

Trabajo Fin de Grado

Estudio de la influencia de la forma y tamaño de
hidrogramas en la simulación 2D de inundaciones en
el tramo medio del río Ebro

(Study of the hydrographs shape and size in the Ebro
river 2D flood simulation)

Autor

Carlos Bachiller Rincón

Directora

Pilar Brufau García

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Año 2018

Resumen

La simulación de inundaciones es un problema de actualidad que preocupa tanto a la sociedad en general, como a los técnicos y administraciones públicas. Durante los últimos años se ha tomado conciencia de que el riesgo por inundación debe ser un factor crucial a tener en cuenta en cualquier planificación territorial enfocada a la seguridad de personas y bienes. El análisis del riesgo de inundación sólo se puede realizar a través de la simulación numérica. Para ello, se necesitan datos que, a menudo, no se encuentran disponibles. La situación ideal sería disponer del hidrograma de avenida antes de que esta ocurra para poder realizar la predicción de las consecuencias o realizar los cálculos a tiempo real. Esta última opción aún no es posible, aunque con la aceleración de los cálculos cada vez se encuentra más cerca; y la primera tampoco es posible ya que por más que se conozcan las variables meteorológicas con bastante precisión, no se puede disponer del hidrograma de avenida con suficiente antelación. Por ello, en este trabajo, se realiza un estudio exhaustivo de diferentes formas y tamaños de hidrogramas, en función de la duración y el caudal máximo que éstos alcanzan. De esta manera, observamos la evolución del transporte de estos hidrogramas a través del cauce y sus consecuencias. En particular, se ha realizado la simulación numérica del tramo medio del río Ebro (Castejón de Ebro-Zaragoza), mediante un programa computacional en 2D llamado RiverFlow2D. Previamente, la información se procesa en un programa de gestión de información geográfica llamado QGIS. A la vista del análisis de los resultados obtenidos en 18 casos simulados, podemos afirmar que hidrogramas de larga duración en el tiempo apenas modifican su forma al llegar al final del dominio de cálculo y son los que mantienen el caudal máximo durante todo su recorrido. Sin embargo, en el caso de que la duración de la avenida sea corta, la forma del mismo, en Zaragoza, cambia drásticamente, presentando una gran laminación y tardando más tiempo en llegar; e incluso pueden aparecer varios picos siendo que sólo uno había sido impuesto en la cabecera del río.



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^{ña}. Carlos Bachiller Rincón

con nº de DNI 73019250T en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo

de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la

Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
Grado _____, (Título del Trabajo)

Estudio de la influencia de la forma y tamaño de hidrogramas en la simulación
2D de inundaciones en el tramo medio del río Ebro. (Shape and size inflow
conditions analysis in the Ebro river 2D flood modelling)

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada
debidamente.

Zaragoza, 23 de noviembre de 2018

Fdo: Carlos Bachiller

ÍNDICE

1. Introducción	4
2. Datos de partida	17
2.1 Localización	17
2.2 Problemática	17
2.3 Modelo Digital de Terreno	17
2.4 Malla de cálculo	18
2.5 Mapa de rozamiento	19
2.6 Condiciones Iniciales	20
2.7 Condiciones de Contorno	20
3. Análisis de resultados	21
4. Conclusiones	33
5. Bibliografía	35
Anexo A. MODELO MATEMÁTICO	36
Anexo B. Pre-proceso de datos: QGIS	38
Anexo C. Método de cálculo del programa RiverFlow2D	51
Anexo D. Resultados numéricos	53
CASO 1	53
CASO 2	58
CASO 3	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Distribución de la civilización egipcia junto al cauce del río Nilo	10
Figura 1.2: Tipos y distribución de desastres naturales relacionados con el agua durante el periodo 1990-2001	11
Figura 1.3: Indemnizaciones en millones de euros totales (en verde) y sólo de inundaciones (en azul) pagadas por el Consorcio de Compensación de seguros entre los años 2005-2013	12
Figura 1.4: Mapa de peligrosidad del río Ebro	14
Figura 1.5: Variables principales que caracterizan un hidrograma de avenida	14
Figura 1.6: Ejemplo de hidrograma teórico de avenida utilizado en este trabajo	15
Figura 2.1.1: Representación en 2D del dominio objeto del estudio	17
Figura 2.4.1: Detalle de las celdas que forman la malla de cálculo utilizada en la simulación	18
Figura 3.1: Formato de salida de resultados del programa Riverflow2D en forma de mapas 2D	21
Figura 3.2: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el tiempo final de la simulación para un hidrograma de caudal pico 1000m ³ /s y duración 20 días	22
Figura 3.3: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el tiempo final de la simulación para un hidrograma de caudal pico 4000m ³ /s y duración 20 días	22
Figura 3.4: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el tiempo final de la simulación para un hidrograma de caudal pico 100m ³ /s y duración 20 días	23
Figura 3.5: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el tiempo final de la simulación para un hidrograma de caudal pico 500m ³ /s y duración 20 días	23
Figura 3.6: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y error de masa (verde)	24
Figura 3.7: Evolución temporal del caudal de entrada de duración 4 días y caudal pico de 2000m ³ /s, del caudal de salida y error de masa	24

Análisis de hidrogramas

Figura 3.8: Evolución temporal del caudal de entrada de duración 4 días y caudal pico de 3000m³/s, del caudal de salida y error de masa_____25

Figura 3.9: Evolución temporal del caudal de entrada de duración 20 días y caudal pico de 1000m³/s, del caudal de salida y error de masa_____25

Figura 3.10: Evolución temporal del caudal de entrada de duración 20 días y caudal pico de 3000m³/s, del caudal de salida y error de masa_____26

Figura 3.11: Evolución temporal del caudal de entrada de duración 4 días y caudal pico de 500m³/s, del caudal de salida y error de masa_____26

Figura 3.12: Evolución temporal del caudal de entrada de duración 4 días y caudal pico de 4000m³/s, del caudal de salida y error de masa_____27

Figura 3.13: Evolución temporal del caudal de entrada de duración 10 días y caudal pico de 500m³/s, del caudal de salida y error de masa_____27

Figura 3.14: Evolución temporal del caudal de entrada de duración 10 días y caudal pico de 3000m³/s, del caudal de salida y error de masa_____27

Figura 3.15: Evolución temporal del caudal de entrada de duración 4 días y caudal pico de 1000m³/s, del caudal de salida y error de masa_____28

Figura 3.16: Evolución temporal del caudal de entrada de duración 20 días y caudal pico de 1000m³/s, del caudal de salida y error de masa_____28

Figura 3.17: Variación de la duración del hidrograma de salida en función del caudal pico de entrada, para duraciones del hidrograma de entrada de 96, 240 y 480 horas_____30

Figura 3.18: Variación de la duración del hidrograma de salida en función de la duración del hidrograma de entrada para caudales de 100, 500, 1000, 2000, 3000 y 4000 m³/s_____30

Figura 3.19: Variación del tiempo de llegada del hidrograma de entrada a la salida en función del caudal pico de entrada, para una duración del hidrograma de entrada de 96, 240 y 480 horas_____31

Figura 3.20: Variación del tiempo de llegada del hidrograma de entrada a la salida en función de la duración del hidrograma de entrada, para caudales pico del hidrograma de entrada de 100, 500, 1000, 2000, 3000 y 4000 m³/s____31

Figura 3.21: Variación del caudal máximo alcanzado en la salida en función del caudal máximo impuesto a la entrada, para duración del hidrograma de entrada de 96, 240 y 480 horas_____32

Figura B.1: Cuadrículas cartográficas del IGN_____38

Figura B.2: Mapa de valores de la cota del fondo del cauce, una vez interpolado a partir de las secciones transversales medidas_____39

Análisis de hidrogramas

Figura B.3: Ventana del programa QGIS que indica cómo unir los rásteres del MDT_____	39
Figura B.4: Opciones del programa QGIS para unir los rásteres del MDT_____	40
Figura B.5: Ventana de QGIS que indica dónde se carga el fichero ráster del MDT_____	41
Figura B.6: Ventana de QGIS con los complementos que se van a necesitar_____	41
Figura B.7: Ventana de QGIS que indica dónde se crea una nueva capa_____	41
Figura B.8: Ventana de QGIS donde se muestran las opciones para crear la nueva capa_____	42
Figura B.9: Ventana de QGIS donde se selecciona añadir un objeto espacial (polígono)_____	42
Figura B.10: Ventana de QGIS desde la que se recorta el polígono dibujado anteriormente sobre el ráster_____	43
Figura B.11: Ventana de QGIS con las opciones de "clipper" con la que vamos a recortar una parte del ráster_____	43
Figura B.12: Ventana de QGIS en la que se inicia el nuevo proyecto_____	43
Figura B.13: Ventana de QGIS en la que se seleccionan las capas que se utilizarán en el nuevo proyecto_____	44
Figura B.14: Ventana de QGIS donde se muestran las capas que aparecen por defecto en el programa_____	45
Figura B.15: Delimitación del dominio de cálculo y del polígono para definir el coeficiente de rozamiento de Manning_____	46
Figura B.16: Trozo de malla generada en QGIS, correspondiente al primer tramo de la zona de estudio_____	47
Figura B.17: Ventana de QGIS donde se muestran las opciones para introducir las condiciones de contorno (tanto a la entrada como a la salida)_____	47
Figura B.18: opciones a marcar, en QGIS, para introducir condición de contorno aguas arriba_____	48
Figura B.19: opciones a marcar, en QGIS, para introducir las condiciones de contorno aguas abajo_____	48
Figura B.20: ejemplo del polígono trazado para introducir la condición de contorno aguas arriba_____	48
Figura B.21: opción de QGIS para exportar los resultados y realizar la simulación correspondiente en Riverflow2D_____	49

Análisis de hidrogramas

Figura B.22: ventana emergente de Riverflow2D, donde se introducen los últimos valores y condiciones adecuadas al caso de estudio_____49

Figura D.1: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el caso 1, para un caudal de 100m³/s_____53

Figura D.2: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y del error de masa (verde) en el caso 1, para un caudal de 100m³/s_____54

Figura D.3: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el caso 1, para un caudal de 500m³/s_____54

Figura D.4: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y del error de masa (verde) en el caso 1, para un caudal de 500m³/s_____55

Figura D.5: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el caso 1, para un caudal de 1000m³/s_____55

Figura D.6: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y del error de masa (verde) en el caso 1, para un caudal de 1000m³/s_____56

Figura D.7: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el caso 1, para un caudal de 2000 m³/s_____56

Figura D.8: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y del error de masa (verde) en el caso 1, para un caudal de 2000 m³/s_____57

Figura D.9: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el caso 1, para un caudal de 3000 m³/s_____57

Figura D.10: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y del error de masa (verde) en el caso 1, para un caudal de 3000 m³/s_____57

Figura D.11: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el caso 1, para un caudal de 4000m³/s_____58

Figura D.12: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y del error de masa (verde) en el caso 1, para un caudal de 4000 m³/s_____58

Figura D.13: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el caso 2, para un caudal de 100m³/s_____59

Figura D.14: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y del error de masa (verde) en el caso 2, para un caudal de 100 m³/s_____59

Análisis de hidrogramas

Figura D.15: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el caso 2, para un caudal de 500m³/s_____60

Figura D.16: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y del error de masa (verde) en el caso 2, para un caudal de 500 m³/s_____60

Figura D.17: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el caso 2, para un caudal de 1000m³/s_____60

Figura D.18: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y del error de masa (verde) en el caso 2, para un caudal de 1000 m³/s_____61

Figura D.19: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el caso 2, para un caudal de 2000m³/s_____61

Figura D.20: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y del error de masa (verde) en el caso 2, para un caudal de 2000 m³/s_____62

Figura D.21: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el caso 2, para un caudal de 3000m³/s_____62

Figura D.22: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y del error de masa (verde) en el caso 2, para un caudal de 3000 m³/s_____63

Figura D.23: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el caso 2, para un caudal de 4000m³/s_____63

Figura D.24: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y del error de masa (verde) en el caso 2, para un caudal de 4000 m³/s_____64

Figura D.25: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el caso 3, para un caudal de 100m³/s_____64

Figura D.26: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y del error de masa (verde) en el caso 3, para un caudal de 100 m³/s_____65

Figura D.27: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el caso 3, para un caudal de 500m³/s_____65

Figura D.28: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y del error de masa (verde) en el caso 3, para un caudal de 500 m³/s_____65

Figura D.29: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el caso 3, para un caudal de 1000m³/s_____66

Análisis de hidrogramas

Figura D.30: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y del error de masa (verde) en el caso 3, para un caudal de 1000 m³/s _____ 66

Figura D.31: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el caso 3, para un caudal de 2000m³/s _____ 67

Figura D.32: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y del error de masa (verde) en el caso 3, para un caudal de 2000 m³/s _____ 67

Figura D.33: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el caso 3, para un caudal de 3000m³/s _____ 68

Figura D.34: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y del error de masa (verde) en el caso 3, para un caudal de 3000 m³/s _____ 68

Figura D.35: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el caso 3, para un caudal de 4000m³/s _____ 69

Figura D.36: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y del error de masa (verde) en el caso 3, para un caudal de 4000 m³/s _____ 69

1. Introducción

Los ríos, han sido desde el inicio de los tiempos uno de los elementos principales para el sostenimiento de la vida humana, no solo porque suministran el agua que necesitamos para sobrevivir, sino porque ayudan también al desarrollo de la agricultura y ganadería, y, por tanto, de la civilización. Por ejemplo, el Antiguo Egipto fue una civilización que alcanzó tres épocas de esplendor y se desarrolló asentándose junto al cauce del río Nilo. La antigua Mesopotamia se ubicó entre los ríos Tigris y Éufrates; la civilización china está ubicada entre los ríos Hoang-Ho y Yang Tse Kiang; Roma, capital del imperio romano, fue fundada junto al río Tíber, por poner algún ejemplo¹

En la figura 1.1 se puede ver la distribución de la población egipcia, hace siglos, en las orillas del río Nilo.

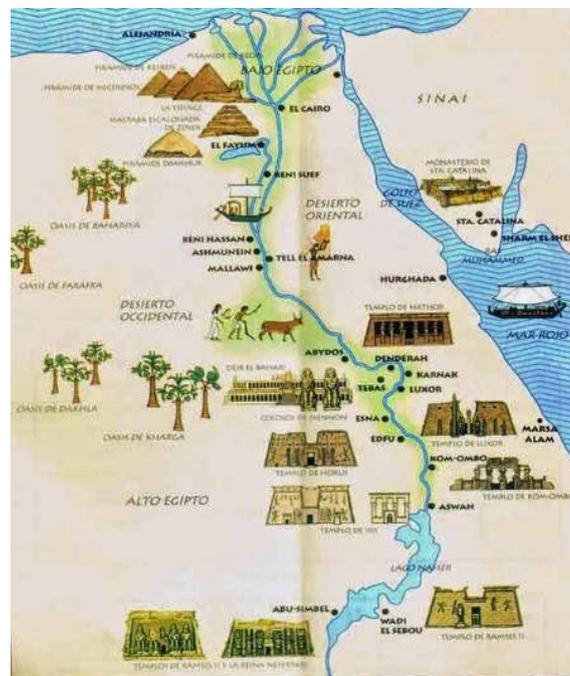


Figura 1.1: Distribución de la civilización egipcia junto al cauce del río Nilo.

Sin embargo, el desbordamiento de los ríos, es uno de los problemas más importantes que, desgraciadamente, suceden de forma periódica. Los elementos que influyen en cada inundación, tienen que ver con varios factores como la meteorología con precipitaciones extraordinarias junto con determinadas características físicas de la cuenca, la topografía de la zona inundable y las condiciones de los cauces.

Esta crecida del río respecto de su caudal medio es lo que se conoce como una avenida. Pueden llegar a causar daños materiales y personales severos, como ahora veremos. Por esto, es de gran interés e importancia el estudio de

¹ <http://civilizacion-egipcia.blogspot.com/2007/06/el-nilo.html>

Análisis de hidrogramas

la predicción de dichas precipitaciones, así como la simulación de posibles inundaciones de cara a planificar los riesgos potenciales y medidas de prevención, y por último la solución para evitar este tipo de catástrofes.

Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM), el número de víctimas en el mundo por desastres naturales aumentó de 147 millones en el año 1991 a 211 millones en el año 2000. El 90% de estos desastres tuvieron que ver con el agua. En la figura 1.2 se representan los tipos de desastres naturales relacionados con el agua y su distribución geográfica.

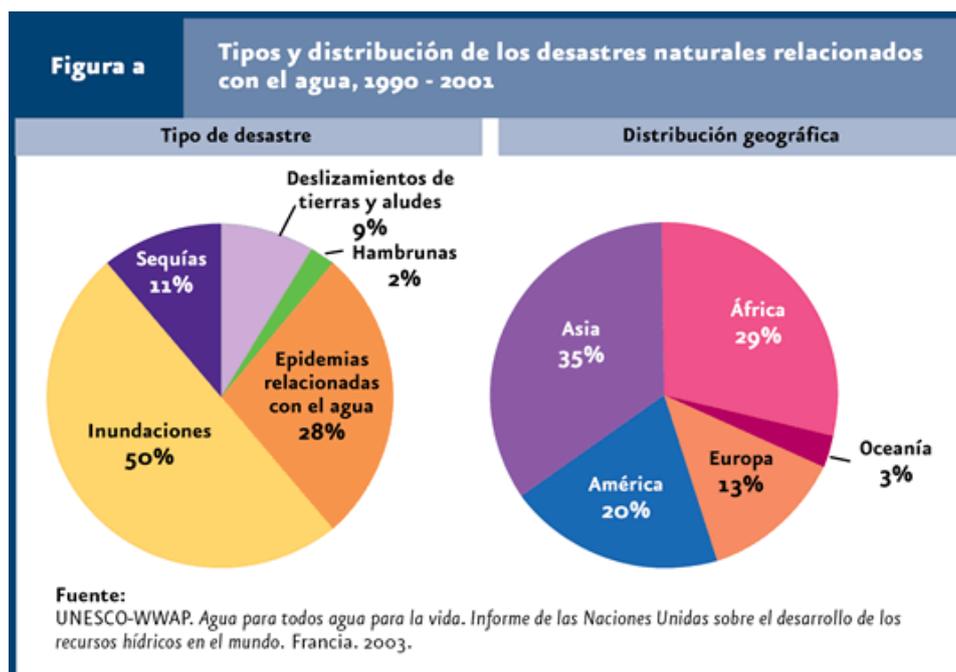


Figura 1.2: Tipos y distribución de desastres naturales relacionados con el agua durante el periodo 1990-2001.

Según la Organización de Naciones Unidas (ONU)², en conjunto, 1.400 millones de personas (alrededor de un tercio de la población mundial) están en peligro de sufrir las consecuencias de un fenómeno natural como ciclones, inundaciones, terremotos, sequías y otro tipo de desastres. A su vez, el Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de la ONU (DESA) advierte en su último informe que cerca de tres de cada cinco ciudades del mundo con al menos 500.000 habitantes, corren un alto riesgo de padecer un desastre natural. Por otra parte, la ONU³ desvela que las pérdidas económicas por desastres climáticos aumentaron un 151% en los últimos 20 años. El país más afectado por las pérdidas económicas totales, en estos últimos 20 años, fue Estados Unidos, seguido de China y Japón.

² <https://www.un.org/development/desa/es/news/population/world-cities-day-2018.html>

³ <https://news.un.org/es/story/2018/10/1443432>

Análisis de hidrogramas

El Consorcio de Compensación de Seguros (CCS), que, es una entidad pública empresarial española con actividad en el sector asegurador, adscrita al Ministerio de Economía y Empresa, asegura que las inundaciones son el desastre natural más costoso y que más pérdidas provoca. La inundación aglutina la mayor proporción de indemnizaciones pagadas por el conjunto de riesgos extraordinarios cubiertos por el CCS. Como ejemplo, sólo en bienes asegurados, en el período 1971-2016, según las estadísticas del Consorcio, el 44,6% de los expedientes tramitados han sido debidos a daños por inundaciones, que han supuesto el 62% del total de las indemnizaciones, las cuales, de media, suponen cerca de 130 millones de euros cada año. En el siguiente gráfico (Figura 1.3) se representan las indemnizaciones pagadas por el CCS durante el periodo 2005-2013.

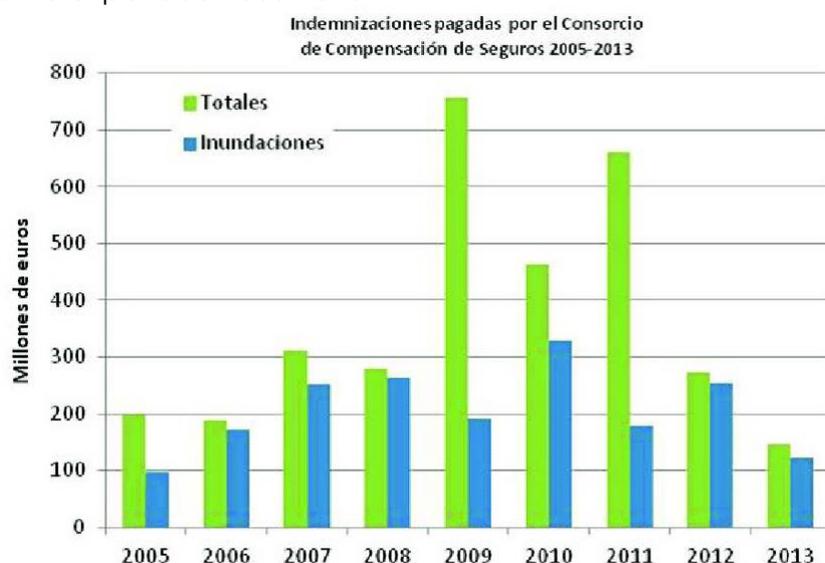


Figura 1.3: Indemnizaciones en millones de euros totales (en verde) y sólo de inundaciones (en azul) pagadas por el Consorcio de Compensación de seguros entre los años 2005-2013.

Por otra parte, según la OMM, a nivel mundial se estima que unos 120.000 millones de dólares anuales son destinados a hacer frente a las inundaciones cada año. La misma organización estima que en 2050, al menos una de cuatro personas vivirá en un país afectado por una escasez crónica o periódica de agua dulce.

En el año 2007 la Unión Europea creó una directiva, Directiva 2007/06/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación. En España tuvo su transposición en el Real Decreto 903/2010, del 9 de Julio. Los mapas de peligrosidad y riesgo de inundaciones se sometieron durante tres meses a consulta pública y una vez analizadas las alegaciones, se sometieron a informe de los órganos competentes en la materia para finalmente remitirlos al Ministerio, para su incorporación al Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables. La metodología para generar los mapas de peligrosidad se recogen en La Guía Metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables⁴.

⁴ https://www.miteco.gob.es/es/agua/publicaciones/guia_metodologica_ZI.aspx

Análisis de hidrogramas

De todos los ríos de España, el río Ebro es el más caudaloso y por tanto uno de los más problemáticos en cuanto a inundaciones se refiere. Con sus 930 km² de extensión, discurre a lo largo de la cuenca hidrográfica del Ebro situada en el noreste de la península ibérica. Tiene su nacimiento en la Sierra de Híjar (Cantabria) y desemboca en el mar Mediterráneo a la altura de Deltebre (Tarragona). Recorre nueve comunidades autónomas en la siguiente proporción⁵:

Comunidad Autónoma	Extensión total, en Km ²	Extensión en la cuenca, Km ²
Cantabria	5.327	775
Castilla y León	94.227	8.148
La Rioja	5.045	5.023
País Vasco	7.230	2.678
Navarra	10.390	9.229
Aragón	47.720	42.111
Castilla-La Mancha	79.462	1.119
Comunidad Valenciana	23.254	851
Cataluña	32.091	15.635

Tabla 1.1: Extensión total y en la cuenca del río Ebro en cada una de las comunidades autónomas por las que transita.

