



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Estudio de soluciones para mitigar inundaciones en
el tramo medio del río Ebro mediante simulación
numérica

Autor

Isabel Echeverribar Pérez

Director/es

Mario Morales Hernández
Pilar Brufau García

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2016

TRABAJOS DE FIN DE GRADO / FIN DE MÁSTER



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

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^a. Isabel Echeverribar Pérez

con nº de DNI 73223022-S 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 en Ingeniería Mecánica, (Título del Trabajo)

Estudio de soluciones para mitigar inundaciones en el tramo medio del río Ebro mediante simulación numérica

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

Zaragoza, 18 de abril de 2016

Fdo: Isabel Echeverribar Pérez

Resumen

En este trabajo se realiza un estudio de posibles soluciones para mitigar las inundaciones que tienen lugar cíclicamente en el tramo medio del río Ebro mediante simulación numérica. El problema se ha abordado con una herramienta computacional desarrollada en el área de Mecánica de Fluidos llamada Riverflow que resuelve el flujo de superficie libre 2D. Como posibles medidas de mitigación se proponen escenarios de limpieza de vegetación del cauce imponiendo diferentes coeficientes de rozamiento de Manning que reflejan la pérdida de energía por rozamiento, uso de zonas de inundación controlada para intentar retrasar tiempo y pico de llegada del máximo de la onda de caudal del hidrograma de avenida y construcción de nuevas motas en zonas que se quieren proteger y evitar que se vean afectadas por la inundación. En todas estas situaciones se parte de un modelo digital de terreno (MDT) de la zona (Castejón de Ebro-Zaragoza), se construye una malla de cálculo adecuada y calibrada con inundaciones recientes y se analiza la respuesta del río a un hidrograma de avenida en términos de altura de agua, velocidad, área máxima inundada y evolución temporal de calado en puntos sonda a lo largo de cauce y llanuras, para poder obtener cuál sería la mejor de las opciones propuestas de cara a mitigar estos sucesos en el futuro. Los resultados y conclusiones se muestran en la memoria y anexos de este trabajo así como a través de vídeos en el portal de Youtube.

Índice general

1. Introducción	17
2. Planteamiento del problema	23
3. Datos de partida	27
3.1. Modelo Digital de Terreno	27
3.2. Mapa de rozamiento	28
3.3. Malla de cálculo	31
3.4. Hidrogramas de avenida	33
3.5. Curvas de aforo	34
3.6. Condiciones iniciales	34
4. Simulaciones numéricas	35
4.1. Resultados previos	35
4.2. Resultados de mitigación	42
4.2.1. Limpieza de la vegetación del cauce	42
4.2.2. Zonas de inundación controlada	44
4.2.3. Protección de zonas	45
5. Conclusiones y trabajo futuro	51
Bibliografía	55
A. Fundamentos teóricos	59
A.1. Hipótesis básica del modelo de aguas poco profundas	59
A.2. Ecuaciones del flujo de superficie libre en 3D	60
A.3. Ecuaciones del flujo de superficie libre en 2D	61
B. Software de modelización: RiverFlow2D	65
B.1. Método numérico	65
B.2. Condiciones iniciales	67

B.3. Condiciones de contorno	68
B.4. Parámetros de simulación	70
C. Generación de las condiciones contorno	73
C.1. Generación de hidrogramas	73
C.1.1. Hidrogramas medidos	73
C.1.1.1. Hidrogramas medidos en Castejón (A002)	74
C.1.2. Hidrogramas correspondientes a periodos de retorno	76
C.1.2.1. Hidrogramas adimensionales unitarios SCS	76
C.1.2.2. Hidrogramas correspondientes a periodos de retorno en Castejón	77
C.2. Generación de curvas de aforo	79
D. Generación y calibración de la malla de cálculo y mapa de rozamiento	81
D.1. Generación de la malla y mapa de rozamiento	81
D.2. Calibración de la malla de cálculo	85
D.2.1. Refinamiento de la malla	88
D.2.2. Elevación de motas	90
D.2.3. Cuantificación de la mejora	90
E. Resultados de las simulaciones	95
E.1. Avenidas correspondientes a periodos de retorno	97
E.1.1. Periodo de retorno de 5 años (T5)	97
E.1.2. Periodo de retorno de 10 años (T10)	99
E.1.3. Periodo de retorno de 100 años (T100)	108
E.1.4. Periodo de retorno de 500 años (T500)	117
E.1.5. Resumen de resultados	121
E.2. Avenidas ocurridas en el Ebro en 2003, 2013 y 2015	124
E.2.1. Avenida de 2003	124
E.2.2. Avenida de 2013	127
E.2.3. Avenida de 2015	136
E.3. Resultados numéricos del análisis de posibles soluciones de mitigación	139
E.3.1. Limpieza de la vegetación en el cauce	142
E.3.1.1. Efecto de la limpieza de la vegetación en el cauce: Avenida de 2015	144
E.3.1.2. Efecto de la limpieza de la vegetación en el cauce: Periodo de retorno de 10 años (T10)	150
E.3.2. Zonas de inundación controlada (ZIC)	154
E.3.3. Protección de zonas	158

E.3.3.1. Protección de Buñuel para la avenida de 2015	159
E.3.3.2. Protección de Buñuel para el periodo de retorno de 10 años (T10)	161
E.3.4. Resumen de resultados de mitigación	162
F. Programas auxiliares utilizados	163
F.1. Gestión de datos de terreno: <i>SAGA GIS</i>	163
F.2. Visualización de resultados: <i>Paraview</i>	165

Índice de figuras

1.1. Representación del porcentaje que supone cada desastre meteorológico frente al total de los ocurridos en función de (a) número de personas afectadas, (b) tipo de desastre. [Fuente: UNISDR/CREDE]	18
1.2. Representación del porcentaje de pérdidas económicas que supone cada desastre meteorológico frente al total de los ocurridos. [Fuente: UNISDR/CREDE]	20
2.1. Delimitación territorial de la cuenca hidrográfica del Ebro.	24
2.2. Explotaciones ganaderas en la comunidad autónoma de Aragón. [Fuente: SITAR]	24
2.3. Localización de las estaciones de medida que la CHE tiene repartidas por el cauce del Ebro. [Fuente: SAIH Ebro]	25
2.4. Representación en 3D del dominio total de estudio.	26
3.1. Cauce interpolado a partir de secciones batimétricas a la altura de Alagón.	28
3.2. MDT del Ebro a la altura de Tudela. Cota del terreno a escala 240-500 m (a) y 240-310 m (b).	29
3.3. Mapa de rozamiento a la altura de Gallur.	30
3.4. Adaptación en el espacio de la malla utilizada a la altura de Castejón de Ebro.	31
3.5. Diferentes tipos de mallas: (a) triangular no estructurada, (b) triangular equilátera y (c) rectangular estructurada	32
4.1. Hidrograma de entrada correspondiente a la avenida de 2015 en Castejón.	37
4.2. Vista general de la extensión de la lámina de inundación para la avenida de 2015.	37
4.3. Vista local de la extensión de la lámina de inundación de 2015 sobre el terreno en el tramo entre Castejón y Zaragoza. La escala es la misma que en la Figura 4.2.	38

4.4.	Evolución temporal de la velocidad tanto en módulo como en vectores para la avenida de 2015.	39
4.5.	Comparación de resultados numéricos (línea continua) y medidas (puntos) de la evolución temporal del nivel superficial en Tudela (a) y en Novillas (b) para la avenida de 2015.	39
4.6.	Imagen tridimensional de la inundación máxima a la altura de Castejón (a) y a su paso por Pradilla de Ebro (b) para la avenida de 2015.	40
4.7.	Mapas de área inundada en diferentes instantes de tiempo en el tramo Castejón-Zaragoza para la avenida de 2015.	41
4.8.	Comparación de manchas de inundación en $t=314h$ para diferentes coeficientes n en el cauce para la avenida de 2015. En azul oscuro se muestra la mancha original y en color más claro las manchas con el nuevo coeficiente n	47
4.9.	Evolución temporal del calado h en diferentes puntos sonda para distintos números de Manning en el cauce con el hidrograma de avenida de 2015.	48
4.10.	Zonas de inundación controlada en la zona de Buñuel y Ribaforada con compuertas a contrapendiente (azul) y a favor de la pendiente (verde).	48
4.11.	Comparación de manchas de inundación para la avenida de 2015 antes y después de la actuación de la ZIC (7-6) (diferencia de h en metros).	49
4.12.	Diferencia entre la malla antes (a) y después (b) de proteger la zona de Buñuel.	49
4.13.	Diferencia entre la mancha de inundación antes (a) y después (b) de proteger la zona de Buñuel para la avenida de 2015.	50
4.14.	Representación de la diferencia de h (en metros) tras la protección de la zona de Buñuel para la avenida de 2015.	50
A.1.	Gráfico que representa las escalas de la teoría de aguas poco profundas.	60
B.1.	Menú desplegable donde se selecciona una de las diferentes condiciones iniciales disponibles en SMS.	68
B.2.	Hidrograma de la avenida de 2013 introducido como condición de contorno en SMS. El tiempo se expresa en horas y el caudal en m^3/s	69
B.3.	Condiciones de contorno de salida que se han utilizado. En (a) se representa la curva de aforo que se introduce en forma de tabla manualmente o importada. En (b) se ve la introducción de una pendiente del terreno con la que SMS crea una curva de aforo.	69
B.4.	Menú en el que se muestran todos los parámetros que se deben fijar para lanzar una simulación.	70
C.1.	Hidrograma de la avenida en 2003 medido en Castejón	74
C.2.	Hidrograma de la avenida en 2013 medido en Castejón	75

C.3. Hidrograma de la avenida en 2015 medido en Castejón	75
C.4. Hidrogramas en Castejón generados a partir de hidrogramas unitarios SCS para periodos de retorno de 5, 10, 100 y 500 años	78
C.5. Curva de aforo en el puente de la autopista A-68, en la salida del dominio Castejón-Zaragoza	80
D.1. Influencia de la distribución espacial de vértices sobre el tamaño de las celdas de la malla. En la imagen (a) se aprecian únicamente los polígonos con la distribución de nodos. En (b) se representan sobre (a) las celdas de la malla.	83
D.2. Proceso de mallado. La imagen (a) representa los polígonos creados en la zona, mientras que (b) los coloca sobre el MDT. En (c) se observa la malla final y en (d) los distintos usos del suelo que tienen asignados los polígonos.	84
D.3. Efecto de la resolución del MDT sobre la representación de una mota. La imagen (a) representa un MDT de 5x5 m y las siguientes muestran mallas de paso mayor: 10, 25 y 50 m, respectivamente.	85
D.4. Huellas de inundación proporcionadas por la CHE correspondientes a las crecidas de diferentes años y visualizadas en <i>Paraview</i>	86
D.5. Representación de la intersección (en color salmón) entre la huella de inundación calculada (azul) y medida (rosa). En la imagen (a) se representa el resultado de la simulación y en (b) la envolvente de dicho resultado.	87
D.6. Comparación de la lámina de inundación en términos de calado (a) y vectores velocidad (b) de lo observado (morado), calculado (azul) e intersección de ambas (rosa), para la avenida de 2013 aguas abajo de Castejón.	88
D.7. Diferentes mallas creadas tras refinar en una mota. La figura (a) representa la malla tras el refinamiento y la (b) sin refinar.	89
D.8. Representación de la diferencia entre refinar (b) y no refinar (a) en algunas motas.	89
D.9. Comparación del resultado de la lámina de inundación tras imponer la elevación correcta de la mota. La imagen (a) tiene la mota únicamente refinada mientras que (b) tiene además la elevación puesta correctamente e impide el paso del flujo.	91
D.10. Diferencia de elevaciones entre motas antes y después de analizar las elevaciones reales. En la imagen (a) la mota tiene elevaciones promediadas. La imagen (b) muestra la mota tras la mejora.	91

D.11. Comparación del nivel de agua en sondas puntuales entre lo medido por CHE y lo simulado antes y después de calibrar la malla de cálculo. Las figuras (a) y (b) representan la comparativa en Tudela para 2013 y 2015, respectivamente. Las gráficas (c) y (d) muestran lo análogo en Novillas para los mismos años. Las siglas SC y S, en la leyenda, significan sin calibrar y calibrado, respectivamente.	93
E.1. Representación topográfica del dominio de cálculo, situado entre Castejón y Zaragoza, destacando las poblaciones relevantes.	96
E.2. Curva de aforo en el puente de la autopista A-68 aguas arriba de Zaragoza.	96
E.3. Hidrograma de entrada correspondiente a T5.	98
E.4. Visión general de la extensión de la máxima lámina de inundación para T5.	98
E.5. Visión por tramos de la extensión de la lámina de inundación sobre el terreno en el tramo entre Castejón y Zaragoza, para T5 en t=118 horas. La escala es la misma que en la Figura E.4.	99
E.6. Evolución temporal de la velocidad en líneas de nivel de módulo y vectores, para T5.	100
E.7. Evolución del desbordamiento de una mota entre Tudela y Fontellas en términos de módulo y vectores velocidad para T5.	101
E.8. Evolución temporal del calado en Tudela (a) y en Novillas (b) para T5.	102
E.9. Imagen tridimensional cota de terreno y calado en Castejón para T5 en t=118 horas.	102
E.10. Mapas de área inundada en diferentes instantes de tiempo en el tramo Castejón-Zaragoza para T5.	103
E.11. Hidrograma de entrada correspondiente a T10.	104
E.12. Visión general de la extensión de la máxima lámina de inundación para T10.	105
E.13. Visión por tramos de la extensión de la lámina de inundación sobre el terreno en el tramo entre Castejón y Zaragoza, para T10 en t=118 horas. La escala es la misma que en la Figura E.12.	105
E.14. Evolución temporal de la velocidad en líneas de nivel de módulo y vectores, para T10.	106
E.15. Evolución del desbordamiento de una mota entre Tudela y Fontellas en términos de módulo y vectores velocidad para T10.	107
E.16. Evolución temporal del calado en Tudela (a) y en Novillas (b) para T10.	107
E.17. Imagen tridimensional cota de terreno y calado en Castejón (b) y en Pradilla de Ebro (a) para T10 en t=118 horas.	109
E.18. Mapas de área inundada en diferentes instantes de tiempo en el tramo Castejón-Zaragoza para T10.	110
E.19. Hidrograma de entrada correspondiente a T100.	111

E.20. Visión general de la extensión de la máxima lámina de inundación para T100. 111

E.21. Visión por tramos de la extensión de la lámina de inundación sobre el terreno en el tramo entre Castejón y Zaragoza, para T100 en t=110 horas. La escala es la misma que en la Figura E.20. 112

E.22. Evolución temporal de la velocidad en líneas de nivel de módulo y vectores, para T100. 113

E.23. Evolución del desbordamiento de una mota entre Tudela y Fontellas en términos de módulo y vectores velocidad para T100. 114

E.24. Evolución temporal del calado en Tudela (a) y en Novillas (b) para T100. . 114

E.25. Imagen tridimensional cota de terreno y calado en Castejón (b) y en Pradilla de Ebro (a) para T100 en t=110 horas. 115

E.26. Mapas de área inundada en diferentes instantes de tiempo en el tramo Castejón-Zaragoza para T100. 116

E.27. Hidrograma de entrada correspondiente a T500. 117

E.28. Visión general de la extensión de la máxima lámina de inundación para T500. 118

E.29. Visión por tramos de la extensión de la lámina de inundación sobre el terreno en el tramo entre Castejón y Zaragoza, para T500 en t=110 horas. La escala es la misma que en la Figura E.28. 118

E.30. Evolución temporal de la velocidad en líneas de nivel de módulo y vectores, para T500. 119

E.31. Evolución del desbordamiento de una mota entre Tudela y Fontellas en términos de módulo y vectores velocidad para T500. 120

E.32. Evolución temporal del calado en Tudela (a) y en Novillas (b) para T500. . 121

E.33. Imagen tridimensional cota de terreno y calado en Castejón (b) y en Pradilla de Ebro (a) para T500 en t=110 horas. 122

E.34. Mapas de área inundada en diferentes instantes de tiempo en el tramo Castejón-Zaragoza para T500. 123

E.35. Evolución de las áreas inundadas en el tiempo para periodos de retorno T=5, 10, 100 y 500 años. 124

E.36. Hidrograma de entrada correspondiente a la avenida de 2003 en Castejón. . 125

E.37. Visión general de la extensión de la lámina de inundación para la avenida de 2003 en t=126 h. 126

E.38. Visión local de la extensión de la lámina de inundación superpuesta con la medida sobre el terreno en el tramo entre Castejón y Zaragoza, para la avenida de 2003. La escala es la misma que en la Figura E.37. 127

E.39. Evolución temporal de la velocidad tanto en módulo como en vectores para la avenida de 2003. 128

E.40.Imagen tridimensional del pico de inundación a la altura de Castejón (a) y a su paso por Pradilla de Ebro (b) para la avenida de 2003.	129
E.41.Mapas de área inundada en diferentes instantes de tiempo en el tramo Castejón-Zaragoza para avenida de 2003.	130
E.42.Hidrograma de entrada correspondiente a la avenida de 2013 en Castejón. .	131
E.43.Visión general de la extensión de la lámina de inundación para la avenida de 2013 en $t=168$ h.	132
E.44.Visión local de la extensión de la lámina de inundación para la avenida de 2013. La escala es la misma que en la Figura E.43.	132
E.45.Evolución temporal de la velocidad tanto en módulo como en vectores para la avenida de 2013.	133
E.46.Evolución temporal del calado en Tudela (a) y en Novillas (b).	133
E.47.Imagen tridimensional del pico de inundación a la altura de Castejón (a) y a su paso por Pradilla de Ebro (b) para la avenida de 2013.	134
E.48.Mapas de área inundada en diferentes instantes de tiempo en el tramo Castejón-Zaragoza para avenida de 2013.	135
E.49.Hidrograma de entrada correspondiente a la avenida de 2015 en Castejón. .	136
E.50.Visión general de la extensión de la lámina de inundación para la avenida de 2015.	137
E.51.Visión local de la extensión de la lámina de inundación en el tramo entre Castejón y Zaragoza, para la avenida de 2015. La escala es la misma que en la Figura E.50.	138
E.52.Evolución temporal de la velocidad tanto en módulo como en vectores para la avenida de 2015.	138
E.53.Evolución temporal del calado en Tudela (a) y en Novillas (b) para periodo de retorno de 500 años.	139
E.54.Imagen tridimensional del pico de inundación a la altura de Castejón (a) y a su paso por Pradilla de Ebro (b) para la avenida de 2015.	140
E.55.Mapas de área inundada en diferentes instantes de tiempo en el tramo Castejón-Zaragoza para avenida de 2015.	141
E.56.Mapas de rozamiento de un tramo cerca de Tudela. La imagen (a) corresponde $n=0.02$ en el cauce. (b), (c) y (d) corresponden a 0.025, 0.03 y 0.038 respectivamente.	143
E.57.Comparación de manchas de inundación con diferentes coeficientes n en el cauce para la avenida de 2015. La imagen (a) compara con $n=0.02$, (b), (c) y (d) con 0.025, 0.03 y 0.038, respectivamente.	145
E.58.Distribución de las sondas de medida colocadas.	147

E.59. Evolución temporal del calado h en el cauce en los puntos sonda para la avenida de 2015 con distintos números de Manning. 148

E.60. Evolución temporal del calado h en las llanuras en los puntos sonda para la avenida de 2015 con distintos números de Manning. 149

E.61. Comparación de manchas de inundación con diferentes coeficientes n en el cauce para T10. La imagen (a) compara con $n=0.02$, (b), (c) y (d) con 0.025, 0.03 y 0.038, respectivamente. 151

E.62. Evolución temporal del calado h en el cauce en los puntos sonda para T10 con distintos números de Manning. 152

E.63. Evolución temporal del calado h en la llanura de inundación en los puntos sonda para T10 con distintos números de Manning. 153

E.64. Zonas de inundación controlada en la zona de Buñuel y Ribaforada con posibles compuertas a estudiar marcadas con cruces. 154

E.65. Comparación de manchas de inundación para la avenida de 2015 antes y después de la actuación de una ZIC. En azul claro está la inundación tras el uso de la ZIC, y en azul oscuro la original. 156

E.66. Diferencia de h , en metros, entre la avenida antes de usar la ZIC a contrapendiente y después. Valores negativos (azul) implican que había menos agua originalmente. Valores positivos (rojo) indican lo contrario. 157

E.67. Diferencia de h , en metros, entre la avenida antes de usar la ZIC a favor de la pendiente y después. Valores negativos (azul) implican que había menos agua originalmente. Valores positivos (rojo) indican lo contrario. 157

E.68. Diferencia entre la malla antes (a) y después (b) de proteger la zona de Buñuel. 159

E.69. Diferencia entre la mancha de inundación antes (a) y después (b) de proteger la zona de Buñuel para la avenida de 2015. 160

E.70. Diferencia de h tras la protección de la zona de Buñuel para la avenida de 2015. Diferencias positivas implican más cantidad de agua tras la aplicación de la medida. 160

E.71. Diferencia entre la mancha de inundación antes (a) y después (b) de proteger la zona de Buñuel para el periodo de retorno de 10 años. 161

E.72. Diferencia de h tras la protección de la zona de Buñuel para el periodo de retorno de 10 años. Diferencias positivas implican más cantidad de agua tras la aplicación de la medida. 161

F.1. Huella de inundación en diferentes proyecciones para la avenida de 2013. . . 164

F.2. Visualización en 3D de la cota, z (en verde), y el calado, h (en azul). . . . 166

F.3. Representación del módulo de la velocidad del flujo en la lámina de inundación 166

Capítulo 1

Introducción

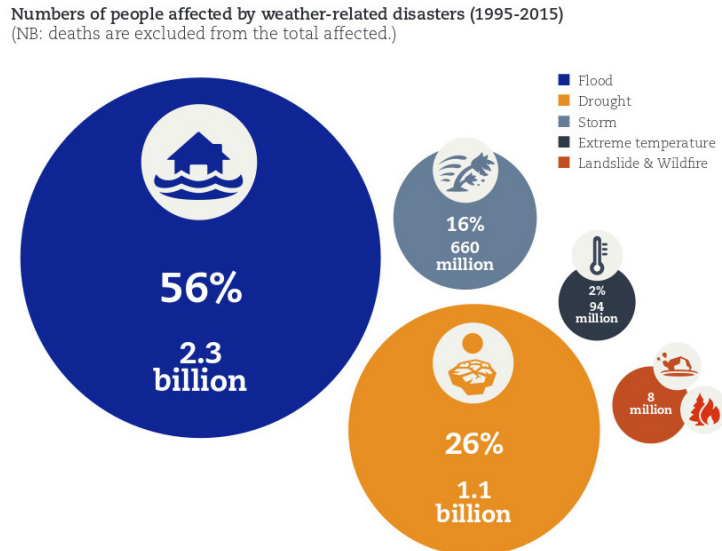
Los ríos constituyen un elemento básico para el sustento de la vida humana. Desde los inicios, muchas de las poblaciones del mundo se han asentado cerca de ríos no sólo para garantizar el suministro de agua sino también por las propiedades de las tierras que se encuentran en las cuencas. Sin embargo, cíclicamente los ríos se desbordan a causa de fuertes precipitaciones produciendo daños tanto personales como materiales.

Los estudios de avenidas bajo su concepto de situación extrema revelan la frecuencia y la severidad de estos fenómenos. Las avenidas generan inundaciones y la destrucción o modificación de elementos naturales y artificiales. La elevación de la lámina de agua anegando terrenos, zonas urbanas, rurales e industriales provoca pérdidas agropecuarias, paisajísticas, naturales, de flora y fauna y de actividad social y económica. El caudal, volumen y velocidad del agua de una avenida transforma el entorno a su paso, modificando las riberas de los ríos ya que se llegan a transportar grandes cantidades de sedimentos durante largos espacios de tiempo. Estos fenómenos pueden tener efectos destructivos sobre infraestructuras varias, tales como puentes, carreteras, edificaciones, etc. Asimismo, ya se ha citado el devastador efecto que, en muchas ocasiones, puede tener una inundación respecto a la población, ya que pueden llegar a llevarse elevadas cantidades de vidas por delante.

Un informe reciente realizado por Naciones Unidas [10]¹ revela que, en los últimos 20 años, 157000 personas han muerto a consecuencia de inundaciones. Además, la misma fuente afirma que entre 1995 y 2015, 2,3 billones de personas se vieron afectadas por una inundación, lo que supone el 56 % de todos los afectados por desastres meteorológicos en el mundo. En la Figura 1.1 (b) se aprecia que el citado porcentaje es considerablemente mayor que el de afectados por cualquier otro desastre meteorológico. Durante este periodo de tiempo se registraron 3062 inundaciones, que suponen un 43 % de todos los desastres naturales que se han producido en estos últimos 20 años. De nuevo, se observa que las

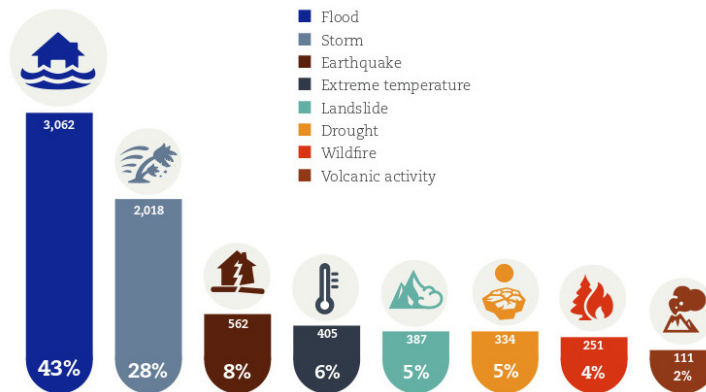
¹<http://floodlist.com/dealing-with-floods/flood-disaster-figures-1995-2015>

inundaciones son el desastre natural que ocurre con más frecuencia, además de ser el desastre meteorológico que afecta a más cantidad de población, como se ve en la Figura 1.1 (a).



(a)

Percentage of occurrences of natural disasters by disaster type (1995-2015)



(b)

Figura 1.1: Representación del porcentaje que supone cada desastre meteorológico frente al total de los ocurridos en función de (a) número de personas afectadas, (b) tipo de desastre. [Fuente: UNISDR/CRED]

En el continente Europeo, el Sistema Español de Información sobre el Agua (Hispa-gua)² calculó que las inundaciones constituyen el 43 % de todos los desastres naturales acontecidos en el periodo 1998-2002, en el cual Europa sufrió 100 inundaciones graves que supusieron la pérdida de 700 vidas y el desplazamiento de aproximadamente medio millón

²http://hispagua.cedex.es/sites/default/files/especiales/desastres%20naturales/desastres_europa.htm

de personas. Además, un informe del EM-DAT³, base de datos del CRED (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters)[13], analiza las 3 décadas que transcurren entre 1973 y 2002, señalando que en este periodo se produjeron un total de 264 inundaciones en Europa clasificadas como desastre⁴, en las cuales se sabe que 2626 personas perdieron la vida.

Además de pérdidas personales, estos desastres naturales provocan también enormes cantidades de daños económicos y materiales, ya que pueden tener consecuencias catastróficas de producción en todo tipo de actividades que se realizan en las cuencas, como son las agrícolas, ganaderas, forestales, etc.; provocando que los correspondientes poderes públicos tengan que hacerse cargo de indemnizaciones millonarias en concepto de reparación de daños y restablecimiento de servicios.

El mismo informe de Naciones Unidas, señala que las inundaciones son el segundo fenómeno natural que más pérdidas económicas genera con un coste de 662 billones de dólares en los últimos 20 años, suponiendo el 25 % de las pérdidas totales (por detrás de las tormentas con el 38 %), como se ve en la Figura 1.2. Si nos centramos en Europa, un estudio publicado en la Revista de Obras Públicas⁵[3] afirma que durante el periodo entre 1989 y 2008 las pérdidas económicas se elevaron a 82400 millones de euros, lo que supone un 40 % de las pérdidas provocadas por desastres naturales.

En España la ocurrencia de estos fenómenos también se hace notar elevando la importancia que le otorgan tanto los poderes públicos como la propia población. El Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente⁶ afirma que las inundaciones son las catástrofe natural que más daños genera en el país, ya que se estima que estos alcanzan en total de media los 800 millones de euros anuales. En concreto, las avenidas que tuvieron lugar en el río Ebro, el más caudaloso de España, el pasado 2015 supusieron un pago de más de 105 millones de euros para la reparación de los efectos causados por la inundación.

Por todo ello, en la actualidad se destinan recursos para el análisis de estos fenómenos, que constituyen un problema de vital importancia en todos los países en los que se padecen. A pesar de que erradicar la ocurrencia de estos sucesos es imposible, el trabajo actual de investigación trata de mitigar los efectos de las avenidas y, a su vez, mejorar las herramientas de predicción, permitiendo así anteponerse en el tiempo a estos fenómenos

³<http://www.emdat.be>

⁴El criterio utilizado por EM-DAT para la clasificación de desastre es: al menos 10 muertes o más de 100 personas afectadas o que solicitan ayuda nacional o internacional.

⁵<http://ropdigital.ciccp.es>

⁶www.magrama.gob.es

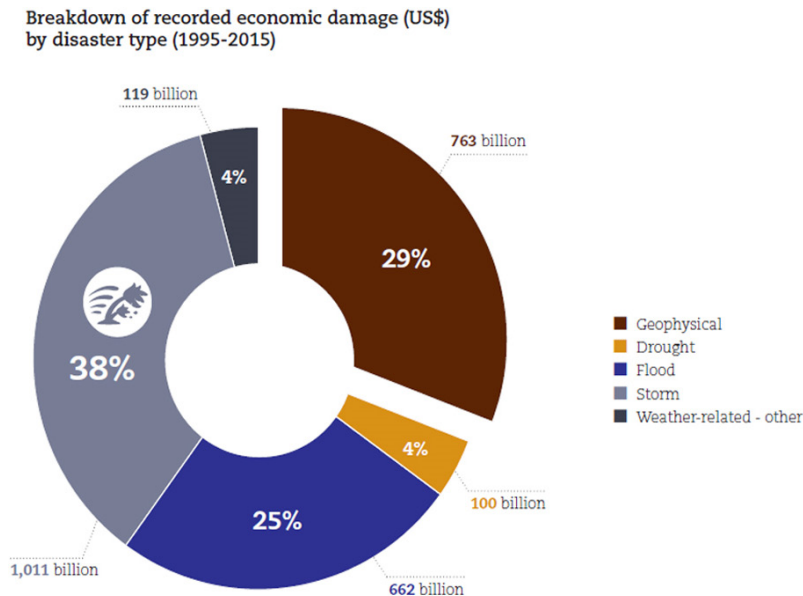


Figura 1.2: Representación del porcentaje de pérdidas económicas que supone cada desastre meteorológico frente al total de los ocurridos. [Fuente: UNISDR/CRED]

y organizar diferentes planes de actuación.

Las medidas orientadas a la mitigación de los efectos que causa una avenida han sido en el pasado y siguen siendo en la actualidad imprescindibles. Este tipo de soluciones tratan de actuar sobre el río haciendo que las inundaciones provocadas por una avenida sean menores y causen, por tanto, menos efecto sobre los alrededores. Para ello se toman medidas tales como levantamiento de diques y motas, creación de balsas de inundación, construcción de presas y trabajos de limpieza de cauce.

Por esta razón, tanto las medidas estructurales, dedicadas al cambio de la topografía mitigando así el efecto de la inundación, como las no estructurales, orientadas a reducir el riesgo mediante la predicción, se ayudan de herramientas que analizan estos fenómenos con datos históricos y pueden predecir situaciones futuras. Orientada a ello, la simulación computacional se ha convertido en los últimos años en una potente herramienta para el estudio de estos fenómenos a través de modelos matemáticos que resuelven el comportamiento del flujo de inundaciones. Además, el avance paralelo de la tecnología informática ha permitido que estos procesos de cálculo sean cada vez más rápidos reduciendo el coste computacional y permitiendo así el uso de modelos más complejos y precisos.

Las avenidas producidas el pasado febrero de 2015 en el Ebro han motivado la realización de este trabajo para dar respuesta a la predicción de posibles avenidas futuras y

analizar diferentes actuaciones dedicadas a la mitigación de las mismas, que afectan a una gran cantidad de personas. Para ello, en este trabajo se ha realizado un análisis mediante simulación numérica de las inundaciones que tienen lugar de manera cíclica en el **tramo medio del río Ebro**, desde Castejón de Ebro a Zaragoza. A partir de datos topográficos, secciones batimétricas y datos históricos, se han estudiado y reconstruido avenidas reales ocurridas en este río, en los años 2003, 2013 y 2015 en concreto; así como avenidas correspondientes a diferentes periodos de retorno, en concreto, a los de 5, 10, 100 y 500 años, donde los tres últimos representan los eventos de alta, media y baja probabilidad de ocurrencia, respectivamente.

Se ha analizado el alcance de las avenidas tanto en área inundada, como en altura de la lámina de agua (calado) y velocidad. Se han propuesto y estudiado computacionalmente escenarios de canalización, gestión de la vegetación del cauce y construcción de balsas en la zona del tramo medio del Ebro, dando las pautas de comportamiento de las avenidas en esos casos y seleccionando la que se ha creído que sería la mejor opción para mitigar estos sucesos en el futuro. Junto a los resultados recogidos en la memoria, se han habilitado enlaces web con vídeos de los resultados del estudio en el portal de Youtube.

Capítulo 2

Planteamiento del problema

La cuenca del Ebro discurre por el noreste de la península ibérica, desde la Sierra de Híjar (en Cantabria) hasta su desembocadura en Deltebre (Cataluña) (Figura 2.1). A pesar de no ser una de las zonas con más densidad de población del país, cuenta con numerosas poblaciones en sus orillas y una gran cantidad de zonas dedicadas a agricultura y ganadería. Como ejemplo, se muestra la Figura 2.2 en la que se observa que existe una alta concentración de explotaciones ganaderas en las llanuras de inundación del río a su paso por Aragón.

En la introducción se han explicado los problemas que las inundaciones causan en todo el mundo y se ha hecho notar la importancia de los sistemas de prevención y mitigación de avenidas. En España estos fenómenos también ocurren, a pesar de contar con ríos de caudal medio, y los poderes públicos dedican esfuerzo y recursos a su análisis. En concreto, el río Ebro es gestionado por la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE), un organismo autónomo dependiente del Ministerio de Medio Ambiente que se centra en la gestión, regulación y mantenimiento de la cuenca hidrográfica de este río, cuya extensión se ve en la Figura 2.1. La CHE realiza estudios a partir de medidas que obtiene de estaciones meteorológicas y de aforo con las que cuenta (ver Figura 2.3), repartidas por toda la cuenca, y pone todos sus datos e informes a disposición de quien las requiera para llevar a cabo estudios como el presente.

Inevitablemente, las avenidas en el Ebro se producen de manera periódica y, frecuentemente (periodo de retorno de 2 años), se alcanzan valores de caudal capaces de producir inundaciones; por ejemplo a su paso por Castejón, en el que se estima que el río supera los $2000 \text{ m}^3/\text{s}$. Los estudios de periodos de retorno son importantes para la prevención, ya que dan una idea de la frecuencia con la que el río puede alcanzar ciertos valores de caudal, a través de análisis estadísticos. En la Tabla 2.1 se exponen los distintos periodos de retorno para diferentes poblaciones que se encuentran en la cuenca del río.

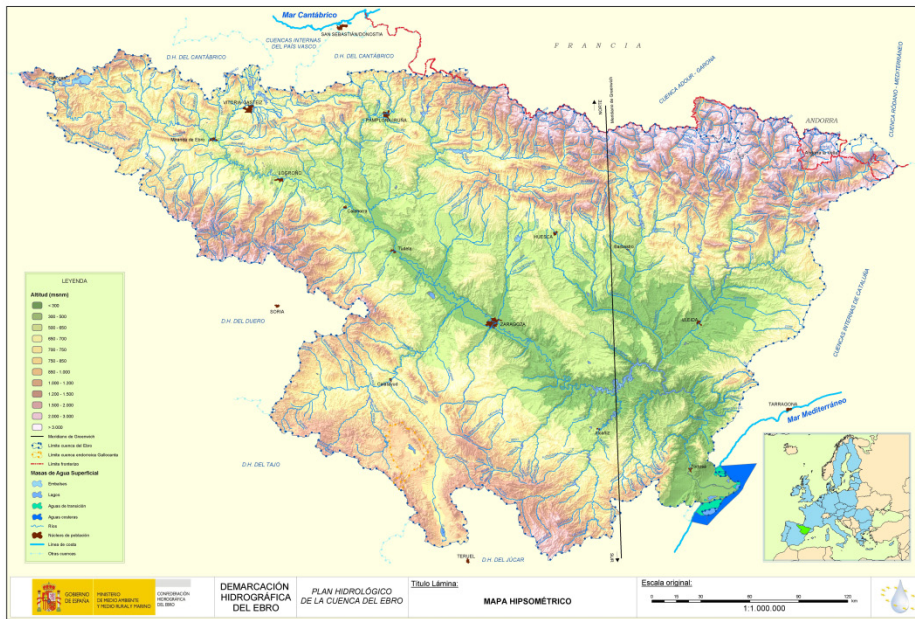


Figura 2.1: Delimitación territorial de la cuenca hidrográfica del Ebro.

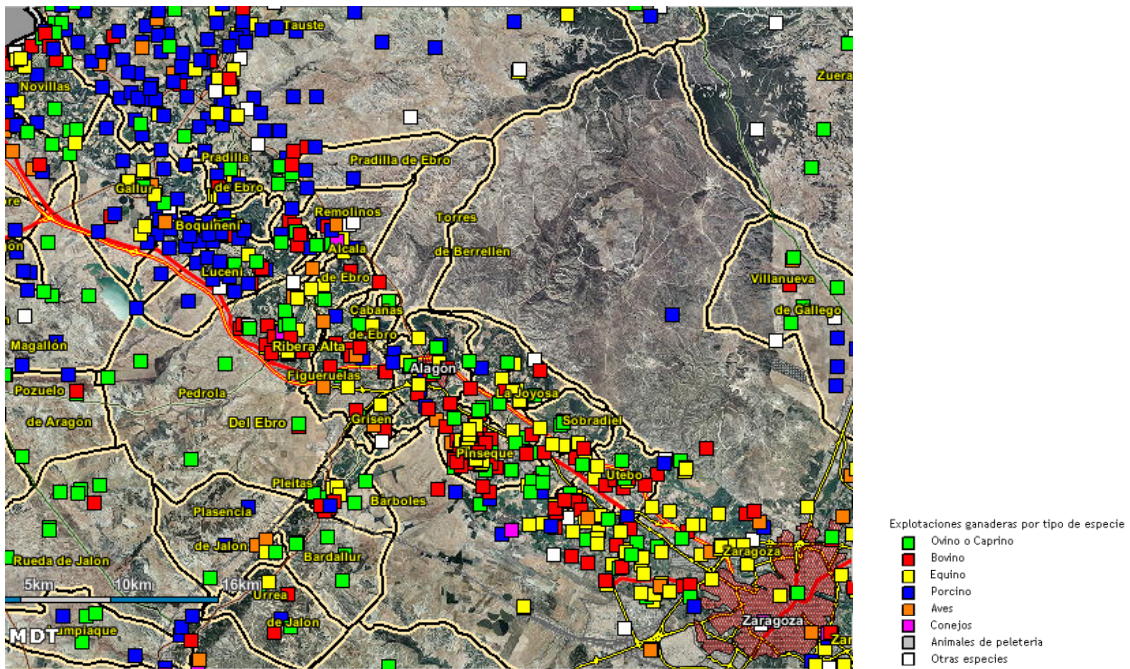


Figura 2.2: Explotaciones ganaderas en la comunidad autónoma de Aragón. [Fuente: SITAR]

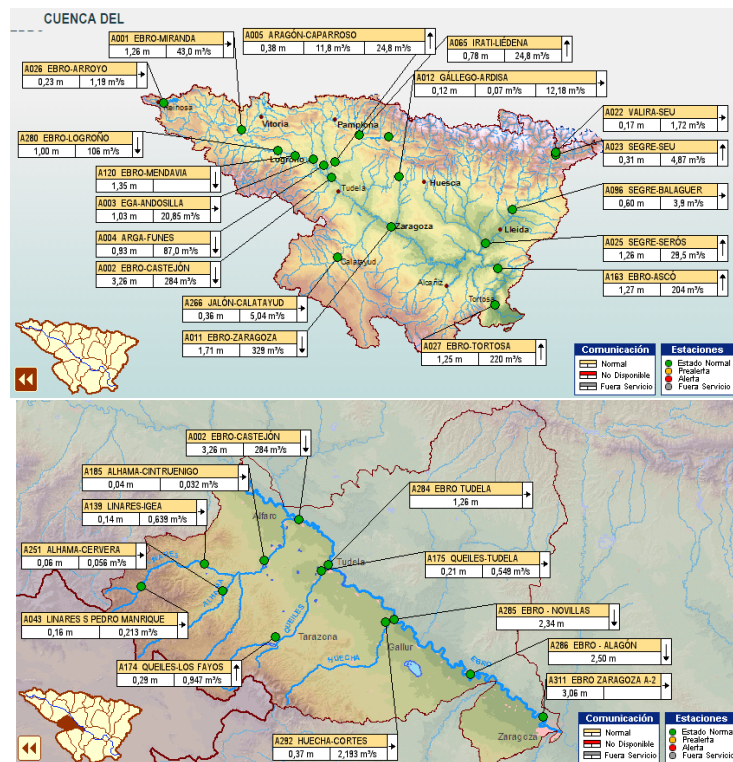


Figura 2.3: Localización de las estaciones de medida que la CHE tiene repartidas por el cauce del Ebro. [Fuente: SAIH Ebro]

Periodo	Caudal[m³/s]		
	Castejón	Tudela	Zaragoza
2 años	2104	2115	2884
5 años	2672	2667	2513
10 años	3047	3045	2933
25 años	3522	3522	3463
100 años	4223	4225	4246
500 años	5031	5036	5148

Tabla 2.1: Caudales pico para diferentes periodos de retorno en las poblaciones más importantes en el tramo medio del Ebro. [Fuente: SAIH Ebro]



Figura 2.4: Representación en 3D del dominio total de estudio.

De toda la extensión que tiene la cuenca del río Ebro, el presente trabajo se centra en el estudio de la zona que transcurre entre las poblaciones de Castejón de Ebro y Zaragoza. El dominio aguas arriba y aguas abajo queda delimitado por las estaciones de aforo con las que ambas ciudades cuentan, y que servirán más adelante como condiciones de contorno. En la Figura 2.4 se muestra una imagen 3D del dominio estudiado, el cual tiene una extensión total de 744 km^2 . A pesar de que la distancia en línea recta entre las dos poblaciones que limitan el dominio es de casi 90 km , la longitud total del cauce alcanza los 125 km , aproximadamente. El dominio total y las poblaciones que en él se encuentran se pueden observar más detalladamente en el siguiente enlace:

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

El estudio de inundaciones en este tramo se realiza a partir de simulación numérica. Para ello se utiliza un programa de modelización (RiverFlow2D) que resuelve las llamadas ecuaciones de aguas poco profundas o *Shallow Water Equations* (SWE) que gobiernan el comportamiento del flujo de superficie libre (explicadas en el Anexo A). Su resolución se realiza a través de un método numérico de volúmenes finitos (ver Anexo B). Con dicho software de simulación se reproduce el escenario de una inundación, en un terreno dado, imponiendo las condiciones de contorno e iniciales deseadas para representar la realidad de la manera más precisa posible. La imposición de estas condiciones y la utilización del software quedan explicados en el Anexo B detalladamente.

Capítulo 3

Datos de partida

Para realizar un estudio como el que se plantea en este trabajo son necesarios una serie de datos, que se introducirán en el programa de simulación para representar la realidad de manera discreta como: un Modelo Digital de Terreno (MDT), un mapa característico de los usos del suelo y medidas de caudal y/o altura de agua en algunos puntos del cauce.

3.1. Modelo Digital de Terreno

La naturaleza discreta del problema empieza con los datos del terreno, que vienen recogidos en una estructura que representa la distribución espacial de la cota respecto del nivel del mar, z_b . En concreto, en nuestro caso, los datos de la cartografía vienen recogidos en Modelos Digitales de Terreno, una red cuadrada de puntos en el plano xy con información de las elevaciones respecto a un sistema de referencia concreto. Es decir, a nivel computacional, los MDT son una matriz de elevaciones z_b en el plano (x, y) .

Estos Modelos Digitales de Terreno han sido generados mediante tecnología LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging), y tratados para eliminar los valores correspondientes a elementos diferenciados de terreno como vegetación o puentes. De esta forma, el MDT representa el suelo desnudo, la topografía. Con esta técnica, el fondo del cauce no es recogido ya que sólo se detecta la superficie libre del agua. Por esta razón, como complemento a la cartografía general se han desarrollado trabajos batimétricos consistentes en la obtención del lecho y márgenes del cauce a partir de datos de secciones transversales medidas a lo largo del tramo de río que se estudia. Finalmente, para la obtención de una información cartográfica continua, hace falta utilizar un MDT con la información del terreno y una reconstrucción del cauce a partir de secciones batimétricas que represente correctamente la capacidad de transporte del río.

Para la parte de las llanuras de inundación se usa un MDT con una resolución de 5x5

m^2 . Este MDT se ha obtenido del Instituto Geográfico Nacional ¹. Para la batimetría del río se utilizaron datos de secciones transversales medidas con las que se reconstruyó un cauce de la misma resolución, $5 \times 5 m^2$.

La reconstrucción del cauce se puede realizar de múltiples maneras en función de la información con la que se cuenta. En el presente trabajo, donde se parte de secciones transversales al río en ciertos puntos del cauce, se utiliza un algoritmo que genera la información entre secciones [7, 8]. Dicho algoritmo interpola, en primer lugar, la trayectoria del cauce en el plano horizontal; y después, utiliza las coordenadas en 3D de los puntos de las secciones transversales para calcular el cauce siguiendo la trayectoria anteriormente obtenida. En la Figura 3.1 se observa la cota z_b del cauce reconstruido a partir de secciones transversales en una zona del dominio.

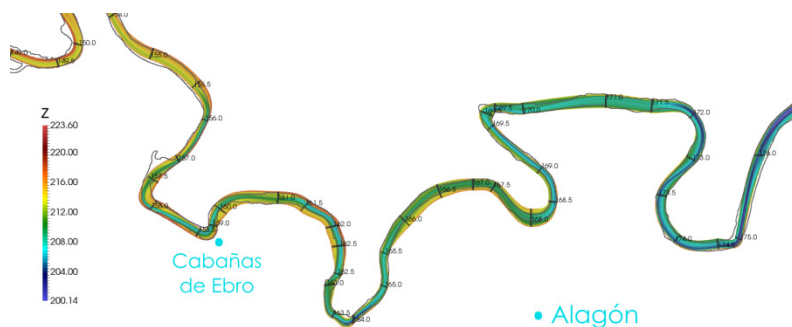


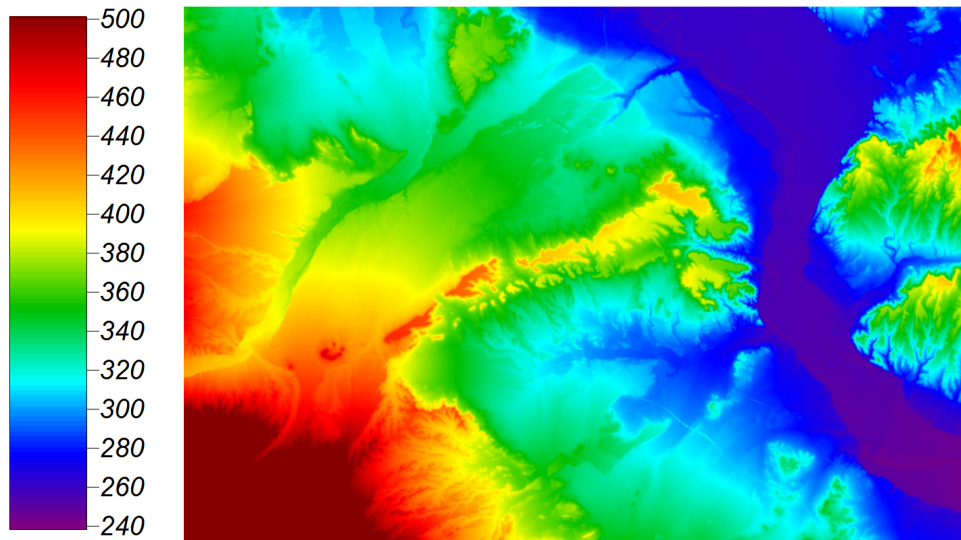
Figura 3.1: Cauce interpolado a partir de secciones batimétricas a la altura de Alagón.

En la Figura 3.2 se muestran dos imágenes de una parte del MDT del IGN. Se observa que, aunque un tamaño de malla de 5 m pueda parecer grueso, para el tipo de estudio que se realiza y las dimensiones del dominio total, representa los datos del terreno con bastante precisión.

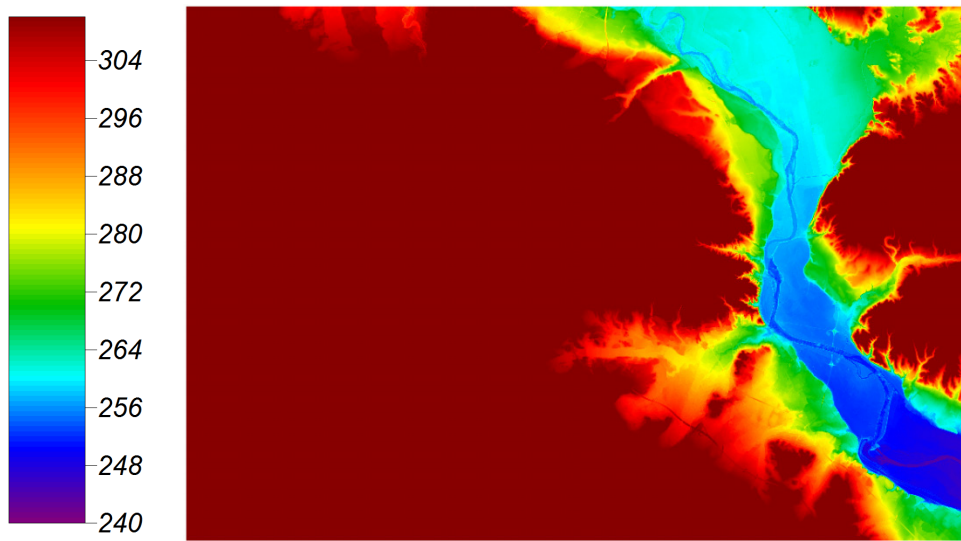
3.2. Mapa de rozamiento

Para la representación del terreno no sólo es necesaria información de la topografía, sino también del tipo de suelo por donde el flujo va a transcurrir. Cada uso del suelo tiene unas condiciones diferentes que se traducen en un coeficiente de rozamiento distinto. La introducción del mismo en el modelo numérico se hace a través del número de Manning n , que aporta información de la fricción. Para ello se divide el dominio en diferentes regiones según el uso del suelo y a cada región o polígono se le asigna un coeficiente de rozamiento.

¹<http://www.ign.es/ign/layoutIn/modeloDigitalTerreno.do>



(a)



(b)

Figura 3.2: MDT del Ebro a la altura de Tudela. Cota del terreno a escala 240-500 m (a) y 240-310 m (b).

Los coeficientes de Manning a utilizar se obtienen de tablas experimentales o bibliografía y permiten introducir información del rozamiento entre el flujo y el terreno. Para el presente trabajo se ha dividido el dominio en 7 tipos de uso del suelo y los valores del coeficiente n asignado se muestran en la Tabla 3.1. El proceso de asignación de estos valores y otros detalles se explican en el Anexo D.

Uso del suelo	n Manning	Referencia
Zona urbana	0.05	van der Sande et al. [18]
Cauce del río	0.035	Arcement y Schneider [1]
Zona arbustos	0.04	Brisbane City Council [17]
Zona medio boscosa	0.045	Arcement y Schneider [1]
Zona boscosa (soto)	0.06	Arcement y Schneider [1]
Zona campos	0.028	Brisbane City Council [17]
Zona Galacho (agua estancada)	0.024	Palmeri et al.[16]

Tabla 3.1: Coeficiente de rozamiento y referencia asignadas a los polígonos del dominio espacial según el uso del suelo.

La Figura 3.3 muestra el mapa de rozamiento en un tramo del dominio de estudio. Se observan diferentes regiones con distintos coeficientes de Manning en las riberas del cauce atendiendo a la cantidad de vegetación.

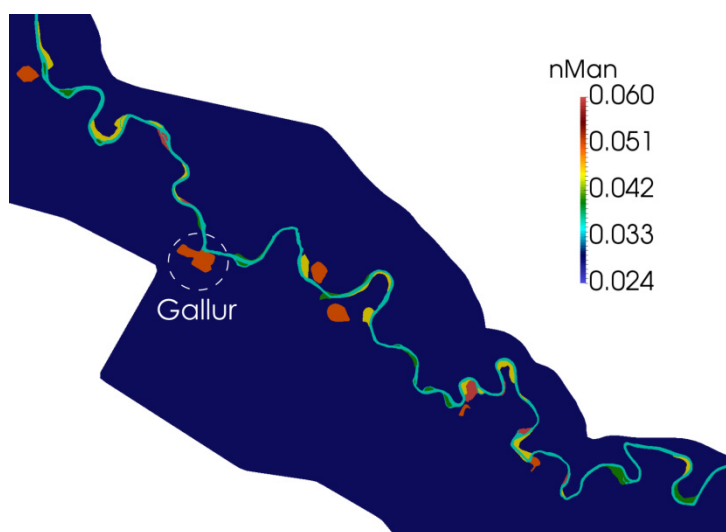


Figura 3.3: Mapa de rozamiento a la altura de Gallur.

3.3. Malla de cálculo

Una vez se tiene un MDT y un mapa de rozamiento hay que proceder a la discretización del problema para el cálculo numérico. Para la realización de dichos cálculos se elige un método numérico de resolución en volúmenes finitos (ver Anexo B) que se resuelve en una malla de cálculo triangular y adaptada al terreno. El MDT viene dado en una malla cuadrada de igual espaciado entre puntos; por tanto, se procesa la información del MDT para conseguir valores de cota de la superficie en los centros de las nuevas celdas triangulares de la malla de cálculo. Como se expone en el Anexo B, cuanto menores sean estas celdas, más se aproximará la resolución de la malla a la del propio MDT, y por tanto a la realidad, pero también será más lento el proceso de cálculo. Por ello, para encontrar un compromiso entre estas dos circunstancias, se recurre a mallas adaptativas en el espacio, es decir, que constan de celdas más finas en tramos que lo requieren y de una malla más gruesa cuando no es necesaria tanta precisión. Se puede observar un ejemplo de dicha práctica en la Figura 3.4, donde se ven celdas más pequeñas en las motas y en el cauce que en la llanura.

