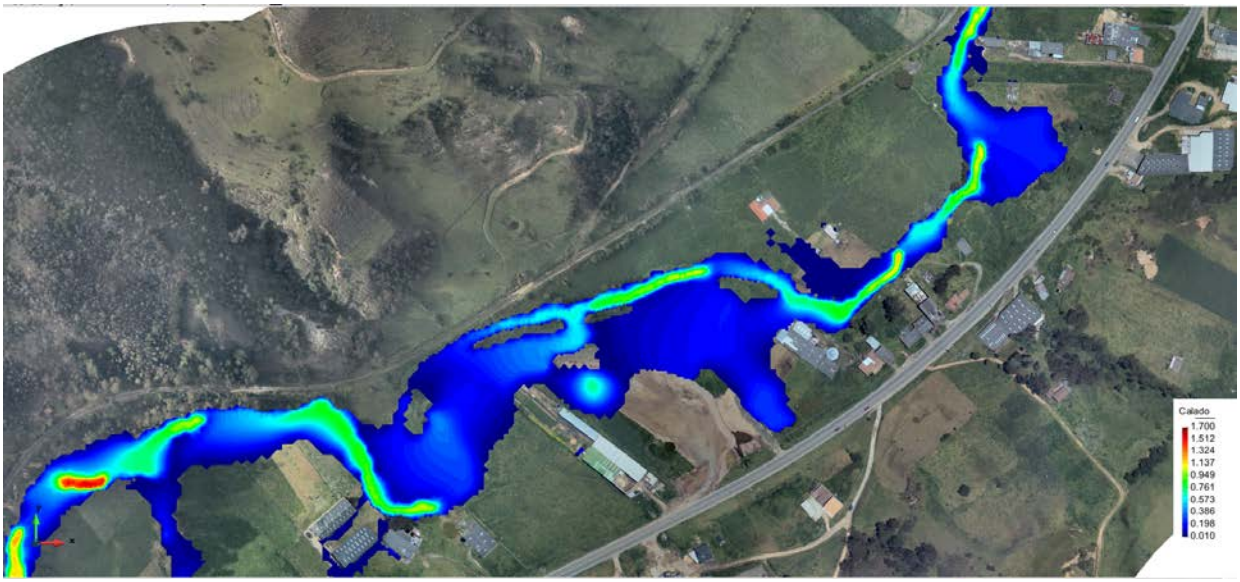
(Tomada por Ing. Abraham Salazar)

Debe prestarse especial atención al punto bajo en la zona urbana debido al estancamiento del agua y las presiones generadas al paso de la crecientes, por lo que se debe implementar un sistema adicional de alcantarillado para la evacuación del flujo producto de las crecientes de alto periodo de retorno y evitar el estancamiento del flujo en la zona.

En las zonas rurales, en donde hay presencia de pequeños sectores de inundación y reflujos, donde el flujo permanece después de la creciente. Si la capacidad de drenaje del cauce es buena, las zonas inundables no permanecerán por mucho tiempo y las zonas donde hay cultivos son

fertilizadas por el arrastre y deposición de material orgánico en los cultivos. Sin embargo si la capacidad de regulación es baja y los fenómenos lluviosos persisten por un largo tiempo, generando crecientes continuas, el agua puede permanecer estancada largos periodos de tiempo, provocando pérdidas en las cosechas y daños en las zonas de pastoreo debido a la asfixia de los pastos y demás vegetación expuesta. En la Imagen 111 se muestran las zonas rurales inundables después del paso de la creciente para el periodo de retorno de 100 años.

Imagen 111 - Estado de las zonas inundables después del paso de la creciente TR 100 Años



Fuente: Software Iber

Las zonas inundables rurales deben ser de especial atención para los análisis de riesgos económicos a los que se encuentran expuestos los cultivos en los predios, y son un buen referente para establecer las zonas de cultivos y de pastoreo, donde las pérdidas económicas son menores.

15. EVENTO HIDROLÓGICO DEL 13 DE MAYO

15.1 DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DEL FENÓMENO

En la noche del 13 de mayo de 2011 ocurrió un evento inusual en la parte alta de la cuenca del río Bogotá. El país se encontraba en plena época invernal y el suelo en la cuenca alta del río se encontraba completamente saturado. En el páramo de Guacheneque, sitio de nacimiento y parte alta de la cuenca se presentó un aguacero de más de ocho horas continuas, el cual alcanzó los 54 mm de precipitación, mucho más del máximo esperado para ésta zona, representando un evento

máximo con condiciones antecedentes de humedad completamente saturadas debido a los intensos aguaceros ocurridos en los días anteriores. Esto generó una creciente súbita en la parte alta de la cuenca del río Bogotá, y al tratarse de una cuenca de forma circular hasta la zona del municipio de Villapinzón provocó una creciente con un pico cuya elevación superó los 4.5 metros a la altura del municipio, cuando lo normal es de en promedio 1 metro. En la Fotografía 19 se muestra el nacimiento del río Bogotá.

Fotografía 19 - Nacimiento del río Bogotá, páramo de Guacheneque

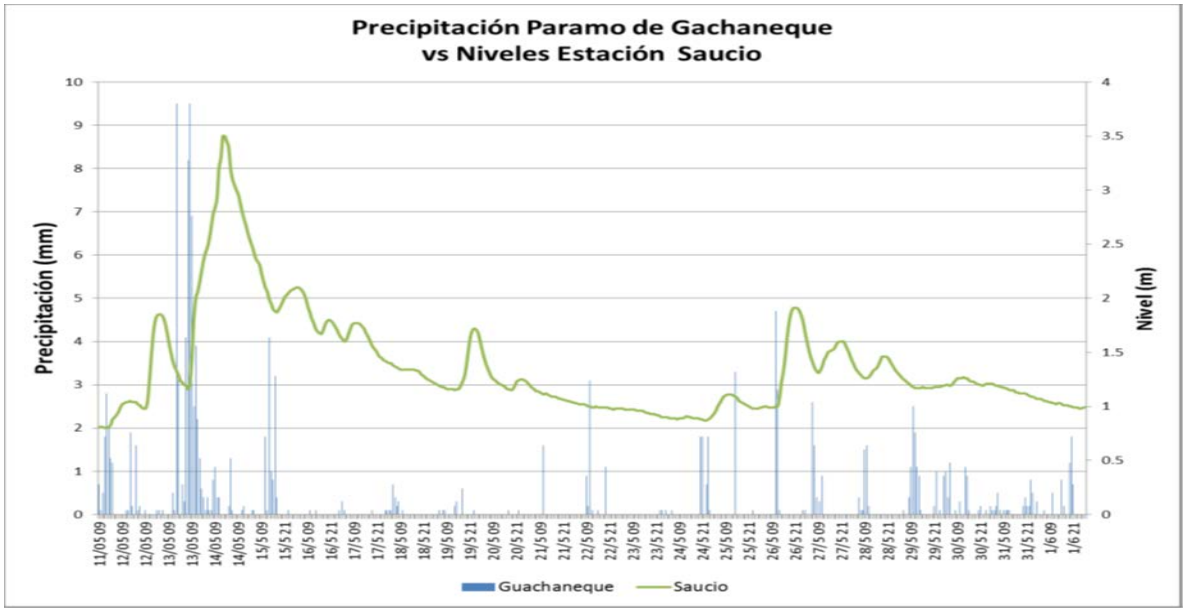
(Tomada por Ing. Abraham Salazar)

La creciente histórica provocada por el fenómeno de la niña, que fue acompañada por lluvias muy fuertes sobrepasó la capacidad hidráulica del río Bogotá, provocando que las zonas de llanura de la parte alta de la cuenca resultaran completamente inundadas provocando pérdidas de cultivos en las regiones inundables.

La estación limnigráfica Saucio, ubicada en el municipio de Chocontá registró este evento el 14 de mayo llegada la 1 de la tarde, con un pico de 68.14 m^3/s. Según el registro histórico para esta estación el único caudal pico que llegó a ser similar al del 14 de mayo ocurrió en el año 1976 con un caudal pico de 64.18 m^3/s, por lo que la primera estimación del periodo de retorno del evento es de 35 años.