Como se ve en la tabla, prácticamente el 50% del tamaño de la cuenca del río Ebro (medida en Km²) corresponde a Aragón.

La Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) es el órgano encargado de la gestión, regulación y mantenimiento de este río. Publica a través de su página web⁶ datos e informes, de forma diaria, para que toda persona o institución interesada pueda hacer uso de ella. Por ejemplo, los mapas de peligrosidad y riesgo. En la Figura 1.4 se muestra el mapa de peligrosidad del río Ebro (fuente Confederación Hidrográfica del Ebro).

⁵ <http://www.chebro.es/contenido.visualizar.do?idContenido=2091&idMenu=2168>

⁶ <http://www.chebro.es/>

Análisis de hidrogramas



Figura 1.4: Mapa de peligrosidad del río Ebro.

La representación gráfica más real de una avenida es lo que se conoce como un hidrograma (en este caso hidrograma de avenida) y va a ser el punto central de interés en este trabajo. Un hidrograma representa la variación durante el tiempo de una variable hidráulica, en este caso, el caudal; del mismo modo que el hietograma representa la precipitación registrada a lo largo del tiempo y el limnigrama, la evolución de los niveles de agua en una sección de río determinada.

En una avenida, el caudal comienza a crecer hasta alcanzar un valor máximo (o pico) para luego comenzar a descender, rápida o lentamente, hasta llegar a un valor de caudal en el que se mantiene el régimen estacionario de funcionamiento normal del río.

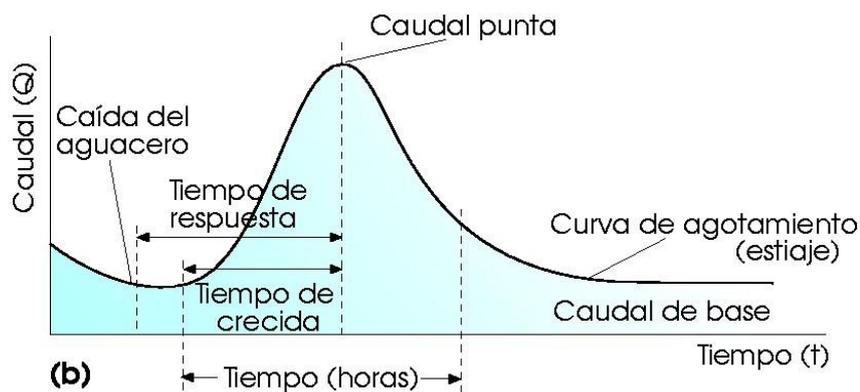


Figura 1.5: Variables principales que caracterizan un hidrograma de avenida.

Las variables que caracterizan la forma y el tamaño de un hidrograma son: tiempo de respuesta, tiempo de crecida, duración (tiempo en horas) y caudal punta, como se muestra en la figura 1.5.

El tiempo de crecida es el tiempo que le cuesta al caudal alcanzar el valor máximo; el tiempo que tarda en estabilizarse, o lo que es lo mismo, en que el

Análisis de hidrogramas

flujo alcance un régimen estacionario o caudal base es la duración; mientras que el valor máximo alcanzado representa el caudal pico del hidrograma.

En este trabajo, en lugar de simular hidrogramas de avenidas reales históricas, se ha optado por simular hidrogramas de avenidas teóricos que conservan la forma lo más parecida a los casos reales (triangular) pero en los que vamos a cambiar el caudal pico, la duración y el tiempo de crecida para simular diferentes patrones de comportamiento. Un ejemplo de estos hidrogramas se puede ver en la figura 1.6.

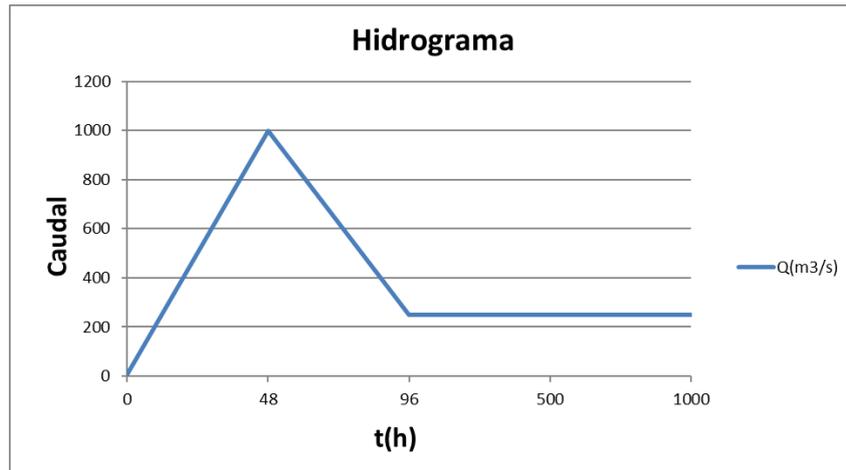


Figura 1.6: Ejemplo de hidrograma teórico de avenida utilizado en este trabajo.

Simulando el comportamiento de hidrogramas con la forma de la Figura 1.6 y cambiando las variables que lo caracterizan, podremos analizar si existe alguna pauta de comportamiento con la que poder prever de forma cualitativa el comportamiento de una avenida en un tiempo rápido. Aunque esta metodología no es tan precisa como la simulación real, nos va a dar idea del tiempo esperado de llegada de la avenida a Zaragoza y un valor aproximado del caudal pico con el que llegará. Esta información es muy valiosa para los gestores de la cuenca; ya que pueden proceder a la simulación de avenidas cuando realmente se necesiten y activar los planes de emergencia; y no realizar este proceso con cualquier aumento de caudal.

Los casos que se han simulado son los siguientes:

- Atendiendo a la duración del hidrograma: Tiempos de crecida de 2, 5 y 10 días.
- Y atendiendo al valor máximo que se puede alcanzar: Caudal pico de 100, 500, 1000, 2000, 3000 y 4000 m³/s.

Para todos los casos, hemos supuesto que el flujo (o caudal) se estabilizará una vez que haya pasado el doble de tiempo de crecida, por lo tanto, para tiempos de crecida de 2 días, se supone una duración del hidrograma de, al menos 4 días. Supondremos también en todos los casos una forma triangular

Análisis de hidrogramas

para el hidrograma, ya que es la forma aproximada que adoptan los hidrogramas de avenidas reales. Con respecto al caudal base después de la crecida, supondremos en todos los casos que éste toma la mitad del valor del caudal máximo en cada hidrograma. Para los casos de caudal muy elevado, a partir de $2000\text{m}^3/\text{s}$, se estabilizará en $250\text{m}^3/\text{s}$.

Se realizan un total de 18 simulaciones numéricas cuyos resultados se muestran en el Anexo D.

2. Datos de partida

2.1 Localización

De los 930 km² de extensión que tiene el río Ebro, en este trabajo nos centramos en lo que se conoce como el tramo medio del río Ebro, unos 90 km en línea recta, que van desde Castejón de Ebro (Navarra) hasta Zaragoza (puente de Santiago). En la figura 2.1.1 se muestra una imagen en 2D del dominio a estudiar, con poblaciones destacadas como Castejón de Ebro (inicio), Tudela, Novillas, Alagón y Zaragoza (final del tramo).



Figura 2.1.1: Representación en 2D del dominio objeto del estudio.

En el siguiente vídeo se ilustra de manera más clara la zona de estudio, así como las poblaciones que quedan en él, desde Zaragoza hasta Castejón de Ebro⁷.

<https://www.youtube.com/watch?v=UkRd9puQRvU>

2.2 Problemática

Como se ha explicado en la introducción de este trabajo, las inundaciones constituyen uno de los grandes problemas en el mundo, y en este tramo medio del río Ebro, se producen con cierta frecuencia. En el siguiente vídeo se observan los daños causados por la última inundación producida en el río Ebro a su llegada a Zaragoza en el mes de abril de 2018.

https://elpais.com/politica/2018/04/13/actualidad/1523603208_804558.html

Poder aplicar sistemas de prevención de avenidas para mitigar sus efectos es de vital importancia, así como el estudio sobre posibles inundaciones, como se realiza en este trabajo, para obtener diferentes resultados teóricos, generando situaciones similares a las reales.

2.3 Modelo Digital de Terreno

Para el desarrollo de este trabajo ha sido necesario disponer de una serie de datos (cartográficos o topográficos) que permiten estudiar el comportamiento de las avenidas en el terreno concreto donde se realiza el estudio. Una vez

⁷ Echeverribar, I., Estudio de soluciones para mitigar inundaciones en el tramo medio del río Ebro mediante simulación numérica. <http://zagan.unizar.es>

Análisis de hidrogramas

obtenidos los datos topográficos, se introducen en un programa de gestión de información geográfica (QGIS) para poder representar la realidad de forma discreta, como es un Modelo Digital de Terreno (MDT).

Un modelo digital de terreno (MDT) es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua, en este caso la cota de elevación del terreno (respecto del nivel del mar).

Los MDT necesarios para este trabajo han sido obtenidos del Instituto Geográfico Nacional (IGN)⁸ con una resolución de 5mx5m (la más pequeña posible, por tanto, la más precisa) para representar la llanura de la inundación. Para la batimetría del cauce se han utilizado datos obtenidos de secciones transversales medidas con las que se ha podido reconstruir el cauce del río en este tramo con la misma resolución.

Inicialmente, se parte de varios MDT de la zona, descargados del IGN, como se ha dicho anteriormente. Se unen para tener uno solo, que represente toda la zona. Sucede lo mismo para el cauce, que ya interpolado a partir de las secciones medidas y transformado al mismo formato se une al anterior para tener un solo ráster con información del río y del terreno (ver Anexo B).

2.4 Malla de cálculo

El siguiente paso es construir la malla de cálculo; en este caso triangular, adaptada al terreno. Necesitamos dividir el dominio de cálculo en celdas en las que almacenar y calcular en cada paso de tiempo las variables que queremos conocer (calado y velocidad en el plano (x, y)). Esto se consigue delimitando un dominio alrededor del cauce (lo suficientemente amplio para incluir todas las celdas que pueden estar mojadas en la simulación), y fijando un tamaño de longitud de lado para la celda (en este caso 25 m).

En la figura 2.4.1 se puede observar el tipo de celda, y la malla, utilizados en todos los casos.

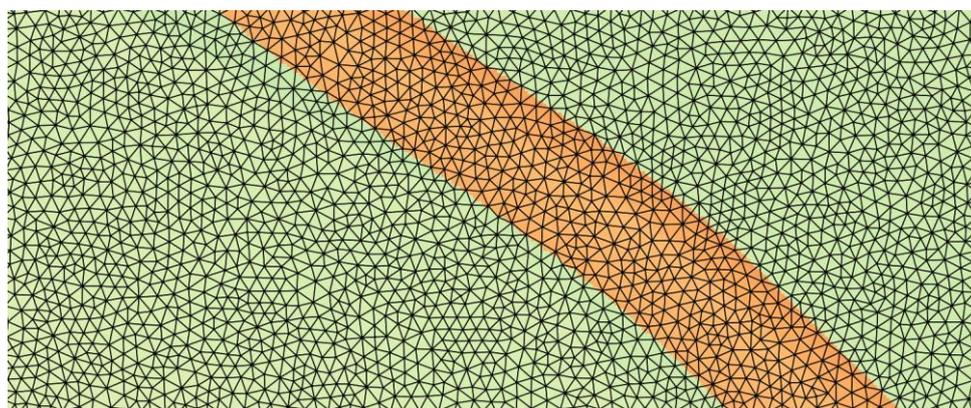


Figura 2.4.1: Detalle de las celdas que forman la malla de cálculo utilizada en la simulación.

⁸ <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>

Análisis de hidrogramas

Esta malla triangular adaptada al terreno se ha realizado de manera uniforme a lo largo de todo el dominio teniendo un total de 3.913.719 celdas y 1.961.137 nodos.

En el Anexo B, se explica más detalladamente el proceso realizado para generar la malla con el programa QGIS.

2.5 Mapa de rozamiento

En la representación del terreno, además de la información topográfica, es también importante disponer de la información del uso del suelo por donde va a discurrir el flujo de agua para poder tener en cuenta la fricción. El rozamiento por fricción del flujo con lo que se encuentra sobre el terreno implica una pérdida de energía directamente relacionada con el coeficiente de rozamiento de Manning; que a su vez toma un valor distinto según el uso del suelo.

En el libro de "Hidráulica de canales abiertos", escrito por Ven Te Chow (1960), encontramos diferentes valores de n , para la rugosidad, o lo que es lo mismo, el coeficiente de Manning. Este coeficiente toma diferentes valores en función del tipo de canal por el que discurre el flujo. En nuestro caso se trata de un río (corriente natural) que discurre sobre planicies de inundación, como muestra la tabla 2.5.1, y por ello se ha elegido un coeficiente de Manning de $0.03 [s/m^{1/3}]$

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
C. Excavado o dragado			
a. En tierra, recto y uniforme			
1. Limpio, recientemente terminado	0.016	0.018	0.020
2. Limpio, después de exposición a la intemperie	0.018	0.022	0.025
3. Con gravas, sección uniforme, limpio	0.022	0.025	0.030
4. Con pastos cortos, algunas malezas	0.022	0.027	0.033
b. En tierra, serpenteante y lento			
1. Sin vegetación	0.023	0.025	0.030
2. Pastos, algunas malezas	0.025	0.030	0.033
3. Malezas densas o plantas acuáticas en canales profundos	0.030	0.035	0.040
4. Fondo en tierra con lados en piedra	0.028	0.030	0.035
5. Fondo pedregoso y bancas con malezas	0.025	0.035	0.040
6. Fondo en cantos rodados y lados limpios	0.030	0.040	0.050
c. Excavado con pala o dragado			
1. Sin vegetación	0.025	0.028	0.033
2. Matorrales ligeros en las bancas	0.035	0.050	0.060
d. Cortes en roca			
1. Lisos y uniformes	0.025	0.035	0.040
2. Afilados e irregulares	0.035	0.040	0.050
e. Canales sin mantenimiento, malezas y matorrales sin cortar			
1. Malezas densas, tan altas como la profundidad de flujo	0.050	0.080	0.120
2. Fondo limpio, matorrales en los lados	0.040	0.050	0.080
3. Igual, nivel máximo de flujo	0.045	0.070	0.110
4. Matorrales densos, nivel alto	0.080	0.100	0.140
D. Corrientes naturales			
D-1. Corrientes menores (ancho superficial en nivel creciente < 100 pies)			
a. Corrientes en planicies			
1. Limpias, rectas, máximo nivel, sin montículos ni pozos profundos	0.025	0.030	0.033
2. Igual al anterior, pero con más piedras y malezas	0.030	0.035	0.040
3. Limpio, serpenteante, algunos pozos y bancos de arena	0.033	0.040	0.045
4. Igual al anterior, pero con algunos matorrales y piedras	0.035	0.045	0.050
5. Igual al anterior, niveles bajos, pendientes y secciones más ineficientes	0.040	0.048	0.055
6. Igual al 4, pero con más piedras	0.045	0.050	0.060
7. Tramos lentos, con malezas y pozos profundos	0.050	0.070	0.080
8. Tramos con muchas malezas, pozos profundos o canales de crecientes con muchos árboles con matorrales bajos	0.075	0.100	0.150

Tabla 2.5.1: Valores del coeficiente de rozamiento de Manning dependiendo de los usos del suelo.

2.6 Condiciones Iniciales

Las condiciones iniciales representan lo que está pasando en el dominio en el instante inicial, es decir, antes de que se produzca la simulación ($t=0$). En todas las simulaciones realizadas hemos supuesto que el río no porta caudal, o lo que es lo mismo, que parte de lecho seco (dry bed).

2.7 Condiciones de Contorno

Las condiciones de contorno son las que introducen la información en el contorno del dominio. En este caso, vamos a diferenciar claramente entre condiciones de contorno aguas arriba, y aguas abajo. En el resto del dominio se tienen condiciones de contorno de tipo pared. Esta condición no influye en el cálculo puesto que el flujo nunca llega a estos contornos.

A la entrada (condición de contorno aguas arriba), lo más frecuente es introducir valores en forma de caudal o altura de lámina de agua; bien de manera estacionaria o bien en función del tiempo (hidrograma). En este trabajo, todos los datos introducidos a la entrada del dominio (Castejón de Ebro) como condiciones de contorno aguas arriba, vienen dados en forma de hidrograma. Mientras que, a la salida del dominio (condición de contorno aguas abajo) impondremos la condición de flujo uniforme con un valor de pendiente de 0.005.

Como ya se ha explicado en la introducción, realizamos un total de 18 simulaciones cambiando en cada una de ellas, valores del hidrograma como el caudal pico, o la duración; pero en general, todos los hidrogramas realizados siguen un mismo modelo, por ejemplo, todos parten de que en el instante inicial el río lleva un caudal de $10 \text{ m}^3/\text{s}$, valor muy cercano al de lecho seco.

3. Análisis de resultados

En este capítulo se presentan los resultados más relevantes obtenidos de las simulaciones realizadas con el programa Riverflow2D. Este programa obtiene los resultados resolviendo el sistema de ecuaciones de aguas poco profundas (shallow water), que rigen el comportamiento del flujo de superficie libre (ver Anexo A); utilizando para ello un método numérico de volúmenes finitos descentrado de primer orden en espacio y tiempo (Anexo C).

Como se ha comentado en la introducción, realizamos un total de 18 simulaciones, y en cada simulación, tenemos información relativa al hidrograma de entrada y de salida y mapas 2D de la extensión de la lámina de agua. En el Anexo D se pueden encontrar más detalles sobre estos resultados.

En primer lugar, vamos a mostrar la manera en la que el programa Riverflow2D proporciona los resultados, en forma de mapas 2D, así como su interpretación. Ver figura 3.1.

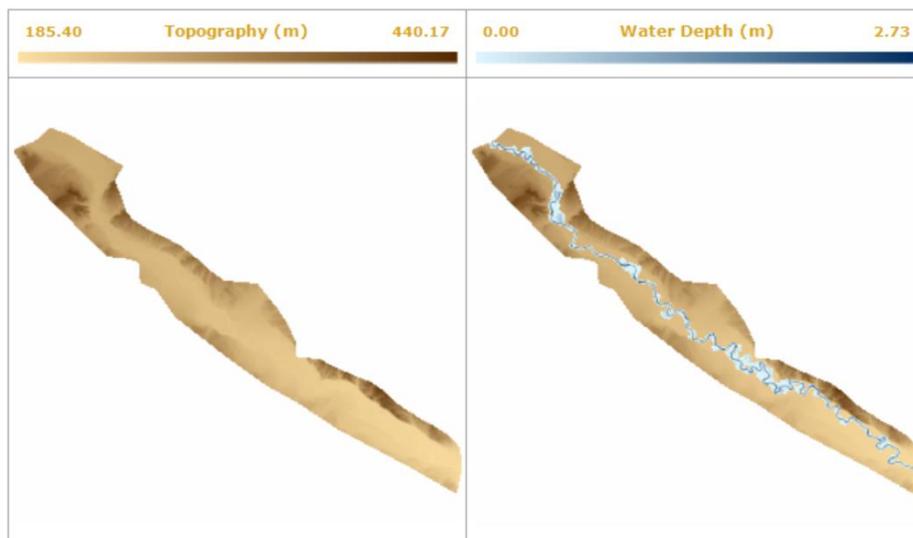


Figura 3.1: Formato de salida de resultados del programa Riverflow2D en forma de mapas 2D.

Primero, el programa te devuelve una imagen como la de la figura 3.1, que no es más que un mapa 2D del terreno. En la parte izquierda, encontramos el mapa “desnudo” del suelo, que representa el modelo de elevaciones del terreno. En la parte derecha, encontramos el mismo mapa característico del terreno, pero con información de la extensión de la lámina de agua. La zona más profunda (con mayor altura de agua) viene representada en un tono azul más oscuro, y las zonas en las que la altura de agua es menor vienen representadas en un tono azul más claro. Podemos observar en esta figura que el cauce del río transporta mucho más volumen de agua que el que va inundando las llanuras a ambos lados del cauce. También se puede desbordar y vemos que el río no se extiende por igual a ambos lados del cauce; ya que depende de la topografía del terreno.

Análisis de hidrogramas

Este efecto, se produce independientemente de la duración del hidrograma, para caudales máximos mayores a $1000\text{m}^3/\text{s}$. En las figuras 3.2 y 3.3 se muestran las imágenes correspondientes a la extensión de la lámina de agua con un caudal de $1000\text{m}^3/\text{s}$ y $4000\text{m}^3/\text{s}$ respectivamente, y una duración de hidrograma de 20 días.

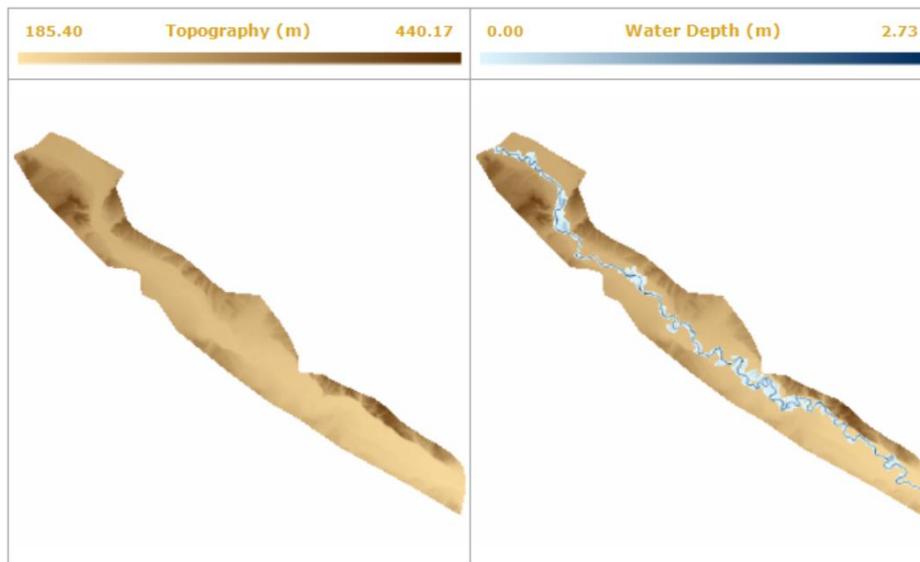


Figura 3.2: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el tiempo final de la simulación para un hidrograma de caudal pico $1000\text{m}^3/\text{s}$ y duración 20 días.