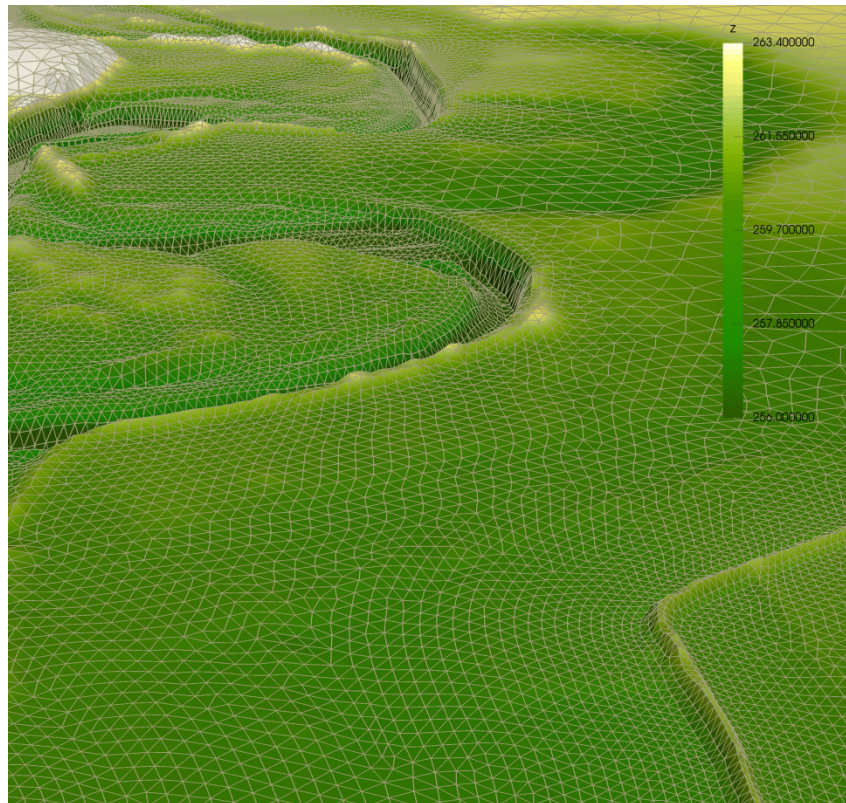


Figura 3.4: Adaptación en el espacio de la malla utilizada a la altura de Castejón de Ebro.

Por otro lado, no sólo es importante la elección del tamaño de celda para el cálculo,

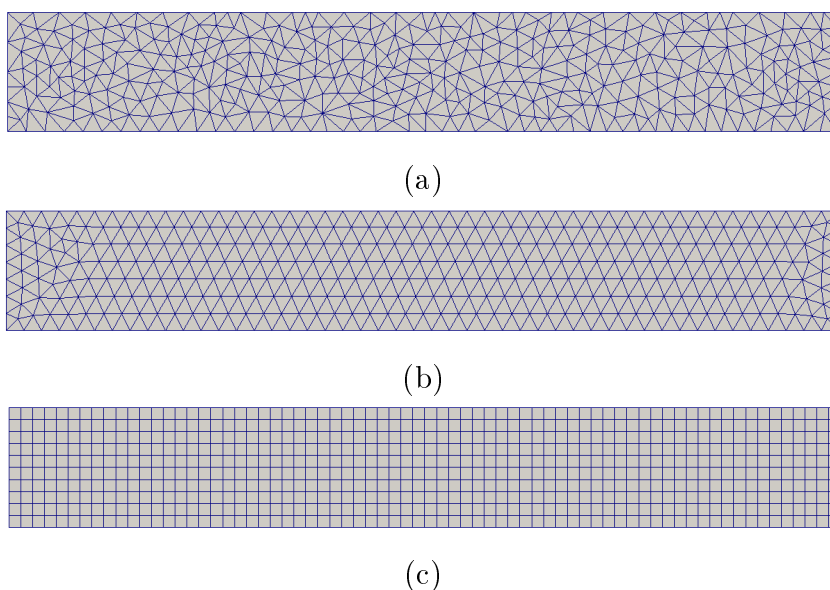


Figura 3.5: Diferentes tipos de mallas: (a) triangular no estructurada, (b) triangular equilátera y (c) rectangular estructurada

sino también la forma y estructura de la malla. Como se puede observar en la Figura 3.4, la malla que se ha utilizado es triangular y está parcialmente estructurada, es decir, sigue un orden y trata de crear siempre triángulos equiláteros, pero se adapta a las irregularidades adoptando formas más desordenadas e irregulares. Se ha utilizado este tipo de malla porque al no tener una orientación preferencial no direcciona el flujo, como sí hacen las mallas cuadradas. En la Figura 3.5 se muestran diferentes tipos de mallas que se pueden usar para el cálculo en volúmenes finitos: no estructurada (a), triangular equilátera (b) y rectangular estructurada (c). En nuestro caso se escoge la malla (b).

La resolución de la malla de cálculo viene limitada por la resolución del MDT, en tanto que este es de 5m, imponer una resolución de malla mayor solo aumentaría el número de celdas sin incrementar la definición. Además, el tramo de Castejón a Zaragoza mide alrededor de 90 km de largo, por lo que una resolución demasiado pequeña podría elevar el número de celdas en una cantidad que no se puede asumir ni para el cálculo ni para la gestión posterior de los datos. Por otro lado, el dominio se ha creado lo suficientemente ancho como para que la lámina de inundación no llegue a los contornos, provocando que zonas de poco interés se encuentren dentro del mismo. A estas zonas, se les pondrá un tamaño de celda mucho mayor. A continuación, en la Tabla 3.2 se muestra el tamaño alrededor del cual se encuentran las aristas de las celdas en las distintas zonas del dominio.

Finalmente, tras la calibración y el refinamiento de la malla en las zonas necesarias, como se detalla en el Anexo D, se obtiene una malla con 867672 elementos. Es un número

Zona	Longitud arista de celda[m]
Cauce del río	15
Vegetación próxima al río	23
Motas	10
Límites exteriores del dominio	250
Poblaciones grandes	100

Tabla 3.2: Longitud aproximada de las aristas de las celdas de la malla en distintas zonas del dominio

de celdas muy elevado, no sólo por el hecho de haber refinado en algunas zonas que así lo requerían sino también por la gran extensión del dominio que se analiza. Para la visualización completa en 3D de la malla final se ha habilitado el siguiente enlace web:

https://www.youtube.com/watch?v=_qYQioLA5Yo

3.4. Hidrogramas de avenida

Con el objetivo de analizar las inundaciones en el río Ebro, se necesita el hidrograma (curva de caudal a lo largo del tiempo) que se introducirá como condición de contorno en la entrada del tramo a simular (en Castejón de Ebro) y que el modelo numérico transportará a lo largo del cauce hasta el punto que consideremos como final en la simulación (Zaragoza). Esta información no es un dato que venga dado ya en forma de tabla y se pueda introducir directamente en el programa de pre-proceso; sino que en algunos casos hay que hacer un filtrado de medidas históricas y; en otros incluso, generar los hidrogramas a partir de otros datos.

Para la obtención de estas curvas $Q(t)$ hay que distinguir entre los dos tipos de análisis que se realizan en el presente trabajo.

- **Eventos de diseño** cuyas simulaciones sirven para la prevención y son de estudio obligado cuando se construye una estructura sobre el río. Los datos vienen de ajustes estadísticos y son valores de caudales pico con cierta probabilidad de ser alcanzados (caudales de retorno). La obtención de hidrogramas a partir de estos valores se detalla en el Anexo C.
- **Avenidas reales** que han ocurrido en el Ebro utilizadas para comparar con nuestro modelo a la hora de calibrar, validar o estudiar nuevos escenarios. De dichas avenidas existen medidas de caudal en algunos puntos de aforo (ver Figura 2.3) que, tras ser procesadas, se convertirán en los hidrogramas de entrada de nuestras simulaciones.

Los hidrogramas utilizados tras el filtrado de datos se pueden ver en detalle en el Anexo C.

3.5. Curvas de aforo

Del mismo modo, las condiciones de contorno a la salida imponen cómo el flujo sale de nuestro dominio. En este caso se utilizará una curva de aforo. Las curvas de aforo son tablas de correlación entre el calado, h , y el caudal, Q . Estas curvas, igual que los hidrogramas, no se encuentran disponibles en forma de tabla y hay que obtener datos y después procesarlos para obtenerlas. El procedimiento consiste en tomar los datos históricos recogidos por CHE en la estación de aforo del puente de la Autopista A-68, donde acaba el dominio, y a partir de ellos se genera una curva de aforo. Su reconstrucción puede verse en detalle en el Anexo C.

3.6. Condiciones iniciales

Finalmente, es necesaria información de la situación inicial del dominio antes de simular, es decir, es necesaria una condición inicial. Matemáticamente significa proporcionar al modelo información de las variables en el instante $t=0$. Para el presente trabajo se utilizan condiciones iniciales estacionarias de caudales constantes, coincidentes con los caudales iniciales de los hidrogramas de avenida que se imponen posteriormente. Para su obtención es necesaria la simulación sobre el terreno seco de hidrogramas de caudal constante hasta que el dominio alcance el estado estacionario. Posteriormente, para simular las avenidas, se parte de esos estados, que contienen la información de las tres variables del problema (calado y componentes de la velocidad: h, u, v) en cada celda para dicho estado estacionario. Información más detallada de la imposición de estas condiciones iniciales se puede encontrar en el Anexo B.

Capítulo 4

Simulaciones numéricas

A continuación se presentan los resultados numéricos obtenidos de las simulaciones realizadas. De cada simulación se ha extraído una gran cantidad de información en términos de: áreas de inundación, velocidades, calados, etc. Dicha información se encuentra en el Anexo E en detalle. En este capítulo se muestra un resumen muy breve de las que llamaremos **simulaciones previas** (estudios de avenidas ocurridas en el Ebro y de avenidas de diseño) y **simulaciones de mitigación** (estudio del efecto de las medidas adoptadas para mitigar las avenidas), contenidas en dicho Anexo.

4.1. Resultados previos

En total se han realizado 7 simulaciones antes de poner a prueba las medidas de mitigación adoptadas. Estas se dividen en: simulaciones de diseño, avenidas teóricas basadas en periodos de retorno; y simulaciones reales, avenidas ocurridas recientemente en el río Ebro.

Las **avenidas de diseño** son avenidas teóricas cuyo propósito es simular posibles crecidas futuras. Como se explica en el Anexo C, sus caudales pico y sus periodos de ocurrencia provienen de estudios estadísticos y, con esa información, se han generado unos hidrogramas de diseño. Se han analizado los periodos de retorno de 5, 10, 100 y 500 años, correspondiendo las tres últimas a avenidas de alta, media y baja probabilidad de ocurrencia respectivamente. Por otro lado, en el estudio de las **avenidas reales** se han simulado eventos ocurridos con hidrogramas procedentes de medidas tomadas durante dicho acontecimiento *in situ*. Se han simulado las avenidas de 2003, 2013 y 2015, y sus caudales pico y duración se pueden consultar en el Anexo C.

En las Tablas 4.1 y 4.2 se muestra información general de las avenidas y de las simulaciones de la mismas, para dar un idea de lo que implica simular eventos de tan larga

duración y tan alto caudal.

Periodo de retorno 5 años		Periodo de retorno 10 años	
Caudal inicial $248 \text{ m}^3/\text{s}$	Caudal pico $2672 \text{ m}^3/\text{s}$	Caudal inicial $248 \text{ m}^3/\text{s}$	Caudal pico $3047 \text{ m}^3/\text{s}$
Duración de avenida 300 h	Tiempo de simulación 9.93 h	Duración de avenida 300 h	Tiempo de simulación 11.01 h
Periodo de retorno 100 años		Periodo de retorno 500 años	
Caudal inicial $248 \text{ m}^3/\text{s}$	Caudal pico $4223 \text{ m}^3/\text{s}$	Caudal inicial $248 \text{ m}^3/\text{s}$	Caudal pico $5031 \text{ m}^3/\text{s}$
Duración de avenida 300 h	Tiempo de simulación 11.4 h	Duración de avenida 300 h	Tiempo de simulación 12.07 h

Tabla 4.1: Datos característicos de las avenidas previas de diseño y sus simulaciones.

Avenida de 2003		Avenida de 2013	
Caudal inicial $796 \text{ m}^3/\text{s}$	Caudal pico $2753 \text{ m}^3/\text{s}$	Caudal inicial $126 \text{ m}^3/\text{s}$	Caudal pico $2186 \text{ m}^3/\text{s}$
Duración de avenida 263.75 h	Tiempo de simulación 9.47 h	Duración de avenida 239.75 h	Tiempo de simulación 8.34 h
Avenida de 2015			
Caudal inicial $473 \text{ m}^3/\text{s}$		Caudal pico $2691 \text{ m}^3/\text{s}$	
Duración de avenida 503.75 h		Tiempo de simulación 17 h	

Tabla 4.2: Datos característicos de las avenidas previas reales y sus simulaciones.

A continuación se muestran los resultados de la avenida de 2015. En la Figura 4.1 se puede observar el hidrograma de entrada para esta simulación.

Las Figuras 4.2 y 4.3 muestran las **áreas máximas inundadas**; es decir, una imagen 2D en el instante de tiempo en el que el área de la lámina de agua es máxima. En este caso corresponde a $t=314$ horas, unas horas después del tiempo de llegada del pico (ver Figura 4.1), cuando el hidrograma ya ha sido transportado por gran parte del cauce.

En la Figura 4.4 se muestra la variación de los mapas de **vectores de velocidad** a lo largo del tiempo. Se puede ver cómo el hidrograma de esta avenida tiene dos picos

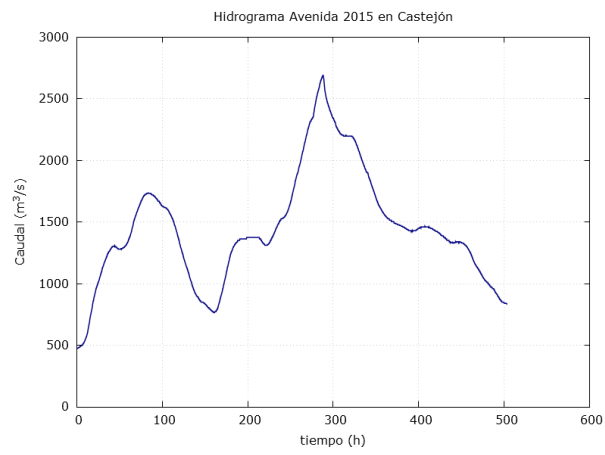


Figura 4.1: Hidrograma de entrada correspondiente a la avenida de 2015 en Castejón.



Figura 4.2: Vista general de la extensión de la lámina de inundación para la avenida de 2015.

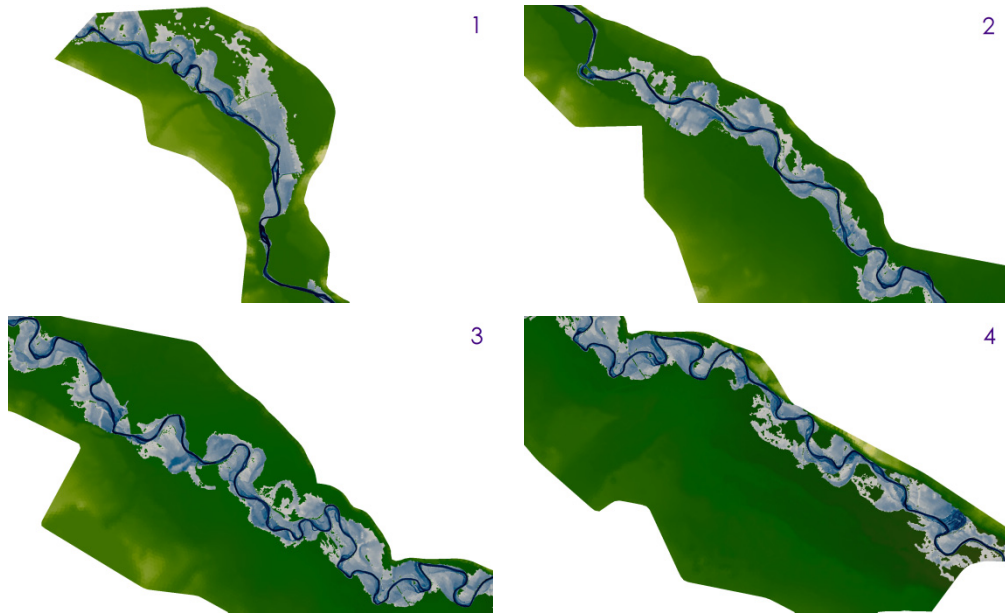


Figura 4.3: Vista local de la extensión de la lámina de inundación de 2015 sobre el terreno en el tramo entre Castejón y Zaragoza. La escala es la misma que en la Figura 4.2.

diferenciados (ver Figura 4.1), el terreno que se encuentra alrededor del cauce está más inundado para $t=80$ horas (primer pico) que para instantes posteriores; hasta que el segundo pico se alcanza y se produce la inundación máxima acompañada de los valores de velocidad más altos.

También es posible obtener la **evolución temporal del calado** en puntos concretos del cauce, gracias al programa de preproceso, que permite la colocación de sondas en el dominio. En el estudio de avenidas reales interesa mucho la colocación de dichos puntos en estaciones de aforo, ya que así es posible comparar con medidas tomadas en las mismas. Para las avenidas reales, con hidrogramas irregulares, la variación temporal del calado tampoco lleva una tendencia clara de subida al principio y bajada al final, como se ve en la Figura 4.5.

En la Figura 4.6 se muestra de manera local una imagen 3D del área inundada máxima a la altura de Castejón de Ebro (a) y Pradilla de Ebro (b) correspondiente a $t=314$ h.

En la Figura 4.7 se observa la evolución del área inundada desde los primeros instantes de tiempo ($t=20$ horas) hasta alcanzar el área de inundación máxima ($t=314$ horas). Se observa que la evolución del área inundada es consecuencia de la forma del hidrograma, que en este caso tiene dos máximos marcados y un descenso significativo de caudal entre ellos. Esto produce una mancha de inundación menor para $t=180$ horas que para $t=80$

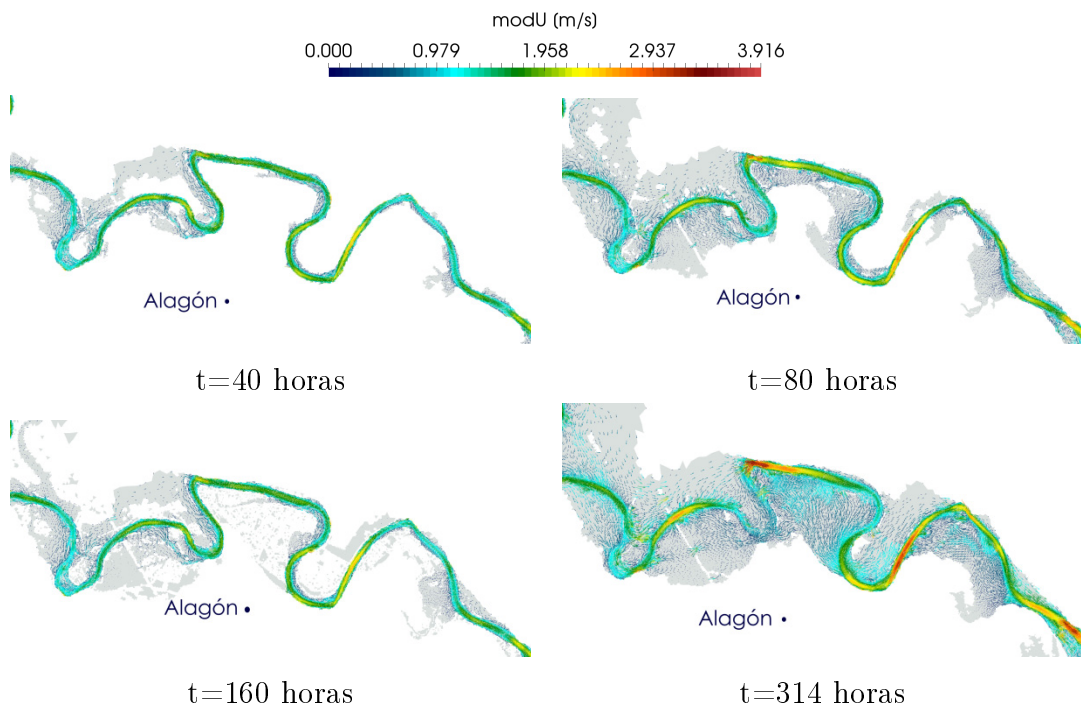


Figura 4.4: Evolución temporal de la velocidad tanto en módulo como en vectores para la avenida de 2015.

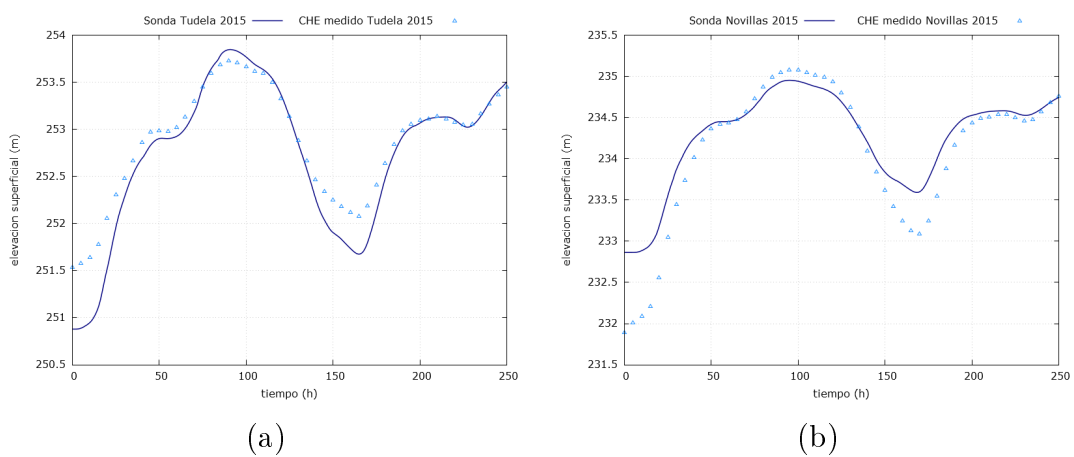
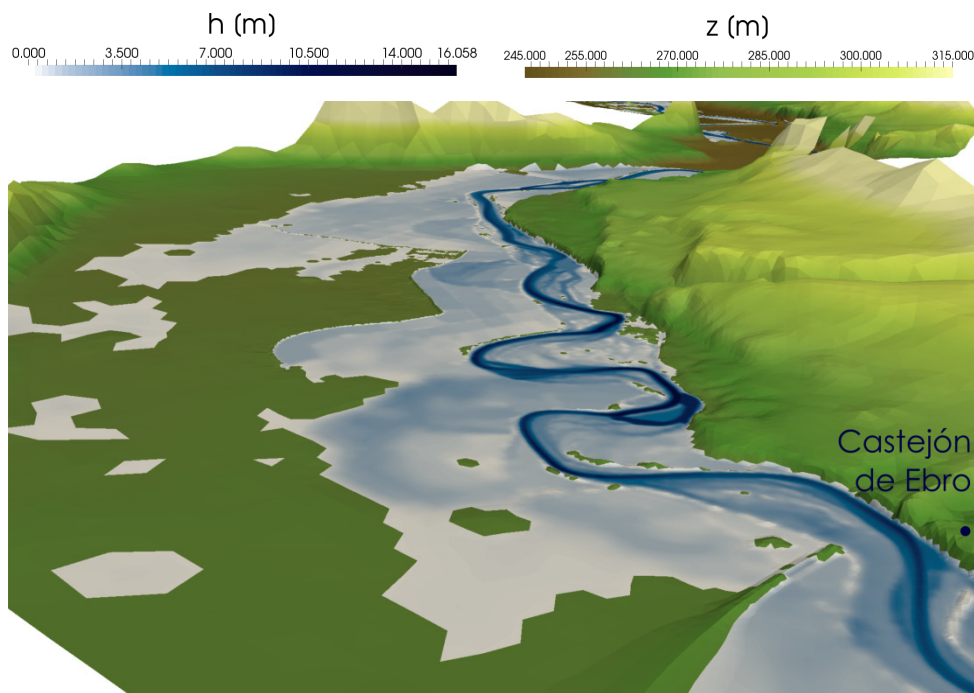
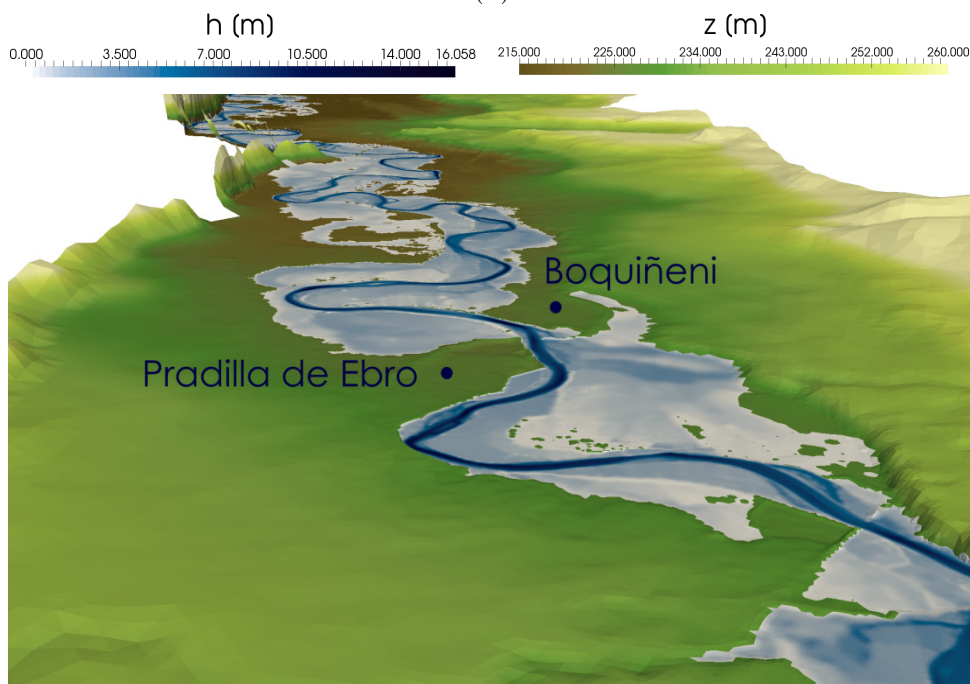


Figura 4.5: Comparación de resultados numéricos (línea continua) y medidas (puntos) de la evolución temporal del nivel superficial en Tudela (a) y en Novillas (b) para la avenida de 2015.



(a)



(b)

Figura 4.6: Imagen tridimensional de la inundación máxima a la altura de Castejón (a) y a su paso por Pradilla de Ebro (b) para la avenida de 2015.

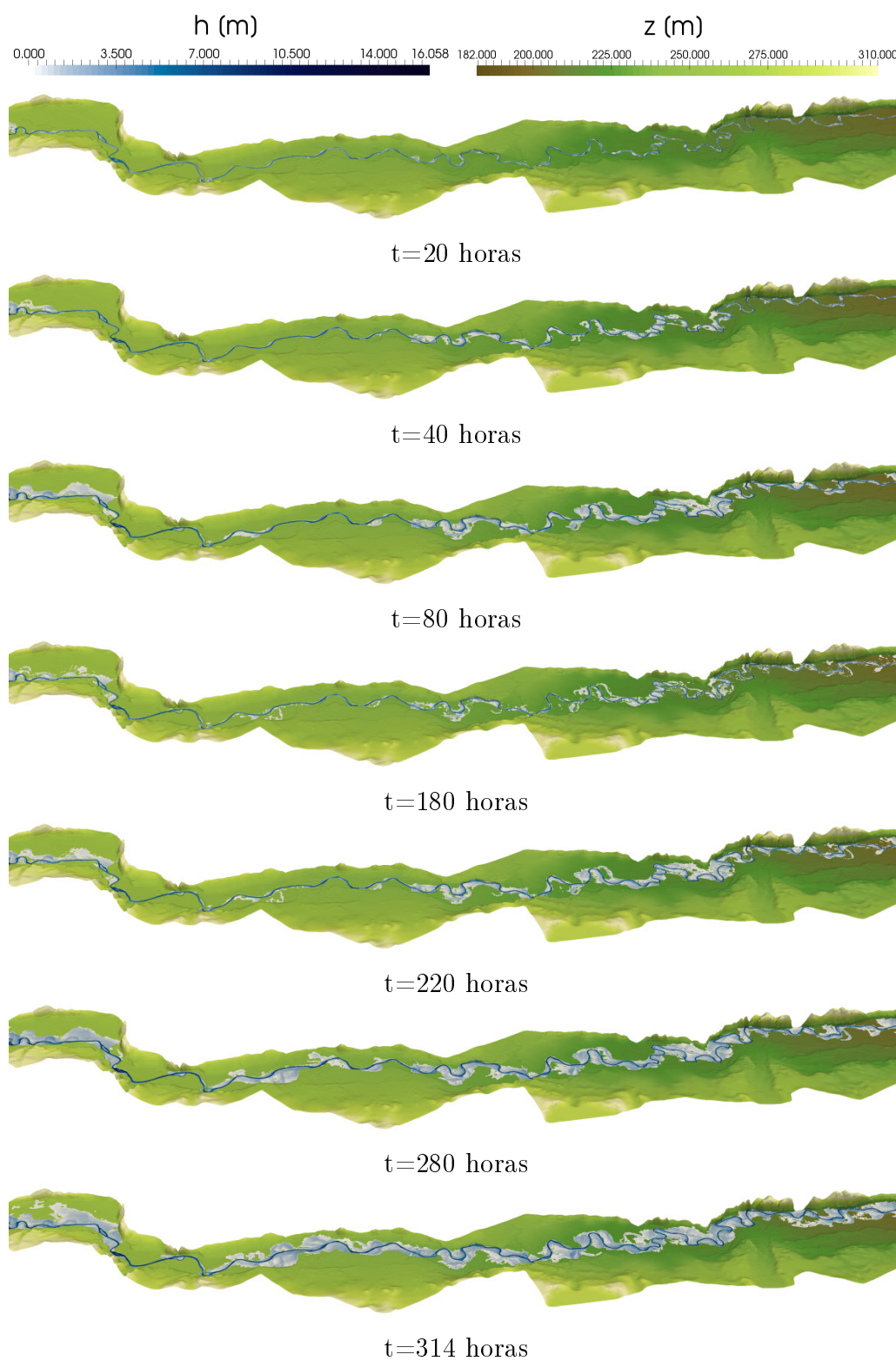


Figura 4.7: Mapas de área inundada en diferentes instantes de tiempo en el tramo Castejón-Zaragoza para la avenida de 2015.

horas. Posteriormente, alrededor de $t=280$ horas el pico de caudal vuelve a crecer en Castejón y provoca que en $t=314$ horas la mancha de inundación sea máxima.

El vídeo de la evolución de la avenida de 2015 se puede consultar en el siguiente enlace:
https://www.youtube.com/watch?v=0Av8_cCa0hw&feature=youtu.be

4.2. Resultados de mitigación

Una vez se han recogido los resultados de las simulaciones previas se pasan a simular las medidas de mitigación propuestas en este trabajo:

- Limpieza de la vegetación del cauce: Se traduce en una disminución de la fricción en el mapa de rozamiento, lo que provoca mayores velocidades y menores valores de calado. Se implementa en el método numérico a través del coeficiente de rozamiento de Manning, n , en el cauce.
- Zonas de inundación controlada: consiste en la inundación a propósito de zonas próximas al cauce de manera que, al almacenar ahí un volumen considerable de agua, el río quede aliviado aguas abajo.
- Protección de una zona concreta: se declara un espacio cercano al cauce como zona protegida que no debe inundarse y se estudia la viabilidad de protegerlo con motas.

De nuevo, los resultados de estas simulaciones pueden consultarse en detalle en el Anexo E. A continuación, se presenta un resumen de los resultados obtenidos y las conclusiones más relevantes para la avenida de 2015.

4.2.1. Limpieza de la vegetación del cauce

Una disminución de la vegetación en el lecho disminuiría el rozamiento entre el flujo y el terreno. Para simularlo, se ha variado el coeficiente de rozamiento del cauce, que originalmente era 0.035, y se han analizado valores menores. A su vez, se ha simulado el hipotético caso en el que ninguna medida es adoptada y la vegetación del cauce sigue aumentando. En la Tabla 4.3 se observan los diferentes valores utilizados y las diferentes características del cauce a las que corresponden.

Las diferencias en las manchas de inundación pueden observarse en la Figura 4.8, donde están representadas las láminas de agua en $t=314$ horas. A pesar de que el instante de máxima área inundada en cada caso es diferente, solamente se produce un desfase de unas pocas horas, de modo que se han representado todas para el mismo instante de tiempo.

4.2. RESULTADOS DE MITIGACIÓN

Descripción fondo cauce	n Manning	Referencia
Cauce muy limpio y liso	0.02	Brisbane City Council [17]
Cauce limpio	0.025	Chow [9]
Cauce limpio con algunas piedras y plantas	0.03	Chow [9]
Cauce original	0.035	Arcement y Schneider [1]
Cauce sin limpiar	0.038	Palmeri et al.[16]

Tabla 4.3: Coeficiente de rozamiento y referencia designadas al cauce para distintas simulaciones de mitigación.

n Manning cauce	Area [m^2]	Instante [h]
0.02	107575290	302
0.025	118601594	312
0.03	133698788	314
0.038	154075321	316
0.035	146808999	314

Tabla 4.4: Valor de las máximas áreas de inundación alcanzadas en el instante en el cual se producen, según el número de Manning del cauce para la avenida de 2015.

En la Tabla 4.4 se muestran los valores que alcanzan las áreas de las manchas de inundación máxima para cada número de Manning en el cauce. Además, se puede leer en la última línea el valor de área que alcanzaba la avenida con $n=0.035$ en el cauce, valor utilizado en las simulaciones previas.

Para el estudio de la dependencia de la altura de agua (calado, h) con el coeficiente de rozamiento se repartieron 12 sondas a lo largo de la cuenca. Su distribución se puede ver en la Figura E.58, en el Anexo E. En la Figura 4.9 se muestran los resultados de las sondas más representativas.

La Sonda 2 se encuentra colocada en el cauce al lado de la población de Tudela. Las sondas posicionadas de esta manera dan idea de la disminución de calado en el río. Se observa cómo esta magnitud es menor conforme disminuye el coeficiente de rozamiento, lo que puede llegar a impedir el desbordamiento del flujo en situaciones en las que antes sobrepasaba los límites del lecho. Por otro lado, las Sondas 1, 3 y 4 son sondas colocadas en llanuras de inundación, por lo que para ciertos intervalos de tiempo tienen valores de calado nulos, dando idea de que no se encuentran mojadas en dicho instante. Así, en la Sonda 3, podemos observar cómo la disminución de n provoca que para el primer pico del hidrograma no desborde en ningún caso, a excepción de la hipotética situación futura en la que aumenta la vegetación. Es decir, el no adoptar ninguna medida de mitigación

podría llegar a marcar la diferencia entre inundar o no un terreno que hasta ahora nunca se había inundado. Poniendo atención no a los valores de calado sino a los tiempos, se puede notar que valores de n más bajos retrasan la inundación y aceleran el secado de la zona, es decir, ésta se encuentra menos tiempo cubierta por un gran volumen de agua. En algunas ocasiones, algunas zonas se inundan y el agua no tiene manera de volver al cauce original del río, este fenómeno de embalsamiento es el que se observa en la Sonda 4.

4.2.2. Zonas de inundación controlada

Las zonas de inundación controlada (ZIC), son espacios cuya inundación se favorece y se regula con compuertas para que el resto del cauce quede aliviado durante una avenida. Algunas de estas áreas están propuestas para estudio por la propia CHE¹ y su distribución se puede ver en la Figura E.58. De todas las ZIC's existentes, se han escogido dos zonas cerca de las poblaciones de Buñuel (7-6) y Ribaforada, (7-4) y (7-2). Estas zonas se pueden observar en la Figura 4.10. Se ha optado por ellas por ser suficientemente grandes como para almacenar un volumen elevado de agua y además, están lo suficientemente cercanas como para observar su efecto por separado y juntas.

Es importante hacer notar que representar estos espacios implica realizar cambios en las elevaciones de la malla de cálculo, ya que la delimitación de las zonas ahora tendrá que ser más marcada para evitar que una vez el agua entre pueda salir. Además, se les realiza una apertura en la mota que permita el acceso del flujo. La colocación de la compuerta es de gran importancia y requiere un análisis de consecuencias. Por un lado, en la práctica, siempre se tratan de colocar al final de la ZIC para favorecer que el agua entre en ésta a contrapendiente de modo que sea menos dañina para el terreno y el ecosistema que en él habita (marcadas en azul en la Figura 4.10). Por otro lado, esta práctica no favorece la entrada del flujo en la zona, de modo que, con ánimo de ver las diferencias, se han realizado simulaciones también con las compuertas favoreciendo la entrada del flujo a favor de la pendiente (en verde en la misma Figura).

Por tanto, se han realizado 6 simulaciones diferentes con el hidrograma de la avenida de 2015 (ver Figura 4.1) para 6 situaciones de estudio de las zonas de inundación controlada. Se han analizado por separado la actuación únicamente de una zona (Buñuel o Ribaforada) con cada posición de compuerta (a favor de la pendiente y en contra), lo que suman 4 simulaciones y, a su vez, se han simulado dos más con la actuación conjunta de ambas zonas, también para los dos casos de posición de compuertas.

¹<http://www.chebro.es/>

Tras las simulaciones se observa que la utilización de estas áreas controladas no tiene ningún impacto significativo en la mancha de inundación (ver Figura 4.11). Además, se ve que la actuación conjunta de ambas zonas no provoca más que la superposición de los efectos en los terrenos cercanos a la ZIC de cada una. A su vez, se concluye que la diferencia entre la utilización de una zona u otra, (7-6) o (7-4) y (7-2), no influye más que en los terrenos en los que tiene efecto, ya que tienen un tamaño similar. En la citada Figura los valores negativos (azul) significan que había menos calado antes de usar la ZIC; los valores positivos (rojo) implican que antes había más calado en la zona. Todos los detalles se pueden consultar en el Anexo E.

A la vista de los resultados se puede concluir que la utilización de una ZIC para caudales tan altos como los simulados, donde esas zonas quedaban anegadas antes de ser declaradas ZIC, no tiene una repercusión importante en la inundación. Para empezar, se recomienda la utilización de estas zonas favoreciendo la entrada del agua a contra-pendiente, lo que provoca que menos volumen de agua entre en la zona, y la adopción de esta medida sea incluso perjudicial, al entrar esa cantidad de flujo en otras zonas. Por otro lado, permitir que el flujo entre a favor de la pendiente es enormemente dañino para el terreno y tampoco causa grandes alivios al cauce aguas abajo. Por tanto, concluimos que en la utilización de estos espacios controlados, a parte de tener únicamente un efecto local, dicho efecto no es lo suficientemente significativo como para ser considerado medida de mitigación para estos valores de caudal.

4.2.3. Protección de zonas

A la vista del poco efecto global que tienen los cambios en una zona, se propone como última medida la protección total de un área de terreno. Es decir, se va a simular el supuesto en el que se declara un espacio cerca del cauce como protegido, y se ha de evitar su inundación. Con esto se analizará la viabilidad de la construcción de motas alrededor de una zona, viendo si la protegen y si esta medida no provoca efectos negativos aguas abajo. Del mismo modo que en los casos anteriores, en el Anexo E se pueden encontrar más detalles y aquí se exponen los resultados de la avenida de 2015.

Como ejemplo, se ha optado por proteger la zona (7-6), que es la misma zona de Buñuel que en el apartado anterior se ha declarado como ZIC. Se ha escogido esta zona por su excesiva cercanía a la población de Buñuel y por ser lo suficientemente grande como para observar si el tomar estas medidas tiene consecuencias perjudiciales aguas abajo.

De nuevo, la protección de una zona implica cambios en la malla, ya que se van a elevar las motas que rodean el área (7-6) y se encuentran cerca del cauce, para evitar el desbordamiento. Los cambios en la elevación de la mota se aprecian en la Figura 4.12, donde se muestran imágenes de la malla antes y después de ser modificada. Se ve cómo para la protección de la zona se eleva la mota cercana al cauce que protege el área.

Tras simular en la nueva malla (imagen (b) de la Figura 4.12) el hidrograma de 2015 (ver Figura 4.1), se obtiene una nueva mancha de la lámina de agua donde se ve que para el instante de máxima inundación ($t=314$ horas) el área protegida no queda anegada. Es decir, permanece seca para un caudal máximo de $2691 \text{ m}^3/\text{s}$, cuando antes quedaba completamente inundada, como se ve en la Figura 4.13. Además, es importante notar que no repercute de manera significativa en el resto de la mancha de inundación. En la Figura 4.14, donde diferencias positivas implican más cantidad de agua tras la aplicación de la medida (y viceversa), observamos cómo algunas zonas quedan un poco más inundadas, pero apenas incrementando entre 6 y 10 cm el calado en la llanura.

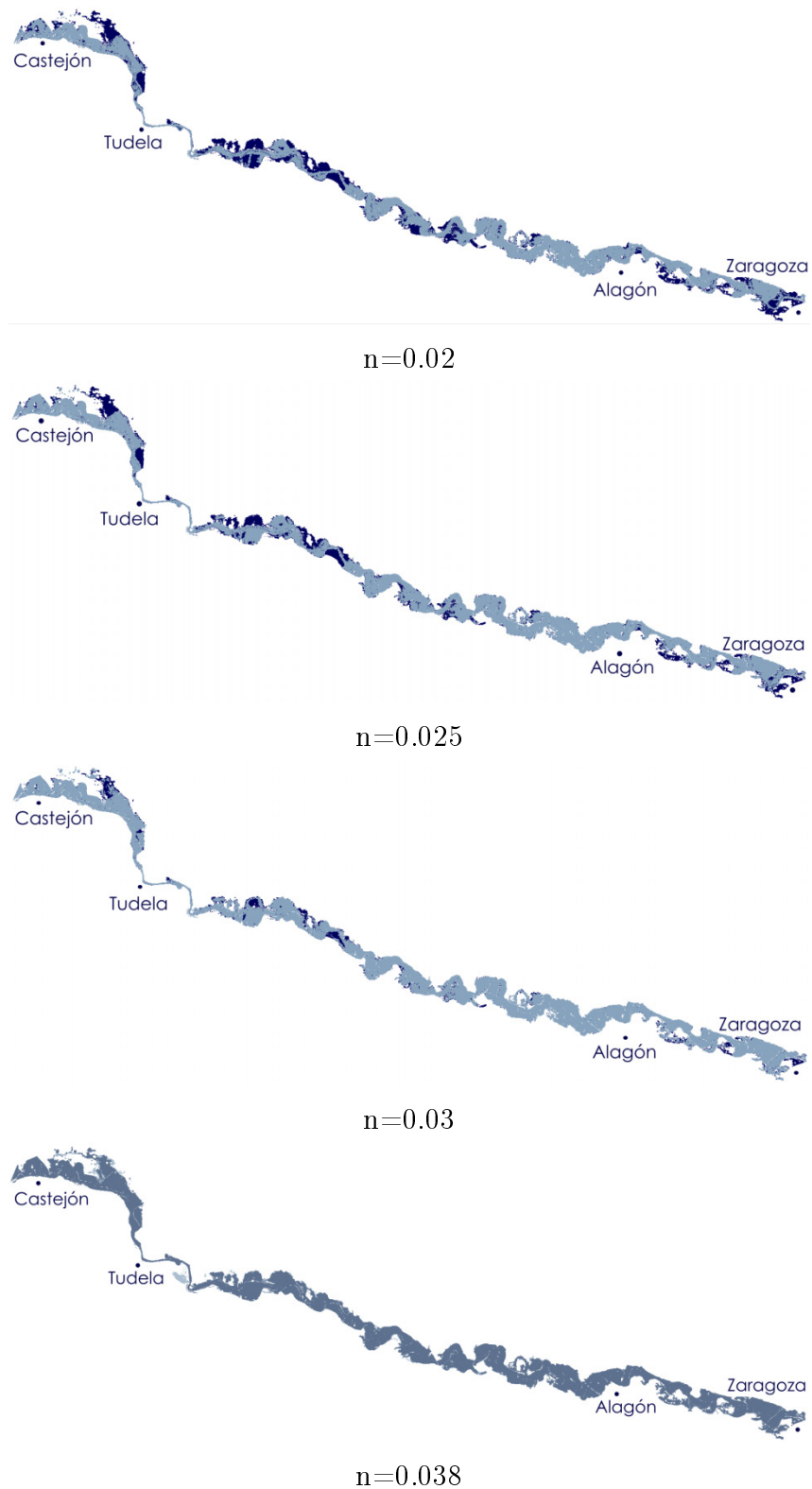


Figura 4.8: Comparación de manchas de inundación en $t=314h$ para diferentes coeficientes n en el cauce para la avenida de 2015. En azul oscuro se muestra la mancha original y en color más claro las manchas con el nuevo coeficiente n .

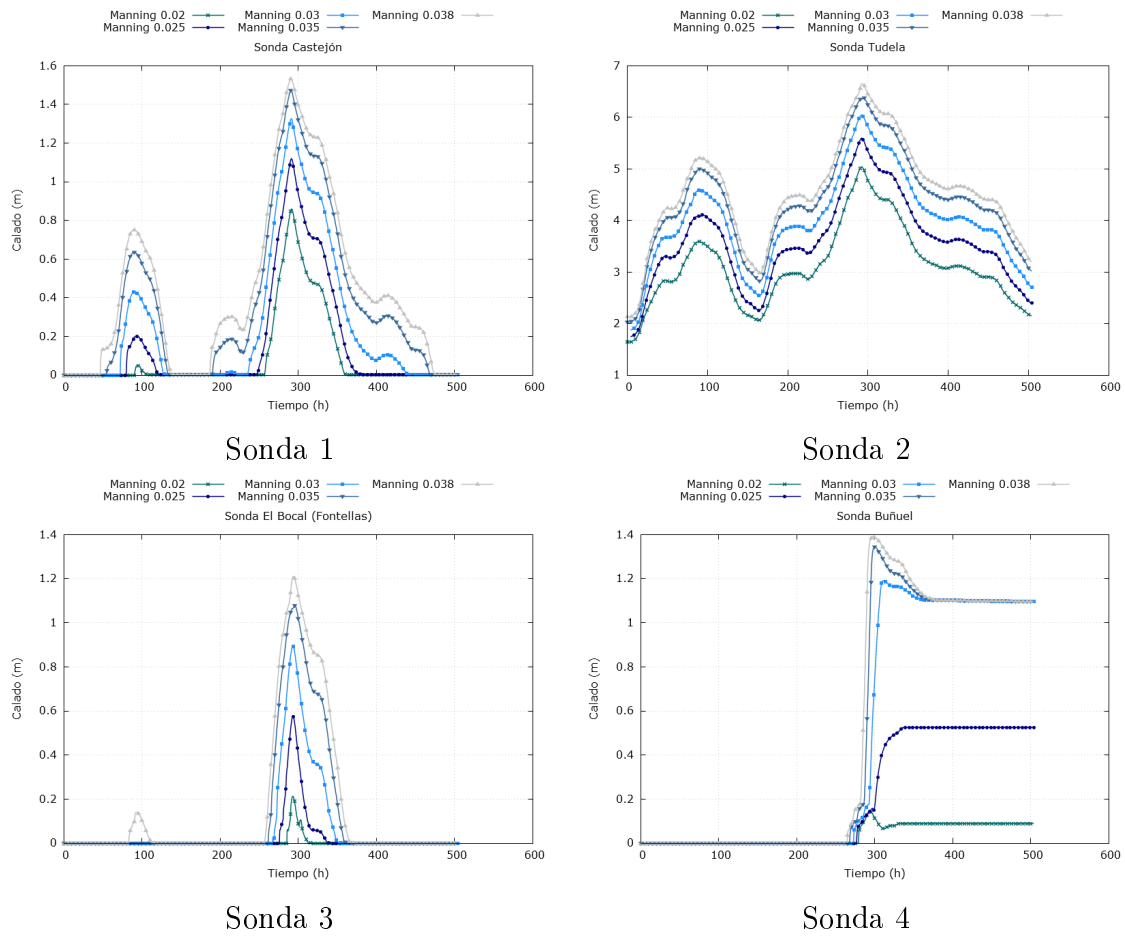


Figura 4.9: Evolución temporal del calado h en diferentes puntos sonda para distintos números de Manning en el cauce con el hidrograma de avenida de 2015.

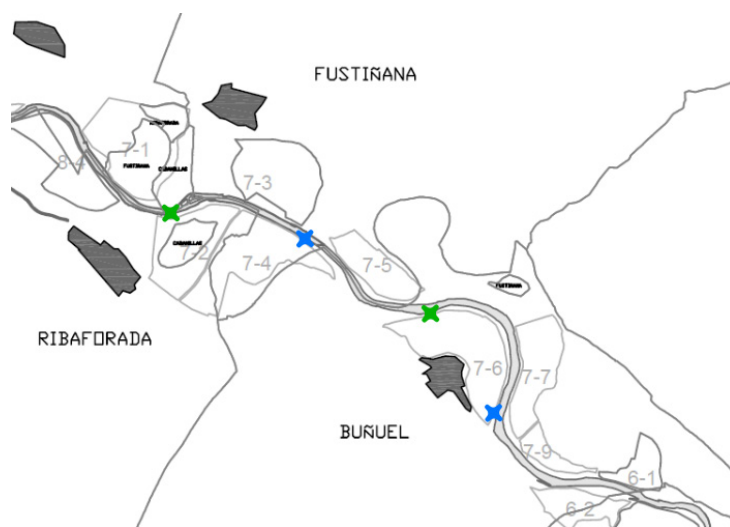


Figura 4.10: Zonas de inundación controlada en la zona de Buñuel y Ribaforada con compuertas a contrapendiente (azul) y a favor de la pendiente (verde).

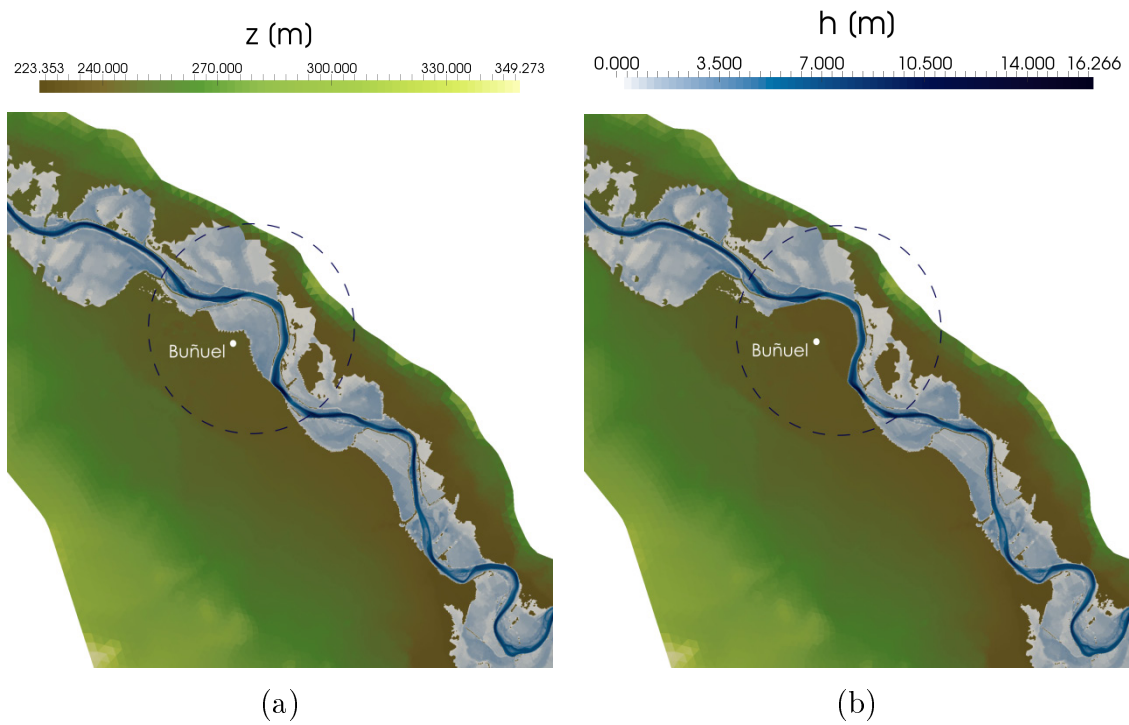


Figura 4.13: Diferencia entre la mancha de inundación antes (a) y después (b) de proteger la zona de Buñuel para la avenida de 2015.

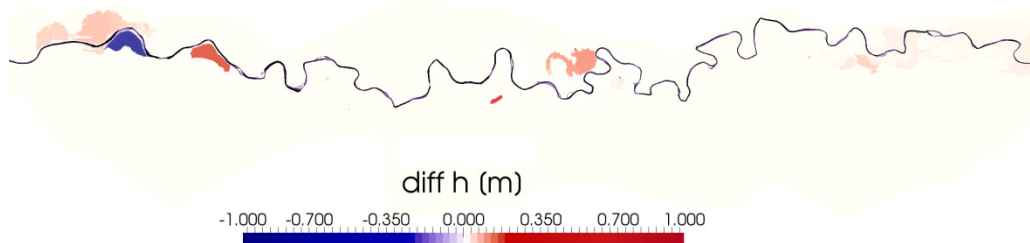


Figura 4.14: Representación de la diferencia de h (en metros) tras la protección de la zona de Buñuel para la avenida de 2015.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajo futuro

A continuación se presentan las conclusiones obtenidas tras el desarrollo del presente Trabajo de Fin de Grado: *Estudio de soluciones para mitigar inundaciones en el tramo medio del río Ebro mediante simulación numérica*.