Al realizarse la comparación de la precipitación registrada por la estación Automática Guacheneque contra el hidrograma de crecientes registrado por la estación LG Saucio se observa como el aguacero ocurrido durante la noche del 13 de Mayo produjo una creciente de gran magnitud aguas abajo en cercanías al municipio de Chocontá, donde hay una alta presencia de llanuras de inundación. En la Imagen 112 se observan las lluvias intensas ocurridas en la noche del 13 de mayo y los niveles registrados el 14 de mayo en la estación Saucio.

Imagen 112 - Registros de las estaciones Climatológica Guacheneque y Limnigráfica Saucio



En la Fotografía 20 se muestran las zonas inundables al paso por la estación LG Saucio

Fotografía 20 - Zona inundable estación Saucio

(Tomada por Ing. Abraham Salazar)

Al tener una pendiente baja, la parte alta de la cuenca del río Bogotá resulta ser muy susceptible a eventos de este tipo, al no poseer la suficiente capacidad hidráulica para evacuar las creciente provocadas por los fenómenos históricos.

La zona del municipio de Villapinzón es muy activa económicamente, por lo que la creciente provocó pérdidas en cultivos como papa y flores, así como la ganadería se vio fuertemente afectada al inundarse las zonas de pastoreo. Las curtiembres, que resulta ser una actividad económica de alto impacto en el municipio resultaron fuertemente afectadas al inundarse las bodegas de almacenamiento. Así mismo la zona a la entrada y a la salida de la población resultó ser muy susceptible a inundaciones debido a la alta presencia de llanuras de inundación, como se muestra en la Fotografía 21.

Fotografía 21 – Llanuras inundables zona norte del municipio de Villapinzón

(Tomada por Ing. Abraham Salazar)

15.2 CONSECUENCIAS DIRECTAS DEL EVENTO HIDROLÓGICO DEL 13 DE MAYO SOBRE EL MUNICIPIO DE VILLAPINZÓN

La creciente súbita generada por el evento del 13 de mayo provocó daños graves en la población. El municipio quedó sin el servicio de agua y amenazó a más de 7 mil personas con una emergencia sanitaria. Causó daños en 180 viviendas y destruyó otras 20 más, provocando la afectación y desplazamiento de 200 familias a lo que corresponde un total de 910 personas. Así mismo resultaron afectados vehículos y buena parte de la infraestructura sufrió daños severos.

En la Fotografía 22 se muestra el colapso del talud de la vía en la zona urbana del municipio, en cercanías de la estación limnimétrica Villapinzón.

Fotografía 22 - Colapso del talud de la vía en la zona urbana del municipio

(Tomada por Ing. Abraham Salazar)

- Transporte de Material y Obstrucción del Cauce

Así mismo la creciente transportó y depositó gran cantidad de material en las zonas inundables del municipio. La afectación más grande se dio en las casas construidas junto a la ribera del río, ya que al no haber un esquema de ordenamiento territorial del municipio los linderos de los predios eran dados hasta el centro del río, provocando la invasión de la ronda hidráulica del río y exponiendo a los habitantes a grandes riesgos por las inundaciones repentinas del río Bogotá.

La creciente provocó también el colapso de muros de cerramiento de lotes y casas. Al presentarse repentinamente no dio tiempo a la población de evacuar sus bienes muebles y mercancía almacenada en bodegas, haciendo que se perdieran grandes cantidades de alimentos y enseres.

En la Fotografía 23 se muestran las afectaciones provocadas por la creciente del 13 de mayo.

Fotografía 23 - Afectaciones provocadas por la creciente del 13 de mayo.

(Tomada por Ing. Abraham Salazar)

- Altos Niveles del Río

La creciente que ocurrió el 13 de mayo alcanzó niveles extraordinarios provocando el desplazamiento de gran cantidad de familias. El río reclamó el terreno ocupado y causó graves daños. En la Fotografía 24 se muestra el estado del río después de la creciente en donde se observa que el nivel sigue aún alto.

Fotografía 24 - Estado del río después de la creciente del 13 de mayo.

(Tomada por Ing. Abraham Salazar)

- Estancamiento en los Puntos Bajos

Una de las afectaciones más graves que provocó la creciente en el área urbana fue la inundación de sobre la carrera séptima, en donde el agua alcanzó niveles cercanos a los 1.5 metros sobre la rasante de la vía, y en donde al ser una zona con un punto bajo, colapsó el sistema de alcantarillado pluvial y el agua se empozó para cuando empezó a bajar la creciente. Sin embargo al bajar la creciente provocó la rotura de puertas y ventanas debido a la acción de la presión hidrostática. Esto causó la pérdida de bienes materiales en las casas pertenecientes a esta cuadra al quedar expuestos los bienes al transporte por el agua acumulada en esta zona. En la se muestra la carrera séptima el día después de la creciente.

Fotografía 25 - Estado de la carrera séptima después de la creciente

(Tomada por Ing. Abraham Salazar)

- Elevadas Presiones Sobre los Muros de las Construcciones

El efecto de la presión hidrostática sobre las construcciones fue devastador al no estar preparados los muros de las construcciones para resistir presiones para láminas de agua superiores a los 4 metros, esto sumado a la velocidad del agua causó el colapso de gran cantidad de muros de edificaciones. En la Fotografía 26 se muestran los efectos de las altas presiones sobre muros de ladrillo.

Fotografía 26 - Efectos de las altas presiones sobre los muros de las construcciones

(Tomada por Ing. Abraham Salazar)

- Saturación del Suelo

Un efecto colateral de las crecientes es la saturación de los taludes laterales del cauce, los cuales generalmente son estables en condiciones secas, sin embargo al presentarse temporadas invernales y con la presencia continua de crecientes el suelo se in estabiliza debido al peso propio del agua, provocando situaciones de colapso de los taludes, afectando el área hidráulica del río y provocando reducciones y aumentos en la velocidad a lo largo del cauce. En la Fotografía 27 se muestra el colapso de un talud sobre el río provocado por la saturación del terreno.

Fotografía 27 - Colapso del talud al paso del río

(Tomada por Ing. Abraham Salazar)

- Daño en la Infraestructura

La saturación provocada por la creciente y por consiguiente inestabilización de los taludes al paso del cauce, provocó una afectación directa en la economía regional, al presentarse afectaciones serias en la infraestructura férrea al paso del municipio y en general al paso por las zonas inundables, provocando consecuencias económicas a nivel regional.

Fotografía 28 - Daño en la infraestructura férrea

(Tomada por Ing. Abraham Salazar)

15.3 ESTIMACIÓN Y MODELACIÓN HIDROLÓGICA DEL EVENTO DEL 13 DE MAYO

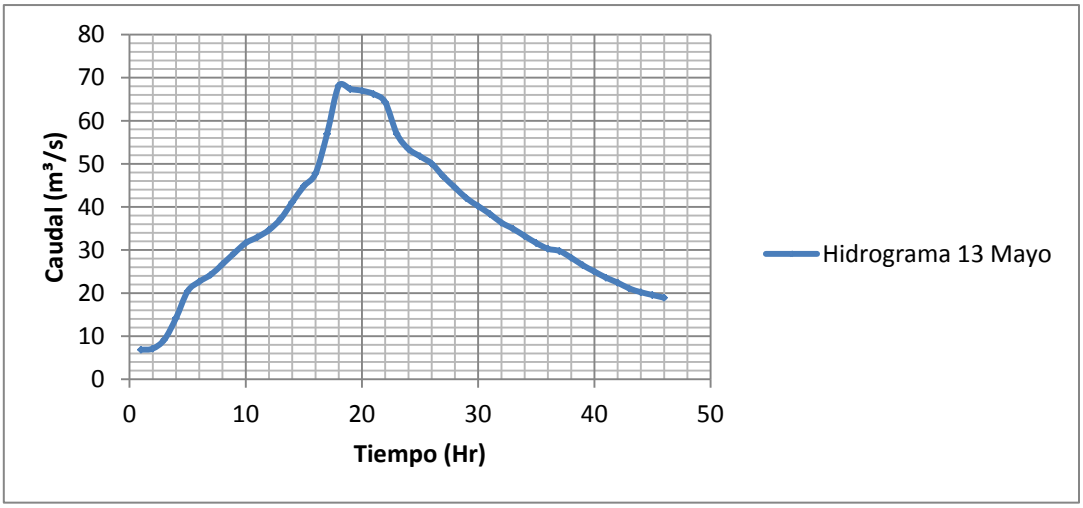
Se realizará una aproximación para el evento del 13 de mayo para flujo permanente con el fin de establecer la mancha inundable para los modelos hidráulicos 1D y 2D, con el fin de verificar la mancha real con la de los modelos hidráulicos y establecer cual resulta ser más aproximado al caso real.