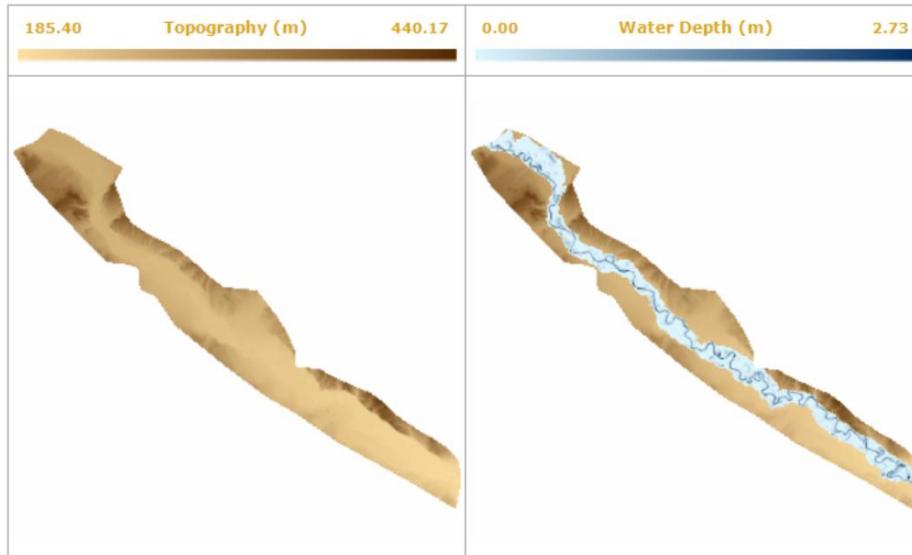


Figura 3.3: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el tiempo final de la simulación para un hidrograma de caudal pico $4000\text{m}^3/\text{s}$ y duración 20 días.

Para hidrogramas con caudales máximos de $100\text{m}^3/\text{s}$ y $500\text{m}^3/\text{s}$, no se produce un desbordamiento del río, es decir, la imagen que se obtiene no muestra que la lámina de agua se haya expandido. Ver figura 3.4. y 3.5.

Análisis de hidrogramas



Figura 3.4: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el tiempo final de la simulación para un hidrograma de caudal pico $100\text{m}^3/\text{s}$ y duración 20 días.

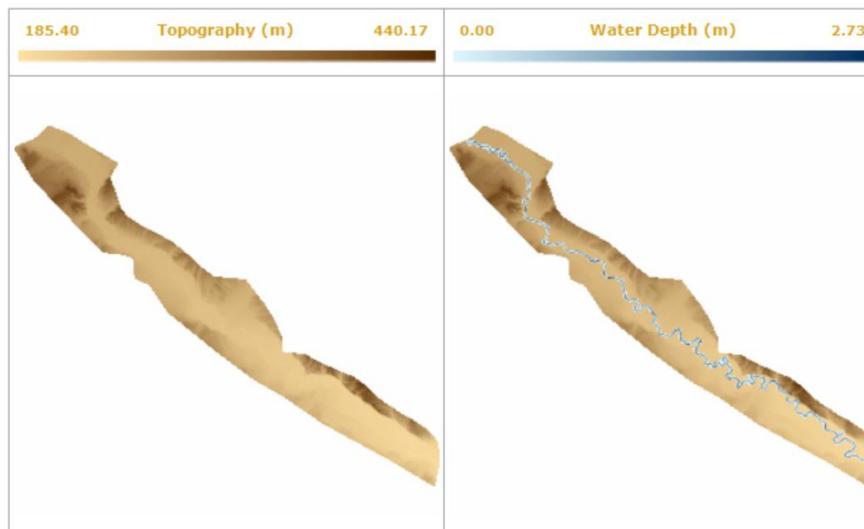


Figura 3.5: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el tiempo final de la simulación para un hidrograma de caudal pico $500\text{m}^3/\text{s}$ y duración 20 días.

El programa también proporciona información en términos de hidrograma, como se va a ilustrar a continuación, en la figura 3.6. En el eje de abscisas, se mide el tiempo, en días (empezando desde 1, y no desde 0), y en el eje de ordenadas, se mide el caudal, en m^3/s .

Análisis de hidrogramas

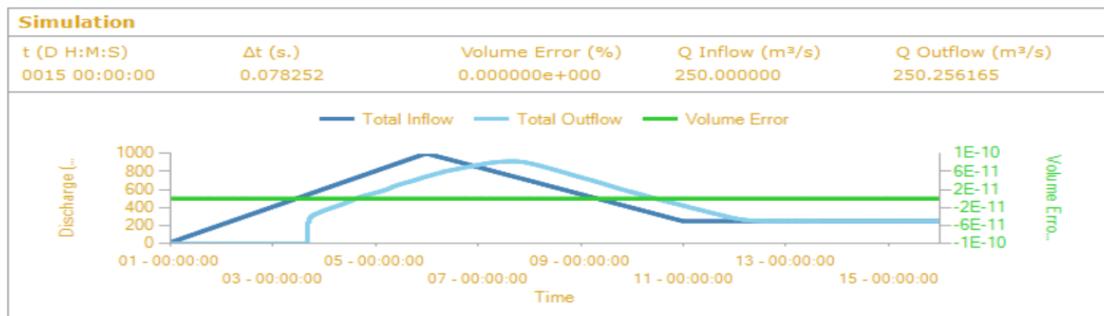


Figura 3.6: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y error de masa (verde).

Para interpretar la figura 3.6, lo primero es aclarar la leyenda de colores, y saber lo que significa cada curva y cada color. El azul oscuro (Total Inflow) representa el hidrograma, o curva de evolución temporal de caudal a la entrada del dominio de cálculo, o lo que es lo mismo, la condición de contorno introducida aguas arriba. El azul más claro (Total Outflow) refleja la evolución temporal del caudal a la salida del dominio, es decir, el hidrograma resultante aguas abajo. La línea verde de la gráfica hace referencia al error de masa, que, como podemos observar, se mantiene constante durante la simulación, con un valor prácticamente igual a cero y nos da idea de la precisión del método numérico. También nos sirve para detectar si existe algún error en el cálculo.

En la parte superior de la figura 3.6 se muestran valores correspondientes al tiempo total de la simulación, al paso de tiempo usado para el cálculo, que no es constante, al error de masa (en porcentaje), e, información del caudal de entrada y de salida en el tiempo final de la simulación; con lo cual se puede comprobar que ha llegado al estacionario (Qinflow, Qoutflow).

La forma del hidrograma obtenido a la salida del dominio es muy irregular e inestable cuando se trata de duraciones pequeñas del hidrograma introducido a la entrada. Por ejemplo, ver figura 3.7 y 3.8

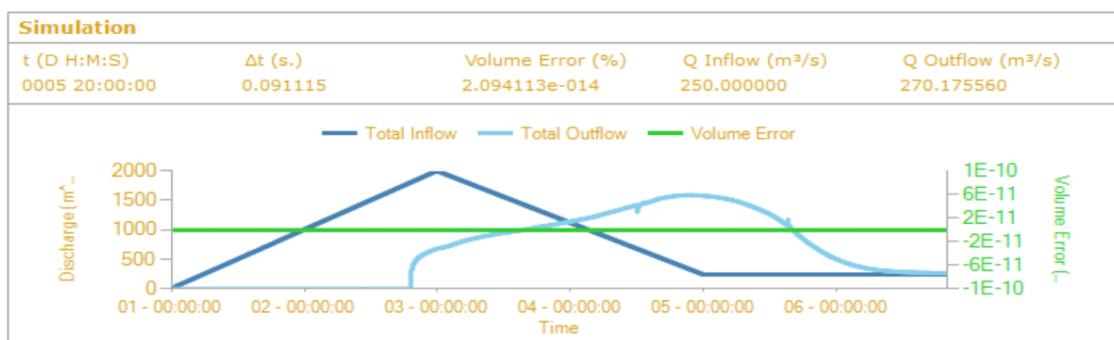


Figura 3.7: Evolución temporal del caudal de entrada de duración 4 días y caudal pico de 2000m³/s, del caudal de salida y error de masa.

Análisis de hidrogramas

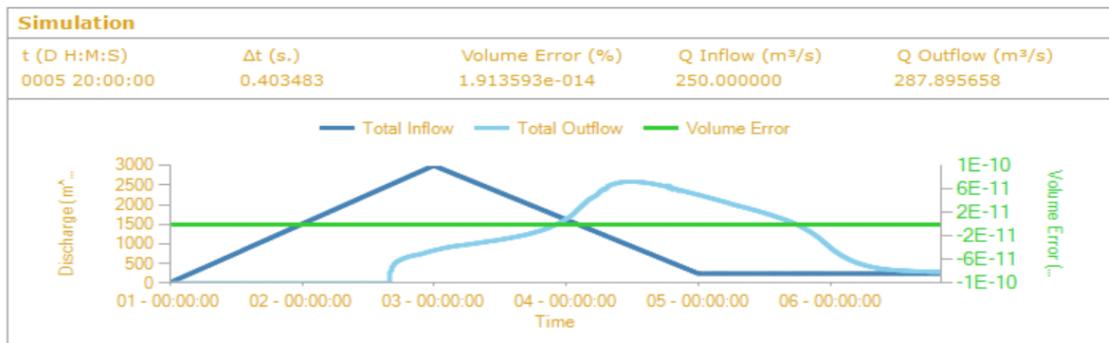


Figura 3.8: Evolución temporal del caudal de entrada de duración 4 días y caudal pico de 3000m³/s, del caudal de salida y error de masa.

En estos casos, el caudal máximo con el que llega a Zaragoza, no es el mismo que el registrado a la entrada del dominio, en Castejón, esto es, desciende de manera considerable, siendo de 1611m³/s para el caso de 2000m³/s, y de 2575 m³/s para el caso de 3000m³/s.

Sin embargo, para casos en los que, la pendiente del hidrograma es más suave (tiempo de crecida largo), o lo que es lo mismo, hidrogramas con mayor duración, vemos cómo el hidrograma resultante se reproduce de manera muy similar al introducido como condición de contorno aguas arriba. De esta manera, es mucho más fácil, prever el comportamiento de una avenida. El problema es, que, en estos casos, el caudal máximo que alcanza el hidrograma a la entrada del dominio, va a llegar con el mismo valor a Zaragoza. Ver figuras 3.9 y 3.10.

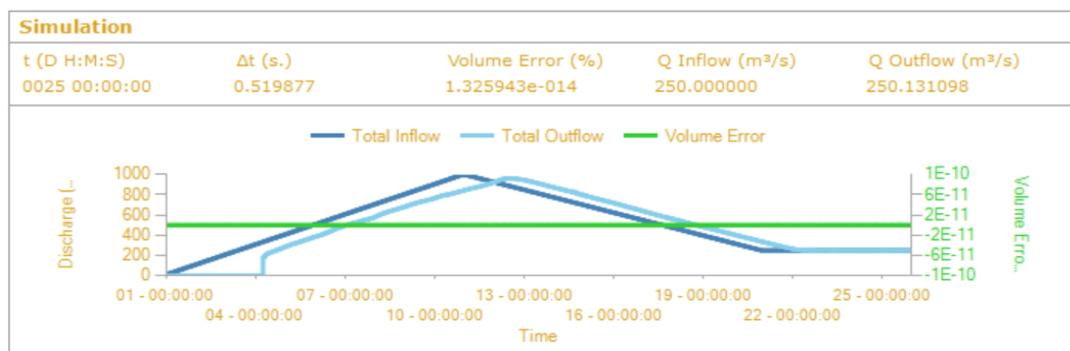


Figura 3.9: Evolución temporal del caudal de entrada de duración 20 días y caudal pico de 1000m³/s, del caudal de salida y error de masa.

Análisis de hidrogramas

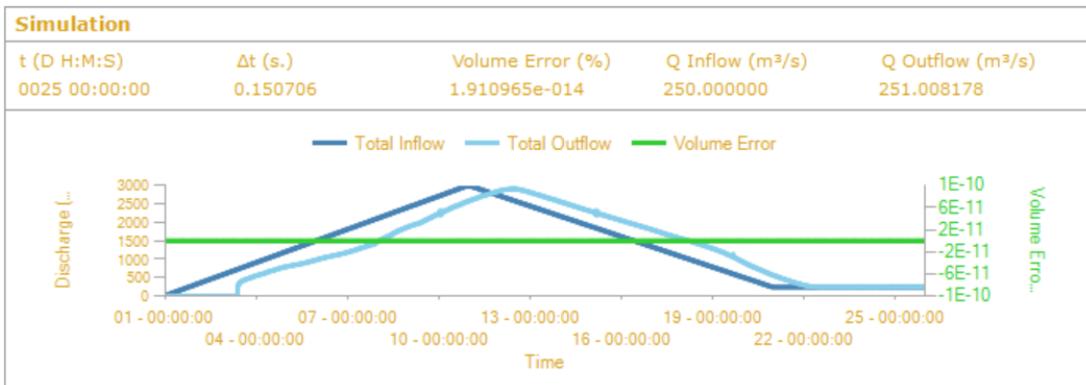


Figura 3.10: Evolución temporal del caudal de entrada de duración 20 días y caudal pico de 3000m³/s, del caudal de salida y error de masa.

Por otra parte, independientemente de la duración del hidrograma de entrada, podemos establecer relaciones entre otras variables, como por ejemplo la duración, el caudal máximo, ambos a la salida, y el tiempo de llegada.

En las figuras 3.11 y 3.12 se representa la evolución temporal del caudal de entrada de 100m³/s y 4000m³/s respectivamente, con una duración de 4 días. En este caso la duración del hidrograma de salida para el caudal de 100m³/s es de 44 horas, mientras que, para el caudal de 400m³/s, es de 99 horas.

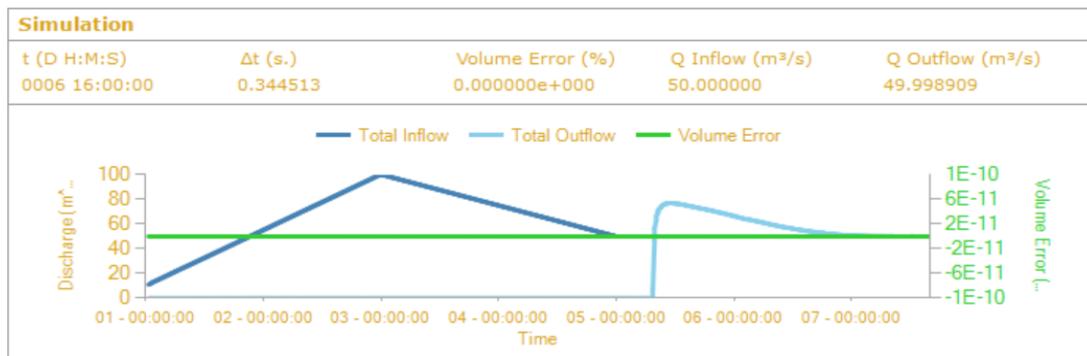


Figura 3.11: Evolución temporal del caudal de entrada de duración 4 días y caudal pico de 500m³/s, del caudal de salida y error de masa.

Análisis de hidrogramas

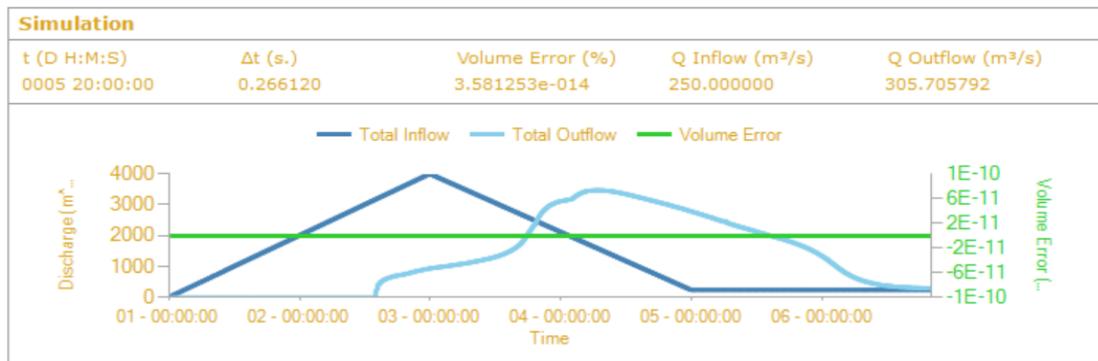


Figura 3.12: Evolución temporal del caudal de entrada de duración 4 días y caudal pico de 4000m³/s, del caudal de salida y error de masa.

Respecto al tiempo de llegada, vamos a reflejar los hidrogramas correspondientes a caudales pico de 500m³/s y 3000m³/s, en el caso de una duración de hidrograma de entrada de 10 días, y mostramos cómo cambian estos tiempos de llegada conforme variamos el caudal. En la figura 3.13, correspondiente a un caudal pico de 500m³/s, el tiempo de llegada del caudal a Zaragoza, es de casi 80 horas; sin embargo, en la figura 3.14, que hace referencia al hidrograma de entrada con caudal pico de 3000m³/s, el tiempo de llegada es de casi 50 horas.

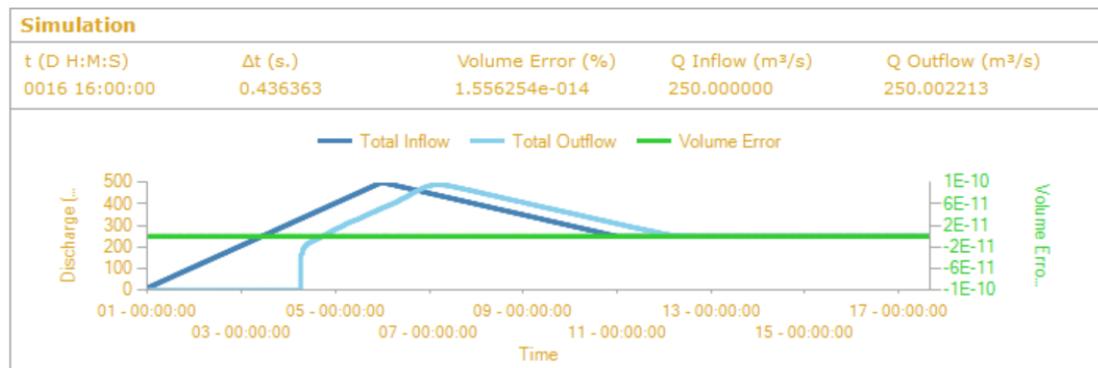


Figura 3.13: Evolución temporal del caudal de entrada de duración 10 días y caudal pico de 500m³/s, del caudal de salida y error de masa.

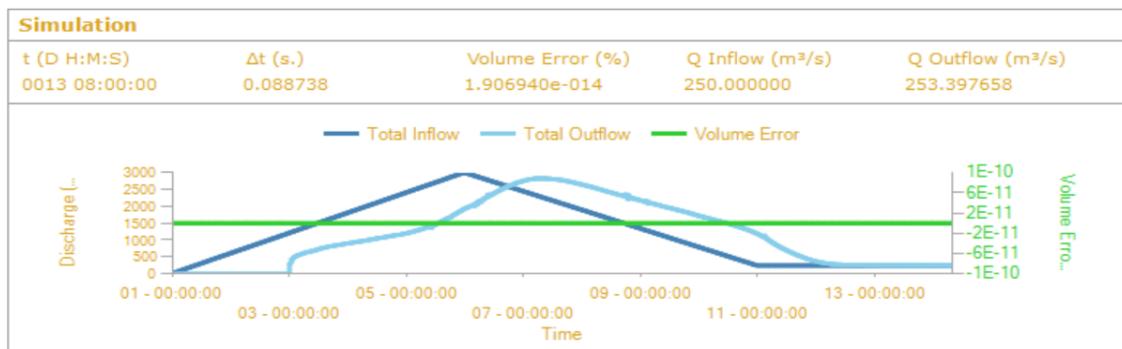


Figura 3.14: Evolución temporal del caudal de entrada de duración 10 días y caudal pico de 3000m³/s, del caudal de salida y error de masa.

Análisis de hidrogramas

En la figura 3.15, se muestra el hidrograma de entrada correspondiente a un caudal pico de $1000\text{m}^3/\text{s}$, en el caso de una duración de 4 días; y en la figura 3.16, se representa el hidrograma de entrada correspondiente a un caudal máximo de $1000\text{m}^3/\text{s}$ (el mismo), pero éste, en el caso de una duración de 20 días (5 veces mayor).

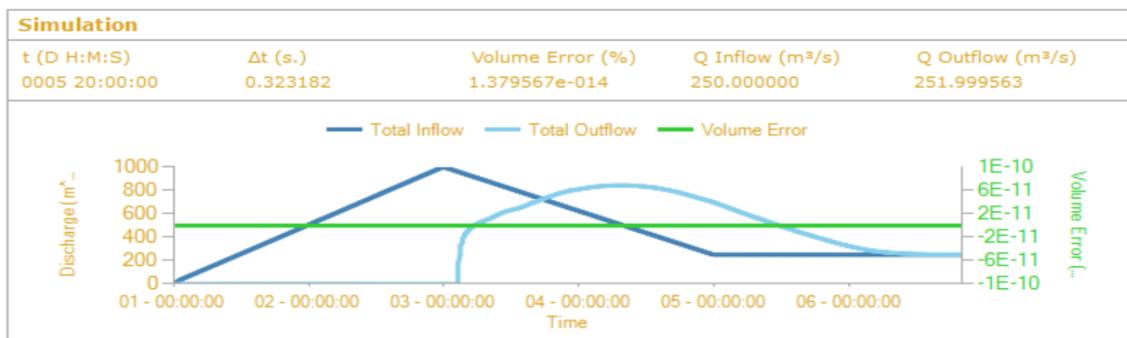


Figura 3.15: Evolución temporal del caudal de entrada de duración 4 días y caudal pico de $1000\text{m}^3/\text{s}$, del caudal de salida y error de masa.

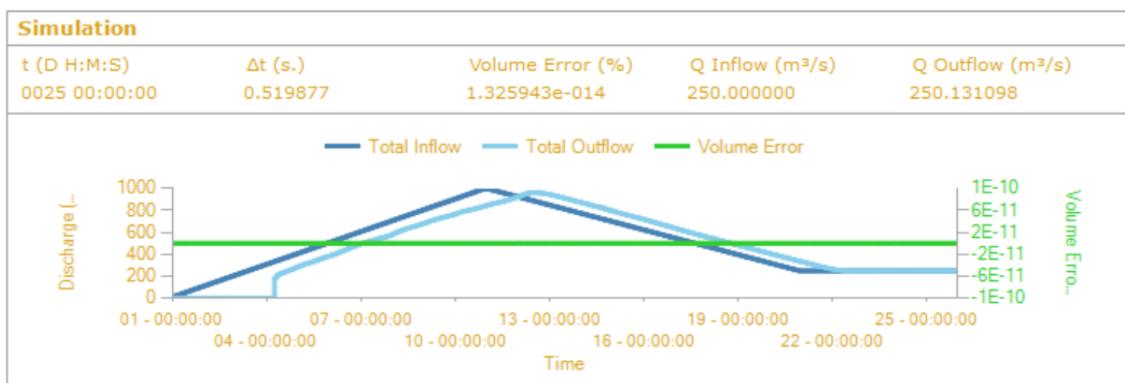


Figura 3.16: Evolución temporal del caudal de entrada de duración 20 días y caudal pico de $1000\text{m}^3/\text{s}$, del caudal de salida y error de masa.

La comparación de estas dos últimas figuras muestra la dependencia del caudal pico que llega en el hidrograma de salida con la duración del hidrograma de entrada. Cuanto mayor sea la duración del hidrograma de entrada, pendiente más suave del tiempo de crecida, mayor es el caudal pico que llega a Zaragoza; y además conserva la misma forma que tenía en la cabecera. Sin embargo, si la pendiente del tiempo de crecida es pronunciada, se puede observar que el hidrograma a la salida cambia completamente suavizando su curva y laminando el caudal pico que llega a la salida.

