



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

Análisis de la influencia de diques y motas en un  
evento de inundación mediante simulación  
numérica

Analysis of the influence of dykes and levees in a  
flood event through numerical simulation

Autor

Manuel Antón Roldán

Director/es

María Pilar García Navarro  
Javier Fernández Pato

Escuela de Ingeniería y Arquitectura  
2020-2021



# Resumen

En este trabajo se realiza un análisis sobre la influencia de los diques y motas en un modelo de simulación numérica sobre la dinámica de las ondas de inundación fluviales. Además, se va a establecer la forma óptima de representar estos elementos en un modelo de volúmenes finitos de simulación numérica de flujo transitorio en lámina libre. Para ello, se van a generar una serie de casos test sintéticos para estudiar la sensibilidad de los resultados a la topografía, la posición de las motas y las características de la onda de caudal. Tras esto, se analiza la influencia de las motas en el tramo Castejón-Zaragoza, representadas como topografía del Modelo Digital Terrestre y como condición de contorno interna. La evaluación de los resultados se realiza a partir de la comparación con medidas de caudal y nivel en las estaciones de aforo, y con medidas de las manchas de inundación. Estos casos se han realizado con la herramienta computacional RiverFlow2D, desarrollada por el Grupo de Hidráulica Computacional de la Universidad de Zaragoza y la empresa Hydronia LLC.



# Índice general

1. Introducción .....	13
2. Caso de estudio .....	15
2.1. Dominio .....	15
2.2. Modelo digital del terreno .....	15
2.3. Mapa de usos del terreno .....	15
2.4. Hidrogramas .....	16
2.5. Curva de aforo .....	16
2.6. Condiciones iniciales .....	17
2.7. Malla de cálculo.....	17
3. Modelo de simulación .....	18
3.1. Hipótesis y ecuaciones de flujo .....	18
3.2. Discretización .....	18
3.3. Condiciones de contorno .....	19
3.3.1. Externas.....	19
3.3.2. Internas .....	20
4. Resultados .....	20
4.1. Casos test preliminares en tramo simplificado .....	20
4.1.1. Sensibilidad a la infiltración .....	21
4.1.2. Sensibilidad a la existencia de motas y su orientación .....	21
4.2. Casos test en tramo del Ebro Castejón-Zaragoza.....	22
5. Conclusiones y trabajo futuro .....	25
6. Referencias.....	27
A. Modelo numérico para vertederos.....	29
B. Software de modelización: RiverFlow2D .....	31
B.1. Panel de control .....	31
B.2. Condiciones de contorno abiertas .....	32
B.3. Condiciones de contorno internas.....	33
B.4. Salidas .....	34
C. Software de configuración: QGIS .....	37
C.1. Preparación y visualización de datos .....	37
C.2. Configuración de la malla de cálculo .....	39
C.3. Condiciones de contorno .....	43
C.4. Coeficientes n de Manning.....	46

C.5. Zonas de control.....	46
D. Modelo de infiltración .....	48
E. Casos test preliminares .....	49
E.1.1. Caso test infiltración.....	50
E.1.2. Caso test infiltración y motas transversales.....	50
E.1.3. Caso test sin infiltración y motas transversales .....	51
F. Resultados de las simulaciones en el Ebro. ....	54
F.1. Malla sin condiciones de contorno internas .....	54
F.1.1. Malla gruesa .....	55
F.1.2. Malla fina.....	57
F.1.3. Malla fina doble.....	59
F.1.4. Comparación de resultados.....	62
F.2. Malla con condiciones de contorno internas .....	69
F.2.1. Configuración Original.....	70
F.2.2. Correcciones en malla y vertederos .....	72
F.2.3. Alteración de los coeficientes n de Manning .....	74
F.2.4. Comparación de resultados.....	77
G. Software de visualización: ParaView .....	85

# Índice de figuras

Figura 1: Tipos de desastres naturales mundiales registrados desde el año 1969 hasta el año 2019.....	13
Figura 2: Hidrogramas provistos por la CHE de las entradas del Ebro y sus afluentes .....	16
Figura 3: Curva de Aforo en Zaragoza .....	17
Figura 4: Diagrama del flujo a través de un dique en una malla triangular 2D. Vista en planta (a) y vista lateral (b).....	20
Figura 5: Representación 3D del tramo simplificado .....	21
Figura 6: Hidrogramas correspondientes al caso con tiempo de base igual a 12 horas.....	22
Figura 7: Representación 2D del tramo Castejón-Zaragoza junto a los aforos situados el tramo .....	22
Figura 8: Caudales a la salida de Zaragoza para 4 configuraciones distintas.....	23
Figura 9: Manchas de inundación en Zaragoza con motas como topografía. ....	23
Figura 10: Manchas de inundación en Zaragoza con motas como topografía. Manning x 1,15	24
Figura 11: Manchas de inundación en Zaragoza con motas como c.c. interna. ....	24
Figura 12: Manchas de inundación en Zaragoza con motas como c.c. interna. Manning x 1,15	25
Figura A.1: Diagrama del flujo a través de un dique en una malla triangular 2D. Vista en planta (a) y vista lateral (b).....	29
Figura B.1: Panel de control de RiverFlow2D.....	32
Figura B.2: Panel de condiciones de contorno abiertas de RiverFlow2D. ....	33
Figura B.3: Panel de vertederos de RiverFlow2D.....	34
Figura B.4: Panel de infiltración de RiverFlow2D.....	34
Figura B.5: Panel de opciones de salida gráficas de RiverFlow2D. ....	35
Figura B.6: Panel de reportes en secciones de RiverFlow2D. ....	35
Figura B.7: Panel de puntos de observación.....	36
Figura C.1: MDT del cauce del río Ebro en el tramo Castejón-Zaragoza.....	38
Figura C.2: MDT con las elevaciones del terreno del tramo Castejón-Zaragoza junto a las machas de inundación.....	38
Figura C.3: MDT con los coeficientes de Manning asociados a los usos del terreno.....	39
Figura C.4: MDT de elevaciones y MDT de coef. de Manning junto a la capa <i>Domain Outline</i> ..	40
Figura C.5: Zonas donde se ha empleado <i>MeshDensityPoligon</i> . Entrada de una afluente al dominio (a) y paso del cauce junto al límite del dominio (b).....	41
Figura C.6: Comparativa entre el uso de líneas tipo <i>MeshBreakLine</i> (a) y <i>MeshDensityLine</i> (b)	41
Figura C.7: Configuración de la malla en torno a una mota para diferentes configuraciones de <i>MeshBreakLine</i> . Celdas de 20 metros (a), de 10 metros (b) y paralelas de 10 metros (c).....	42
Figura C.8: Visualización del todos los elementos de configuración de la malla.....	43

Figura C.9: Hidrogramas provistos por la CHE de las entradas del Ebro y sus afluentes .....	44
Figura C.10: Curva de Aforo en Zaragoza .....	44
Figura C.11: Visualización de la capa <i>Weir</i> . Representación en QGIS como polilínea (a) y en ParaView como condición de contorno (b).....	45
Figura C.12: Estaciones de control a lo largo del tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro .....	46
Figura D.1: Esquema del frente húmedo en el modelo de Green-Ampt. ....	48
Figura E.1: Representación en 3D del caso test preliminar. ....	49
Figura E.2: Relación porcentual entre el volumen infiltrado y el volumen entrante al sistema en los casos con infiltración y motas transversales. ....	51
Figura E.3: Hidrogramas correspondientes al caso con tiempo de base igual a 12 horas sin infiltración. ....	52
Figura E.4: Hidrogramas correspondientes al caso con tiempo de base igual a 18 horas sin infiltración. ....	52
Figura E.5: Hidrogramas correspondientes al caso con tiempo de base igual a 24 horas sin infiltración. ....	53
Figura F.1 Comparativa entre los distintos tipos de malla. Malla Gruesa (a), malla fina (b) y malla fina con doble polilínea (c). ....	54
Figura F.2: Hidrogramas real y simulado (MG) en la estación de Aforo A011 – Zaragoza. Malla gruesa con motas como topografía .....	55
Figura F.3: Manchas de inundación a la llegada a Zaragoza. Malla gruesa con motas como topografía.....	56
Figura F.4: Manchas de inundación en las proximidades de Pradilla de Ebro (a) y Tudela (b) . Malla gruesa con motas como topografía .....	56
Figura F.5: Hidrogramas real y simulado (MF) en la estación de Aforo A011 – Zaragoza. Malla fina con motas como topografía .....	57
Figura F.6: Manchas de inundación a la llegada a Zaragoza. Malla fina con motas como topografía .....	58
Figura F.7: Manchas de inundación en las proximidades de Pradilla de Ebro (a) y Tudela (b) . Malla fina con motas como topografía .....	59
Figura F.8: Hidrogramas real y simulados (MF) en la estación de Aforo A011 - Zaragoza. Malla fina doble y n x 1,15 con motas como topografía.....	60
Figura F.9: Manchas de inundación a la llegada a Zaragoza. Malla Doble Fina (a) y Malla Fina Doble con factor n de Manning x 1,15 (b) . Malla fina doble y n x 1,15 con motas como topografía .....	61
Figura F.10: Manchas de inundación en las proximidades de Tudela. Malla Doble Fina (a) y Malla Fina Doble con factor n de Manning x 1,15 (b) . Malla fina doble y n x 1,15 con motas como topografía.....	61
Figura F.11: Manchas de inundación en las proximidades de Pradilla de Ebro. Malla Doble Fina (a) y Malla Fina Doble con factor n de Manning x 1,15 (b) . Malla fina doble y n x 1,15 con motas como topografía.....	62

Figura F.12: Niveles real y simulados en la estación de Aforo A002 – Castejón. Comparación para motas como topografía.....	63
Figura F.13: Manchas de inundación a la altura de Castejón en la hora 210. Comparación para motas como topografía.....	63
Figura F.14: Niveles real y simulados en la estación de Aforo A284 – Tudela. Comparación para motas como topografía.....	64
Figura F.15: Manchas de inundación a la altura de Tudela en la hora 210. Comparación para motas como topografía.....	64
Figura F.16: Niveles real y simulados en la estación de Aforo A285 – Novillas. Comparación para motas como topografía.....	65
Figura F.17: Manchas de inundación a la altura de Novillas en la hora 220. Comparación para motas como topografía.....	65
Figura F.18: Niveles real y simulados en la estación de Aforo A340 – Pradilla de Ebro. Comparación para motas como topografía.....	66
Figura F.19: Manchas de inundación a la altura de Pradilla de Ebro en la hora 230. Comparación para motas como topografía.....	66
Figura F.20: Niveles real y simulados en la estación de Aforo A311 – Ronda Norte. Comparación para motas como topografía.....	67
Figura F.21 Niveles real y simulados en la estación de Aforo A011 – Zaragoza. Comparación para motas como topografía.....	67
Figura F.22: Manchas de inundación a la altura de Zaragoza en la hora 240. Comparación para motas como topografía.....	68
Figura F.23: Manchas de inundación en el tramo Castejón-Zaragoza en la hora 240. Comparación para motas como topografía.....	69
Figura F.24: Hidrogramas real y simulado (Conf. Original) en la estación de Aforo A011 – Zaragoza. Malla original con motas como c.c. interna.....	71
Figura F.25: Manchas de inundación a la llegada a Zaragoza. Malla original con motas como c.c. interna.....	71
Figura F.26: Manchas de inundación en las proximidades de Pradilla de Ebro (a) y Tudela (b) . Malla original con motas como c.c. interna.....	72
Figura F.27: Hidrogramas real y simulados (Conf. Original y Conf. Correcciones) en la estación de Aforo A011 – Zaragoza. Malla original y malla corregida con motas como c.c. interna.....	73
Figura F.28: Manchas de inundación a la llegada a Zaragoza. Malla corregida con motas como c.c. interna.....	73
Figura F.29: Manchas de inundación en las proximidades de Pradilla de Ebro (a) y Tudela (b) . Malla corregida con motas como c.c. interna.....	74
Figura F.30: Hidrogramas real y simulados (Conf. Correcciones, Manning x1,15 y x1,25) en la estación de Aforo A011 – Zaragoza. Malla corregida, n x 1,15 y n x 1,25 con motas como c.c. interna.....	75
Figura F.31: Manchas de inundación a en Zaragoza. Manning x 1,25 (a) y Manning x 1,15 (b). Motas como c.c. interna.....	76

Figura F.32: Manchas de inundación en Tudela. Manning x 1,25 (a) y Manning x 1,15 (b) ). Motas como c.c. interna.....	76
Figura F.33: Manchas de inundación en Pradilla de Ebro. Manning x 1,25 (a) y Manning x 1,15 (b). Motas como c.c. interna.....	77
Figura F.34: Niveles real y simulados en la estación de Aforo A002 – Castejón. Comparación para motas como condición de contorno interna.....	77
Figura F.35: Manchas de inundación a la altura de Castejón en la hora 210. Comparación para motas como condición de contorno interna.....	78
Figura F.36: Niveles real y simulados en la estación de Aforo A284 – Tudela. Comparación para motas como condición de contorno interna.....	78
Figura F.37: Manchas de inundación a la altura de Tudela en la hora 210. Comparación para motas como condición de contorno interna.....	79
Figura F.38: Niveles real y simulados en la estación de Aforo A285 – Novillas. Comparación para motas como condición de contorno interna.....	80
Figura F.39: Manchas de inundación a la altura de Novillas en la hora 230. Comparación para motas como condición de contorno interna.....	80
Figura F.40: Niveles real y simulados en la estación de Aforo A340 – Pradilla de Ebro. Comparación para motas como condición de contorno interna.....	81
Figura F.41: Manchas de inundación a la altura de Pradilla de Ebro en la hora 230. Comparación para motas como condición de contorno interna.....	81
Figura F.42: Niveles real y simulados en la estación de Aforo A311 – Ronda Norte. Comparación para motas como condición de contorno interna.....	82
Figura F.43: Niveles real y simulados en la estación de Aforo A011 – Zaragoza. Comparación para motas como condición de contorno interna.....	82
Figura F.44: Manchas de inundación a la altura de Zaragoza en la hora 270. Comparación para motas como condición de contorno interna.....	83
Figura F.45: Manchas de inundación en el tramo Castejón-Zaragoza en la hora 260. Comparación para motas como condición de contorno interna.....	84

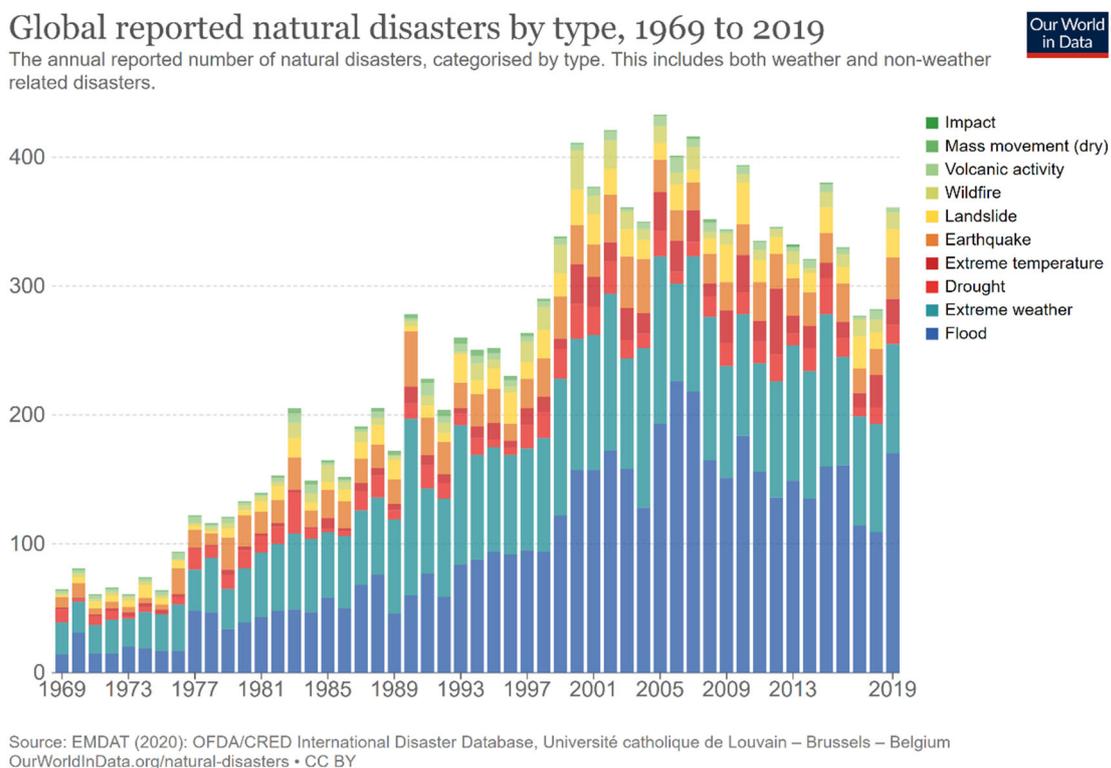
# Índice de tablas

Tabla 1: Resumen de los datos característicos de 4 simulaciones con cuatro configuraciones distintas .....	25
Tabla E.1: Parámetros empleados en el modelo de Green-Ampt.....	49
Tabla E.2 Tabla de tiempos de simulación para los distintos casos test con motas transversales .....	53
Tabla F.1: Datos característicos de la simulación con la configuración de malla gruesa.....	55
Tabla F.2: Datos característicos de la simulación con la configuración de malla fina .....	57
Tabla F.3: Datos característicos de la simulación con la configuración de malla fina doble .....	59
Tabla F.4: Datos característicos de la simulación con la configuración de malla fina doble con un factor aplicado a Manning de 1,15 .....	60
Tabla F.5: Datos característicos de la simulación con la configuración original de la malla empleando vertederos.....	70
Tabla F.6: Datos característicos de la simulación con las correcciones en la malla y los vertederos .....	72
Tabla F.7: Datos característicos de la simulación con la configuración corregida con un factor aplicado a Manning de 1,25 .....	74
Tabla F.8: Datos característicos de la simulación con la configuración corregida con un factor aplicado a Manning de 1,15 .....	75



## 1. Introducción

Los ríos no solo son una importante reserva de agua, también son una fuente de alimento y una vía de comunicación para el caso de los ríos navegables. Por ello se ha tratado durante años de controlar los ritmos y cursos de estos, se crean embalses, se construyen canales o se desvían cauces. Sin embargo, los fenómenos extremos no se pueden controlar o al menos no totalmente. Estos eventos extremos en ríos son los conocidos como eventos de avenida, causantes de inundaciones, destrucciones y en algunos casos incluso de muertes. En la Figura 1 se muestra la evolución en el número de desastres naturales producidos en los últimos 50 años a nivel mundial. Se observa como las inundaciones son el tipo de evento que genera la mayor cantidad de desastres en el mundo. Aparte de las posibles medidas de mitigación estructurales que se pueden ejecutar sobre el terreno, hay otro elemento fundamental, las simulaciones numéricas (Ritchie & Roser, 2014).