15.3.1 Hidrograma Registrado en la Estación LG Saucio

La creciente repentina, que ocurrió en la noche del 13 de mayo provocó la evacuación de gran parte de la población del municipio de Villapinzón. La estación LM Villapinzón al ser manejada por un observador no logró registrar esta creciente a su paso por el municipio, debido a que la creciente rebasó el puente y por ende inundó toda la calle. Aun así si se hubiera tomado lectura del evento, no sería confiable debido a que la curva de calibración de la estación se encuentra generada únicamente para la sección transversal bajo el puente, pero la creciente lo rebasó, por lo que no se tiene registro del evento ni del hidrograma de este día para la estación.

La estación LG Saucio, ubicada en el municipio de Chocontá sí logró registrar este evento al día siguiente, en donde el pico ocurrió entrada la 1 de la tarde con un caudal de 68.14 m^3/s. El hidrograma registrado por esta estación se muestra en la Imagen 113.

Imagen 113 - Hidrograma registrado por la estación Limnigráfica Saucio



Fuente: Estación Saucio

Para este hidrograma se registró un volumen de 5'928.714,14 m^3.

15.3.2 Análisis del Caudal Pico para las Distribuciones de Frecuencia de la Estación LG Saucio

La calibración de los modelos hidrológicos para diferentes periodos de retorno se realizó para los caudales pico de los ajustes probabilísticos para la estación LG Saucio. Del mismo modo se utilizó el pico del hidrograma medido para establecer a qué periodo de retorno corresponde el pico de la creciente producida por la creciente del 13 de Mayo de 2011.

Realizando ajustes probabilísticos para la distribución Log-Pearson III la cual resultó ser la que mejor ajustó para la estación, se utilizó la misma distribución para estimar periodo de retorno para el caudal pico de la creciente. Realizando un proceso inverso se determinó que el periodo de retorno para el pico de la creciente fue de 43 años, dato que resulta ser acertado partiendo del hecho de que la creciente histórica de similar magnitud ocurrió en el año de 1976 con un caudal pico de 64.18 m^3/s y ocurrió en un lapso de 35 años. En la Tabla 2 se muestra el cálculo del periodo de retorno del pico de la creciente del 13 de mayo.

Revisando la congruencia de este hecho respecto a los ajustes probabilísticos y a las crecientes históricas registradas por la estación LG Saucio se establece el periodo de retorno de la creciente aproximado de 45 años.

15.3.3 Generación del Modelo Lluvia Escorrentía para el Evento del 13 de Mayo

Para la generación del modelo lluvia escorrentía se revisaron los registros de las lluvias máximas y diarias ocurridas en el mes de mayo de 2011, como se muestra en el Anexo B, Capítulo 1.7. Con base a la información se produjeron las curvas Iso-13Mayo, del modo descrito en el Anexo B, Capítulo 2.5 las cuales se muestran en el Plano 21 y Plano 22.

Una vez generadas las curvas Iso-13Mayo se calcularon las precipitaciones medias para las subcuencas de la manera explicada en el Anexo B, Capítulo 1.8.4.2. Con esto se obtuvo la Tabla 3 (Hoja 1 a Hoja 4), donde se muestra el resumen de las precipitaciones medias de las para el evento del 13 de mayo.

Con las precipitaciones medias para cada subcuenca se generarán los hietogramas del evento. Se realizó una distribución del tipo bloque alterno debido a que el comportamiento del hietograma que se muestra en la Imagen 112 refleja con similaridad este comportamiento, donde se observa el evento registrado en la estación automática Guacheneque, y asegurando que la suma de los pulsos del hietograma corresponda al total de las precipitaciones medias calculadas para cada subcuenca.

Los hietogramas generados se distribuyeron temporalmente en 3, 9, 18 y 24 horas con el fin de observar la influencia en los picos de los hidrogramas del modelo y concluyendo que la distribución que más se ajusta temporalmente es la de 24 horas, produciendo los resultados más cercanos al

pico del hidrograma registrado por las estación Saucio. En la Tabla 4 se muestra la distribución temporal de la lluvia a aplicar al modelo lluvia escorrentía para la modelación del evento.

15.3.3.1 Estimación del CN Para el Evento

Debido a la singularidad de este evento, en donde las condiciones para las cuales ocurrió la creciente fueron únicas, la estimación del CN debe realizarse con base en las precipitaciones brutas y efectivas medidas para el evento.

Se calculó la precipitación media para toda la cuenca utilizando la fórmula:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(A_i . P_i)}{\sum_{i=1}^{n} A_i}$$

En Donde:

n: Número de subcuencas.
Pi: Precipitación media en 24 horas para la subcuenca de cálculo.
Ai: Área de influencia correspondiente a la subcuenca de cálculo.

El cálculo de la precipitación media para la cuenca hasta la estación LG Saucio se muestra en la Tabla 5, para el cual se obtuvo que la precipitación media fue de 37 mm, siendo esta la precipitación bruta en la cuenca.

El cálculo de la precipitación efectiva se realizó con base al hidrograma registrado para el evento, para el cual se calculó el volumen total y se dividió sobre el área total de la cuenca. El cálculo de la precipitación efectiva registrada para el evento se muestra en la Tabla 6. Se obtuvo que la precipitación efectiva para la zona de estudio fue de 22.9 mm.

Se utilizó el cálculo de la precipitación efectiva mediante la metodología de SCS (1972) para calcular la infiltración potencial (S), mediante la siguiente fórmula:

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}$$

Dónde:

P_e: Precipitación efectiva en pulgadas.

P: Precipitación total del evento, pulgadas.

S: Infiltración potencial ó retención potencial máxima, pulgadas.

Así entonces se obtuvo que la infiltración potencial (S) para la cuenca en estudio fue de 0.63. Habiendo calculado la infiltración potencial se calcula el CN promedio para la cuenca utilizando la siguiente fórmula:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

Dónde:

CN: Curva número.

S: Infiltración potencial ó retención potencial máxima, pulgadas.

Se obtuvo que el valor del CN para la cuenca hasta la estación LG Saucio fue de 94.07, correspondiendo a condiciones antecedentes saturadas del terreno en donde gran parte de la precipitación fue transformada a escorrentía.

15.3.3.2 Resultados del Modelo Sin Calibrar

La asignación del CN al modelo se realizó partiendo del CN calibrado para un periodo de retorno de 50 años mediante los ajustes probabilísticos para los diferentes periodos de retorno, ya que los hietogramas de lluvia generados resultaban ser similares a los calculados para un periodo de retorno de 50 años, cuya sumatoria de pulsos era muy similar a la lluvia total registrada para el día. Se utilizó la siguiente fórmula para el cálculo de los CN para un TR50 en la cuenca mediante la siguiente fórmula

$$\overline{CN} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(A_i . CN_i)}{\sum_{i=1}^{n} A_i}$$

En Donde:

n: Número de subcuencas.

CN_i: CN calibrado para un periodo de retorno de 50 años según ajustes probabilísticos.

A_i : Área de influencia correspondiente a la subcuenca de cálculo.

$\overline{CN}$: Valor de CN ponderado para toda la cuenca.