En la tabla 3.1 se recogen los datos más importantes relativos a caudal pico y duración del hidrograma de entrada; lo mismo en la salida, así como el tiempo de llegada del hidrograma desde la entrada hasta la salida de las 18 simulaciones realizadas.

Análisis de hidrogramas

Q pico entrada (m ³ /s)	Duración hidrograma entrada (h)	Tiempo de llegada del hidrograma desde la entrada hasta la salida (h)	Q pico salida (m ³ /s)	Duración hidrograma salida (h)
100	96	103	77	40
500	96	52,5	471	66
1000	96	50,8	852	79
2000	96	45	1611	91
3000	96	40	2575	95
4000	96	38,1	3517	99
100	240	130,5	98,5	153,5
500	240	78,7	492	190
1000	240	64	933	204
2000	240	53,5	1912	218
3000	240	48	2895	224
4000	240	45	3965	228,5
100	480	161,3	100	357,2
500	480	95	500	412
1000	480	78	1000	426
2000	480	63	2000	447
3000	480	57	3000	452
4000	480	49,5	4000	458,5

Tabla 3.1: datos más relevantes obtenidos de las simulaciones, tanto en el hidrograma de entrada como en el de salida

Las dos primeras columnas representan los valores relevantes de los hidrogramas teóricos que hemos introducido a la entrada del dominio (aguas arriba): caudal pico y duración. Este último, como ya se ha explicado previamente en la introducción, será el doble del tiempo de crecida.

Las tres últimas columnas contienen la información del hidrograma de salida, o la curva de evolución temporal del caudal a su llegada al puente de Santiago (final del dominio). Primero nos interesa el tiempo que tarda en llegar el agua a la salida del dominio desde su inicio, esto es el tiempo de llegada. También nos interesa el caudal máximo con el que llega la avenida a la salida del dominio, caudal pico de salida. Y, por último, la duración del hidrograma de salida.

A continuación, vamos a mostrar gráficamente los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas correspondientes a la tabla 3.1.

Para un valor fijado de duración del hidrograma de entrada, vemos que la duración del hidrograma de salida crece conforme el caudal pico en la entrada es mayor (figuras 3.11 y 3.12). Además, este crecimiento es más pronunciado cuando nos movemos en valores de caudales bajos entre 100 y 1000m³/s. A partir de este último valor prácticamente la duración del

Análisis de hidrogramas

hidrograma de salida es el mismo. También se puede observar que conforme la duración del hidrograma de entrada se hace mayor, la curva se abre más. Esto significa que en el caso de caudales bajos de gran duración a la entrada, la duración del hidrograma de salida se hace aún mayor que con duraciones cortas en la entrada.

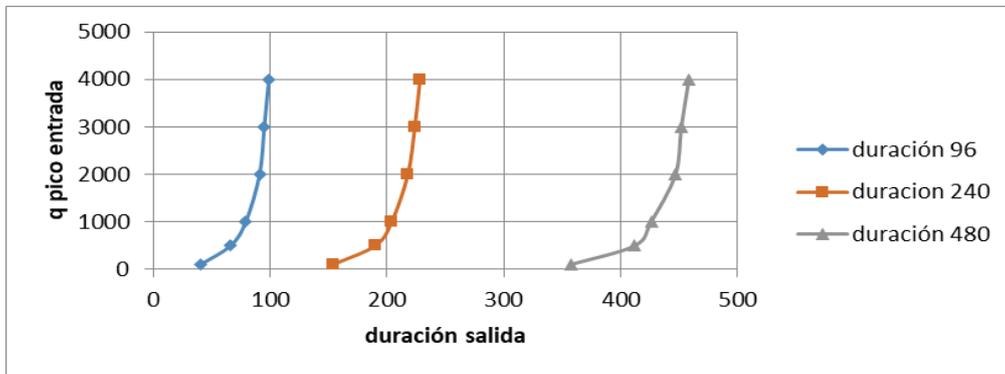


Figura 3.17: Variación de la duración del hidrograma de salida en función del caudal pico de entrada, para duraciones del hidrograma de entrada de 96, 240 y 480 horas.

Representamos también, en la figura 3.18, la duración del hidrograma de salida en función de la duración del hidrograma de entrada para todos los picos máximos de caudal de entrada simulados. La tendencia en este caso es de aumento lineal de la duración del hidrograma de salida con la duración del hidrograma de entrada, independientemente del caudal pico que se tenga en la entrada.

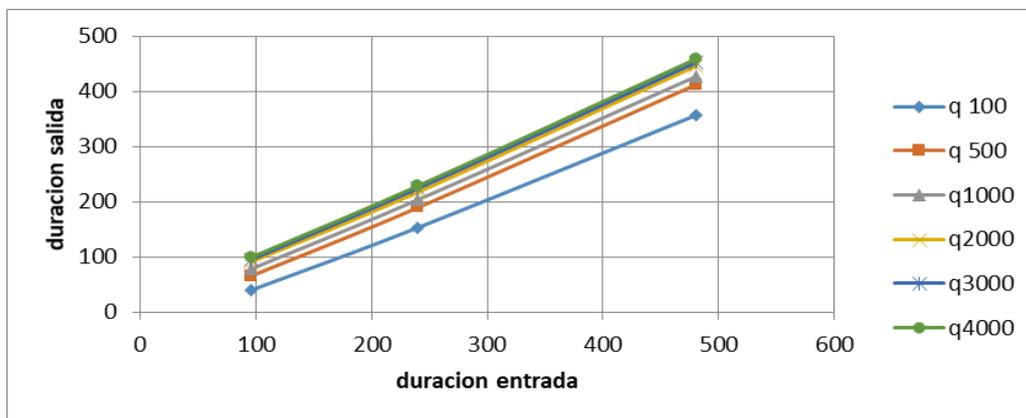


Figura 3.18: Variación de la duración del hidrograma de salida en función de la duración del hidrograma de entrada para caudales de 100, 500, 1000, 2000, 3000 y 4000 m³/s.

En la figura 3.19 se observa la variación del tiempo de llegada del hidrograma de entrada a la salida en función del caudal máximo del hidrograma de entrada. A simple vista parece que la tendencia es la misma, de decrecimiento casi exponencial, para cualquier valor de duración del hidrograma de entrada; pero se observa que hay diferencias cuando la duración del hidrograma de entrada es corta (tiempo de crecida del hidrograma de entrada acusado), produciéndose casi un mínimo en la curva para un valor de caudal pico en la entrada de 500m³/s.

Análisis de hidrogramas

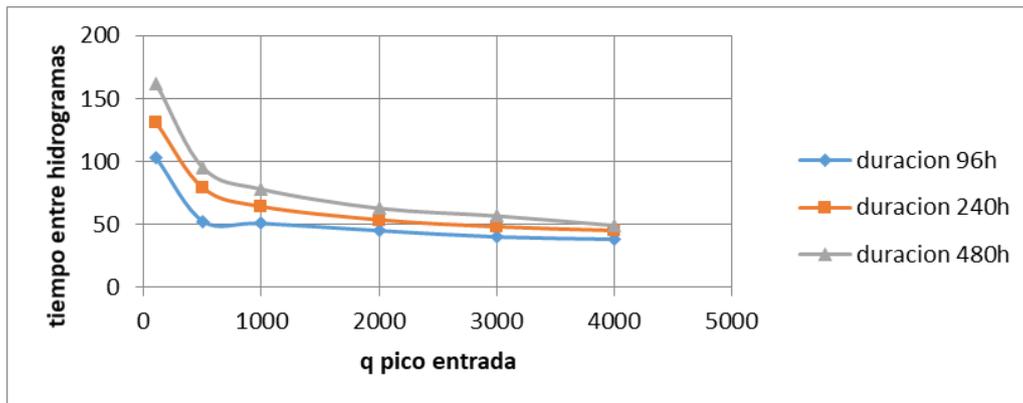


Figura 3.19: Variación del tiempo de llegada del hidrograma de entrada a la salida en función del caudal pico de entrada, para una duración del hidrograma de entrada de 96, 240 y 480 horas.

Sin embargo, si analizamos la relación entre el tiempo de llegada del hidrograma de entrada a la salida y la duración del hidrograma de entrada, observamos que, se tiene una función de crecimiento lineal en todos los casos (para cualquier caudal pico de entrada). A este respecto, hay que hacer otra observación y es que para valores de caudal pico de entrada bajos (sin desbordamiento del cauce), y a igualdad de duración del hidrograma de entrada (cualquiera que éste sea), el tiempo que le cuesta al hidrograma llegar a la salida es mucho mayor que para valores de caudal pico mayores a $500\text{m}^3/\text{s}$. También es cierto, que aún cumpliéndose este comportamiento, conforme la duración del hidrograma de entrada aumenta, las rectas se van separando un poco y el tiempo entre hidrogramas es mayor. Ver figura 3.20.

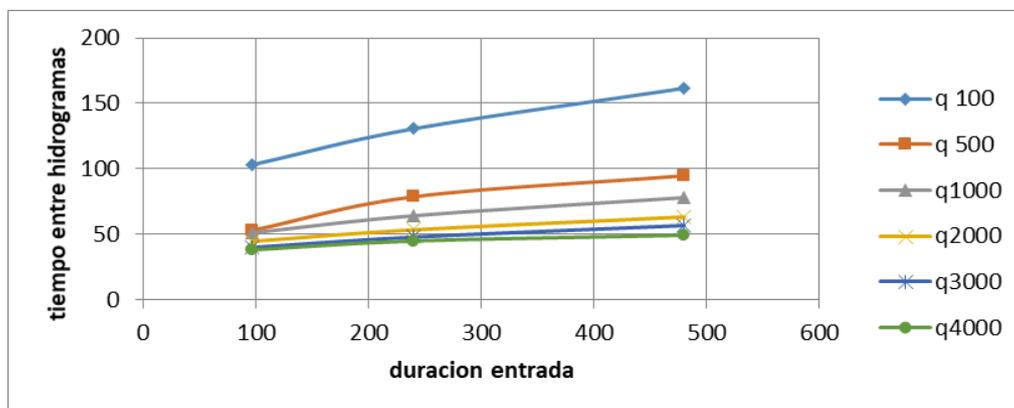


Figura 3.20: Variación del tiempo de llegada del hidrograma de entrada a la salida en función de la duración del hidrograma de entrada, para caudales pico del hidrograma de entrada de 100, 500, 1000, 2000, 3000 y $4000\text{m}^3/\text{s}$.

En último caso, se analiza el caudal pico que llega a la salida según el caudal pico que presenta el hidrograma de entrada para las diferentes duraciones que se tienen del hidrograma de entrada (96, 240 y 480 horas). Ver figura 3.21. El comportamiento también es lineal creciente, conforme el caudal pico en la entrada es mayor, el caudal pico en la salida también; aunque esta linealidad se rompe si la duración del hidrograma de entrada es pequeña (96 horas); es decir tiempo de crecida alto o pendiente pronunciada.

Análisis de hidrogramas

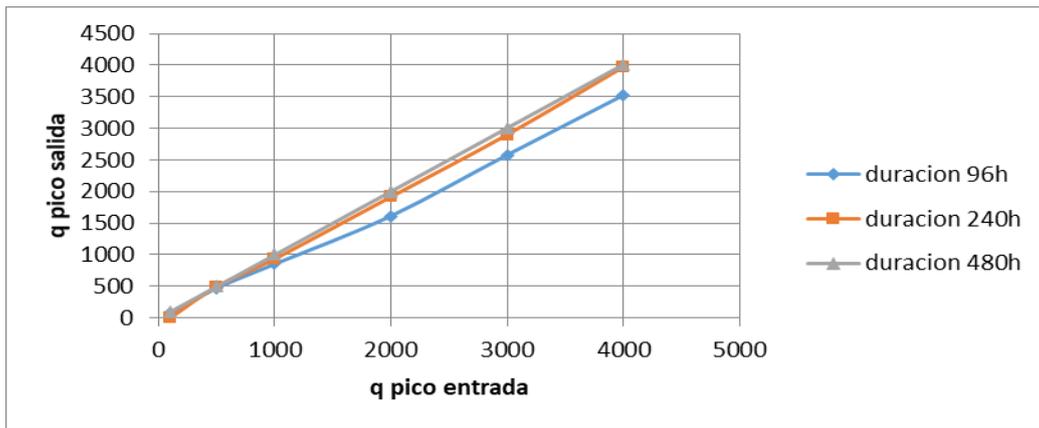


Figura 3.21: Variación del caudal máximo alcanzado en la salida en función del caudal máximo impuesto a la entrada, para duración del hidrograma de entrada de 96, 240 y 480 horas.

4. Conclusiones

Con el objetivo de mejorar la predicción de avenidas en el tramo medio del río Ebro se han realizado 18 simulaciones variando los parámetros que definen un hidrograma teórico (caudal pico y duración). Las conclusiones específicas que se pueden obtener a partir del análisis de los resultados de estas simulaciones son:

- Para un valor fijado de duración del hidrograma de entrada, la duración del hidrograma de salida crece conforme el caudal pico en la entrada es mayor. Este crecimiento es más pronunciado cuando nos movemos en valores de caudales bajos entre 100 y 1000m³/s.
- La duración del hidrograma de salida respecto a la duración del hidrograma de entrada sigue una tendencia de crecimiento lineal, independientemente del caudal pico que se tenga en la entrada
- La variación del tiempo de llegada del hidrograma de entrada a la salida en función del caudal máximo del hidrograma de entrada sigue un comportamiento de decrecimiento casi exponencial, para cualquier valor de duración del hidrograma de entrada; aunque se observa que hay diferencias cuando la duración del hidrograma de entrada es corta.
- La relación entre el tiempo de llegada del hidrograma de entrada a la salida y la duración del hidrograma de entrada aumenta de forma lineal para cualquier caudal pico de entrada.
- Por último, el caudal pico que llega a la salida depende del caudal pico que presenta el hidrograma de entrada de forma también lineal creciente; aunque esta linealidad se rompe si la duración del hidrograma de entrada es pequeña; es decir tiempo de crecida alto o pendiente pronunciada.

En cuanto al manejo de programas, se ha tenido alguna dificultad con el programa QGIS, a la hora de tratar previamente los datos, en el sentido de unir, recortar y juntar los MDT necesarios para realizar el trabajo (ver Anexo B). En Riverflow2D, las dificultades han estado relacionadas con el tiempo de simulación, es decir, debemos suponer un tiempo suficiente para que el hidrograma resultante, aguas abajo, alcance el estado estacionario de nuevo.

Como trabajo futuro se propone realizar más simulaciones con más valores intermedios de variación de los parámetros característicos de los hidrogramas y con todos ellos realizar un análisis estadístico que pueda ser útil en la predicción de avenidas. También se podrían analizar hidrogramas de entrada que presentaran dos picos de valores máximos diferentes; ya que este patrón también se suele dar en la realidad. Desde el punto de vista de la simulación numérica, habría que tener en cuenta el refinamiento de la malla en el cauce para proporcionar resultados más precisos, sobre todo cuando se tienen

Análisis de hidrogramas

caudales bajos; e incluir la aportación de los afluentes al caudal que transporta el río.

5. Bibliografía

- [1] Brufau y P. García-Navarro. Conceptos básicos de hidrodinámica de superficie. Copy Center (Zaragoza), 2001
- [2] Echeverribar, I., Estudio de soluciones para mitigar inundaciones en el tramo medio del río Ebro mediante simulación numérica. <http://zaguan.unizar.es>, 2015
- [3] Instituto Geológico y Minero de España, Consorcio de Compensación de Seguros. Análisis del impacto de los riesgos geológicos en España. Evaluación de pérdidas por terremotos e inundaciones en el periodo 1987-2001 y estimación para el periodo 2004-2033. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, 2004.
- [4] Lacasta, A., Morales-Hernández, M., Murillo, J., García-Navarro, P. 2014. An optimized GPU implementation of a 2D free surface simulation model on unstructured meshes. *Advances in engineering software*, 78, 1-15. doi:10.1016/j.advengsoft.2014.08.007.
- [5] L. Berga. Las inundaciones en España. La nueva Directiva Europea de Inundaciones. *Revista de Obras Públicas*, 158 (3520): 7-18, 2011
- [6] M. González-Sanchis, J. Murillo; B. Latorre, F. Comín, y P. García-Navarro. Transient Two-Dimensional Simulation of Real Flood Events in a Mediterranean Floodplain. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*, 138: 629-641, 2012.
- [7] Morales-Hernández, M., García-Navarro, P., Burguete, J., Brufau, P. 2013. A conservative strategy to couple 1D and 2D models for shallow water flow simulation. *Computers & Fluids*, 81, 26-44. doi:10.1016/j.compfluid.2013.04.001.
- [8] Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Guía Metodológica para el Desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011.
- [9] Roe, P. L. 1981. Approximate Riemann solvers, parameter vectors and difference schemes. *Journal of Computational Physics*, 43(2), 357-372. doi:10.1016/0021-9991(81)90128-5.
- [10] V.Te Chow, Hidraulica de canales abiertos, Mc Graw – Hill, 1994

Anexo A. MODELO MATEMÁTICO: ECUACIONES DEL FLUJO DE SUPERFICIE LIBRE EN 2D

Resumimos a continuación las hipótesis fundamentales del modelo de aguas poco profundas que describen el comportamiento del flujo superficial y que, por tanto, se usan para modelizar el flujo en ríos y canales.

- Las ondas que se producen en la superficie varían suavemente, lo cual es equivalente a decir que la distribución de presiones en la vertical es hidrostática o que la aceleración en la vertical es pequeña.
- Las pérdidas por fricción en flujo transitorio no difieren mucho de las mismas pérdidas en flujo estacionario.
- La pendiente promedio del fondo del cauce es tan pequeña que la tangente puede ser aproximada por el ángulo y las medidas en el fondo son equivalentes a medidas en el plano horizontal excepto cuando las pendientes son fuertes.

En muchas situaciones reales todas estas hipótesis son válidas en la mayor parte del dominio a estudiar excepto en regiones donde pueden no cumplirse como es el caso de los saltos hidráulicos. En tal caso, las ecuaciones diferenciales dejan de ser válidas, pero no ocurre así con las relaciones integrales de conservación de masa y cantidad de movimiento. El problema discreto se resuelve buscando una solución que satisfaga globalmente las leyes físicas en esa zona y que conecte bien con las zonas en las que sí se cumplen las hipótesis del modelo alcanzando así un resultado satisfactorio. En los casos que se van a simular no se producen este tipo de discontinuidades en el flujo y es por ello que las hipótesis de partida van a ser válidas.

El promedio en la vertical de las ecuaciones del flujo de superficie libre en 2D bajo las hipótesis del modelo de aguas poco profundas conduce a una versión muy común del sistema de ecuaciones:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} + c_f u \sqrt{u^2 + v^2} + hv \tau \nabla^2 u \quad (\text{A.2})$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hv^2}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} + c_f v \sqrt{u^2 + v^2} + hv \tau \nabla^2 v \quad (\text{A.3})$$

La ecuación (A.1) representa la ecuación de conservación de masa para un fluido en 2D. El primer sumando indica la variación temporal del calado (h) y los otros dos representan la variación del caudal unitario en x y en y . (hu y hv respectivamente), siendo (u,v) las componentes (x,y) del vector velocidad del flujo en 2D.

Las ecuaciones (A.2) y (A.3) hacen referencia a la conservación de cantidad de movimiento en x y en y , respectivamente. A la izquierda de la igualdad encontramos la variación temporal de la cantidad de movimiento y los

Análisis de hidrogramas

términos de flujo convectivo. Al otro lado de la igualdad, el primer sumando representa la presión hidrostática y la pendiente del fondo, teniendo en cuenta que $H=h+z$, nivel de la superficie libre, donde z es la cota del fondo. El siguiente término indica el rozamiento del fluido con el terreno que proviene del tensor de esfuerzos viscosos, y que a continuación lo relacionaremos con el coeficiente de rozamiento de Manning, y por último, el siguiente término representa la viscosidad debida a la turbulencia, que en este caso se desprecia, ya que dentro de las hipótesis del flujo de superficie libre en 2D se asume que el flujo es totalmente turbulento, que está totalmente desarrollada y este término se tiene en cuenta dentro del término de pérdidas de energía por fricción.

El coeficiente c_f que aparece en el término de fricción se expresa habitualmente en términos del coeficiente de rugosidad de Manning n o de Chézy [Chow 1959],

$$c_f u \sqrt{u^2 + v^2} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (\text{A.4})$$

$$c_f v \sqrt{u^2 + v^2} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (\text{A.5})$$

El coeficiente de rugosidad n en la práctica se determina a partir de medidas experimentales o se estima a partir de valores que ya han sido recogidos en tablas. La ecuación de Manning aquí descrita (A.4) y (A.5) es de naturaleza empírica y por tanto es el resultado de un proceso de ajuste a una curva de medidas experimentales. La primera dificultad que surge a la hora de usar este coeficiente de rugosidad es la precisión con la que ha sido estimado. El coeficiente n depende en principio del número de Reynolds del flujo, de la rugosidad de los contornos y de la forma geométrica de la cuenca. La rugosidad de la superficie del contorno representa un valor crítico a la hora de estimar n , con valores pequeños si el material es fino y valores altos en el caso contrario. El valor de n también debe de dar cuenta de la vegetación retardando el flujo y proporcionando valores altos de n , dependiendo también de la altura de agua. El modelo de fricción dado por (A.4) y (A.5) se basa en la teoría de capa límite estacionaria sobre pared rugosa.

Para más información consultar Chow [Chow 1959] que presenta una tabla muy extensa de los valores que puede tomar este coeficiente para cada tipo de situación y una discusión de sus limitaciones.

Anexo B. Pre-proceso de datos: QGIS

Antes de realizar la simulación de los hidrogramas de avenida sobre el tramo medio del cauce del río Ebro, es necesario preparar los datos que el programa Riverflow2D necesita para proceder al cálculo. Esta tarea es extensa y laboriosa y consume gran parte del tiempo de realización del TFG. En principio se dispone de varios archivos, correspondientes a las cuadrículas cartográficas de la zona, obtenidos del IGN⁹, en formato ráster. Estos rásteres se han unido mediante el programa QGIS, como se explica más adelante, para formar un solo ráster de toda la zona. En la figura X.X aparecen algunas de las cuadrículas cartográficas de las descargadas por las que pasa el tramo medio del río Ebro.