**Figura 1: Tipos de desastres naturales mundiales registrados desde el año 1969 hasta el año 2019**

Las crecidas, o eventos de avenida son fenómenos en los cuales el caudal de un río alcanza valores muy elevados en comparación con su valor promedio anual. Por ejemplo, en el río Ebro a su paso a por Zaragoza el valor promedio en el año 2018 era de  $289 \text{ m}^3/\text{s}$ ; mientras que el valor máximo registrado ese año durante la crecida del mes de abril fue de  $2037 \text{ m}^3/\text{s}$ , siete veces mayor que el promedio. Este incremento va asociado a un aumento del nivel del río capaz de producir la inundación de terrenos adyacentes, zonas urbanizadas, zonas de regadío y otras infraestructuras tanto naturales como artificiales. Se justifica así la necesidad de desarrollar modelos predictivos de la evolución temporal y espacial de estos eventos que ayuden a cuantificar los daños provocados. Para ello, los modelos de resolución numérica de las ecuaciones que gobiernan el flujo en lámina libre son una herramienta útil, que se ha ido desarrollando y mejorando en las últimas décadas (Brufau, Vázquez-Cendón, & García-Navarro, 2002).

La universidad de Zaragoza y la Confederación Hidrográfica del Ebro han colaborado recientemente en dos proyectos de transferencia UZ-CHE. Por un lado el proyecto 2017/0396 para la *instalación y mantenimiento del modelo de simulación 2D del Ebro en el sistema de ayuda a la decisión del centro de proceso de la cuenca*. Por otro lado, el proyecto 2019/0648 para la *implantación de un modelo bidimensional para simulación de tránsito en el tramo del río Ebro entre Zaragoza y Mequinenza*. Estos proyectos plantean el contexto y justificación del presente Trabajo Fin de Grado puesto que la aplicación a situaciones realistas de los modelos numéricos desarrollados en el grupo de investigación en Hidráulica Computacional ([ghc.unizar.es](http://ghc.unizar.es)) es compleja.

Dada la complejidad del estudio de este tipo de flujos, es necesario incorporar aproximaciones que faciliten la resolución de las ecuaciones. Las distintas aproximaciones consideradas dan lugar a conjuntos de ecuaciones que conforman los distintos modelos. A pesar de que el fenómeno es esencialmente 3D, es habitual estudiarlo a gran escala promediando las ecuaciones en la vertical (aproximación 2D); e incluso, considerando el promedio en la sección transversal (aproximación 1D). Estas simulaciones suelen implicar dominios de gran tamaño y escalas de tiempo prolongadas. Las aplicaciones prácticas requieren un compromiso entre precisión espacial y eficiencia computacional. Para lograr la resolución espacial necesaria, en muchos casos se necesitan mallas de cálculo bastante finas, por lo que se requiere más almacenamiento de datos, aumentando proporcionalmente el número de operaciones y reduciendo el tamaño de paso de tiempo permitido para cálculos explícitos.

En simulaciones previas a este trabajo se notó una discrepancia en los resultados obtenidos para el tramo Castejón-Zaragoza en la avenida de 2018. A la llegada a Zaragoza, el hidrograma de caudal simulado mostraba una pendiente mayor que el registrado por la CHE; además, la onda de caudal generada en la simulación era más rápida, observándose el valor máximo de caudal antes de lo previsto. Ante esto se plantean dos factores que podrían ser los causantes de estas diferencias en los resultados. El primero de ellos es la infiltración, que hasta ahora no ha sido considerada en las simulaciones del tramo. La segunda son las motas, ya que es posible que la representación de estas esté fallando a causa de errores en el Modelo Digital del Terreno.

Los objetivos principales de este trabajo se resumen a continuación:

- Cuantificar y evaluar la importancia del fenómeno de la infiltración en un evento de crecida.
- Evaluar la influencia de las motas en la forma de la onda de caudal a la salida de un tramo durante un evento de crecida.
- Comparar resultados y tiempos de cálculo ofrecidos por una modelización de las motas como topografía y como condición de contorno interna

Para lograr estos objetivos se va a estudiar el comportamiento en el tramo del río Ebro Castejón-Zaragoza; aunque primero se analizarán los resultados sobre un tramo más simple. Para la simulación, se utiliza el programa RiverFlow2D desarrollado entre el Grupo de Hidráulica Computacional de la Universidad de Zaragoza y la empresa Hydronia LLC.

## 2. Caso de estudio

### 2.1. Dominio

La cuenca del Ebro recorre la península Ibérica desde el Norte hasta el Este. Naciendo en el Pico Tres Mares, Cantabria y desembocando en Deltebre, Cataluña. Este caso de estudio está establecido en el tramo del río Ebro Castejón-Zaragoza. Se trata de una superficie de  $719 \text{ km}^2$  y una distancia de  $90 \text{ km}$  en línea recta desde Castejón hasta Zaragoza; sin embargo, la longitud total del cauce se aproxima a los  $130 \text{ km}$ .

Para realizar una simulación son necesarios: un modelo digital del terreno (MDT), encargado de dar las cotas a las celdas de la malla; un mapa de usos del terreno que permita definir los coeficientes de rugosidad de Manning; uno o varios hidrogramas de entrada  $Q = Q(t)$ , obtenidos de las bases de datos de la confederación hidrográfica del Ebro; así como las curvas de aforo  $Q = Q(h)$  que serán impuestas a la salida del sistema.

### 2.2. Modelo digital del terreno

Los modelos digitales del terreno son un modelo discreto donde se representa la cota del terreno  $z_b$  respecto a un sistema de referencia. Los MDT empleados han sido obtenidos de las bases cartográficas del Instituto Geográfico Nacional. Son generados gracias a la tecnología LIDAR (*Laser Imaging Detection and Ranging*) y son tratados para eliminar posibles errores en las cotas debidos a la vegetación u otros elementos obstaculizadores. Hay distintas resoluciones, en este caso se va a emplear una resolución de 5 por 5 metros

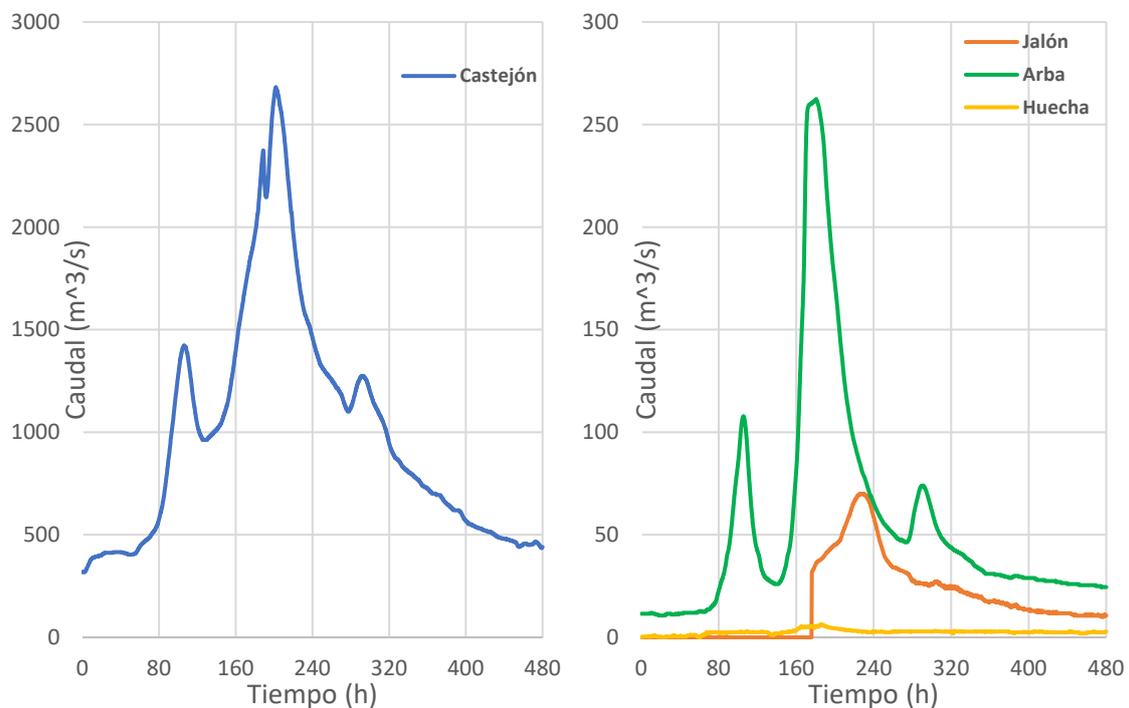
Para transformar el cauce en un MDT es necesario conocer el fondo de este, pero el río Ebro nunca está vacío y por tanto no se puede hacer por medio de la tecnología LIDAR. La obtención de este modelo requiere del establecimiento de una serie de secciones a lo largo de todo el curso del río. A estas se las denomina secciones batimétricas y pueden ser trasladadas a un programa encargado de interpolarlas, generando así un MDT. Una vez se tienen los dos MDT de cauce y llanura listos, se procede a refundirlos. Hay varias opciones para hacer esto pero la que se ha empleado en este trabajo consiste en juntar ambos modelos quedándonos con los puntos de menor cota. Para esto se ha empleado la herramienta *r.series* de GRASS que se encuentra disponible en el programa QGIS empleado para la elaboración del caso (ver Anexo C).

### 2.3. Mapa de usos del terreno

El terreno no solo debe estar representado por su cota; sino que también debe de ser representado el tipo de superficie por la que va a transcurrir el flujo. Esto permite asignar un coeficiente de rozamiento por medio del número de Manning. Para la creación de un mapa de rozamiento se debe partir de un mapa de usos del terreno. Este se obtiene del Sistema de Información de Ocupación del Suelo de España (SIOSE). Lo que se obtiene es un mapa con una serie de códigos asociados a distintas secciones del terreno y que están relacionados con el tipo de suelo, vegetación. El mismo SIOSE provee de una guía para zonas inundables donde se da la correspondencia entre esos códigos y el número de Manning al que están asociados. Hay cerca de 40 tipos de superficie distintos con sus correspondientes coeficientes. Todo este proceso se realiza de nuevo con herramientas provistas por el programa QGIS que permiten configurar un pequeño programa que transforme los índices de las zonas en los coeficientes de Manning (ver Anexo D).

## 2.4. Hidrogramas

Se va a analizar la avenida ocurrida entre el 5 y el 25 de abril de 2018. Para ello será necesario conocer cómo evolucionó el caudal durante ese periodo en el punto de entrada del dominio. Es a esto a lo que se denomina hidrograma y será impuesto como condición de contorno a la entrada. Para obtener estos hidrogramas la CHE tiene repartidas distintas estaciones a lo largo de toda la cuenca del Ebro donde se registran datos de calado y caudal. Además, para los eventos de crecida se toman los datos del caudal máximo *in situ* para evitar posibles errores de los sistemas de medida. Todos estos datos se pueden obtener del Sistema Automático de Información Hidrológica o SAIH de la CHE. Es importante saber los puntos en los que se necesitarán esos hidrogramas. En este caso se analiza el tramo Castejón-Zaragoza, por tanto serán necesarios los de ambos puntos además de los de los afluentes que nutren al Ebro. Para este caso fueron incluidos el río Arba de la margen norte y los ríos Jalón y Huecha de la margen sur.

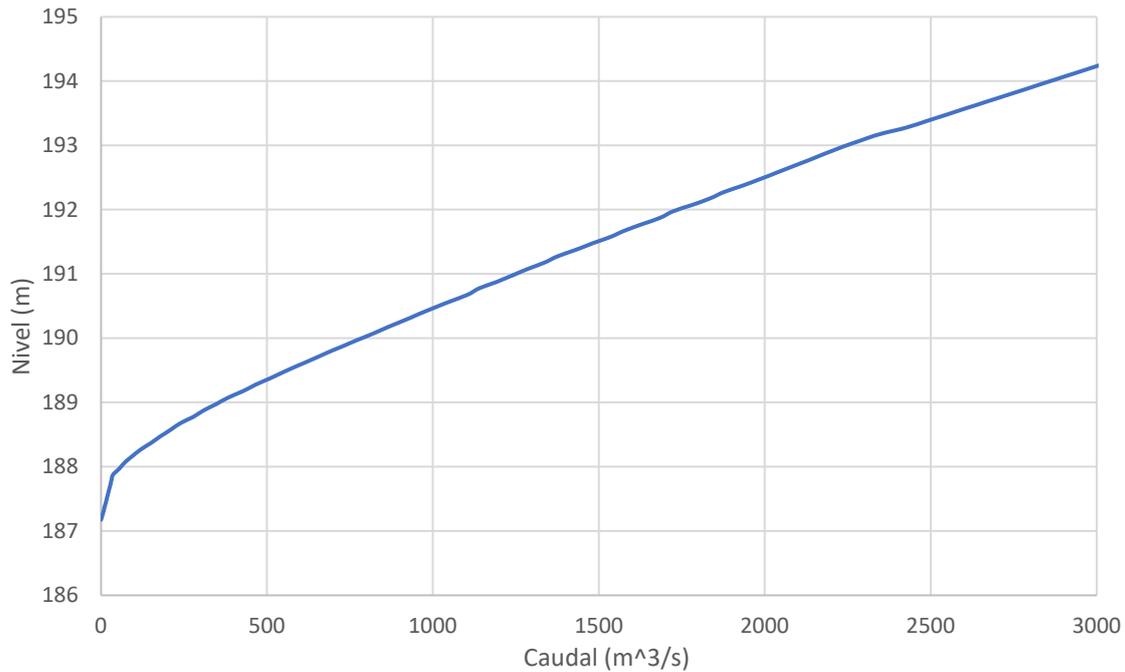


**Figura 2: Hidrogramas provistos por la CHE de las entradas del Ebro y sus afluentes**

El tiempo base del hidrograma fue 480 horas, partiendo de un estado estacionario y regresando a ese mismo estado. El pico del hidrograma se da al inicio del noveno día, 201 horas y media después del comienzo de la simulación, y tiene un caudal máximo de  $2682 \text{ m}^3/\text{s}$ .

## 2.5. Curva de aforo

Las curvas de aforo establecen la relación caudal-calado  $Q = Q(h)$  en una sección de control del cauce. La obtención de las curvas de aforo se apoya fundamentalmente en mediciones precisas de caudal que se realizan periódicamente en las estaciones de aforo. En cada aforo directo debe constar el caudal resultante de la medición y el nivel que marca la escala en el momento de la medida. Cuando se tienen suficientes aforos directos hechos se traza la curva de aforo. Estos valores también están provistos por la CHE.



**Figura 3: Curva de Aforo en Zaragoza**

## 2.6. Condiciones iniciales

Para resolver el modelo numérico a lo largo del tiempo se requiere de unas condiciones iniciales de las variables del flujo de las que partir,  $t = 0$  s. Para que el caso sea lo más realista posible se hace una primera simulación donde se parte de un lecho seco; es decir, no hay calado ni velocidad en ningún punto del dominio y las condiciones de contorno en las entradas son un caudal constante igual al primer valor de los hidrogramas planteados anteriormente. Con esto se realiza una simulación equivalente a 3 días de convergencia a un estado estacionario donde se obtienen las condiciones de partida, velocidades ( $u$ ,  $v$ ) y calado ( $h$ ) desde las que comenzará el caso final con los hidrogramas de avenida.

## 2.7. Malla de cálculo

Los datos del MDT están asociados a superficies cuadradas de  $25 m^2$ . Puesto que se desea resolver sobre una malla triangular no estructurada, la malla empleada se conforma de elementos triangulares de diversas superficies. Para asignar cotas a esas celdas de la malla se promedia los valores de las cotas del MDT que se encuentran dentro de cada celda. Esto provoca la necesidad de mallas muy finas en las zonas donde se requiere que el MDT esté representado sobre la malla con gran precisión. Sin embargo, una malla excesivamente refinada puede suponer un problema de lentitud en el proceso de cálculo. Se debe llegar por tanto a un compromiso, tratando de refinar únicamente las zonas que realmente sean sensibles a las elevaciones del MDT y dando tamaños de celda groseros en zonas muy alejadas que no vayan a verse implicadas en la simulación. La definición del tamaño de las celdas se hace a partir de la longitud de arista de estas. Para el mallado se ha empleado el programa QGIS que contiene el mallador GMSH. Este genera mallas triangulares no estructuradas a partir de las indicaciones que dé el usuario como se explica en el Anexo C.

### 3. Modelo de simulación

La realización de simulaciones numéricas requiere de modelos matemáticos que representen el comportamiento del agua. En este TFG se emplean las ecuaciones de aguas poco profundas o *Shallow Water Equations* (SWE). Para la resolución de las ecuaciones de aguas poco profundas se hace uso del programa de modelización RiverFlow2D. Este utiliza para realizar los cálculos el método numérico de los volúmenes finitos, que se resuelve en la malla de cálculo triangular. Dicha malla debe ajustarse al terreno y supone una discretización del MDT.

#### 3.1. Hipótesis y ecuaciones de flujo

Debido a las características geométricas de un río, es habitual trabajar bajo la hipótesis del modelo de aguas poco profundas. Por lo tanto la evolución del flujo en ríos y llanuras aluviales se puede describir mediante las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento promediadas en la vertical junto a la hipótesis de distribución de presión hidrostática.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} + \frac{\partial G(U)}{\partial y} = S(U) \quad (1)$$

con

$$U = \begin{pmatrix} h \\ hu \\ hv \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} hu \\ hu^2 + g \frac{h^2}{2} \\ huv \end{pmatrix}, \quad G = \begin{pmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + g \frac{h^2}{2} \end{pmatrix}, \quad S = \begin{pmatrix} -f \\ gh(S_{0x} - S_{fx}) \\ gh(S_{0y} - S_{fy}) \end{pmatrix} \quad (2)$$

donde  $h$ ,  $hu$  y  $hv$  son las variables conservadas: calado, caudal unitario en el eje x y caudal unitario en el eje y, respectivamente; a su vez,  $f$  es la tasa de infiltración (ver Anexo D). La pendiente del lecho representa la evolución espacial del nivel,  $z_b$ :

$$S_{0x} = -\frac{\partial z_b}{\partial x} \quad S_{0y} = -\frac{\partial z_b}{\partial y} \quad (3)$$

y la pendiente de fricción se define en término del coeficiente de fricción de Manning,  $n$ , como:

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

#### 3.2. Discretización

El sistema de ecuaciones (1) no tiene solución analítica. Se requiere un método numérico definido en una malla computacional para poder resolver el problema. Se emplea un método numérico de los volúmenes finitos explícito y de primer orden (García-Navarro *et al.* 2019) y el sistema de ecuaciones (1) se integra en cada celda, actuando como un volumen de control  $\Omega$  limitado por el contorno  $C$ :

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} U d\Omega + \oint_C (E \cdot n) dl = \int_{\Omega} S d\Omega \quad (5)$$

donde  $(E \cdot n)$  representa los flujos en la dirección normal a  $C$ . Este flujo participa a través de la matriz Jacobiana, sus valores propios,  $\tilde{\lambda}^m$ , y sus vectores propios,  $\tilde{e}$ . La expresión en cada celda de la malla,  $i$ , tiene la siguiente forma:

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

donde  $A_i$  es el área de la celda,  $l_k$  representa la longitud de la arista de la celda y  $\tilde{\gamma}_k$  representa de forma compacta los flujos y términos fuente en cada arista de la celda,  $k$ . El superíndice negativo indica las contribuciones entrantes que llegan a cada celda, siguiendo la metodología *upwind*. Por último,  $\Delta t$  es el paso de tiempo, que no es constante durante la simulación, sino que se calcula de forma dinámica:

$$\Delta t = CFL \min_{k,m} \frac{\delta x_k}{\tilde{\lambda}_k^m} \quad (7)$$

donde

$$\delta x_k = \min(\chi_i, \chi_j) \quad \chi_i = \frac{A_i}{\max_{k=1,NE} l_k} \quad (8)$$

y  $CFL$  es el parámetro adimensional encargado de controlar la estabilidad bajo el criterio  $0 < CFL \leq 1$  para métodos numéricos explícitos. La definición (7) muestra la dependencia del paso de tiempo con el tamaño de la malla y las propiedades del flujo. El método numérico está formulado para asegurar soluciones correctas para un estado estacionario y buen comportamiento en presencia de frentes seco/mojado evitando siempre un calado negativo y asegurando la conservación del volumen de agua.