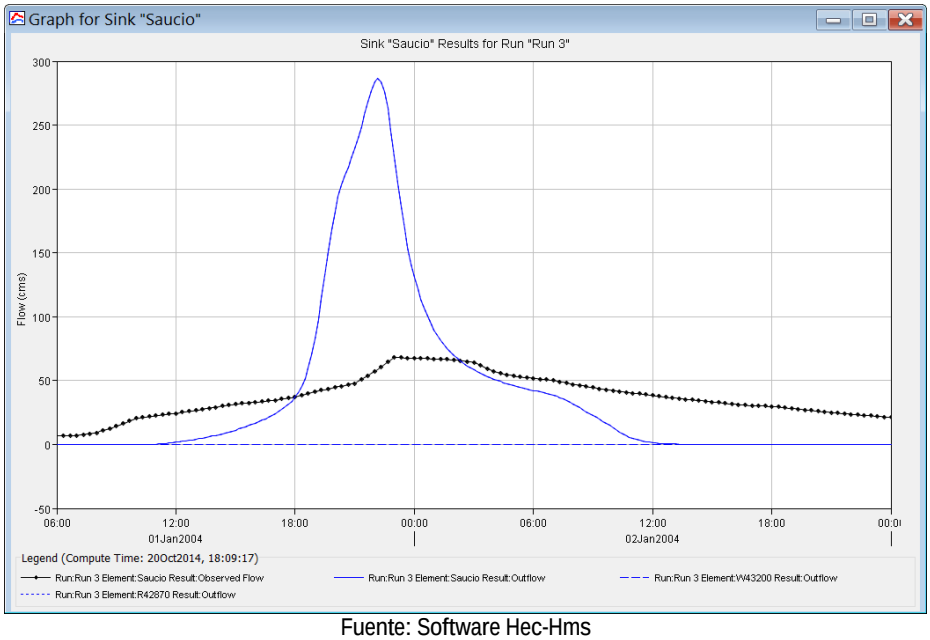
El cálculo del valor de $\overline{CN}$ para toda la cuenca se muestra en la Tabla 7, para la cual se obtuvo un valor de 86.10. Con este valor se calculó el factor de ajuste para los CN para el TR de 50 años de la siguiente manera:

$$F = \frac{94.07}{86.10} = 1.09$$

Este factor F fue multiplicado por el CN para el TR de 50 años de cada subcuenca, obteniendo el valor de los CN ajustados para las condiciones del suelo del evento hidrológico del 13 de mayo. El resultado final de los CN ajustados para el evento se muestra en la Tabla 7.

Una vez ajustados los CN y ajustadas las precipitaciones para el evento se procede a ejecutar el modelo lluvia escorrentía mediante el modelo Hec-Hms. En la Imagen 114 se muestra el hidrograma a la salida Vs hidrograma registrado en la estación Saucio para el día del evento.

Imagen 114 - Hidrograma de salida vs hidrograma registrado para el evento

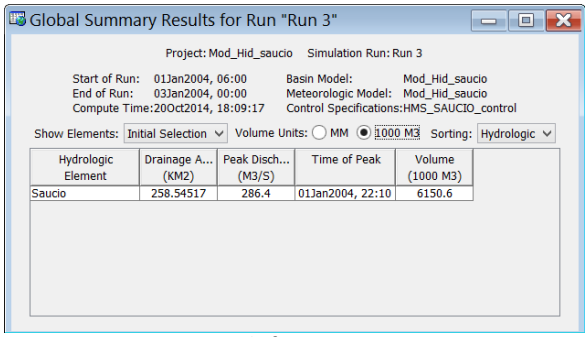


Fuente: Software Hec-Hms

Se observa que el evento modelado tiene un pico de 286.4 m³/s presentando una diferencia de 218.26 m³/s respecto a la creciente registrada por la estación. Sin embargo el volumen del

hidrograma que registró la estación fue de 5'930.000 m^3 y el volumen de escorrentía calculado mediante el modelo fue de 6'150.000 m^3 teniendo una diferencia de sólo 220.000 m^3, aceptable para las escorrentías totales estimadas. Por lo que se debe realizar una calibración respecto al pico del evento y del modelo. En la Imagen 115 se muestran los valores obtenidos de la modelación para la estación Saucio.

Imagen 115 - Valores obtenidos de la modelación hasta la estación Limnigráfica Saucio



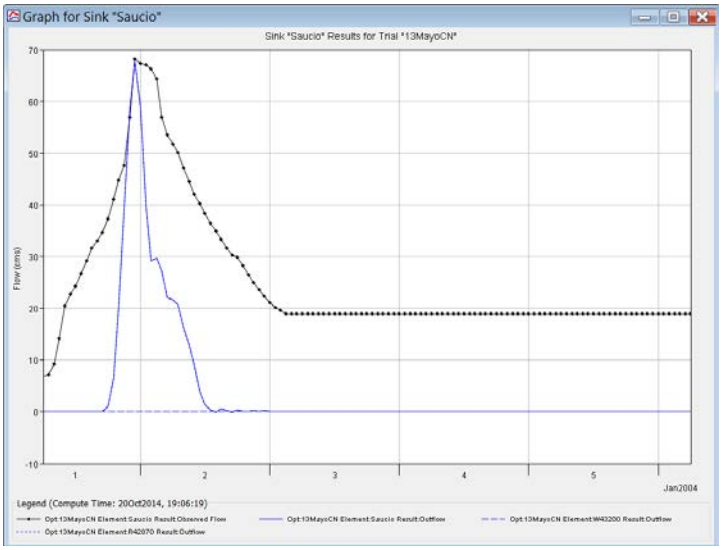
Fuente: Software Hec-Hms

15.3.3.3 Calibración del Modelo Hidrológico

Se determinaron los valores mediante el módulo de optimización del modelo Hec-Hms para los parámetros K, X, TC, NT (Número de Tramos). Las calibraciones resultaron en ligeras atenuaciones del pico, que no son significativas. Teniendo en cuenta que los modelos hidráulicos para la estimación de las manchas de inundación y niveles del evento del 13 de mayo se transitarán en régimen permanente, no es necesario conocer el hidrograma de la creciente en el sitio de proyecto, sino únicamente el pico.

Se realizó la calibración de los CN respecto a los pico del modelo y de la creciente, esto implicará que los volúmenes de los hidrogramas de los modelos para la estación LG Saucio y para el sitio de proyecto serán menores a los reales. El resultado de la calibración se muestra en la Imagen 116.

Imagen 116 - Resultado de la calibración utilizando CN Para la estación Saucio

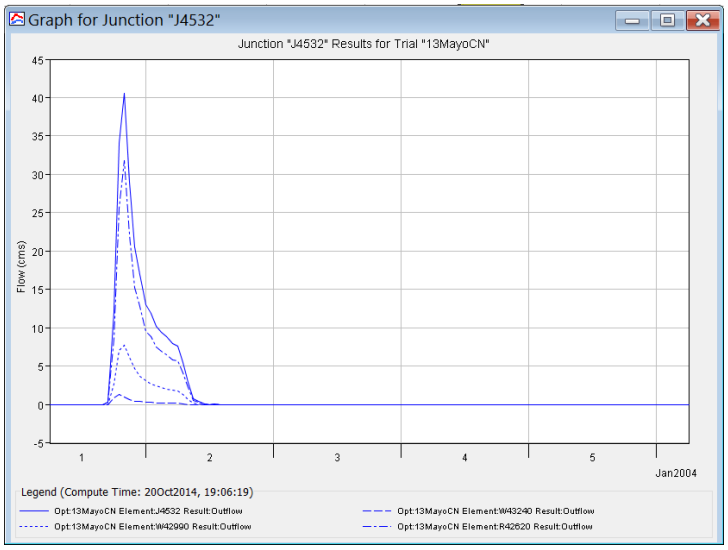


Fuente: Software Hec-Hms

El resultado de la calibración mediante CN para los picos del modelo y del evento es un pico de 67.8 m^3/s, que respecto al de 68.14 m^3/s registrado por la estación LG Saucio, representa una diferencia de 0.34 m^3/s lo cual es aceptable.

Con esta calibración se revisa el pico del hidrograma para el sitio de proyecto. El hidrograma para el sitio de proyecto se muestra en la Imagen 117.

Imagen 117 - Hidrograma calibrado para el sitio de proyecto



Fuente: Software Hec-Hms

Analizando el pico del hidrograma en la zona de proyecto se encuentra que el pico para el evento del 13 de mayo es de 40.6 m^3/s. Sin embargo se debe considerar un flujo base en el cauce

correspondiente a las condiciones antecedentes de lluvia, ya que el evento se presentó en plena época invernal. La determinación del flujo base se realizó haciendo una revisión de los caudales el día antes de la creciente histórica, los cuales resultan ser confiables al no haber sido caudales máximos. El registro diario de caudales para el año 2011 del día 12 de mayo indica que el caudal medio diario es de 2.6 m^3/s.