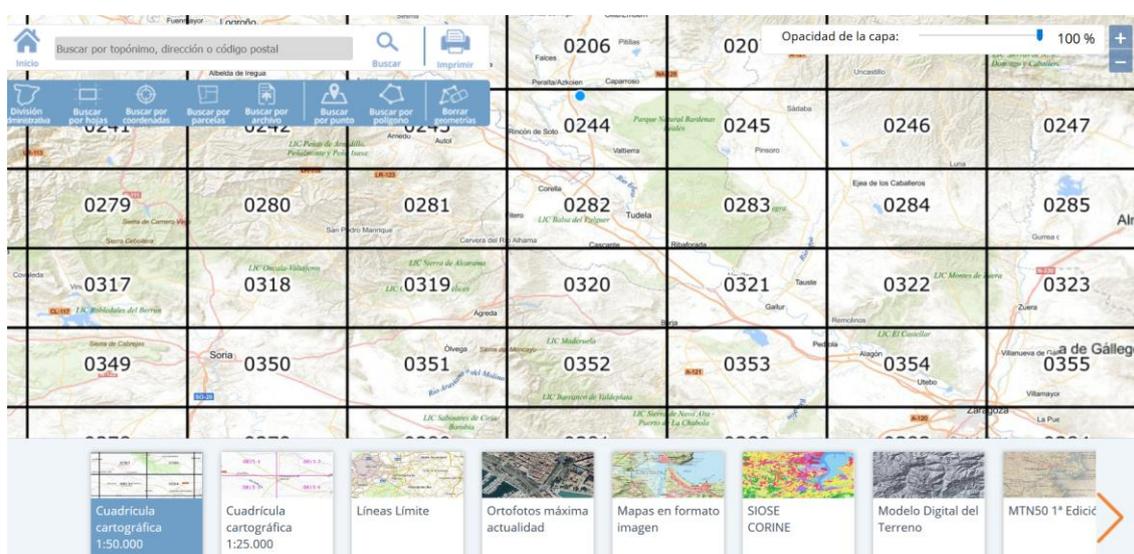


Figura B.1: Cuadrículas cartográficas del IGN.

Para obtener un modelo digital del terreno (MDT) fiable, se hace uso de la tecnología LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) para medir las elevaciones del terreno, que consiste en utilizar un láser de alta precisión para obtener una imagen de la superficie a estudiar, realizando mediciones de la coordenada z, que representa la altura del terreno, respecto de un plano del suelo (x,y). A nivel almacenamiento, los MDT se pueden registrar en formato ráster, que consiste en una matriz regular cuadrada equi-espaciada de elevaciones z en el plano (x,y), dando el espaciado de esta matriz y un punto de referencia.

Los datos cartográficos vienen dados con los valores de cota correspondiente a edificios, puentes, vegetación etc. eliminados y formar así un MDT que representa sólo la topografía del terreno. El problema de este método es que no recoge la topografía del fondo del cauce debido a que la lámina de agua dificulta la toma de datos. Por ello, se han llevado a cabo trabajos

⁹ <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>

Análisis de hidrogramas

batimétricos a lo largo del río, que consisten en utilizar la misma tecnología, pero desde la superficie del río, midiendo la cota del fondo del cauce.

La reconstrucción del cauce, a partir de estas medidas batimétricas, se puede realizar de diferentes maneras según el método de interpolación que se utilice, pero para el presente trabajo se nos ha dado el tramo de cauce correspondiente ya interpolado (figura B.2).

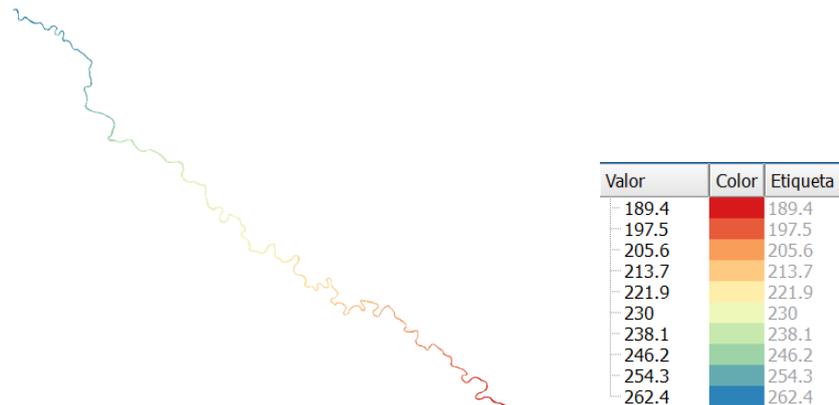


Figura B.2: Mapa de valores de la cota del fondo del cauce, una vez interpolado a partir de las secciones transversales medidas.

Por último, juntando el ráster del MDT original del IGN con la información del terreno y la reconstrucción del cauce a partir de las secciones batimétricas, se obtiene una información cartográfica continua de todo el dominio.

En las siguientes imágenes (figura B.3 y figura B.4) se describe el proceso a seguir, en QGIS, para unir, de manera correcta, los archivos correspondientes a los MDT del terreno.

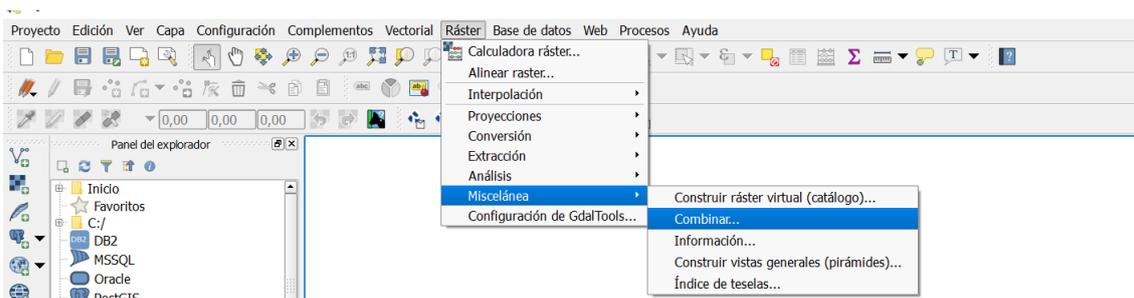


Figura B.3: Ventana del programa QGIS que indica cómo unir los rásteres del MDT.

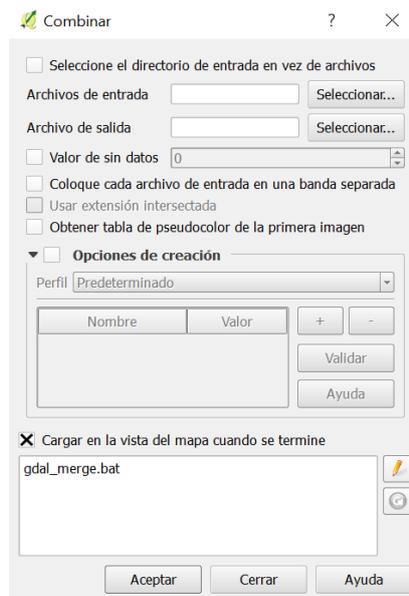


Figura B.4: Opciones del programa QGIS para unir los rásteres del MDT.

Una vez que hemos generado el ráster de la topografía del terreno, nos disponemos a realizar el mismo procedimiento para el tramo del río, ya que éste no aparece en el ráster generado anteriormente. De esta forma, tendremos dos archivos ráster: uno para el cauce y otro para el terreno.

Para obtener un solo ráster con la información del terreno y del río, debemos recortar el margen izquierdo y derecho del ráster que contiene la información solo del terreno, para poder unirlos posteriormente (de la misma manera que se ha realizado antes), con el ráster del cauce interpolado a partir de las secciones batimétricas.

Para recortar un tramo del ráster del terreno, en este caso las orillas del río, en QGIS, debemos seguir el procedimiento explicado a continuación.

Lo primero es añadir la capa ráster, de la cual, queremos recortar cierta zona, ver figura B.5

Análisis de hidrogramas

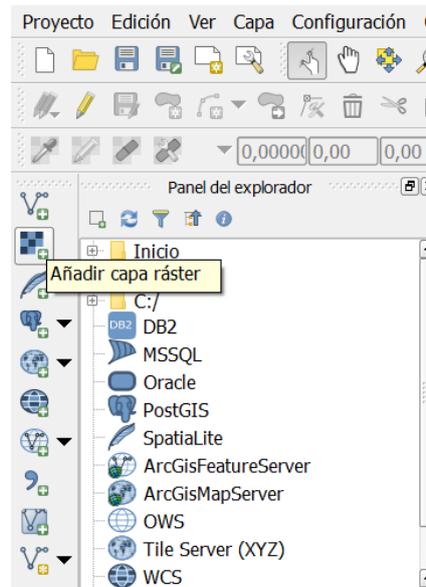


Figura B.5: Ventana de QGIS que indica dónde se carga el fichero ráster del MDT.

Es necesario comprobar que la herramienta "GdalTools" está activada. Esto se hace, acudiendo a la pestaña complementos>administrar e instalar complementos, ver figura B.6.

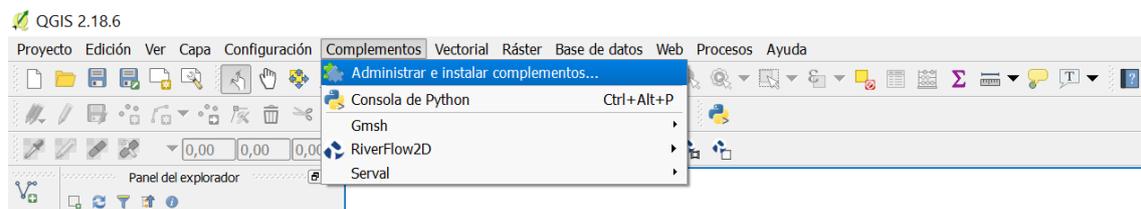


Figura B.6: Ventana de QGIS con los complementos que se van a necesitar.

Luego, para designar la zona que queremos recortar, seleccionamos la opción "nueva capa de archivo shape", ver figura B.7.

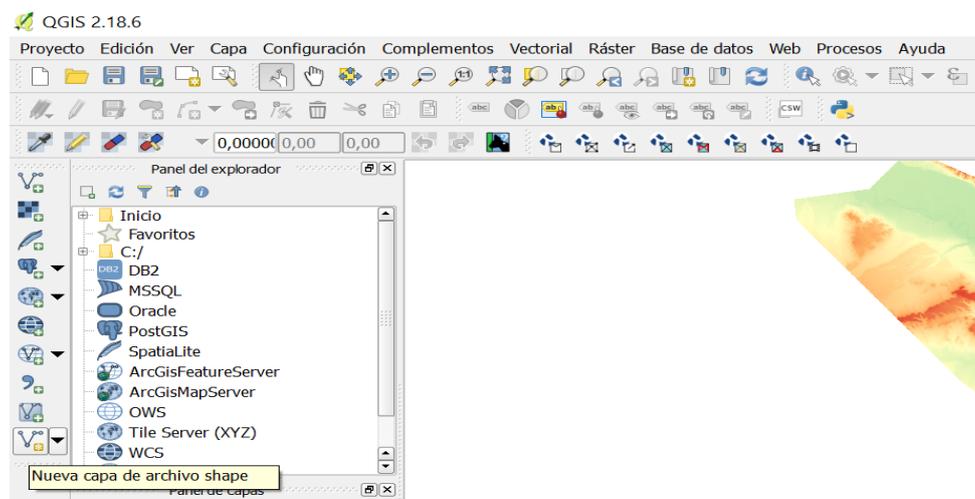


Figura B.7: Ventana de QGIS que indica dónde se crea una nueva capa.

Análisis de hidrogramas

Al seleccionar esta opción, aparece una tabla como la de la figura B.8.

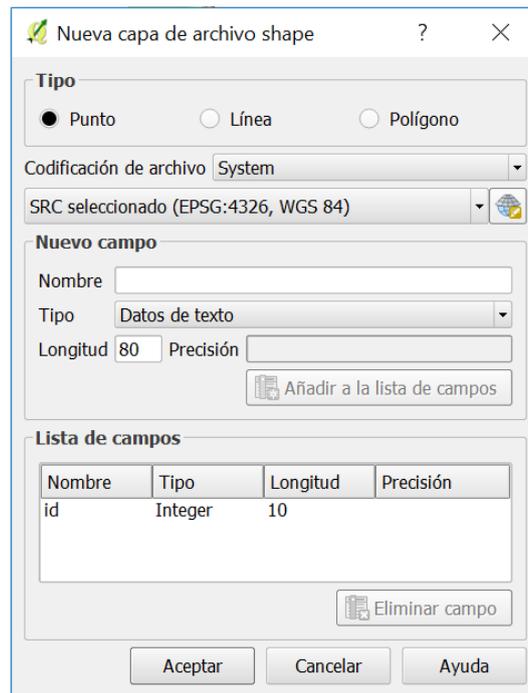


Figura B.8: Ventana de QGIS donde se muestran las opciones para crear la nueva capa.

En esta nueva ventana emergente, se selecciona el tipo “polígono”, se da nombre a la nueva capa ráster que vamos a generar, y en “tipo”, escogemos la opción “número decimal”. Una vez que aceptamos, nos aparecerá una nueva capa ráster, con el nombre que hemos asignado.

Ahora nos disponemos a realizar un polígono en la zona que vamos a recortar. Seleccionando la nueva capa ráster, le damos al símbolo del lápiz, “conmutar edición”, y un poco más a la derecha, “añadir objeto espacial”. Ver figura B.9.



Figura B.9: Ventana de QGIS donde se selecciona añadir un objeto espacial (polígono).

Una vez que se ha finalizado de trazar el polígono, se le da al botón derecho, y por defecto sale una pantalla en la que hay que introducir un valor “id”, en este caso, se ha puesto 1, y se acepta. Volviendo a pinchar en el lápiz, “conmutar edición”, se guardan los cambios realizados.

Ahora tenemos que ir a la pestaña ráster>extracción>clipper, ver figura B.10.

Análisis de hidrogramas

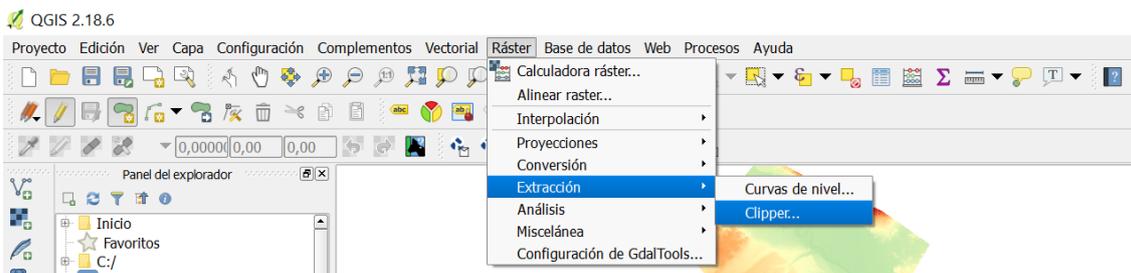


Figura B.10: Ventana de QGIS desde la que se recorta el polígono dibujado anteriormente sobre el ráster.

Notar que estas opciones estarán disponibles sólo si hemos activado el complemento "GdalTools".

Al pulsar en la opción "clipper", aparecerá una ventana como la siguiente (figura B.11):

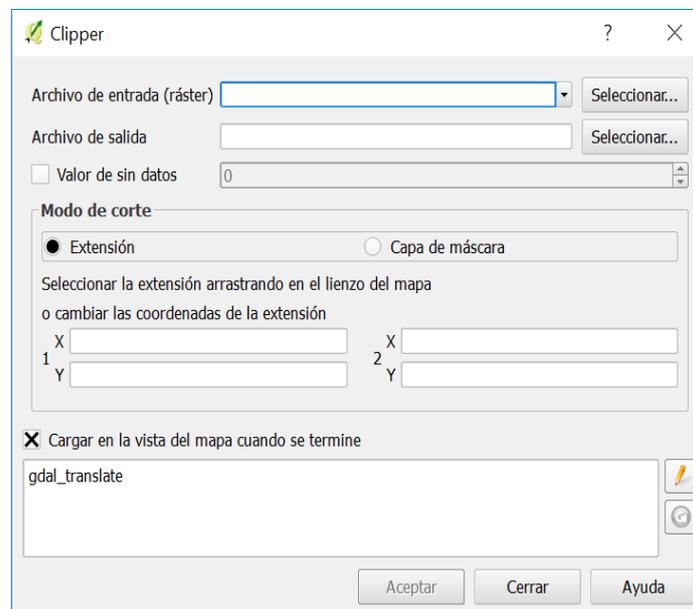


Figura B.11: Ventana de QGIS con las opciones de "clipper" con la que vamos a recortar una parte del ráster.

En archivos de entrada, se selecciona el ráster original, del cual se ha recortado un tramo. En archivos de salida, se selecciona la carpeta donde se va a guardar el nuevo archivo ráster, así como el nombre del fichero de salida. Seleccionamos en modo de corte, "capa de máscara" y asignamos el polígono recién recortado. Seleccionamos "valor de sin datos" y dejamos 0 por defecto.

Por tanto, realizamos esto dos veces, obteniendo así, dos capas ráster (una para el margen izquierdo, y otro para el derecho). Seguimos el primer procedimiento realizado en este anexo (unir archivos en QGIS), con el archivo del cauce y de las orillas, y obtenemos una sola capa ráster con la información que necesitamos para llevar a cabo este trabajo.

Análisis de hidrogramas

Una vez que disponemos de la información necesaria para poder trabajar en QGIS, iniciamos un nuevo proyecto, y seleccionamos la opción “nuevo proyecto Riverflow 2D”, ver figura B.12; nos aparecerá una ventana como la de la figura B.13.

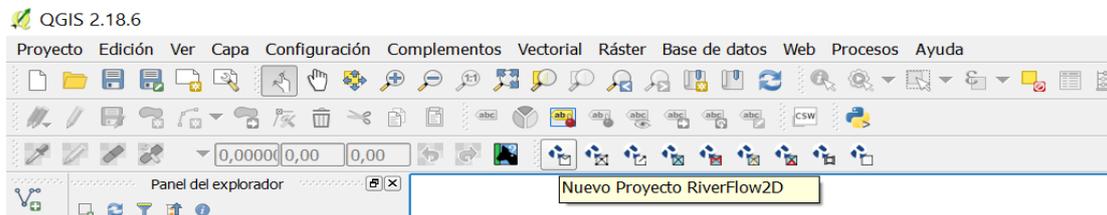


Figura B.12: Ventana de QGIS en la que se inicia el nuevo proyecto.



Figura B.13: Ventana de QGIS en la que se seleccionan las capas que se utilizarán en el nuevo proyecto.

En este trabajo, no se ha creado ninguna capa adicional, ver figura B.13; ya que se pueden cargar también más adelante si fuese necesario. La proyección, para este proyecto, es la indicada en el ráster, y debe coincidir con el Sistema de Referencia de Coordenadas (SRC) de las demás capas del proyecto.

Al aceptar, aparecen las capas, que, por defecto, crea QGIS, ver figura B.14.

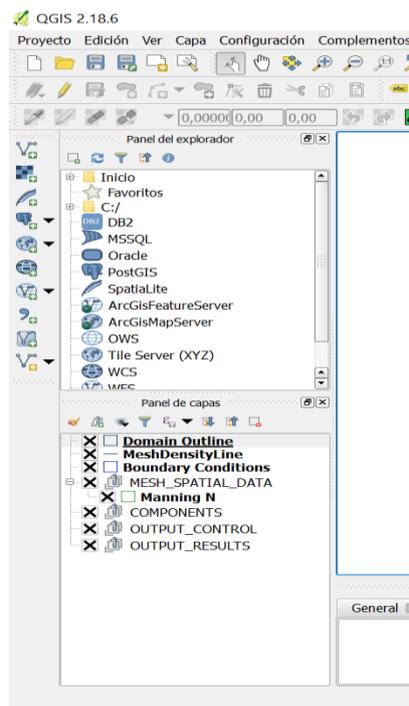


Figura B.14: Ventana de QGIS donde se muestran las capas que aparecen por defecto en el programa.

El primer paso es añadir el ráster que hemos generado (igual que se ha hecho al comienzo de este Anexo) con la información del terreno y del cauce. Para ello, vamos a la opción "añadir capa ráster", ver figura B.5.

Comprobamos que el SRC del ráster sea el mismo que el del proyecto. Sólo tenemos que darle al botón derecho en la capa ráster que tenemos, e ir a la opción "establecer SRC de la capa".

Lo primero, una vez que ya tenemos el mapa en forma de ráster, es delimitar el dominio, e introducir el valor que deseamos para el tamaño de longitud del lado de la celda en la que posteriormente nuestro dominio será discretizado. Para ello, con la capa "Domain Outline" seleccionada, vamos al icono del lápiz ("conmutar edición") y dibujamos un polígono, con la opción "añadir objeto espacial", ver figura B.9.

Una vez que trazamos el polígono, pinchamos en el botón derecho, y aparece una pantalla en la que introducimos el valor del tamaño de longitud del lado de la celda. En este trabajo hemos dotado a la celda de un tamaño de 25m para todo el dominio. Para finalizar, volvemos a darle al icono del lápiz, y se guardan los cambios.

Luego, con la capa aún seleccionada, le damos a la opción "generar malla Trimesh"; de esta manera, si tenemos activado el complemento Gmsh, se generan dos nuevas capas (en el panel de capas): Trimesh y Trimesh_Point, que hacen referencia a las celdas, y a los centros de cada celda (donde se recoge la información, en términos de velocidades y calado).

Análisis de hidrogramas

Fijar un tamaño de celda u otro, afecta a la precisión de los resultados de las variables que se obtienen de las simulaciones, así como al tiempo que tarda en llevarse a cabo dicha simulación.

El siguiente paso es introducir el coeficiente de Manning, o de rugosidad del suelo. El método a seguir, es el mismo que el realizado en el paso anterior. Esta vez, con la capa de "Manning" seleccionada, trazamos un polígono (igual que antes) de forma que éste sea más grande que el dominio, es decir, que englobe al polígono del dominio. Al final, le damos al botón derecho, y aparecerá una ventana emergente, en la que debemos introducir el coeficiente de Manning que deseemos; en este caso 0.03.

En la figura B.15 se muestra el ráster del terreno, con los polígonos de definición del dominio de cálculo y Manning ya delimitados (negro y verde respectivamente).

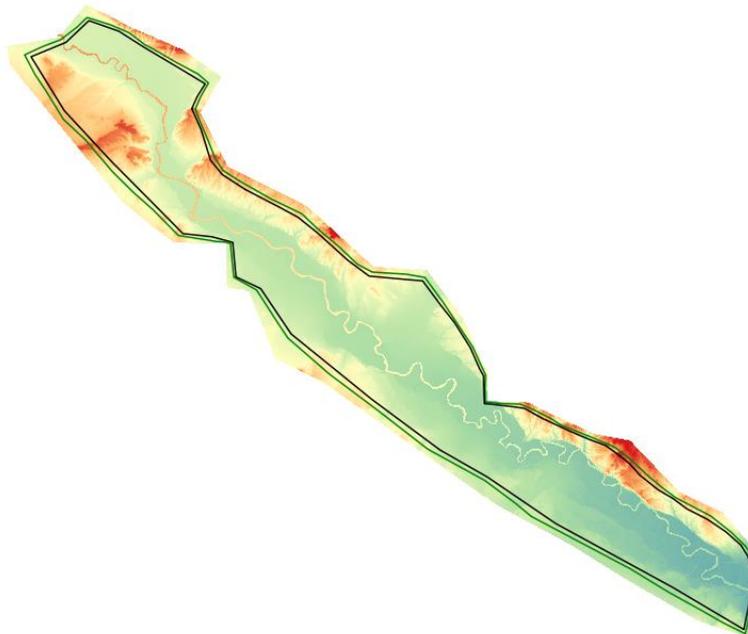


Figura B.15: Delimitación del dominio de cálculo y del polígono para definir el coeficiente de rozamiento de Manning.