### 3.3. Condiciones de contorno

La ecuación (6) representa el método de actualización de las variables en el interior de cada celda del dominio con los flujos entrantes que provienen de las celdas vecinas. Sin embargo, las celdas que se encuentran en el contorno carecen de información ya que al menos uno de sus bordes no tiene una celda vecina. Por tanto, son necesarias unas condiciones de contorno que suplan esa falta de información. En este caso, esas condiciones serán aplicadas directamente en el centro de las celdas límite y serán de dos tipos, externas e internas.

#### 3.3.1. Externas

Las condiciones de contorno externas establecen la información de entrada y salida para los límites del dominio. Para la simulación de ríos, la condición de contorno externa empleada habitualmente es un hidrograma de caudal. Para ese caso, el caudal unitario se impone en el centro de la celda del contorno siguiendo la dirección normal hacia el borde del límite de entrada, mientras que el calado es dado por el método numérico (6). Como condición de contorno a la salida, las curvas de aforo son habituales, ya que introducen la información de las secciones transversales a la salida, dando la relación entre el calado y el caudal. A partir del caudal dado por el método numérico (6), la curva de aforo se usa para evaluar el nivel del agua en la celda límite.

### 3.3.2. Internas

La presencia de una estructura hidráulica interna puede ser modelada mediante una condición matemática impuesta sobre una línea dentro del dominio computacional (Echeverribar *et al.* 2019). A esto se le denomina condición de contorno interna. A cada par de celdas que comparten una arista en esa línea interna se las considera como celdas del límite interno. Como en el caso de las celdas del límite externo, estas celdas se actualizan usando información del método numérico y de la condición de contorno interna. Se asume que, dadas dos celdas, el flujo va de izquierda a derecha, siendo la celda de la izquierda (celda 1) la que está aguas arriba y la celda de la derecha (celda 2) la que está aguas abajo. Durante todo el proceso se asume que  $d_1 > d_2$ , siendo  $d = h + z_b$  el nivel de la superficie libre.

Los valores del nivel de la superficie de agua son provistos por el esquema numérico y son los empleados para evaluar el caudal a través de la mota por medio de una expresión externa. El cálculo del flujo está gobernado por  $H = d - h_{z,weir}$ , i.e., la diferencia entre el nivel del agua y la cresta del dique, que puede estar definida a ambos lados del dique. Además, hay varias situaciones que se deben tener en cuenta (ver Anexo A).

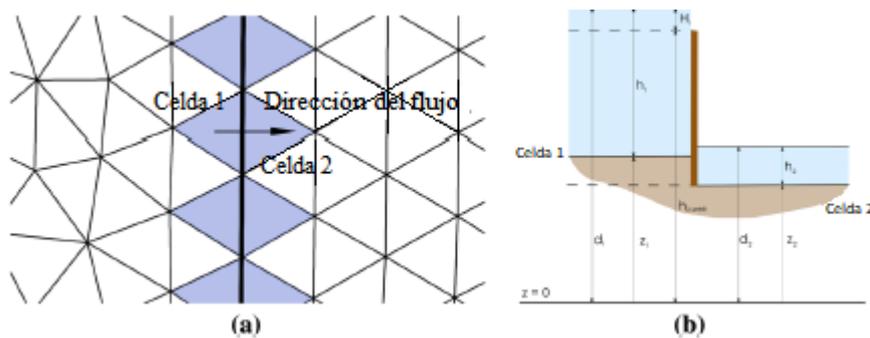


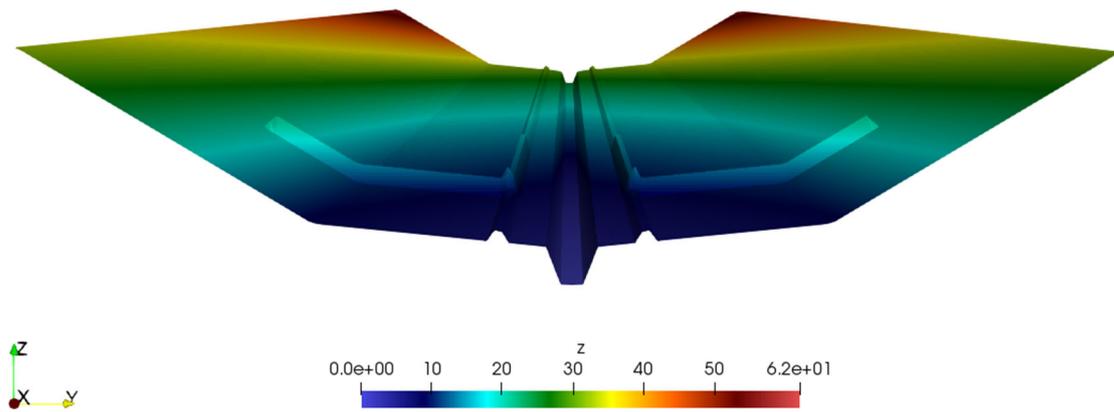
Figura 4: Diagrama del flujo a través de un dique en una malla triangular 2D. Vista en planta (a) y vista lateral (b).

## 4. Resultados

A continuación se van a mostrar los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas. De cada simulación se obtienen grandes cantidades de información; caudales, niveles, volúmenes de infiltración, áreas de inundación, etc. Toda esta información se encuentra detallada en el Anexo E, este capítulo solo mostrará un breve resumen de los casos preliminares para el tramo simplificado y de los casos en el tramo completo Castejón-Zaragoza.

### 4.1. Casos test preliminares en tramo simplificado

Los casos test preliminares se definen en una región rectangular con una longitud de 5 km y una anchura de 1,5 km, recorrida por un cauce recto de sección transversal rectangular. Cuenta con motas longitudinales (paralelas al cauce) y motas transversales (perpendiculares al cauce) que se encuentran al final del recorrido. En la Figura 5 se muestra una imagen en 3D donde se puede observar el dominio de este caso test preliminar. Este caso ha sido creado de manera artificial con la intención de evaluar la sensibilidad de los resultados a la infiltración y a la presencia y posición de las motas.



**Figura 5: Representación 3D del tramo simplificado**

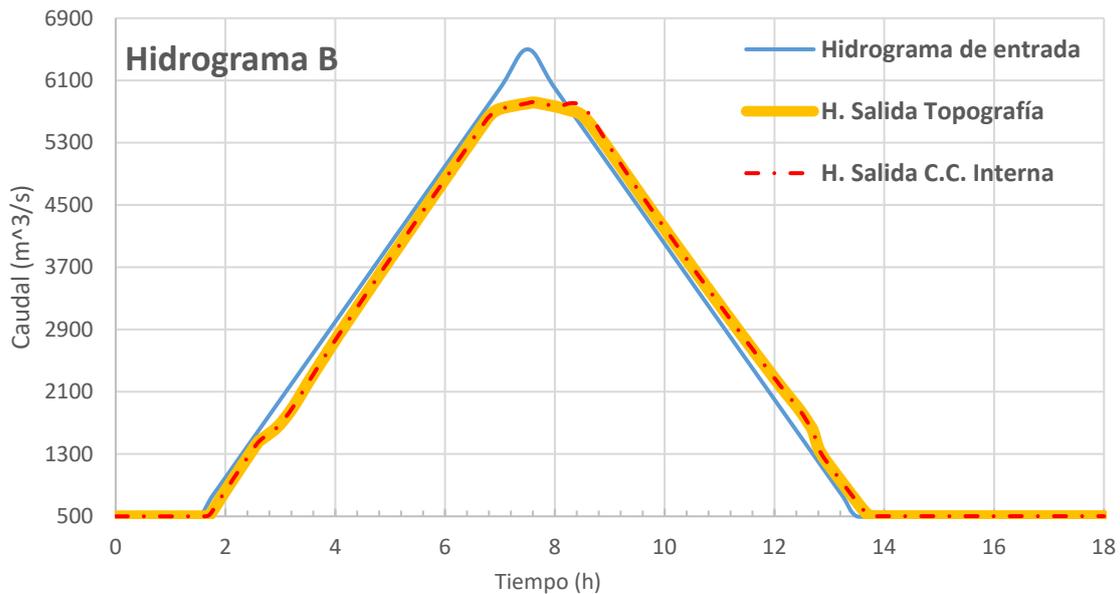
Se van a comentar dos casos, en el primero de ellos se analizarán los efectos de la infiltración. En el segundo de ellos no se tendrá en cuenta la infiltración y se analizará la sensibilidad de los resultados a la existencia de motas y su orientación.

#### **4.1.1. Sensibilidad a la infiltración**

Si el modelo no cuenta con motas transversales que generen un dique capaz de bloquear el avance del agua hacia la salida del dominio, los efectos de la infiltración son despreciables. Según los resultados obtenidos, para una duración de 32 horas, de todo el volumen que entra al dominio, únicamente un 0,305 % se infiltra al terreno (ver Anexo F). En presencia de motas transversales, los porcentajes de volumen infiltrado son similares, por tanto siguen siendo despreciables. Además, se observa que, a mayor tiempo de simulación, mayor volumen entrante al sistema y menor tanto por ciento de volumen infiltrado. Vista la poca relevancia de la infiltración, esta se va a eliminar a partir de ahora del resto de simulaciones para reducir tiempos de simulación. Como ejemplo de esta reducción, para una simulación de 16 horas y 21.000 celdas sin infiltración, se obtuvo una reducción de unos 35 minutos respecto a la hora y 20 minutos del mismo caso con infiltración. Apartir de este caso no se considerará que haya infiltración.

#### **4.1.2. Sensibilidad a la existencia de motas y su orientación**

La colocación de motas transversales que puedan actuar como diques genera comportamientos interesantes sobre el hidrograma que nos sugieren efectos extrapolables para la comprensión del caso real. En la Figura 6 se muestran los resultados para una avenida con una duración de 12 horas; sobre la hora 7 se produce una meseta en el hidrograma hasta la hora 9. Este efecto se debe al desbordamiento de las motas y el posterior estancamiento en las motas transversales. Este comportamiento es el mismo que se observa en la avenida del año 2018 que es el caso de análisis de este trabajo.

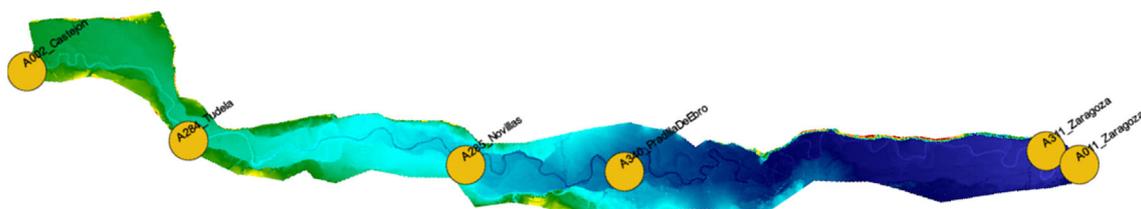


**Figura 6: Hidrogramas correspondientes al caso con tiempo de base igual a 12 horas**

Es interesante comentar la influencia computacional que tienen las distintas formas de representar las motas ya que, para una ligera diferencia de 1000 celdas sobre un total de 44.000, se logra una reducción en el tiempo de simulación del 12 % en el caso de tiempo base 24 horas (ver Anexo E). Esta reducción se logra representando las motas como condiciones de contorno internas en lugar de hacerlo como topografía. Este comportamiento es debido a la dependencia que tiene el paso de tiempo dinámico en el tamaño de las celdas. Dado que las celdas necesarias para la representación discreta de las motas como topografía son las más pequeñas, su eliminación no solo reduce el número total de celdas sino que incrementa el mínimo paso de tiempo compatible con la estabilidad numérica.

#### 4.2. Casos test en tramo del Ebro Castejón-Zaragoza

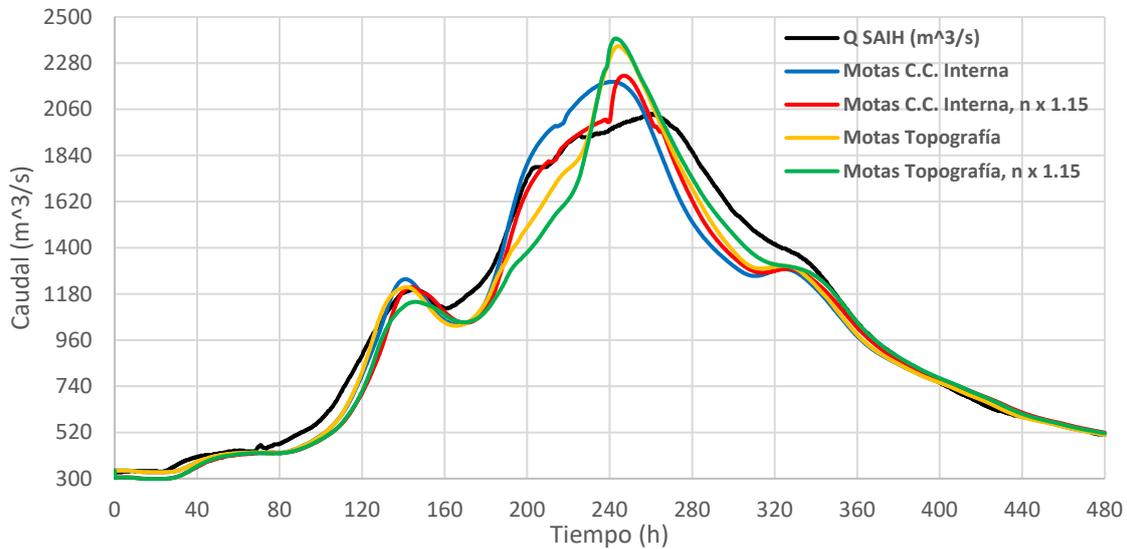
A partir de la experiencia ganada con los casos sintéticos, para el tramo Castejón-Zaragoza, Figura 7, se han planteado varias situaciones que se han analizado a fondo y se recogen en el Anexo F. Allí se muestran comparaciones de la medida y simulación de las manchas de agua y de los niveles de las estaciones de aforo repartidas a lo largo del tramo. Aquí, por razones de síntesis, simplemente se van a comentar cuatro casos representativos. En dos de ellos se plantean las motas como topografía y en los otros dos como condición de contorno interna. Dentro de cada modelo se muestran los resultados correspondientes a los valores de Manning originales y los resultados si se modifica el coeficiente de Manning aplicándole un factor de 1,15.



**Figura 7: Representación 2D del tramo Castejón-Zaragoza junto a los aforos situados el tramo**

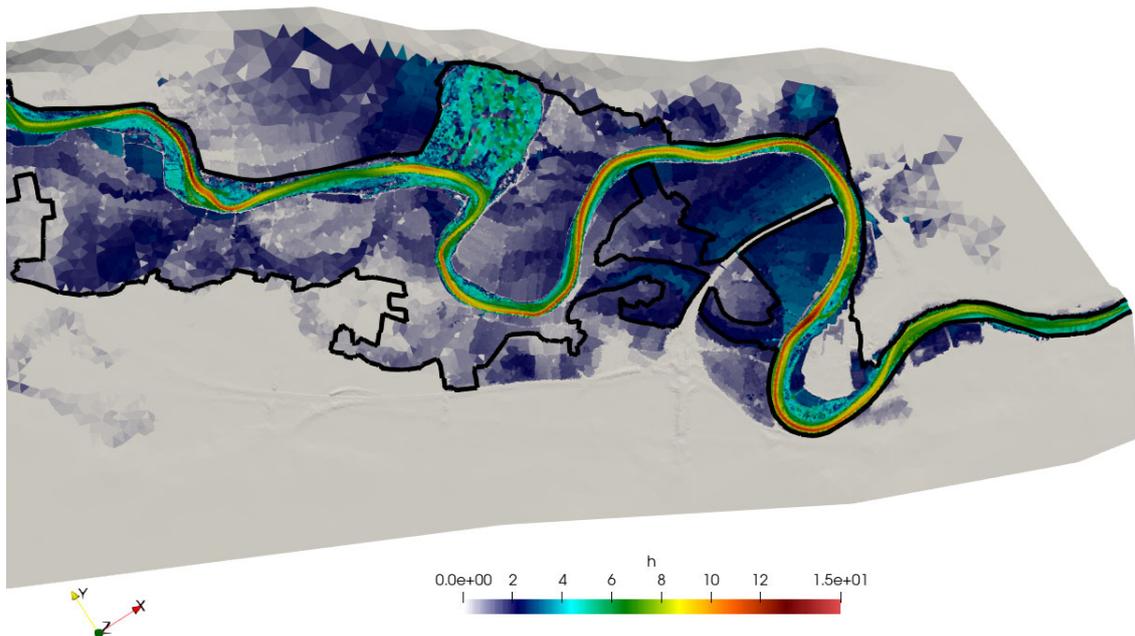
Si se observan las figuras correspondientes a los hidrogramas de salida en Zaragoza, Figura 8, se puede apreciar como el comportamiento de las configuraciones

que han modelizado las motas como topografía es peor. Estas figuras no tienden a formar una meseta entre la hora 200 y la 280, a diferencia de las configuraciones en las que se ha representado las motas como condiciones de contorno interna. Aun así, ninguna de las configuraciones logra ajustarse con gran precisión a los valores registrados por el SAIH.