En primer lugar resulta interesante realizar un análisis acerca de los objetivos cumplidos y del trabajo efectuado. En general, el presente estudio cuenta con dos grandes tareas que son: la realización de una malla de cálculo adecuada y la posterior utilización de dicha malla para el estudio de mitigación de avenidas. Ambos han sido elaborados correctamente y se han obtenido con ellos resultados precisos y de utilidad. Sin embargo, cabe resaltar que la tarea de confección de una malla de cálculo adecuada puede llegar a ser tediosa, sobre todo en ocasiones en las que la información de partida no es del todo correcta, como ha sido el presente caso. Por ello, se puede concluir que el trabajo desarrollado cumple los objetivos fijados y es de calidad, pero para conseguirlo ha sido necesaria una enorme cantidad de datos y es importante que estos sean adecuados, es decir, es necesaria una información topográfica actual y de precisión, unas medidas en estaciones de aforo bien referenciadas y, en ocasiones, conocimientos geográficos básicos para su gestión.

La herramienta de cálculo utilizada, RiverFlow2D en SMS, ha resultado ser de fácil manejo. La delimitación del dominio y la imposición de condiciones de contorno se realiza de manera intuitiva y sencilla. No obstante, fue necesario un periodo de aprendizaje para llegar a su utilización con soltura. Además, es necesario familiarizarse no sólo con la interfaz del mismo, sino con el formato de los resultados que se obtienen, ya que el programa genera una gran cantidad de información en archivos de texto para la cual es necesaria un programa de post-proceso capaz de interpretarla. Por otro lado, para estudios como el presente, el usuario debe tomar consciencia de la gran cantidad de información que gestiona (en términos de tamaño del dominio, número de celdas, etc.) y adecuarse a ello aceptando la lentitud de algunos procesos, como por ejemplo, el cambio de la escala de color en el terreno cuando se está trabajando con un MDT o con la malla. A pesar de

todo, se puede concluir que la utilización de este software es de gran utilidad para la tarea realizada en este trabajo.

En cuanto al modelo físico de simulación, se puede concluir que la simulación en 2D resulta el mejor modelo, hoy en día, para el cálculo de avenidas. Con él, la información obtenida es lo suficientemente precisa, como se ha visto, para hacer innecesario el uso de un modelo tridimensional, que es significativamente más caro computacionalmente y, además, en estudio de crecidas, que son fenómenos marcadamente bidimensionales, la escala vertical ni siquiera influye. A su vez, el desarrollo informático ha hecho posible que las simulaciones bidimensionales se realicen cada vez más rápido, obteniendo tiempos de cálculo como los mostrados en el Capítulo 4, dejando a un lado el uso de modelos 1D que, si bien son mucho más rápidos, no reproducen de manera precisa la realidad bidimensional de una inundación.

Además, se quiere hacer notar la calidad de los resultados obtenidos con el modelo utilizado y la malla de cálculo generada. Hoy en día, aún se analizan gran cantidad de situaciones con modelos unidimensionales tratando de ahorrar en costes computacionales menoscabando la precisión de los resultados; sin embargo, el avance tecnológico ha permitido que modelos como el utilizado en este trabajo puedan desarrollarse y usarse sin elevar excesivamente los costes de computación y acercando un poco más el cálculo numérico a la realidad. Como se ve en el Anexo D, un modelo bidimensional consigue obtener porcentajes de coincidencia en términos de área inundada de hasta un 80 %, que resulta impensable con modelos 1D.

Posteriormente al análisis de las simulaciones previas, del estudio de mitigación se pueden obtener conclusiones acerca de las diferentes medidas analizadas. En primer lugar, la medida más efectiva de todas ellas a nivel general es la limpieza de la vegetación del cauce, es decir, la eliminación de la vegetación en el fondo del río, total o parcialmente. Atendiendo a los resultados numéricos, esta medida produce efectos positivos en todo el cauce tanto en términos de calado como de extensión de la mancha de inundación. Por otro lado, con este estudio queda descartado el uso de zonas de inundación controlada como medida de mitigación para grandes avenidas, por su poca o nula efectividad. No obstante, sería interesante para el futuro un análisis de su uso en avenidas con caudal pico menor. Por último, en el análisis de protección de zonas concretas nos proporciona una manera de asegurar que zonas sensibles a las inundaciones queden secas durante una avenida sin requerir obras civiles desmesuradas; sin embargo, dista mucho de ser una medida de mitigación efectiva más allá del nivel local, y quedaría limitada a casos en los que se requieran protecciones especiales, ya sea de poblaciones, industrias sensibles, explotaciones ganaderas, etc.

Finalmente, cabe destacar que, a pesar de que el estudio realizado sólo involucra tres medidas de mitigación, se ha generado una malla sobre la que se puede trabajar para seguir realizando estudios de mitigación o de predicción. Lo que supone un paso enorme en la generación de una herramienta útil en el futuro para el desarrollo de este tipo de estudios.

Bibliografía

- [1] G.J. Arcement y V.R. Schneider. *Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains*. Number 2339 in U.S. Geological Survey. Water-supply paper. 1984.
- [2] G. Aron y E. White. Fitting a gamma distribution over a synthetic unit hydrograph. *Water Resources Bulletin*, 18(1):95–98, 1982.
- [3] L. Berga. Las inundaciones en España. La nueva Directiva Europea de Inundaciones. *Revista de Obras Públicas*, 158(3520):7–18, 2011.
- [4] P. Brufau y P. García-Navarro. *Conceptos básicos de hidrodinámica de superficie*. Copy Center (Zaragoza), 2001.
- [5] P. Brufau, ME. Vazquez-Cendón, y P. García-Navarro. A numerical model for the flooding and drying of irregular domains. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 39(3):247–275, 2002.
- [6] M. Morales-Hernández P. García-Navarro J. Burguete y P. Brufau. A conservative strategy to couple 1D and 2D models for shallow water flow simulation. *Computers & Fluids*, 81:26 – 44, 2013.
- [7] D. Caviedes-Voullième, M. Morales-Hernández, I. López-Marijuan, y P. García-Navarro. Reconstruction of 2D river beds by appropriate interpolation of 1D cross-sectional information for flood simulation. *Environmental Modelling & Software*, 61(0):206 – 228, 2014.
- [8] D. Caviedes-Voullième, M. Morales-Hernández, I. López-Marijuan, A. Lacasta, y P. García-Navarro. 2D river flood simulation using interpolated river bed geometry. *Proceedings of 2013 IAHR World Congress*, 2013.
- [9] V. Te Chow. *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill Civil Engineering Series. McGraw-Hill, 1959.

-
- [10] Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED). The human cost of weather related disasters (1995-2015). *CRED: Brussels*, pages 1–30, 2015.
- [11] M. Gonzalez-Sanchís, 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(7):629–641, 2012.
- [12] F.M. Henderson. *Open channel flow*. Macmillan Series in Civil Engineering. Macmillan, 1966.
- [13] D. Ph. Hoyois y D. Guha-Shapir. Three decades of floods in Europe: a preliminary analysis of EMDAT data. *Working paper. Brussels, CRED*, 2003.
- [14] R.J. LeVeque. *Numerical Methods for Conservation Laws*. Lectures in Mathematics. ETH Zürich. Birkhäuser Basel, 1992.
- [15] M. Morales-Hernández. *Efficient explicit finite volume schemes for the shallow water equations with solute transport*. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza, 2014.
- [16] F. Palmeri, F. Silván, I. Prieto, M. Balboni, y I. García-Mijangos. *Manual de técnicas de ingeniería naturalística en ámbito fluvial*. Departamento de Ordenación del territorio y Medio Ambiente. Gobierno del País Vasco, España, 2002.
- [17] Bcc Waterways Program Staff, G. Witheridge, y Brisbane (Qld.). City Council. *Natural Channel Design Guidelines. Appendix C*. Technical Document. Brisbane City Council, 2000.
- [18] C.J. van der Sande, S.M. de Jong, y A.P.J. de Roo. A segmentation and classification approach of IKONOS-2 imagery for land cover mapping to assist flood risk and flood damage assessment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 4(3):217–229, 2003.

Apéndice A

Fundamentos teóricos

A.1. Hipótesis básica del modelo de aguas poco profundas

Dadas las características geométricas del objeto de estudio, un río, se trabaja siempre bajo la hipótesis del modelo de aguas poco profundas. Esta hipótesis se basa en la comparación de escalas del problema, y se aplica cuando cualquier escala vertical, d , es menor que cualquier escala horizontal, L . Para definir cómo de pequeña debe ser una respecto de la otra, se establece un criterio para diferenciar entre poco o muy profundo basado en la propagación de las ondas en la superficie. Así, se determina una relación entre dicha escala d , y la longitud de la onda que se propaga sobre el nivel medio de la superficie libre, λ . Si dicha relación es menor que 1, se considera poco profundo mientras que si es mayor se considerará muy profundo.

Este modelo se puede aplicar al flujo de agua que circula en un río ya que se cumple el criterio de escalas. Tomando el calado del río, h , como escala vertical, y la longitud del río desde el principio hasta el final del dominio como escala horizontal, L , es sencillo determinar que el calado es mucho menor que la longitud ($h \ll L$) (ver Figura A.1).

Las hipótesis básicas del modelo de aguas poco profundas se aplican a las ecuaciones de Navier-Stokes que definen el comportamiento del flujo y, aplicadas a las ecuaciones tridimensionales, conducen a lo que se considera la propiedad central de la teoría de aguas poco profundas, que es la distribución hidrostática de presiones en la vertical. Esta simplificación proviene del análisis de los órdenes de magnitud de los términos que intervienen en la ecuación de la cantidad de movimiento en dirección vertical

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (\text{A.1})$$

que se asume como aproximación siempre que se aplica la teoría de aguas poco profundas.

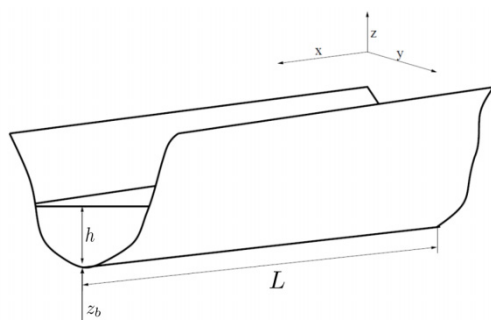


Figura A.1: Gráfico que representa las escalas de la teoría de aguas poco profundas.

A.2. Ecuaciones del flujo de superficie libre en 3D

Para describir el comportamiento de un fluido se han de formular una serie de leyes físicas en base a un modelo. Dicho modelo puede centrarse en sistemas moleculares (descripciones Lagrangianas) o en volúmenes de control (descripciones Eulerianas), mucho más habituales ya que estudian los valores de las variables en distintos puntos que dependen de la posición y del tiempo, independientemente de las partículas que ocupan dicha posición. De este modo, nuestro estudio se basará en modelos Eulerianos que miren el fluido globalmente y nos den información del flujo general, ya que carece de sentido mirar partículas concretas en el tipo de análisis que vamos a realizar. Para ello, definiremos un volumen de control (VC) en el que se analizarán los valores de diferentes variables. Además, consideraremos dicho VC fijo, y no móvil.

Las leyes físicas en las que se basa el modelo para la descripción del flujo son la conservación de la masa, la segunda ley de Newton y la 1ª ley de la Termodinámica, de las que se deducen la ecuación de continuidad, la ecuación de conservación de movimiento y la de conservación de la energía, respectivamente, siendo el conjunto de ellas las llamadas ecuaciones de Navier-Stokes. Puesto que se va a considerar una variación de la densidad despreciable o nula, la tercera de las ecuaciones no tendrá vínculo alguno con las otras dos, de modo que las de continuidad y cantidad de movimiento serán suficientes para la descripción del flujo.

A su vez, a partir de las ecuaciones generales de Navier-Stokes se deducen las ecuaciones de flujo de superficie libre en 3D imponiendo la hipótesis anteriormente citada (ecuación (A.1)) de aguas poco profundas. De este modo se establece un sistema de ecuaciones diferenciales acompañado de unas condiciones de contorno y condiciones iniciales que introducen la información de las fronteras y fijan así la solución que buscamos.

Estas ecuaciones recogen la información de las 3 dimensiones espaciales y es de donde obtendremos, al resolverlo, la información de las velocidades en las 3 direcciones y la información sobre el calado a través de las variables u, v, w y h , que quedan perfectamente definidas con 4 ecuaciones diferenciales y las condiciones de contorno.

Como ya se ha dicho, el presente estudio se centra en el análisis de la extensión de las áreas de inundación que puede haber en ciertos tramos del río Ebro. El dominio del problema es de gran magnitud (del orden de kilómetros) y el análisis tridimensional provocaría un gran aumento del coste computacional. Se ha de tener en cuenta que un cálculo 3D multiplicaría el número de celdas que ya se utilizan para resolver el problema en dos dimensiones por la magnitud vertical, ofreciendo un detalle que no es necesario en el estudio de fenómenos de inundación como este, con una marcada tendencia bidimensional. El flujo que se da en una avenida se desarrolla en el plano horizontal y los movimientos en la vertical frente a los que se dan en dicho plano son despreciables.

A.3. Ecuaciones del flujo de superficie libre en 2D

Partiendo de las ecuaciones 3D, se añade una importante simplificación adicional que elimina la información en la dirección z de las mismas. Esto se realiza promediando las variables en la dirección vertical de modo que asumimos que los cambios en z no son relevantes[4].

Esto significa que el problema, en el que cada punto en el espacio tenía asignadas una velocidad en x , otra en y y otra en z , pasará a estar contenido en un plano en el que cada coordenada (x, y) tendrá asignadas una velocidades u, v además de una profundidad, h , que representará el calado e introducirá la información de z en el problema bidimensional.

Así, a cada punto del plano se le asigna una velocidad (\bar{u}, \bar{v}) que serán los promedios de la distribución de velocidades en z para dicho punto (x, y) . Dicho promedio se realiza integrando en toda la dirección z donde hay velocidad, es decir, desde z_b como cota del fondo hasta H (ver Figura A.1).

$$\bar{u} = \frac{1}{h} \int_{z_b}^H u dz \quad (\text{A.2})$$

$$\bar{v} = \frac{1}{h} \int_{z_b}^H v dz \quad (\text{A.3})$$

De este modo desaparece la velocidad en z (w) como incógnita del problema tridimensional, siendo ahora las variables del problema bidimensional u, v y el calado, h . Y

desaparece también, por tanto, de una de las ecuaciones, que es la de la cantidad de movimiento en la dirección vertical.

De modo que, obteniendo la ecuación de continuidad, considerando el balance de masa en una columna vertical de agua con velocidades promedio \bar{u} y \bar{v} en las direcciones x e y y reescribiendo en un modo más intuitivo las ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento, el sistema de ecuaciones en 2D resultante es el siguiente [4]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (\text{A.4})$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + gh\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial h(uv)}{\partial y} = gh(S_{0x} - S_{fx}) \quad (\text{A.5})$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} + gh\frac{\partial h}{\partial y} = gh(S_{0y} - S_{fy}) \quad (\text{A.6})$$

donde la ecuación de continuidad (A.4) representa las variaciones del calado, h , con el tiempo, t , relacionadas con la variación del caudal unitario, (hu) y (hv) , en las direcciones x e y respectivamente.

En las ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento, (A.5) y (A.6), se representan las variaciones de caudales unitarios junto a los términos convectivos a la izquierda de la igualdad, que expresan el flujo de las variables del calado y los caudales unitarios en las diferentes direcciones, además del término de presión hidrostática. Además, en la parte derecha de la igualdad se tienen los términos fuente, que caracterizan en las variaciones del fondo a lo largo de una dirección y se expresan en forma de pendiente tanto en dirección x como en dirección y :

$$S_{0x} = -\frac{\partial z_b}{\partial x} \quad S_{0y} = -\frac{\partial z_b}{\partial y} \quad (\text{A.7})$$

Por otro lado, los términos de fricción del agua con el fondo del cauce quedan representados por S_f que se define como la pendiente de la línea de energía en cada dirección:

$$S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (\text{A.8})$$

donde n es el coeficiente de rugosidad de Manning (en $s/m^{1/3}$). Este coeficiente, en la práctica, se determina a partir de medidas experimentales o se estima a partir de valores que han sido ya almacenados en tablas [1, 9, 16, 17]. Además de este sistema, son necesarias unas condiciones de contorno que fijen la solución del problema y que se detallan más adelante.

Es muy habitual escribir el sistema de ecuaciones que se acaba de presentar de manera matricial, siendo esta forma mucho más compacta y fácil de usar a la hora de resolver las ecuaciones mediante un método numérico. Así, el sistema de leyes de conservación de masa y cantidad de movimiento se puede escribir como el siguiente sistema hiperbólico no lineal de ecuaciones en derivadas parciales:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{U})}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}(\mathbf{U})}{\partial y} = \mathbf{S}(\mathbf{U}) \quad (\text{A.9})$$

con

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} h \\ hu \\ hv \end{pmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} hu \\ hu^2 + g\frac{h^2}{2} \\ huv \end{pmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{pmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + g\frac{h^2}{2} \end{pmatrix}, \quad (\text{A.10})$$

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 \\ gh(S_{0x} - S_{fx}) \\ gh(S_{0y} - S_{fy}) \end{pmatrix}$$

donde \mathbf{U} representa el vector de variables conservadas, es decir, el calado y los caudales unitarios a lo largo de las direcciones x e y , \mathbf{F} y \mathbf{G} son los flujos de dichas variables conservadas a través de los lados del volumen de control y contienen el flujo convectivo y los gradientes de presión hidrostática. Por último, \mathbf{S} es el término fuente que contiene los sumideros de la cantidad de movimiento a lo largo de las direcciones que provienen de las variaciones del fondo del cauce y de las pérdidas por fricción.

En muchas ocasiones, como en el estudio de canales o ríos sin una marcada curvatura, es muy habitual realizar estudios unidimensionales de los mismos. Dichos modelos 1D son muy prácticos en problemas con una clara direccionalidad porque pueden aportar muy buenos resultados y tienen un bajo coste computacional. En cambio, para casos como los que se analizan en el presente trabajo, las aproximaciones unidimensionales no son tan apropiadas ya que no recogen de manera adecuada la naturaleza bidimensional de un fenómeno como es una inundación, donde se tienen campos de velocidades significativos no solo en la dirección longitudinal del río, sino también en la transversal.

Por ello, no se explicará el método matemático que hay tras un modelo unidimensional, y se utilizará así un modelo 2D. Esta es la opción más adecuada ya que no es tan excesivamente costosa como una aproximación 3D ni tan simple como para aplicar un modelo unidimensional.

La resolución del sistema de ecuaciones (A.9) se realiza mediante métodos numéricos rápidos y eficientes, ya que habitualmente no existen soluciones analíticas de este tipo de problemas. El método numérico utilizado se detalla en el Anexo B.

Apéndice B

Software de modelización: RiverFlow2D

Para un estudio de simulación numérica de inundaciones se requiere un software que resuelva las ecuaciones bidimensionales planteadas el Anexo A y, además, son necesarios también programas de pre y post proceso que ayuden a gestionar los datos de partida y los resultados numéricos. El módulo de cálculo, que contiene el método numérico que resuelve las ecuaciones de flujo de superficie libre 2D, se llama RiverFlow2D y ha sido desarrollado por el Grupo de Hidráulica Computacional de la Universidad de Zaragoza (<http://ghc.unizar.es>). Este módulo de cálculo se complementa con una herramienta de preproceso llamada SMS, que permite introducir las condiciones de contorno, condiciones iniciales, información de las elevaciones y los rozamientos del terreno necesarios para llevar a cabo la simulación. El post-proceso, es decir, la observación y análisis de resultados, se realizará en un programa de visualización detallado en el Anexo F, llamado ParaView.

B.1. Método numérico

Para resolver las ecuaciones diferenciales que gobiernan el comportamiento del flujo (sistema de ecuaciones (A.9)) es necesario discretizar el problema. Para ello se divide el dominio de estudio en un conjunto de celdas y se resolverá, en cada una de ellas, el valor que toman las variables conservadas además del paso temporal (Δt), que hace avanzar la solución desde un tiempo inicial ($t=0$ s) hasta el tiempo final de la simulación.

La ecuación (A.9) representa las leyes de conservación escritas como un sistema, y dicho sistema se puede escribir en forma conservativa como

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

donde $\mathbf{E} = (\mathbf{F}, \mathbf{G})$

En cada una de las celdas del dominio se resolverá el sistema (B.1), utilizando el método de volúmenes finitos [5], para calcular el valor de las variables (h , hu y hv) en el centro de la celda. Para ello se integra la ecuación (B.1) sobre un volumen fijo Ω :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \mathbf{U}(x, y) d\Omega + \oint_{\partial\Omega} \mathbf{E} \mathbf{n} dl = \int_{\Omega} \mathbf{S} d\Omega \quad (\text{B.2})$$

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 de las variables conservadas; una formulación descentrada (*upwind*) unificada de los flujos y los términos fuente y una discretización explícita del término temporal, la ecuación (B.2) se puede escribir como

$$A_i \frac{(\mathbf{U}_i^{n+1} - \mathbf{U}_i^n)}{\Delta t} + \sum_{k=1}^{NE} (\mathbf{E} \mathbf{n} - \bar{\mathbf{S}})_k^* l_k = 0 \quad (\text{B.3})$$

donde NE es el número de celdas vecinas de la celda i ($NE=3$ en mallas triangulares) y A_i representa el área de dicha celda.

A través del uso de matrices Jacobianas aproximadas locales en cada pared de cálculo k (linealización de Roe) y sus valores y vectores propios ($\tilde{\lambda}$ y $\tilde{\mathbf{e}}$, respectivamente) se llega finalmente a la ecuación (B.4) que se resuelve en cada celda i [15]

$$\mathbf{U}_i^{n+1} = \mathbf{U}_i^n - \frac{\Delta t}{A_i} \sum_{k=1}^{NE} \sum_{m=1}^3 \left[(\tilde{\lambda}^- \tilde{\gamma} \tilde{\mathbf{e}})_k^m l_k \right]^n \quad (\text{B.4})$$

donde l_k representa la longitud de la pared k y $\tilde{\gamma}_k$ expresa de manera compacta las contribuciones de flujos y términos fuente en la pared k . El significado de la expresión (B.4) 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, Δt es el paso de tiempo que no es constante a lo largo de toda la simulación, sino que se recalcula dinámicamente como:

$$\Delta t = \text{CFL} \min_{k,m} \frac{\delta x_k}{\tilde{\lambda}_k^m} \quad (\text{B.5})$$

donde

$$\delta x_k = \min(\chi_i, \chi_j) \quad \chi_i = \frac{A_i}{\max_{k=1, NE} l_k} \quad (\text{B.6})$$

e i y j representan las celdas que comparten la pared k . El coeficiente CFL es el número de *Courant-Friedrich-Lewy*, una constante cuyo valor está entre 0 y 1 y tiene que ver con

la estabilidad del método numérico [14, 15]. El valor asignado al CFL es importante porque valores muy elevados podrían desestabilizar el método dependiendo del tipo de malla que se utilice y valores demasiado pequeños incrementan la lentitud del cálculo. Con todo ello, el esquema numérico avanza tanto en el espacio, evaluando las variables en todas las celdas, como el tiempo.

En la ecuación (B.5) se observa que cuanto mayor es el área de la celda, menor es el paso de tiempo, es decir, el proceso de cálculo es más rápido si las celdas son más grandes. Sin embargo, la generación de celdas de gran tamaño conlleva la pérdida de precisión de la información, ya que, al ser un método de primer orden, en cada celda se calcula un valor para una variable que será constante en toda ella. De modo que una celda con una gran área podría no captar bien la variación de calado, de velocidad o incluso de topografía que podría existir en la misma. Por esta razón la elección del tamaño de celda es de gran importancia a la hora de su generación, siempre buscando un compromiso entre precisión y velocidad de cálculo.

B.2. Condiciones iniciales

Las condiciones iniciales representan la situación en la que se encontraba el dominio antes de empezar la simulación, es decir, cómo estaba el río antes de llegar la avenida. Matemáticamente, las condiciones iniciales son información del valor que toman las variables en el instante $t = 0$.

La herramienta de cálculo ofrece varias opciones para introducir como condición inicial. Por un lado, permite seleccionar la opción *Dry Bed*, que es la manera de representar que el problema parte de seco, es decir, que a lo largo del dominio los valores de calado, h , y las velocidades, u y v , son nulas. No es la más adecuada para el trabajo que se va a realizar, pero puede interesar para otras muchas situaciones. También se permite partir de un estado inicial con un valor de nivel ($h + z$) concreto que se puede fijar como constante en todo el dominio, *Horizontal Water Surface*; pero de nuevo, para la simulación de un río carece de realismo ya que este valor no se puede asumir como constante en un tramo tan grande de estudio donde la pendiente ya no es despreciable. Finalmente, existe la alternativa de partir de un estado anterior ya simulado para imponerlo como estado inicial, *Define Initial WSE as Dataset (Hotstart Run on)*. Esta última opción es la que ha sido utilizada en todas las simulaciones de avenidas de este trabajo. Para ello se simulan situaciones estacionarias con valores de caudal que coincidan con el inicial de las simulaciones transitorias. De esta manera se imponen los valores de calado y velocidad que ya habían sido calculados con anterioridad como condición inicial. En la Figura B.1 se

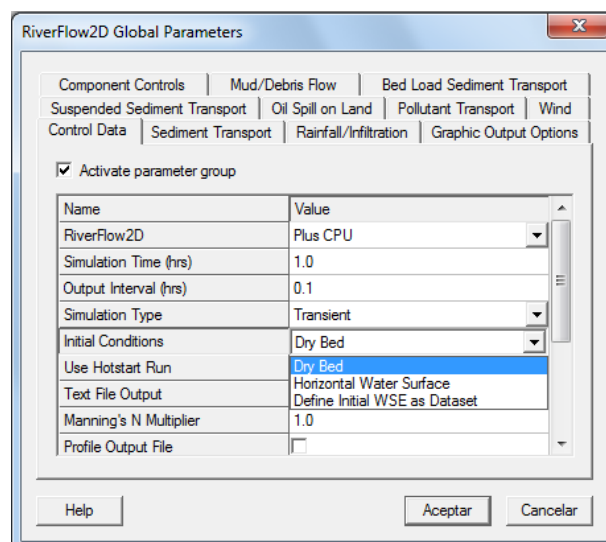


Figura B.1: Menú desplegable donde se selecciona una de las diferentes condiciones iniciales disponibles en SMS.

pueden ver las 3 opciones nombradas en el programa de preproceso, dentro de un menú de elección de parámetros donde se escoge la condición inicial como uno de esos parámetros.

B.3. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno, a nivel matemático, fijan la solución única del sistema de ecuaciones que se resuelve en cada celda. Desde un punto de vista físico, introducen la información de los contornos del dominio. Estas condiciones pueden ser de varios tipos y la herramienta de cálculo permite escoger entre todas ellas.

El usuario ha de hacer una distinción entre condiciones de contorno de entrada y de salida. Dentro de las de entrada, lo habitual es fijar valores de caudal o de calado, ya sea de manera estacionaria o en función del tiempo. Para el presente estudio se introducirá información del caudal a la entrada para todas las simulaciones. Bien de manera estacionaria con un único valor constante; o transitoria, mediante una tabla de valores, llamada hidrograma (opción *Discharge* en la interfaz). Dicho hidrograma representa la variación del caudal a lo largo del tiempo, que el usuario puede introducir manualmente o importarlo con un archivo. En la Figura B.2 se observa un ejemplo de un hidrograma introducido de una de las avenidas usadas en este estudio, la de 2013. En el lado izquierdo de la imagen se distingue la tabla importada o escrita por el usuario que establece una relación entre caudales e instantes de tiempo.

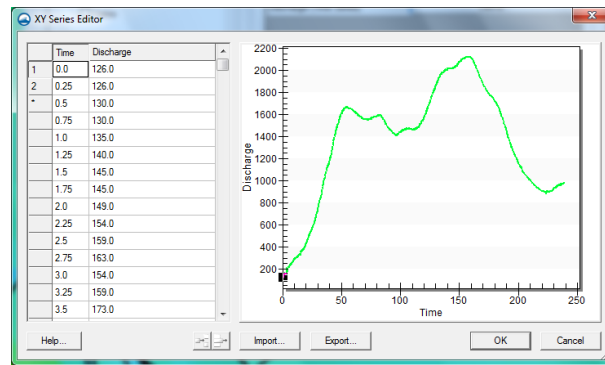


Figura B.2: Hidrograma de la avenida de 2013 introducido como condición de contorno en SMS. El tiempo se expresa en horas y el caudal en m^3/s

Por otro lado, las condiciones de salida fijan la manera en la que el flujo sale del dominio. También suelen ser imposiciones de nivel o de calado sujetas a alguna ley o relación. Por ejemplo, están disponibles, y se usan habitualmente, las condiciones de salida de flujo uniforme (imposición de calado normal), *Uniform Flow Outflow*, o la imposición de una curva de aforo ($Q(h)$), *External Rating Curve*. En términos generales, la imposición de flujo uniforme significa asumir que la pendiente del terreno, S_0 , está igualada a la pendiente de fricción, S_f , de modo que la herramienta de procesamiento que utilizamos hace todos los cálculos y solo es necesario introducir la pendiente del terreno, S_0 , como dato para imponer esta condición. Si la condición de contorno que se quiere imponer es una curva de aforo, se pide introducir una tabla de valores de caudal, Q , en función del calado, h . Se pueden ver ejemplos de la introducción de estas dos condiciones de salida en la Figura B.3.

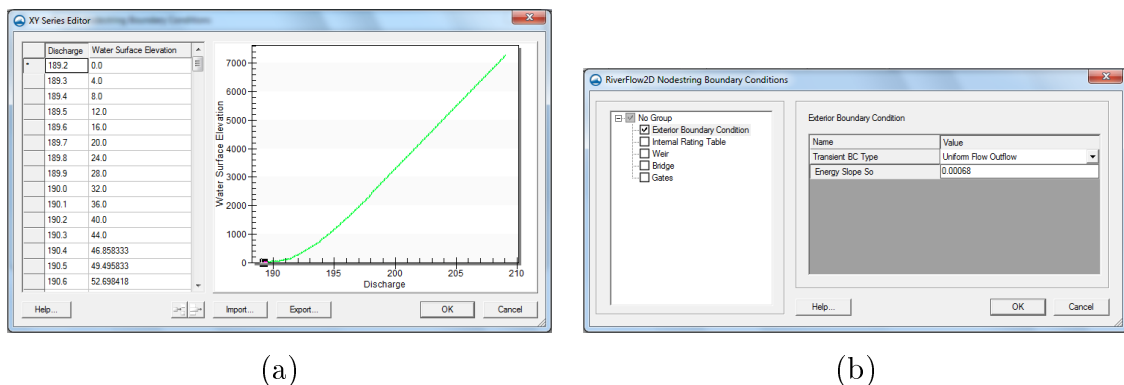


Figura B.3: Condiciones de contorno de salida que se han utilizado. En (a) se representa la curva de aforo que se introduce en forma de tabla manualmente o importada. En (b) se ve la introducción de una pendiente del terreno con la que SMS crea una curva de aforo.

Por último, existen unos límites laterales en el dominio que han de tener también una

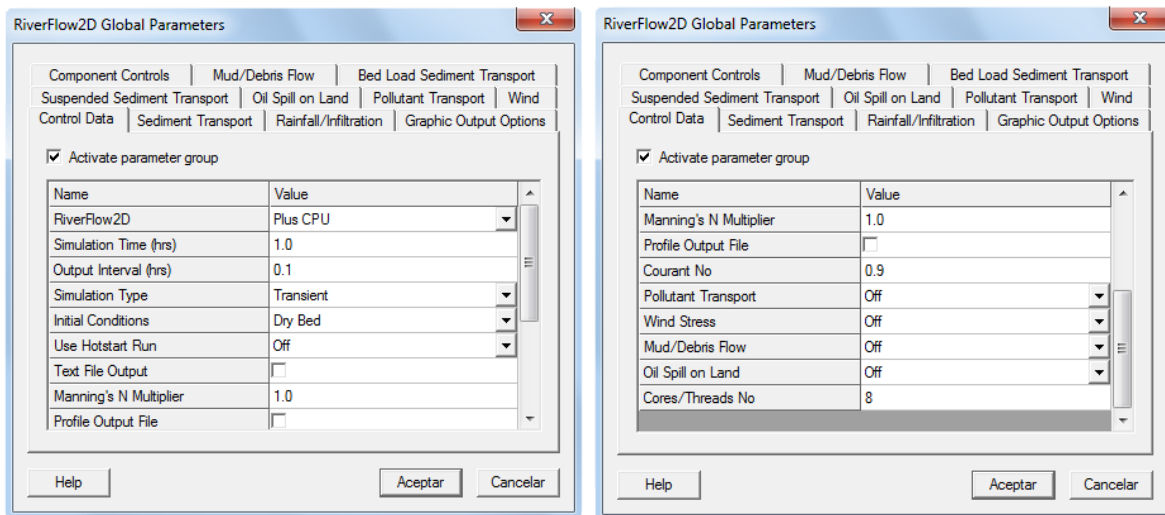


Figura B.4: Menú en el que se muestran todos los parámetros que se deben fijar para lanzar una simulación.

condición de contorno. Las condiciones de contorno siempre implican una imposición que a veces puede no estar ajustada exactamente a la realidad. Habitualmente, se impone en los laterales una velocidad ortogonal al contorno nula y se hace un dominio lo suficientemente ancho como para asegurar que el cauce del río, incluso en caso de avenida, no alcanzará dicho límite.

Esta condición de impenetrabilidad es sencilla de imponer en SMS, ya a que todos los contornos que no tengan impuesta otra condición expresamente, el programa les asigna velocidad normal nula por defecto. De esta manera solo hay que imponer las condiciones de contorno a la entrada y a la salida, es decir, los hidrogramas y las curvas de aforo.

B.4. Parámetros de simulación

Además de las condiciones de contorno, la condición inicial y las características tanto geométricas como de rozamiento del terreno, es necesario definir los parámetros globales de la simulación. Estos parámetros se pueden introducir en la herramienta de cálculo y fijan la manera en la que se va a lanzar la simulación. En la figura B.4 se puede ver el menú donde se seleccionan todas estas opciones en SMS.

El software de simulación calculará cada Δt el valor de las variables en las celdas, según la ecuación (B.5), pero el almacenamiento de toda esa información puede no ser necesario o interesante, de modo que se puede elegir, además del tiempo total de simulación, parámetros como el intervalo de volcado de datos o el de volcado de medidas. La selección de parámetros de simulación en *SMS* también permite tomar decisiones acerca

de la manera de implementar el cálculo, si se quiere lanzar en GPU (*Graphics Processing Units*) o en el propio procesador (CPU). A continuación se muestra una lista de los principales parámetros que influyen en el proceso de simulación.

- **Tiempo total de simulación:** es el tiempo total que se va a simular y se divide en los diferentes Δt a cada paso del cálculo. Indica a la herramienta de cálculo cuando debe finalizar la simulación. A modo de ejemplo, si se quiere simular una avenida cuya duración es de 10 días, el tiempo de cálculo serán 240 horas, que es la unidad temporal que utiliza RiverFlow2D.
- **Tiempo de volcado de datos:** este parámetro temporal (en horas) indica cada cuánto tiempo se quiere guardar la información de las variables del flujo en cada celda a lo largo de toda la simulación. Esta información se guarda en archivos cuya extensión es **.vtk* y almacenan información de velocidades, calados, elevaciones, régimen de flujo, etc. Volviendo al ejemplo anterior de la avenida de 240 horas, si se impone un tiempo de volcado de 2 horas, el programa generaría 120 archivos *.vtk* y cada uno de ellos tendría información del estado de las celdas en un momento concreto de tiempo, múltiplo de 2 horas.
- **Tiempo de volcado de medidas:** el programa permite colocar una serie de puntos característicos en el dominio (llamados sondas) de los que recoge la información de las variables. Mientras que en los ficheros de tiempo de volcado se recogen cómo se encuentran las variables en el dominio en un tiempo concreto, en este caso se almacena la evolución temporal de cada variable en la sonda.
- **Número de Courant (CFL):** explicado en la ecuación (B.5), el CFL es un parámetro clave para la estabilidad y la rapidez de la simulación. Mientras que Δt es calculado por el propio método numérico, el CFL es un parámetro que se introduce fijo. Como se ha explicado anteriormente, dicho valor ha de estar comprendido entre 0 y 1. En el presente estudio, donde se utilizan mallas triangulares, se ha utilizado CFL=0.9.
- **Implementación del método:** es importante diferenciar entre los diferentes tipos de arquitectura en los que se puede implementar el método, ya que la información se procesa de manera diferente si los cálculos se hacen en GPU o en CPU. Los cálculos en GPU son mucho más rápidos ya que los procesos de cálculo se paralelizan y se realizan al mismo tiempo en diferentes *cores*. En particular, una GPU puede llegar a tener del orden de miles de ellos, mientras que el procesador (CPU) puede llegar a tener hasta 8 *cores* en un ordenador convencional de sobre-mesa. RiverFlow2D permite elegir entre estos tipos de implementación, pero hay que tener en cuenta

que para las simulaciones en GPU el ordenador que realice los cálculos debe tener una unidad de procesamiento gráfico.

- **Número de procesadores:** Este parámetro hace referencia al número de *cores* que queremos usar en caso de simular en CPU.

Además, la lista de parámetros globales a elegir en RiverFlow2D incluye conceptos generales de los que ya se ha hablado anteriormente pero que se seleccionan en la misma pestaña.

- **Condición inicial:** como ya se ha explicado, se elige entre una de las opciones disponibles dependiendo de si se quiere imponer un nivel concreto (*Horizontal Water Surface*), partir de seco (*Dry Bed*) o partir de otra simulación (*Define Initial WSE as Dataset*).
- **Régimen de la simulación:** este parámetro simplemente determina si la simulación será transitoria (*Transient*) o estacionaria (*Steady*). Al seleccionar una opción u otra es cuando se configura el programa para poder imponer condiciones de contorno de un tipo o de otro.

Apéndice C

Generación de las condiciones contorno

En este anexo se presenta todo el proceso de generación de las distintas condiciones de contorno que se han introducido en el modelo, es decir, hidrogramas y curvas de aforo. Estas se han elaborado a partir de datos extraídos de estaciones de medida repartidas por la cuenca o de estudios estadísticos con los que se obtienen caudales característicos.

C.1. Generación de hidrogramas

Un hidrograma es una curva que representa un caudal a lo largo del tiempo. Puesto que expresa una variación de caudal, un hidrograma es una condición de contorno que define un problema transitorio. Para el presente estudio se van a realizar simulaciones con dos tipos de hidrogramas que se explican a continuación.

C.1.1. Hidrogramas medidos

Por un lado, se introducirán al modelo hidrogramas reales que representan avenidas que se han producido en años anteriores en el río Ebro. Estos hidrogramas son fruto de medidas que se han tomado en distintas estaciones a lo largo del río y que se encuentran disponibles para su consulta si en la Confederación Hidrográfica del Ebro¹. En concreto, el presente estudio se centrará en la estación de Castejón de Ebro para el estudio del tramo Castejón-Zaragoza. Con estos datos, que ya están dados en forma de tabla, lo único que se debe hacer es un filtrado de tiempo para coger solo los eventos que interesan y una adaptación a las unidades que se han de introducir en el programa de preproceso SMS. Para el presente trabajo se han escogido 3 eventos diferentes que representan las avenidas que se produjeron en febrero de 2003, enero de 2013 y febrero de 2015. Por ello, de todos los

¹<http://www.saihebro.com/saihebro/index.php?url=/datos/mapas/tipoestacion:A>

datos que se encuentran disponibles, que son medidas continuas desde 1997 hasta nuestros días cada 15 minutos, se han escogido solo 3 momentos diferentes que representan las 3 avenidas que interesan para el estudio. A continuación se expone el proceso de generación de los hidrogramas en la zona de Castejón.

C.1.1.1. Hidrogramas medidos en Castejón (A002)

Como se ha explicado, de la estación de medida de Castejón (denominada estación A002 por la Confederación Hidrográfica del Ebro)² se obtienen datos de caudal que han sido calculados por la propia Confederación Hidrográfica del Ebro a través de medidas de calado, h .

A continuación se exponen los 3 hidrogramas de los 3 eventos de avenida en forma de curva, tras haber adaptado la medida de tiempo a la que requiere el programa, es decir, se ha contado como instante 0 el primer dato de cada hidrograma y, en horas, se ha ido sumando 0,25 horas en cada nuevo valor de caudal medido. Se pueden ver dichos hidrogramas en las Figuras C.1, C.2 y C.3.

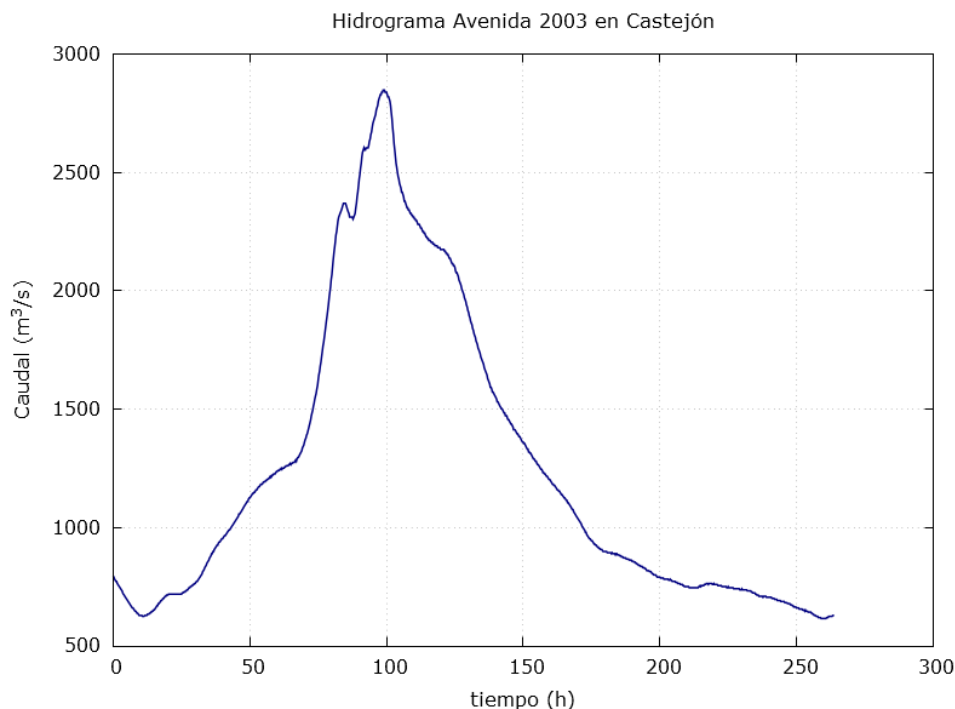


Figura C.1: Hidrograma de la avenida en 2003 medido en Castejón

²<http://www.saihebro.com/saihebro/index.php?url=/datos/ficha/estacion:A002>

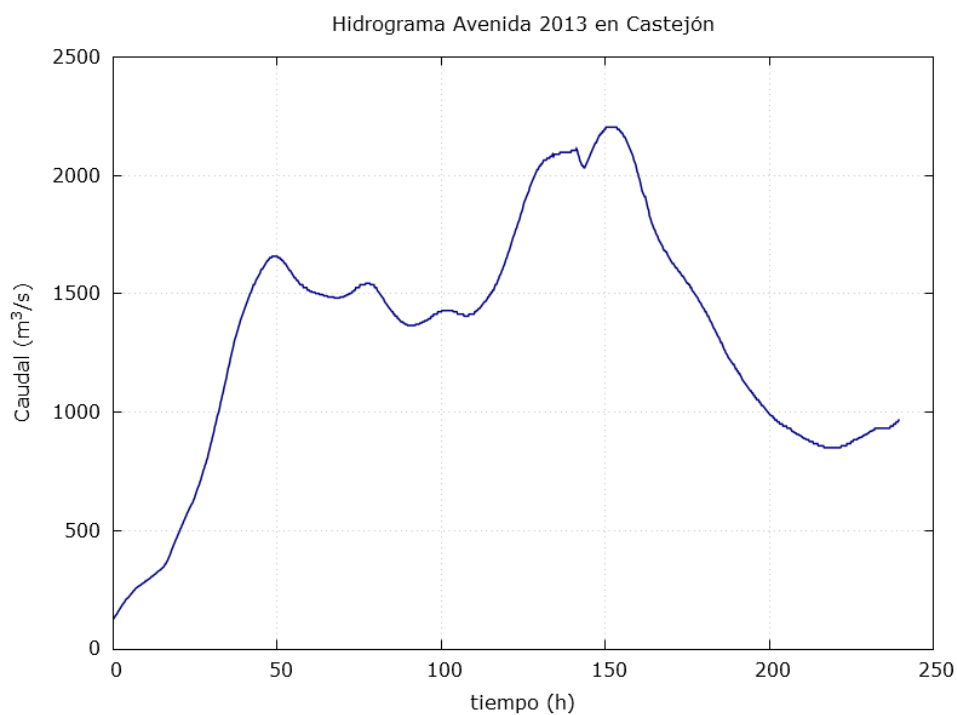


Figura C.2: Hidrograma de la avenida en 2013 medido en Castejón

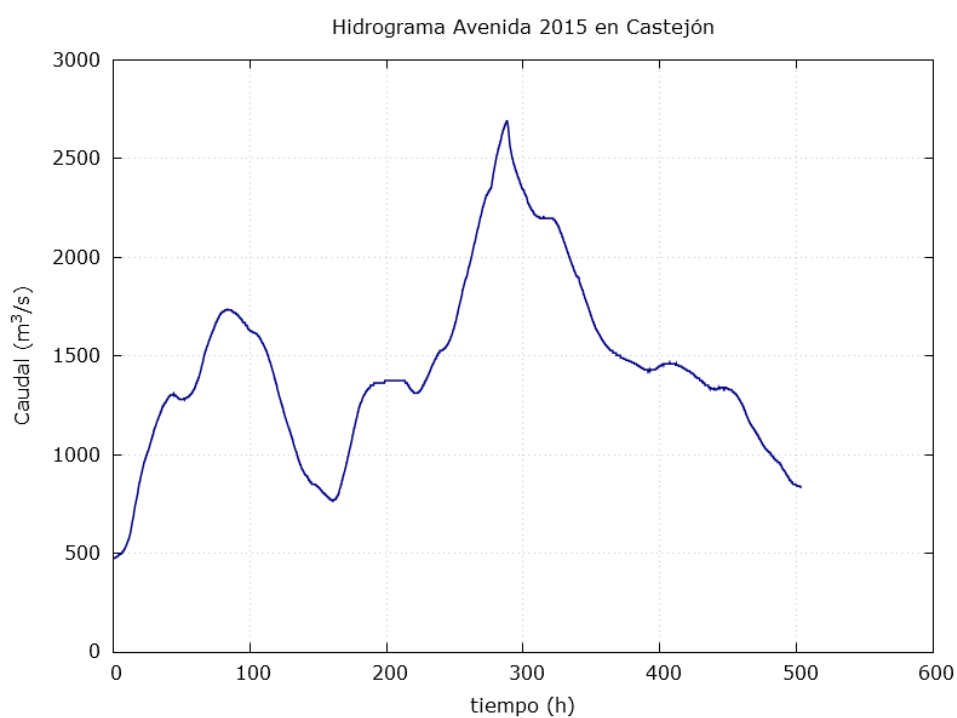


Figura C.3: Hidrograma de la avenida en 2015 medido en Castejón

De este modo quedan definidos los 3 hidrogramas necesarios para las simulaciones del tramo Castejón-Zaragoza que caracterizan las avenidas reales que se dieron en el río Ebro

en los años 2003, 2013 y 2015.

C.1.2. Hidrogramas correspondientes a periodos de retorno

Por otro lado, en los estudios de prevención es común recurrir al ajuste estadístico de series de datos históricos de diferentes estaciones de aforo para las funciones de evaluación de situaciones extremas. Así, aplicando distintas funciones estadísticas, la Confederación Hidrográfica del Ebro publica para cada estación diferentes caudales pico que corresponden a diferentes periodos de retorno. Con dichos caudales se pueden hacer estudios de prevención como es el presente.

De dichas funciones estadísticas se obtiene un único valor de caudal, que se considera caudal pico, pero en la realidad de las avenidas periódicas que contempla este estudio, generalmente causadas por la lluvia, ni ese caudal pico llega de repente como una discontinuidad en el hidrograma, ni se mantiene ese valor como en un hidrograma estacionario. Por ello, a partir de esos caudales pico hay que generar hidrogramas que paulatinamente alcancen dicho valor y progresivamente descendan después hasta el caudal inicial que tenía el río antes de la avenida. Existen varios métodos de generación de hidrogramas y, a continuación, se va a explicar el utilizado en el presente estudio para, más adelante, exponer los hidrogramas resultantes en Castejón.

Se desea analizar escenarios con alta, media-alta, media-baja y baja probabilidad de ocurrencia, con lo que se han elegido los periodos de retorno de 5, 10, 100 y 500 años respectivamente. A pesar de su baja probabilidad de suceder, se ha considerado el periodo de retorno de 500 años por ser el más catastrófico.

C.1.2.1. Hidrogramas adimensionales unitarios SCS

El método utilizado para la generación de los hidrogramas a partir de los caudales pico de retorno es el de los hidrogramas adimensionales unitarios [2]. El hidrograma adimensional unitario SCS³ fue desarrollado por el Soil Conservation Service a partir de datos de precipitación recogidos en numerosas cuencas fluviales en Estados Unidos. Con este método se genera una tabla a partir de la cual se pueden construir los hidrogramas necesarios en base a un tiempo y caudal pico. Dicha tabla (Tabla C.1) proporciona una relación unitaria entre el tiempo de pico (t/t_p) y el caudal pico (Q/Q_p). Al multiplicar dichos valores por el caudal pico y el tiempo de pico deseados se obtiene un hidrograma

³ftp://192.46.108.3/staff/nilsson/web/uhg/scs_uhg.htm

que se ajusta a las características deseadas, en este caso los caudales de retorno.

SCS unit Hydrograph			
t/T_p	Q/Q_p	t/T_p	Q/Q_p
0	0	1.4	0.75
0.1	0.015	1.5	0.66
0.2	0.075	1.6	0.56
0.3	0.16	1.8	0.42
0.4	0.28	2	0.32
0.5	0.43	2.2	0.24
0.6	0.6	2.4	0.18
0.7	0.77	2.6	0.13
0.8	0.89	2.8	0.098
0.9	0.97	3	0.075
1	1	3.5	0.036
1.1	0.98	4	0.018
1.2	0.92	4.5	0.009
1.3	0.84	5	0.004

Tabla C.1: Hidrograma adimensional unitario SCS

Por último, hay que tener en cuenta que el hidrograma unitario comienza en 0, es decir, en el instante inicial no hay caudal. Para adaptarlo a la realidad de los eventos de avenida de un río, en concreto del Ebro, hay que sumar a todos los valores un caudal inicial que supuestamente lleve el río antes de la avenida manteniendo el caudal pico correspondiente a cada periodo de retorno, es decir, la columna de caudal unitario habrá que multiplicarla por $(Q_{pico} + Q_{inicial})$. Para la obtención de dicho caudal inicial, del mismo modo que para la obtención de t_p se ha recurrido al análisis de los datos de eventos de avenida antiguos. Se han estudiado los caudales de partida del río en las distintas avenidas de los últimos años y se ha hecho un promedio, resultando un caudal de $248m^3/s$ en Castejón de Ebro.

C.1.2.2. Hidrogramas correspondientes a periodos de retorno en Castejón

Utilizando el método anteriormente explicado, se generan hidrogramas teóricos a partir de los datos suministrados de caudales de retorno. Puesto que estos hidrogramas no simulan hechos reales que hayan ocurrido en el pasado, sino supuestas situaciones futuras calculadas con métodos estadísticos, el tiempo de pico ha de estar elegido acorde con un criterio estadístico, pero sin la necesidad de ser exacto puesto que la simulación solo re-

presentará una situación supuesta. Por ello, se han analizado los hidrogramas de distintas avenidas dadas en el pasado y se ha realizado un promedio para calcular el tiempo de pico que introducir al método. De dicho análisis se obtuvo un tiempo de pico promedio y se encuentra alrededor de los 4 días después del comienzo de la avenida. De modo que multiplicando por 4 días la columna adimensional de tiempo y por los respectivos caudales pico la columna adimensional del caudal se obtienen los diferentes hidrogramas.

Los caudales de retorno son proporcionados por el SAIH (Sistema Automático de Información Hidrológica) del Ebro y se muestran en la Tabla C.2. Con ellos y el tiempo de pico estimado anteriormente obtenemos los hidrogramas de retorno que se muestran en la Figura C.4.

Periodos de retorno	Caudal [m^3/s]
5 años	2672
10 años	3047
100 años	4223
500 años	5031

Tabla C.2: Caudales de crecida para distintos periodos de retorno en Castejón (Estación A002)

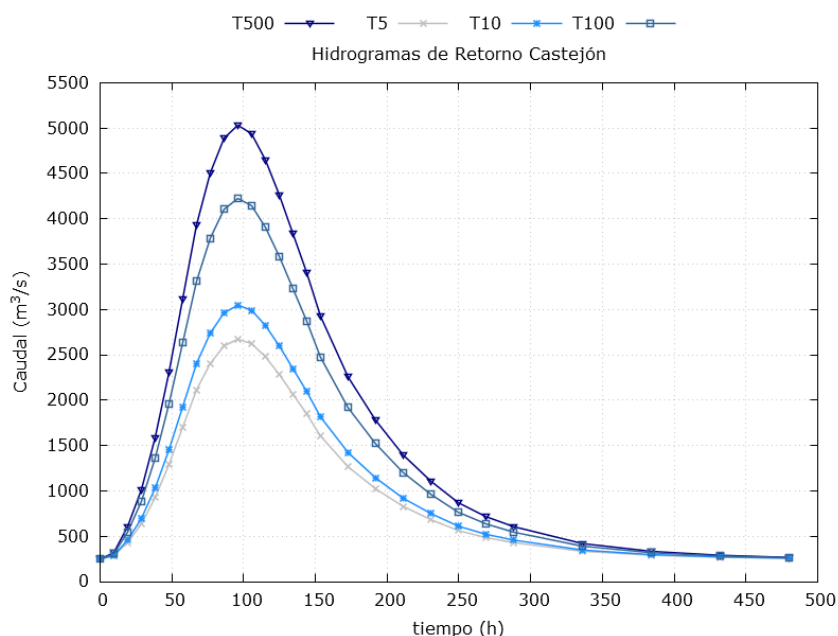


Figura C.4: Hidrogramas en Castejón generados a partir de hidrogramas unitarios SCS para periodos de retorno de 5, 10, 100 y 500 años

C.2. Generación de curvas de aforo

Las condiciones de contorno a la salida de ríos y canales pueden ser muchas y muy variadas, desde la imposición de un calado específico h , por ejemplo si el área de salida es fija, hasta imponer simplemente flujo libre. El presente estudio trata de aproximarse lo máximo posible a la realidad, de modo que se intentan imponer condiciones de contorno que provengan de medidas reales.