En la figura B.16 se muestra un tramo del dominio a estudiar con la malla generada. (La zona negra es la malla generada, donde no se aprecian las celdas, debido a su pequeño tamaño)

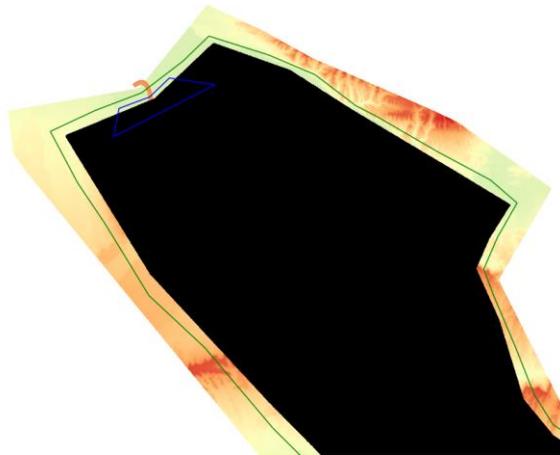


Figura B.16: Trozo de malla generada en QGIS, correspondiente al primer tramo de la zona de estudio.

Para las condiciones de contorno, con la capa “Boundary Conditions” seleccionada, trazamos un polígono (de la misma manera que hemos realizado anteriormente) que englobe el tramo del cauce con las celdas que necesitemos donde se van a imponer las condiciones de contorno. Realizamos este procedimiento dos veces, a la entrada del dominio (condición de contorno aguas arriba), y a la salida de éste (condición de contorno aguas abajo).

Al finalizar de trazar el polígono, saldrá una ventana como la siguiente (ver figura B.17)

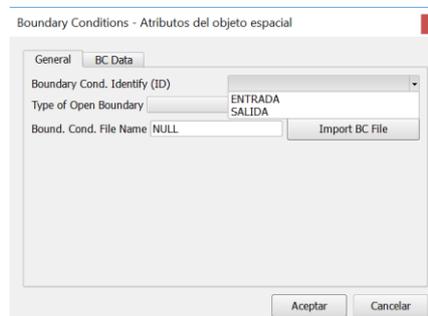


Figura B.17: Ventana de QGIS donde se muestran las opciones para introducir las condiciones de contorno (tanto a la entrada como a la salida).

Para el polígono delimitado a la entrada del dominio, seleccionamos la opción “entrada”, luego le damos a la opción “Descarga vs Tiempo”, y, por último, seleccionamos el archivo con los valores del hidrograma de entrada correspondiente, ver figura B.18

Análisis de hidrogramas

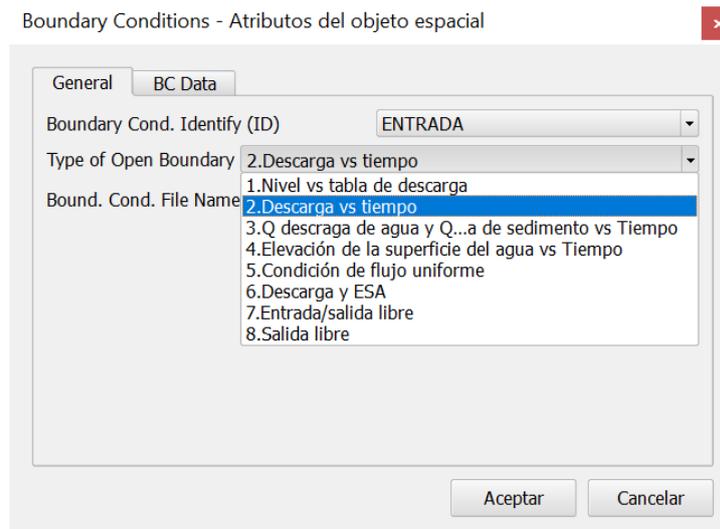


Figura B.18: opciones a marcar, en QGIS, para introducir condición de contorno aguas arriba.

En el caso del polígono dibujado a la salida del dominio, le damos a la opción “salida”, luego a “Condición de flujo uniforme”, y por último, introducimos el valor de pendiente del fondo, en este caso 0.005, ver figura B.19

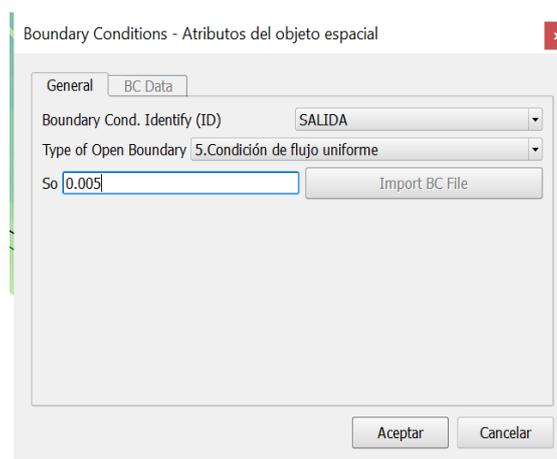


Figura B.19: opciones a marcar, en QGIS, para introducir las condiciones de contorno aguas abajo.

En la figura B.20 se muestra el polígono delimitado a la entrada del dominio como condición de contorno aguas arriba.

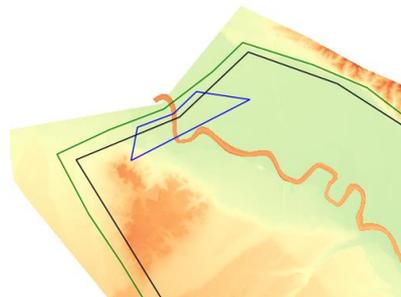


Figura B.20: ejemplo del polígono trazado para introducir la condición de contorno aguas arriba.

Análisis de hidrogramas

Una vez que hemos realizado todos estos pasos, podemos llevar a cabo la simulación con el programa Riverflow2D. Primero le damos, en QGIS, a la opción “exportar a Riverflow2D”, ver figura B.21



Figura B.21: opción de QGIS para exportar los resultados y realizar la simulación correspondiente en Riverflow2D.

De esta manera, aparece una ventana en la que, primero, seleccionamos el ráster original con la información del terreno y del cauce (escenario donde se va a producir la simulación); y, en segundo lugar, damos nombre y seleccionamos la carpeta donde queremos que nos genere los archivos correspondientes a la simulación. El único requisito a cumplir es, que en la carpeta donde se van a generar todos los archivos de la simulación debe estar el archivo correspondiente al hidrograma de entrada que ha sido introducido como condición de contorno aguas arriba.

Por último, aparecerá una ventana como la de la figura B.22. El tiempo que introduciremos para la simulación será clave para la duración de ésta. En el Anexo D, se explica más detalladamente el tiempo introducido en cada simulación, así como el tiempo que le ha costado al programa realizarla.

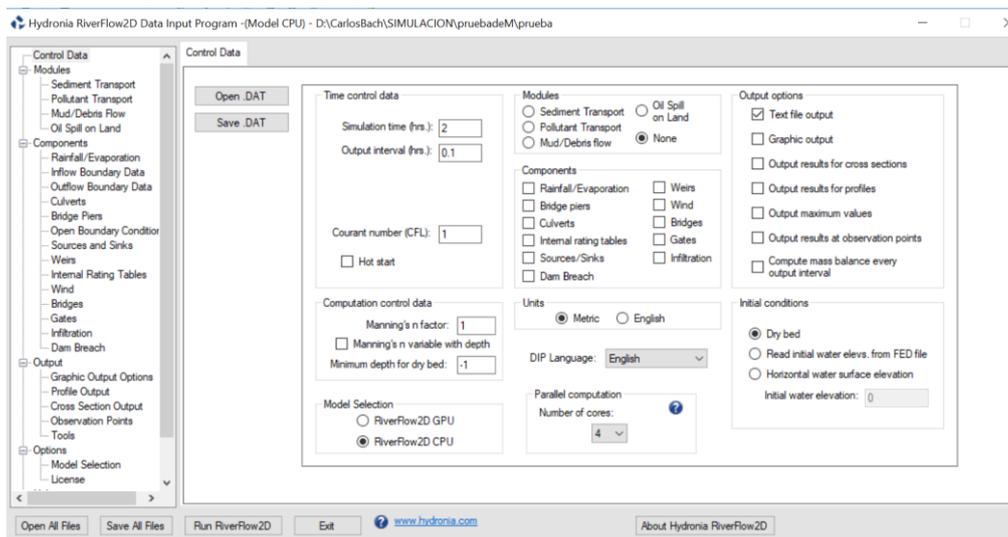


Figura B.22: ventana emergente de Riverflow2D, donde se introducen los últimos valores y condiciones adecuadas al caso de estudio.

Análisis de hidrogramas

Es en esta figura B.22, en la parte inferior derecha, se introducen las condiciones iniciales, en este caso, como ya hemos explicado en el capítulo 2, suponemos que el río parte de lecho seco (dry bed).

Anexo C. Método de cálculo del programa RiverFlow2D

El estudio de simulación de hidrogramas teóricos se realiza con este programa de cálculo, en el cual se resuelven las ecuaciones del flujo de superficie libre 2D, como hemos dicho en el Anexo A, y que se pueden escribir en su forma compacta como

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{E}(\mathbf{U}) = \mathbf{S}(\mathbf{U}) \quad (\text{C.1})$$

donde $\mathbf{U}=(h, hu, hv)$ \mathbf{T} es el vector de variables conservadas, $\mathbf{E}=(\mathbf{F},\mathbf{G})$, representa los flujos de dichas variables de la forma $\mathbf{F}=(hu, hu^2+g\frac{h^3}{2}, huv)$ y $\mathbf{G}=(hu, huv, hv^2+g\frac{h^3}{2})$ \mathbf{T} , g representa la aceleración de la gravedad ($g=9.81 \text{ m/s}^2$); y por último, \mathbf{S} es el término fuente, donde se encuentra la pendiente del fondo S_0 y la pérdida de energía por rozamiento debida a la fricción del flujo con el terreno por el que circula S_f (Brufau y García-Navarro, 2001) siendo

$$\mathbf{S}=(0, gh(S_{0x}-S_{fx}), gh(S_{0y}-S_{fy}))\mathbf{T} \quad (\text{C.2})$$

con

$$S_{0x} = -\frac{\partial z_b}{\partial x} \quad S_{0y} = -\frac{\partial z_b}{\partial y} \quad S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (\text{C.3})$$

donde n es el coeficiente de rozamiento de Manning que introduce la información sobre la rugosidad del terreno por el que circula el flujo y z la cota del fondo.

Su resolución se lleva a cabo con un método numérico de volúmenes finitos explícito descentrado de primer orden en espacio y tiempo mediante el cual se calcularán las variables h , hu y hv en los centros de las celdas de la malla. Para ello, se integra la ecuación (C.1) en un volumen fijo Ω :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \mathbf{U} d\Omega + \oint_{\partial\Omega} \mathbf{E} \mathbf{n} dl = \int_{\Omega} \mathbf{S} d\Omega \quad (\text{C.4})$$

donde $\partial\Omega$ y $\mathbf{n}=(n_x, n_y)$ son el contorno y el vector unitario normal al volumen Ω , respectivamente. Asumiendo una representación discreta constante de las variables conservadas y una discretización explícita del término temporal, la Ecuación (C.4) se puede escribir como

$$A_i \frac{(\mathbf{U}_i^{n+1} - \mathbf{U}_i^{n-1})}{\Delta t} + \sum_{K=1}^{NE} (\mathbf{E}_n - \overline{\mathbf{S}})_k \mathbf{1}_k \quad (\text{C.5})$$

donde NE es el número de celdas vecinas de la celda i y A_i representa el área de dicha celda. A través de la linealización de Roe (Roe, 1981) es posible obtener una matriz Jacobiana del flujo \mathbf{E}_n de dimensiones $m \times m$ ($m=3$ para el caso 2D) cuyos valores propios λ_{km} y vectores propios \mathbf{e}_m (Morales et al., 2013) permiten escribir la actualización en cada celda para cada instante de tiempo:

Análisis de hidrogramas

$$U_i^{n+1} = U_i^n - \frac{\Delta t}{A_i} \sum_{k=1}^{NE} \sum_{m=1}^3 [(\tilde{\lambda} - \tilde{\gamma}_k^m) l_k]^n \quad (C.6)$$

donde l_k representa la longitud de la pared k y $\tilde{\gamma}_k^m$ expresa de manera compacta las contribuciones de flujos y términos fuente en dicha pared k (Morales et al., 2013). El significado de la expresión (C.6) es simple: las variables conservadas en cada celda i en el instante de tiempo siguiente $n+1$ dependen directamente del valor que tenían en el instante anterior de tiempo, n , y de las contribuciones provenientes de las celdas colindantes a través de los lados, k , de la misma. Por último, debido al carácter explícito del método utilizado es necesaria una condición de estabilidad para el paso de tiempo. Para ello se restringe con la condición de CFL de manera que

$$\Delta t = \text{CFL} \min_{k,m} \frac{\delta x_k}{\lambda_k^m} \quad (C.7)$$

$$\text{donde } \delta x_k = \min(\chi_i, \chi_j) \quad \chi_i = \frac{A^i}{\max_{k=1,NE} l_k} \quad (C.8)$$

El número CFL toma valores entre 0 y 1 y se mantiene constante durante toda la simulación para garantizar la estabilidad numérica. En este caso se escogió CFL=0.9. Este método numérico se ha implementado sobre GPU para ganar rapidez de cálculo (Lacasta et al., 2014).

Anexo D. Resultados numéricos

En este apartado se presentan, gráficamente, los resultados obtenidos de las 18 simulaciones realizadas, tanto en forma de mapas 2D de extensión de la lámina de agua sobre el MDT; como de los hidrogramas resultantes respecto a los de entrada. También se exponen los tiempos que le ha costado al programa ejecutar cada caso. El tiempo de duración de la simulación está indicado en la parte superior de cada figura, como ya se ha explicado en la memoria.

Vamos a diferenciar los casos en función de la duración del hidrograma de entrada.

CASO 1

Este caso se corresponde con una simulación de 4 días de duración del hidrograma de entrada, con un tiempo de crecida de 2 días hasta alcanzar el caudal pico. Vamos a distinguir los diferentes caudales pico que se han estudiado:

- 100m³/s: Tiempo de simulación de 4 horas y 26 minutos.

En la figura D.1 se muestra a la derecha la extensión de la lámina de agua sobre el MDT. Para un caudal tan bajo, se observa que el flujo no ha desbordado el cauce en ningún punto. Se trata de un caudal que no supone ninguna amenaza para las llanuras de inundación.

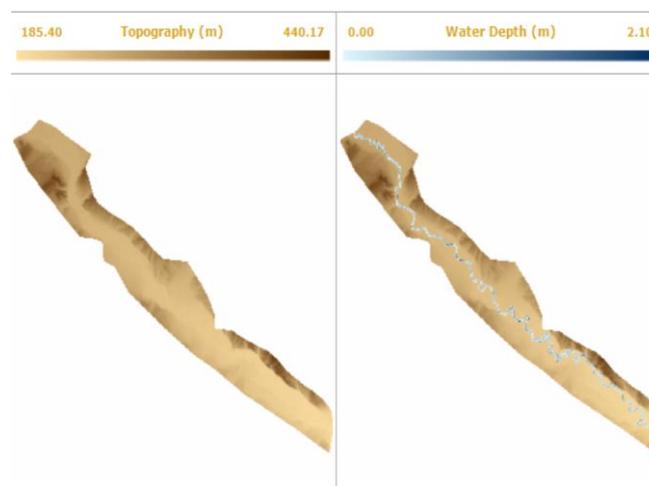


Figura D.1: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el caso 1, para un caudal de 100m³/s.

Respecto a la evolución temporal del hidrograma, este es el caso en el que más tiempo tarda el programa Riverflow2D en que el caudal llegue a la condición de contorno de salida, ver figura D.2. El tiempo de llegada del hidrograma desde la entrada hasta la salida del tramo de río estudiado roza los 5 días. También podemos ver que el pico máximo se lamina desde 100 m³/s a 77m³/s; y por último, la duración del hidrograma de entrada que era de 4

Análisis de hidrogramas

días se convierte en una duración en el hidrograma de salida de 1 día y medio.

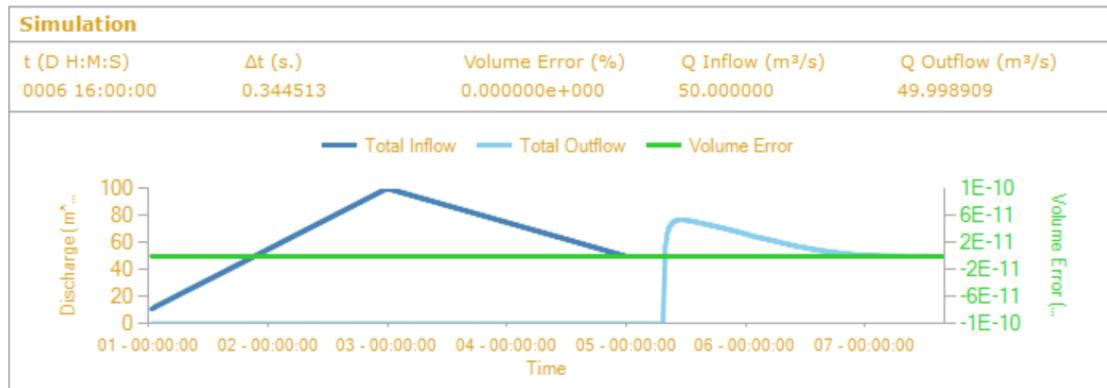


Figura D.2: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y del error de masa (verde) en el caso 1, para un caudal de 100m³/s.

- 500m³/s: Tiempo de simulación de 6 horas y 52 minutos.

En la figura D.3 se muestra la extensión de la lámina de agua sobre el MDT. Para un caudal de 500m³/s, se observa que el flujo sigue sin desbordar el cauce en ningún punto, aunque se empiezan a observar profundidades de agua mayores, ver figura D.3.

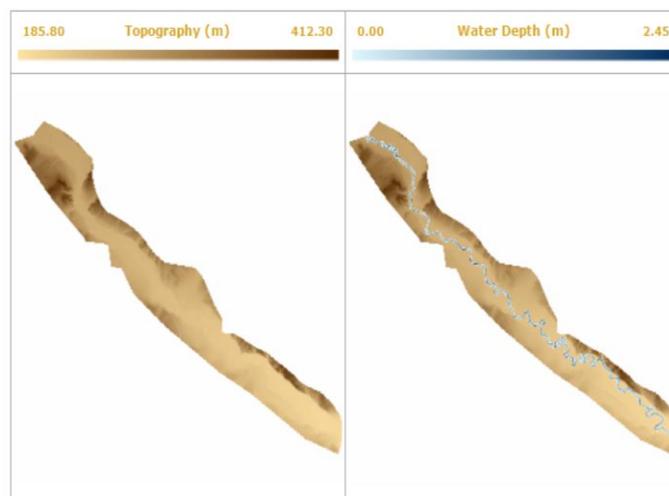


Figura D.3: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el caso 1, para un caudal de 500m³/s.

En el hidrograma obtenido a la salida, vemos como el caudal tarda mucho menos en llegar a Zaragoza, que en el caso anterior.

Análisis de hidrogramas

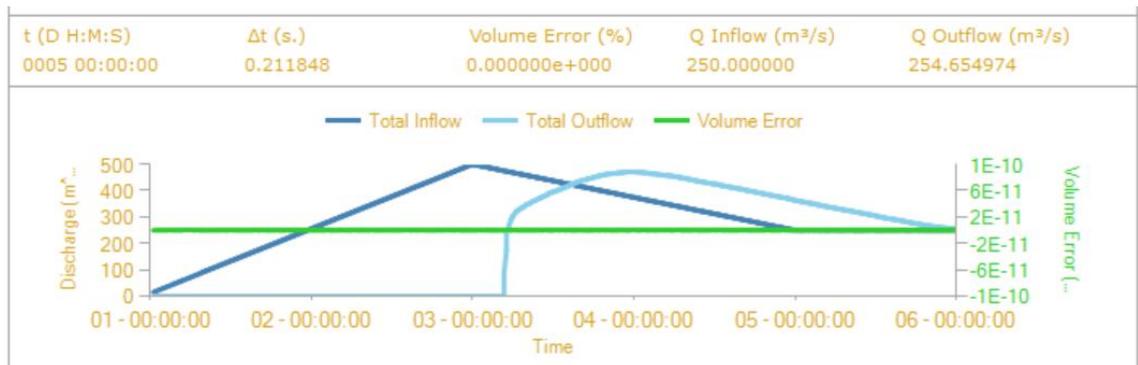


Figura D.4: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y del error de masa (verde) en el caso 1, para un caudal de 500m³/s.

- 1000m³/s: Tiempo de simulación de 7 horas y 23 minutos.

En la figura D.5 ya vemos cómo con un caudal de 1000m³/s se empieza a extender por las llanuras de inundación, sobre todo en el primer tramo y en la zona de curvas antes de llegar a Tudela y también antes de llegar a Alagón, donde el río presenta muchas curvas seguidas.

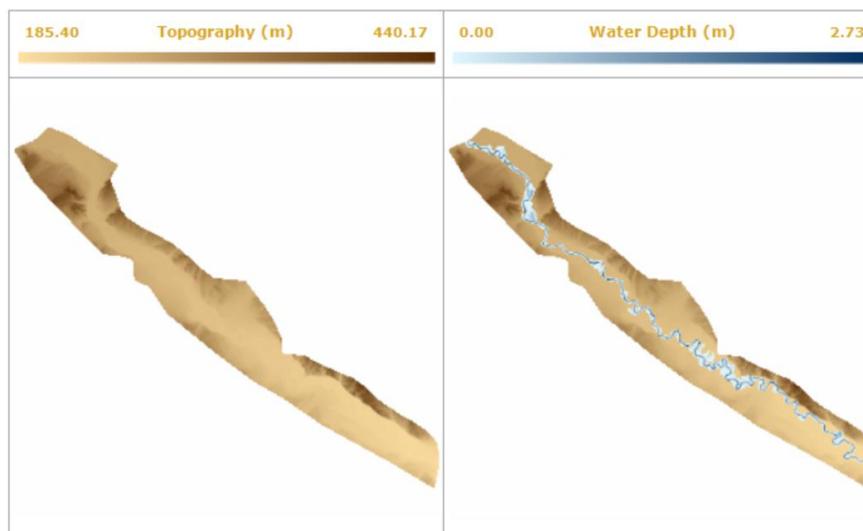


Figura D.5: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el caso 1, para un caudal de 1000m³/s.

En el hidrograma obtenido vemos que el caudal máximo de llega disminuyo considerablemente respecto al de entrada

Análisis de hidrogramas

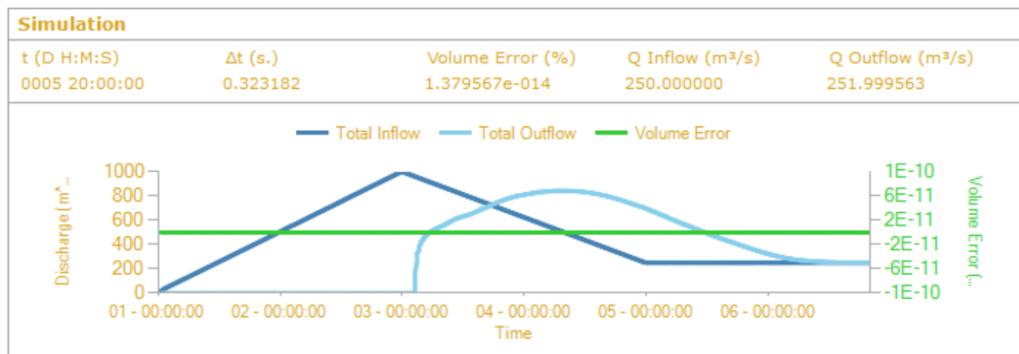


Figura D.6: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y del error de masa (verde) en el caso 1, para un caudal de 1000m³/s.