A partir de la calibración del evento histórico del 13 de Mayo de 2011 para el sitio de proyecto se definió entonces un caudal pico de 43.2 m^3/s. Con base en este caudal se estimarán las manchas generadas por los modelos hidráulicos Iber y Hec-Ras y se compararán respecto a la mancha producida por el evento.

En el Anexo K se muestra el modelo hidrológico para el evento del 13 de mayo.

15.4 ESTIMACIÓN Y MODELACIÓN HIDRAULICA DEL EVENTO DEL 13 DE MAYO

Con el modelo lluvia escorrentía calibrado únicamente para el pico de la creciente que registró la estación LG Saucio, se revisó el caudal pico para la zona correspondiente al sitio de proyecto. Debido a que el objetivo es analizar las manchas de inundación generadas por los dos modelos para el evento, se ejecutarán los modelos unidimensional y bidimensional en régimen permanente para el caudal pico anteriormente estimado de 43.2 m^3/s.

Con los modelos ejecutados se produjeron los resultados en formato raster, para su posterior análisis y superposición de manchas en el software ArcGis.

Los resultados de las manchas de inundación para el evento del 13 de mayo del modelo Hec-Ras se muestran en el Plano 23 y los de Iber en el Plano 24.

La comparación de resultados de las manchas de inundación para los dos modelos se muestra en el Plano 25.

15.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS

Con base en los resultados de las manchas de inundación, del plano de inundación de la zona urbana generado para el municipio de Villapinzón y de testimonios de personas, quienes vivieron el evento, se realizaron análisis de las manchas de inundación principalmente para la zona urbana, donde se realizó el mapa y se recopilaron la mayoría de testimonios.

Es de recalcarse que el modelo Iber resulta más apropiado para las zonas urbanas, debido a que trabaja mediante celdas, lo que permite subdividir el flujo. En el caso del Hec-Ras, como se había

comentado anteriormente, cuando ocurre una subdivisión del flujo, como en el caso de las calles que hacen parte de la red urbana, se debe generar una subdivisión a manera de brazo paralelo por el cual se desvía el flujo y se debe asignar el flujo para este brazo. Esto genera grandes complicaciones al analizar efectos de las crecientes en las zonas urbanas en una red compuesta por calles y carreras. Por otro lado al generarse las manchas de inundación, se realiza una extrapolación hasta el cruce con la topografía en un modelo se superficie, como se había explicado anteriormente. Esto junto a otras limitaciones propias de los modelos 1D es una ventaja directa del modelo Iber sobre el Hec-Ras en el caso de estudios de inundación de la zona urbana.

Carrera 4 entre calles 13 y 11

Al momento de la creciente la primera zona en la que se presentaron afectaciones en el casco urbano de la población fue en la carrera 4 entre calles 13 y 11, en donde el desbordamiento del río hacia la calzada provocó que el agua se desviara paralelamente a lo largo de la vía alcanzando niveles cercanos a los 40 centímetros. Así mismo la acción de la velocidad junto con la saturación del terreno provocó inestabilidad del talud del río, generando el colapso del mismo en esta zona. Las manchas producidas por estos modelos se muestran para esta zona en las Imagen 118 e Imagen 119.

Imagen 118 - Resultado de la mancha en la zona de colapso de talud modelo Iber

Fuente: Software Iber

Imagen 119 - Resultado de la mancha en la zona de colapso de talud modelo Hec-Ras

Fuente: Software Hec-Ras

En este caso se observa que en el modelo Hec-Ras la inundación no alcanza significativamente la calzada de la vía, mientras que en el modelo Iber el desbordamiento ocurre precisamente en la zona donde colapsó el talud, que corresponde a un punto bajo, y muestra la invasión del cauce a la calzada de la vía, hecho que ocurrió en el caso de la creciente de mayo de 2011, Por consiguiente el modelo Iber reproduce mejor la situación observada.

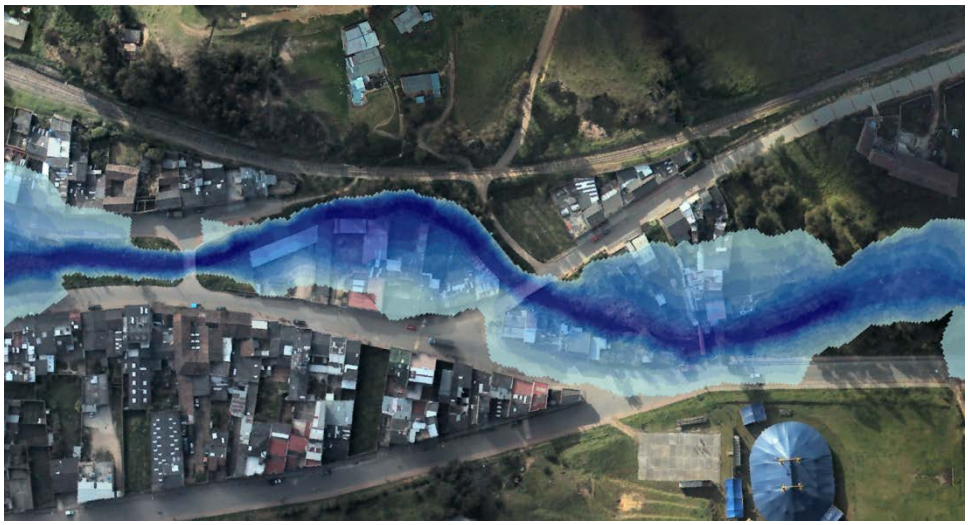
Carrera 5 entre Calles 6 y 7

Una vez bifurcada la creciente a lo largo de la carrera 4 y del cauce natural, el flujo continuó por inercia a lo largo de la vía paralela y del cauce hasta llegar a la carrera 5, entre calles 6 y 7, donde el flujo se subdividió debido a la presencia de las construcciones de la zona urbana, por lo tanto se generó un canal artificial por donde se desvió una parte del flujo. Esta situación se estudió en flujo no permanente para un periodo de retorno de 100 años, como se mostró en el Capítulo 13.1, en donde el hidrograma presentó una subdivisión debido a la presencia del canal artificial. En el caso del modelo Hec-Ras, aunque se generara la subdivisión del flujo, debe asignarse un caudal para el afluente, lo cual puede resultar complejo de estimar. Para el evento del 13 de mayo el flujo se subdividió y pasó gran parte por esta zona alcanzando láminas de aproximadamente 50 centímetros, según relatos de habitantes de la zona, que viven en esta calle. En la Imagen 120 e Imagen 121 se muestran las manchas de inundación de los modelos al paso por la carrera 5.

Imagen 120 – Paso del flujo entre el cauce y la carrera 5 modelo Iber

Fuente: Software Iber

Imagen 121 - Paso del flujo entre el cauce y la carrera 5 modelo Hec-Ras



Fuente: Software Hec-Ras

El modelo Hec-Ras, como se había comentado anteriormente, tiene la limitación de la subdivisión del flujo en las zonas urbanas, limitando el análisis de riesgos para las zonas urbanas. El resultado de la lámina en el modelo Iber para la zona del flujo paralelo fue de 60 cms en promedio, muy cercana al flujo real de la creciente.

Carrera 5 y Carrera 7, entre Calles 5 y 6

Esta zona resultó ser una de las más afectadas por el paso de la creciente. Teniendo en cuenta que la carrera 5 en la dirección del flujo aumenta su cota, se genera un retorno del flujo al cauce y se aumenta el nivel en esta zona. Las casas ubicadas entre la carrera 5 y carrera 7 resultaron ser las más afectadas debido a que por un lado estaba el cauce cuyo nivel aumentó debido al retorno de las aguas que pasaban paralelamente por la calle y por otro lado la carrera 7 corresponde a un punto bajo, haciendo que inicialmente los niveles sean muy altos, y después del paso de la creciente el agua se estanque, produciendo diferencias significativas de presiones sobre las paredes, puertas y ventanas de los predios de esta zona. Esta situación se analizó previamente en el Capítulo 11.2.1 correspondiente al análisis de las zonas inundables en flujo no permanente.