Puesto que el dominio de cálculo va desde la estación de medida de Castejón de Ebro a Zaragoza, queda delimitado en su salida por el puente de la autopista A-68 a la entrada de dicha ciudad, donde contamos con datos de medida que proporciona la estación de aforo colocada en dicho punto. Esto permite la generación de curvas de aforo, una relación directa entre el caudal, Q , y el calado, h , de modo que para una variable ya calculada por el modelo, la otra queda determinada de inmediato.

Gracias a la estación de aforo contamos con medidas de nivel, h , a lo largo del tiempo y con medidas de caudal, Q , a lo largo del mismo periodo. Haciendo coincidir dichos periodos obtenemos una relación entre h y Q , aunque desordenada. Por ello, se ha tratado la información para escoger tramos de valores de calado y hacer una media del caudal para dicho tramo. Como el programa de pre-proceso utilizado para los cálculos necesita las curvas de aforo en formato $(h + z, Q)$ en vez de (h, Q) , al valor de nivel medido, h , hay que sumarle la elevación del terreno, z , que en este caso son 189,2 m en Zaragoza. Finalmente se obtuvo la curva de aforo de la Figura C.5, que representa el caudal en función de la elevación de la lámina de agua.

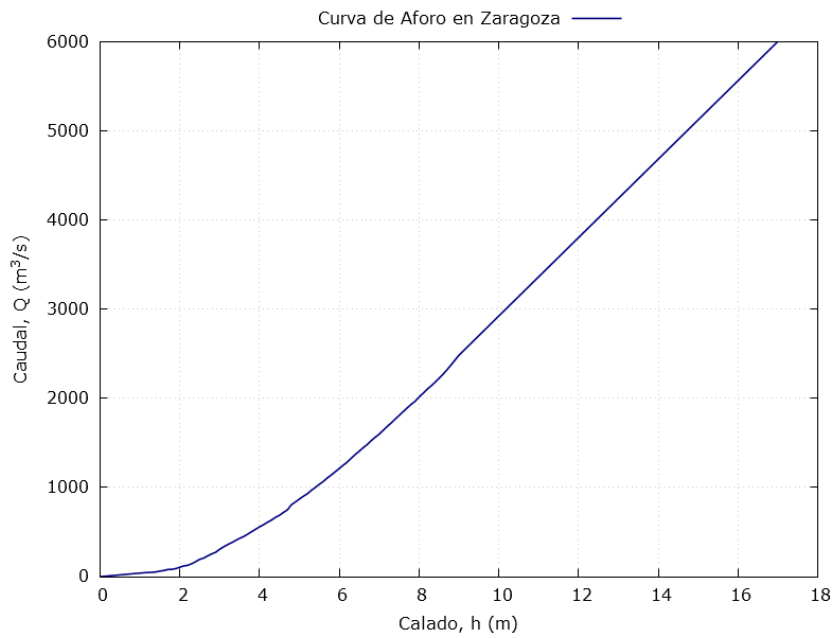


Figura C.5: Curva de aforo en el puente de la autopista A-68, en la salida del dominio Castejón-Zaragoza

Apéndice D

Generación y calibración de la malla de cálculo y mapa de rozamiento

Para realizar una simulación es necesario establecer el dominio físico sobre el que trabajar. En este dominio se aplican las ecuaciones de conservación que se resolverán mediante un método numérico discretizando en celdas. En cada una de ellas se resolverá el sistema de ecuaciones (A.9) y se obtendrán las variables deseadas. La división en celdas discretas del dominio espacial es lo que llamamos malla de cálculo.

D.1. Generación de la malla y mapa de rozamiento

La construcción de la malla de cálculo forma parte de la etapa de pre-proceso que hay que llevar a cabo antes de lanzar cualquier simulación. Dentro del procedimiento de realización de la malla y representación del terreno, el usuario elige características como la resolución de las celdas o el rozamiento asignado. Para el proceso de mallado se ha utilizado el programa SMS, el cual discretiza el dominio de manera automática, aunque siguiendo las indicaciones dadas en términos de refinamiento.

En este software, el usuario debe dividir su dominio en polígonos para asignar a cada uno de ellos las siguientes características:

- Nivel de discretización. Se podrá elegir la finura que se desea que sea la malla dentro del polígono.
- Número de Manning. Se le asignará un coeficiente de Manning a cada polígono, de manera que quedará definido así el rozamiento en el dominio.
- Fuente de información. A cada polígono se le asignan unas cotas de terreno relacionadas con el MDT del que se parte.

Cada polígono tiene asignada la procedencia de los datos de la elevación del terreno. En la mayoría del dominio esos datos se recogen de MDT's obtenidos de distintas fuentes como el IGN (Instituto Geográfico Nacional¹) o la CHE (Confederación Hidrográfica del Ebro). Sin embargo, la información de la batimetría suele ser poco adecuada o incluso inexistente en estos MDT, y por ello para el cauce del río se hizo un trabajo de reconstrucción a partir de secciones batimétricas[7, 8]. Por lo tanto, las celdas del cauce tomarán la información de dicha reconstrucción.

Por otro lado, a cada polígono se le asigna lo que SMS denomina como “material”, que lleva asignado un número de Manning. El coeficiente de rozamiento de Manning, n , aporta la información del uso del suelo, y la resistencia que opondrá al avance del flujo, es decir, el rozamiento. La elección del número de Manning que se le asigna a cada polígono no es una tarea sencilla y en muchas ocasiones requiere, simplemente, de la experiencia del usuario. Sin embargo, hay multitud de guías y documentación que ayudan a la elección de un coeficiente de Manning u otro según las características del terreno. En la Tabla D.1 se dan los valores elegidos en este caso.

Uso del suelo	n Manning	Referencia
Zona urbana	0.05	Sande van Der et al. [18]
Cauce del río	0.035	Arcement y Schneider [1]
Zona arbustos	0.04	Brisbane City Council [17]
Zona medio boscosa	0.045	Arcement y Schneider [1]
Zona boscosa (soto)	0.06	Arcement y Schneider [1]
Zona campos	0.028	Brisbane City Council [17]
Zona Galacho (agua estancada)	0.024	Palmeri et al.[16]

Tabla D.1: Coeficiente de rozamiento y referencia asignadas a los polígonos del dominio espacial según el uso del suelo.

Finalmente, se tiene que elegir la resolución de la malla. Por límites informáticos relacionados con el almacenamiento de memoria, resulta inviable discretizar el dominio entero de una manera fina y precisa. Sin embargo, la precisión es necesaria en zonas sensibles como son el cauce y los alrededores con potencial para quedar anegados ante una inundación. Por ello, se recurre al uso de mallas adaptativas en el espacio, que implica la imposición de distintas resoluciones según la importancia de la zona. En SMS se definen distintos espaciamientos entre nodos en el perímetro de los polígonos. Estos puntos sirven de apoyo para los nodos de las celdas de modo que la distribución de nodos elegida marcará el tamaño de arista de las celdas dentro de cada polígono. El espaciamiento entre

¹<http://www.ign.es/ign/layoutIn/modeloDigitalTerreno.do>

nodos que posee la malla final utilizada en este trabajo se detalla en la Tabla D.2 mientras que en la Figura D.1 se aprecia un ejemplo de discretización adaptativa.

Zona	Longitud arista de celda[m]
Cauce del río	15
Vegetación próxima al río	23
Motas	10
Límites exteriores del dominio	250
Ciudades	100

Tabla D.2: Longitud aproximada de las aristas de las celdas de la malla de cálculo en distintas zonas del dominio.

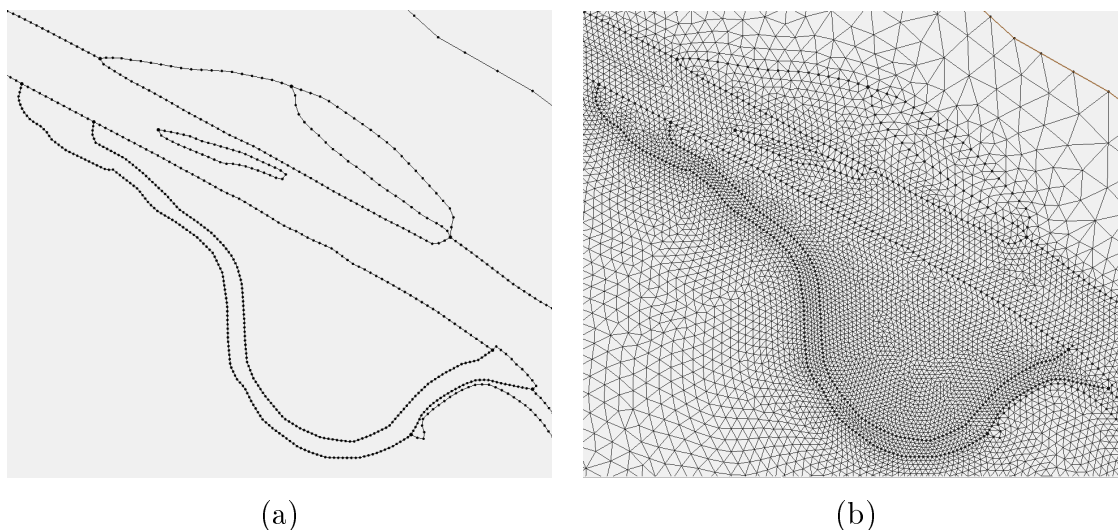


Figura D.1: Influencia de la distribución espacial de vértices sobre el tamaño de las celdas de la malla. En la imagen (a) se aprecian únicamente los polígonos con la distribución de nodos. En (b) se representan sobre (a) las celdas de la malla.

En la Figura D.2 se observa un ejemplo del proceso de mallado e imposición de las propiedades en una zona del dominio. Se observa como el cauce en el MDT no tiene información del fondo, y cómo la malla sólo coge la información de ese MDT para los alrededores del río (llanura de inundación), mientras que el lecho lo ha cogido de otra fuente, el cauce reconstruido.

Tras la imposición de todas las condiciones se genera una primera malla con *SMS*. Sin embargo, sería un error aceptar como válida esta primera malla construida sin antes revisarla y hacer todo un proceso de calibración de la misma. La razón y la descripción

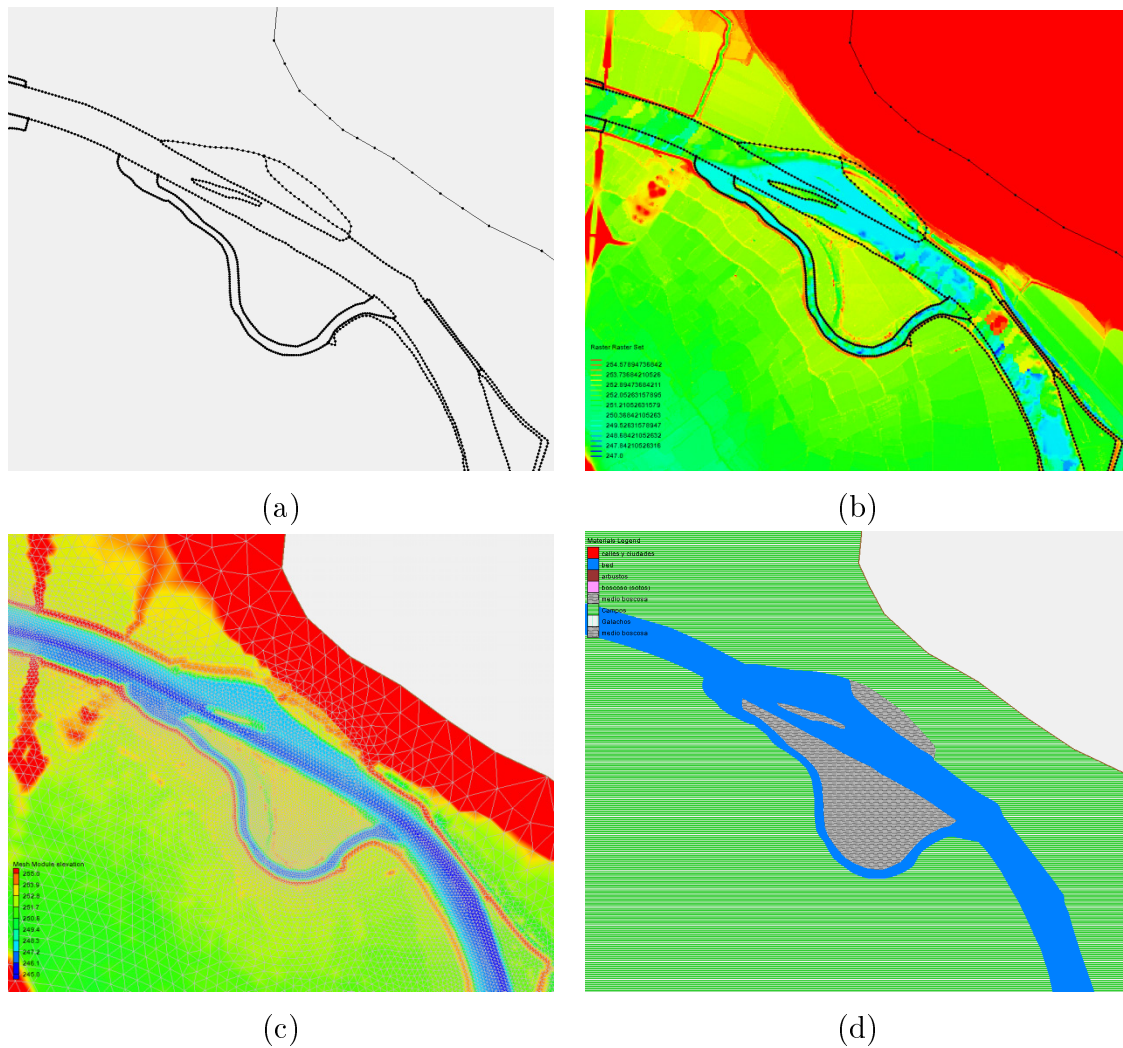


Figura D.2: Proceso de mallado. La imagen (a) representa los polígonos creados en la zona, mientras que (b) los coloca sobre el MDT. En (c) se observa la malla final y en (d) los distintos usos del suelo que tienen asignados los polígonos.

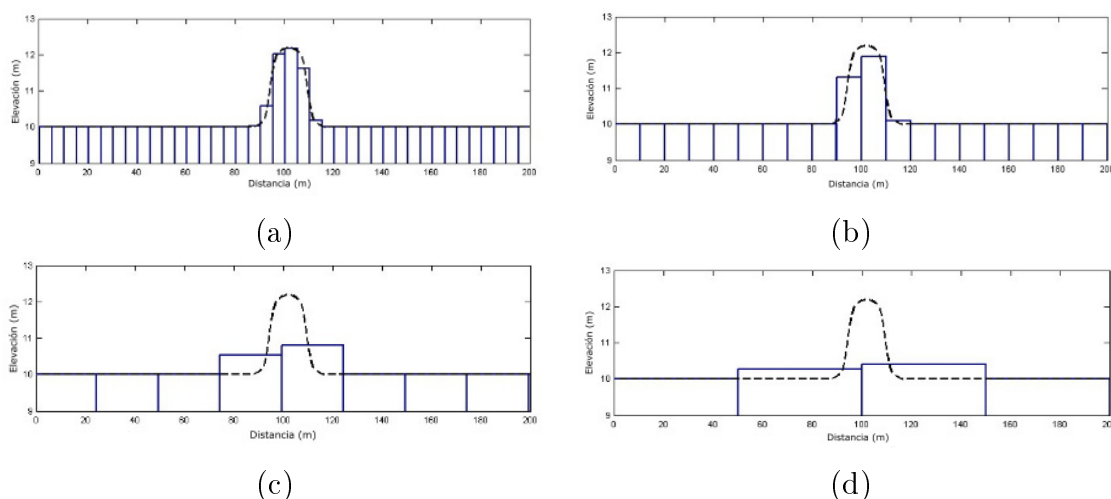


Figura D.3: Efecto de la resolución del MDT sobre la representación de una mota. La imagen (a) representa un MDT de 5×5 m y las siguientes muestran mallas de paso mayor: 10, 25 y 50 m, respectivamente.

del proceso se explican en el siguiente apartado.

D.2. Calibración de la malla de cálculo

Existen múltiples razones por las que la malla generada puede no ser válida para representar la realidad y requiera de algunas correcciones.

Una de las razones es la necesidad de validar el cauce. En la mayoría de las ocasiones, la información del fondo del río no está presente en los MDT, como hemos dicho, y es necesaria una reconstrucción del mismo a partir de secciones batimétricas. Puesto que no siempre se cuenta con un elevado número de secciones transversales del cauce hay que realizar una calibración para asegurar que el cauce reconstruido es aceptable.

La discretización del terreno en celdas de cálculo lleva consigo una serie de simplificaciones y errores que pueden dar lugar a falsos resultados. Es, por ejemplo, el caso de la representación de motas. Dicha representación será mejor cuanto más fina sea la discretización del MDT, pero en cualquier caso, siempre proporcionará valores por debajo de los reales. Este fenómeno se ve representado en la Figura D.3, donde se observa como queda captada una mota real (en línea discontinua) con diferentes resoluciones de MDT.

En el presente trabajo se utilizan MDT's con una discretización del dominio en mallas de paso 5m, para el tramo Castejón-Zaragoza. Aunque pueden considerarse MDT's de resolución alta para la clase de estudio realizado, hay que tener en cuenta que, pos-

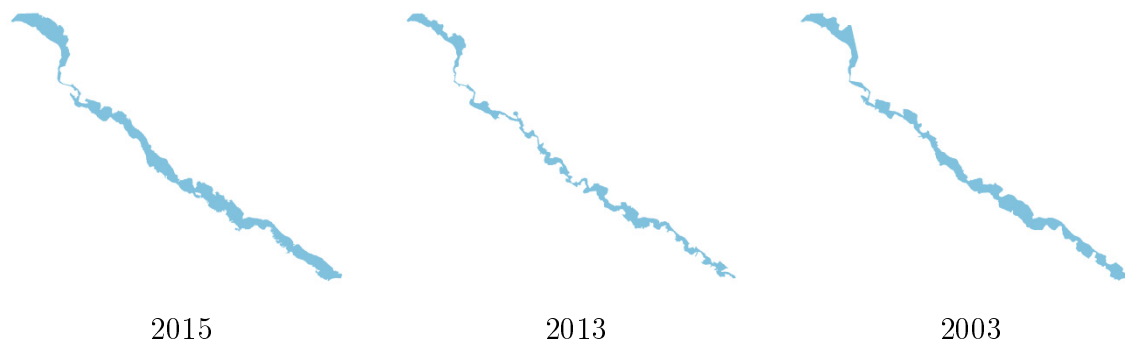


Figura D.4: Huellas de inundación proporcionadas por la CHE correspondientes a las crecidas de diferentes años y visualizadas en *Paraview*.

teriormente, se vuelve a dividir el dominio en celdas para la generación de la malla de cálculo. Por lo tanto, a pesar de haber refinado en las zonas críticas como motas o en las irregularidades del cauce del río, donde se desea captar bien la forma de la sección, en cada celda de la malla se hace un promedio de los valores del MDT, y ello puede provocar una pérdida de información en algunos tramos.

Los procesos de calibración consisten en la comparación de resultados entre el modelo y algún tipo de medida, que puede ser real o el resultado obtenido con un modelo ya calibrado. En el presente estudio se utilizan medidas que consisten en:

- Medidas de nivel a lo largo del tiempo en todas las estaciones entre Castejón y Zaragoza.
- Representación de la extensión de la inundación provocada por las avenidas de 2003, 2013 y 2015 (Figura D.4), llamada también *shape* de la huella de inundación.

De modo que, en la etapa de post-proceso, se compararán tanto gráficas de nivel en puntos correspondientes a estaciones de aforo, como manchas de inundación sobre el dominio con ayuda del programa de visualización *Paraview*. Con ánimo de cuantificar la coincidencia de las manchas de inundación y no hacer únicamente un análisis visual, se ha utilizado la ecuación (D.1) [11] para estimar un porcentaje de intersección entre el área simulada y el área observada.

$$Fit_A(\%) = 100 \frac{A_0 \cap A_C}{A_0 \cup A_C} \quad (D.1)$$

donde A_0 es el área observada durante la avenida ocurrida y A_C el área calculada, es decir, la obtenida con la simulación. Esta ecuación penaliza el porcentaje en todas las zonas en las que el área no coincide, ya sea por exceso o por defecto. Esto supone un problema ya que la información medida es solo la de los límites de la zona inundada, es decir, no consta si en algún lugar interior a dicha mancha hay alguna zona seca.

Por ello para obtener un dato cuantitativo de coincidencia, se trazó la envolvente de la mancha de inundación calculada con la malla definitiva, para compararla con la medida dada. Una ilustración de este problema se muestra en la Figura D.5, donde se ve la intersección entre la medida y la simulación y entre la medida y la envolvente de la simulación.



Figura D.5: Representación de la intersección (en color salmón) entre la huella de inundación calculada (azul) y medida (rosa). En la imagen (a) se representa el resultado de la simulación y en (b) la envolvente de dicho resultado.

Tras mostrar de manera general cómo se llevó a cabo la etapa de calibración, a continuación se expone un resumen de la realización del proceso mostrando ejemplos de mejora en algunas zonas concretas y errores cometidos.

Entre todas las medidas con las que se cuenta para comparar, el criterio escogido ha sido el de ajustar el modelo a los resultados de la avenidas más recientes, es decir, 2013 y 2015. Hay que tener en cuenta que tanto la topografía de la llanura como la batimetría del cauce de un río cambian en el tiempo, por lo que ajustar el modelo con la avenida más reciente conlleva la creación de una malla que se ajusta más a la realidad actual, y puede servir para el futuro como herramienta de predicción.

D.2.1. Refinamiento de la malla

En la primera malla que se construye se da más resolución a los lugares que se han considerado importantes. En este caso, se dedicó especial atención a todas las motas en las riberas del río, imponiendo una distribución fina de las celdas, como se ha descrito en la Tabla D.2.

Tras una primera simulación, comparando con las avenidas de 2013 y 2015, se observó que era insuficiente; ya que las motas que se encontraban más alejadas del río no habían sido representadas por la malla de cálculo al ser esta más gruesa en zonas menos cercanas al cauce, y resultaron ser de importancia porque impidieron el paso del flujo durante las avenidas ocurridas, como se observa en la Figura D.6. Por ello, se procedió a la creación de nuevos polígonos definiendo una resolución mayor en las zonas de presencia de motas, lo que conllevó a su mejor representación en la malla de cálculo, como se aprecia en la Figura D.7, y a una mayor coincidencia entre la extensión de la huella de inundación calculada y medida, mostrado en la Figura D.8, donde la mancha azul representa la inundación simulada y la rosa la medida, utilizada como referencia. En la imagen (a) se observa como al no refinar, el flujo apenas se ve afectado por la presencia de una mota, mientras que en (b) la mota bien representada en detalle impide el avance de gran parte del flujo.

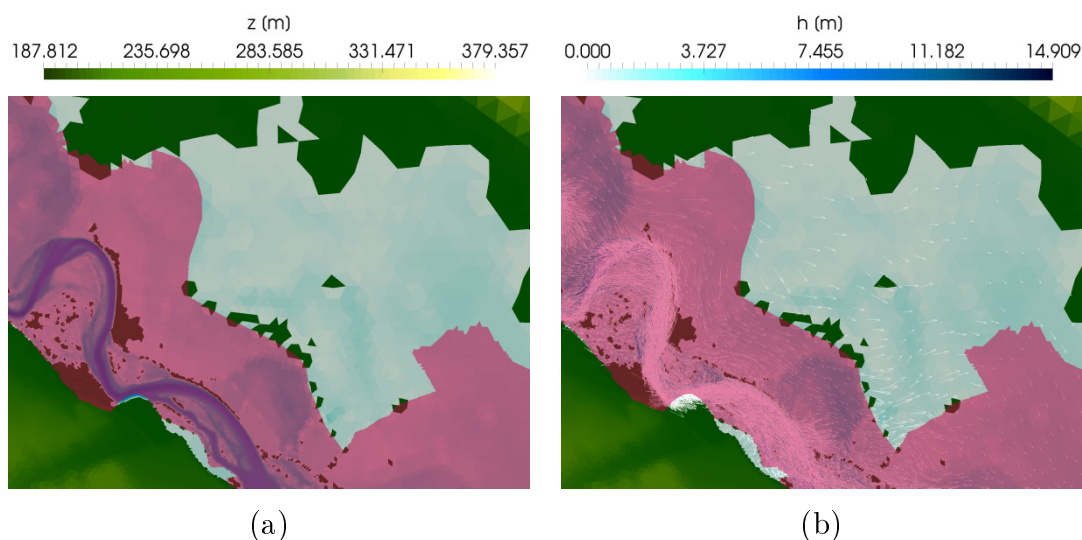


Figura D.6: Comparación de la lámina de inundación en términos de calado (a) y vectores velocidad (b) de lo observado (morado), calculado (azul) e intersección de ambas (rosa), para la avenida de 2013 aguas abajo de Castejón.

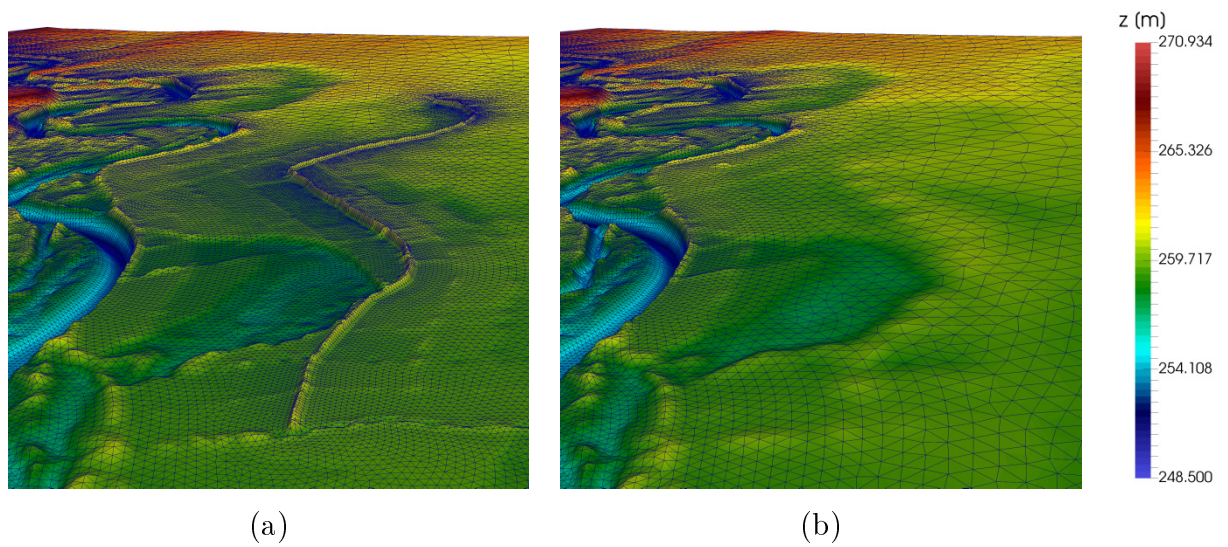


Figura D.7: Diferentes mallas creadas tras refinar en una mota. La figura (a) representa la malla tras el refinamiento y la (b) sin refinar.

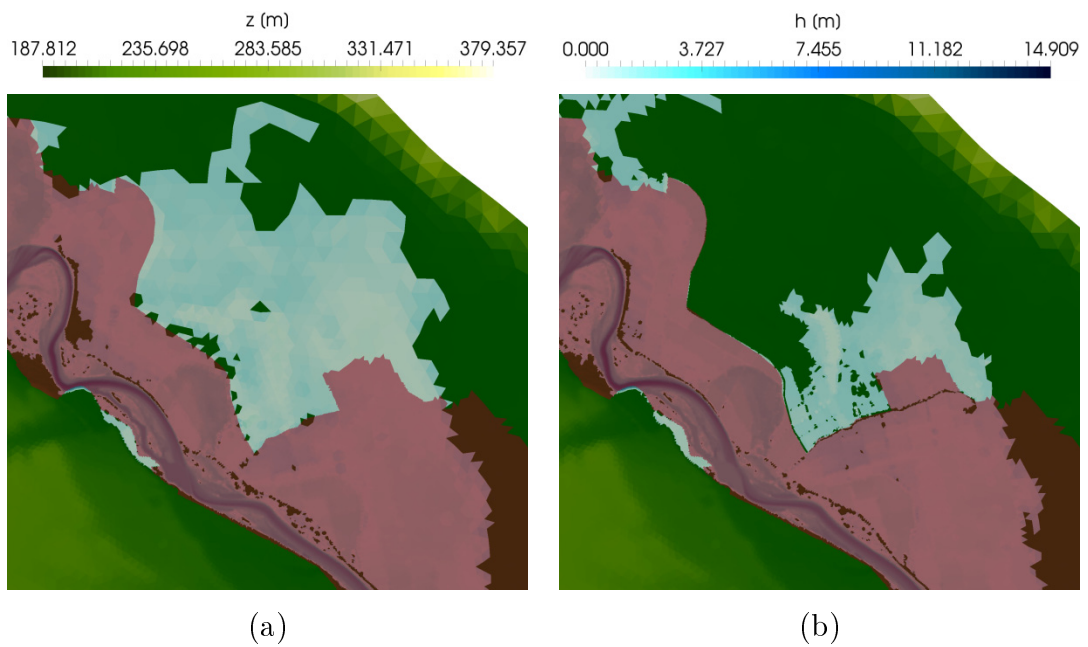


Figura D.8: Representación de la diferencia entre refinar (b) y no refinar (a) en algunas motas.

D.2.2. Elevación de motas

Tras el refinamiento en zonas de importancia se procedió al análisis de la verdadera elevación de algunas motas, que no había sido bien captada por la malla de cálculo. Como se observa en la Figura D.8, la malla ya detecta la presencia de una mota pero el flujo sigue desbordando, aunque no de manera catastrófica como en la primera malla, debido a que no todas las celdas de la malla de cálculo tienen asignadas las elevaciones correctas ya que han sido promediadas y abarcan más zona que la que ocupa la propia mota. Para solucionar este problema se retocan las elevaciones de la malla de manera manual.

Para ello, se analiza en detalle cada celda del MDT en la zona de la mota, obteniendo el valor de la cota en cada celda. Normalmente, se observa como el propio MDT, en motas muy estrechas, tiene zonas en las que no capta bien el valor de la elevación, al tener un grupo de celdas con la misma elevación y un hueco insignificante con un valor menor. Estos agujeros provocan desbordamientos en la simulación que no sucedieron en la realidad por no existir tal hueco. Al solucionar este error se pasa a obtener motas uniformes que impiden el paso del flujo de la misma manera que sucede en la realidad, como se ve en la Figura D.9. Además, en la Figura D.10 se observa otro ejemplo de cómo se ha arreglado una mota de manera manual obteniendo una elevación uniforme.

D.2.3. Cuantificación de la mejora

Tras cada análisis visual se ha obtenido el porcentaje de intersección, calculado a través de la ecuación D.1, para cada iteración y se ha tratado que éste aumente tras cada modificación de la misma. Con la malla de cálculo definitiva se trazaron además las envolventes de las manchas de inundación simuladas para poder tener un dato de intersección real. Así, en la Tabla D.3 se exponen los valores de las áreas calculadas en cada simulación ($A_{simulada}$), el área de la extensión utilizada como referencia (A_{medida}), la intersección sin envolvente ($A_{interseccion}$) y los porcentajes de intersección antes y tras la realización de la envolvente ($Fit_A(\%)$ y $Fit_A(\%)_{envol.}$, respectivamente).

Nótese que el modelo se ajusta peor al suceso de 2003 que a los otros dos, más recientes. Como se ha explicado antes, esto se debe a que se ha calibrado la malla dando prioridad a los resultados de las avenidas más recientes, con el objetivo de obtener un modelo que se ajuste a la realidad más actual, y pueda incluso servir como herramienta de predicción.

Por otro lado, también se compara la simulación con datos reales atendiendo a medidas

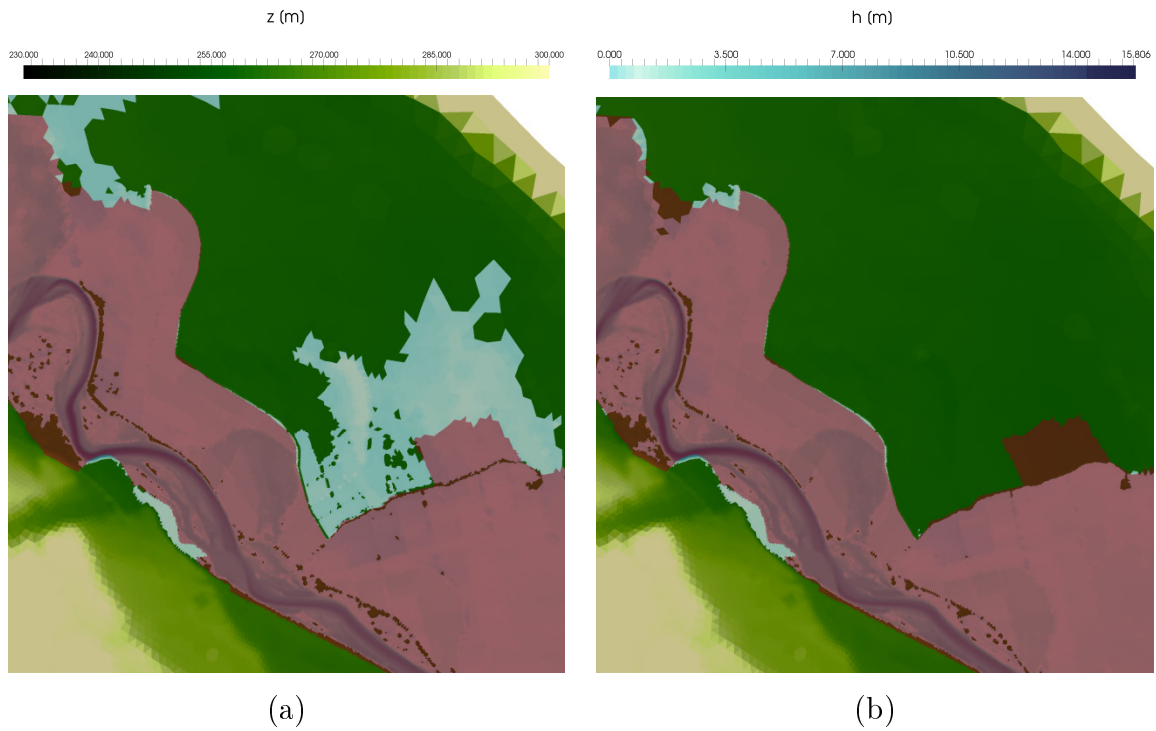


Figura D.9: Comparación del resultado de la lámina de inundación tras imponer la elevación correcta de la mota. La imagen (a) tiene la mota únicamente refinada mientras que (b) tiene además la elevación puesta correctamente e impide el paso del flujo.

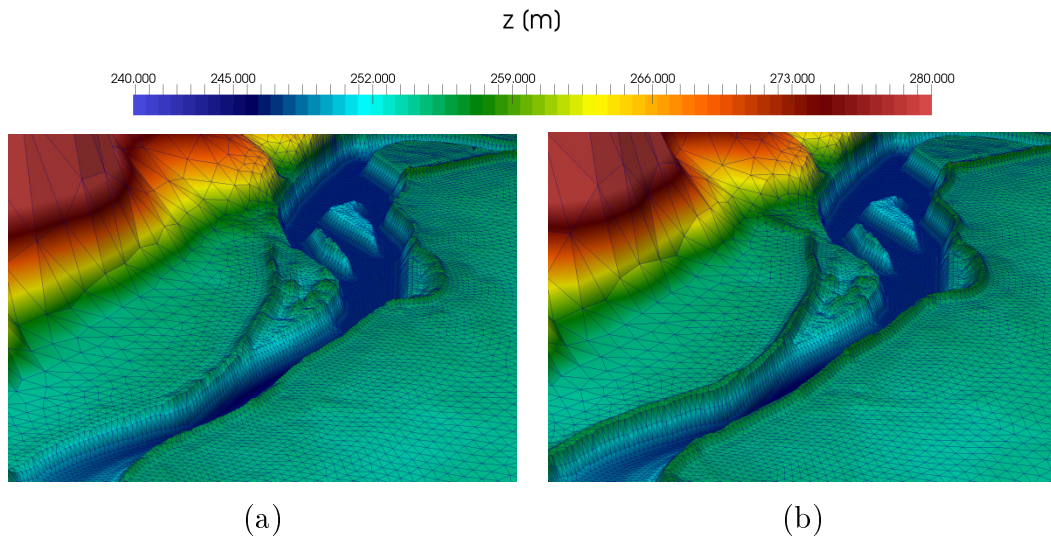


Figura D.10: Diferencia de elevaciones entre motas antes y después de analizar las elevaciones reales. En la imagen (a) la mota tiene elevaciones promediadas. La imagen (b) muestra la mota tras la mejora.

de nivel superficial del flujo. Se dispone de información del calado medido a lo largo del tiempo en diferentes estaciones de aforo del Ebro. En concreto, se escogen las estaciones de Tudela y Novillas, que se encuentran entre Castejón y Zaragoza, para comparar con las medidas de las sondas introducidas en las simulaciones. Puesto que no es posible obtener

APÉNDICE D. GENERACIÓN Y CALIBRACIÓN DE LA MALLA DE CÁLCULO Y MAPA DE ROZAMIENTO

Año	$A_{simulada}[m^2]$	$A_{medida}[m^2]$	$A_{interseccion}[m^2]$	$Fit_A(\%)$	$Fit_A(\%)_{envol.}$
2003	178583770.92	173152495.10	150225499.67	69.4	74.55
2013	125712023.04	120058458.77	107011793.17	75.29	77.12
2015	179032310.81	202368382.10	174451658.82	71.15	84.30

Tabla D.3: Tabla que muestra, en m^2 , el valor del área de la huella de inundación simulada, medida y la intersección de ambas. Además, muestra los porcentajes de coincidencia antes y después de trazar la envolvente.

con exactitud el punto de medida real se ha comparado la altura de la lámina de agua, que se mantiene más o menos constante en una sección transversal del río. En la Figura D.11 se observan las medidas tomadas y las simuladas antes y después de calibrar la malla de cálculo para los años 2013 y 2015.

No hay una diferencia significativa tras la calibración, únicamente una leve mejora. Esto se debe a que las sondas puntuales se encuentran en el cauce del río y la calibración de la malla se ha hecho atendiendo a motas y a la llanura de inundación en general por lo que el efecto en el calado en el río no es significativo.

D.2. CALIBRACIÓN DE LA MALLA DE CÁLCULO

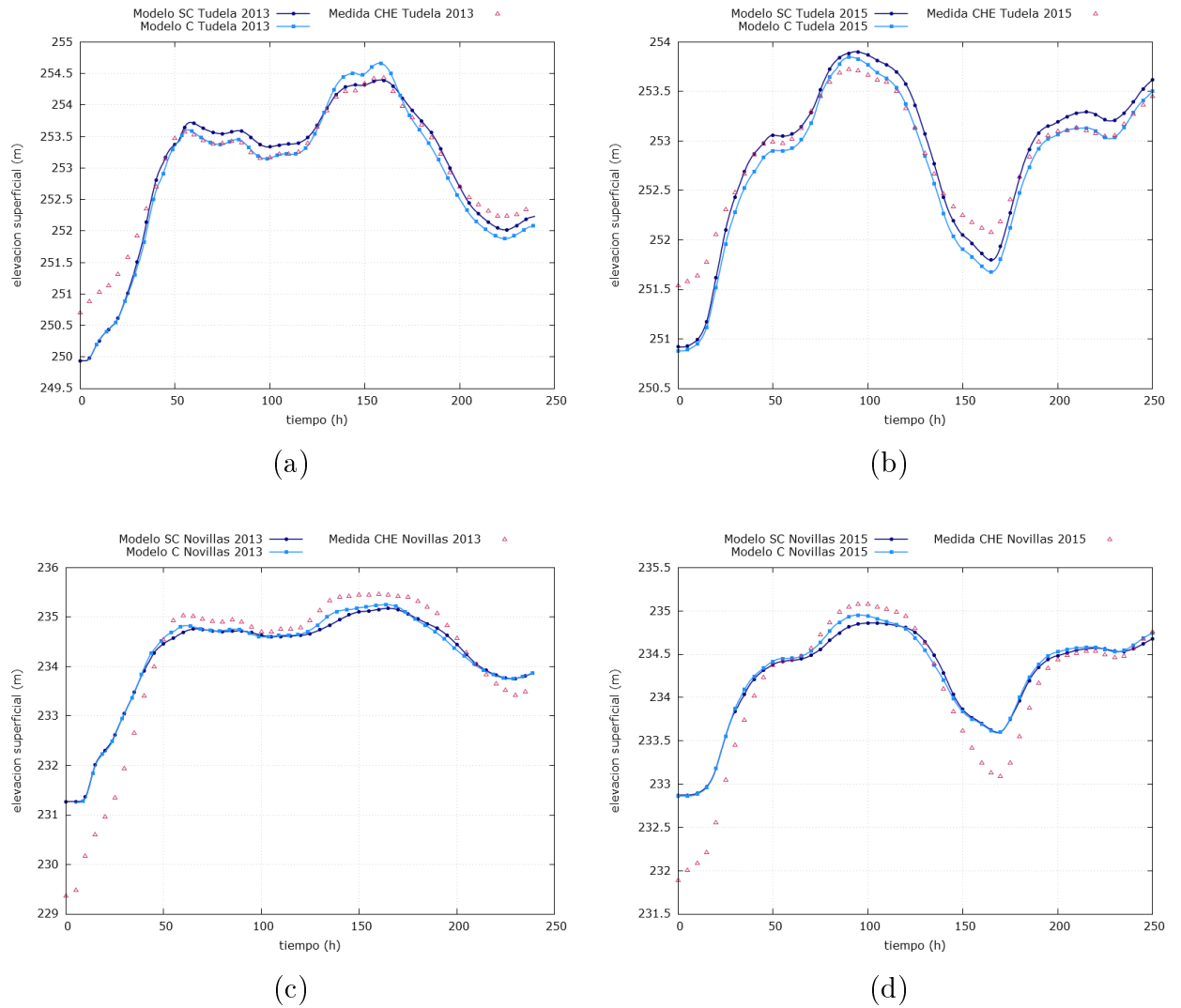


Figura D.11: Comparación del nivel de agua en sondas puntuales entre lo medido por CHE y lo simulado antes y después de calibrar la malla de cálculo. Las figuras (a) y (b) representan la comparativa en Tudela para 2013 y 2015, respectivamente. Las gráficas (c) y (d) muestran lo análogo en Novillas para los mismos años. Las siglas SC y S, en la leyenda, significan sin calibrar y calibrado, respectivamente.

Apéndice E

Resultados de las simulaciones

En este Anexo se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas en el tramo medio del río Ebro. Para cada caso se mostrarán: mapas de inundación, mapas de velocidad, evoluciones temporales de medidas de calado en puntos significativos e imágenes tridimensionales de la evolución de la avenida.

Se presentan resultados analizando: hidrogramas de avenidas correspondientes a los periodos de retorno de 5, 10, 100 y 500 años; y resultados de los hidrogramas de las avenidas ocurridas en el Ebro en los años 2003, 2013 y 2015. Posteriormente se estudian posibles soluciones para ayudar a la mitigación de las mismas.

En la Figura E.1, se presenta la topografía del tramo medio del río Ebro simulado, indicando la posición de las poblaciones importantes.

Todas las simulaciones previas a las de mitigación comparten la misma malla de cálculo y la misma condición de contorno aguas abajo, una curva de aforo impuesta a la salida del dominio que se puede observar en la Figura E.2. El elemento diferenciador que hace de cada simulación un caso diferente de estudio es la condición de contorno de entrada. Por ello, junto a cada caso se presenta el hidrograma impuesto aguas arriba del dominio (en Castejón).



Figura E.1: Representación topográfica del dominio de cálculo, situado entre Castejón y Zaragoza, destacando las poblaciones relevantes.

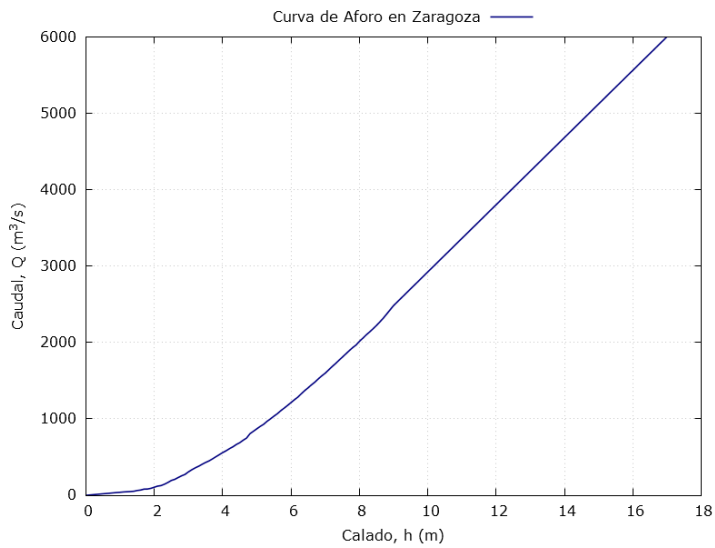


Figura E.2: Curva de aforo en el puente de la autopista A-68 aguas arriba de Zaragoza.

E.1. Avenidas correspondientes a periodos de retorno

Las avenidas correspondientes a periodos de retorno son avenidas de diseño que tratan de simular eventos de diferente envergadura cuyos caudales pico han sido calculados mediante ajuste estadístico. En el presente trabajo se han simulado las avenidas de 5, 10, 100 y 500 años de retorno, donde las 3 últimas corresponden con avenidas de alta, media y baja probabilidad.

E.1.1. Periodo de retorno de 5 años (T5)

La avenida correspondiente al periodo de retorno de 5 años (T5) tiene una elevada probabilidad de ocurrencia, con un caudal pico que es poco mayor que el considerado “caudal de máxima crecida ordinaria”¹ por las autoridades reguladoras competentes. Sin embargo, el caudal es suficiente como para provocar inundaciones y merecer estudios de análisis. En la Tabla E.1 se exponen datos característicos del caso y en la Figura E.3 se puede observar el hidrograma de entrada de caudal que se impone como condición de contorno de entrada en Castejón.

Periodo de retorno 5 años	
Caudal inicial [m^3/s]	Caudal pico [m^3/s]
248	2672
Duración de avenida [h]	Tiempo de simulación [h]
300	9.93

Tabla E.1: Datos característicos de la avenida correspondiente a T5 y datos de la simulación realizada.

A continuación se muestran los resultados obtenidos tras la simulación del evento. Las Figuras E.4 y E.5 muestran las áreas máximas inundadas en líneas de nivel de terreno y de calado, correspondientes a $t=118$ horas. Dicho instante se produce unas horas después de la entrada del pico del hidrograma aguas arriba del dominio, en Castejón, ya que este tarda unas horas en propagarse por toda la cuenca. Se observa que a pesar de ser la menos catastrófica de las avenidas simuladas, como se verá más adelante, el área de inundación es extensa y gran parte de los alrededores del cauce quedan anegados. El dominio entero (Figura E.4) se muestra separado en 4 zonas que se presentan en detalle en la Figura E.5.

En la Figura E.6 se muestra los vectores de velocidad y el módulo de la velocidad en líneas de nivel para diferentes instantes de tiempo. Además, la Figura E.7 muestra los

¹Ley de Aguas (art. 4) (<https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1986-10638>)

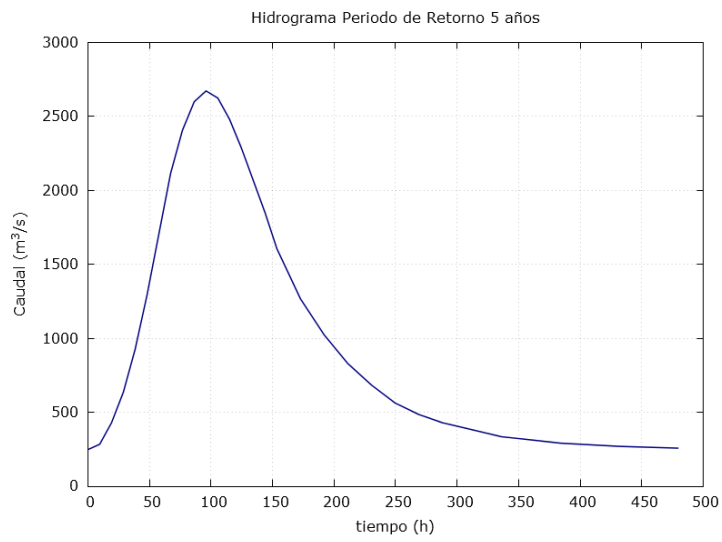


Figura E.3: Hidrograma de entrada correspondiente a T5.



Figura E.4: Visión general de la extensión de la máxima lámina de inundación para T5.

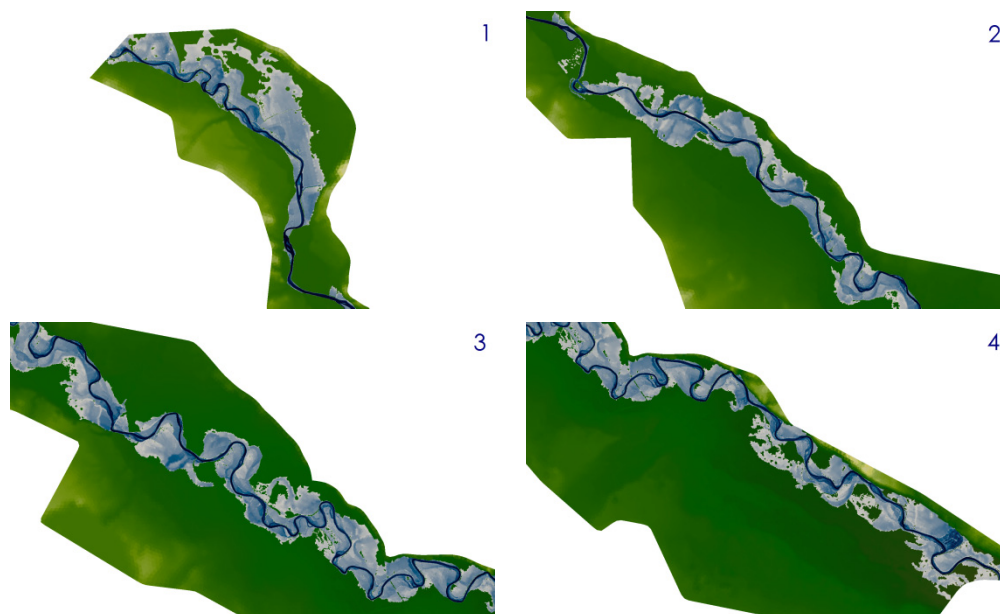


Figura E.5: Visión por tramos de la extensión de la lámina de inundación sobre el terreno en el tramo entre Castejón y Zaragoza, para T5 en $t=118$ horas. La escala es la misma que en la Figura E.4.

mismos mapas en el análisis del desbordamiento del agua en una mota entre Tudela y Fontellas. Se puede notar que durante las primeras 40 h el río aún no ha desbordado pero sí ha aumentado su velocidad (Figura E.6).

En la Figura E.8 se puede observar la evolución temporal del calado en Tudela y Novillas. Se colocan sondas puntuales de medida en el mismo punto que las estaciones de aforo de estas poblaciones. Se observa como ambas siguen la forma del hidrograma (ver Figura E.3), pero más laminado conforme más aguas abajo se encuentra el punto de medida.

La Figura E.9 muestra una imagen tridimensional de la zona de Castejón para el instante de máxima inundación. Por otro lado, la Figura E.10 muestra la evolución temporal de la lámina de agua desde el principio del hidrograma ($t=20$ horas) hasta el momento en el que la extensión de la lámina de agua es máxima ($t=118$ horas).

E.1.2. Periodo de retorno de 10 años (T10)

La avenida correspondiente al periodo de retorno de 10 años (T10) sigue estando considerada evento de probabilidad de ocurrencia alta. Su estudio es importante porque a pesar de no ser tan probable como el anterior, sus consecuencias serían más catastróficas, al tener un mayor caudal pico. En la Tabla E.2 se exponen datos característicos del caso y en la Figura E.11 se puede observar el hidrograma de entrada.

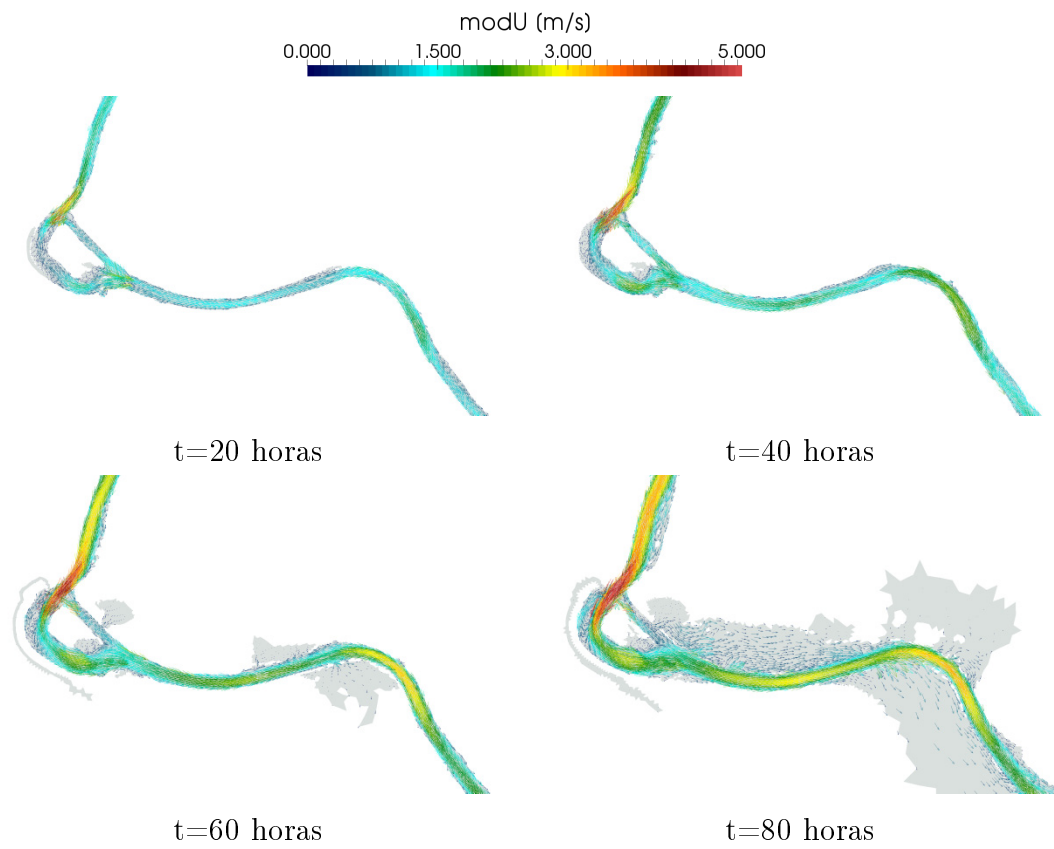


Figura E.6: Evolución temporal de la velocidad en líneas de nivel de módulo y vectores, para T5.