- 2000m³/s: Tiempo de simulación de 8 horas y 50 minutos.

Para este valor de caudal, en la figura D.7 vemos que el cauce se ha desbordado por completo a ambos lados del cauce. Se ve mucho más por el margen izquierdo que por el derecho. Esto es debido a la topografía; en zonas donde la cota del fondo del terreno es más baja las alturas de agua son más altas. Esto se indica en la figura en color azul más oscuro. Este valor de caudal suele ser superado en las avenidas extraordinarias reales.

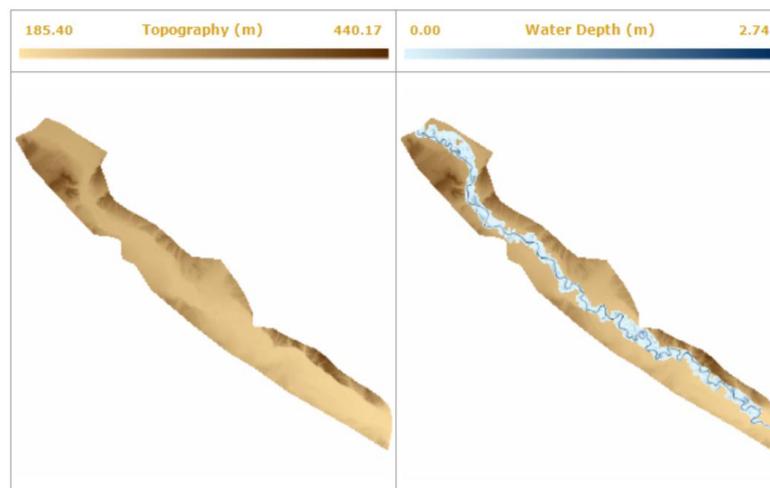


Figura D.7: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el caso 1, para un caudal de 2000 m³/s.

Para el hidrograma obtenido a la salida, se observa que éste tiene una forma muy irregular, llegando a alcanzar un máximo relativo antes de llegar al absoluto.

Análisis de hidrogramas

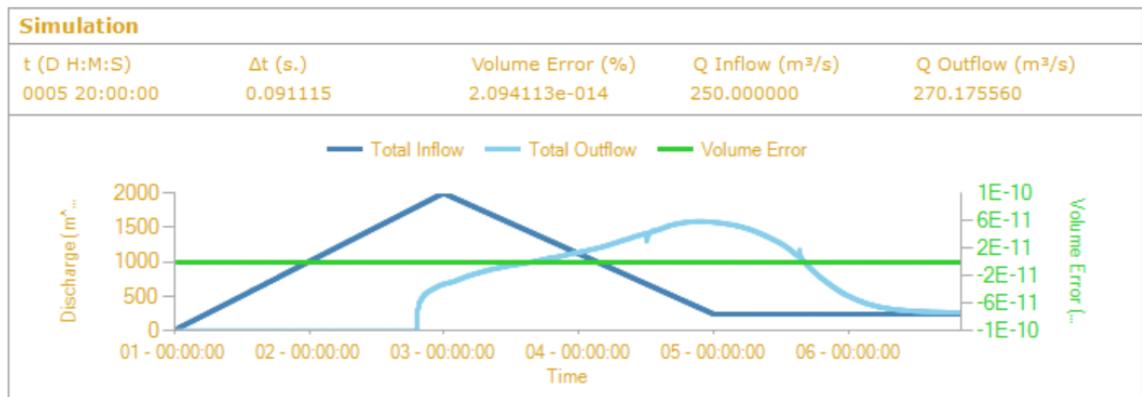


Figura D.8: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y del error de masa (verde) en el caso 1, para un caudal de 2000 m³/s.

- 3000 m³/s: Tiempo de simulación de 9 horas y 34 minutos.

En este caso, en la figura D.9, vemos que el desbordamiento del agua se produce en casi todo el dominio excepto en la zona de Zaragoza en la que el cauce se encuentra canalizado.

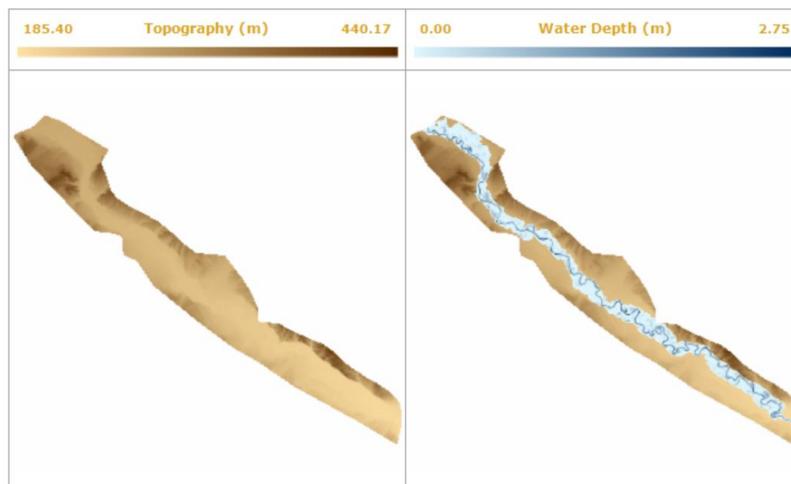


Figura D.9: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el caso 1, para un caudal de 3000 m³/s.

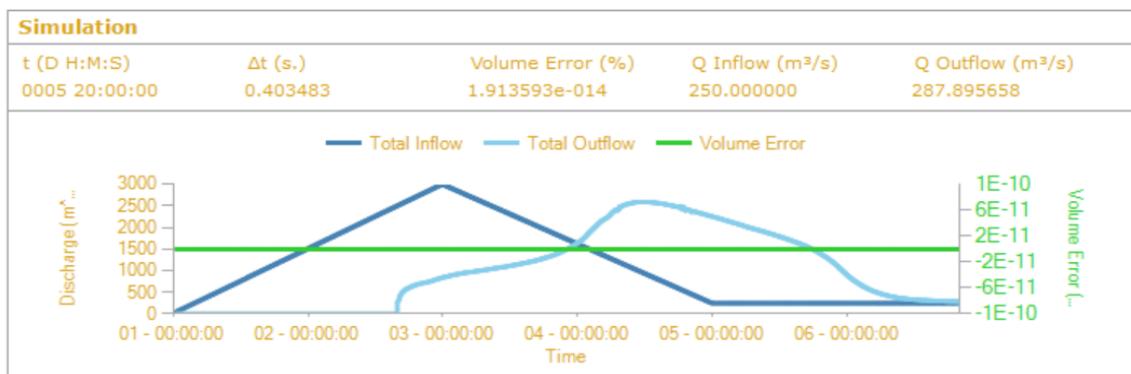


Figura D.10: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y del error de masa (verde) en el caso 1, para un caudal de 3000m³/s

Análisis de hidrogramas

- 4000 m³/s: Tiempo de simulación de 10 horas y 10 minutos.

Aunque este caudal pudiera parecer excesivo, es el caudal pico que se produce en una avenida extraordinaria de periodo de retorno de 500 años. Como era previsible, la extensión de la lámina de agua es máxima en este caso.

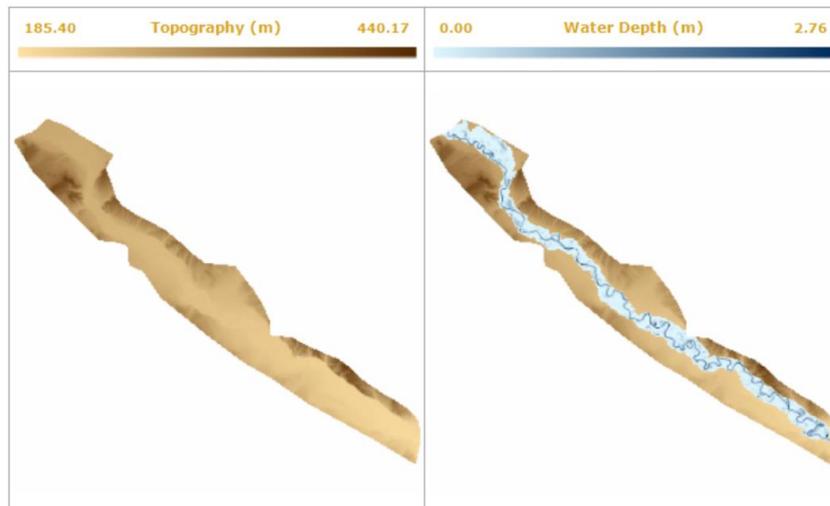


Figura D.11: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el caso 1, para un caudal de 4000m³/s.

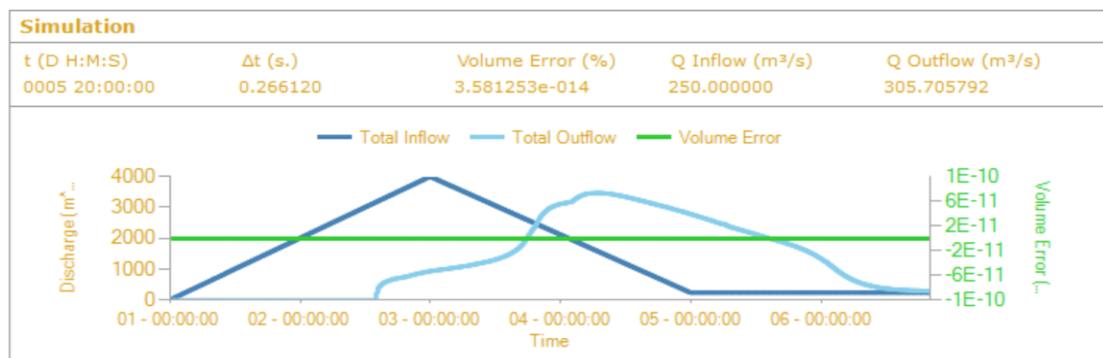


Figura D.12: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y del error de masa (verde) en el caso 1, para un caudal de 4000m³/s

CASO 2

En este caso la duración del hidrograma de entrada es de 10 días. Los caudales pico que se han estudiado son:

- 100 m³/s: Tiempo de simulación de 11 horas y 33 minutos.

Aunque en este caso el caudal sea el mismo que en el caso 1, la duración del hidrograma es el doble. Esto implica que la pendiente del tiempo de crecida del hidrograma no es tan pronunciada. Por otra parte, el suelo se encuentra mojado durante más tiempo. En esta primera figura (D.13), como el caudal es bajo, apenas se muestran diferencias respecto a la figura (D.3).

Análisis de hidrogramas

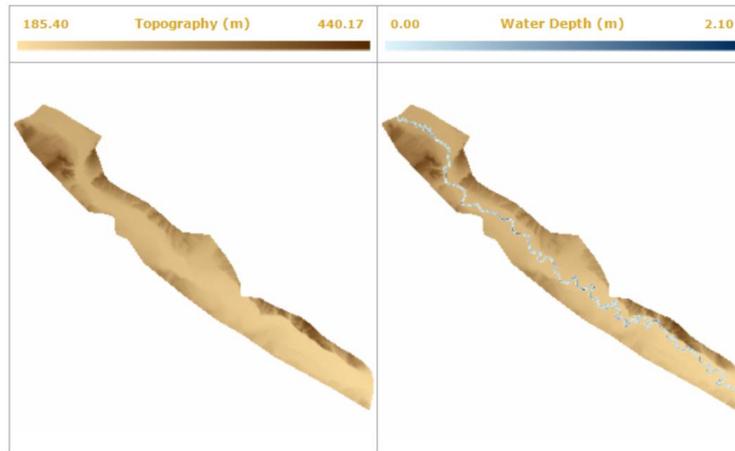


Figura D.13: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el caso 2, para un caudal de 100m³/s.

Se obtiene un hidrograma a la salida con una forma muy similar al de la figura D.14 (correspondiente a un mismo caudal pico de entrada pero con una duración menor).

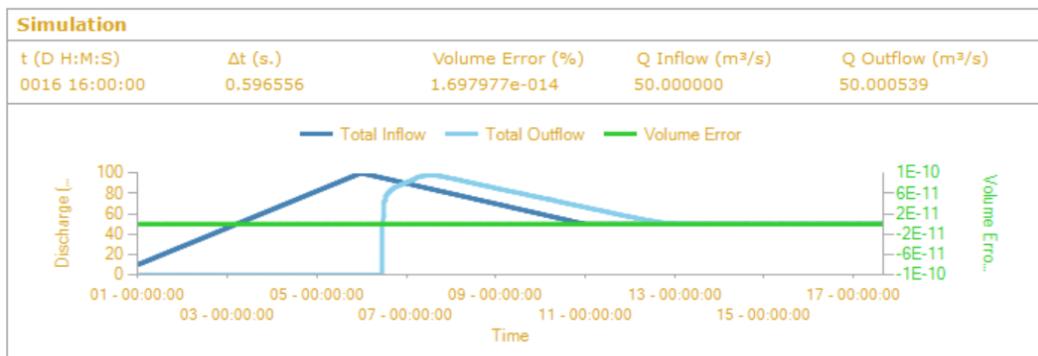


Figura D.14: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y del error de masa (verde) en el caso 2, para un caudal de 100m³/s.

- 500 m³/s: Tiempo de simulación de 19 horas y 58 minutos.

La figura D.15 se diferencia poco de la D.13; al igual que pasaba con la D.5 respecto a la D.3. Esto es debido a que aún nos encontramos con caudales bajos (menores que 500m³/s); en los que aún no se ha producido desbordamiento.

Análisis de hidrogramas



Figura D.15: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el caso 2, para un caudal de 500m³/s.

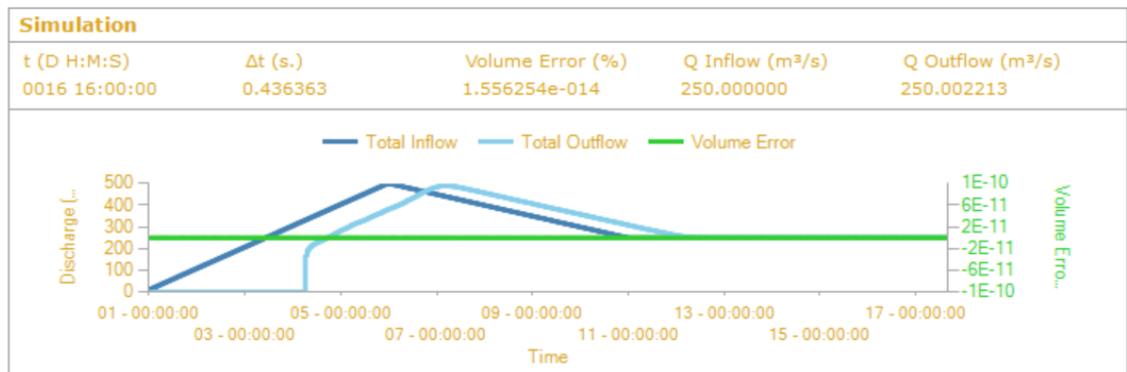


Figura D.16: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y del error de masa (verde) en el caso 2, para un caudal de 500m³/s

- 1000 m³/s: Tiempo de simulación de 20 horas y 14 minutos.

La lámina de agua que se extiende para este caudal (figura D.17) ya empieza a abarcar zonas contiguas al cauce, sin ser excesiva su propagación.

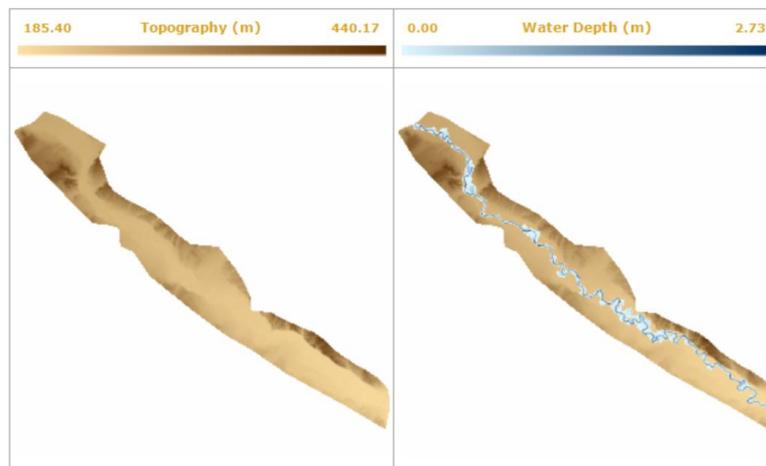


Figura D.17: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el caso 2, para un caudal de 1000m³/s.

Análisis de hidrogramas

En cuanto al hidrograma resultante, la figura D.18 adopta una forma más similar a la del hidrograma de entrada, en comparación con D.16, por ejemplo, correspondiente a un caudal pico menor.

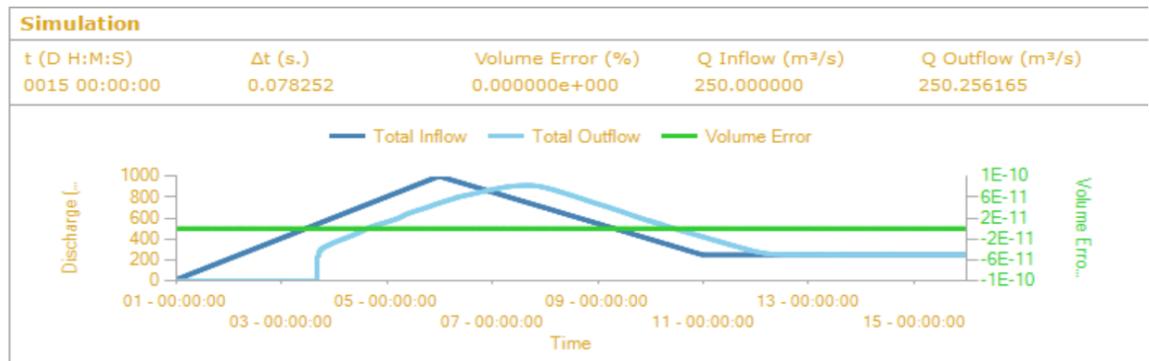


Figura D.18: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y del error de masa (verde) en el caso 2, para un caudal de 1000m³/s.

- 2000 m³/s: Tiempo de simulación de 23 horas y 55 minutos.

Para este caudal, en la figura D.19, se observa cómo la lámina de agua se expande sobre el MDT. Existe un aumento, considerable, de la extensión de la lámina de agua, en comparación con el caudal anterior, ver figura D.18.

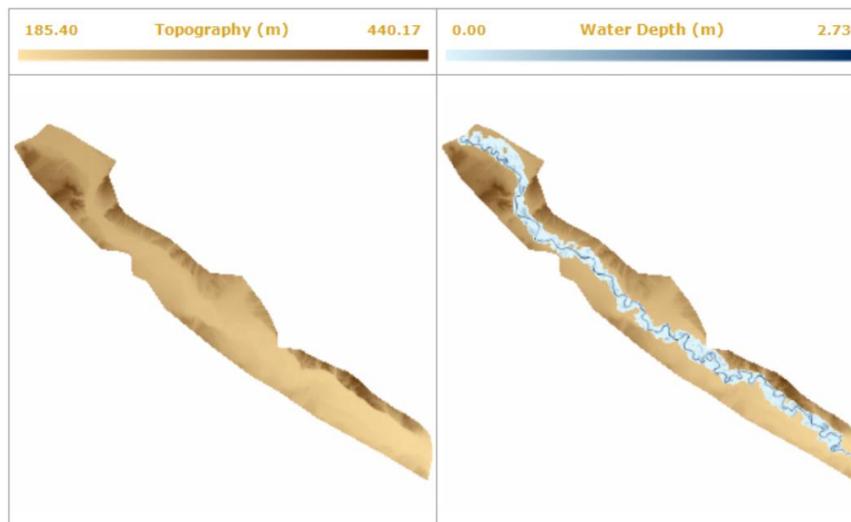


Figura D.19: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el caso 2, para un caudal de 2000m³/s.

En este caso de caudal máximo a la salida, se obtiene un hidrograma a la salida como el de la figura D.20, cada vez se asimila más al introducido en la entrada.

Análisis de hidrogramas

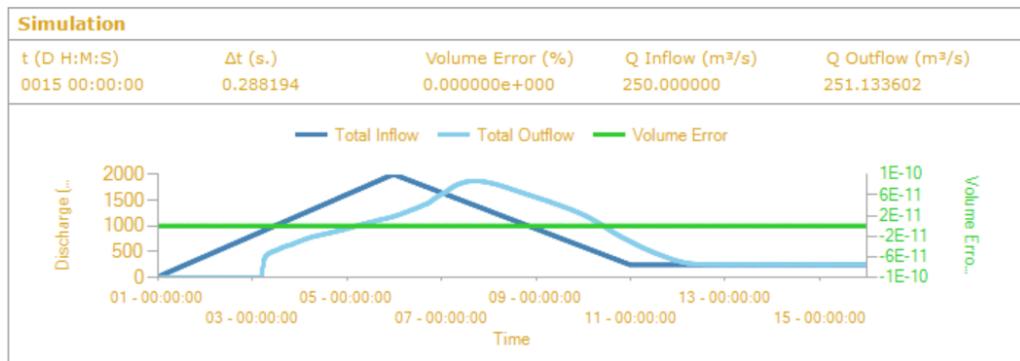


Figura D.20: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y del error de masa (verde) en el caso 2, para un caudal de 2000m³/s

- 3000 m³/s: Tiempo de simulación de 22 horas y 19 minutos.

Para este caso de caudal, la lámina de agua se extiende sobre el MDT como muestra la figura D.21, exceptuando a la llegada a Zaragoza, que no se produce un desbordamiento del río.

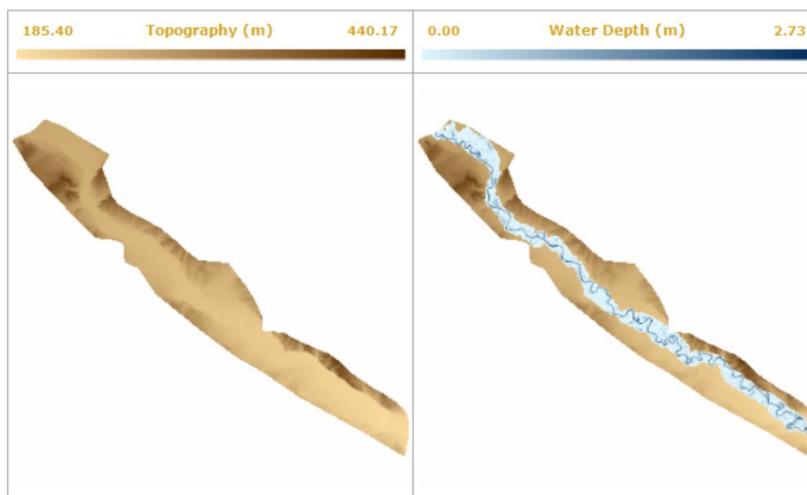


Figura D.21: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el caso 2, para un caudal de 3000m³/s.