En el caso de la creciente presentada en el año 2011 se presentó la situación anteriormente descrita, en donde al paso de la creciente y por ser un punto bajo, la carrera 7 se convirtió en un estanque después del paso de la creciente. Los niveles que alcanzó el agua luego de la creciente según los dueños de los predios fue de 1.4 metros, provocando altas presiones sobre los elementos de los predios, una vez disminuyó la creciente. Las presiones altas sobre las puertas y ventanas de las casa provocó el colapso de las mismas, y arrastró muchos bienes muebles hacia el río aumentando así los daños en estos predios. En la Imagen 122 e Imagen 123 se muestra el resultado de las manchas de inundación al paso por la carrera 7.

Imagen 122– Resultado de manchas de inundación al paso por la carrera 7 modelo Iber

Fuente: Software Iber

Imagen 123 - Resultado de manchas de inundación al paso por la carrera 7 modelo Hec-Ras

Fuente: Software Hec-Ras

Debido a que las modelaciones se realizaron en flujo permanente utilizando los caudales pico, no se puede establecer el valor de la profundidad de la lámina de agua de 1.4 metros resultante después de la creciente. Este análisis se realizó previamente en el Capítulo 11.2.1 correspondiente al análisis de las zonas inundables para flujo no permanente, en donde se estableció que la profundidad máxima de inundación para el punto bajo de la carrera 7 fue de 1.3 metros. Entonces el modelo Iber es el más recomendable para el análisis de las zonas inundables rurales y urbanas.

Estación del Tren y Centro Lúdico

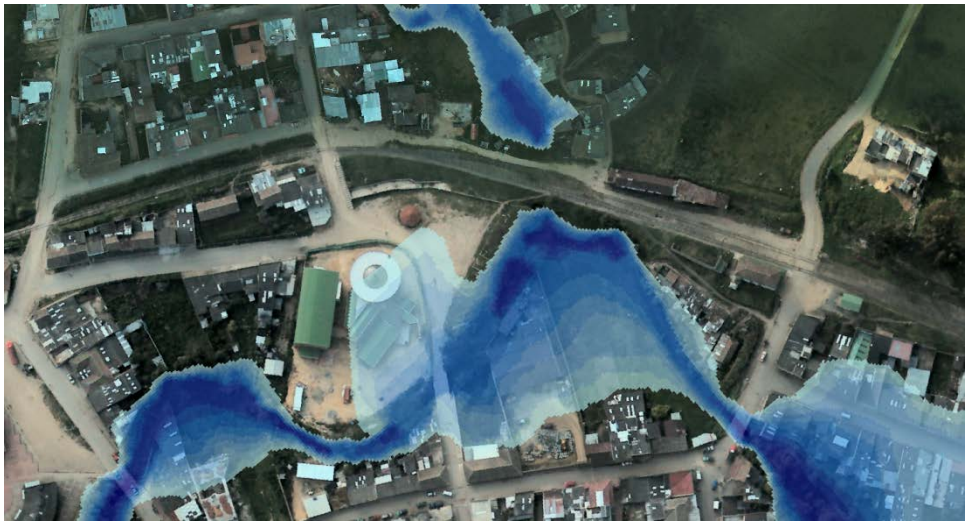
Esta zona resultó fuertemente afectada debido al paso de la creciente del 13 de mayo debido a la presencia de taludes altamente inestables, así como la presencia de muros en ladrillo que no soportaron las altas velocidades y niveles del flujo del río. Esto se sumó al colapso de una pequeña quebrada afluente que vierte sus aguas por el costado occidental, y que había sido canalizada en un pequeño tramo debido al paso de la vía férrea, y que debido a las fuertes lluvias colapsó e inundó predios en la zona occidental del municipio.

El centro lúdico se vio afectado debido a los niveles de la lámina de agua, que alcanzaron los 60 centímetros rodearon el centro lúdico y hubo estancamiento en los puntos bajos. En la Imagen 124 e Imagen 125 se muestra las manchas de inundación al paso por estas estructuras.

Imagen 124 - Resultado de manchas de inundación al paso por la estación del tren y el centro lúdico modelo Iber

Fuente: Software Iber

Imagen 125 - Resultado de manchas de inundación al paso por la estación del tren y el centro lúdico modelo Iber



Fuente: Software Hec-Ras

Para este caso los dos modelos resultan ser muy acertados respecto a la estimación de las láminas inundables y al colapso de la estructura de paso en la quebrada.

Plaza de Mercado del Municipio

En la zona urbana del municipio correspondiente a la plaza de mercado el día del evento la lámina de agua alcanzó a esta estructura, en donde se alcanzaron niveles cercanos a los 30 centímetros, debido a que es una zona plana y el agua se expandió al paso de la creciente.

En esta zona también es el cruce entre el río Bogotá y la quebrada la Quincha. Esta quebrada debido a sus altos niveles también produjo inestabilidad en los taludes debido a la saturación del terreno, así mismo a la entrega del municipio debe tenerse en cuenta la limitación del modelo Hec-Ras al confinar el flujo para que las secciones transversales entre cauces no se crucen, lo que causa una sobreestimación de la lámina de agua. En la Imagen 126 e Imagen 127 se muestran los resultados de las manchas de inundación al paso por la plaza de mercado del municipio.

Imagen 126 - Resultado de manchas de inundación al paso por la plaza de mercado modelo Iber

Fuente: Software Iber

Imagen 127 - Resultado de manchas de inundación al paso por la plaza de mercado modelo Hec-Ras

Fuente: Software Hec-Ras

En este caso se muestra una gran diferencia entre las manchas de inundación de los dos modelos, mientras que el modelo Iber muestra que la mancha alcanza la plaza de mercado, el modelo Hec-Ras muestra una inundación hacia la plaza debida al remanso generado por la estructura de paso ubicada en esta zona. Si no existiera, la mancha no alcanzaría la plaza de mercado, por lo que el modelo Iber resulta más preciso para esta zona que resultó afectada por la creciente del 13 de mayo.

15.6 ANÁLISIS DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS RESPECTO AL EVENTO DEL 13 DE MAYO

Son evidentes las ventajas que tiene el modelo Iber sobre el modelo Hec-Ras en lo referente al análisis de inundaciones en zonas urbanas. Para el caso de la estimación hidráulica de la mancha inundable para el evento del 13 de mayo el modelo Iber resultó mucho más aproximado debido al confinamiento del flujo en el caso de la malla urbana.

Al inicio del desbordamiento el modelo Iber reflejó con mayor precisión el sitio de ocurrencia y con mayor detalle el flujo sobre la calzada de la vía como ocurrió el día del evento. En el caso de la subdivisión del flujo el modelo Iber permite determinar el caudal que pasa por el canal artificial, y los niveles fueron muy cercanos a los reportados por los habitantes del sector en la creciente. La determinación de las zonas inundables y las cotas medidas corresponden a las láminas del modelo Iber, mientras que en el modelo Hec-Ras aunque se tuvo encuentra hidráulicamente las obstrucciones, las láminas en las zonas inundables resultan ser muy bajas respecto a las reales y al modelo Iber. En general la extensión de las manchas producidas por el modelo Iber corresponde a lo ocurrido el 13 de mayo. Por último, en visita al municipio de Villapinzón las manchas se mostraron a

varios habitantes que vivieron el evento, quienes resaltaron que los resultados del modelo Iber, se acercaban con gran fidelidad a lo ocurrido el 13 de mayo. Por lo tanto el modelo Iber resultó ser mucho más preciso en la zona urbana al momento de recrear un evento real y más acertado respecto a las manchas producidas por el evento.

16. CONCLUSIONES

Para los modelos realizados mediante el uso de filosofías distintas de modelación se realizó una evaluación de los parámetros de respuesta comparables, y en base a estos se realiza un resumen de conclusiones, que se muestra a continuación:

Respecto a los resultados en régimen permanente se puede concluir en general

- Los resultados de las láminas de las secciones transversales tienen gran similitud en las zonas rurales, incluyéndose las zonas de flujo bidimensional. Esto resulta tener sentido en el tramo final de los modelos, donde las condiciones de contorno son las mismas. Sin embargo en la zona urbana las láminas presentan grandes diferencias, en algunos casos, cercanas al metro. Esto se debe principalmente al confinamiento del flujo y a la formación de remansos importantes en las estructuras de paso que resultan ser continuas a lo largo de la zona urbana, y en donde las condiciones hidráulicas de los modelos pueden ser distintas.