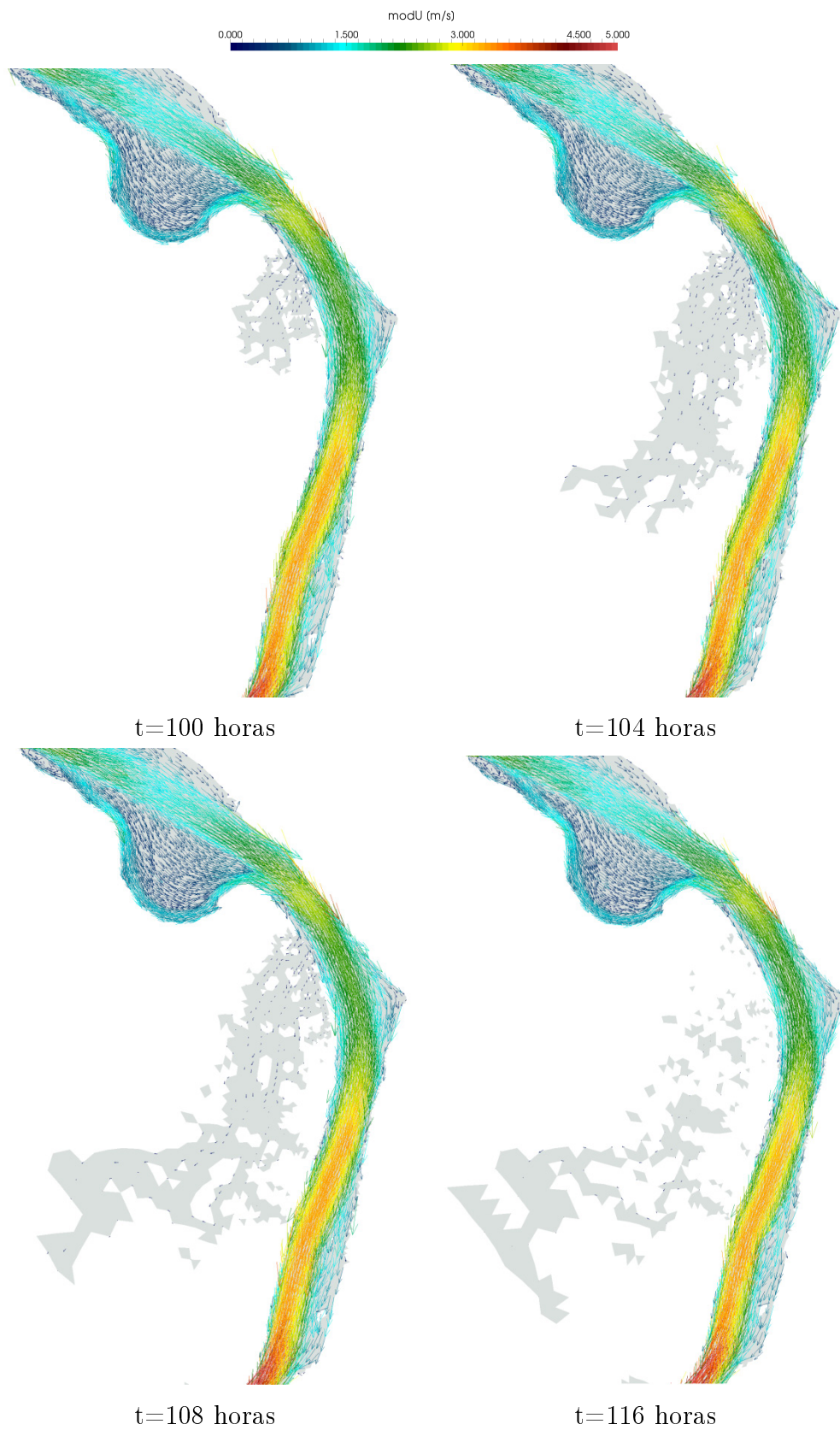


Figura E.7: Evolución del desbordamiento de una mota entre Tudela y Fontellas en términos de módulo y vectores velocidad para T5.

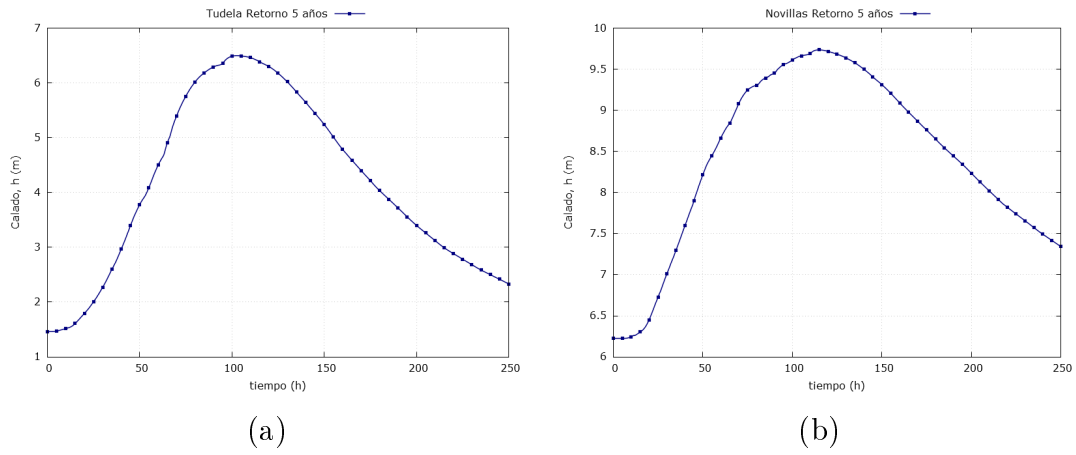


Figura E.8: Evolución temporal del calado en Tudela (a) y en Novillas (b) para T5.

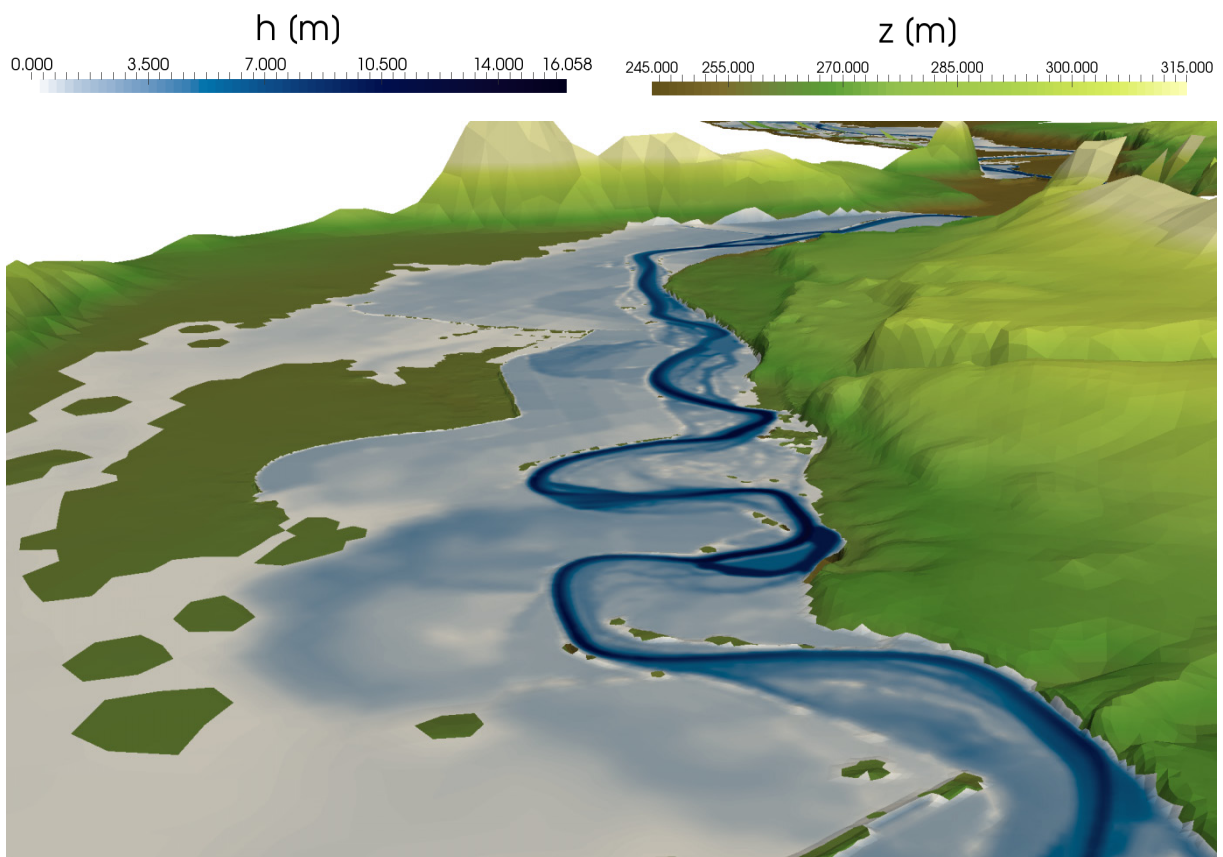


Figura E.9: Imagen tridimensional cota de terreno y calado en Castejón para T5 en t=118 horas.

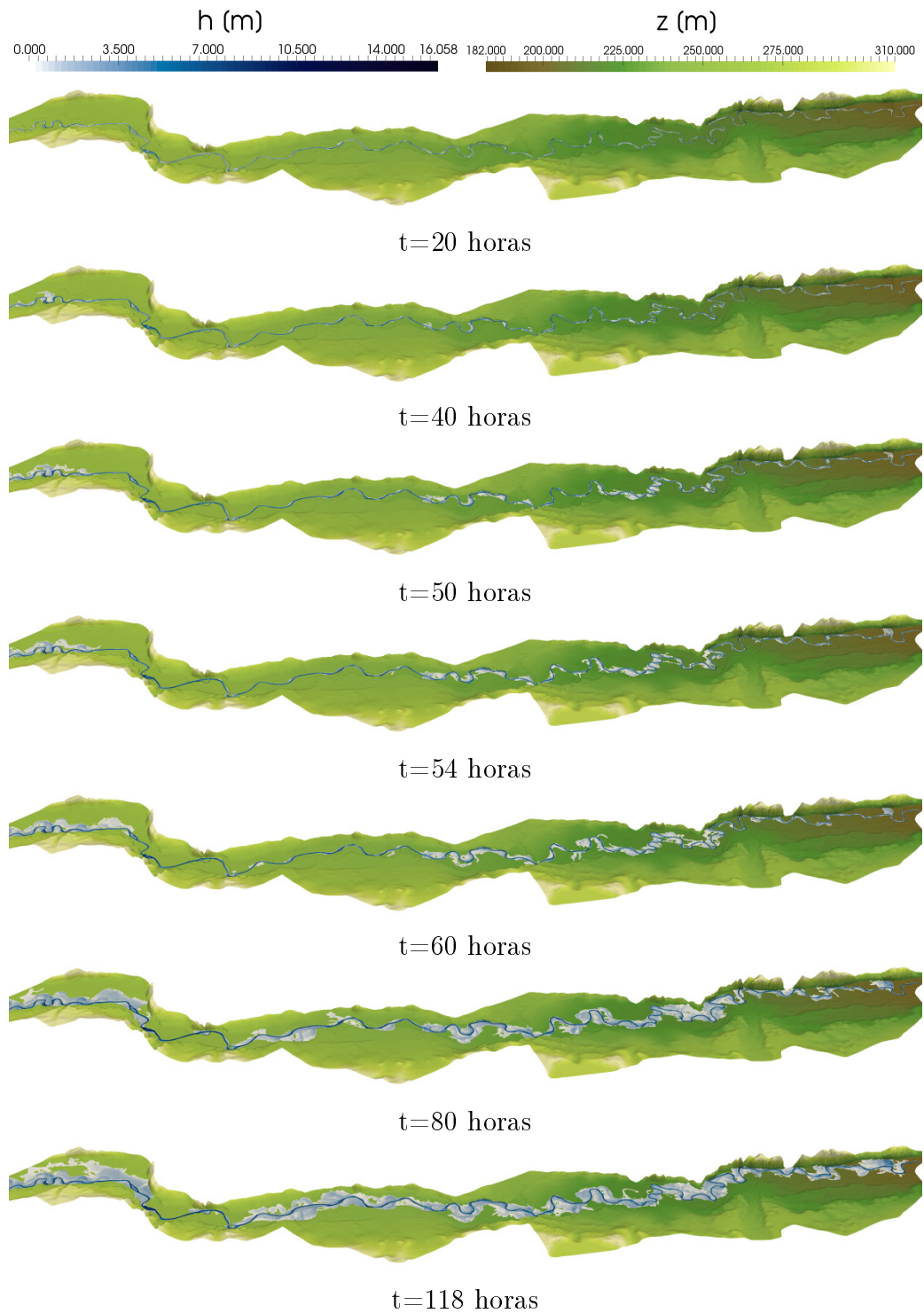


Figura E.10: Mapas de área inundada en diferentes instantes de tiempo en el tramo Castejón-Zaragoza para T5.

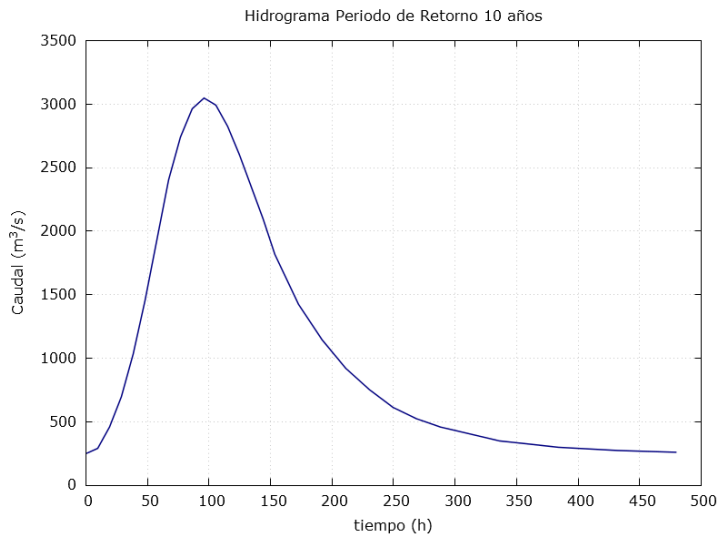


Figura E.11: Hidrograma de entrada correspondiente a T10.

Periodo de retorno 10 años	
Caudal inicial [m^3/s]	Caudal pico [m^3/s]
248	3047
Duración de avenida [h]	Tiempo de simulación [h]
300	11.01

Tabla E.2: Datos característicos de la avenida correspondiente a T10 y datos de la simulación realizada.

Los resultados en términos de área máxima inundada correspondientes a T10 se pueden observar en las Figuras E.12 y E.13, que muestran de manera general y detallada la extensión de la lámina de inundación en su punto máximo, $t=118$ horas.

La evolución de los vectores velocidad del flujo a lo largo del tiempo se pueden ver en la Figura E.14. Además, la representación de esta variable resulta de utilidad si se quiere analizar el desbordamiento del agua en una mota, como se ve en la Figura E.15.

La Figura E.16 expone la evolución temporal del calado obtenido a través de sondas puntuales colocadas en las estaciones de aforo de Tudela y Novillas. Se observa como ambas siguen la forma del hidrograma de entrada (ver Figura E.11).

Finalmente la Figura E.17 ofrece unaimagen tridimensional de la inundación, representando la cota del terreno y el calado para $t=118$ horas, en dos zonas del dominio. A su vez, la Figura E.18 muestra la evolución temporal de la lámina de inundación sobre la



Figura E.12: Visión general de la extensión de la máxima lámina de inundación para T10.

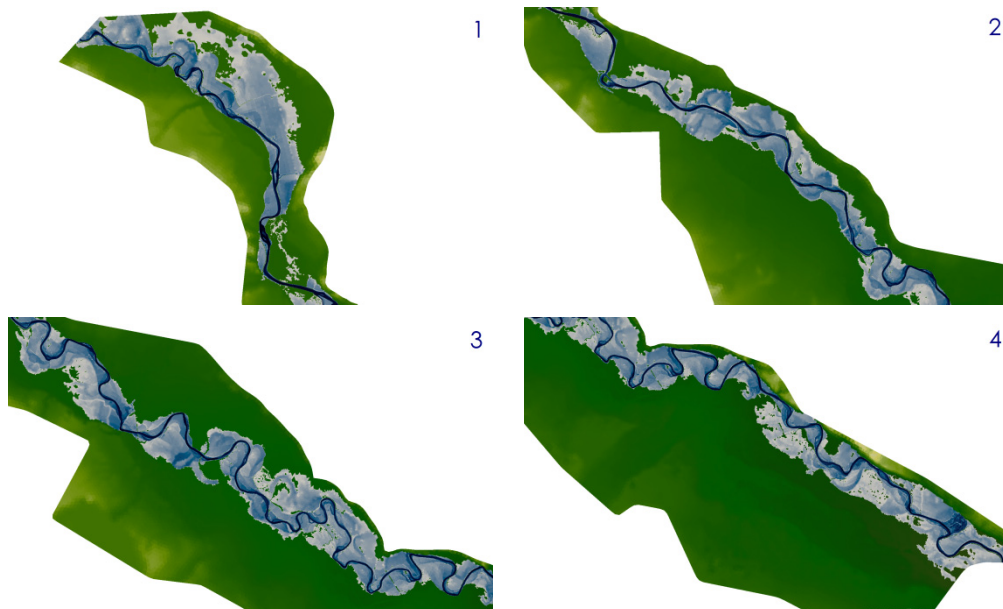


Figura E.13: Visión por tramos de la extensión de la lámina de inundación sobre el terreno en el tramo entre Castejón y Zaragoza, para T10 en $t=118$ horas. La escala es la misma que en la Figura E.12.

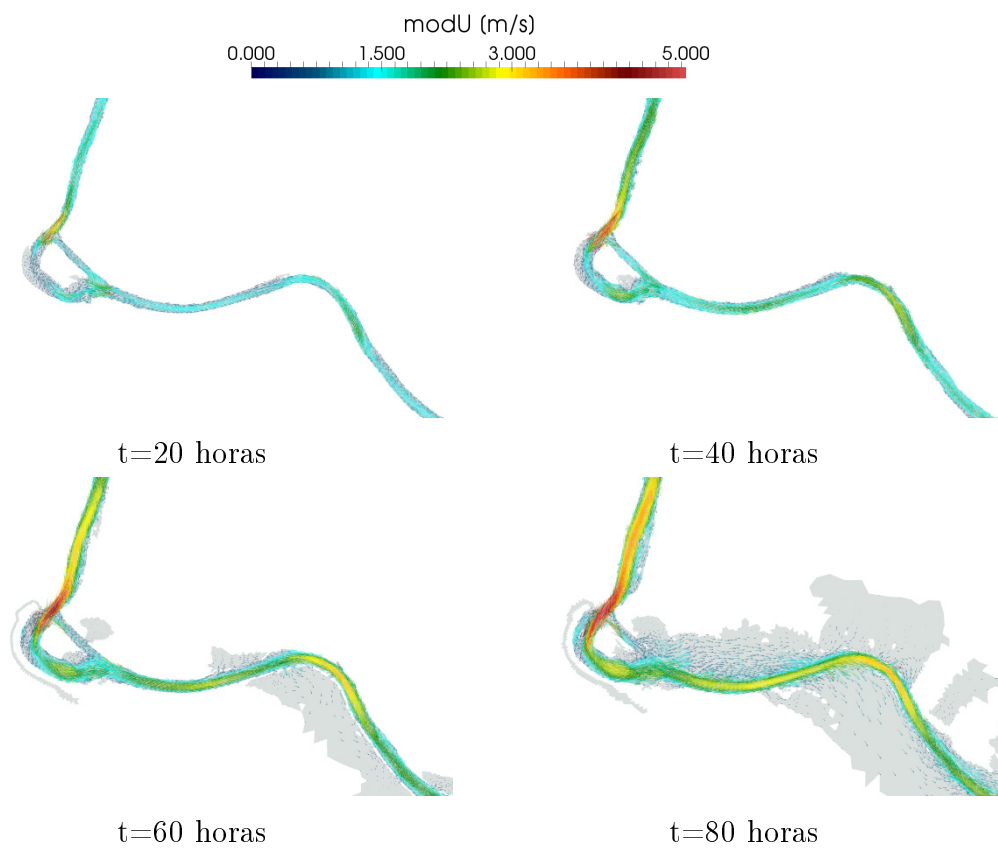


Figura E.14: Evolución temporal de la velocidad en líneas de nivel de módulo y vectores, para T10.

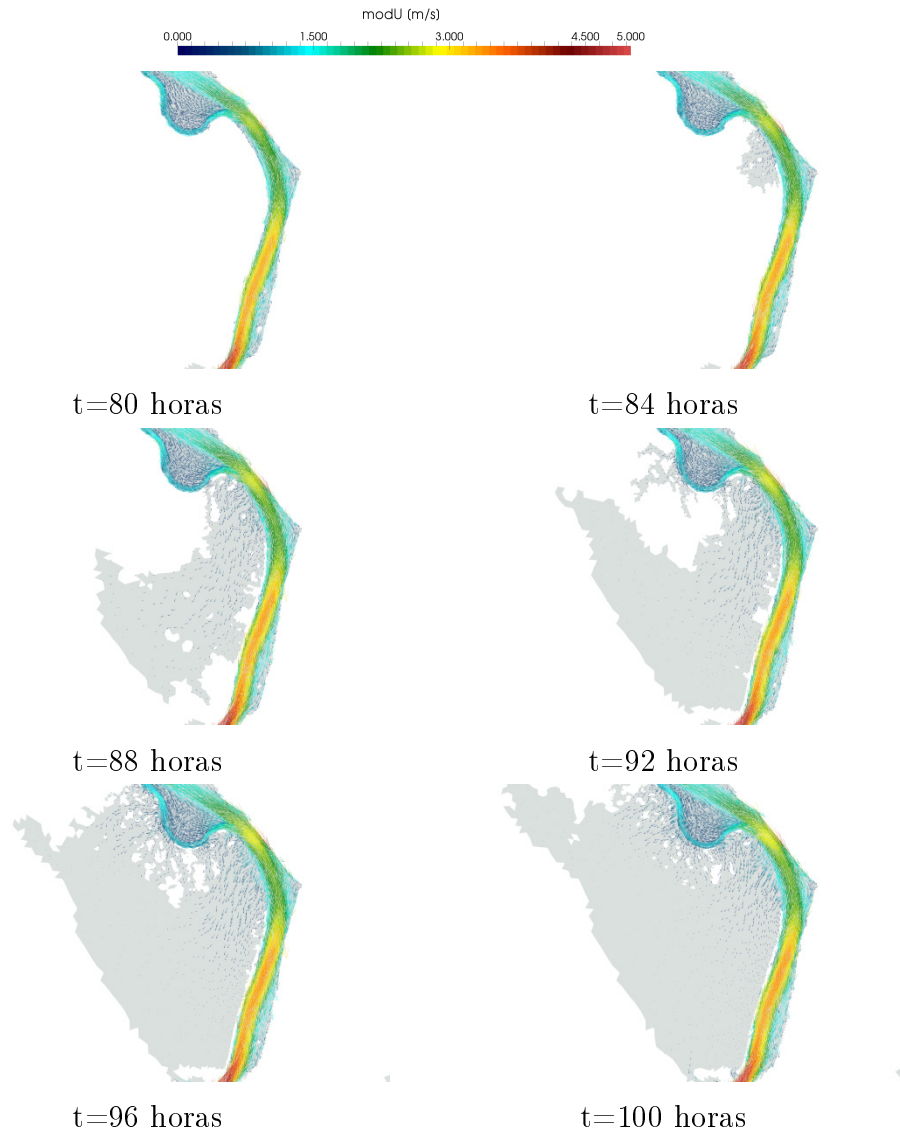


Figura E.15: Evolución del desbordamiento de una mota entre Tudela y Fontellas en términos de módulo y vectores velocidad para T10.

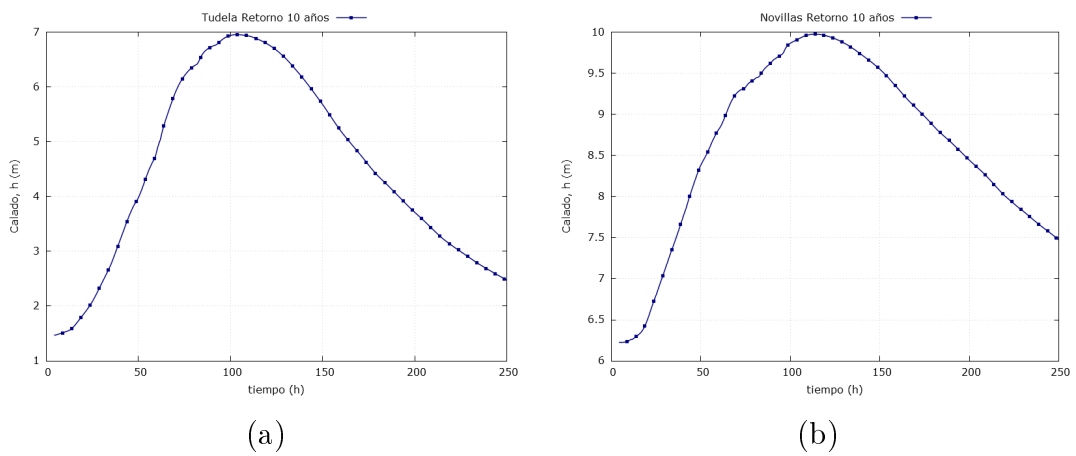


Figura E.16: Evolución temporal del calado en Tudela (a) y en Novillas (b) para T10.

topografía representada en 3D.

En la Figura E.18 se muestra la evolución del área inundada para los mismos instantes que se ha presentado T5, partiendo de un mismo estacionario de $248 \text{ m}^3/\text{s}$. Se observa que el instante de máxima inundación coincide con la avenida anterior, puesto que el tiempo de llegada del pico es el mismo, sin embargo, la extensión del área inundada es mayor al ser el caudal pico mayor. Un efecto similar se observa en las imágenes presentadas que muestran la evolución del desbordamiento de una mota (Figuras E.7 y E.15), donde se aprecia que para T5 la mota no desborda hasta $t=100$ horas mientras que para T10 a las 10 horas ya se encuentra gran parte de la llanura de inundación anegada, debido a que para los mismos instantes de tiempo, T10 tiene mayores caudales que T5. Todos estos efectos, como se observará más adelante, se acentúan conforme aumenta el periodo de retorno, y el caudal punta es mayor.

E.1.3. Periodo de retorno de 100 años (T100)

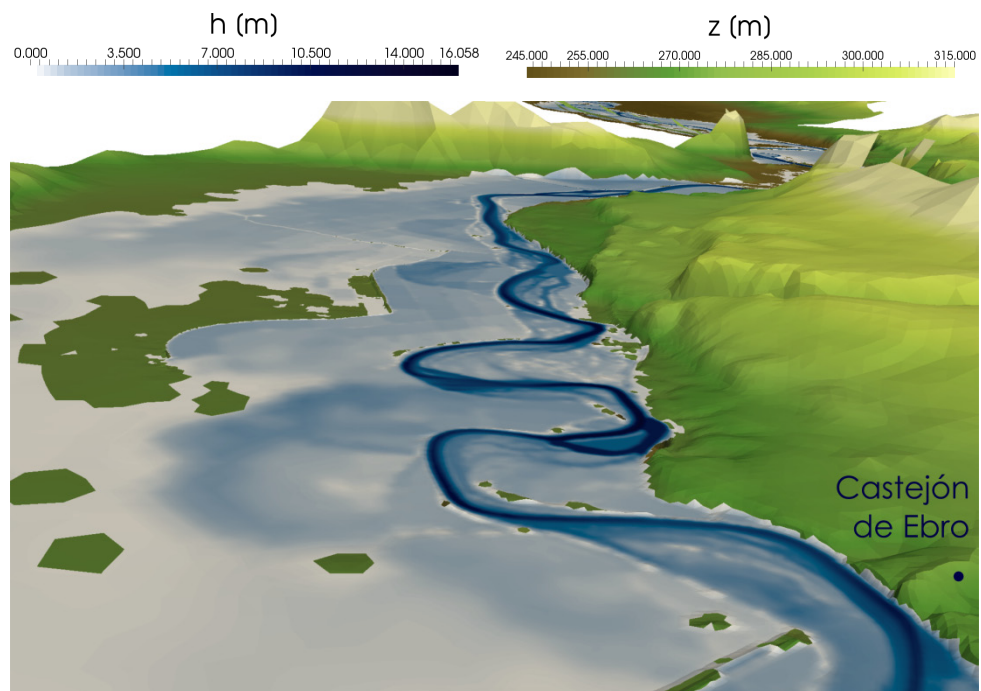
La avenida correspondiente al periodo de retorno de 100 años se considera de probabilidad de ocurrencia media. Por un lado, los análisis de los efectos de esta avenida ya resultan en planes de actuación a largo plazo, pero son lo suficientemente probables como para que, en relación con sus devastadores efectos, interese su estudio. En la Tabla E.3 se exponen datos característicos del caso y en la Figura E.19 se puede observar el hidrograma usado como condición de contorno de entrada.

Periodo de retorno 100 años	
Caudal inicial [m^3/s]	Caudal pico [m^3/s]
248	4223
Duración de avenida [h]	Tiempo de simulación [h]
300	11.4

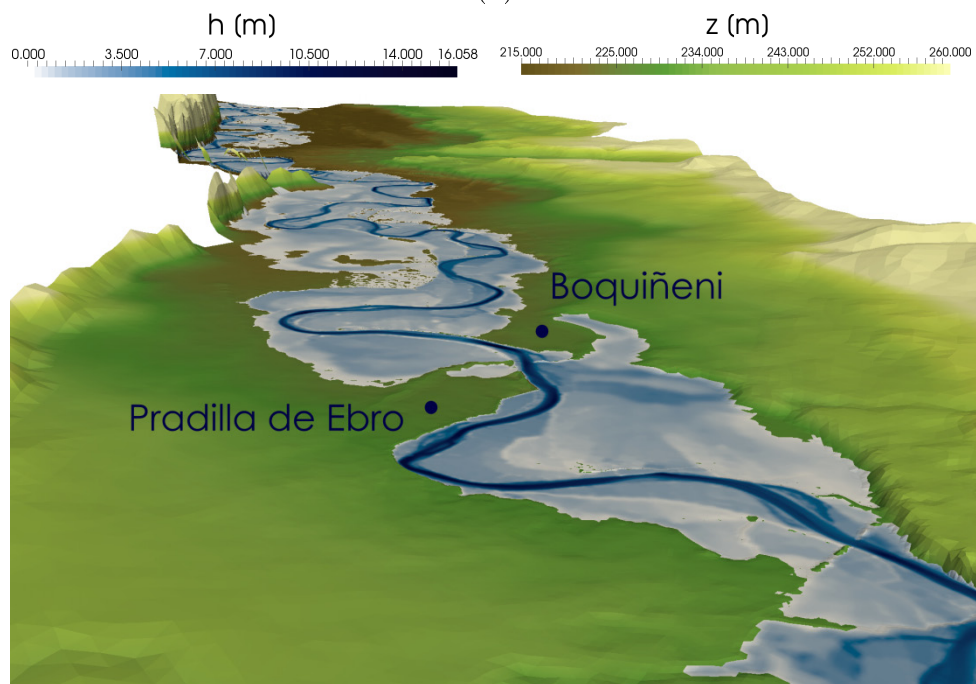
Tabla E.3: Datos característicos de la avenida correspondiente a T100 y datos de la simulación realizada.

La extensión máxima de la lámina de agua se muestra en las Figuras E.20 y E.21, donde se representan el calado y la topografía en $t=110$ horas, instante de máxima inundación, para T100.

Los mapas de vectores de velocidad y el módulo de esta, se observan en las Figuras E.22 y E.23, que ofrecen un desarrollo temporal de la velocidad y la evolución de la



(a)



(b)

Figura E.17: Imagen tridimensional cota de terreno y calado en Castejón (b) y en Pradilla de Ebro (a) para T10 en $t=118$ horas.

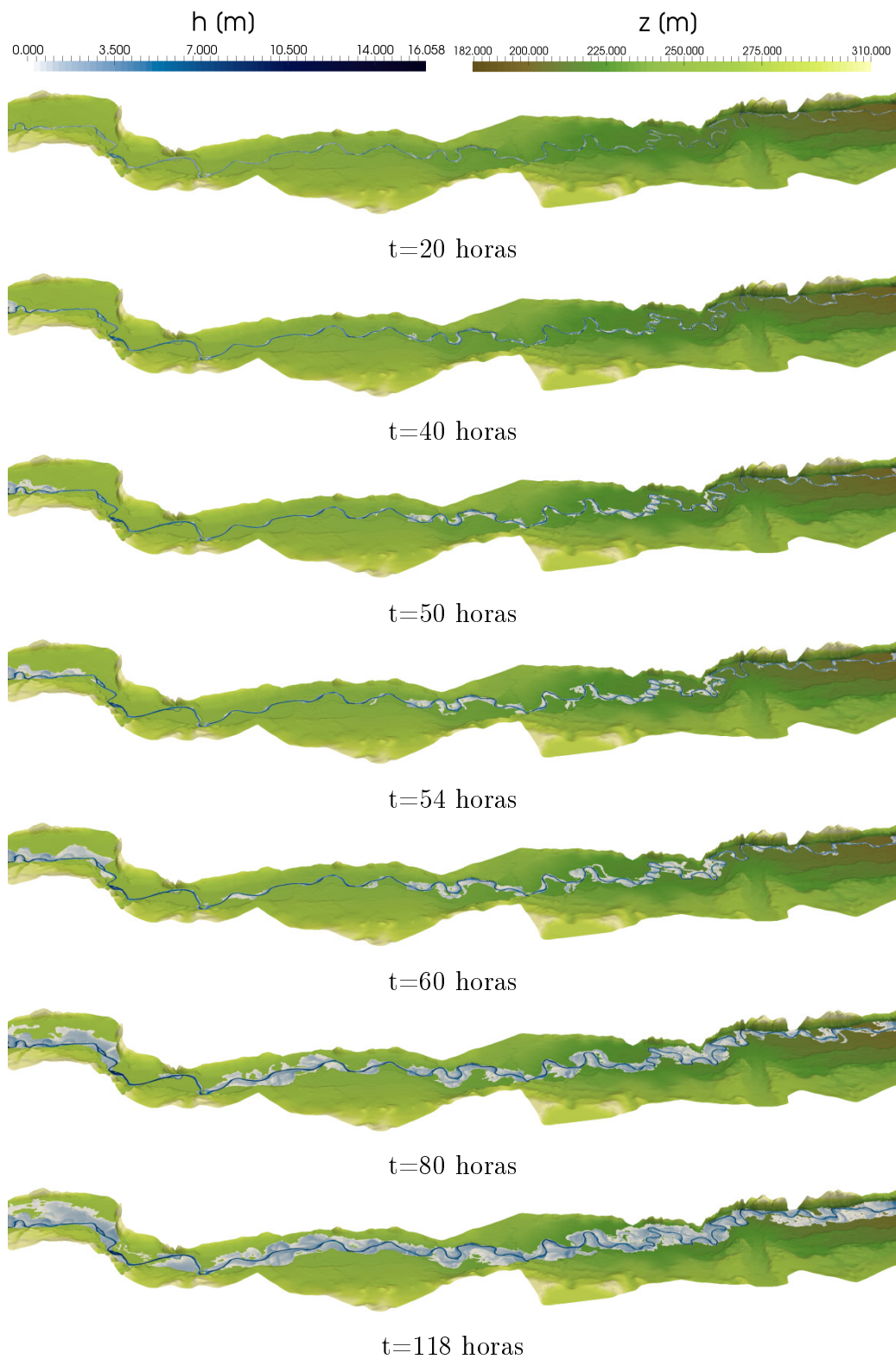


Figura E.18: Mapas de área inundada en diferentes instantes de tiempo en el tramo Castejón-Zaragoza para T10.

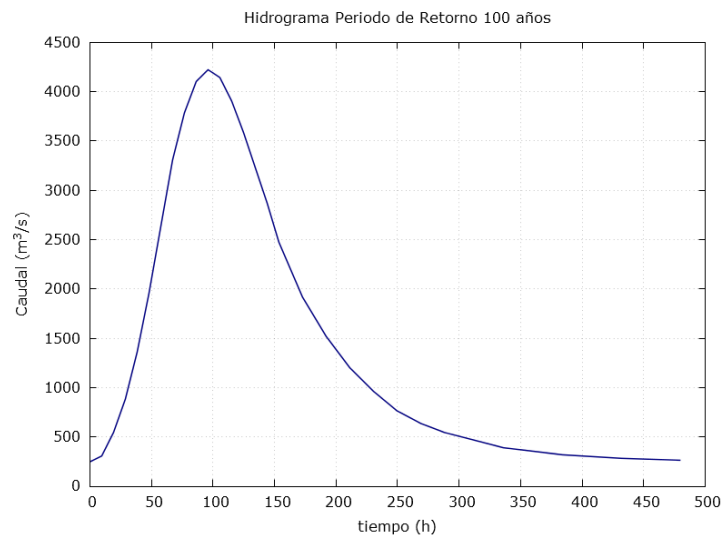


Figura E.19: Hidrograma de entrada correspondiente a T100.



Figura E.20: Visión general de la extensión de la máxima lámina de inundación para T100.

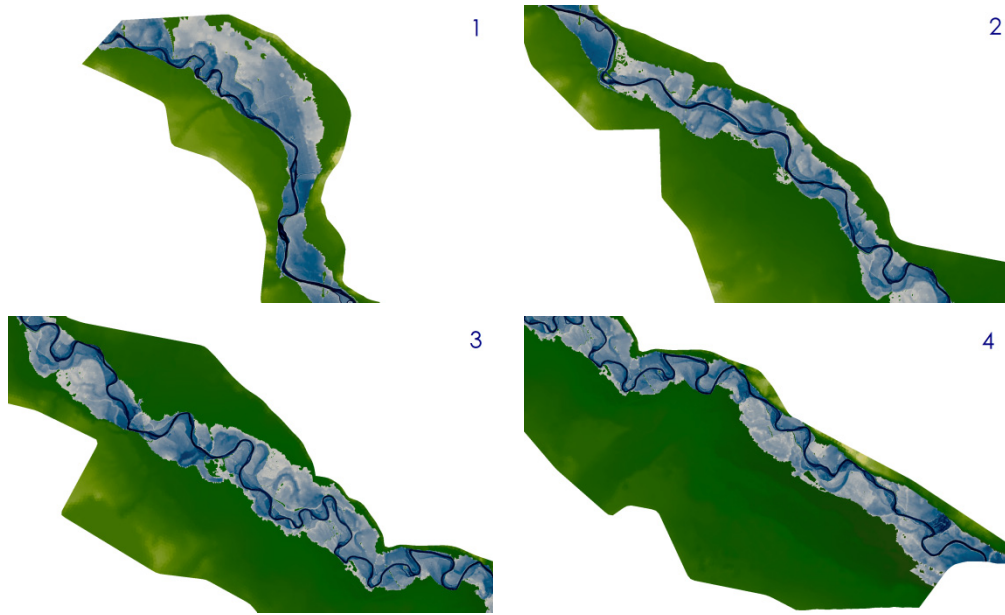


Figura E.21: Visión por tramos de la extensión de la lámina de inundación sobre el terreno en el tramo entre Castejón y Zaragoza, para T100 en $t=110$ horas. La escala es la misma que en la Figura E.20.

rotura de una mota entre Tudela y Fontellas, respectivamente.

La evolución temporal del calado sigue el mismo patrón que hasta ahora se ha visto en T5 y T10, debido a que los hidrogramas tienen la misma forma (ver Figuras E.3, E.11 y E.19), en cambio, alcanza valores de calado más altos debido al pico de caudal de T100. La Figura E.24 muestra dicha evolución en Tudela y en Novillas.

Se presenta la extensión de la lamina de agua para $t=110$ horas en Castejón y en Pradilla de Ebro (Figura E.25), así como la evolución temporal de dicha lámina en todo el dominio (Figura E.26), en una vista 3D.

Nótese que el periodo de retorno de 100 años consta de un caudal punta de $4223 \text{ m}^3/\text{s}$ que ocasiona graves efectos en las llanuras de la cuenca. En la imagen (a) de la Figura E.25 se observa como la población de Pradilla de Ebro quedaría inundada ante una crecida como la simulada. Puesto que las poblaciones están modeladas con un rozamiento equivalente al de suelo urbano y, asimismo, normalmente protegidas con motas o elevadas por la propia topografía, el hecho de que una población se inunde es significativo, ya que demuestra el devastador efecto que puede tener la crecida de T100.

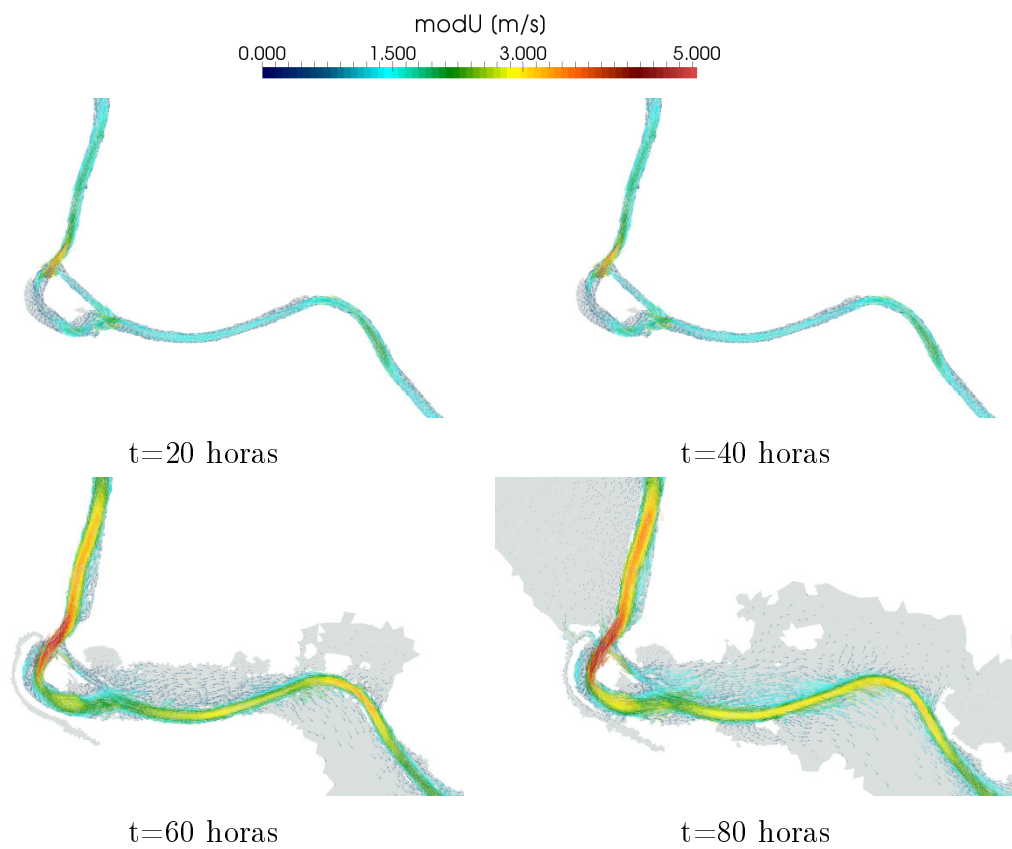


Figura E.22: Evolución temporal de la velocidad en líneas de nivel de módulo y vectores, para T100.

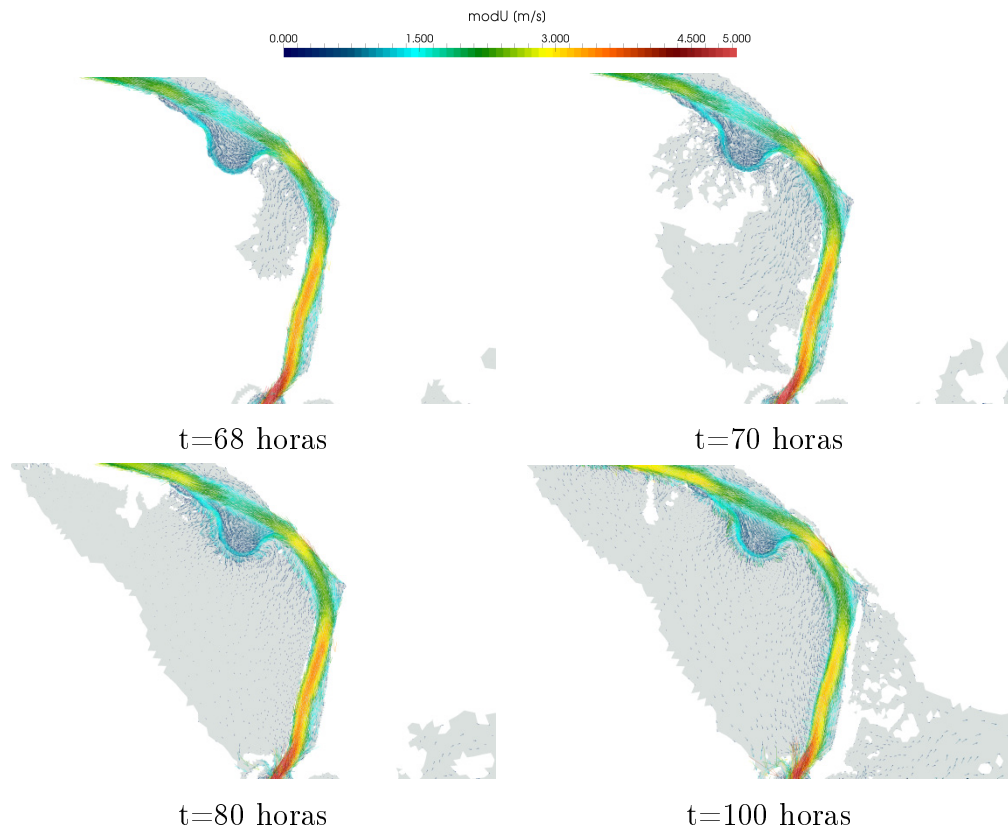


Figura E.23: Evolución del desbordamiento de una mota entre Tudela y Fontellas en términos de módulo y vectores velocidad para T100.

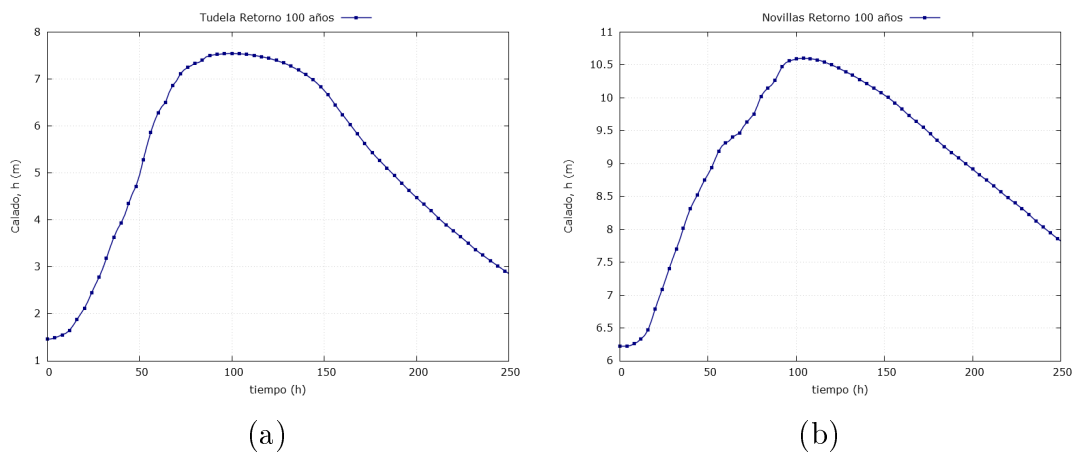
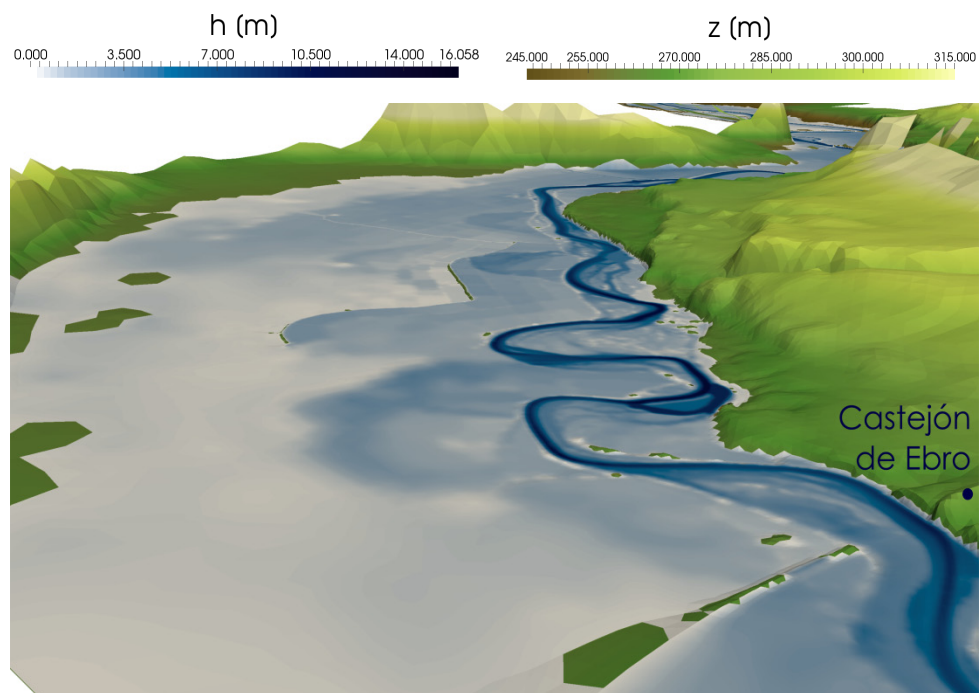
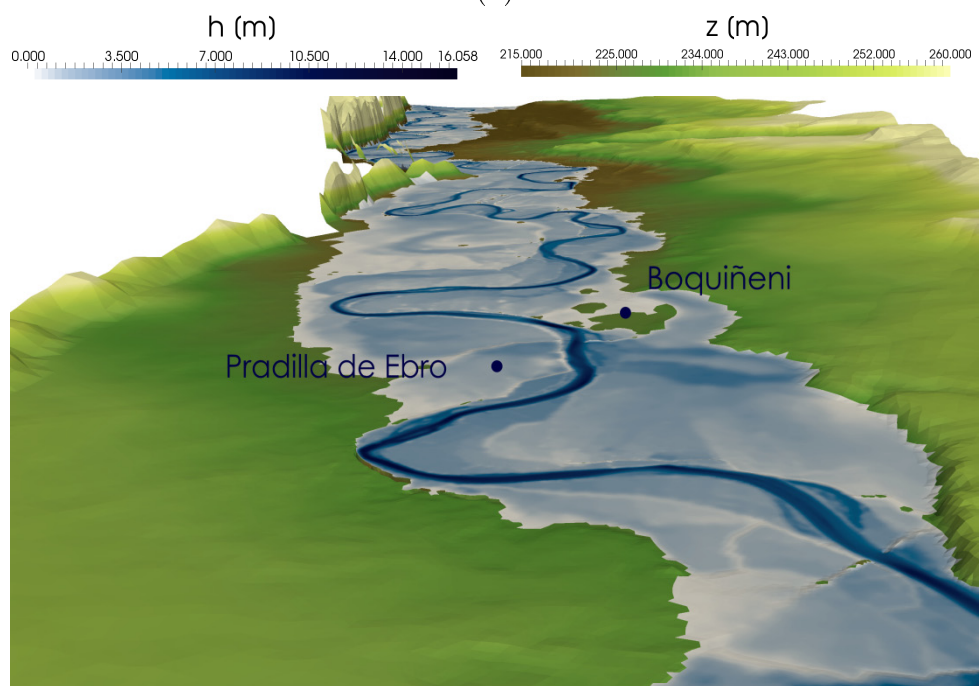


Figura E.24: Evolución temporal del calado en Tudela (a) y en Novillas (b) para T100.



(a)



(b)

Figura E.25: Imagen tridimensional cota de terreno y calado en Castejón (b) y en Pradilla de Ebro (a) para T100 en t=110 horas.