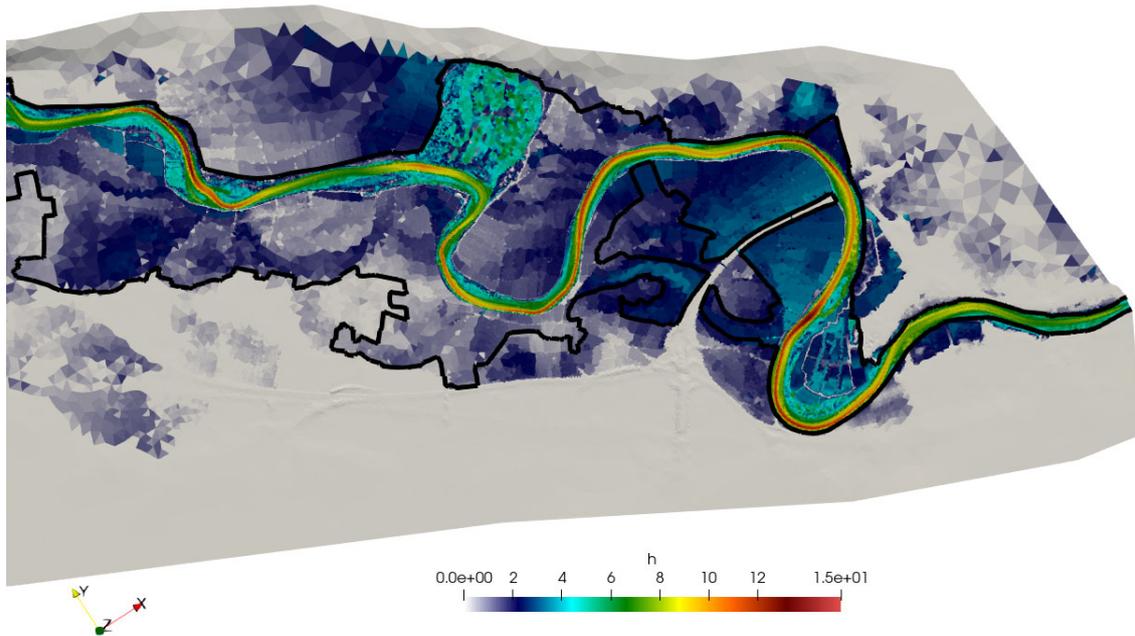


**Figura 8: Caudales a la salida de Zaragoza para 4 configuraciones distintas**

En las imágenes de la Figuras 9 y 10 se pueden ver las manchas de agua en la llegada a Zaragoza en el momento en el que la mancha de agua es máxima, 270 horas. Estas imágenes se corresponden a los casos con representación topográfica de las motas, se ven también unas líneas negras que denotan los límites reales de la inundación. Como se observa, estas líneas son sobrepasadas en varias zonas, mostrando que el efecto de las motas no es el adecuado. Además, se ve en la Figura 10 como la aplicación de un factor de 1,15 sobre el coeficiente de Manning provoca una expansión de las manchas con respecto al caso anterior mayor, Figura 9. El calado también aumenta en este segundo caso con respecto al primero.

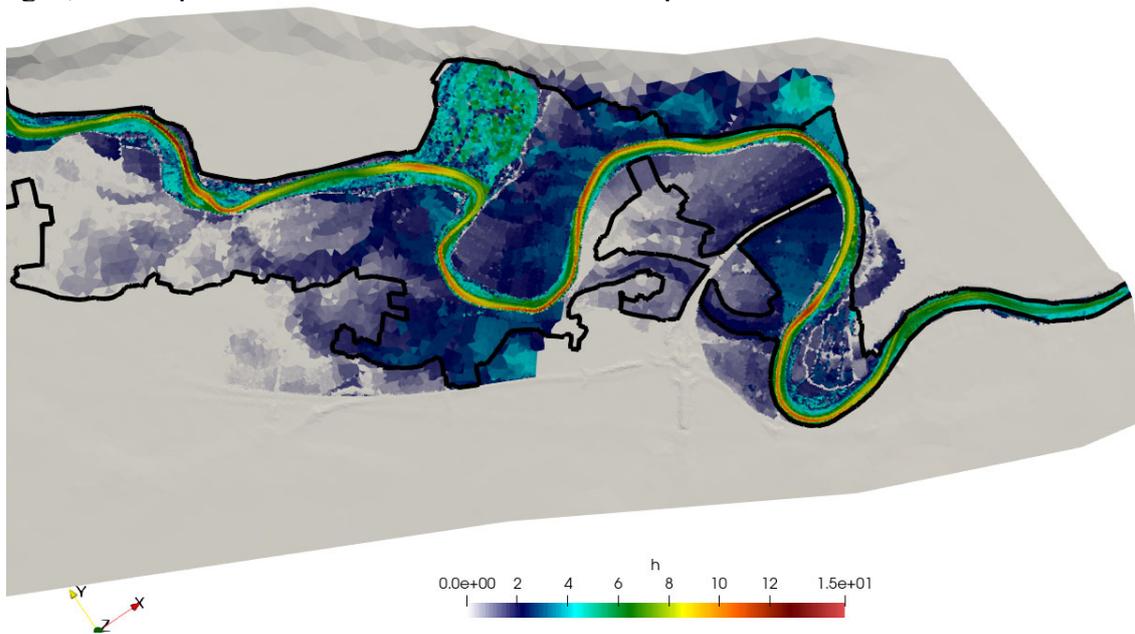


**Figura 9: Manchas de inundación en Zaragoza con motas como topografía.**

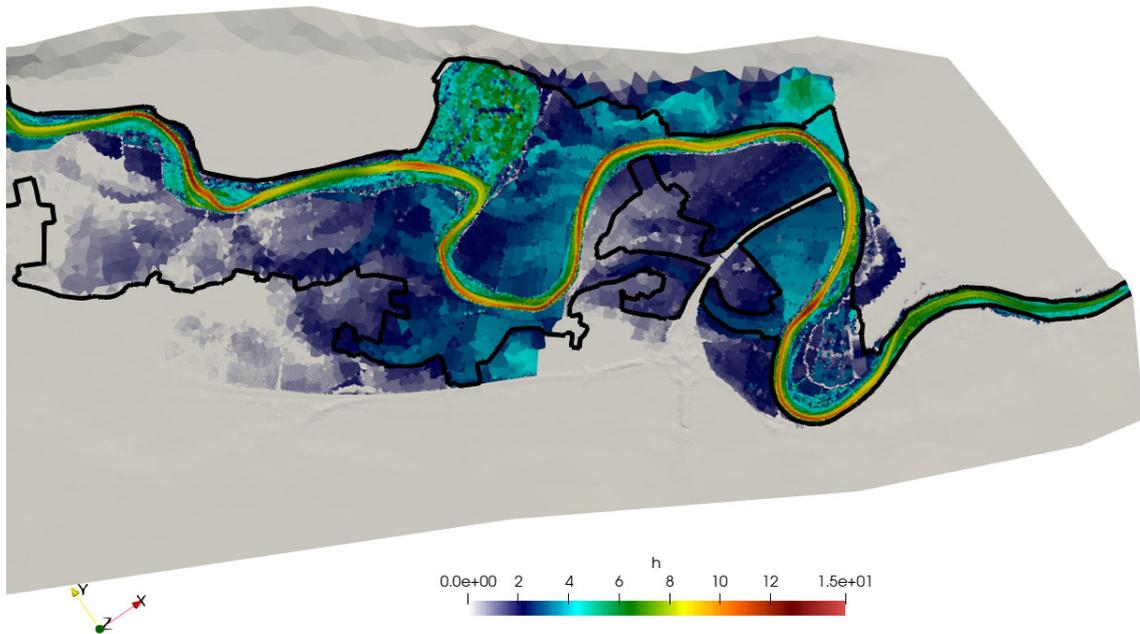


**Figura 10: Manchas de inundación en Zaragoza con motas como topografía. Manning x 1,15**

Por otra parte, en las Figura 11 y 12 se muestran las imágenes correspondientes a las manchas de inundación para los casos en los que las motas se representan como c.c. internas. En estas imágenes se observa una mejora sustancial en comparación con las de las Figuras 9 y 10, esto se debe a un mayor efecto de las motas debido a una mejor representación de estas. El buen efecto de las motas también provoca que el calado sea mayor en las zonas que se encuentran entre el cauce y las motas. Comparando la situación entre un caso donde se aplica un factor de 1,15 al coeficiente de Manning, Figura 12, y uno donde no, Figura 11, no se puede decidir con claridad cuál es el mejor de ambos. Vemos manchas con unas extensiones muy similares, pero con un calado ligeramente mayor para el caso en el que se aplica el factor al coeficiente de Manning. Un coeficiente de Manning mayor supone un mayor rozamiento, y por tanto un mayor estancamiento del agua, de ahí que el calado aumente en este caso respecto al caso anterior.



**Figura 11: Manchas de inundación en Zaragoza con motas como c.c. interna.**



**Figura 12: Manchas de inundación en Zaragoza con motas como c.c. interna. Manning x 1,15**

Como se muestra en la Tabla 1, las motas representadas como topografía tienen tiempos de simulación en torno al doble del de los casos en los que se representan como condiciones de contorno internas. Además, los valores máximos de caudal son mayores también; a priori esto es algo negativo, ya que se sabe que el valor máximo esperable es de  $2037 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Motas como topografía		Motas como C.C. Interna	
Nº de celdas	T. Simulación	Nº de celdas	T. Simulación
1.088.881	42 h	578.087	20 horas
S. prom, de las celdas	Caudal máximo	S. prom, de las celdas	Caudal máximo
428 $\text{m}^2$	2.361 $\text{m}^3/\text{s}$	807 $\text{m}^2$	2.230 $\text{m}^3/\text{s}$
Motas como topografía ( $n \cdot 1,15$ )		Motas como C.C. Interna ( $n \cdot 1,15$ )	
Nº de celdas	T. Simulación	Nº de celdas	T. Simulación
1.088.881	44 h	578.087	23 horas
S. prom, de las celdas	Caudal máximo	S. prom, de las celdas	Caudal máximo
428 $\text{m}^2$	2.398 $\text{m}^3/\text{s}$	807 $\text{m}^2$	2.220 $\text{m}^3/\text{s}$

**Tabla 1: Resumen de los datos característicos de 4 simulaciones con cuatro configuraciones distintas**

## 5. Conclusiones y trabajo futuro

Al comienzo de esta memoria se planteaban tres objetivos: analizar la importancia de la infiltración en un fenómeno de crecida, evaluar la influencia de las motas en la forma de la onda de caudal a la salida de un tramo durante un evento de crecida y comparar dos metodologías de modelización de motas. Los tres han sido desarrollados y a continuación se van a comentar las conclusiones obtenidas.

En primer lugar, se ha determinado que, la influencia de la infiltración sobre un evento de crecida es mínima. El volumen infiltrado es tan pequeño en comparación con el volumen de agua que entra en el dominio, que su efecto sobre un hidrograma de salida es despreciable. Además se ha determinado que a mayor tiempo de duración del análisis, menor será la relación entre ambos volúmenes.

El segundo de los objetivos buscaba encontrar una relación entre las motas y el comportamiento de los hidrogramas de salida. Se ha visto en este trabajo que las motas tienen efectos reales importantes sobre estos. Cuando se produce el desbordamiento de una mota, generalmente se está ante un volumen de agua que no regresará rápidamente al cauce; por tanto, este volumen de agua queda redistribuido en el hidrograma de salida. Esto genera una reducción de los valores máximos del hidrograma de salida con respecto a los de entrada. Si, además, el volumen desbordado es lo suficientemente grande, se puede llegar a observar como lo que originalmente era un pico en el hidrograma de entrada, ahora es una meseta en el de salida. También se ha visto cual es el efecto si una de las llanuras de inundación se llena y comienza a retornar agua al cauce aguas abajo. Esto se ha visto en la entrada a Zaragoza, donde las llanuras próximas a la Expo se veían inundadas por un volumen de agua que entraba aguas arriba, desbordando aguas abajo. En este caso, el efecto que se apreciaba era una crecida repentina debido al volumen de agua que retorna al cauce.

Por último, el tercer objetivo trataba de comparar el uso de condiciones de contorno internas como metodología para representar motas frente al uso de la topografía. En este punto los resultados no dejan lugar a dudas. El uso de condiciones de contorno internas es sustancialmente mejor. El uso de la topografía requiere mallas mucho más finas que llevan a tiempos de simulación mayores. En particular, para los casos de análisis de este trabajo se tarda el doble en finalizar las simulaciones con esta metodología. Además, la topografía es muy sensible al MDT, por tanto requiere de modelos precisos que no contengan errores de configuración ni de la malla, ni del propio MDT, donde los errores son habituales debido a diversas circunstancias. Sin embargo, la configuración de las motas como condiciones de contorno internas es más simple y no requiere de tanta precisión en el posicionamiento de estas. A estas, los errores locales del MDT no les afectan porque se asignan los valores de altura correctos manualmente; pero es cierto que se puede requerir de varias iteraciones hasta encontrar las alturas adecuadas de las motas. Este mismo proceso se podría seguir modificando el MDT para corregir las alturas de las motas y se debería llegar con ello a los mismos resultados. Sin embargo, este proceso requeriría más tiempo del que ha sido empleado en modificar los 54 ficheros asociados a las condiciones de contorno. Además, el tiempo de simulación sería el doble según los resultados obtenidos en este trabajo, ya que no sería posible reducir el número de celdas de la malla.

De cara al futuro, sería interesante buscar los puntos conflictivos que no permiten aproximar los resultados a los valores provistos por el SAIH. Esto requeriría de algunas modificaciones en la malla y las alturas de las motas. Haciendo uso de las motas como condiciones de contorno internas se puede establecer la posibilidad de que estas se rompan. Parte de un futuro trabajo podría estar en buscar cual sería el efecto de estas roturas e incluso si las discrepancias en los resultados actuales podrían estar relacionadas con este fenómeno.

## 6. Referencias

- Brufau, P., Vázquez-Cendón, M., & García-Navarro, P. (2002). A numerical model for the flooding and drying of irregular domains. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 39: 247-275.
- Campo, A. S. (2019). *Cuantificación de la infiltración durante una inundación en el tramo Castejón de Ebro–Zaragoza del río Ebro mediante simulación numérica*. Universidad de Zaragoza.
- Echeverribar, I. (2015). *Estudio de soluciones para mitigar inundaciones en el tramo medio del río Ebro mediante simulación numérica*. Trabajo fin de grado, Universidad de Zaragoza.
- Echeverribar, I., Morales-Hernández, M., Brufau, P., & García-Navarro, P. (2019). 2D numerical simulation of unsteady flows for large scale floods prediction in real time. *Advances in Water Resources*, 134, 103444.
- Echeverribar, I., Morales-Hernandez, M., Brufau, P., & García-Navarro, P. (2019). Use of internal boundary conditions for levees representation: application to river flood management. *Environmental Fluid Mechanics*, 1253-1271.
- Fernández-Pato, J. (2019). *Performance assessment of Finite Volume methods in transient simulations of hydraulic processes*. Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza.
- Fernández-Pato, J., Caviedes-Voullième, D., & García-Navarro, P. (2016). Rainfall/runoff simulation with 2D full shallow water equations: Sensitivity analysis and calibration of infiltration parameters. *Journal of Hydrology*, 536, 496-513.
- García-Navarro, P., Murillo, J., Fernández-Pato, J., Echeverribar, I., & Morales-Hernández, M. (2019). The shallow water equations and their application to realistic cases. *Environmental Fluid Mechanics*, 19, 1235-1252.
- Hydronia LLC. (2020). *RiverFlow2D Two-Dimensional Flood and River Dynamics Model*.
- Muñoz Carpena, R., & Ritter Rodríguez, A. (2005). *Hidrología Agroforestal*.
- Ritchie, H., & Roser, M. (2014). *Natural Disasters*. Our World In Data. Obtenido de <https://ourworldindata.org/natural-disasters>



# Anexos

## A. Modelo numérico para vertederos

Hay varias situaciones que se deben tener en cuenta a la hora de evaluar la descarga a través de la mota.

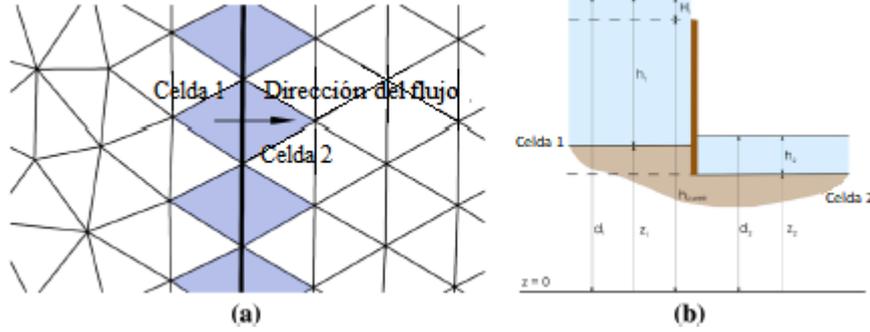


Figura A.1: Diagrama del flujo a través de un dique en una malla triangular 2D. Vista en planta (a) y vista lateral (b).

1. Si  $h_{z,weir} > \max(d_1, d_2) \rightarrow H_1^n < 0$ , el flujo normal es nulo y el dique se comporta como una pared sólida.

$$q_1^{n+1} = q_2^{n+1} = q = 0 \quad (A.1)$$

2. Si  $(d_1, d_2) > h_{z,weir} \rightarrow H_1^n, H_2^n > 0$ , la descarga a través del dique se calcula como.

$$q_1^{n+1} = q_2^{n+1} = q = C_d \frac{2}{3} \sqrt{2g} (H_1^n)^{3/2} \left( 1 - \left( \frac{H_1^n}{H_2^n} \right)^{3/2} \right)^{0,385} \quad (A.2)$$

Donde  $C_d$  es un coeficiente de pérdida de energía que debe de ser calibrado.

3. Si solo  $d_1 > h_{z,weir} \rightarrow H_1^n > 0$ , la misma ley de descarga con  $H_2 = 0$  es empleada para calcular el flujo a través del dique.

$$q_1^{n+1} = q_2^{n+1} = q = C_d \frac{2}{3} \sqrt{2g} (H_1^n)^{3/2} \quad (A.3)$$

El valor  $C_d$  es el mismo que se emplea en la ecuación anterior. En este caso no solo se debe atender a la descarga, sino que también se debe de tener en cuenta el calado en la celda aguas abajo. El procedimiento difiere dependiendo de  $h_2^n$  y  $h_{cr} = h_{cr}(q, h_2)$ , que es el calado crítico asociado a  $q$ .

- a. Si  $h_2^n > h_{cr}$ , solo se impone la descarga y  $h_2^{n+1}$  es proporcionado por el esquema numérico.
- b. Si  $h_2^n \leq h_{cr}$  se requiere un tratamiento especial. Aquí, se propone el método del transporte del volumen (VTM). El calado crítico es

impuesto en la celda aguas abajo y este representa un volumen adicional en esa celda. El mismo volumen debe desaparecer de la celda aguas arriba para asegurar la conservación de la masa. El volumen adicional es:

$$V = [h_{cr} - h_2^n]A_2 \quad (A.4)$$

llevando a,

$$h_2^{n+1} = h_{cr} \quad (A.5)$$

y eso implica una actualización en la celda aguas arriba

$$h_1^{n+1}A_1 = h_1^nA_1 - V \quad (A.6)$$

Cabe señalar que se requiere la ayuda de una tolerancia  $\xi$  para evitar oscilaciones a la hora de decidir el signo de  $H_1$ , ya que el volumen eliminado de la celda aguas arriba podría conducir a unos valores negativos de  $H_1^n$ . Por tanto,  $H_1^n$  debe ser suficiente para garantizar el calado crítico de la siguiente manera.

$$h_2^n + \frac{H_1^n A_1}{A_2} \geq h_{cr}$$

$$H_1^n \geq \frac{(h_{cr} - h_2^n)A_2}{A_1} = \xi \quad (A.7)$$

$$H_1^n \geq \xi$$

Vale la pena enfatizar que el enfoque del modelado de motas descrito, VTM, se propone para evitar las inestabilidades del modelo en los casos en que una celda de la mota se llena hasta el límite donde el calado aguas arriba ( $d_1$ ) y el nivel de la cresta del dique ( $h_{z,weir}$ ) son similares y la celda aguas abajo tiene un bajo o nulo calado. Esto podría suceder en la etapa inicial del desborde de las motas.

## B. Software de modelización: RiverFlow2D

Para llevar a cabo una simulación hidráulica e hidrológica, se requiere de un software capaz de transportar avenidas en ríos y simular inundaciones sobre llanuras y terrenos complejos con una alta resolución, velocidad remarcable y gran estabilidad y precisión. Este software en RiverFlow2D, se trata de un módulo de cálculo que contiene el método numérico explicado en la memoria de este trabajo, Ecuación (6), que resuelve las ecuaciones de flujo en superficie libre 2D, Ecuación (1). RiverFlow2D ha sido desarrollado por el Grupo de Hidráulica Computacional de la Universidad de Zaragoza.