- Los anchos superficiales no tuvieron diferencias significativas en general, a excepción de la zona rural inundable que fue estudiada previamente en el Capítulo 12.1.

- En general los modelos en flujo permanente resultaron estables debido a las simplificaciones en las ecuaciones de Saint Venant, así mismo la presencia de estructuras de paso no afectó la estabilidad de los modelos. De igual forma los tiempos de simulación para los modelos resultaron ser aceptables.

- Los caudales producto de periodos de retorno elevados provocaron el colapso de la gran mayoría de las estructuras de paso, así como remansos importantes en la zona urbana. En el caso de la creciente del 13 de mayo de 2011, colapsaron casi todos los puentes, hecho que se vio reflejado en las modelaciones 1D y 2D.

- En general para flujo permanente se encontró que la lámina de agua del modelo Iber se encuentra un 75.4% del alineamiento del río sobre la lámina del modelo Hec-Ras. Los resultados del modelo Iber fueron eminentemente superiores en la zona urbana debido a la presencia de remansos en las estructuras, por lo que el modelo Iber tiene una marcada tendencia a la seguridad principalmente en la zona urbana.

- Para el caso del diseño y propuesta de estructuras de mitigación en zonas rurales, consistentes en diques de confinamiento del flujo, el uso de los dos modelos resulta ser apropiado, debido a que el comportamiento del flujo resulta ser unidimensional. Resulta entonces más práctico el uso del modelo Hec-Ras por sus bajos tiempos de cálculo y costos computacionales.

- En el caso de los análisis de flujo con estructuras y sin estructuras de paso para la zona urbana, se realizó una revisión de las velocidades para los dos modelos con el fin de revisar la consistencia entre estas y las láminas de agua para la zona del remanso. Para el modelo Hec-Ras la velocidad en esta sección es de 0.7 m/s, mientras que en el modelo Iber fue de 0.6 m/s siendo valores consecuentes debido a que la lámina del modelo Hec-Ras es menor. Para el caso sin estructuras la velocidad del modelo Hec-Ras fue de 0.84 m/s, mientras que la velocidad del modelo Iber fue de 0.64 m/s representando una diferencia de 0.2 m/s y siendo consecuente con la diferencia entre las láminas de agua de los modelos.

Respecto a los resultados en régimen no permanente se puede concluir en general

- A partir de las modelaciones hidráulicas mediante el modelo bidimensional Iber en régimen no permanente se pueden establecer los tiempos en los cuales las estructuras de paso se encuentran con flujo anegado.

- La atenuación de los picos de los hidrogramas para los dos modelos fue similar principalmente a las simplificaciones realizadas para lograr la estabilidad en cada modelo. En el caso del modelo Hec-Ras la atenuación del pico a la salida del modelo fue de 0.92 m^3/s, 1.52 % del pico, mientras que la atenuación del modelo Iber a la salida fue de 2.72 m^3/s, 4.5 % del pico siendo una diferencia poco significativa para los dos casos. Los resultados producto de la modelación Hec-Ras resultan ser menos confiables debido a las simplificaciones realizadas y la pérdida de precisión en los resultados. El tránsito de la creciente mediante el modelo Hec-Hms arrojó una atenuación del pico de 0.9 m^3/s, siendo muy similar a los resultados del modelo Hec-Ras. Este valor resulta muy esperado, debido a que el valor K asignado fue el mismo del resultado de la simulación mediante el modelo Hec-Ras.

- El tiempo de recorrido del pico de la onda resultó ser el mismo para los dos modelos, siendo de 52 minutos, por lo tanto los esquemas numéricos utilizados para los mismos resultaron ser muy aproximados entre sí. La simulación se realizó para un tramo de río de 4.5 Km, si se realizara una comparación con el tiempo del aguacero del 13 de mayo de 2011 en donde el pico según observadores fue aproximadamente a la 4:00 am, y el pico registrado en la estación LG Saucio fue el 12 de mayo a la 1:00 pm, el tránsito es de 9 horas. El tiempo de tránsito de las modelaciones extrapolado hasta la estación Saucio, ubicada a 21.1 Km es de 4.5 horas, siendo la mitad del registrado. Sin embargo debe recalcarse la presencia de grandes llanuras de inundación en la zona de Chocontá, en donde se genera una gran amortiguación en la zona, por lo tanto es posible una atenuación en mayor escala el pico lo que podría provocar un aumento del tiempo de tránsito de la creciente hasta la estación, por lo tanto la diferencia entre tiempos se puede atribuir a la presencia de llanuras inundables en la parte media de la cuenca del río Bogotá.

- Para la zona rural del tramo de modelación se evidenció la presencia de bidimensionalidad en el flujo debido a la presencia de pequeñas llanuras de inundación. El modelo Iber reflejó la presencia de zonas en las que los vectores de flujo resultaban no ser paralelos a las líneas de corriente principal, sin embargo en las manchas no se logró ver directamente el efecto en los resultados de las modelaciones debido al tamaño de las llanuras de inundación.

- El análisis de las zonas inundables al paso de los hidrogramas de crecientes mostró la presencia de una zona de estancamiento del flujo de gran importancia, debido a altas presiones sobre las construcciones. Este caso ocurre en la carrera séptima, en donde el agua alcanza los 1.4 metros de profundidad después del paso de la creciente, siendo una zona de alta peligrosidad debido a la presencia del punto bajo, por un lado y a la presencia del río altamente encausado por el otro.

- Las zonas rurales inundables reflejaron una baja capacidad de drenaje del río, en donde se evidenció la presencia de piscinas de estancamiento del flujo después de las crecientes. Esta situación, que a la vez genera pérdidas en los cultivos permite el análisis y delimitación de la zona de ronda hídrica en el río. Este problema se agudiza aguas abajo del tramo de modelación, en inmediaciones del municipio de Chocontá, en donde predominan pendientes bajas y amplias zonas inundables.

- Los hidrogramas en las secciones representativas del modelo, (a excepción de las zonas de flujo divido en el modelo Iber) resultaron ser muy similares en los tiempos de tránsito, aunque la atenuación del pico resultó ser distinta, siendo el modelo Iber más preciso que el modelo Hec-Ras.

- Al igual que en flujo permanente, los anchos superficiales presentaron en algunos casos grandes variaciones, presentándose mayores diferencias en las zonas rurales. Sin embargo en estas zonas en donde es evidente el flujo bidimensional, resulta más confiable el modelo Iber para el análisis de zonas de inundación y estimación de ronda hídrica.

Respecto a la sensibilidad de los modelos al parámetro de rugosidad se puede concluir que

- En general la sensibilidad del modelo Iber fue menor a la del modelo Hec-Ras, aun así la predicción en la lámina de agua de respuesta de los dos modelos es muy similar.

- El tamaño de las celdas juega un papel importante en la sensibilidad y propagación de errores en modelos bidimensionales, debido a la asignación de un único valor de rugosidad a cada celda, y produciendo significativas imprecisiones en cauces pequeños.

- La sensibilidad en los modelos se calculó mediante una ecuación lineal, válido para un rango de valores de rugosidad aceptable, el parámetro de respuesta tuvo valores mayores a los correspondientes de la linearidad, alterando la proporcionalidad.

Respecto al evento registrado el 13 de mayo de 2011 se puede concluir que

- El modelo que representó con mayor fidelidad el evento hidrológico del 13 de mayo fue el modelo Iber resultando en manchas y profundidades de lámina muy similares a las registradas.

- No se evidenció el efecto de las zonas de estancamiento debido a la ejecución de los modelos con flujo permanente, sin embargo este análisis se realizó en el capítulo 14.3, en donde las zonas inundables reflejadas en la modelación resultaron ser muy similares a las observadas luego del paso de la creciente del evento del 13 de mayo, siendo el modelo Iber, debido a su esquema de cálculo (volúmenes finitos), el más acertado respecto al fenómeno en estudio.