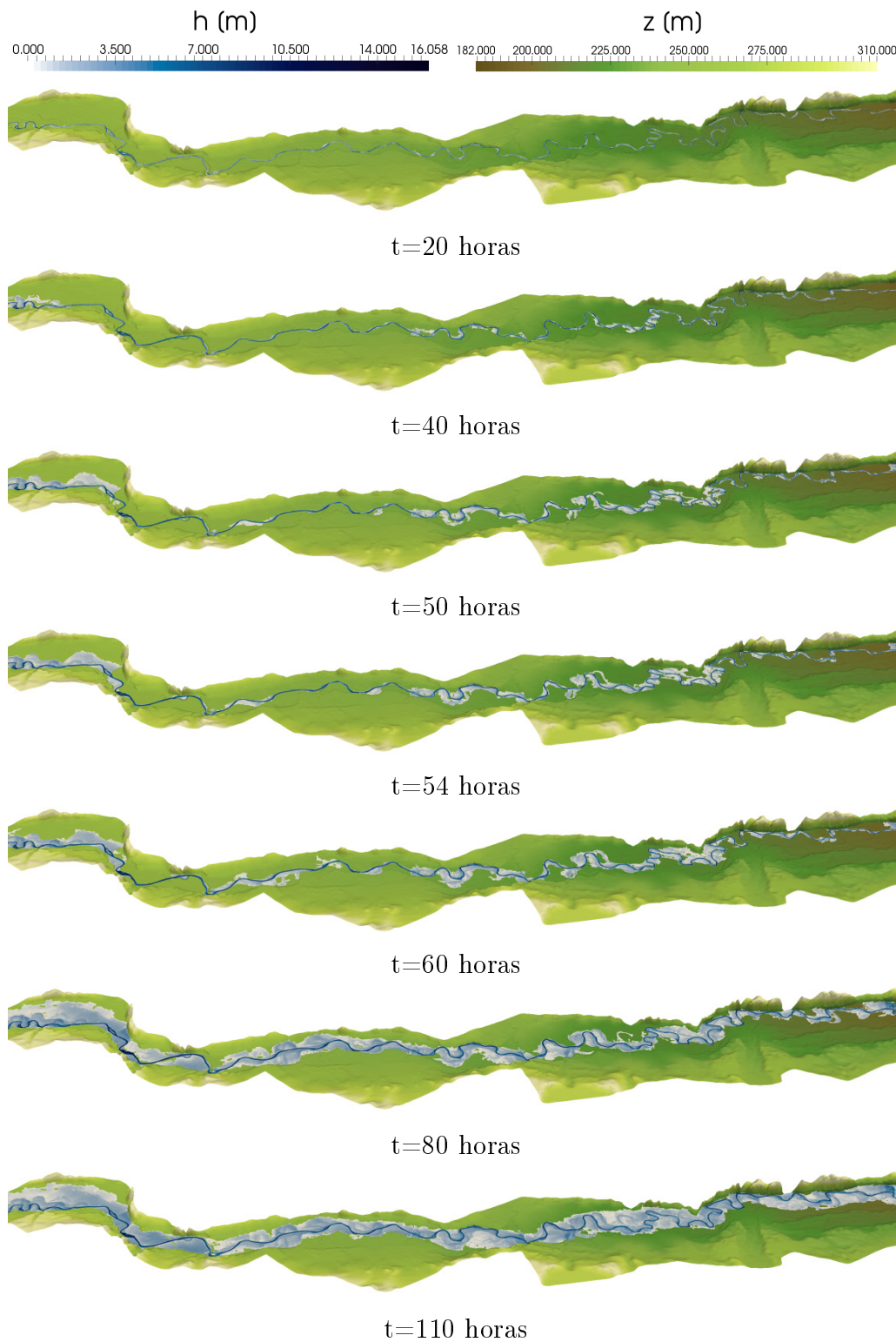


Figura E.26: Mapas de área inundada en diferentes instantes de tiempo en el tramo Castejón-Zaragoza para T100.

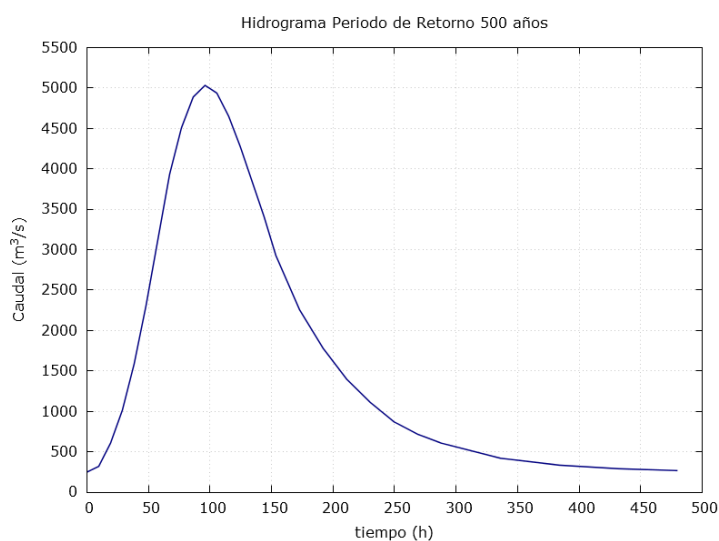


Figura E.27: Hidrograma de entrada correspondiente a T500.

E.1.4. Periodo de retorno de 500 años (T500)

La avenida correspondiente al periodo de retorno de 500 años es considerada de baja probabilidad de ocurrencia. Sin embargo, su caudal pico alcanza un valor elevado y sus efectos son catastróficos, por lo que forma de parte de este y otros estudios por su importancia a largo plazo. En la Tabla E.4 se exponen datos característicos del caso y en la Figura E.27 se puede observar el hidrograma de entrada.

Periodo de retorno 500 años	
Caudal inicial [m^3/s]	Caudal pico [m^3/s]
248	5031
Duración de avenida [h]	Tiempo de simulación [h]
300	12.067

Tabla E.4: Datos característicos de la avenida correspondiente a T500 y datos de la simulación realizada.

Las Figuras E.28 y E.29 muestran el área inundada correspondiente a T500 en $t=110$ horas, cuando esta es máxima. El área de inundación máxima para este periodo de retorno es la mayor de todas las expuestas hasta ahora al ser la avenida con mayor caudal pico.

En la Figura E.30 se muestra la variación de los mapas de vectores de velocidad a lo largo del tiempo, en concreto, para $t=20, 40, 60$ y 80 horas. Además, en la Figura E.31 se muestran los mismos mapas en el análisis del desbordamiento del agua en una mota, aunque para instantes de tiempo con la avenida mucho más avanzada.

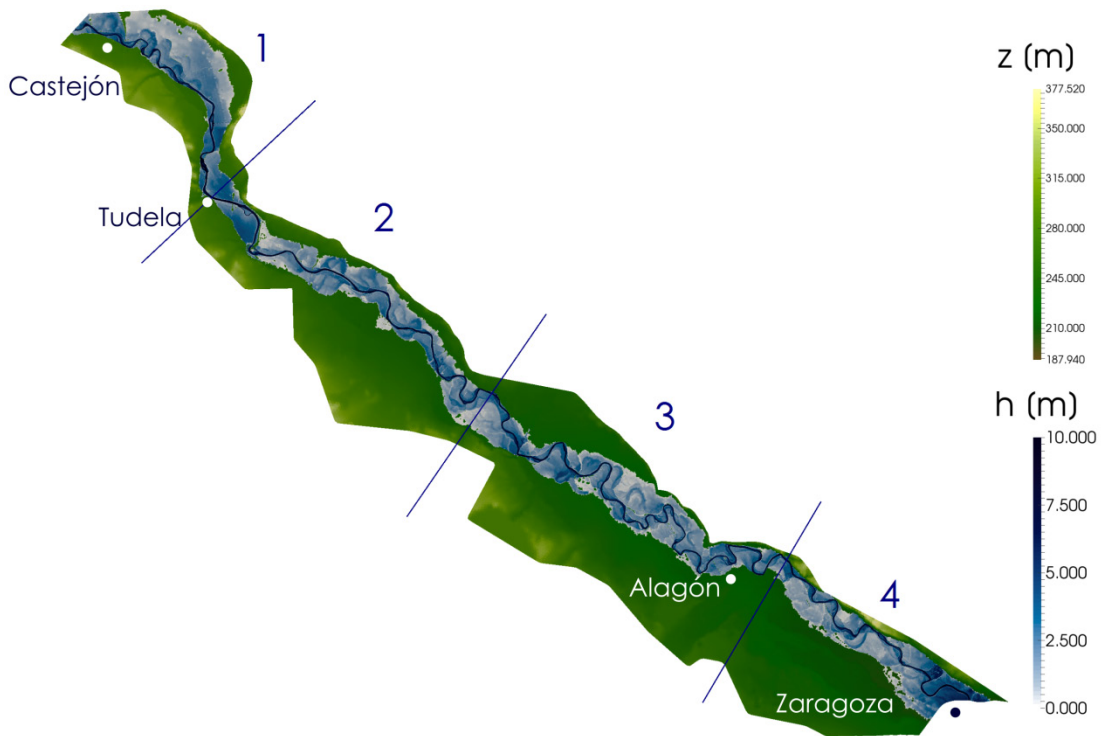


Figura E.28: Visión general de la extensión de la máxima lámina de inundación para T500.

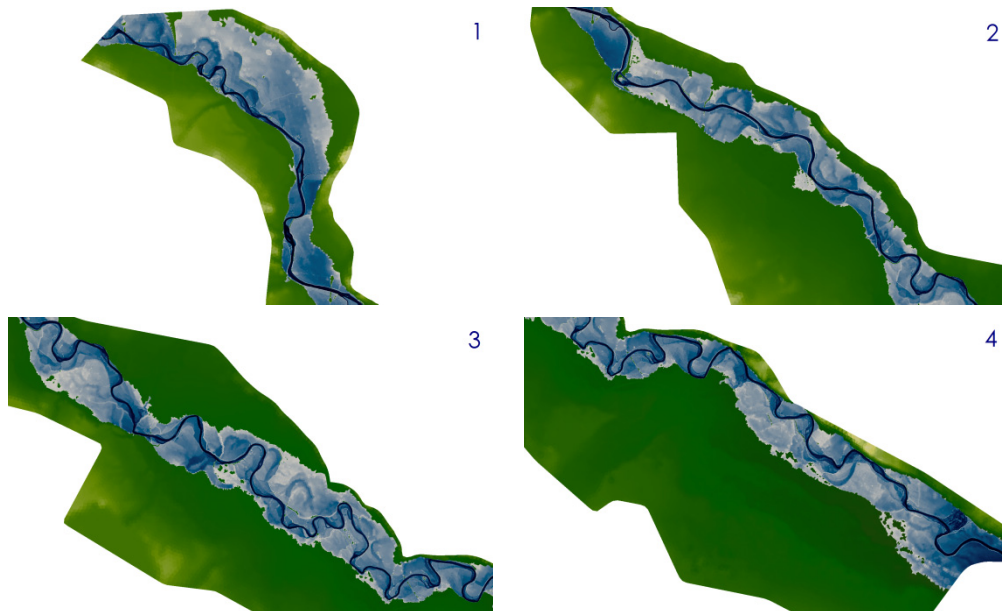


Figura E.29: Visión por tramos de la extensión de la lámina de inundación sobre el terreno en el tramo entre Castejón y Zaragoza, para T500 en $t=110$ horas. La escala es la misma que en la Figura E.28.

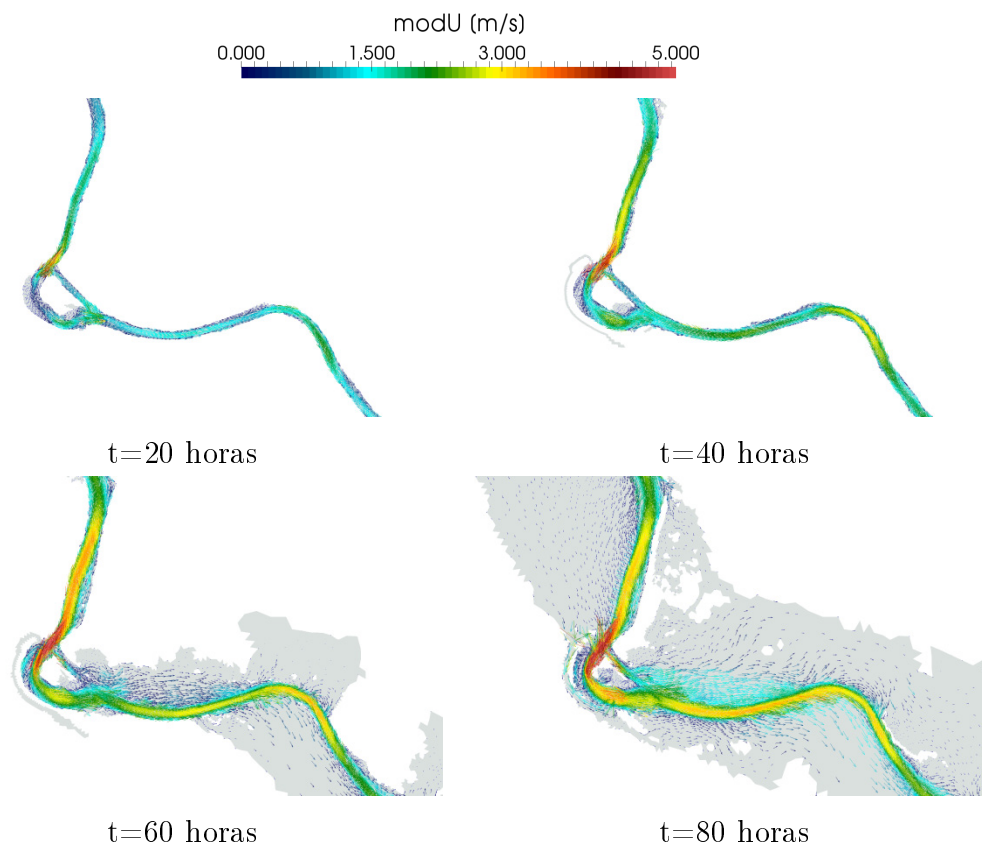


Figura E.30: Evolución temporal de la velocidad en líneas de nivel de módulo y vectores, para T500.

La Figura E.30 muestra la evolución temporal de los vectores velocidad y el módulo de la misma, para la crecida T500. A su vez, en la Figura E.31 se presenta la evolución del desbordamiento de la misma mota hasta ahora presentada, entre Tudela y Fontellas, en este caso.

Como se ha dicho, el periodo de retorno de 500 años es el más caudaloso de los expuestos hasta ahora y eso provoca, no solo una mayor extensión de la lámina de inundación, sino también un mayor calado. En la Figura E.32 se observa la evolución temporal del calado en las estaciones de aforo de Tudela y Novillas, y se observa cómo este es mayor que todas las expuestas hasta ahora.

En la Figura E.33 se observa una vista 3D del cauce desbordado para el instante de inundación máxima en dos zonas del dominio, la zona de Castejón (b) y la de Boquiñeni y Pradilla de Ebro (a). Se muestra la topografía y el valor de calado en $t = 110$ horas para T500. Asimismo, se presenta en la Figura E.26 la evolución temporal de la lámina de agua desde el inicio de la simulación hasta el instante donde esta es máxima.

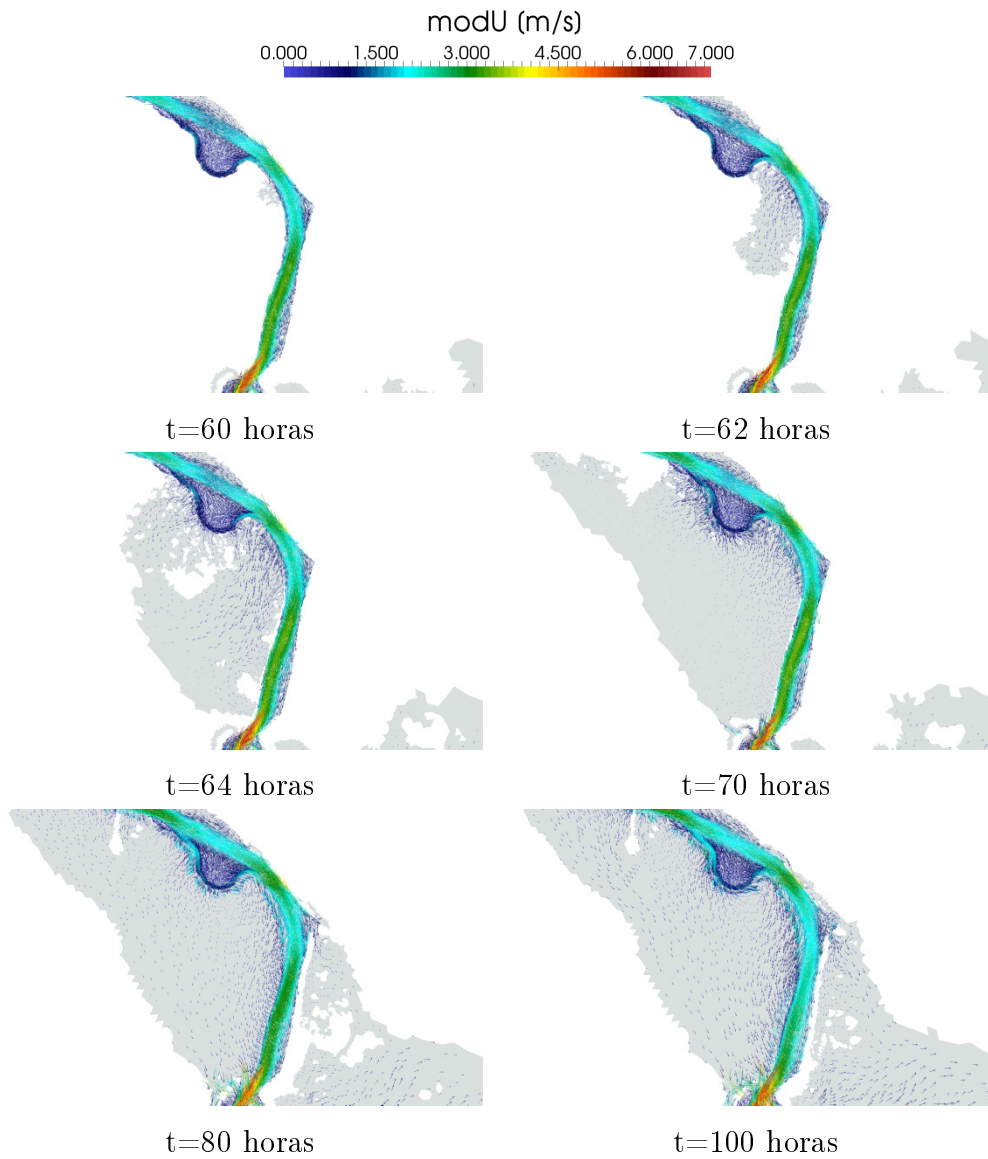


Figura E.31: Evolución del desbordamiento de una mota entre Tudela y Fontellas en términos de módulo y vectores velocidad para T500.

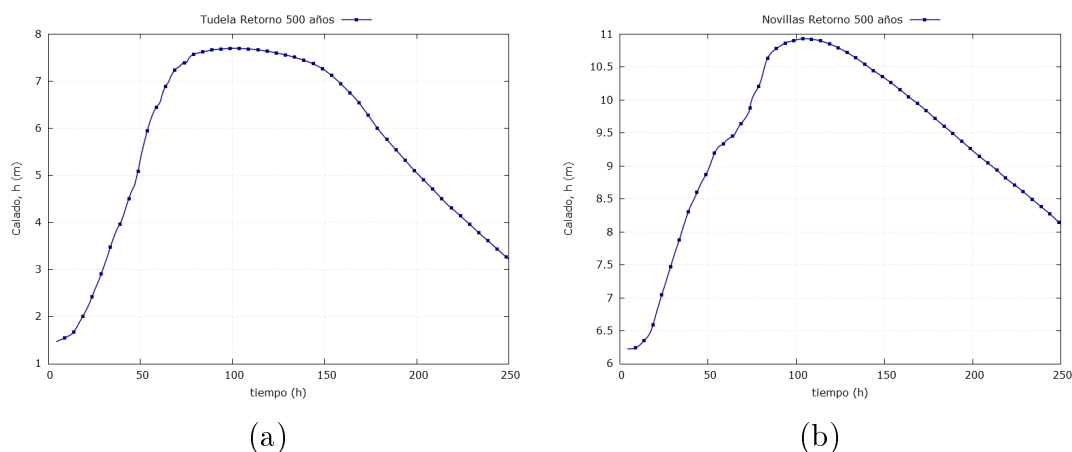


Figura E.32: Evolución temporal del calado en Tudela (a) y en Novillas (b) para T500.

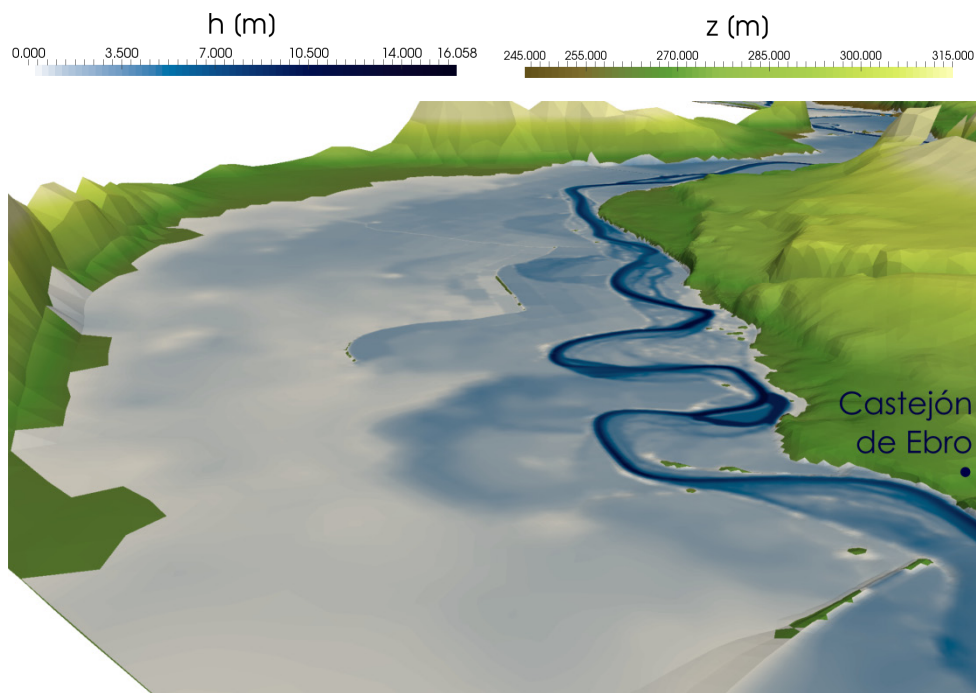
Analizando la Figura E.32 y comparándola con las de las crecidas anteriores, vemos cómo para mayores caudales no aumenta únicamente la extensión de la lámina de agua, sino que también el calado, llegando a haber un metro y medio de diferencia en la población de Novillas entre T5 y T500. Asimismo, esta magnitud no sólo aumenta en la zona del cauce, como vemos en la información obtenida por las sondas, sino que igualmente se incrementa en los campos que quedan anegados en la llanura de inundación, como se puede notar al comparar la escala de color entre las Figuras E.5 y E.29, por ejemplo.

E.1.5. Resumen de resultados

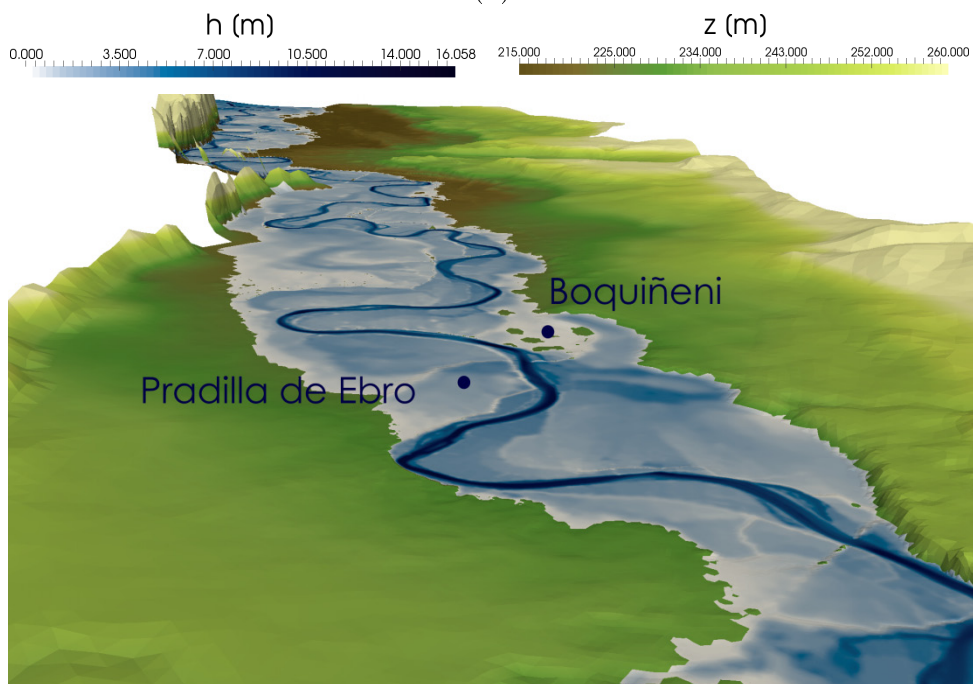
En la Figura E.35 se observa la evolución temporal del área de inundación para cada periodo de retorno. Como era de esperar, a mayor periodo de retorno, con mayor pico de caudal, se observan valores más altos de áreas de inundación. A su vez, si se observa la escala de colores del calado, h , en las Figuras E.5, E.13, E.21 y E.29, se puede notar cómo este valor aumenta progresivamente para periodos de retorno más altos, pues sus hidrogramas conllevan volúmenes de agua mayores.

El hecho de que estos hidrogramas de diseño tengan el pico situado en el mismo tiempo pero diferente caudal máximo causa, para cualquier instante de tiempo, la entrada de más caudal a periodo de retorno más alto. Esto provoca que en muchas situaciones no solo desborde más agua, sino que lo hace antes. Esto se observa comparando las Figuras E.7, E.15, E.23 y E.31, donde se ve que el agua sobrepasa la mota para instantes anteriores a medida que los hidrogramas corresponden a periodos de retorno más altos.

Puesto que existe un salto significativo en términos de área y en términos de pro-



(a)



(b)

Figura E.33: Imagen tridimensional cota de terreno y calado en Castejón (b) y en Pradilla de Ebro (a) para T500 en $t=110$ horas.

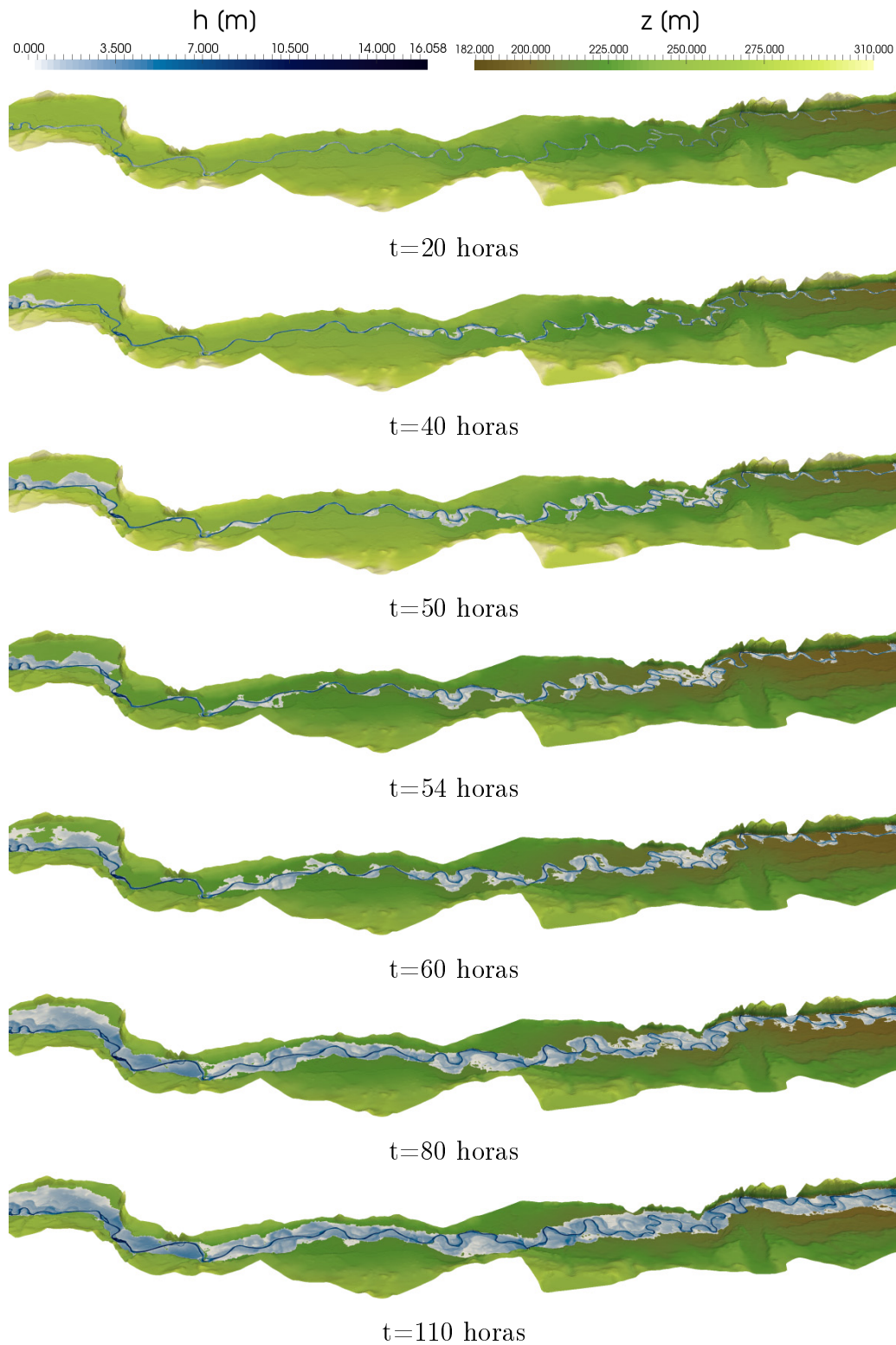


Figura E.34: Mapas de área inundada en diferentes instantes de tiempo en el tramo Castejón-Zaragoza para T500.

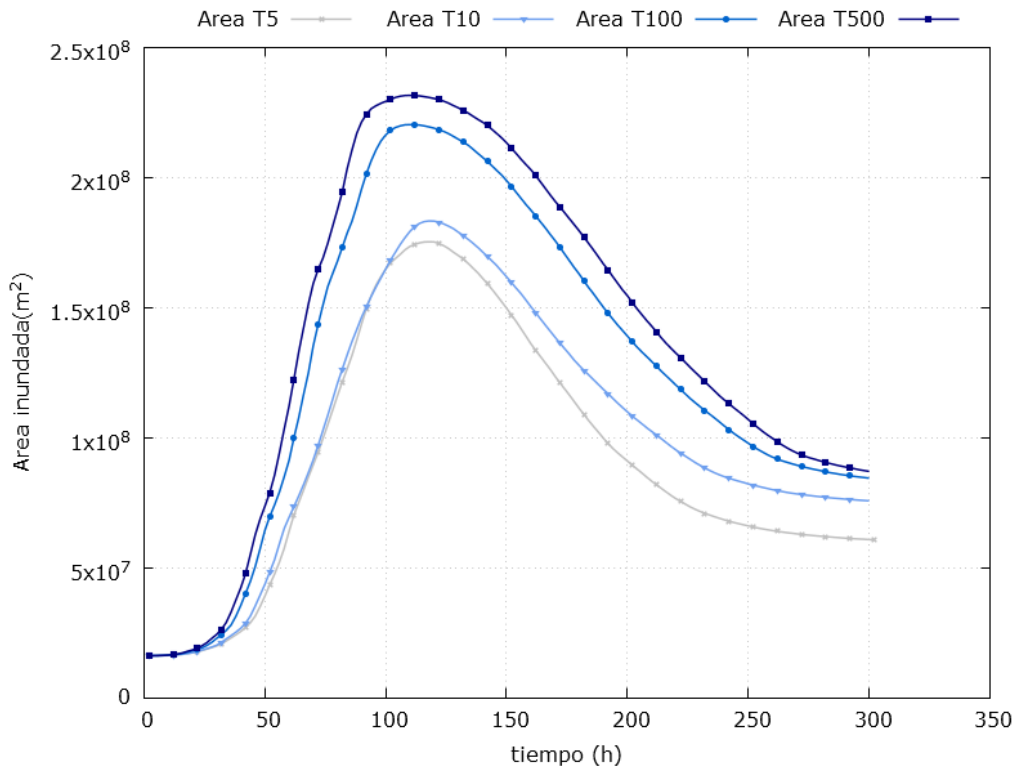


Figura E.35: Evolución de las áreas inundadas en el tiempo para periodos de retorno $T=5$, 10, 100 y 500 años.

babilidad a partir de $T10$, las medidas de mitigación que se van a estudiar se centrarán en el periodo de retorno de 10 años, que es el más catastrófico dentro de los más probables.

E.2. Avenidas ocurridas en el Ebro en 2003, 2013 y 2015

En el presente estudio se han analizado las avenidas que se dieron en 2003, 2013 y 2015. Los hidrogramas de las simulaciones de este apartado se han obtenido a partir de medidas tomadas en el Ebro durante diferentes eventos.

E.2.1. Avenida de 2003

En la Tabla E.5 se muestran los datos más relevantes de la avenida de 2003 y de la simulación realizada. Además, en la Figura E.36 se representa el hidrograma a la entrada del dominio, que ya no es uniforme como eran los hidrogramas correspondientes a los periodos de retorno.

Avenida de 2003	
Caudal inicial [m^3/s]	Caudal pico [m^3/s]
796	2753
Duración de avenida [h]	Tiempo de simulación [h]
263.75	9.47

Tabla E.5: Datos característicos de la avenida correspondiente a la avenida ocurrida en 2003 y datos de la simulación realizada.

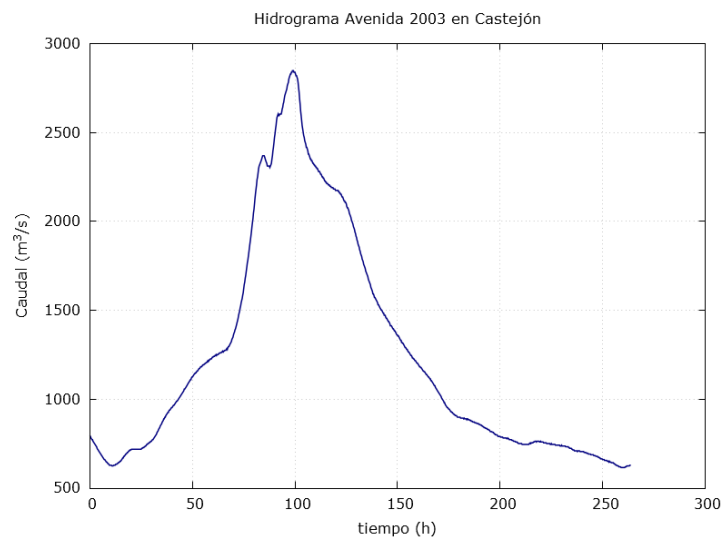


Figura E.36: Hidrograma de entrada correspondiente a la avenida de 2003 en Castejón.



Figura E.37: Visión general de la extensión de la lámina de inundación para la avenida de 2003 en $t=126$ h.

A continuación se muestran los resultados obtenidos tras la simulación del evento.

Las Figuras E.37 y E.38 muestran las áreas máximas inundadas, correspondientes con $t=126$ horas para este caso.

La Figura E.39 muestra la evolución temporal tanto del módulo de la velocidad como de los vectores en la zona de Alagón para la crecida de 2003. En ella se observa cómo en el primer instante de la simulación ya se han producido pequeños encharcamientos de algunas zonas cercanas, debido al alto valor del caudal estacionario del que se parte (ver E.36), $796 \text{ m}^2/\text{s}$. Se observa cómo la velocidad parte de poco más de 2 m/s en algunas zonas para $t=0$ horas, hasta 3.8 m/s en $t=126$ horas.

La imagen E.40 muestra una vista tridimensional de dos lugares del dominio (Pradilla de Ebro (a) y Castejón (b)) donde se representa sobre la topografía el calado de la lámina de inundación para $t=126$ horas, instante de máxima inundación. A su vez se presenta en la Figura E.41 la evolución temporal de la lámina de inundación.

En la Figura E.41 se observa la evolución del área inundada desde los primeros instantes de tiempo ($t=20$ horas) hasta el estado donde el área de inundación es máxima,

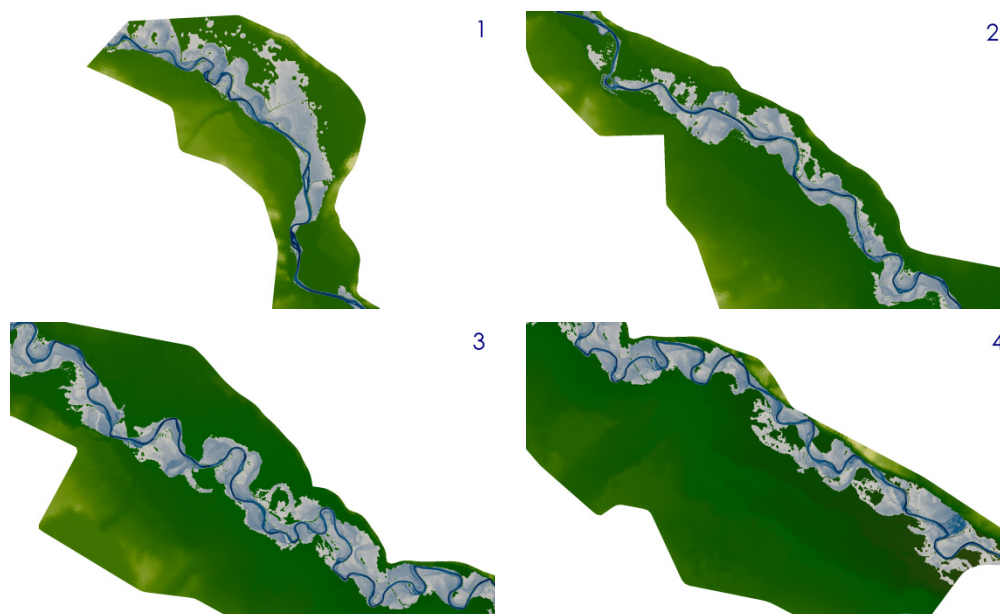


Figura E.38: Visión local de la extensión de la lámina de inundación superpuesta con la medida sobre el terreno en el tramo entre Castejón y Zaragoza, para la avenida de 2003. La escala es la misma que en la Figura E.37.

en $t=126$ horas. Nótese que el hidrograma de entrada (ver Figura E.36) tiene un mínimo que hace que a las 40 horas de avenida, aproximadamente, se alcance el mismo valor que en el instante inicial, y provoca que la mancha de inundación de los instantes $t=20$ horas y $t=40$ horas sea muy similar.

E.2.2. Avenida de 2013

En la Tabla E.6 se muestran los datos más relevantes de la avenida de 2013 y de la simulación realizada. Además, en la Figura E.42 se representa el hidrograma a la entrada del dominio, que ya no es uniforme como eran los de retorno.

Avenida de 2013	
Caudal inicial [m^3/s]	Caudal pico [m^3/s]
126	2186
Duración de avenida [h]	Tiempo de simulación [h]
239.75	8.34

Tabla E.6: Datos característicos de la avenida correspondiente la avenida ocurrida en 2013 y datos de la simulación realizada.

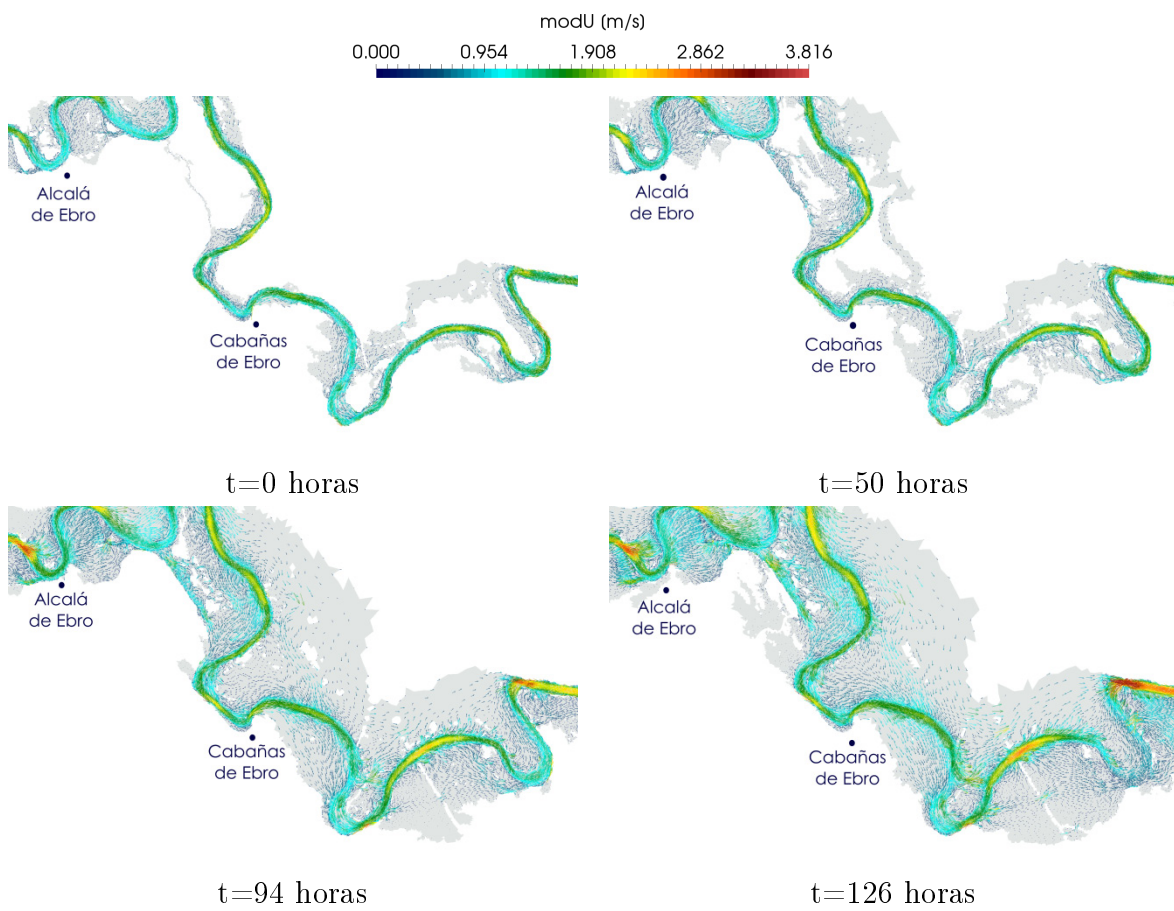
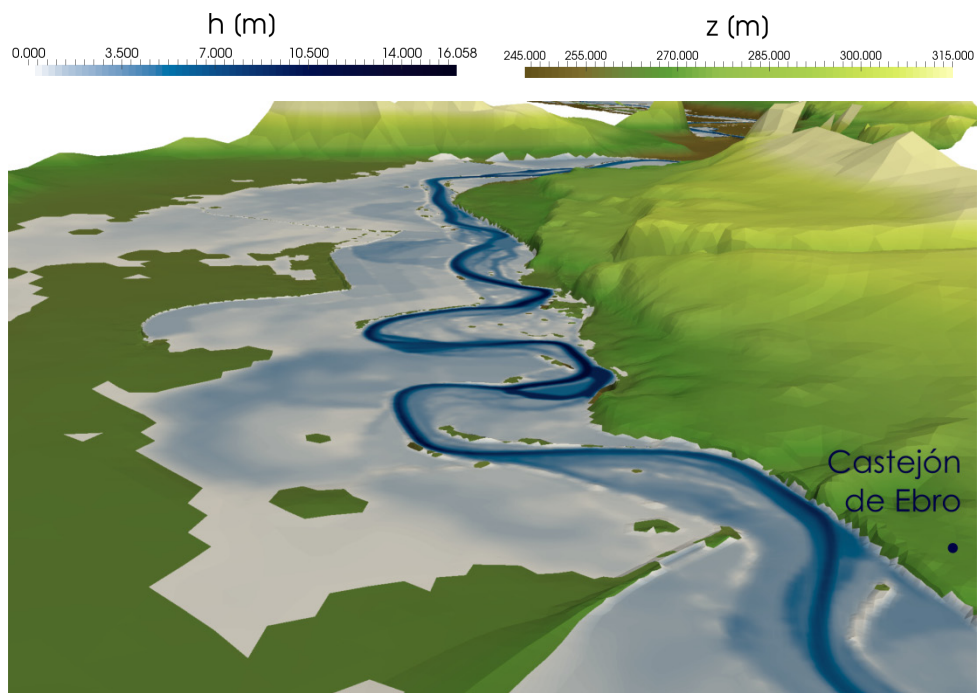
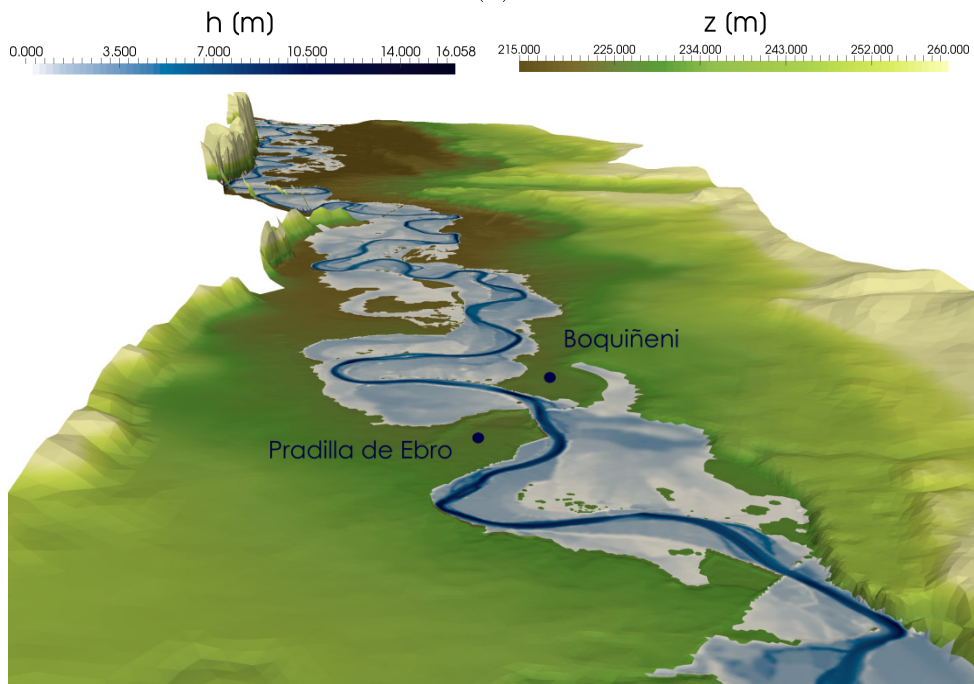


Figura E.39: Evolución temporal de la velocidad tanto en módulo como en vectores para la avenida de 2003.



(a)



(b)

Figura E.40: Imagen tridimensional del pico de inundación a la altura de Castejón (a) y a su paso por Pradilla de Ebro (b) para la avenida de 2003.

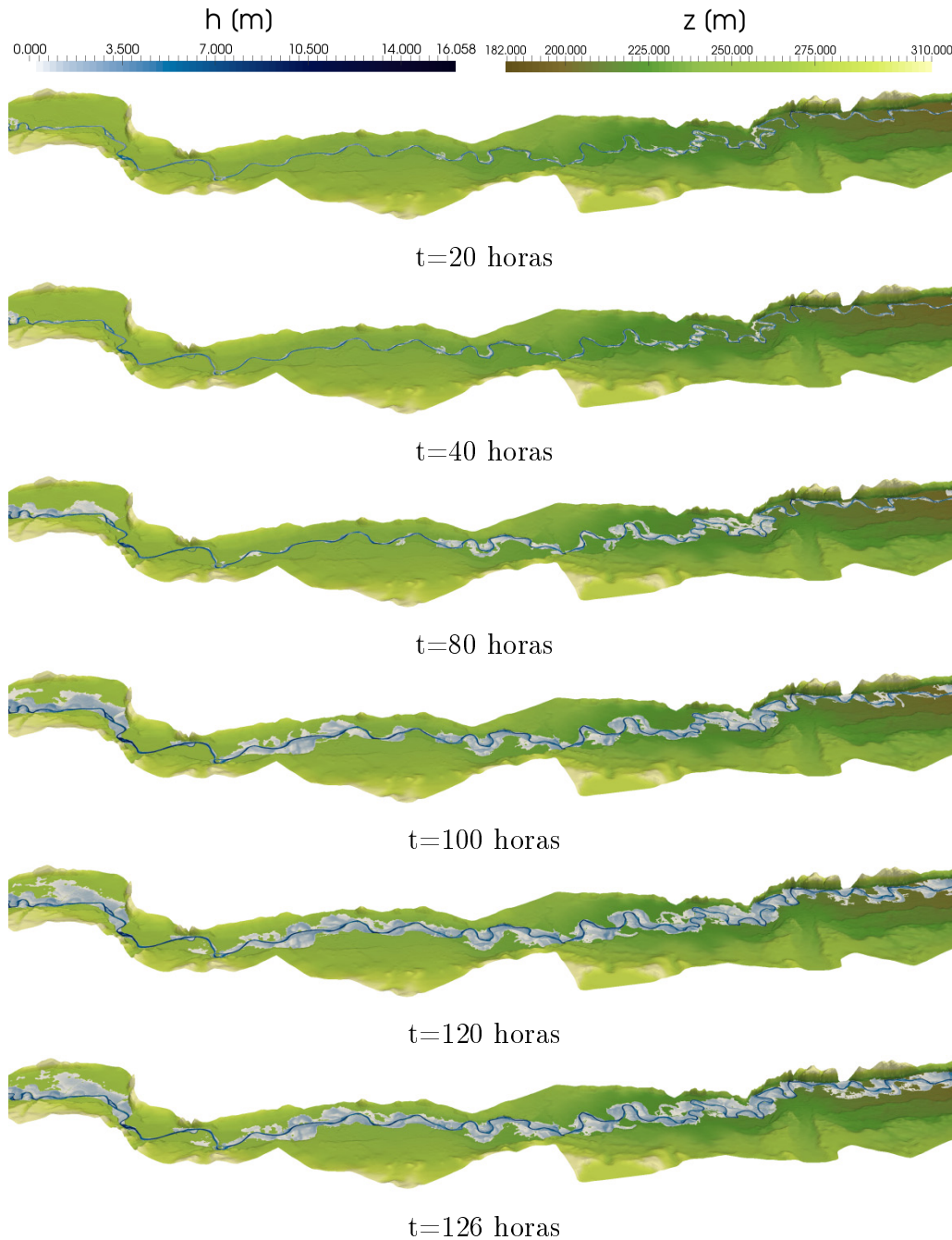


Figura E.41: Mapas de área inundada en diferentes instantes de tiempo en el tramo Castejón-Zaragoza para avenida de 2003.

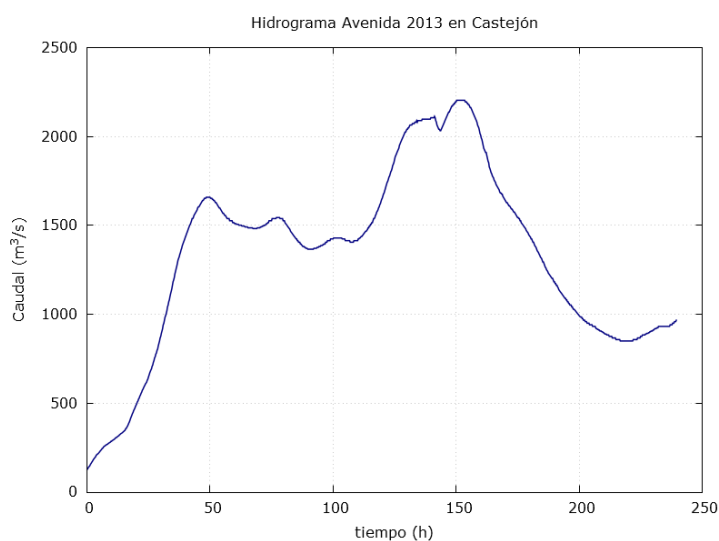


Figura E.42: Hidrograma de entrada correspondiente a la avenida de 2013 en Castejón.

A continuación se muestran los resultados obtenidos tras la simulación del evento.

En las Figuras E.43 y E.44 se observan las áreas máximas inundadas para la crecida de 2013, en $t=168$ horas.

En la Figura E.45 está representada la evolución temporal de las líneas de nivel del módulo de la velocidad y los vectores de esta en la zona Alcalá de Ebro y Luceni. Se observa cómo en meandros muy cerrados el flujo circula de un lado a otro del mismo completamente transversal al cauce atravesando la llanura de inundación conforme aumenta el tiempo (y por tanto el caudal).

En la Figura E.46 se puede observar la evolución temporal del calado en puntos concretos del cauce. En el estudio de avenidas reales interesa mucho la colocación de dichos puntos en estaciones de aforo, ya que así es posible comparar con medidas tomadas en las mismas. Para las avenidas reales, con hidrogramas irregulares, la variación temporal del calado tampoco lleva una tendencia clara de subida al principio y bajada al final.

Finalmente, se muestran imágenes tridimensionales que ayudan a visualizar el estado de las zonas inundadas, tanto de manera estática, es decir, en un tramo concreto en un instante de tiempo, como se observa en la Figura E.47, o dinámicamente, tratando de ver la evolución de la avenida en todo el dominio, como en las imágenes de la Figura E.48.

En la Figura E.48 se observa la evolución del área inundada desde los primeros instantes de tiempo ($t=20$ horas) hasta el estado donde el área de inundación es máxima,



Figura E.43: Visión general de la extensión de la lámina de inundación para la avenida de 2013 en $t=168$ h.

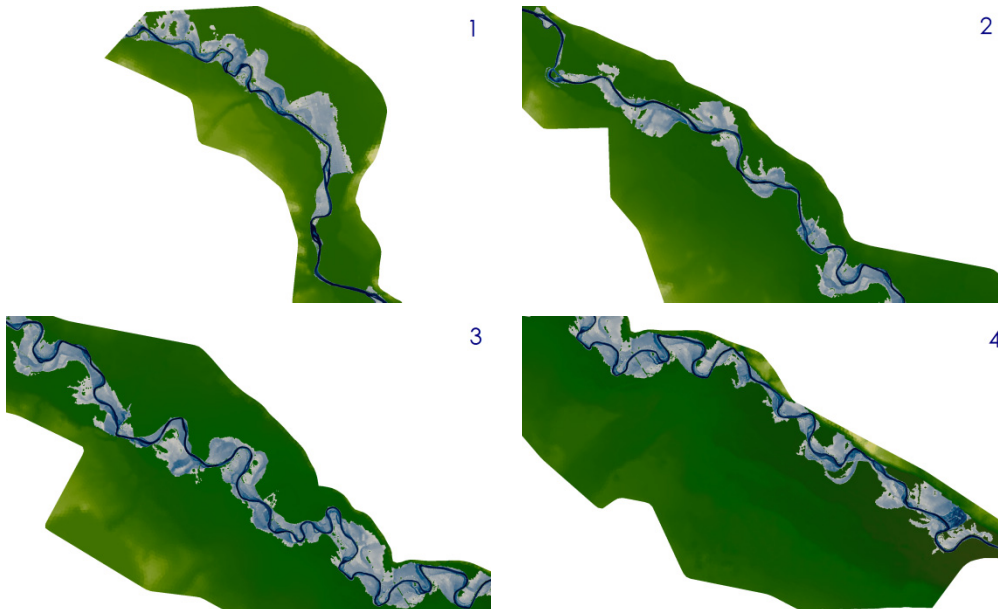


Figura E.44: Visión local de la extensión de la lámina de inundación para la avenida de 2013. La escala es la misma que en la Figura E.43.