Lo primero que se debe hacer es trabajar el caso mediante el programa QGIS (ver Anexo C). Una vez estén introducidas las condiciones de contorno externas e internas, condiciones iniciales, elevaciones del terreno y rozamiento de este; se exporta el modelo a RiverFlow2D.

### B.1. Panel de control

Una vez ejecutado RiverFlow2D, lo primero que se ve es el panel de control del programa, tal y como se muestra en la Figura B.1. En el caso de que se haya lanzado el programa desde QGIS (ver Anexo C), no será necesario cargar nada; en caso contrario, se deberán cargar los archivos desde la opción '*Open All Files*'. Una vez se tenga abierto el caso, se puede pasar a configurar los diferentes parámetros.

La primera sección que se muestra en la Figura B.1 es '*Time control data*', en la primera opción de esta, '*Simulation time (hrs.)*', se configura el número de horas totales que durará la simulación. En la casilla '*Output interval (hrs.)*', se escoge la frecuencia en horas con la que el programa va a escribir los ficheros con todos los parámetros para cada celda de la malla; y la opción '*Output interval for components (hrs.)*' configura la frecuencia, de nuevo en horas, con la que se escribirán ciertos parámetros que en este trabajo serán las salidas gráficas, los caudales de las secciones transversales y los parámetros de los puntos de observación. Por último para esta sección se tiene la opción '*Courant number (CFL)*', tal y como se ha explicado en la memoria, y se muestra en la ecuación (A.7), este parámetro controla la estabilidad del método numérico y su valor se encuentra entre  $0 < CFL \leq 1$ , en este caso se escogió 0,9 que es un valor típico para estos casos.

En la sección inmediatamente inferior se puede variar el valor del coeficiente de Manning según un factor, o bien se puede hacer que el coeficiente varíe según el calado. En algunos de los casos se va a probar el efecto que tiene la primera de ellas sobre los hidrogramas.

Continuando por la primera sección que se encuentra en el centro, '*Modules*' es empleado en el caso de que se requiera por ejemplo calcular el transporte de sedimento o contaminantes. Es otra sección que no es de interés para este trabajo.

Debajo de esta sección tenemos '*components*', esta opción permite activar distintas condiciones de contorno internas con las que cuenta el programa. Para este trabajo se han empleado dos de ellas, por un lado '*infiltration*' y por otro '*Weirs*'. La primera de estas nos permite configurar la infiltración en el modelo como se explicará más adelante. La segunda nos permite introducir la condición de contorno interna de dique que es el objeto principal de estudio de este trabajo.

Las dos secciones de la derecha, la que está en la parte inferior '*Initial conditions*', permite fijar las condiciones iniciales del calado que para este trabajo se establecen en cauce seco ('*Dry bed*'), ya que las condiciones iniciales se fijarán haciendo una primera simulación con un hidrograma constante para el estado estacionario del río, y de ese estado se partirá en una segunda simulación con los hidrogramas adecuados. En la sección que se encuentra encima de esta, '*Output option*', se puede escoger los ficheros que el programa escribirá y por tanto los parámetros que podremos visualizar posteriormente. En este caso se seleccionan '*Text file output*' que escribe los ficheros con los parámetros calculados para cada celda, '*Output results for cross sections*' escribirá los caudales que atraviesen las secciones transversales que se hayan situado, '*Output maximum values and files to create animations*', '*Output results at observation points*' proporciona los parámetros de las celdas sobre las que se encuentren los puntos de observación según la frecuencia introducida en '*Output interval for components (hrs.)*' y '*Compute mass balance every output interval*' calcula y escribe en un fichero el balance de masa con la frecuencia seleccionada en '*Output interval (hrs.)*'.

Por último, se escogen las unidades en '*Units*', la forma de escribir los números decimales (coma o punto) '*DIP Language*' y si se quiere emplear GPU o CPU para el cálculo '*Model Selection*' (para casos tan grandes es necesario el uso de GPU's)

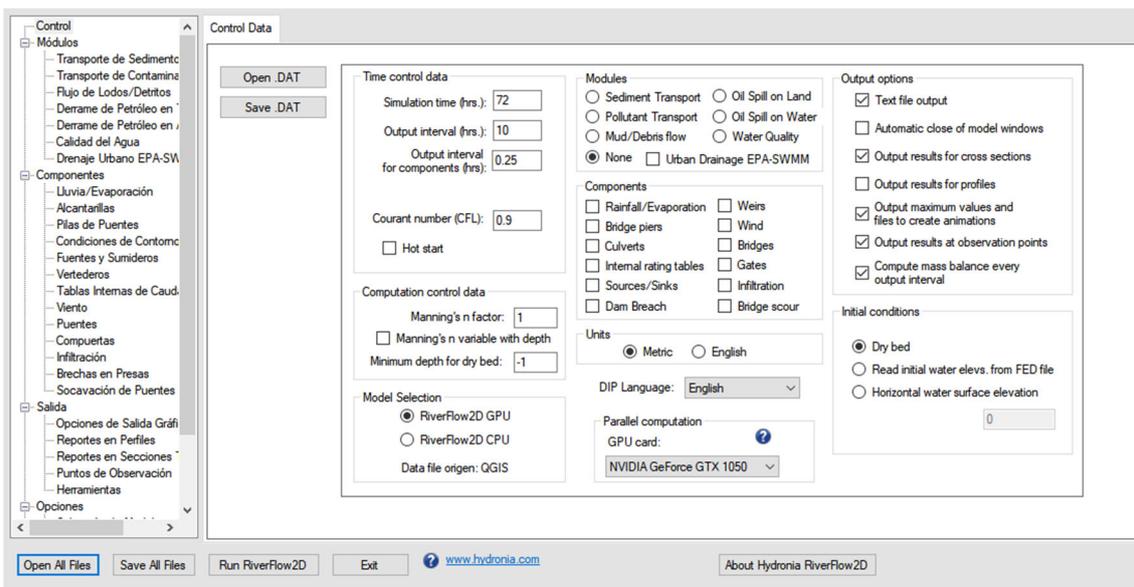
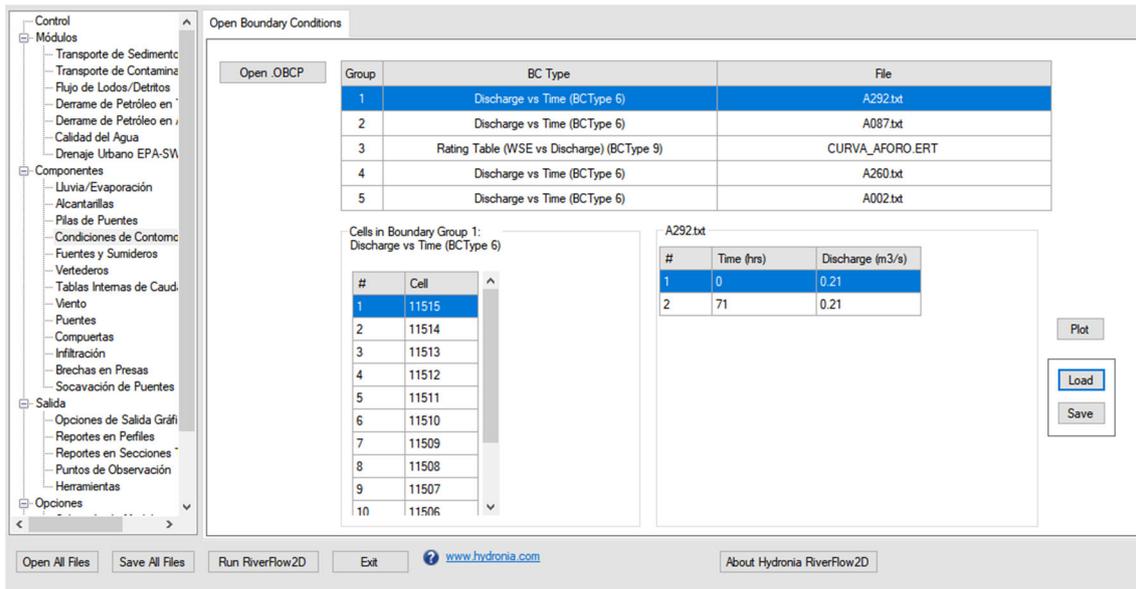


Figura B.1: Panel de control de RiverFlow2D.

## B.2. Condiciones de contorno abiertas

Dentro del apartado '*components*' se encuentra la pestaña '*Condiciones de contorno Abiertas*', aquí se configura el fichero .OBCEP. Este fichero recoge todas las condiciones de contorno internas que se muestran en el panel de RiverFlow2D, tal y como se ve en la Figura B.2. Cada grupo está compuesto por una serie de celdas, una condición de contorno que se refleja a partir de un número en el fichero de texto, cada grupo lleva asociado un fichero según el tipo de condición. Por ejemplo, la condición '*Discharge vs Time*' lleva asociado un hidrograma. Desde este panel únicamente se puede cargar un fichero .OBCEP o bien cambiar el contenido de los ficheros asociados a cada condición.



**Figura B.2:** Panel de condiciones de contorno abiertas de RiverFlow2D.

### B.3. Condiciones de contorno internas

Al igual que antes, dentro del apartado 'components' se encuentran las pestañas 'Vertederos' y 'Infiltración'. Dentro de la pestaña 'Vertederos', Figura B.3, se puede visualizar todas las líneas con la condición interna de vertedero que se ha explicado la memoria de este trabajo. Además de visualizar, se puede cargar un nuevo fichero .WEIRS y únicamente se pueden modificar las coordenadas. Los parámetros que componen el fichero son: 'Weir Name' que da un nombre a cada línea de vertedero, 'N Vertices' que indica el número de vértices para cada línea, 'CF' que indica el factor de descarga del vertedero, que será 1 puesto que se simula una mota, 'Crest Elev.' que marca la elevación del vertedero en ese vértice y por último 'x' e 'y' que indican las coordenadas del vértice del vertedero.

Por otro lado se encuentra la pestaña de 'Infiltración', Figura B.4, que permite visualizar los distintos polígonos en los que se va a considerar la infiltración y los ficheros de texto asociados a cada polígono. Además, se permite modificar el tipo de infiltración empleado (Green-Ampt, Horton y SCS-CN) y los parámetros asociados al modelo de infiltración seleccionado.

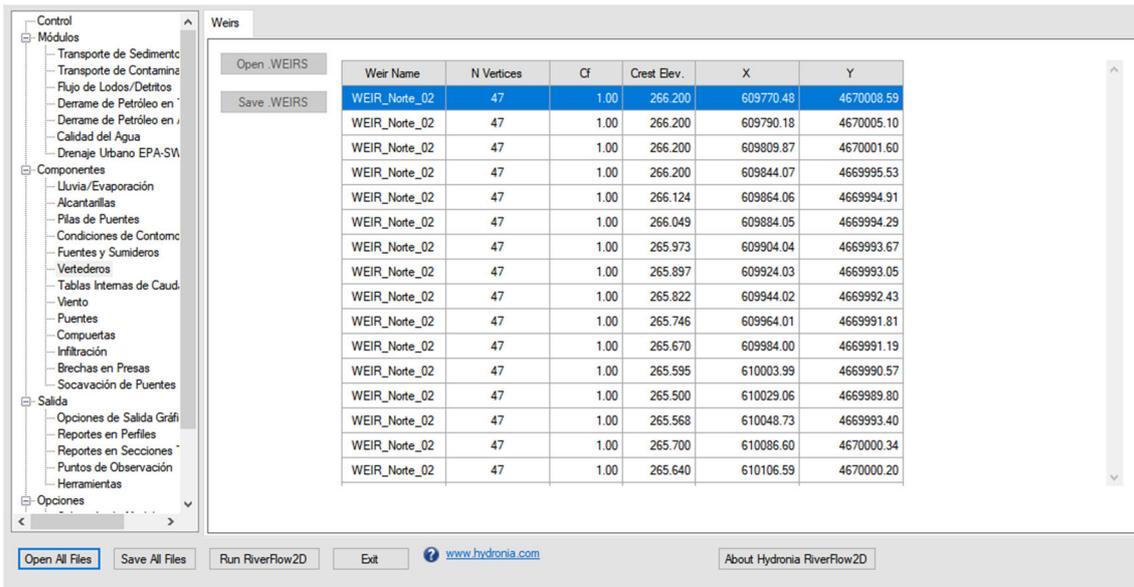


Figura B.3: Panel de vertederos de RiverFlow2D.

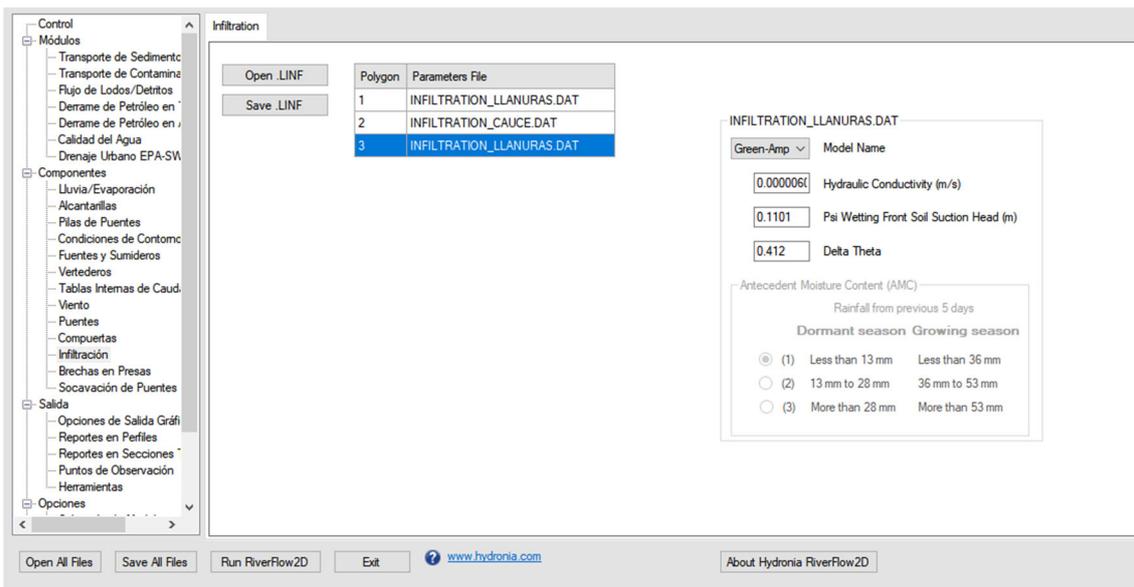
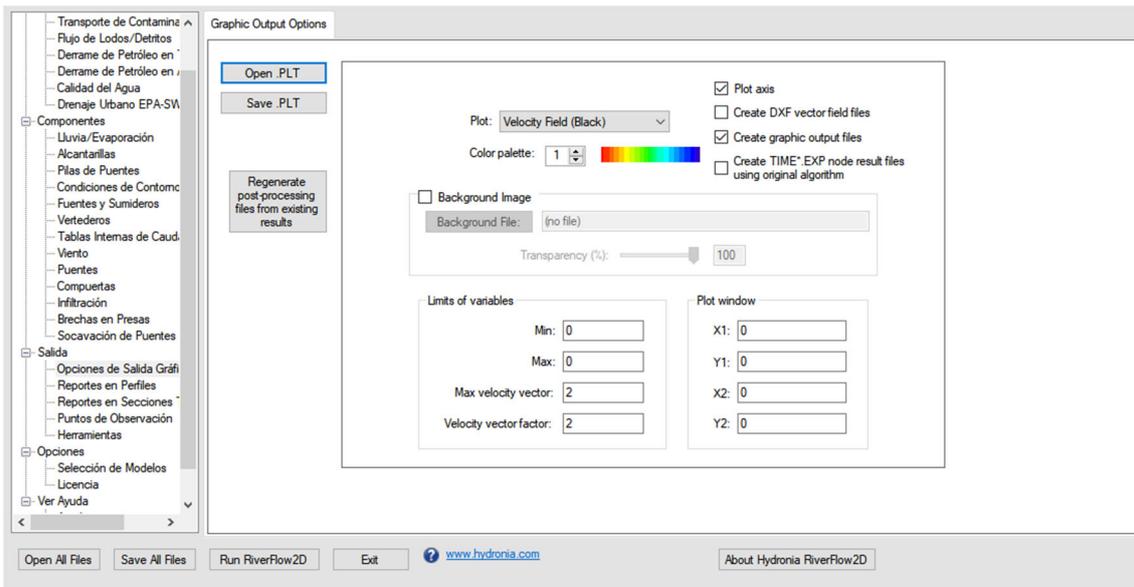


Figura B.4: Panel de infiltración de RiverFlow2D.

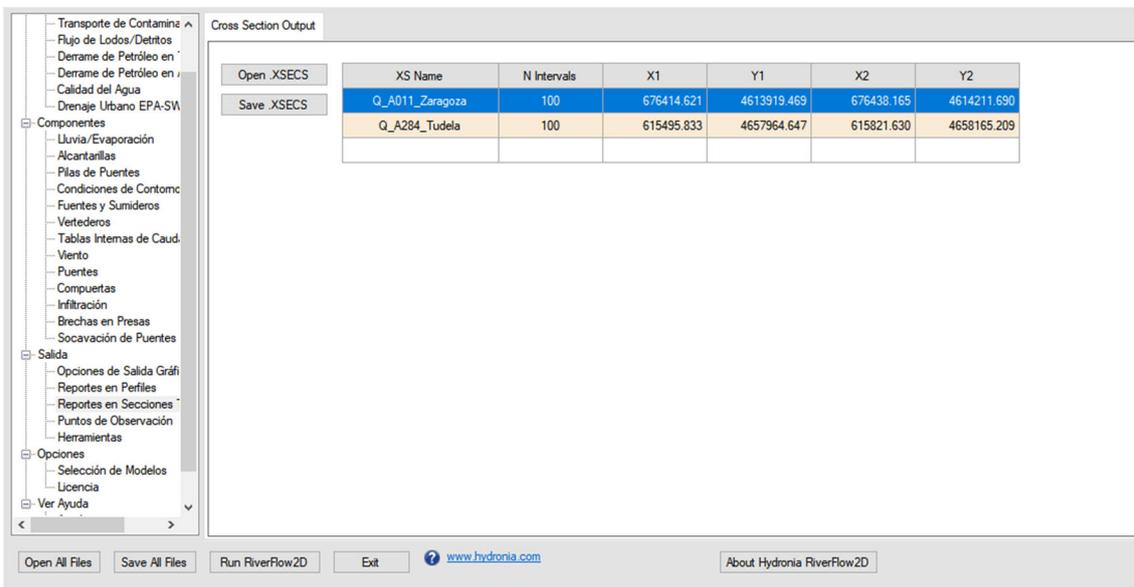
## B.4. Salidas

En la Figura B.5 se permite activar la escritura de ficheros tipo .VTK que permitirá visualizar la situación de la simulación con la frecuencia elegida en la sección 'Output interval (hrs.)' del panel de control, Figura B.1.