- El modelo Iber resulta ser más aceptable para el análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgos por inundaciones para el municipio de Villapinzón, debido a que reflejó con gran precisión un caso real ocurrido en la población. Con base en esto se recomienda utilizar éste modelo para el análisis de riesgos por inundaciones en poblaciones que se encuentren expuestas a este fenómeno.

En el Capítulo 8.2 se mostraron las características de cada modelo. Teniendo en cuenta que cada modelo trabaja con esquemas numéricos distintos, no se podría hablar integralmente de una comparación entre metodologías de modelación, pero si de una caracterización de las metodologías para cada caso, partiendo del hecho de que los resultados en las zonas de confinamiento del flujo deben ser de gran similaridad. Una vez tenidas en cuenta y aclaradas las caracterizaciones de los modelos se pueden unificar las mismas con los resultados producto de la aplicación de los modelos a un mismo caso de estudio y se pueden especificar en qué casos puede presentar una ventaja importante la utilización de esquemas unidimensionales o bidimensionales para la modelación hidráulica.

Se encuentran ventajas del uso del modelo Hec-Ras sobre el modelo Iber

- Debido a la existencia de la extensión Hec-Geo RAS para el software ArcGis, se presenta una mayor facilidad para la discretización del dominio mediante secciones transversales, partiendo de una buena y coherente información topográfica.

- El modelo Hec-Ras al tener una mayor trayectoria que el modelo Iber, presenta menos errores (bugs), así mismo presenta gran cantidad de herramientas para la visualización de resultados (Gráficos, Tablas, etc.) Por lo que resulta más útil para el estudio de parámetros locales en determinados puntos del proyecto.

Así mismo el modelo Hec-Ras presenta limitaciones respecto al modelo Iber

- La presencia de cambios continuos de régimen y estructuras de paso puede provocar inestabilidad para flujo no permanente en el modelo Hec-Ras, esto obliga a la simplificación de determinados parámetros, provocando la pérdida de precisión en los resultados.

- La sensibilidad del modelo es más alta respecto al modelo Iber para el parámetro de rugosidad.

- Exige geometría detallada para llevar a cabo una óptima modelación.

- Los parámetros de salida (velocidad, Número de Froude, etc.) son constantes para las secciones, tendiendo a sobreestimarse.

- Las componentes de la velocidad son perpendiculares a la sección del río, es decir paralelas al sentido del flujo. Se desprecian aceleraciones verticales y horizontales.

El modelo Iber presenta ventajas respecto al modelo Hec-Ras debido a que simula con mayor precisión el flujo a superficie libre

- Se puede establecer la calidad para la presentación de los resultados, de una manera más rápida para la visualización en el software ArcGis.

- Permite el cálculo de las componentes X e Y de la velocidad, hidrogramas, láminas de agua, energía, etc. en cada celda del dominio, así como la visualización de los vectores de flujo a lo largo del intervalo de simulación.

- El método de volúmenes finitos permite la simulación de fenómenos como el estancamiento.

Como desventajas del modelo Iber respecto al modelo Hec-Ras se pueden resaltar las siguientes

- La información para el montaje del modelo debe ser muy detallada para una simulación exitosa, por lo que las topografías pueden ser muy costosas.

- La precisión en los resultados depende directamente de la habilidad del modelador para establecer la malla de cálculo más apropiada para la modelación, debido a la existencia de distintos tipos de mallas.

- Al refinar en exceso la malla de cálculo los tiempos de simulación pueden llegar a ser demasiado altos. Por lo tanto un requisito es el uso de computadores de alto rendimiento para la realización de las simulaciones.

- El modelo Iber resulta apropiado para tramos cortos de simulación, por lo tanto es de mejor aplicación para fenómenos puntuales como zonas urbanas o puentes con el fin de analizar fenómenos locales.

La información topográfica base es fundamental para el óptimo desarrollo de las modelaciones hidráulicas, por lo tanto la topografía LIDAR, aunque muy importante, resulta no ser suficiente para la correcta discretización del terreno en los modelos, debido a que no refleja con buena precisión el lecho del cauce. La realización de topografías convencionales, mediante secciones transversales del cauce resulta ser confiable para la óptima representación del fondo del cauce, por lo tanto es necesaria la complementación de estos dos tipos de topografías para la obtención de resultados más reales y confiables.

El modelo Iber resulta ser más preciso al momento de generar los resultados producto de las manchas de inundación, al reflejar de una manera más detallada el comportamiento hidrodinámico del agua tanto en la zona urbana, como la zona rural. Los grandes avances tecnológicos han provocado la aparición de computadores de alto rendimiento, que son capaces de disminuir los costos computacionales de las modelaciones bidimensionales, siendo estos de mayor precisión para el estudio de llanuras de inundación. El evidente cambio en las condiciones hidrometeorológicas producto del cambio climático, ha provocado que se preste más atención en las zonas vulnerables a los fenómenos de inundación, en donde se encuentren expuestas vidas, propiedades y cultivos, siendo necesario el uso de modelos más precisos respecto al comportamiento real del agua. Sin embargo existen casos en los cuales resulta práctico el uso de modelos unidimensionales o cuasi-bidimensionales, resultando en menores costos computacionales y con resultados aceptables.

17. BIBLIOGRAFÍA

Ashakar, F., & T.B.M.J Ouarda, R. R. (1993). *Robust Estimators in Hydrologic Frequency Analysis.* C.Y., pp 347-352, Am. Soc. Civ. Eng.

Bladé i Castellet, E. (2005). *Modelación de Flujo en Lámina Libre Sobre Cauces Naturales. Análisis Integrado con Esquemas en Volúmenes Finitos en Una y Dos Dimensiones.* Barcelona.

Centro de Estudios Hidráulicos, C. E. (2008). *Curso Taller de Sistemas de Infromación Geográficos Aplicados.* Bogotá D.C.: ECI.

Chaudry, M. H. (2008). *Open Channel Flow, 2nd Edition.* Columbia: Springer.

Chow, V. M. (1988). *Applied Hydrology.* New York, EE.UU: McGraw Hill.

Chow, V. T. (1959). *Open Channel Hydraulics.* McGraw-Hill Kogakusha Ltd.

Fernandez López, C. (2011). *Modelización de la Ruptura de una Balsa de Laminación y Análisis Según el Esquema de Cálculo.* Barcelona.

Flumen. (2012). *IBER, Modelización Bidimensional del Flujo en Lámina Libre en Aguas Poco Profundas, Manual de Referencia Hidráulico.* Barcelona.

Guinot V., C. B. (2009a). *Sensitivity Analysis if 2D Steady State Water Flow. Application to free surface model calibration. Advances in Water Resources.*

Horritt, M. S. (2002). Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. *Journal of Hydrology*, 88-99.

Ltda., I. I. (1995). *Estudio para el Análisis y Caracterización de Tormentas de la Sabana de Bogotá.* Santafe de Bogotá D.C., Colombia.

Maidment, D. (1993). *Handbook of Hydrology.* New York, EE.UU: McGraw-Hill Inc.

Mc. Huen, R. H. (1986). *Hydrologic Modeling, Satistical Methods and Applications.* U.S.A: Prentice-Hall.

Monsalve Sáenz, G. (1999). *Hidrología en la Ingenería.* Santafe de Bogotá D.C., Colombia: Escuela Colombia de Ingenería.

Ochoa Rubio, T. (2014). *Hidrología, Hidráulica y Socavación en Ríos.* Bogotá D.C.: Ecoe.

Technologies, M. (2010). *EasyFit 5.5.* MathWave.

UNAM, I. d. (2013). *La Incertidumbre y su Evaluación.*

U.S. Army Corps of Engineers. (2008). *HEC-HMS, Hydrology Engineering Center - Hydrologic Modelling System.* Estados Unidos: Copyright Haestad Methods, Inc. V. 3.5.

Vargas, R. D. (1998). *Curvas Sintéticas Regionalizadas de Intensidad - Duración - Frecuencia para Colombia.* Santafe de Bogotá D.C., Colombia: Universidad de los Andes.

Velez, J. B. (2010). *Estimación del Tiempo de Concentración y Tiempo de Rezago en la Cuenca Experimental Urbana de la Quebrada San Luis.* Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Wu, W. (2007). *Computational River Dynamics.* Missisipi: Taylor & Francis.