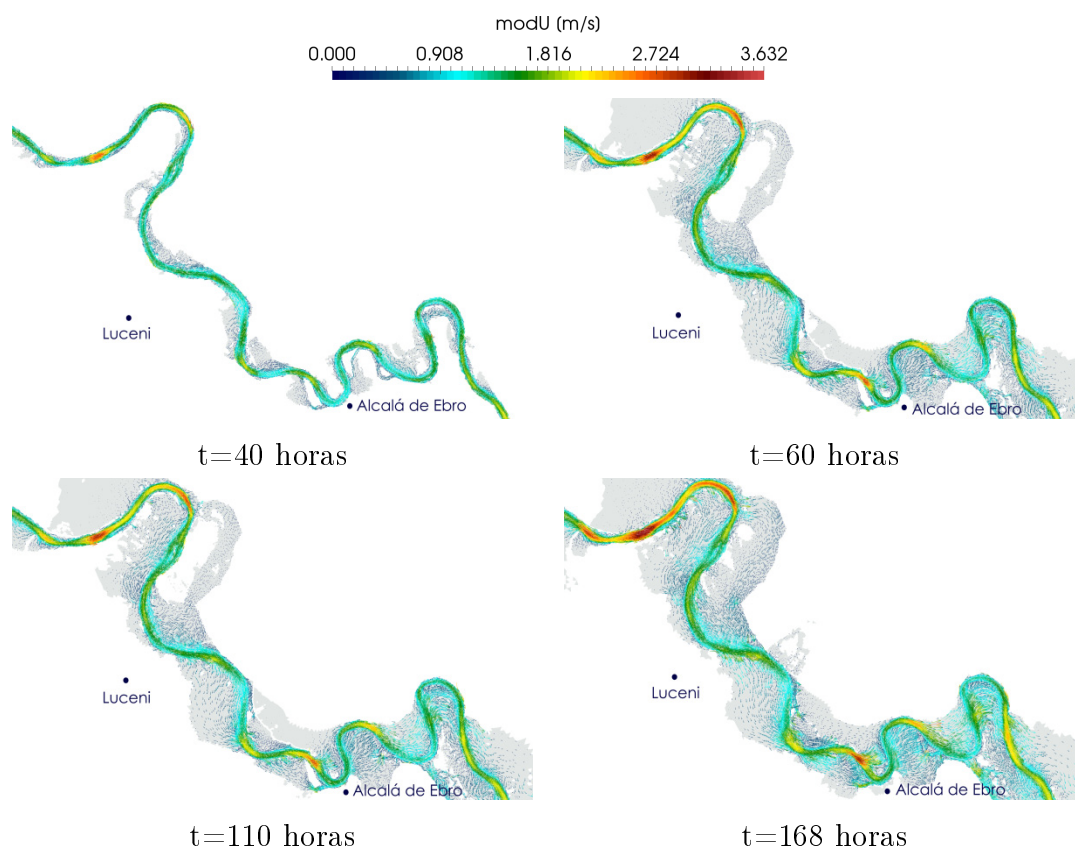


Figura E.45: Evolución temporal de la velocidad tanto en módulo como en vectores para la avenida de 2013.

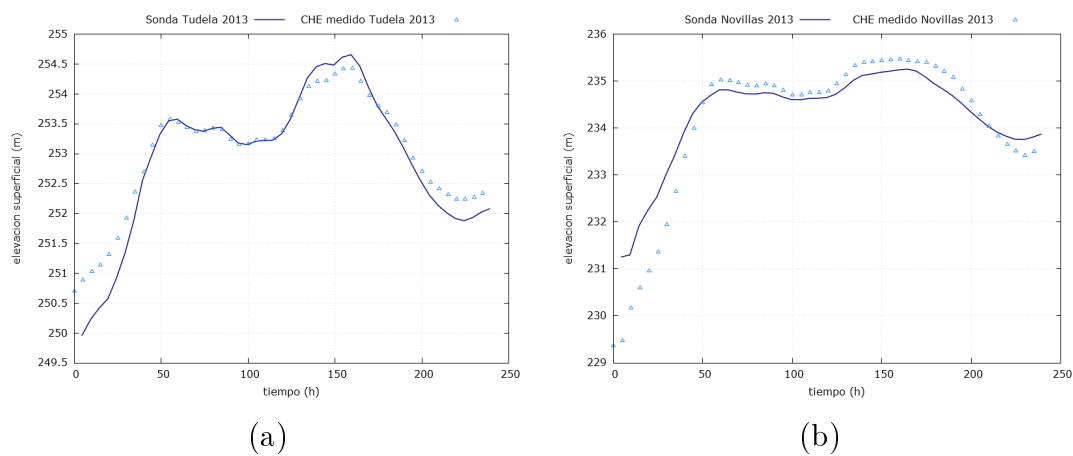
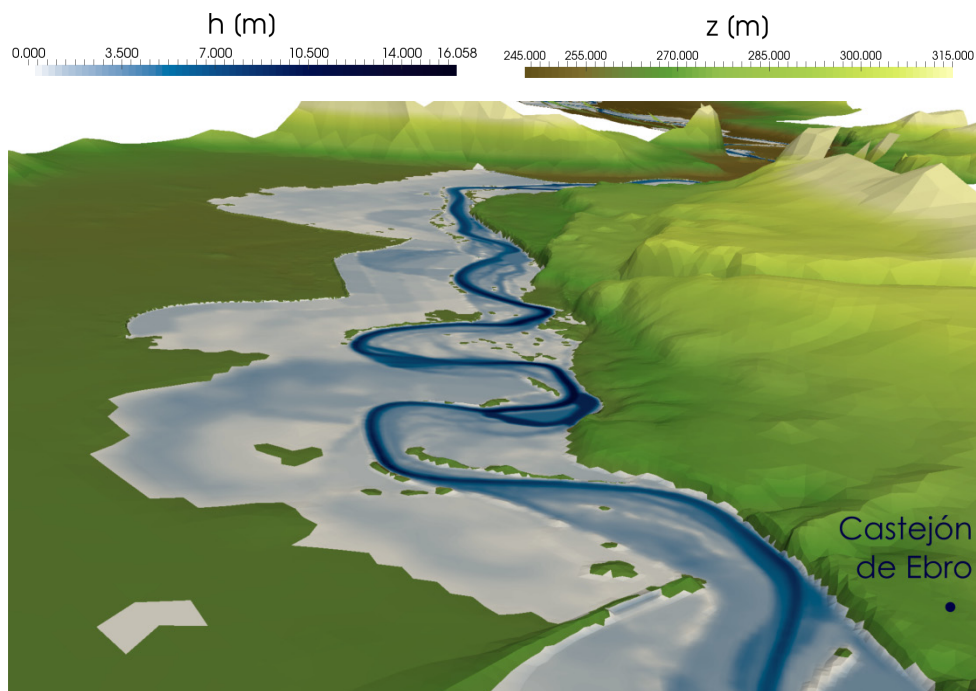
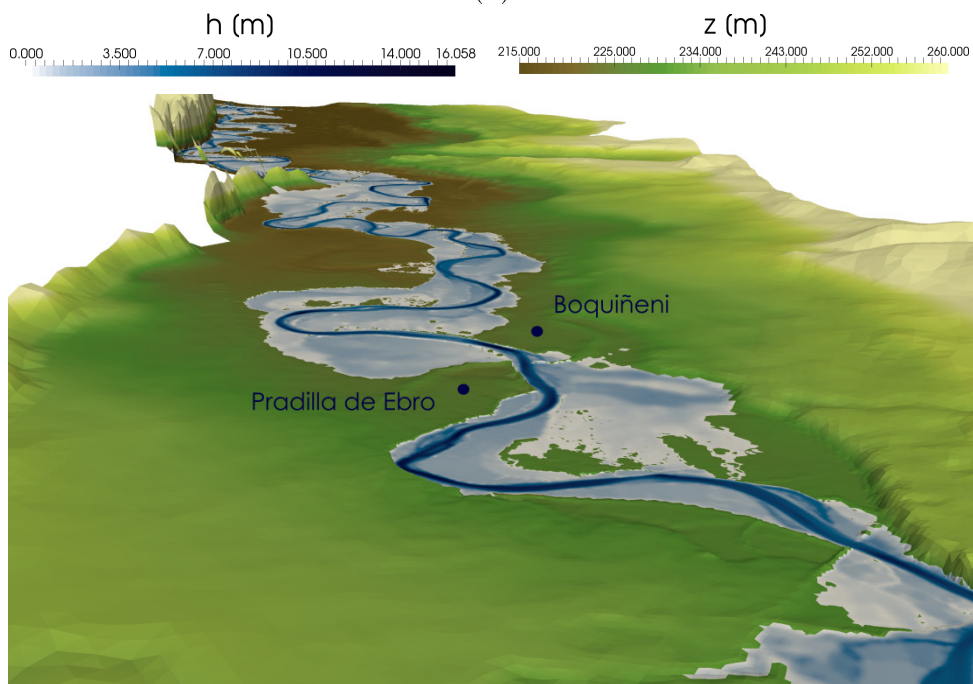


Figura E.46: Evolución temporal del calado en Tudela (a) y en Novillas (b).



(a)



(b)

Figura E.47: Imagen tridimensional del pico de inundación a la altura de Castejón (a) y a su paso por Pradilla de Ebro (b) para la avenida de 2013.

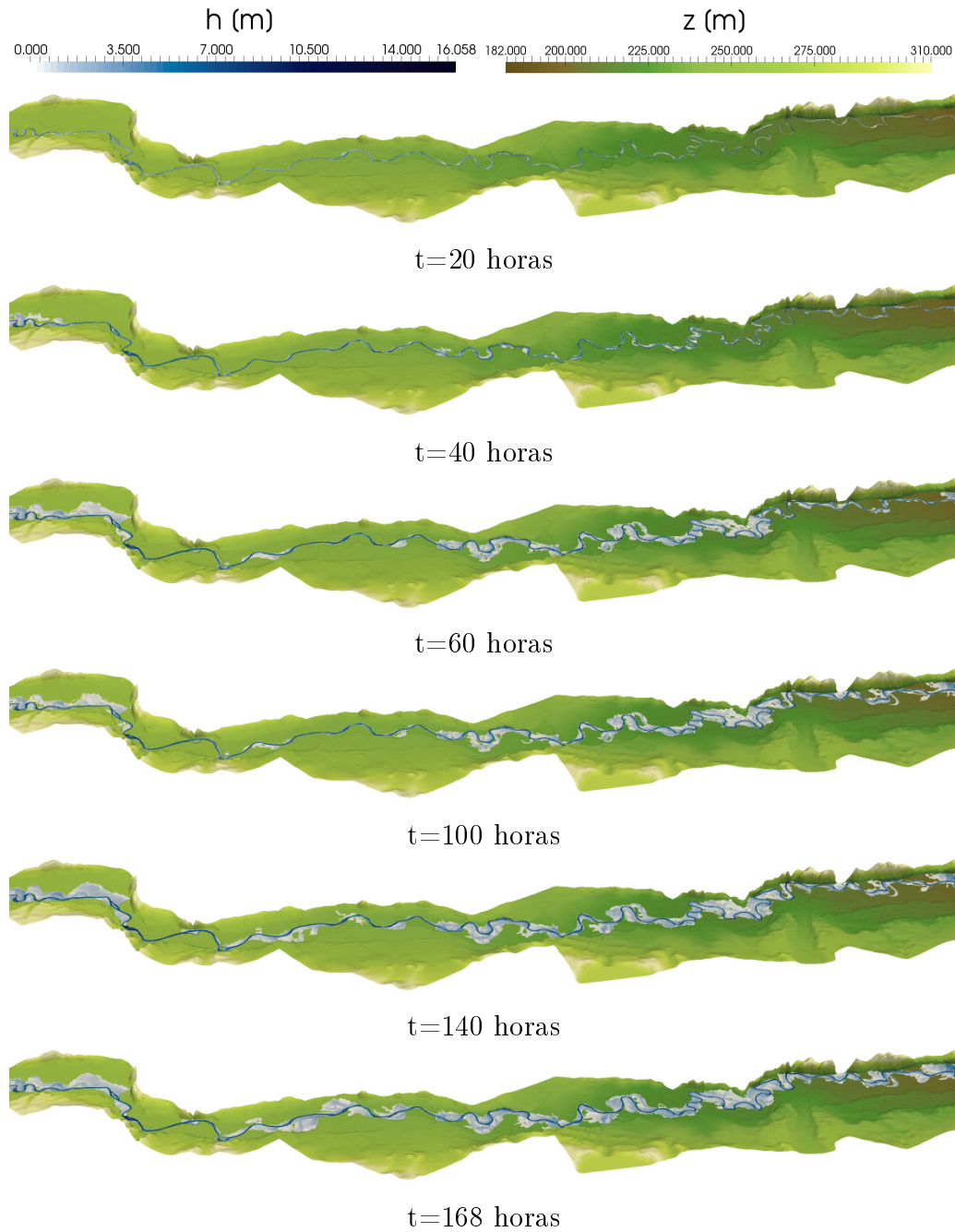


Figura E.48: Mapas de área inundada en diferentes instantes de tiempo en el tramo Castejón-Zaragoza para avenida de 2013.

en $t=168$ horas. Es importante notar que el aumento del área de inundación ya no es tan lineal como era para las avenidas de diseño o incluso para 2003, que tenía un hidrograma más o menos regular. Si se observa la Figura E.42 se ve que en 2013 hay un máximo local para $t=50$ horas, aproximadamente, y a partir de ahí el caudal de entrada incluso decrece, lo que provoca que la mancha de inundación no vaya en aumento durante ese periodo de tiempo, hasta que se acerca al segundo pico, que es el máximo.

E.2.3. Avenida de 2015

En la Tabla E.7 se muestran los datos más relevantes de la avenida de 2015 y de la simulación realizada. Además, en la Figura E.49 se representa el hidrograma a la entrada del dominio, que ya no es uniforme como eran los de retorno.

Avenida de 2015	
Caudal inicial [m^3/s]	Caudal pico [m^3/s]
473	2691
Duración de avenida [h]	Tiempo de simulación [h]
503.75	17.002

Tabla E.7: Datos característicos de la avenida correspondiente la avenida ocurrida en 2015 y datos de la simulación realizada.

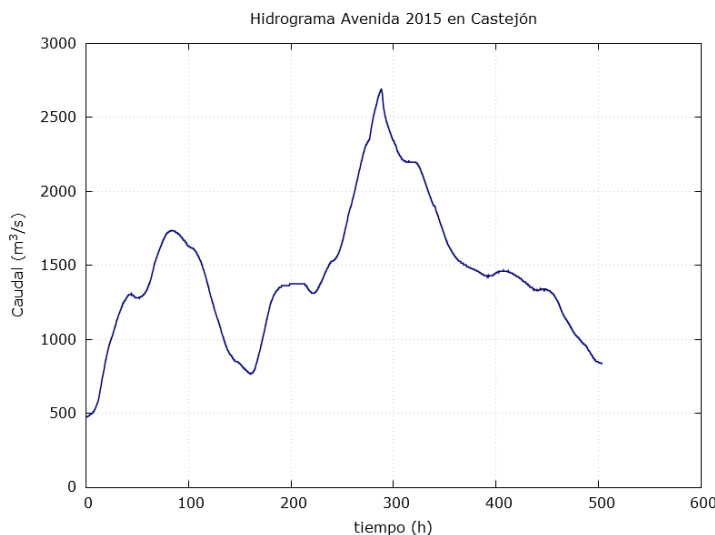


Figura E.49: Hidrograma de entrada correspondiente a la avenida de 2015 en Castejón.

A continuación se muestran los resultados obtenidos tras la simulación del evento.



Figura E.50: Visión general de la extensión de la lámina de inundación para la avenida de 2015.

Las Figuras E.50 y E.51 muestran las áreas máximas inundadas correspondientes con $t=314$ horas para este caso.

En la Figura E.52 se muestra la variación de los mapas de vectores de velocidad a lo largo del tiempo. Se observa cómo en el instante $t=160$ horas los campos cercanos están menos inundados que en instantes anteriores, esto se debe a la forma del hidrograma, que consta de dos picos diferenciados (ver Figura E.49).

En la Figura E.53 se puede observar la evolución temporal del calado en puntos concretos del cauce.

Finalmente, se muestran imágenes tridimensionales que ayudan a visualizar el estado de las zonas inundadas, tanto de manera estática, es decir, en un tramo concreto en un instante de tiempo, como se observa en la Figura E.54, o dinámicamente, tratando de ver la evolución de la avenida en todo el dominio, como en las imágenes de la Figura E.55.

En la Figura E.55 se observa la evolución del área inundada desde los primeros instantes de tiempo ($t=20$ horas) hasta alcanzar el área de inundación máxima, en $t=314$ horas. Del mismo modo que para la avenida de 2013, se observa que la evolución del área de inundación es consecuencia de la forma del hidrograma, que en este caso tiene dos

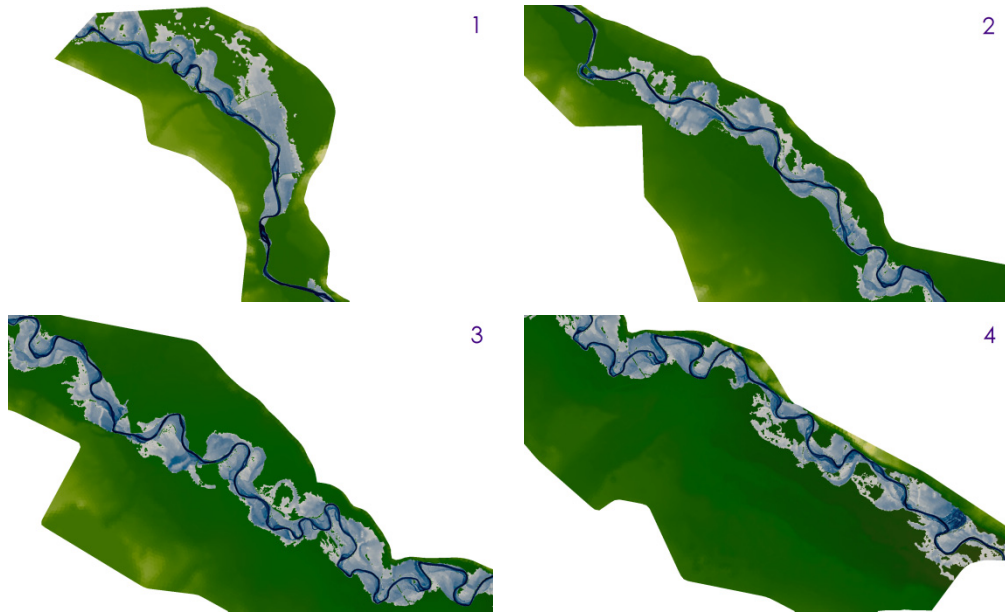


Figura E.51: Visión local de la extensión de la lámina de inundación en el tramo entre Castejón y Zaragoza, para la avenida de 2015. La escala es la misma que en la Figura E.50.

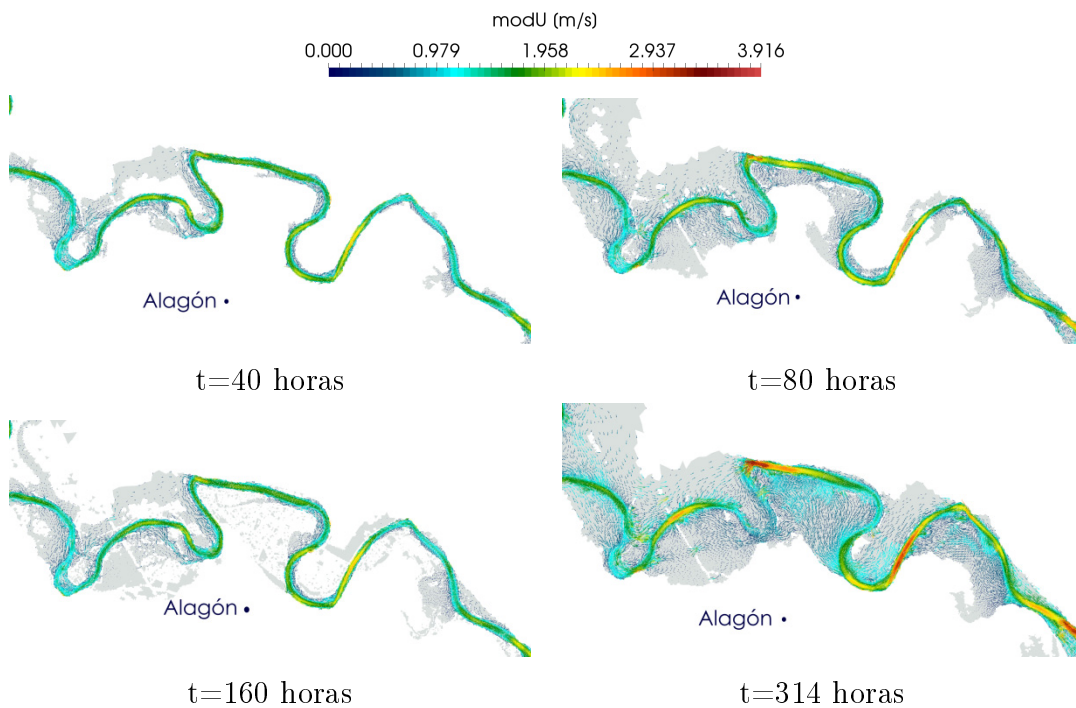


Figura E.52: Evolución temporal de la velocidad tanto en módulo como en vectores para la avenida de 2015.

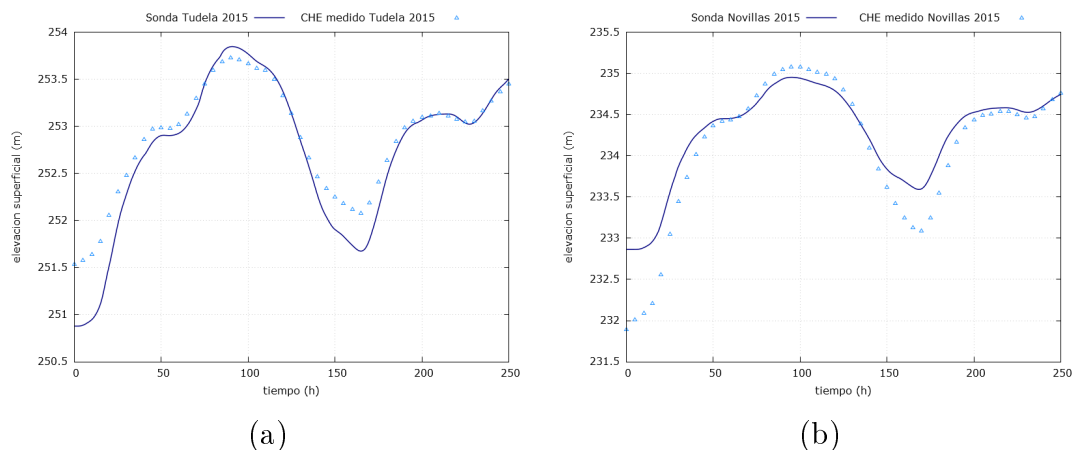


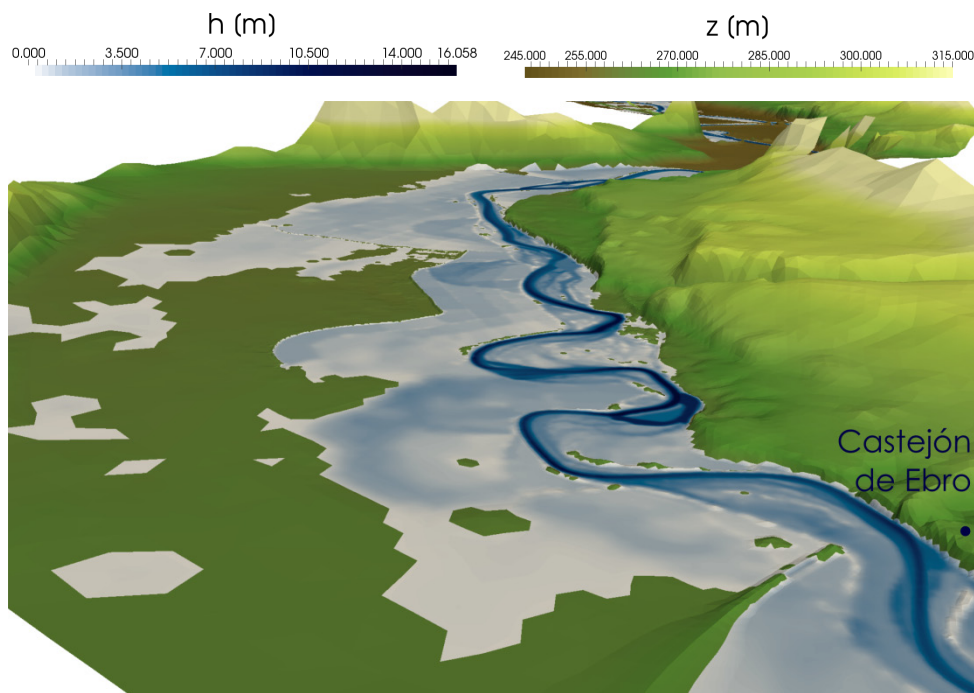
Figura E.53: Evolución temporal del calado en Tudela (a) y en Novillas (b) para periodo de retorno de 500 años.

máximos marcados y un descenso significativo de caudal entre ellos. Esto produce una mancha de inundación menor para $t=180$ horas que para $t=80$ horas. Posteriormente, alrededor de $t=280$ horas el pico de caudal entra por Castejón y provoca que en $t=314$ horas la mancha de inundación sea máxima.

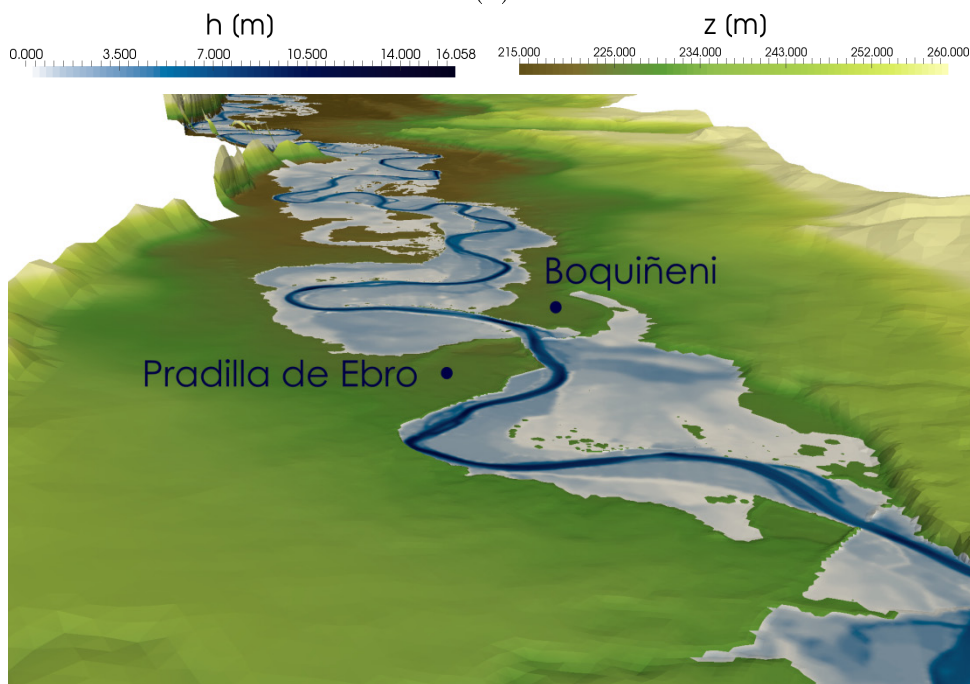
E.3. Resultados numéricos del análisis de posibles soluciones de mitigación

Tras el análisis de avenidas sucedidas en el Ebro y de avenidas de diseño correspondientes a periodos de retorno, se obtiene una visión general sobre las zonas que suelen inundarse y con qué frecuencia. A partir de aquí, se van a exponer las diferentes medidas de mitigación de efectos de las inundaciones que se han llevado a cabo y los resultados obtenidos.

Para la realización de las pruebas de mitigación se han escogido dos avenidas importantes: la correspondiente al periodo de retorno de 10 años y la avenida ocurrida en 2015. De todas las avenidas reales simuladas, ninguna supera en caudal a la que corresponde al periodo de retorno de 10 años. A pesar de no ser muy frecuente a corto plazo, este evento (T10) se considera de probabilidad de ocurrencia alta y sus consecuencias son lo suficientemente catastróficas como para requerir un estudio de mitigación. A su vez, el estudio de avenidas históricas recientes como la de 2015 resulta de utilidad para probar el efecto de medidas llevadas a cabo y poder comparar.



(a)



(b)

Figura E.54: Imagen tridimensional del pico de inundación a la altura de Castejón (a) y a su paso por Pradilla de Ebro (b) para la avenida de 2015.

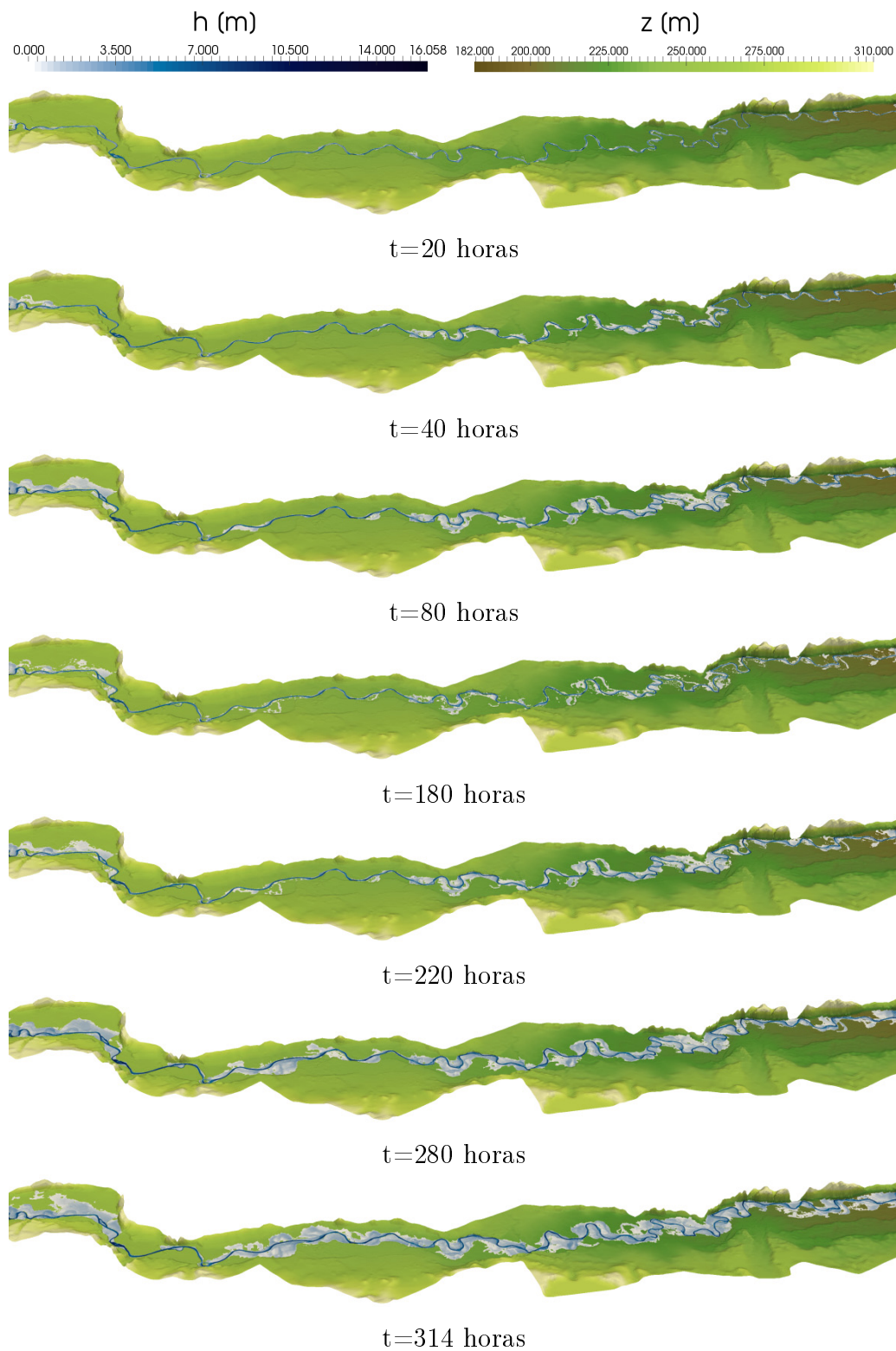


Figura E.55: Mapas de área inundada en diferentes instantes de tiempo en el tramo Castejón-Zaragoza para avenida de 2015.

En general existen múltiples opciones a la hora de estudiar medidas para la mitigación de los efectos de una inundación. En este trabajo se han estudiado 3 tipos distintos:

- **Limpieza de la vegetación del río:** a lo largo de los años el río acumula cada vez más vegetación y, a efectos hidráulicos, se traduce en un aumento del número de Manning, n , que cuantifica la pérdida de energía del flujo por rozamiento. Se van a proponer situaciones en las que se modifica el coeficiente de rozamiento y se simula con el mismo hidrograma de entrada.
- **Zonas de inundación controlada:** se estudiará el vaciado/llenado de unas zonas propuestas por CHE delimitadas por motas. Estas áreas almacenan el flujo de la avenida y disminuyen el volumen de agua que es transportado aguas abajo de manera que el efecto de la crecida es menos devastador.
- **Protección de zonas:** se estudiará la viabilidad de proteger zonas que bajo ningún concepto deben inundarse con la ayuda de motas y el efecto que ello puede tener en el resto de cauce, principalmente aguas abajo.

A continuación se exponen los cambios realizados en la malla o mapa de rozamientos para estos estudios y los resultados obtenidos.

E.3.1. Limpieza de la vegetación en el cauce

En las simulaciones previas el río ha tenido asignado un número de Manning de 0.035, correspondiente a un cauce con abundante vegetación (ver Tabla D.1, en el Anexo D). En este apartado se proponen escenarios con un número de Manning menor que el hasta ahora utilizado en el cauce, caracterizando supuestas situaciones de limpieza de la vegetación. Adicionalmente, se simula un caso en el que no se toma ninguna medida y la vegetación sigue en aumento, utilizando un Manning mayor que 0.035. En la Tabla E.8 se muestran todos los números de Manning utilizados para el cauce y su referencia. El resto de valores de n (orillas y llanuras) se mantienen como en las simulaciones previas.

Estos escenarios de limpieza se van a estudiar con la avenida de 2015 y T10. La malla utilizada tiene las mismas elevaciones que la anterior, aunque distinto número de Manning en el cauce. En la Figura E.56 se pueden ver los mapas de rozamiento de las nuevas simulaciones. Se aprecia que los coeficientes n del resto de zonas del dominio de cálculo no han cambiado su valor de rozamiento.

A continuación se exponen los resultados de la simulación de las avenidas T10 y 2015 obtenidos tras la aplicación de la medida de limpieza de la vegetación. Comparados con

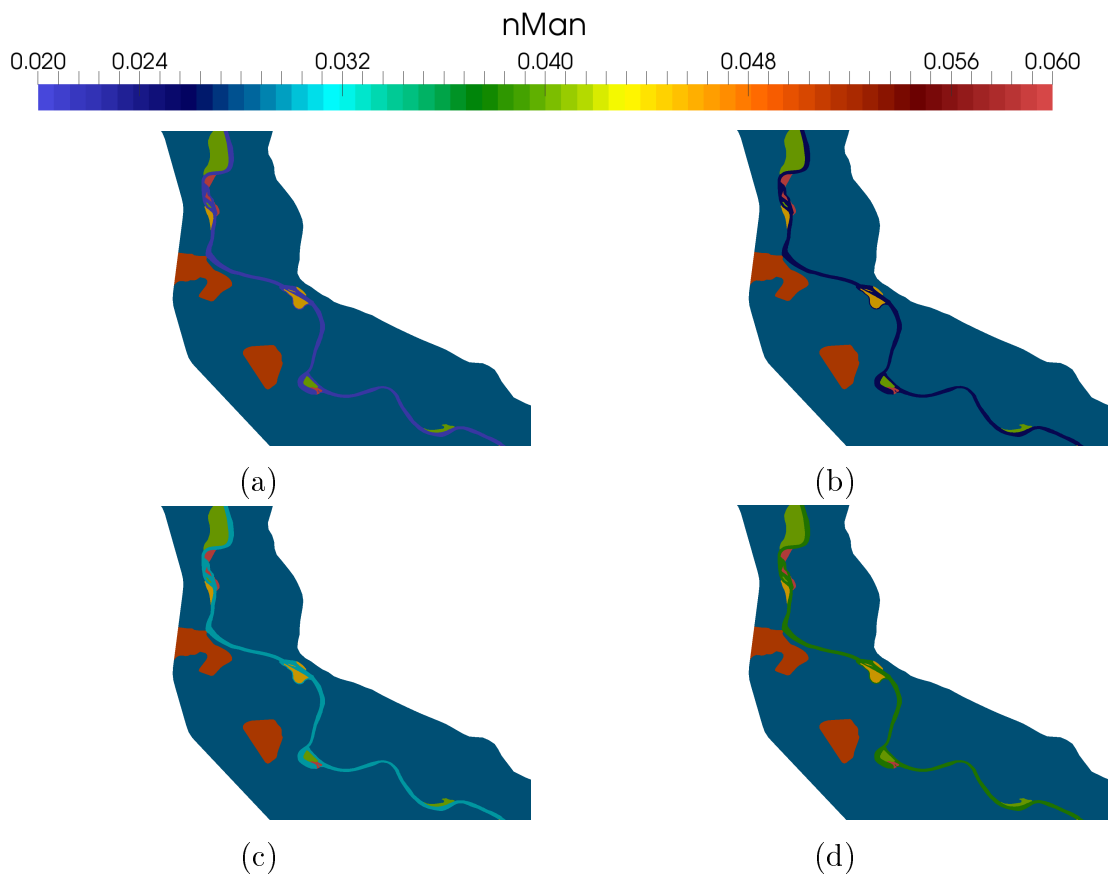


Figura E.56: Mapas de rozamiento de un tramo cerca de Tudela. La imagen (a) corresponde $n=0.02$ en el cauce. (b), (c) y (d) corresponden a 0.025, 0.03 y 0.038 respectivamente.

Descripción fondo cauce	n Manning	Referencia
Cauce sin vegetación	0.02	Brisbane City Council [17]
Cauce con poca vegetación	0.025	Chow [9]
Cauce con algunas piedras y pocas plantas	0.03	Chow [9]
Cauce original	0.035	Arcement y Schneider [1]
Cauce son mucha vehetación	0.038	Palmeri et al. [16]

Tabla E.8: Coeficiente de rozamiento y referencia designadas al cauce para distintas simulaciones de mitigación.

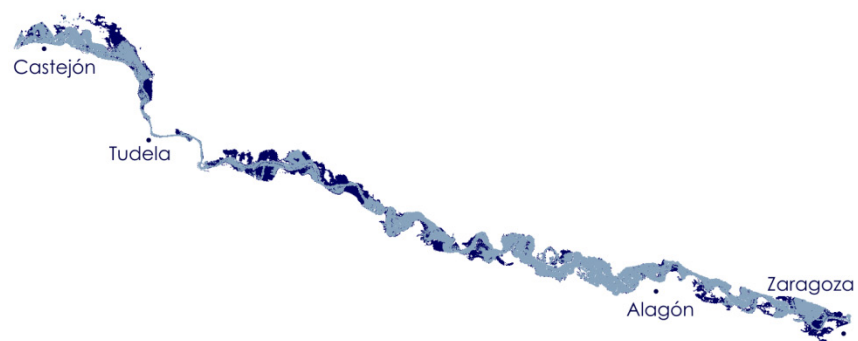
los simulados anteriormente se pueden apreciar los efectos que provoca su aplicación.

E.3.1.1. Efecto de la limpieza de la vegetación en el cauce: Avenida de 2015

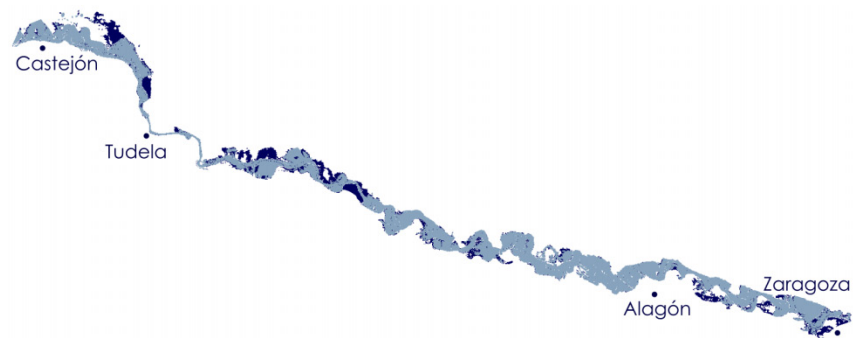
Tras simular la avenida de 2015, sobre el mismo terreno pero con distintos valores de rozamiento en el cauce, se han obtenido significativas diferencias en los resultados en términos de: velocidad, extensión de la lámina de inundación y calado, para un mismo instante de tiempo (el punto de máxima inundación correspondiente a $t=314$ horas). En particular, la Figura E.57 representa las diferentes lámina de agua para $t=314$ horas, correspondiente al estado de máxima inundación para el cauce original (con $n=0.035$). En las 3 primeras -(a), (b) y (c)- se presenta en oscuro la mancha con el número de Manning inicial y el azul más claro la mancha con los nuevos valores de rozamiento -0.02, 0.025 y 0.03, respectivamente-. A su vez, en la imagen (d) se muestra la comparación entre el cauce original y un cauce con excesiva vegetación ($n=0.038$), representando en azul más claro la mancha original ($n=0.035$) y en oscuro el cauce con un alto rozamiento.

Con ánimo de mostrar datos cuantitativos se enseñan en la Tabla E.9 los valores que alcanzan las áreas de las manchas de inundación para cada número de Manning en el cauce. Además, se puede leer en la última línea el valor de área que alcanzaba la avenida con el cauce original, para $n=0.035$. Obsérvese que el instante de máxima inundación no es el mismo para todos los casos, desviándose unas pocas horas. Por la irrelevante diferencia que existe entre estos instantes, se han representado todas para el mismo $t=314$ h en la Figura E.57.

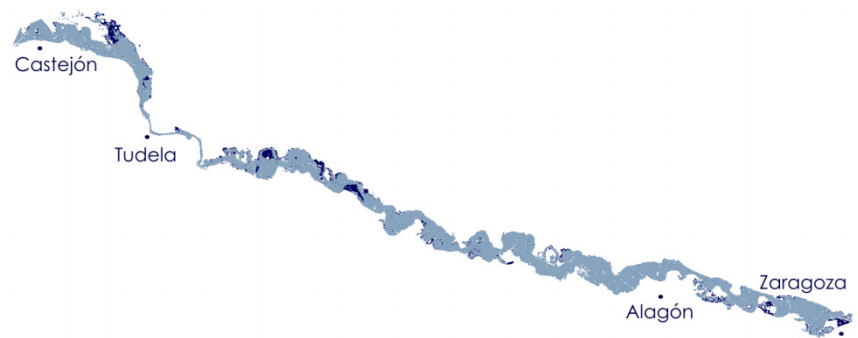
La disminución del coeficiente de rozamiento del fondo por el que circula un flujo afecta directamente a la velocidad y a la altura que alcanza el fluido, haciendo disminuir el calado como consecuencia de un aumento de la velocidad. El hecho de que h disminuya, como ya se ha visto, tiene un efecto sobre la mancha de inundación, que evidentemente



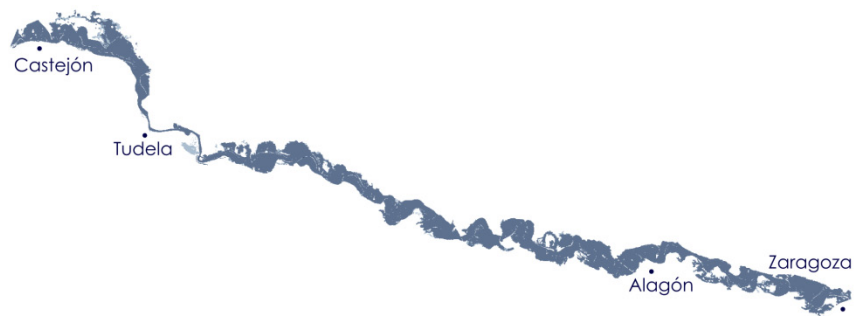
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura E.57: Comparación de manchas de inundación con diferentes coeficientes n en el cauce para la avenida de 2015. La imagen (a) compara con $n=0.02$, (b), (c) y (d) con 0.025, 0.03 y 0.038, respectivamente.

n Manning cauce	Area [m^2]	Instante [h]
0.02	107575290	302
0.025	118601594	312
0.03	133698788	314
0.038	154075321	316
0.035	146808999	314

Tabla E.9: Valor de las máximas áreas de inundación alcanzadas, el instante en el cual se producen, según el número de Manning del cauce para la avenida de 2015.

es menor al desbordar menor volumen de agua.

Para el estudio de la variación del calado, h , al cambiar el rozamiento en el cauce se repartieron 12 sondas a lo largo del dominio de cálculo. Estas 12 sondas se pueden dividir en sondas que se encuentran dentro del cauce y sondas que están en las llanuras de inundación (ver Figura E.58).

Las sondas colocadas en el cauce dan información acerca del calado en el mismo, ya que este se encuentra desde el principio con un valor de h distinto de cero. En la Figura E.59 se muestra la evolución temporal del calado en estos puntos sonda para los diferentes Manning's simulados.

Por otro lado, se han colocado sondas en las llanuras de inundación y, como se ve en la Figura E.60, proporcionan el momento en el que las llanuras comienzan a inundarse. En ella se observan claramente los dos picos que tiene el hidrograma de entrada (ver Figura E.49) y que, como consecuencia, provocan dos picos en los valores de h . En una de ellas, Sonda 3, podemos ver como el primer pico no provoca la inundación de la llanura a excepción de la simulación con $n = 0,038$. La conclusión fundamental de esto es que la no limpieza de la vegetación del río podría marcar la diferencia entre inundar y no inundar para caudales más bajos. Para caudales más altos, como es el caso del segundo pico, la inundación es inevitable pero los calados alcanzados son menores cuanto menor es el número de Manning. En cuanto a los tiempos de llegada de los picos, se puede notar que valores de n más bajos retrasan la inundación y aceleran el secado de la zona; es decir, esta se encuentra menos tiempo cubierta por un gran volumen de agua. En algunas ocasiones, algunas zonas se inundan y el agua no tiene la manera de volver al cauce original del río, este fenómeno de embalsamiento es el que se observa en la Sonda 4.

E.3. RESULTADOS NUMÉRICOS DEL ANÁLISIS DE POSIBLES SOLUCIONES DE MITIGACIÓN

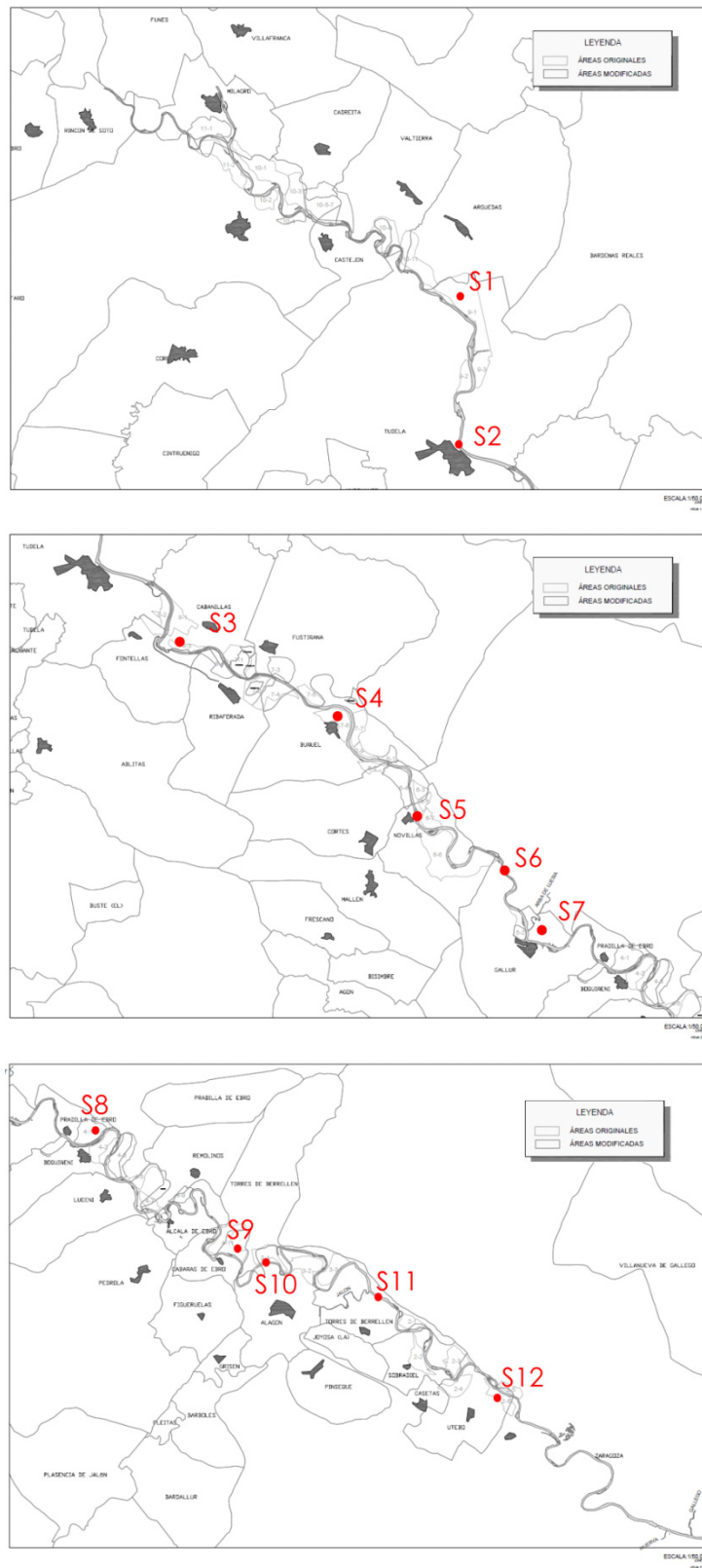


Figura E.58: Distribución de las sondas de medida colocadas.

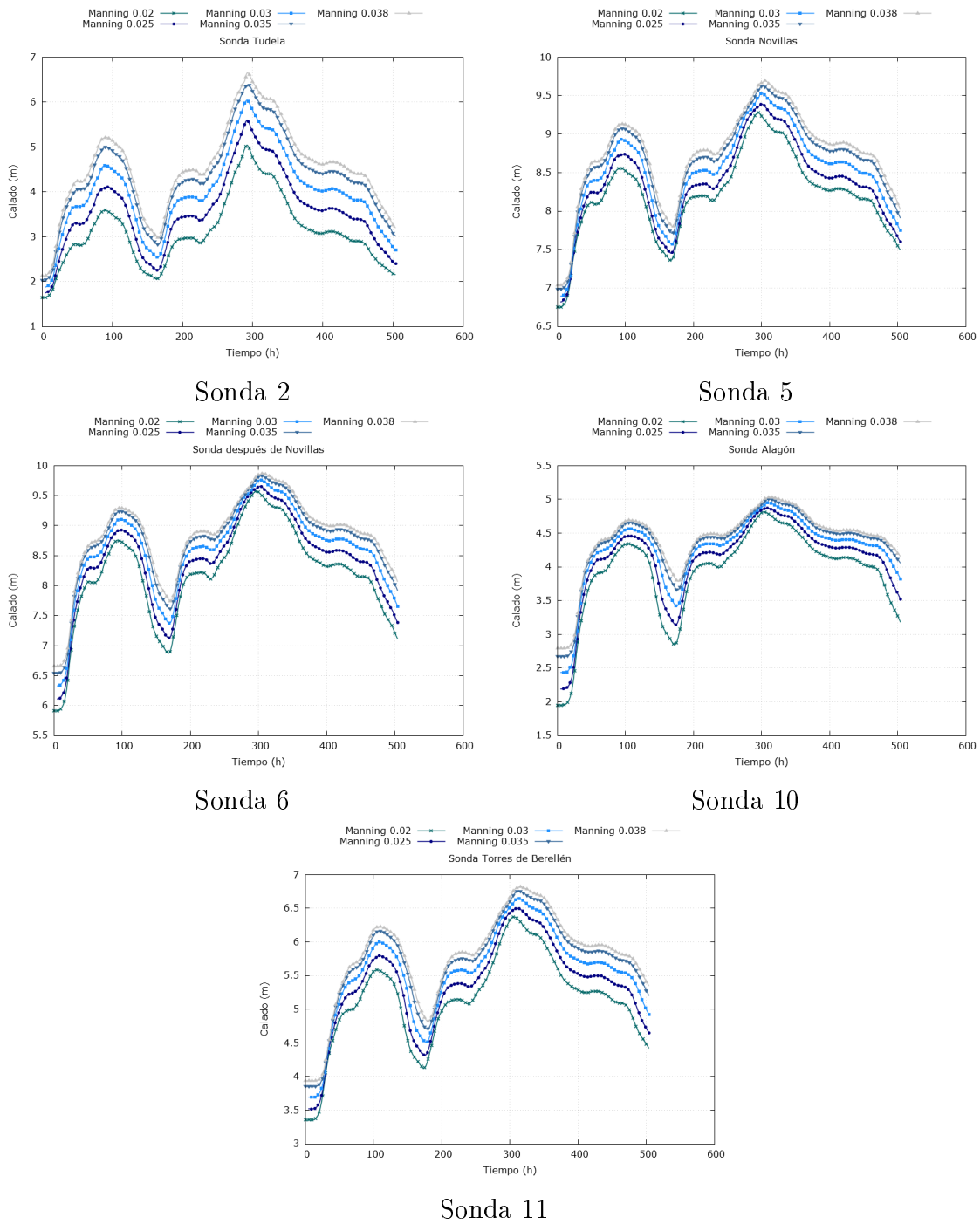


Figura E.59: Evolución temporal del calado h en el cauce en los puntos sonda para la avenida de 2015 con distintos números de Manning.