**Figura B.5: Panel de opciones de salida gráficas de RiverFlow2D.**

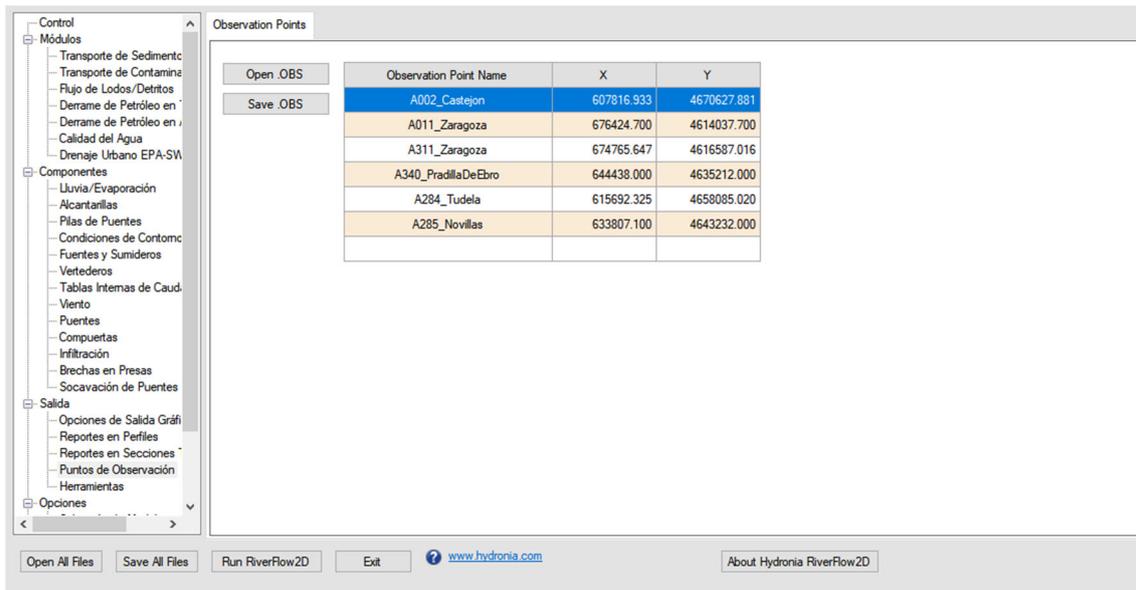
En la pestaña '*Reportes en Secciones Transversales*', Figura B.6, se muestran las secciones que se han escogido y de las cuales se mostrará el caudal que las atraviesa. En la pestaña se puede modificar '*N Intervals*', que permite elegir el número de intervalos en los que se dividirá la sección transversal; dependiendo del número de celdas que atraviese la sección será necesario un mayor número de intervalos para no perder precisión en el cálculo del caudal que la atraviesa. Se pueden visualizar y modificar también los puntos que forma la sección.



**Figura B.6: Panel de reportes en secciones de RiverFlow2D.**

Por último, en la pestaña '*Puntos de Observación*' se visualizan los puntos escogidos de los que se escribirán los parámetros calculados según la frecuencia seleccionada en '*Output interval for components (hrs.)*' dentro del panel de control. Esta es también la frecuencia de las secciones transversales. Como se ve en la Figura B.7, en

esta pestaña se muestra el nombre del punto de observación y sus coordenadas, que pueden ser modificadas desde aquí.



**Figura B.7: Panel de puntos de observación.**

## **C. Software de configuración: QGIS**

Para el preprocesado de los datos y la elaboración de la malla se ha empleado el programa QGIS. Una vez ha finalizado la simulación hecha con RiverFlow2D se procede a la gestión y visualización de los resultados y para ello vamos a usar algunas herramientas del propio QGIS. También se empleará ParaView para la visualización de los resultados, en particular para obtener imágenes en 3D.

### **C.1. Preparación y visualización de datos**

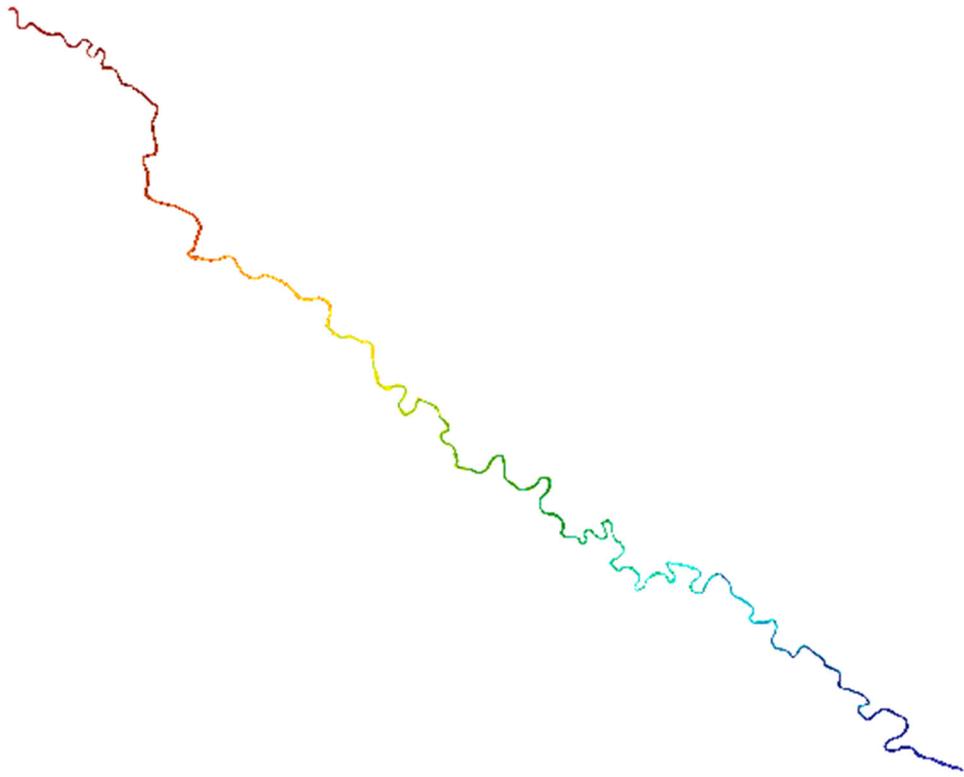
QGIS, también conocido como Quantum GIS, es un Sistema de Información Cartográfica o SIG de software libre y código abierto.

Para la realización de este trabajo se ha requerido la manipulación de diversos archivos con información sobre el terreno. QGIS permite manipular los MDT juntándolos, cortándolos y/o combinándolos. Todo esto ha sido necesario para la configuración de un MDT que contuviera un cauce lo más realista posible que sustituyera el cauce erróneo proporcionado por los MDT del Instituto Geográfico Nacional. Los valores erróneos del cauce se deben a que un río como el Ebro nunca está vacío, por tanto los datos que se tienen en el cauce se corresponden al nivel del agua, no al fondo del cauce. Además, el IGN proporciona MDT's rectangulares, como se puede ver en la Figura C.4, que requieren ser combinados para conformar un MDT más grande capaz de contener todo el dominio de análisis.

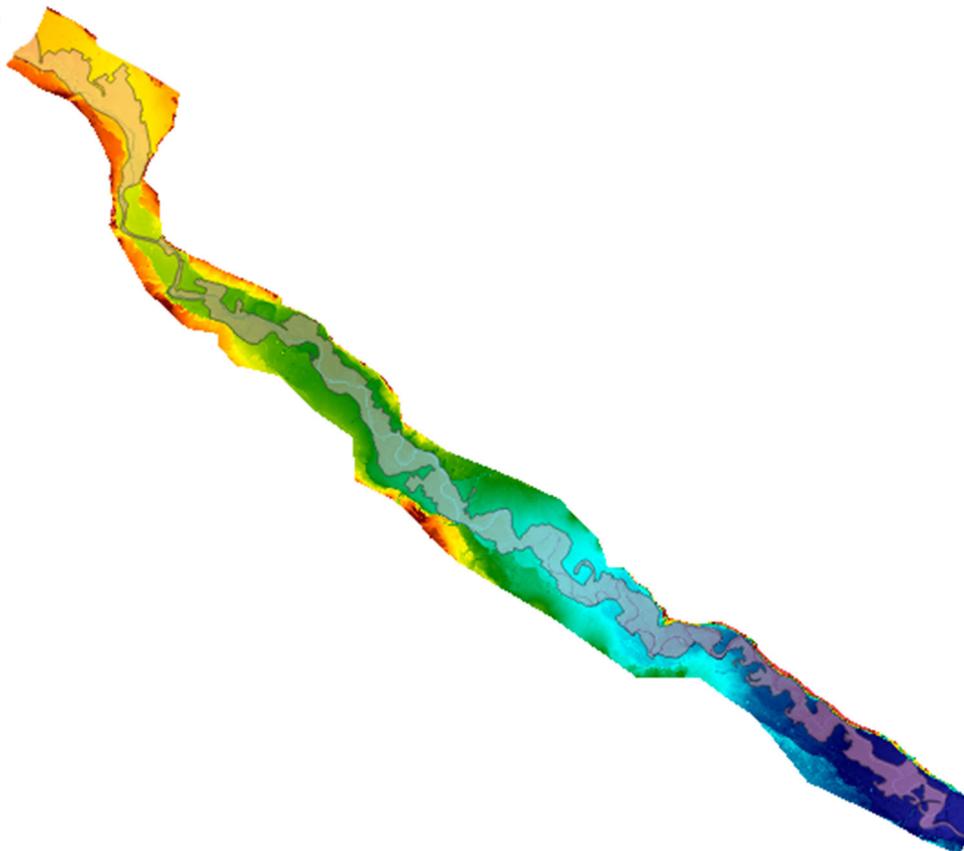
Para la creación del cauce fue necesario la organización y modificación de las secciones batimétricas. Una vez se interpoló el cauce, el resultado no fue el deseado en algunos tramos, lo que obligó a hacer una composición entre el cauce antiguo del que se disponía del año 2015 y los tramos válidos de la interpolación actual. El resultado de la combinación fue satisfactorio y arregló casi la totalidad de los problemas que se generaban con el solapamiento del cauce antiguo con algunas motas del MDT actual. Este cauce se puede ver en la Figura C.1.

Otro de los ficheros que se han empleado en QGIS son los correspondientes a las machas de inundación registradas por la Confederación Hidrográfica del Ebro en el año 2018 que se ven en color rosa en la Figura C.2. Esto ha permitido comparar las manchas de inundación obtenidas y las que proporciona la CHE.

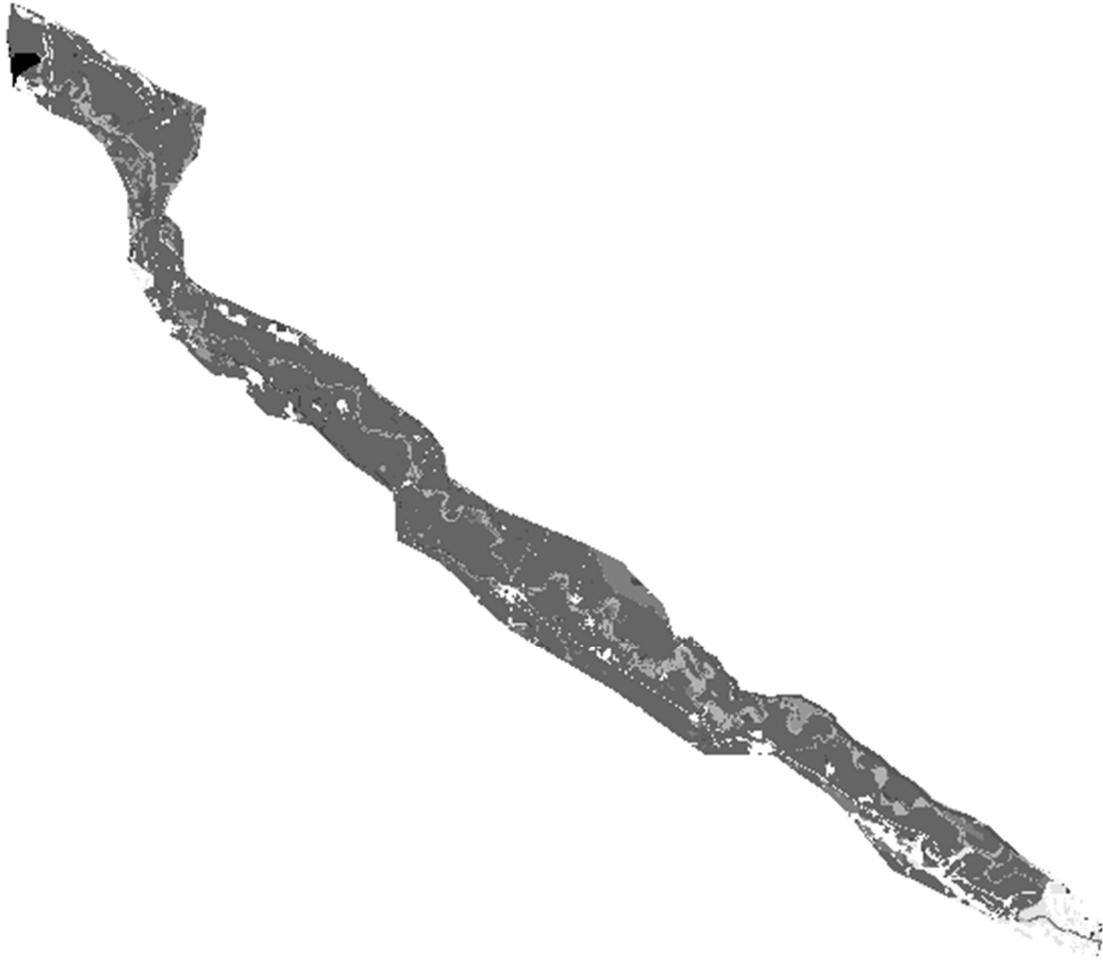
Otro punto importante es la configuración del MDT que contiene los datos del coeficiente de Manning, Figura C.3. Para ello, se parte de un archivo .SHAPE al cual se le aplica, mediante la calculadora de QGIS, un pequeño script que transforme los valores del fichero .SHAPE correspondientes al uso del terreno en un MDT que contenga los coeficientes de Manning, al igual que tenemos un MDT que contiene los valores del nivel del terreno.



**Figura C.1: MDT del cauce del río Ebro en el tramo Castejón-Zaragoza.**



**Figura C.2: MDT con las elevaciones del terreno del tramo Castejón-Zaragoza junto a las machas de inundación.**



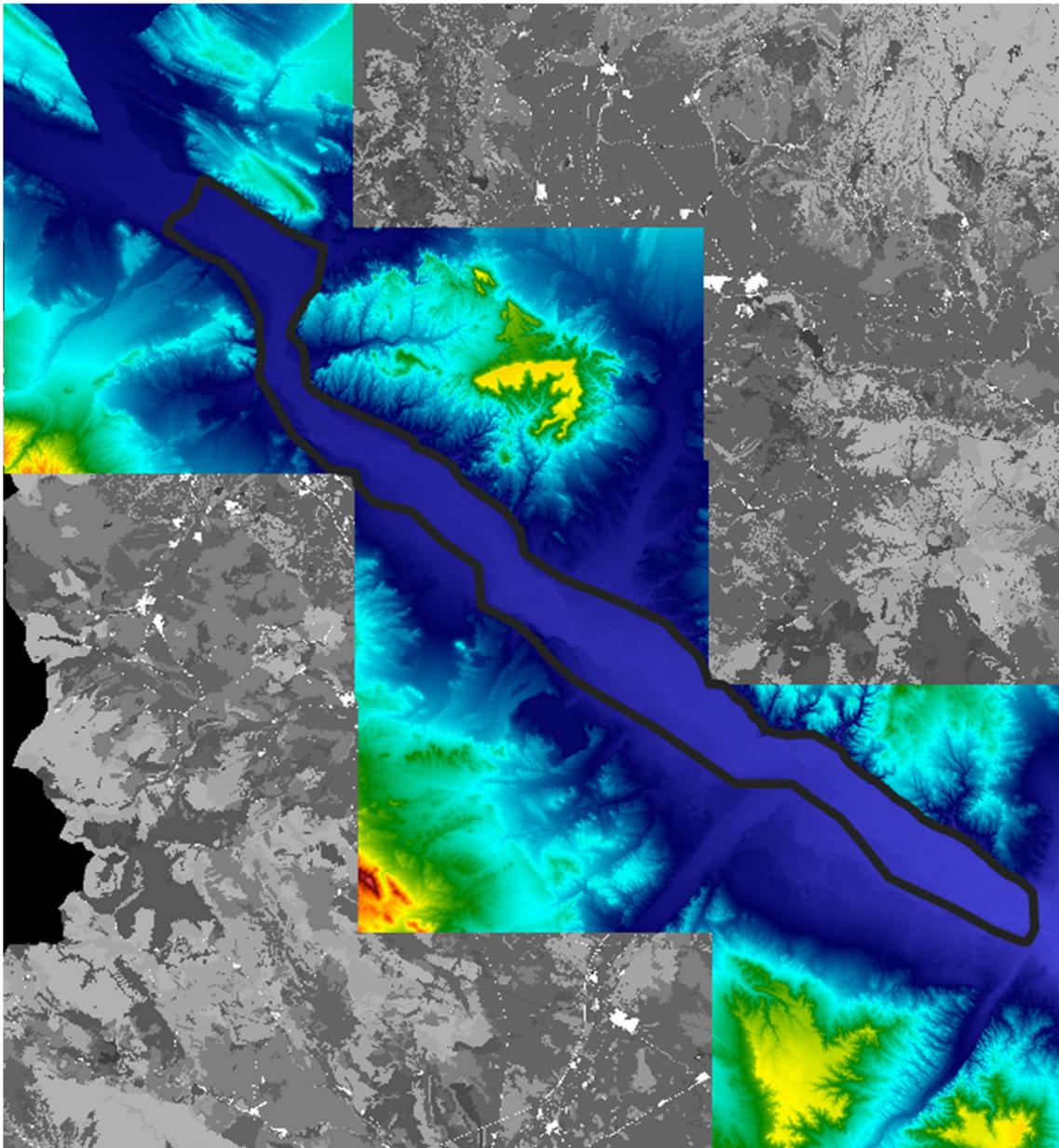
**Figura C.3: MDT con los coeficientes de Manning asociados a los usos del terreno.**

## **C.2. Configuración de la malla de cálculo**

Una vez se dispone de los modelos digitales del terreno, tanto del modelo correspondiente a las elevaciones, como del modelo que representa los valores de los coeficientes de Manning asociados a cada superficie del terreno, se puede comenzar a configurar el resto de los elementos necesarios para obtener un modelo bien definido.

Hay varios elementos en QGIS que permite controlar la generación de la malla. Se trata de los elementos *Domain Outline*, *MeshDensityLine*, *MeshBreakLine* y *MeshDensityPoligon*.