El caudal máximo de llegada a Zaragoza, registra un valor cercano al de la entrada, pero sin llegar a alcanzarlo.

Análisis de hidrogramas

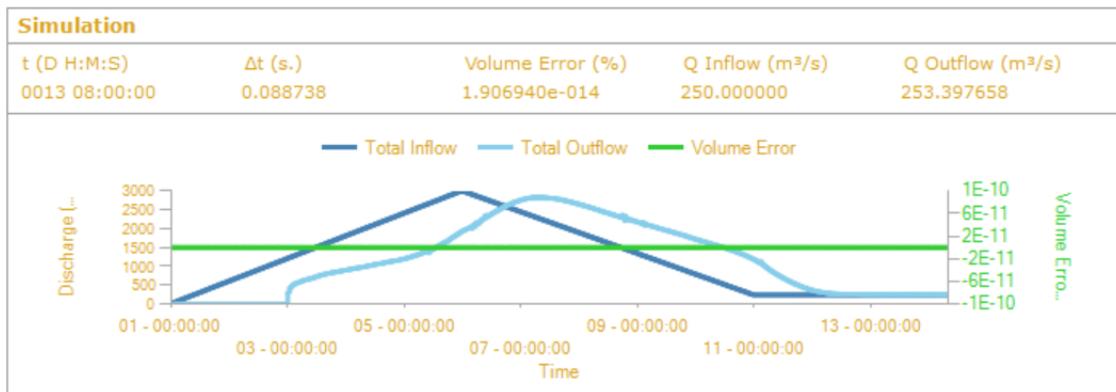


Figura D.22: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y del error de masa (verde) en el caso 2, para un caudal de 3000 m³/s

- 4000 m³/s: Tiempo de simulación de 23 horas y 44 minutos.

Para este tipo de caudal, el río se desborda hasta mojar todas las llanuras de inundación, y detenerse en una zona de terreno con mayor cota de elevación.

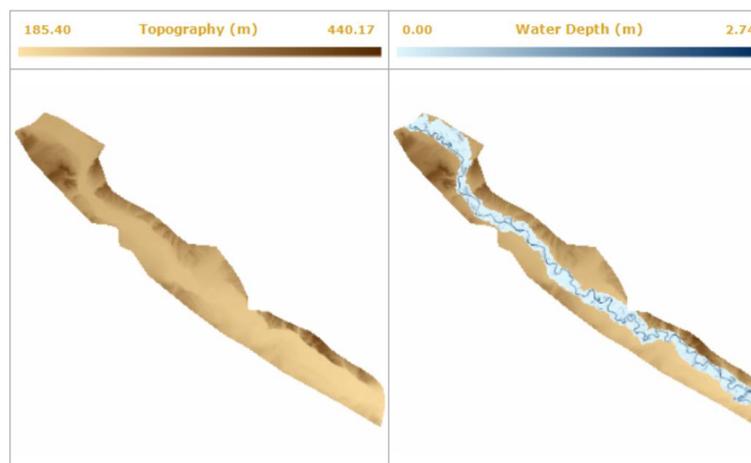


Figura D.23: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el caso 2, para un caudal de 4000 m³/s.

En la figura D.24 se observa que, cuando comienza a descargar caudal en la salida del dominio, lo hace de manera drástica e irregular, pero mucho más similar al hidrograma de entrada que para el caso D.12, con un mismo caudal pico, pero una menor duración del hidrograma de entrada.

Análisis de hidrogramas

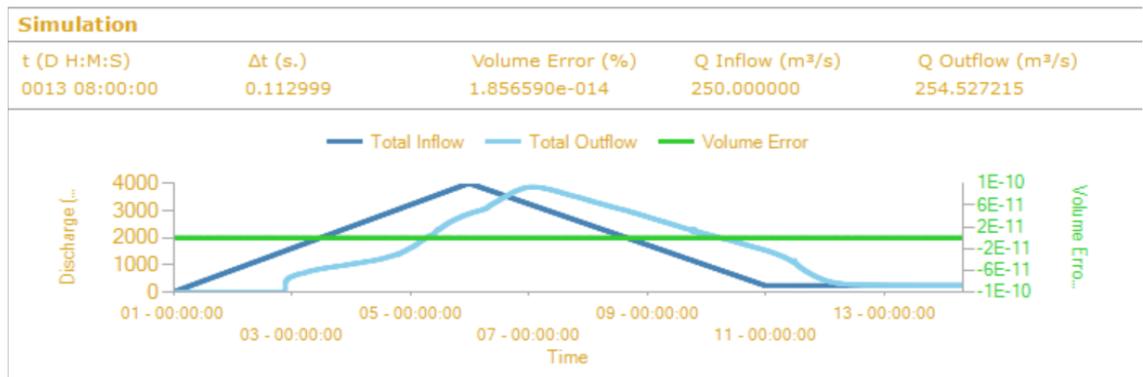


Figura D.24: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y del error de masa (verde) en el caso 2, para un caudal de 4000 m³/s

CASO 3

Este es el último caso, correspondiente a una duración del hidrograma de entrada de 20 días, el mayor de todos los supuestos. En un tiempo de crecida de 10 días, el caudal aumenta hasta alcanzar su máximo valor. Los resultados obtenidos según los caudales pico estudiados son:

- 100 m³/s: Tiempo de simulación de 17 horas y 35 minutos.

Al igual que en la figura D.1 y D.13, correspondientes también a caudales máximos de entrada de 100 m³/s, pero con duraciones menores; la figura D.25 muestra que la lámina de agua no se ha extendido sobre las llanuras de inundación, en el MDT.



Figura D.25: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el caso 3, para un caudal de 100 m³/s.

En la figura D.26 observamos una forma de hidrograma mucho más lineal que en casos anteriores. Esto es debido a la suavidad de la pendiente del hidrograma, o lo que es lo mismo, la suavidad con la que se introduce caudal a la entrada hasta alcanzar un determinado máximo.

Análisis de hidrogramas

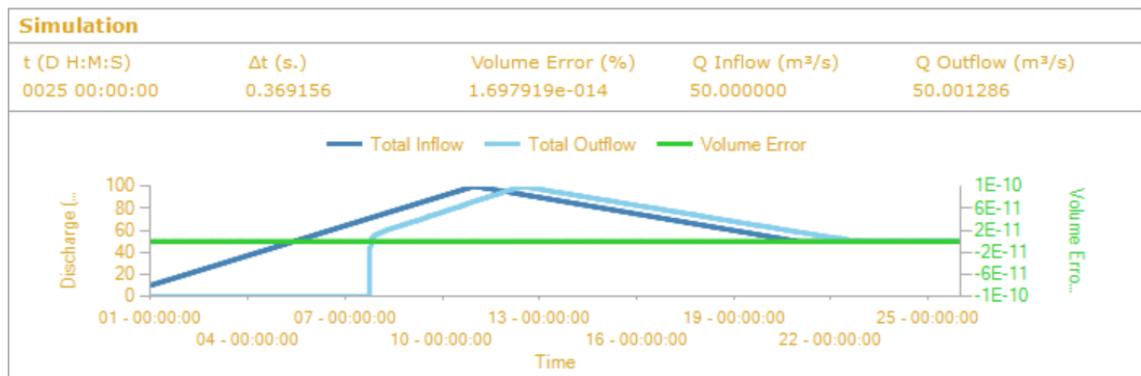


Figura D.26: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y del error de masa (verde) en el caso 3, para un caudal de 100 m³/s.

- 500 m³/s: Tiempo de simulación de 1 día 3 horas y 16 minutos.

En la figura D.27, sigue sin apreciarse un desbordamiento del río. La lámina de agua no se ha extendido sobre el MDT.

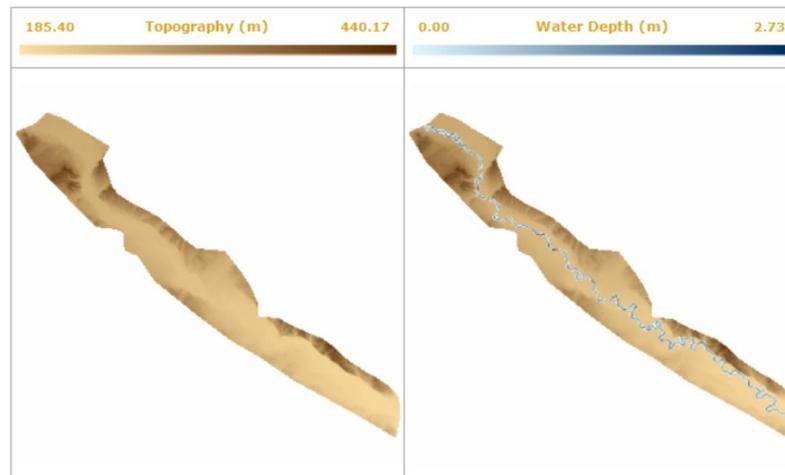


Figura D.27: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el caso 3, para un caudal de 500 m³/s.

En la figura D.28 se observa claramente, que el valor máximo de caudal a la salida, es el mismo que el introducido a la entrada.

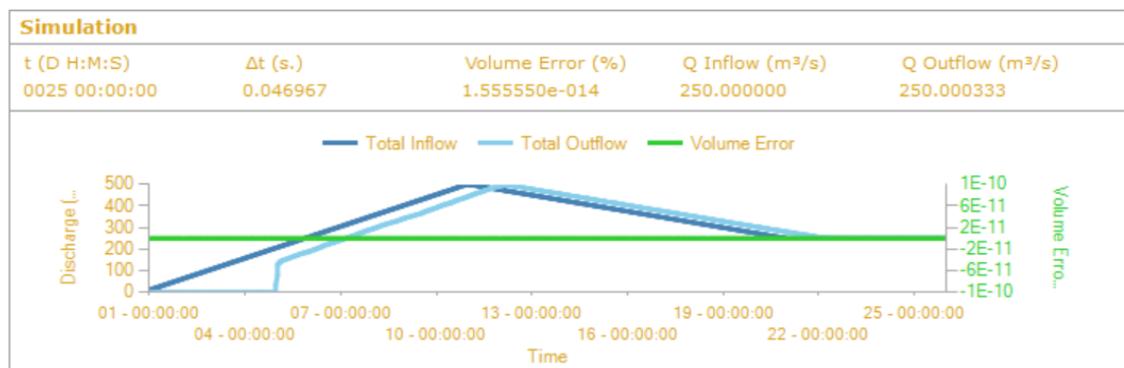


Figura D.28: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y del error de masa (verde) en el caso 3, para un caudal de 500 m³/s.

Análisis de hidrogramas

- 1000 m³/s: Tiempo de simulación de 1 día y 8 horas.

Para este caudal, comenzamos a notar cambios en el mapa 2D del terreno. La lámina de agua comienza a expandirse, en las zonas cercanas a las orillas, pero de manera poco notada. Ver figura D.29

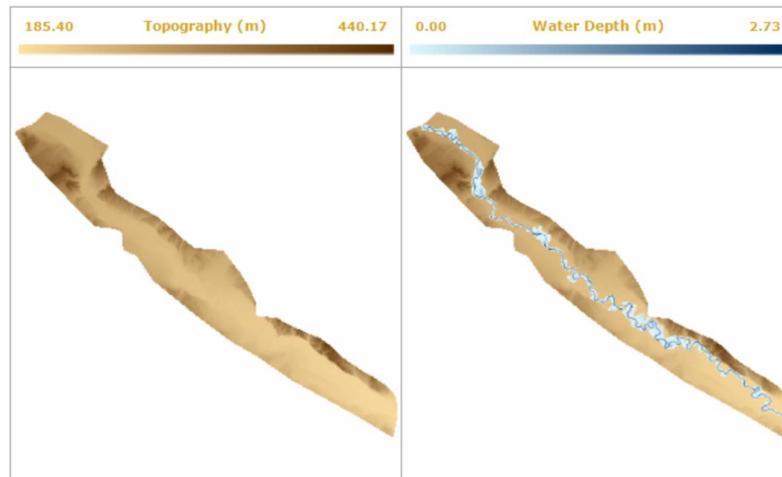


Figura D.29: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el caso 3, para un caudal de 1000 m³/s.

En la figura D.30 se aprecia que el hidrograma obtenido a la salida, se está reproduciendo de manera muy similar

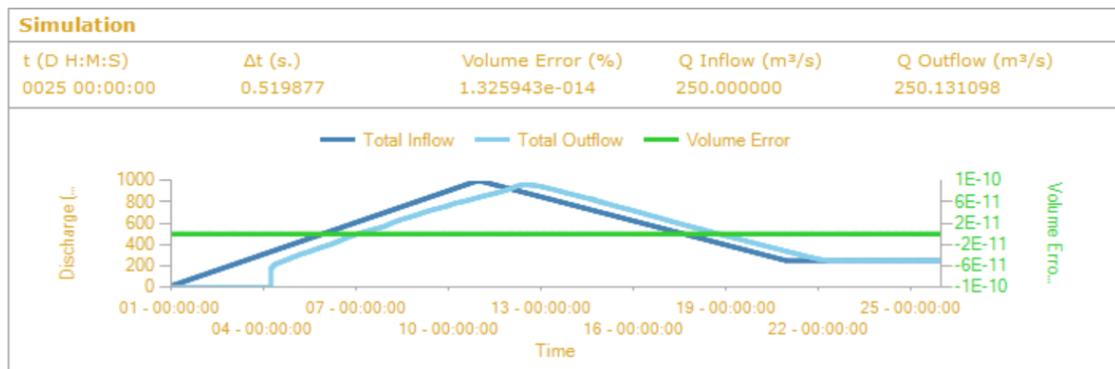


Figura D.30: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y del error de masa (verde) en el caso 3, para un caudal de 1000 m³/s

- 2000 m³/s: Tiempo de simulación de 1 día, 14 horas y 10 minutos.

En la figura D.31 se ve que el río ha desbordado, lo que se traduce en la extensión de la lámina de agua sobre el MDT, pero se detiene antes de llegar a Zaragoza, sin llegar a causar daños.

Análisis de hidrogramas

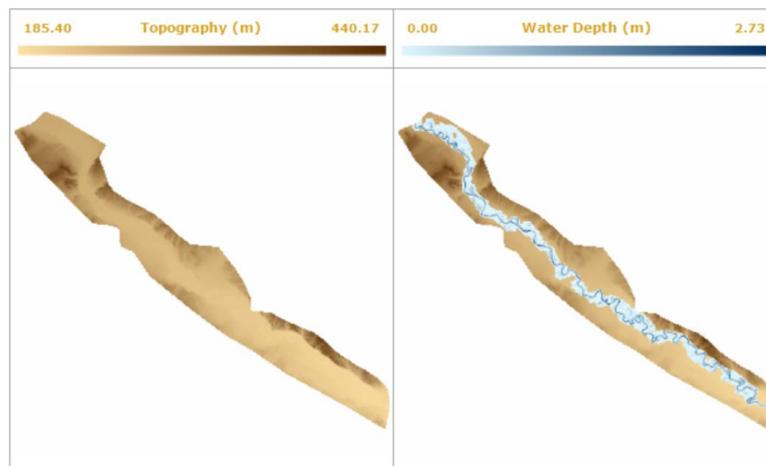


Figura D.31: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el caso 3, para un caudal de 2000 m³/s.

En la figura D.32, al igual que en la figura D.31, se nota claramente la similitud entre el hidrograma de salida y el que hemos impuesto en Castejón.

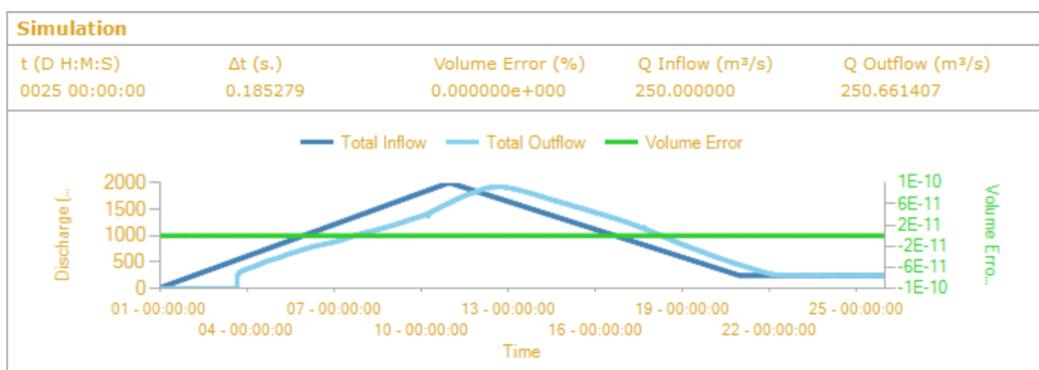


Figura D.32: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y del error de masa (verde) en el caso 3, para un caudal de 2000 m³/s

- 3000 m³/s: Tiempo de simulación de 1 día, 17 horas y 54 minutos.

En este caso, ver figura D.33, se observa que la lámina de agua se extiende de manera considerable en comparación con la figura D.31, correspondiente a un caudal un poco menor.

Análisis de hidrogramas

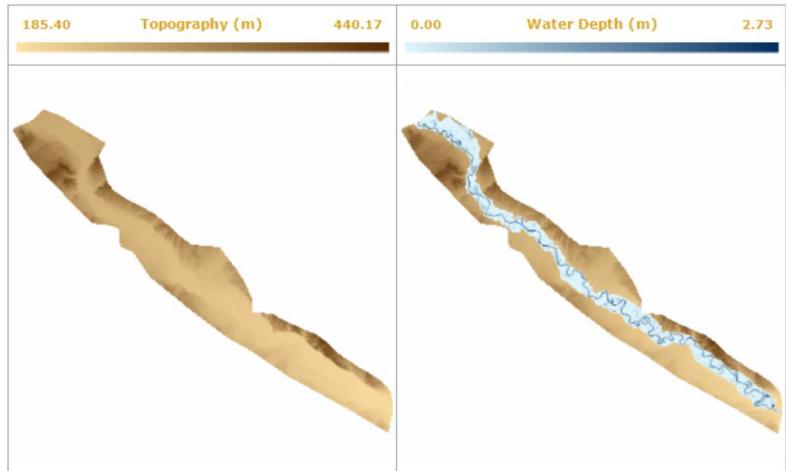


Figura D.33: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el caso 3, para un caudal de 3000 m³/s.

Al igual que en el caso de la figura D.32 y D.30, el hidrograma obtenido a la salida, es prácticamente el mismo que el de la entrada.

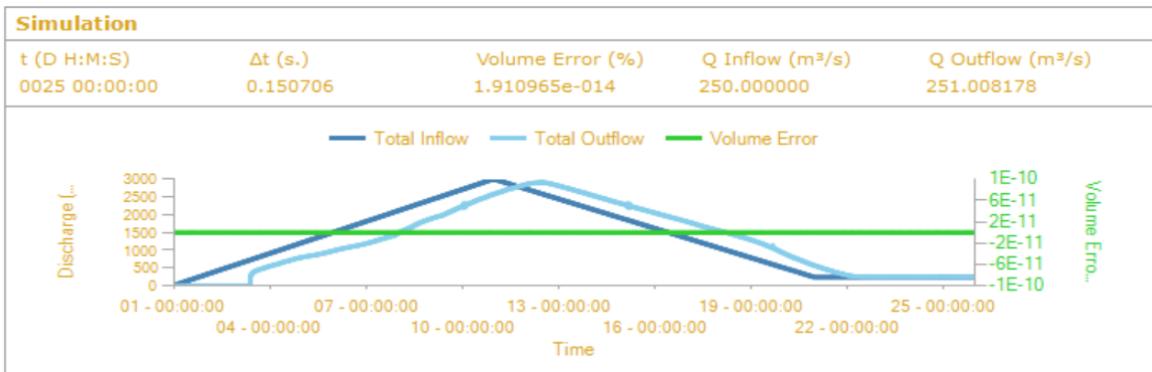


Figura D.34: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y del error de masa (verde) en el caso 3, para un caudal de 3000 m³/s

- 4000 m³/s: Tiempo de simulación de 1 día, 20 horas y 41 minutos.

Es el caso correspondiente al máximo caudal de entrada, por tanto, va a corresponder a la máxima extensión de la lámina de agua sobre el MDT. Ver figura D.35.

Análisis de hidrogramas

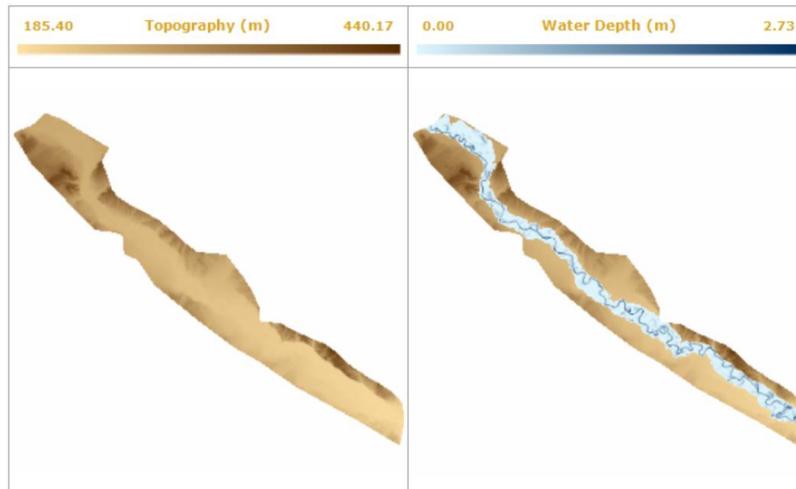


Figura D.35: Mapa 2D de la extensión de la lámina de agua sobre el MDT en el caso 3, para un caudal de 4000m³/s.

En comparación con otros hidrogramas correspondientes a los mismos valores de caudal, pero diferentes duraciones (figura D.12 y D.24) el caudal de llegada a Zaragoza es mucho mayor en este caso, ver figura D.36

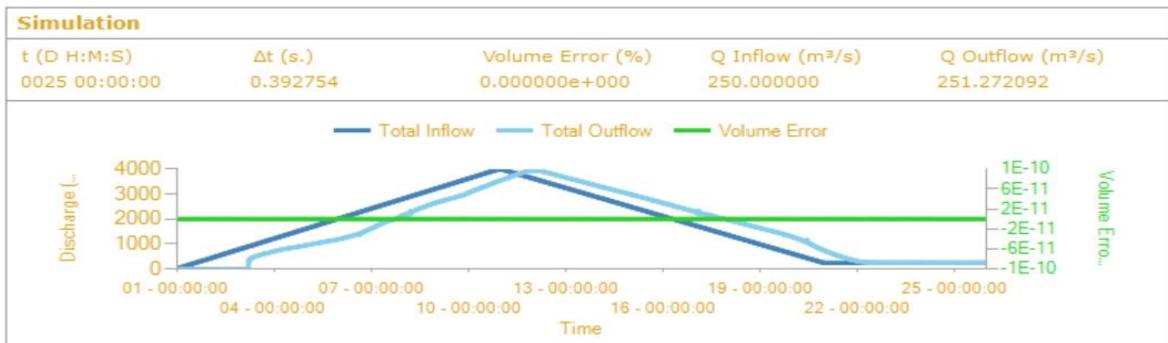


Figura D.36: Evolución temporal del caudal de entrada (azul oscuro), del caudal de salida (azul claro) y del error de masa (verde) en el caso 3, para un caudal de 4000 m³/s