E.3. RESULTADOS NUMÉRICOS DEL ANÁLISIS DE POSIBLES SOLUCIONES DE MITIGACIÓN

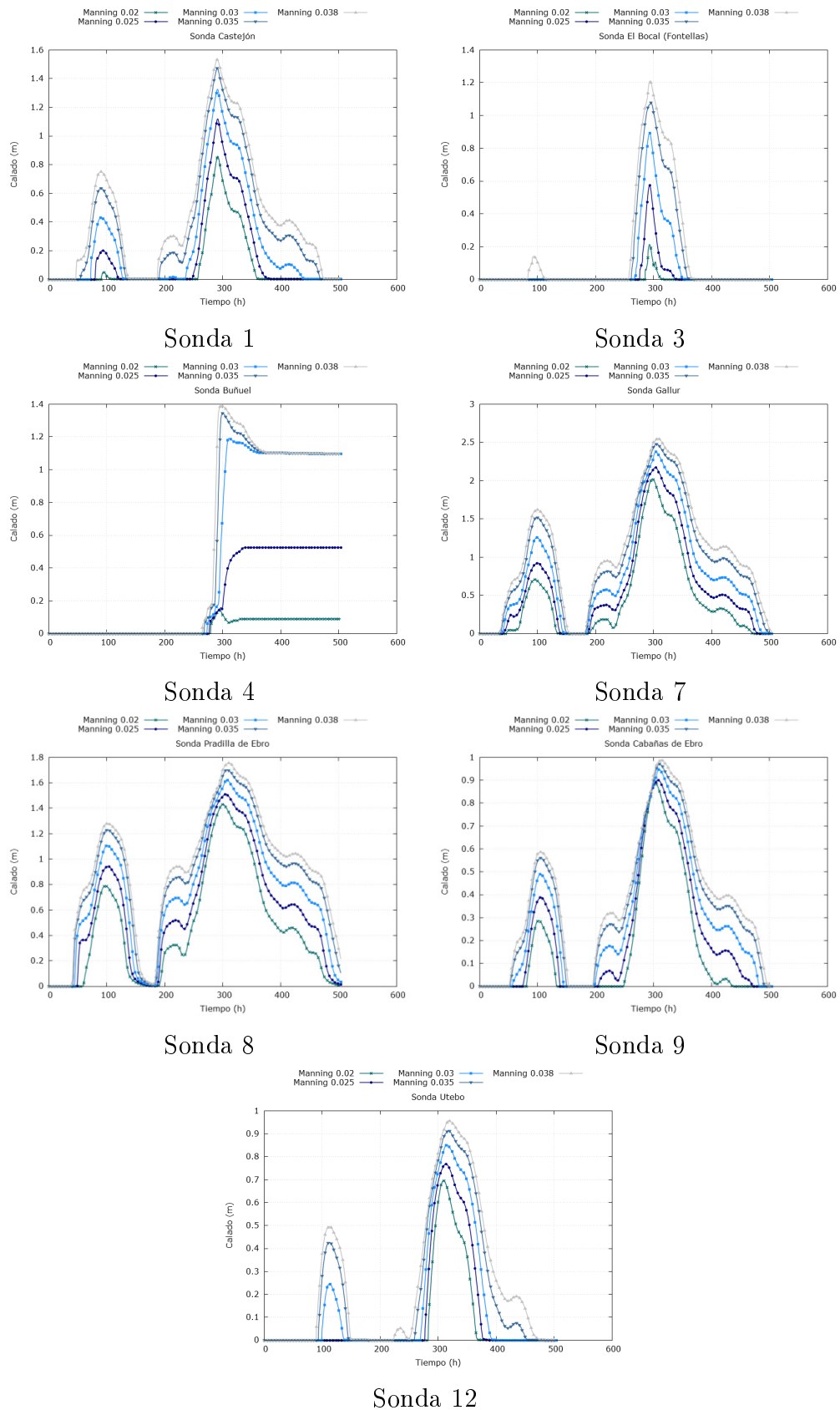


Figura E.60: Evolución temporal del calado h en las llanuras en los puntos sonda para la avenida de 2015 con distintos números de Manning.

E.3.1.2. Efecto de la limpieza de la vegetación en el cauce: Periodo de retorno de 10 años (T10)

De un modo análogo al que se han expuesto los resultados para la avenida de 2015, en este apartado se compararán resultados con diferentes números de Manning en el instante de máxima inundación de la avenida correspondiente al periodo de retorno de 10 años (ver hidrograma en Figura E.11), $t=118$ horas. Se exponen manchas de inundación y valores de calado medidas en las mismas 12 sondas usadas en el apartado anterior.

De nuevo se aprecian diferencias en las manchas de inundación (Figura E.61), al representar las láminas de agua para $t=110$ horas. El punto de máxima de área para cada inundación es diferente otra vez (ver Tabla E.10). Sin embargo, al producirse un desfase de unas pocas horas, se han representado para el mismo instante. La Figura E.61 muestra en oscuro la mancha de inundación para T10, con $n=0.035$ en el cauce, en las imágenes (a), (b) y (c). Dichas imágenes comparan con las manchas para $n=0.02$, 0.025 y 0.03 , respectivamente. Además, la imagen (d) compara la mancha para el cauce original (en azul claro) y la mancha para un cauce con mucha vegetación ($n=0.038$). La principal diferencia se observa en la zona de Tudela (d).

n Manning cauce	Area [m^2]	Instante [h]
0.02	148549636	120
0.025	161807838	120
0.03	173501418	120
0.038	189286225	118
0.035	183335838	118

Tabla E.10: Valor de las máximas áreas de inundación alcanzadas, el instante en el cual se producen, según el número de Manning del cauce, para el retorno T10.

Finalmente se muestra la evolución temporal del calado que se midieron en las 12 sondas (ver Figura E.58) durante la simulación del periodo de retorno de 10 años. Nótese que la evolución temporal del calado sigue la misma forma que el hidrograma de entrada (ver Figura E.11), que en este caso consta de un solo pico de caudal. Las sondas que se encuentran en la llanura tienen una forma creciente-decreciente pero muestran, además, los momentos en los que esta se encuentra seca, igual que para 2015. Los resultados se pueden ver en las Figuras E.62 y E.63.

Se observa de nuevo que, aunque con menos efecto que para 2015, la limpieza de la vegetación provoca el secado de las llanuras antes que para coeficientes de rozamiento

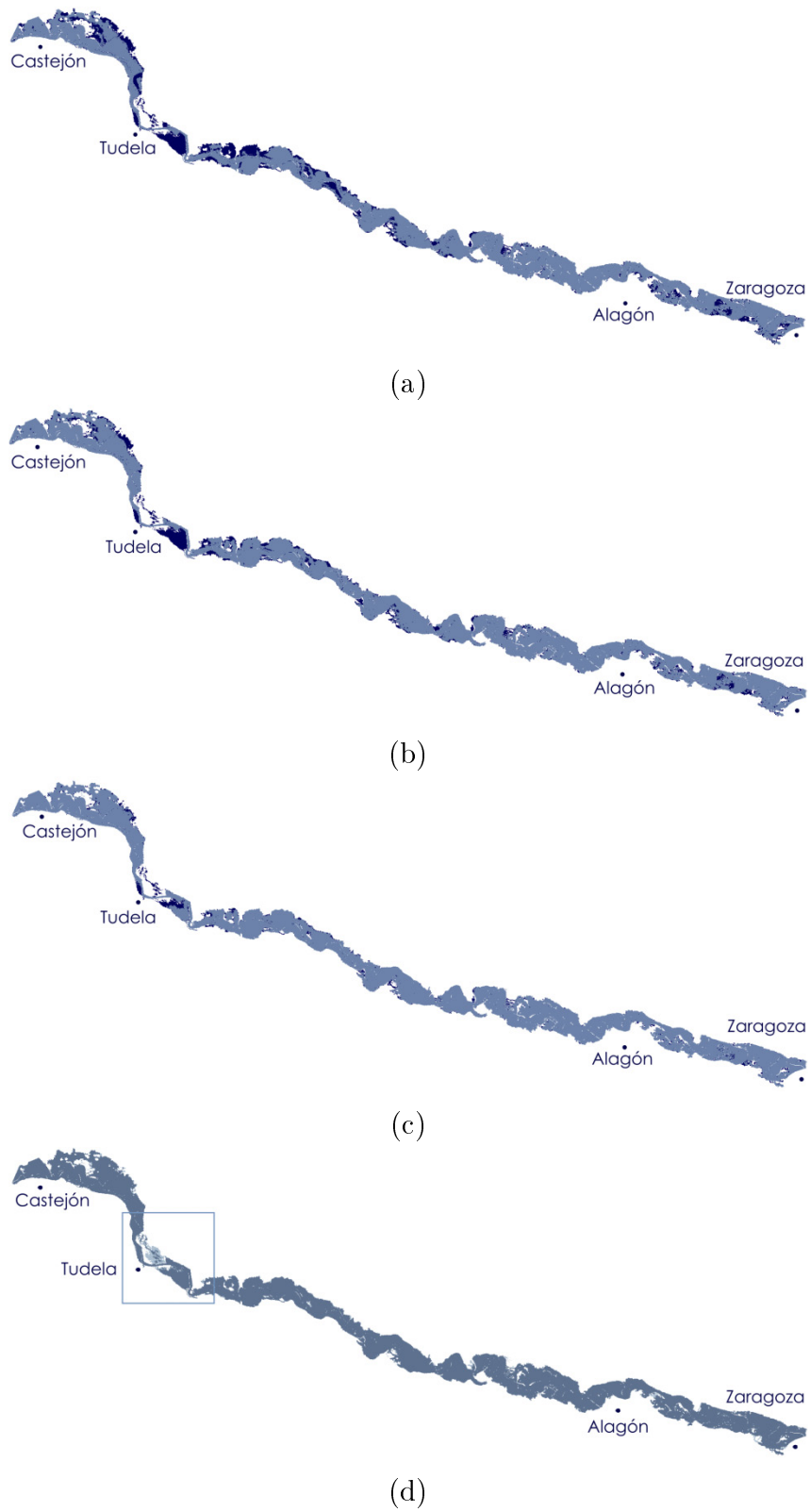


Figura E.61: Comparación de manchas de inundación con diferentes coeficientes n en el cauce para T10. La imagen (a) compara con $n=0.02$, (b), (c) y (d) con 0.025, 0.03 y 0.038, respectivamente.

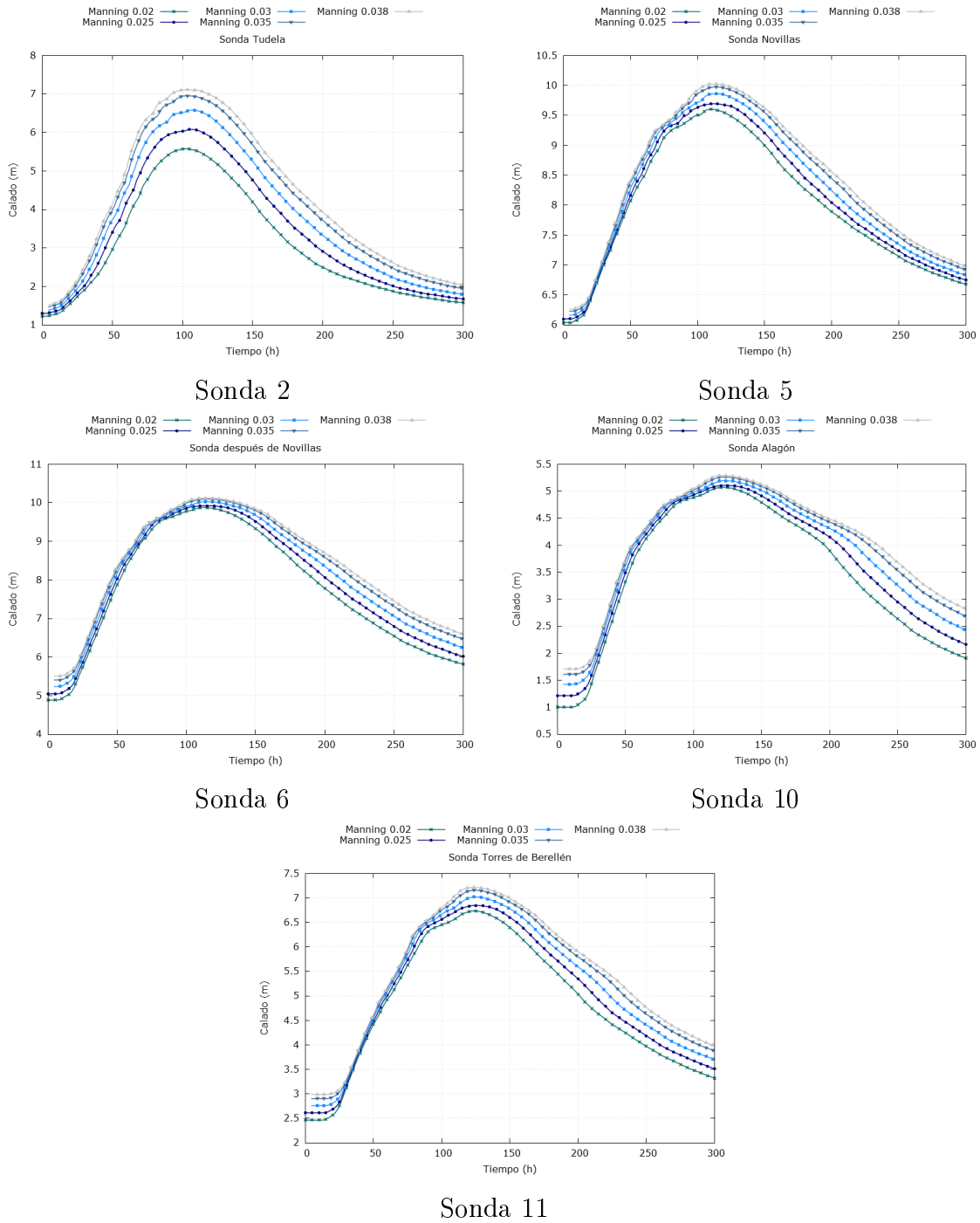


Figura E.62: Evolución temporal del calado h en el cauce en los puntos sonda para T10 con distintos números de Manning.

E.3. RESULTADOS NUMÉRICOS DEL ANÁLISIS DE POSIBLES SOLUCIONES DE MITIGACIÓN

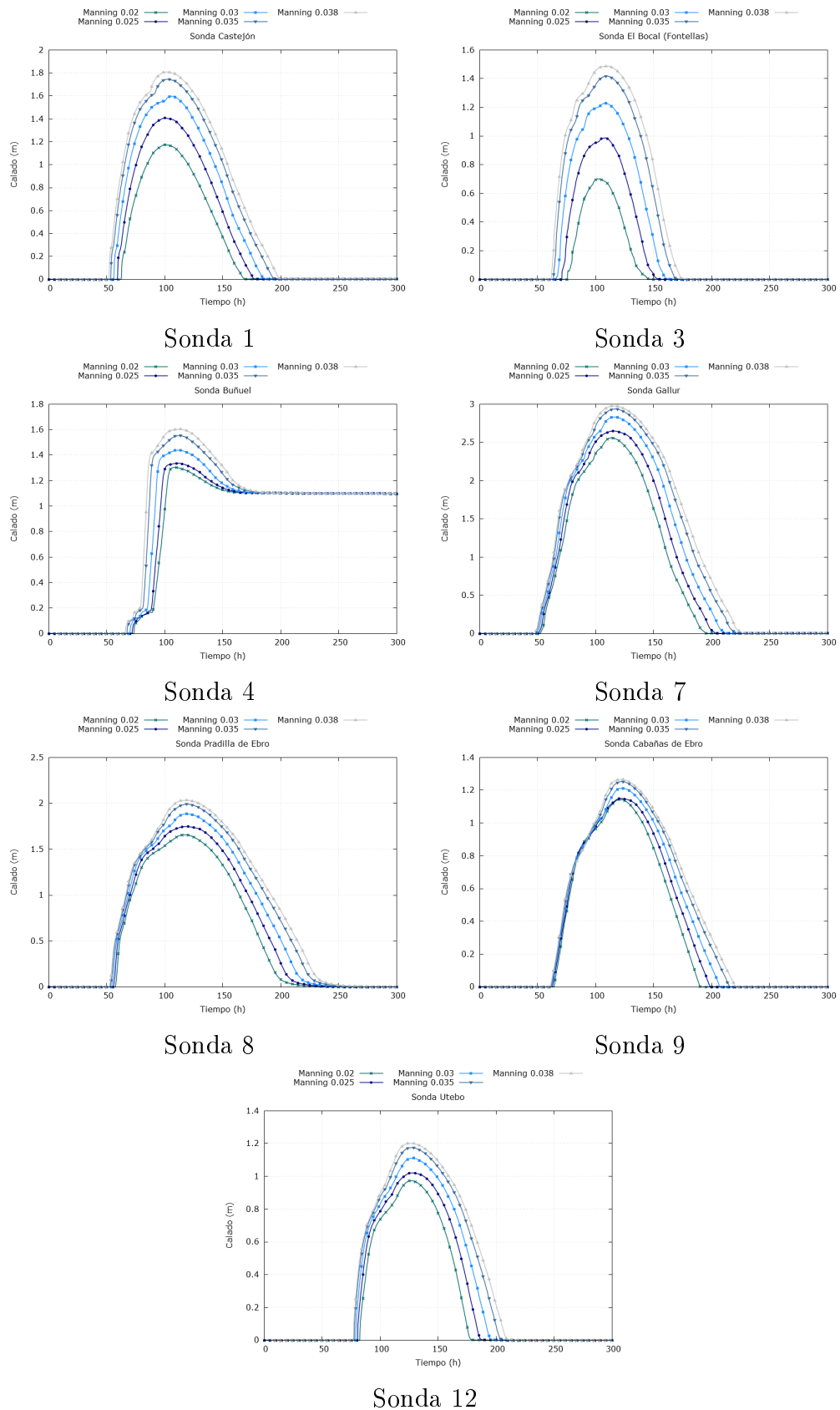


Figura E.63: Evolución temporal del calado h en la llanura de inundación en los puntos sonda para T10 con distintos números de Manning

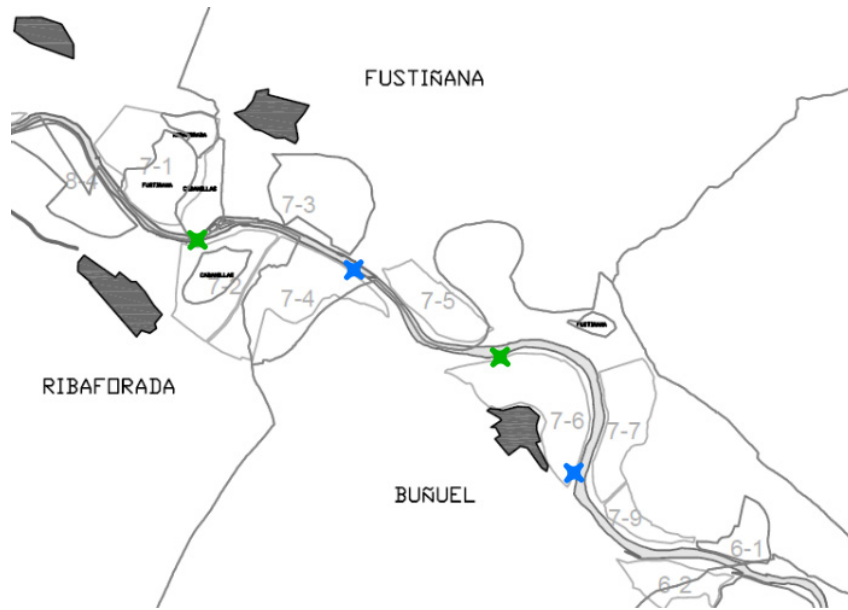


Figura E.64: Zonas de inundación controlada en la zona de Buñuel y Ribaforada con posibles compuertas a estudiar marcadas con cruces.

altos, como se ve en las Sondas 7, 8, 9 y 12. En general, dentro del cauce también observamos un valor de calado menor al disminuir n , en ocasiones hasta de metro y medio, como se ve en la Sonda 2, lo que retrasa la inundación y disminuye el volumen de agua que sobrepasa la altura de la llanura para esta avenida y podría impedir el desbordamiento para caudales más bajos. Por último, en la Sonda 4 se observa como la llanura de inundación cerca de Buñuel se inunda y posteriormente no posibilita el retorno del flujo al cauce, de modo que se queda un volumen de agua estancado aproximadamente de 1.1 m de altura.

E.3.2. Zonas de inundación controlada (ZIC)

En la Figura E.58, además de observar las sondas colocadas a lo largo del dominio para medir calado, se observan una serie de zonas alrededor del cauce que representan posibles áreas de inundación controlada propuestas a estudio por la CHE. De esas zonas, se han escogido dos para su estudio: una en la zona de Buñuel (7-6) y otra en la zona de Ribaforada (7-2 y 7-4) (ver Figura E.64). Permiten almacenar un volumen elevado de agua y, además, están lo suficientemente próximas como para observar su efecto por separado y de manera conjunta.

Es importante notar que representar estos espacios implica realizar cambios en las elevaciones de la malla de cálculo, ya que la delimitación de las zonas ahora tendrá que ser más marcada para evitar que una vez el agua entre pueda salir. Además, se les realiza

una apertura en la mota que permita el acceso del flujo. La colocación de la compuerta es de gran importancia y requiere de un análisis de consecuencias. Por un lado, en la práctica, siempre se tratan de colocar estas compuertas al final de la ZIC para favorecer que el agua entre a contra-pendiente de modo que sea menos dañina para el terreno y el ecosistema que en él habita (marcadas en azul en la Figura E.64). Por otro lado, esta práctica no favorece la entrada del flujo en la zona, de modo que, para ver las diferencias, se han realizado simulaciones también con las compuertas favoreciendo la entrada del flujo a favor de la pendiente (en verde en la misma Figura).

Por tanto, se han realizado 6 simulaciones diferentes con el hidrograma de la avenida de 2015 (ver Figura E.49) para 6 situaciones de estudio de las zonas de inundación controlada. Se han analizado por separado la actuación únicamente de una zona (Buñuel o Ribaforada) con cada posición de compuerta (a favor de la pendiente y en contra), lo que suman 4 simulaciones y, a su vez, se han simulado dos más con la actuación conjunta de ambas zonas, también para los dos casos de posición de compuertas.

Las comparación de manchas de inundación entre la avenida con una ZIC y la avenida original se puede ver para cada caso en las Figura E.65.

En general, esta medida no tiene ninguna consecuencia significativa sobre la mancha de inundación. Además, se puede observar que los pocos efectos que produce aparecen de manera local.

No obstante, no solo la extensión de la lámina es de gran importancia, sino también el valor del calado que anega los campos. En las Figuras E.66 y E.67 se representa la diferencia de calado en las áreas inundadas entre la avenida original y la crecida con la ZIC en uso.

Las Figuras E.66 y E.67 representan esa diferencia como la resta entre el calado que había originalmente y calado tras el uso de la ZIC. De este modo, cuando esta diferencia es nula (representada en blanco) el calado no ha cambiado tras la aplicación de la medida. Cuando la diferencia es positiva (representado en rojo) indica que el calado era mayor antes de usar la ZIC, y si ésta es negativa (en azul), implica que el efecto es el contrario.

Al analizar las Figuras E.66 y E.67 vemos que el hecho de abrir las ZIC's a contra-pendiente no favorece su inundación, ya que el flujo tiene que entrar en sentido contrario al que lleva. Esto provoca que las propias ZIC se inunden menos de lo que se inundaban sin ser ZIC (aparecen en rojo) y las zonas colindantes queden incluso más anegadas que

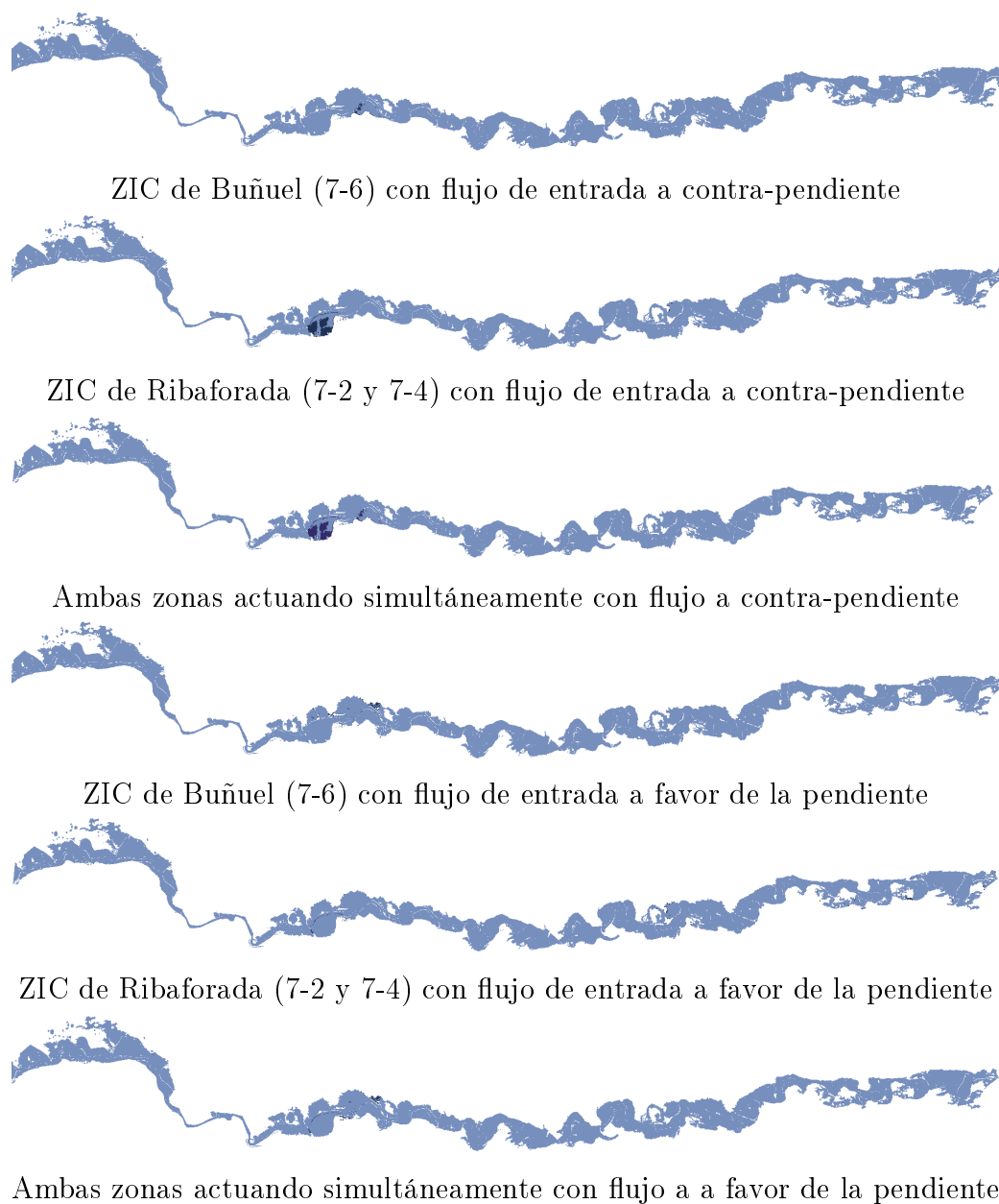


Figura E.65: Comparación de manchas de inundación para la avenida de 2015 antes y después de la actuación de una ZIC. En azul claro está la inundación tras el uso de la ZIC, y en azul oscuro la original.

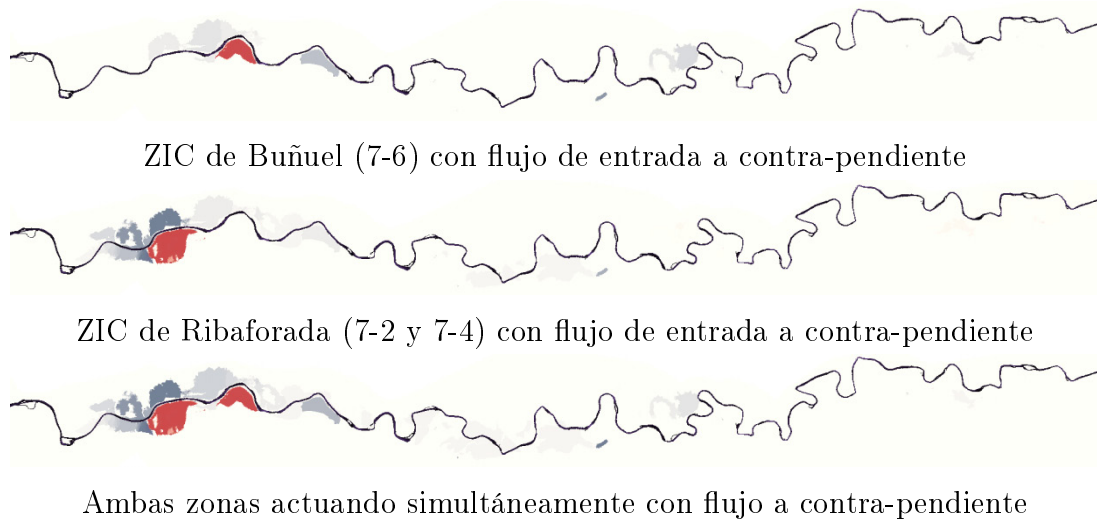


Figura E.66: Diferencia de h , en metros, entre la avenida antes de usar la ZIC a contra-pendiente y después. Valores negativos (azul) implican que había menos agua originalmente. Valores positivos (rojo) indican lo contrario.

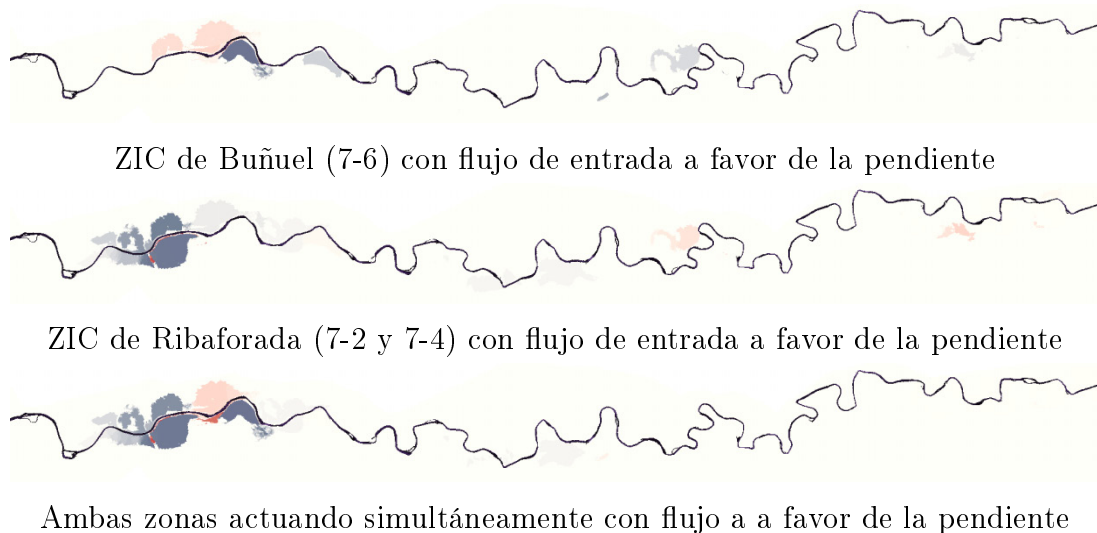


Figura E.67: Diferencia de h , en metros, entre la avenida antes de usar la ZIC a favor de la pendiente y después. Valores negativos (azul) implican que había menos agua originalmente. Valores positivos (rojo) indican lo contrario.

antes (en azul). En cualquier caso, se observa que su efecto es simplemente local, teniendo mínimas consecuencias aguas abajo de la zona de uso de la ZIC.

Por otro lado, el uso de estas zonas permitiendo que el agua entre a favor de la pendiente es más beneficioso. Sin embargo, resulta mucho más dañino para el terreno ya que el flujo arrastra gran cantidad de sedimentos. Observamos como en este caso las zonas aparecen en azul, es decir, almacenan más agua que antes, y además, en el caso de la zona 7-6 y el uso de ambas, zonas colindantes sí quedan menos anegadas.

A la vista de los resultados se puede concluir que la utilización de zonas de inundación controlada no resulta demasiado efectiva a la hora de mitigar los efectos de una avenida extraordinaria, puesto que se está favoreciendo la inundación de zonas que ya se mojaban antes de ser declaradas ZIC. Esta medida sería de más utilidad para avenidas menores, favoreciendo la inundación de zonas que en principio quedarían secas. No obstante, se observa que el efecto de esta medida es meramente local, lo que podría ser de utilidad para la protección de una zona, pero no como medida de mitigación general. Por esta razón, se descarta directamente el análisis de esta medida para la avenida correspondiente al periodo de retorno de 10 años, ya que consta de un caudal pico aún mayor que el escenario de 2015.

E.3.3. Protección de zonas

A la vista del poco efecto global que tienen los cambios en una zona, se propone como última medida la protección total de un área de terreno. Es decir, se va a simular el supuesto en el que se declara un espacio cerca del cauce como protegido, y se ha de evitar su inundación. Con esto se analizará la viabilidad de la construcción de motas alrededor de una zona, viendo si la protegen y si esta medida no provoca efectos negativos aguas abajo.

Como ejemplo, se ha optado por proteger la zona (7-6), que es la misma zona de Buñuel que en el apartado anterior se ha declarado como ZIC. Se ha escogido esta zona por su excesiva cercanía a la población de Buñuel y por ser lo suficientemente grande como para observar si el tomar estas medidas tiene consecuencias perjudiciales aguas abajo.

De nuevo, la protección de una zona implica cambios en la malla, ya que se va a elevar las mota que rodea el área (7-6) y que se encuentra cerca del cauce, para evitar el desbordamiento. Los cambios en la elevación de la mota se aprecian en la Figura E.68, donde se exponen imágenes de la malla antes y después de ser modificada, marcando especialmente las zonas más elevadas. Se ve cómo para la protección de la zona se eleva la mota cercana al cauce que protege el área. Es importante hacer notar que la realización de

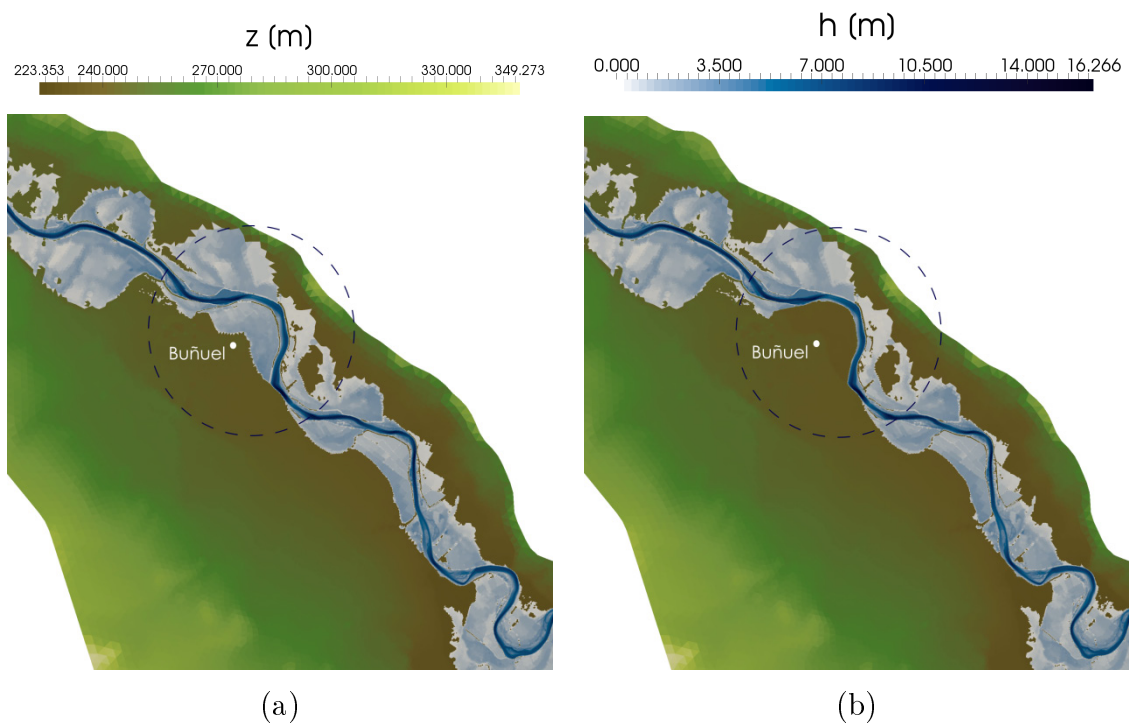


Figura E.69: Diferencia entre la mancha de inundación antes (a) y después (b) de proteger la zona de Buñuel para la avenida de 2015.

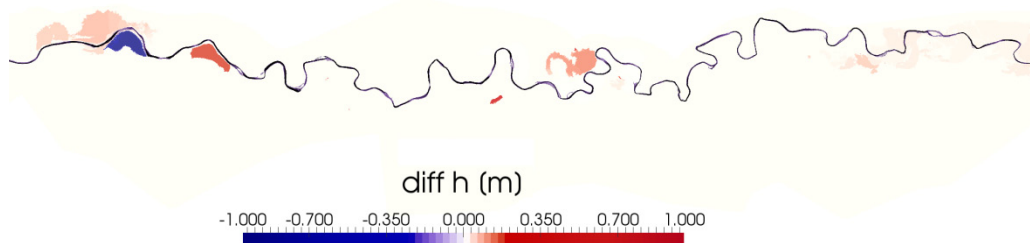


Figura E.70: Diferencia de h tras la protección de la zona de Buñuel para la avenida de 2015. Diferencias positivas implican más cantidad de agua tras la aplicación de la medida.

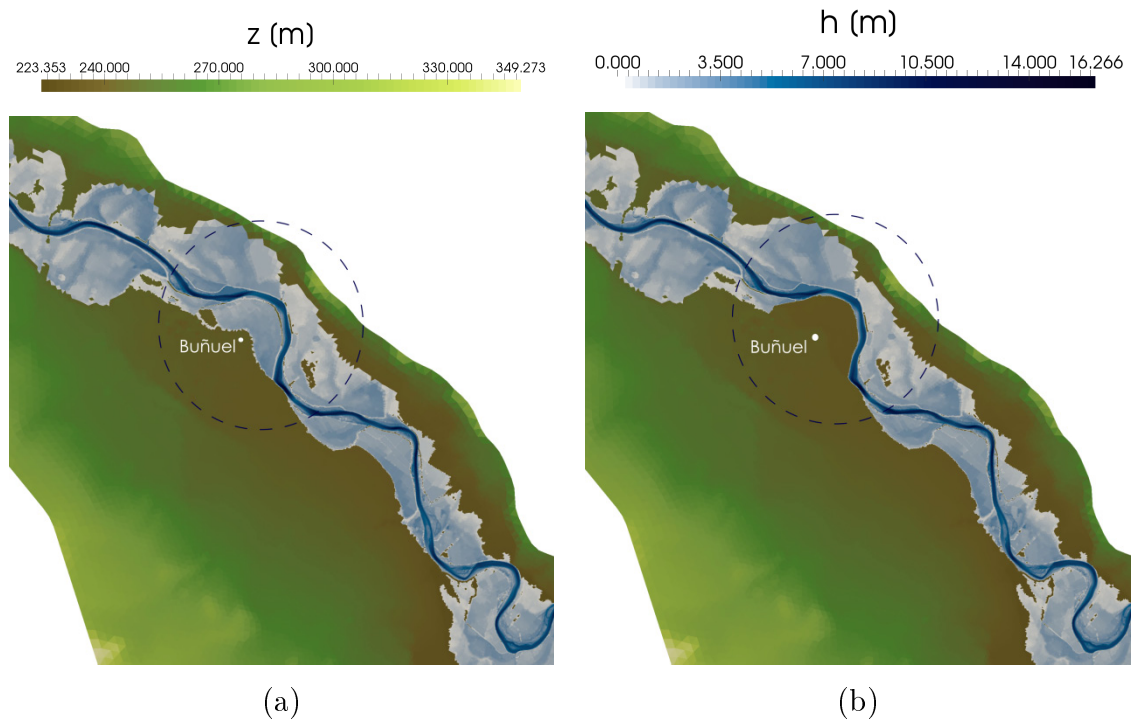


Figura E.71: Diferencia entre la mancha de inundación antes (a) y después (b) de proteger la zona de Buñuel para el periodo de retorno de 10 años.

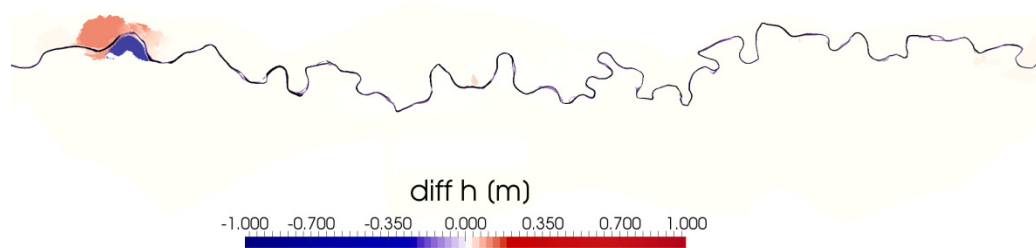


Figura E.72: Diferencia de h tras la protección de la zona de Buñuel para el periodo de retorno de 10 años. Diferencias positivas implican más cantidad de agua tras la aplicación de la medida.

E.3.3.2. Protección de Buñuel para el periodo de retorno de 10 años (T10)

El mismo estudio se ha realizado para T10, con un caudal pico mayor a la ocurrida en 2015 (ver Figura E.11). De nuevo se obtiene información de la extensión de la lámina de agua, donde se observa si la zona protegida ha quedado o no cubierta por el agua. En la Figura E.71 vemos cómo el objetivo sigue cumpliéndose incluso para un caudal de $3047 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondiente al caudal pico de T10. Análogamente a la exposición de resultados de la avenida de 2015, se muestran en la Figura E.72 las diferencias de calado que hay en el dominio tras la protección de la zona. De nuevo, estas diferencias no son significativas y permitirían llevar a la práctica una medida como esta.

E.3.4. Resumen de resultados de mitigación

A la vista de los resultados expuestos se puede concluir que la medida más efectiva en términos de mitigación de los efectos de una crecida, de las estudiadas en este trabajo, es la limpieza del cauce, que conlleva a una reducción de la fricción en el lecho. Esta medida afecta de manera general a todo el dominio y de un modo significativo. No obstante, hay que tener en cuenta que el calado disminuye como consecuencia de un aumento de la velocidad, que provocará un incremento de los fenómenos erosivos y de transporte de sedimentos. En principio, el aumento de dicha magnitud no es tan drástico como para que surja la necesidad de hacer un estudio de dicho fenómeno, pero es necesario destacar la consecuencia en la aplicación de dicha medida.

Por otro lado, la utilización de zonas de inundación controlada no resulta de gran utilidad en avenidas extraordinarias, ya que la mayor parte de las áreas con posibilidad de ser declaradas zona de inundación controlada ya quedaban anegadas sin serlo. Además, se ha hecho notar la diferencia entre las distintas posiciones de las compuertas en el uso de una ZIC. El uso de compuertas aguas arriba de la zona, favoreciendo una entrada de flujo a favor de la pendiente, perjudica gravemente el terreno de la ZIC; sin embargo, la utilización de compuertas que pretenden una entrada del flujo a contrapendiente resultan de poca utilidad ya que no favorecen la entrada del agua en la zona. Como estudio futuro, se propone el análisis de este tipo de soluciones para avenidas con caudales más bajos, inundando zonas que, sin ser ZIC no quedarían anegadas.

Por último, se estudia la protección de un único espacio cerca del cauce. Esto resulta de gran utilidad porque una elevada cantidad de poblaciones se encuentran a orillas del río y requieren de protección mediante motas durante una avenida. En general, esta solución resulta práctica para proteger cualquier proyecto futuro por el cual un espacio no pueda quedar inundado, por ejemplo, por una industria importante, explotación ganadera, espacio natural protegido o nueva concentración de viviendas. Se ha observado que no se requiere de una obra civil desmesurada y que el hecho de evitar que una gran cantidad de volumen de agua no entre en una zona determinada no afecta catastróficamente al resto del dominio de estudio.

Apéndice F

Programas auxiliares utilizados

En la realización del presente trabajo ha sido necesaria la utilización de herramientas auxiliares para el tratamiento de datos. A pesar de contar con el software de pre-proceso SMS, se ha utilizado un programa adicional para la gestión de la información topográfica, *SAGA GIS*. Por otro lado, para la observación y análisis final de los resultados se ha hecho uso de una herramienta de visualización denominada *ParaView*.

F.1. Gestión de datos de terreno: *SAGA GIS*

SAGA es el acrónimo inglés de *System for Automated Geoscientific Analyses* (*Sistema para Análisis Automatizados Geocientíficos* en español) y es un programa para el tratamiento de información geográfica (GIS). Permite, entre otras cosas, la organización, almacenamiento, manipulación y modelización de grandes cantidades de datos vinculados a una referencia espacial.

Para el presente trabajo se ha utilizado gran cantidad de información del terreno que constituye la zona que se ha simulado. Todos estos datos se proporcionaron de maneras distintas y la mayoría han requerido algunas modificaciones para ser introducidos en *RiverFlow2D* y usados para simular. Además, los programas de tratamiento GIS también permiten visualizar de forma detallada la información, de modo que ha sido de gran utilidad cuando ha sido necesario obtener información muy concreta de algún dato de terreno, por ejemplo, la elevación exacta de una zona determinada de un MDT.

A continuación se expone una lista con la información utilizada para este estudio, su formato y la razón por la cual fue necesaria una herramienta GIS:

- Modelos Digitales de Terreno. Conjunto de elevaciones, z , en un plano horizontal utilizados para representar la información del terreno alrededor del cauce. Estos ficheros pueden estar dados en muchos formatos de archivo (**.asc*, **.txt*, etc.) y

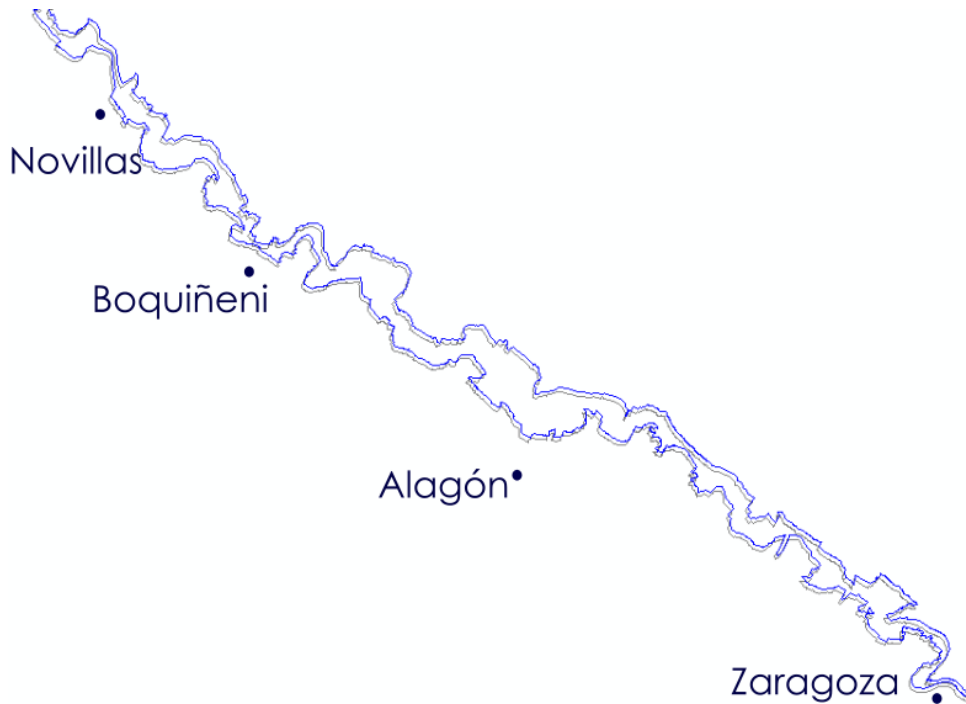


Figura F.1: Huella de inundación en diferentes proyecciones para la avenida de 2013.

SAGA es capaz de procesar todos ellos y convertirlos al formato que se desee.

- Secciones batimétricas. Representan la información del cauce del río y son dados en forma de puntos en el espacio (x, y, z) . Fueron transformadas a formato de texto $(*.txt)$ y se visualizaron en el espacio con *SAGA*, lo que fue de gran utilidad para su organización y ordenación, necesaria para interpolar después y generar la información del cauce [7, 8].
- Extensión de la huella de inundación. La información de los límites que alcanzó la lámina de agua en cada una de las avenidas fue medida y recogida en forma de coordenadas en el plano horizontal. Estos datos son dados en forma de "shape" (formato $*.shp$) y son transformados a formato de texto para su introducción en *RiverFlow2D* a través de *SAGA*. Además, fue necesario el cambio de su proyección topográfica para que coincidiese con la de las simulaciones. Dicha tarea fue realizada igualmente con el software de GIS, *SAGA*. La Figura F.1 muestra las polilíneas que delimitan la huella de inundación en dos proyecciones diferentes, ED50 (usada antiguamente) en gris y ETRS89 (utilizada habitualmente y en el presente trabajo) en azul.

F.2. Visualización de resultados: *Paraview*

Paraview es una aplicación para visualización de problemas científicos, multiplataforma y de código abierto. Permite un análisis rápido de resultados de un modo cualitativo y cuantitativo, por lo que es muy útil para mostrar de una manera visual los resultados obtenidos de las láminas de inundación, y para una observación detallada de los valores que toman las variables del problema.

Entre otros tipos de archivo, *Paraview* es capaz de abrir ficheros **.vtk* que vuelca la herramienta de cálculo utilizada, *RiverFlow2D*. Cada uno de estos ficheros contiene, para un momento concreto de tiempo, el valor que toman las variables del problema en todas las celdas de la malla. Es posible introducir al mismo tiempo todos los archivos **.vtk* de una simulación, con lo que permite representar la evolución temporal de las variables a lo largo de la misma, lo que es de gran utilidad en el estudio de fenómenos de inundación.

Por sus características, *Paraview* ha sido utilizado en este trabajo para:

- Representación en 3D de todas las variables del problema, lo que ha permitido analizar tanto el terreno como las áreas de inundación de un modo muy visual, como se puede observar en la Figura F.2.
- Observación cualitativa y análisis cuantitativo de las variables representadas a través de una escala de colores. En la Figura F.3 se ven representadas las velocidades a lo largo de toda la lámina de inundación. Las flechas, además de indicar la dirección del flujo, están escaladas con el módulo de la velocidad .
- Visualización de la evolución temporal de las variables, lo que ha permitido representar las inundaciones en formato de vídeo.

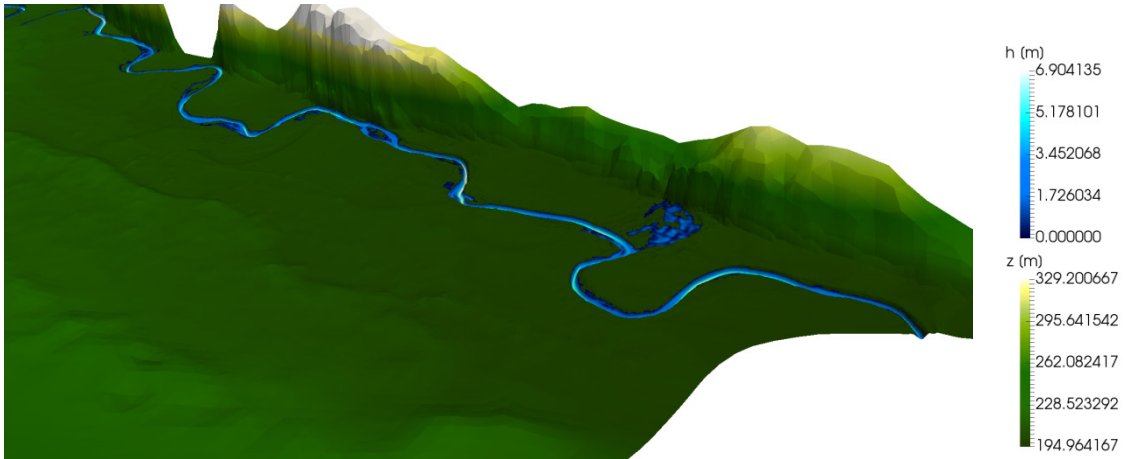


Figura F.2: Visualización en 3D de la cota, z (en verde), y el calado, h (en azul).

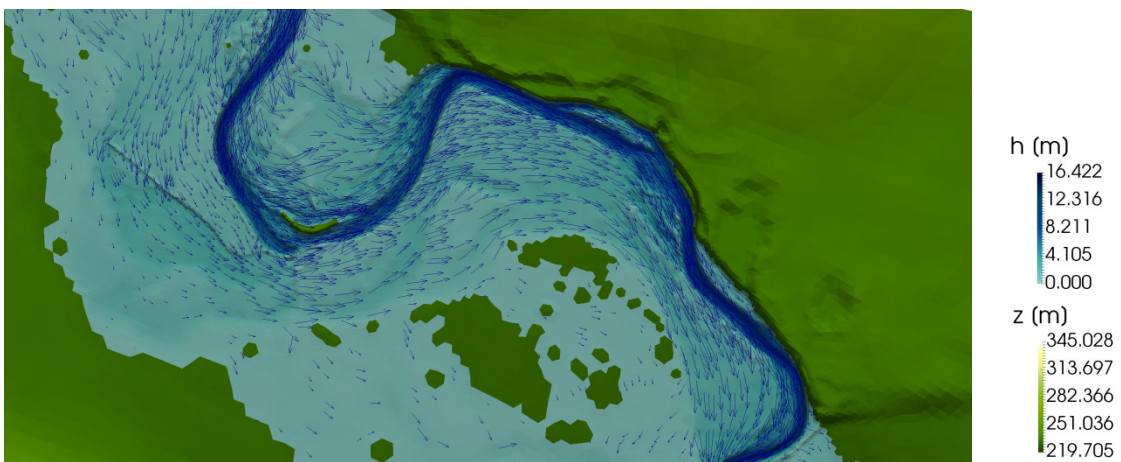


Figura F.3: Representación del módulo de la velocidad del flujo en la lámina de inundación