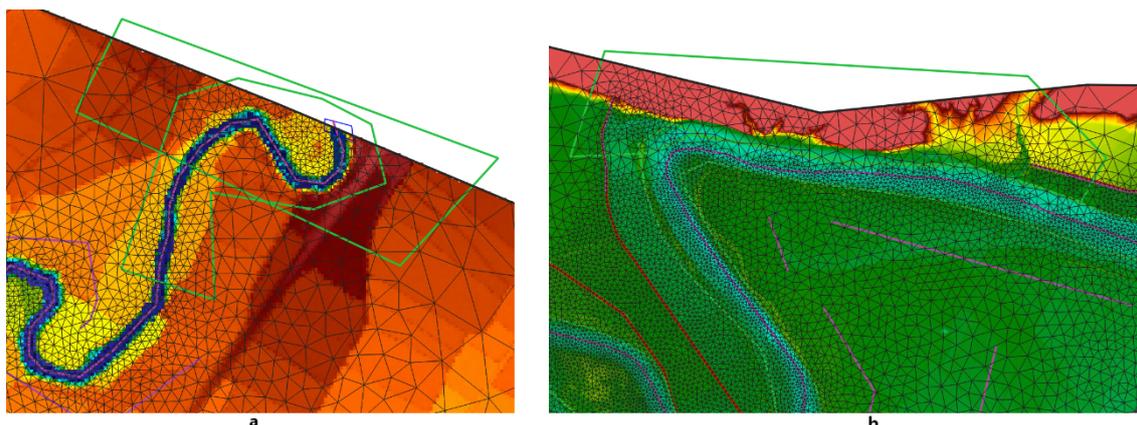
*Domain Outline* es la capa que determina los límites del dominio de análisis. Además, esta capa permite establecer el valor de un atributo de la capa que se corresponde al tamaño de la celda triangular que se desea. Para este caso se determina un valor de 250 metros, estas celdas tan grandes realmente solo se van a generar en zonas del modelo donde no haya posibilidad de que llegue el agua. Para el resto de las zonas se van a utilizar otros elementos que permitan variar estos tamaños de celda para obtener mayores precisiones.



**Figura C.4:** MDT de elevaciones y MDT de coef. de Manning junto a la capa *Domain Outline*

En la Figura C.4 se muestran los dos modelos digitales del terreno superpuestos junto a la capa *Domain Outline* que está marcada como una línea negra. A efectos del análisis, todo lo que esté fuera de esa línea no será considerado.

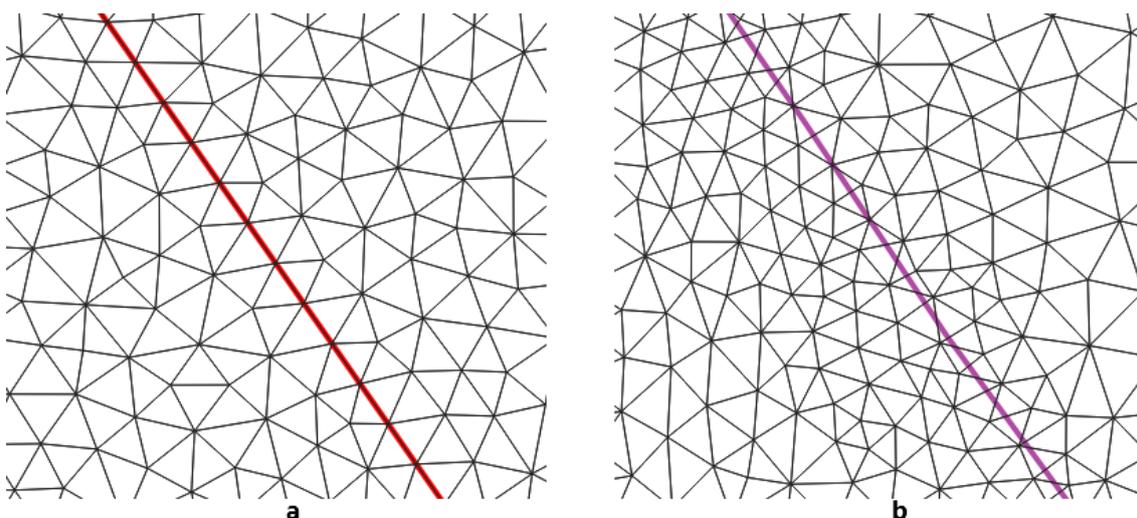
*MeshDensityPoligon* es una herramienta que se comporta como la herramienta *Domain Outline*, con la diferencia de que este caso no implica que las líneas formen parte del contorno del dominio. El polígono generado marca a la malla el valor de celda que debe ajustar para esa región. Este elemento se ha empleado en las entradas y salidas del dominio y las zonas donde el cauce pasaba pegado al contorno. Esto se puede ver en la Figura C.5, donde vemos en color verde claro las líneas asociadas a la capa *MeshDensityPoligon*, se puede apreciar como dentro de estas el tamaño de las celdas es menor en comparación con el tamaño de las celdas contiguas a esta capa y al contorno del dominio.



**Figura C.5: Zonas donde se ha empleado *MeshDensityPoligon*. Entrada de una afluente al dominio (a) y paso del cauce junto al límite del dominio (b)**

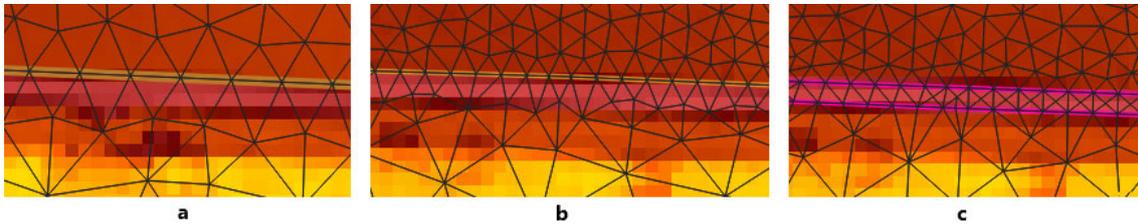
*MeshDensityLine* se emplea para la introducción de polilíneas a lo largo de las cuales se refinará la malla en función del valor que se haya asignado al atributo que define el tamaño deseado en las celdas de las polilíneas. Este tamaño será aproximado y en ningún momento obliga al generador de la malla a ajustarse a él, sino a aproximarse a ese valor. Los valores empleados en este trabajo han sido muy variados en función de donde se las colocara, desde valores de 100 u 80 para hacer transiciones suaves en los tamaños de la malla en las zonas próximas al contorno del dominio; hasta valores de 10, 20 o 30 para zonas próximas al cauce o a las motas que requerían ser refinadas para no forzar a la malla a generar celdas extremas que ralentizan el cálculo.

*MeshBreakLine* es la capa que se utiliza para introducir polilíneas a lo largo de las cuales el programa de generación de mallas refina la malla según el valor asociado al atributo que determina el tamaño de las celdas. La diferencia con *MeshDensityLine* están en que en este caso, se obliga al generador de la malla a crear nodos a lo largo de la línea definida. Esto se puede ver en la Figura C.6, donde se muestra a la izquierda una línea tipo *MeshBreakLine* y a la derecha una del tipo *MeshDensityLine*.



**Figura C.6: Comparativa entre el uso de líneas tipo *MeshBreakLine* (a) y *MeshDensityLine* (b)**

Las líneas del tipo *MeshBreakLine* se van a emplear como elementos defintorios de las motas y para ello se utilizarán dos valores distintos, 20 y 10 metros. Para buscar una mayor definición a la hora de definir las motas, se empleará el valor de 10 metros, pero se usarán dos líneas paralelas que permitan marcar de manera efectiva la mota. Esto se comentará en el Anexo E.

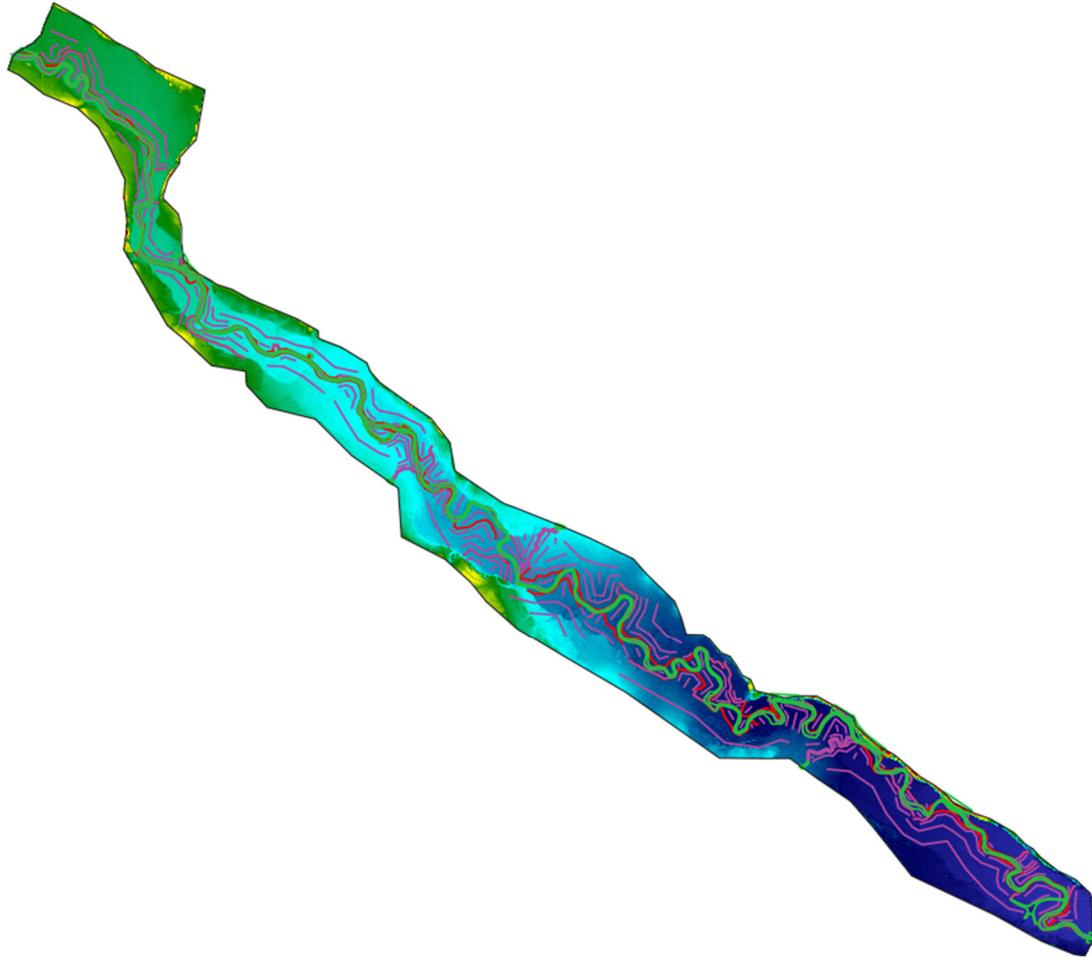


**Figura C.7: Configuración de la malla en torno a una mota para diferentes configuraciones de *MeshBreakLine*. Celdas de 20 metros (a), de 10 metros (b) y paralelas de 10 metros (c)**

En la Figura C.7 se muestra la comparativa entre las mallas generadas en un mismo punto del dominio para un tamaño de 20 metros (a), de 10 metros (b) y con un tamaño de 10 metros usando dos líneas paralelas (c). Los colores del mapa representan las alturas, siendo el color rojo el más alto y que por tanto indica la ubicación de la mota. Se puede ver cómo como el tercero de los casos (c) es el que mejor representa las motas. En el caso (b) lo que se aprecia es que algunas celdas recogen únicamente puntos pertenecientes a la mota, pero otras contienen partes que no pertenecen a esta. Por último, la peor de las situaciones es la del caso (a) donde es muy evidente que todas las celdas están compuestas por tramos pertenecientes a la mota y tramos que no pertenecen a la mota. Esto supondrá que esas celdas tengan una altura promedio menor que la de la mota y por tanto el resultado no debería de ser correcto para esas configuraciones de la malla.

A parte de los elementos descritos anteriormente también hay otros que objetos espaciales que ejercen un control sobre la malla. De estos el único que se va a emplear en este caso y que será fundamental son los vertederos (*Weirs*). El funcionamiento matemático de estos se explica en el anexo A, y su configuración en QGIS se explicará a continuación en el punto 3 de este anexo C.

Por último, en la Figura C.8 se muestran todos los elementos de uno de los casos. En este se pueden ver varios colores, por un lado el verde representa los *MeshDensityPolygon*, el color rosa representa las *MeshDensityLine* y las líneas rojas representan en este caso las líneas tipo *Weir*, cuyo funcionamiento a efectos de la malla es el mismo que el de las *MeshBreakLine*. además, el contorno está marcado por una línea negra que corresponde a la capa *Domain Outline*.



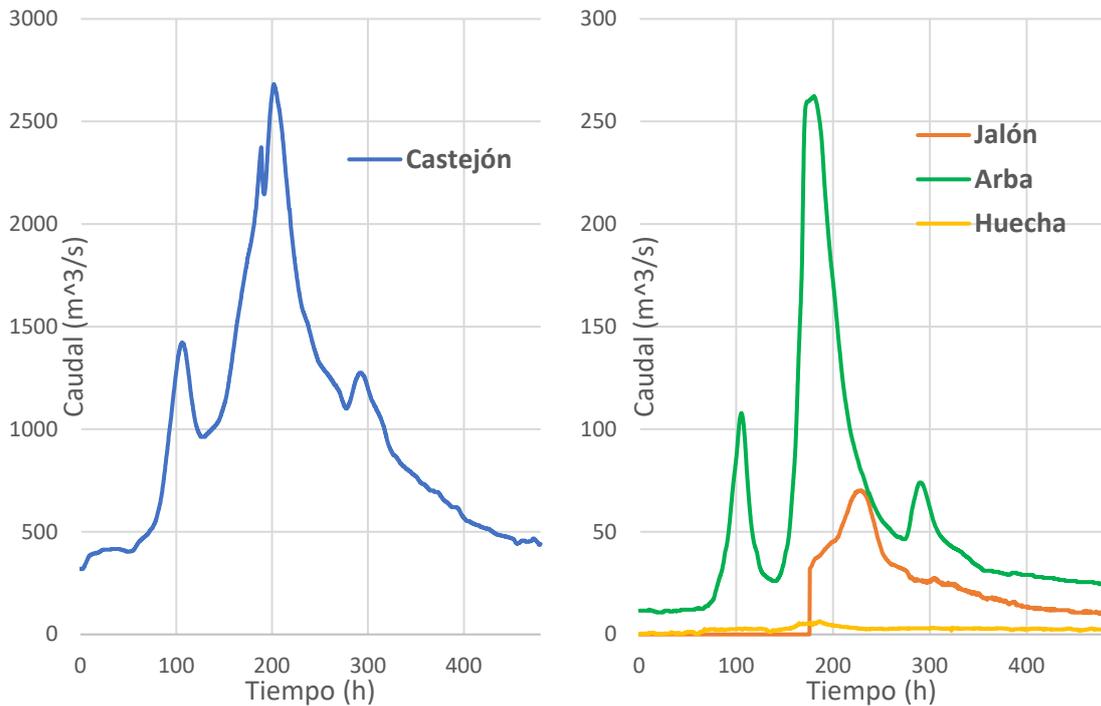
**Figura C.8: Visualización del todos los elementos de configuración de la malla.**

### **C.3. Condiciones de contorno**

Los datos que imponen las condiciones de contorno abiertas se introducen en la capa *Boundary Conditions*. En esta capa se introducen polígonos, una se vez se ha dibujado el polígono que representará la condición de contorno abierta, se asigna el tipo de condición que le corresponde. En este trabajo se imponen dos tipos de condiciones de contorno abiertas. Por un lado las que imponen la entrada y por otro las que imponen la salida.

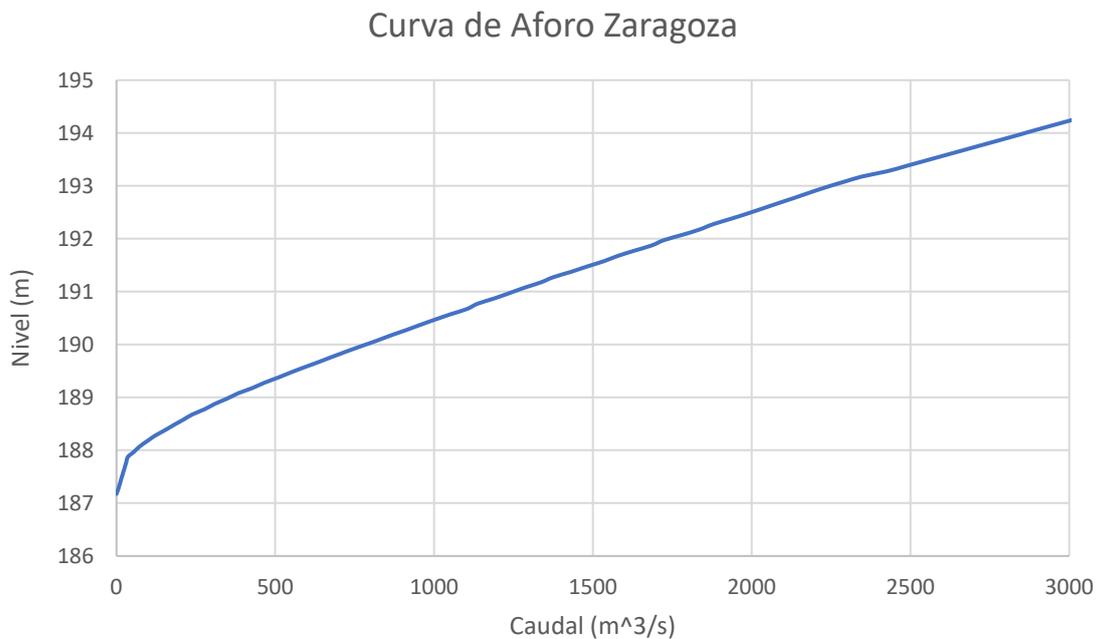
Como entradas se tienen 4 zonas. La entrada del río Ebro a su paso por Castejón y las entradas de 3 afluentes del Ebro con caudales suficientemente grandes como para ser considerados relevantes en la simulación. Estos afluentes son los ríos Jalón, Arba y Huecha que se incorporan al dominio en las localidades de Grisén, Tauste y Cortes respectivamente.

Los datos de las entradas son hidrogramas provistos por el Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE). En la Figura C.9 se pueden ver estos hidrogramas que representan el caudal frente al tiempo que será impuesto como descarga en la zona marcada del dominio.



**Figura C.9: Hidrogramas provistos por la CHE de las entradas del Ebro y sus afluentes**

En la salida se impone la curva de aforo que la Confederación Hidrográfica del Ebro tiene calculada para la zona correspondiente al puente de hierro de la ciudad de Zaragoza que será la salida del dominio. En la Figura C.10 se muestra esta curva de aforo. Esta impone un caudal en función del nivel; así pues, la simulación asignará un caudal a la salida en función del nivel de agua que llegue a las celdas correspondiente a la zona delimitada por la condición de contorno abierta.

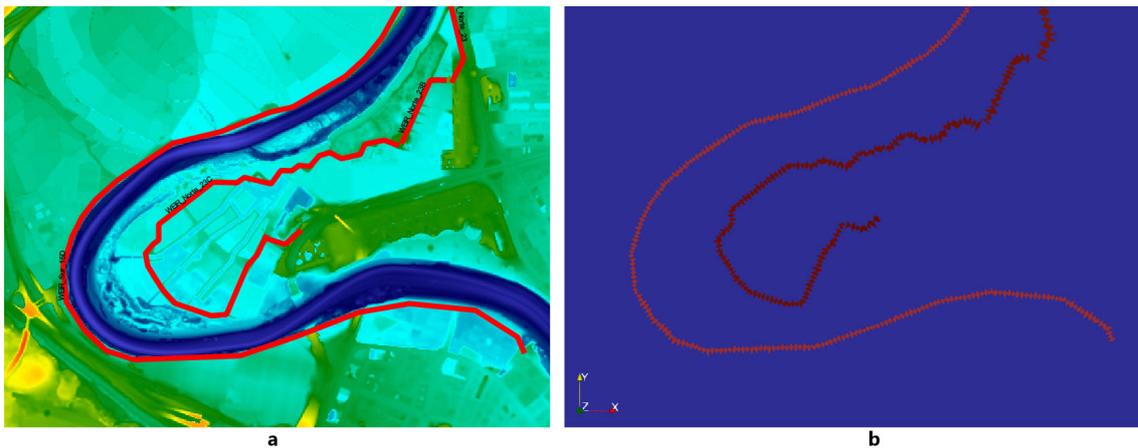


**Figura C.10: Curva de Aforo en Zaragoza**

A parte de las condiciones de contorno abiertas se emplean también condiciones de contorno internas. Estas son las denominadas como vertederos o *Weirs* y su modelo matemático ya ha sido explicado en el Anexo A.

Su configuración en QGIS consiste en la creación de polilíneas capaces de ejercer control en la creación de la malla. Su comportamiento en ese sentido es el mismo que el que se ha explicado para los objetos espaciales del tipo *MeshBreakLine*. Sin embargo hay que tener en consideración que estas polilíneas no pueden tener giros abruptos; es decir, giros mayores o en el entorno de los 90°. Estos ángulos pueden crear errores en el algoritmo que identifica los nodos que recaen en la polilínea, de esta forma podría ocurrir que la polilínea fuera creada pero que la condición de contorno solo fuera aplicada a un segmento de esta y se viera interrumpida con el cambio brusco. Esto se debe a que el caudal del vertedero se calcula por pares de parejas, tal y como se explica en el Anexo A, por tanto no puede haber una celda que pertenezca a varios pares de celdas.

Una vez se ha creado la polilínea se debe introducir el factor de descarga, en este caso será factor 1. A su vez se debe introducir las alturas de cada punto que define la polilínea. Esta parte se debe hacer de manera manual, visualizando las alturas que marca el ráster en cada tramo de la polilínea y asignando un valor promedio de esas alturas a cada punto. Una vez se realice la primera simulación se podrán corregir estas alturas en función de las manchas de aguas obtenidas. Este paso se explicará en Anexo E de manera más detallada.



**Figura C.11: Visualización de la capa *Weir*. Representación en QGIS como polilínea (a) y en ParaView como condición de contorno (b).**

En la Figura C.11 se puede ver en la imagen (a) la representación de la condición de contorno interna como una polilínea en la zona de la Expo de la ciudad de Zaragoza; a su vez en la imagen (b) se puede ver como se representa esa condición en el programa ParaView, en este lo que se ve no es una polilínea sino una serie de celdas coloreadas que marcan aquellas en las cuales se ha impuesto la condición de contorno.

#### C.4. Coeficientes n de Manning

La asignación de los coeficientes n de Manning se hace en QGIS utilizando la capa *Manning N*. Esta capa permite la creación de polígonos a los cuales se les debe asignar un valor de coeficiente. Para casos más pequeños es posible crear manualmente todos los polígonos; sin embargo en un caso tan grande como este llevaría mucho tiempo y no sería eficiente ya que el Instituto Geográfico Nacional (IGN) tiene disponibles los datos de los usos del terreno. El propio IGN aporta un documento donde se explican cuáles son los coeficientes n de Manning asociados a cada uso del terreno; por tanto en QGIS únicamente se creará un polígono que contenga todo el dominio y al que se le asignará un valor de coeficiente de 0. Cuando se proceda a exportar el modelo de QGIS a RiverFlow2D se marcará una opción que permite usar una capa ráster para los valores de los coeficientes. Este MDT es el que se ha comentado en el apartado 1 de este anexo.

#### C.5. Zonas de control

Para la posible comparación posterior de los resultados se requiere del establecimiento de zonas de control. Estas zonas de control se establecen en la simulación en las coordenadas reales en las que se encuentran las distintas estaciones de control que tiene repartidas la CHE a lo largo de la cuenca del río Ebro como se muestra en la Figura C.12).

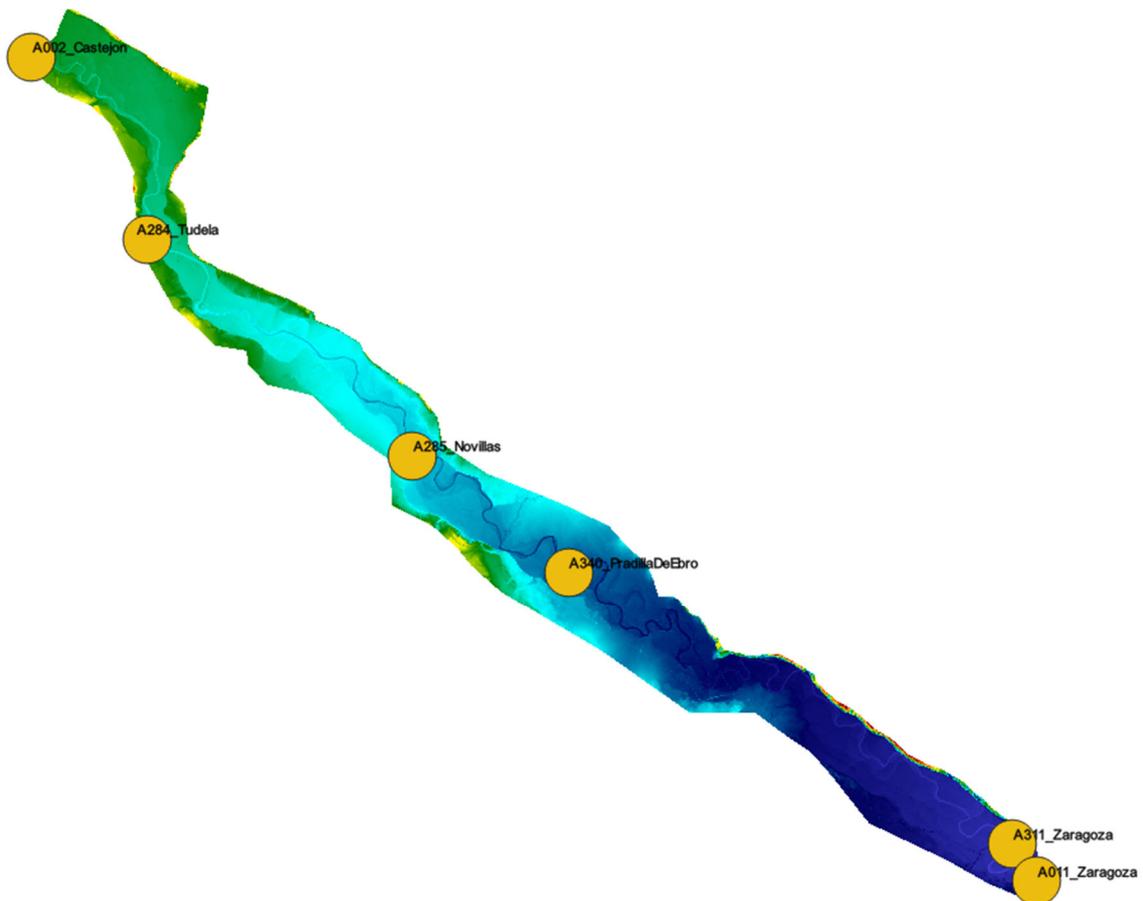


Figura C.12: Estaciones de control a lo largo del tramo Castejón-Zaragoza del río Ebro

En estas zonas de control se pueden configurar dos elementos que nos permitirán conocer distintos datos. Por un lado tenemos las *CrossSections*, se trata de polilíneas que

calculan el caudal que las atraviesa. Estas no están colocadas en todas las zonas de control; ya que no en todas las estaciones de aforo de la cuenca se mide el caudal y por tanto no tendría sentido obtener un dato que no se puede comprar con nada. Estos elementos están situados en la estación A011 en Zaragoza y en la estación A284 en Tudela. Dichas estaciones se muestran en la Figura C.12.

Por otra parte tenemos los *ObservationPoints*, estos son puntos donde se miden todos los valores de la celda sobre la que se sitúan. De estos valores realmente solo nos importa el nivel del agua que compararemos con los valores de las estaciones de aforo. En este caso las estaciones están situadas en Castejón, Tudela, Novillas, Pradilla de Ebro y Zaragoza. En este último lugar tenemos dos estaciones, una a la entrada de la ciudad y otra a la salida del contorno. Todas estas se pueden ver como puntos amarillos en la Figura C.12.

## D. Modelo de infiltración

Hay varios modelos de infiltración que se pueden emplear, modelo de Horton, modelos de Green-Ampt, modelo SCS-CN, etc (Fernández-Pato, 2019). No es objeto de este trabajo el determinar cuál de estos es más adecuado para nuestra situación pues esto ya se hizo en un trabajo previo (Campo, 2019) y se determinó que el modelo Green-Ampt era el mejor para caracterizar el fenómeno de la infiltración debido a que sus parámetros tienen un significado físico. El modelo de Green-Ampt asume que en el subsuelo el frente delimita la frontera entre las zonas saturada y no saturada en la posición  $z = s(t)$ . La región saturada se encuentra en  $0 \leq z \leq s(t)$  y tiene un contenido de humedad igual a la porosidad  $\eta$ ; por su parte, la zona no saturada presenta un contenido de humedad inicial  $\theta_i$ . Además, la succión del agua en el frente húmedo  $\psi$  se considera constante. A su vez, el flujo vertical por unidad de área en la región saturada  $q_s$  viene dado por la ley de Darcy:

$$q_s = K_s \frac{\partial H}{\partial z} \quad (\text{Ecuación D. 1})$$

Donde  $H(z, t) = \psi + z$  es la altura hidráulica y  $K_s$  representa la conductividad hidráulica saturada.

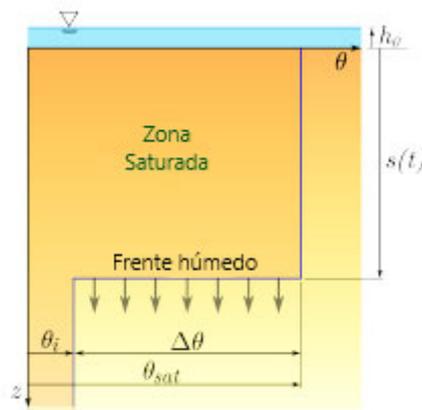


Figura D.1: Esquema del frente húmedo en el modelo de Green-Ampt.

Teniendo lo anterior en cuenta, el modelo Green-Ampt aproxima la capacidad de infiltración del suelo como:

$$f_p(t) = K_s + \frac{K_s \psi \Delta\theta}{F(t)} \quad (\text{Ecuación D. 1})$$

Siendo  $K_s$  [ $L/T$ ] conductividad hidráulica saturada,  $\psi$  [ $L$ ] la succión media en la posición del frente húmedo y  $\Delta\theta = \eta - \theta_i$  [ $L^3/L^3$ ] la diferencia entre la porosidad del suelo  $\eta$  [ $L^3/L^3$ ] y el contenido de humedad inicial  $\theta_i$  [ $L^3/L^3$ ]. Estos parámetros tienen significado físico, por lo que pueden ser estimados a partir de las propiedades físicas del suelo. Asumiendo las condiciones de suelo encharcado, podemos obtener una expresión adicional para la infiltración acumulada  $F$ :

$$f_p = \frac{dF}{dt} \Rightarrow K_s t = F(t) - \psi \Delta\theta \ln \left[ 1 + \frac{F(t)}{\psi \Delta\theta} \right] \quad (\text{Ecuación D. 3})$$

## E. Casos test preliminares

Para realizar los casos test simplificados, se plantea un tramo de 5 km de longitud con una anchura de 1,5 km y una pendiente longitudinal del 0,5 %. El cauce tiene una anchura de 50 metros y una profundidad de 5 metros, considerando su sección como un rectángulo. Las motas tienen una altura de 3 metros y están colocadas a 70 metros del cauce.

Se trabaja con dos hipótesis, la primera de ellas es la consideración de que la infiltración tiene un efecto sustancial sobre los hidrogramas de salida. La otra hipótesis con la que se trabaja es la de que el agua que se ha desbordado esté retenida en las zonas de inundación. Para representar eso en el modelo simplificado se introducen unas motas transversales y longitudinales que formen una 'L' y actúen como una suerte de dique. Estas motas cuentan con una mayor elevación, 10 metros. Las motas transversales están situadas a 500 metros de la salida y se prolongan paralelamente al cauce durante otros 800 metros y tangencialmente hasta 400 metros, de modo que no escape el agua por el contorno inferior ni retorne hacia el cauce. En la Figura E.1 se muestra el dominio del caso test preliminar en tres dimensiones.

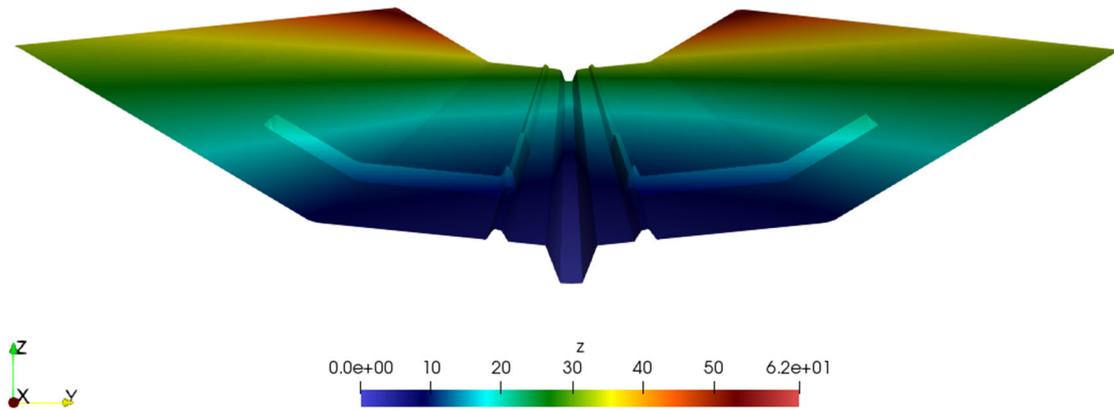


Figura E.1: Representación en 3D del caso test preliminar.

En los casos test realizados se simplificó a dos únicas zonas de infiltración que son el cauce y las llanuras de inundación. Se considera como cauce tanto el propio cauce, como la zona que está entre las motas y el cauce. Y como llanuras se considerará el resto del dominio. Los parámetros empleados son los que se encuentra en la Tabla (E.1).

$K_s$ (m/s)	$\psi$ (m)	$\eta$
0,00000055556	0,273	0,432
0,0000060556	0,1101	0,412

Tabla E.1: Parámetros empleados en el modelo de Green-Ampt

Para los casos test donde se tenga en cuenta la infiltración se va a emplear el modelo de Green-Ampt y se establecerán dos zonas de infiltración, una correspondiente al cauce y otra a las llanuras de inundación que comprende el resto de la superficie.

Se van a comentar tres casos, el primero de ellos tendrá únicamente las motas longitudinales además de infiltración, en el segundo se le añaden unas motas transversales para ver si el volumen infiltrado aumenta considerablemente a causa del estancamiento del agua y en el último de ellos se eliminará la infiltración y se analizará el comportamiento del caso para las distintas metodologías de definición de motas.

### **E.1.1. Caso test infiltración**

Este primer caso, consiste en el análisis del comportamiento del hidrograma de salida, obtenido al simular un evento, donde el hidrograma de entrada crece hasta un máximo de  $5500 \text{ m}^3/\text{s}$ , este tiene una forma triangular. Lo que se espera ver es si el comportamiento del hidrograma a la salida es distinto en función de si hay o no infiltración. La simulación parte de un caso estacionario de  $400 \text{ m}^3/\text{s}$  y finaliza 32 horas después en ese mismo estado estacionario.

Tras hacer las simulaciones, se observa como el comportamiento a nivel de hidrogramas es idéntico; por tanto, no es una forma útil de analizar el efecto de la infiltración. Aunque con esto ya se puede esperar que no sea la culpable del efecto que se busca en este trabajo.

Tras esto se plantea buscar diferencias en la observación de los volúmenes, puesto que un hidrograma indica el volumen que entra o sale para cada instante de tiempo. Atendiendo a esto, se analiza cual es el volumen de agua infiltrado respecto al volumen total que ha entrado a la cuenca. Se ve que de todo el volumen que ha entrado, solo un 0,305 % se ha infiltrado.

Visto esto, se plantea de cara al siguiente caso, cuál será el efecto si ese volumen de agua que se ha desbordado es contenido por unas motas transversales, evitando así su avance hacia la salida, y por otras longitudinales que eviten su retorno al cauce.

### **E.1.2. Caso test infiltración y motas transversales**

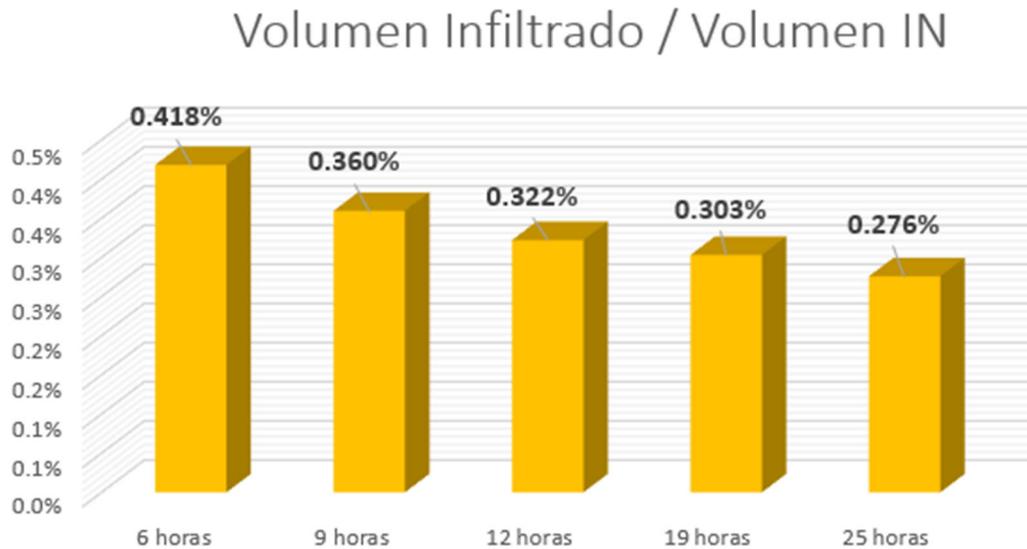
Este caso como ya se ha comentado, se plantea con la idea de ver si el efecto de la infiltración se magnifica cuando se colocan unas motas que actúan como diques para el agua desbordada. Además, lo que se hará es probar 5 hidrogramas distintos, todos ellos con forma triangular y caudal máximo de  $6000 \text{ m}^3/\text{s}$ . La diferencia estará en el tiempo de base de los hidrogramas, que será de 6, 9, 12, 19 y 25 horas.

De nuevo, los hidrogramas de salida no son útiles para observar el efecto de la infiltración, una pista más sobre la poca relevancia de esto en el efecto que buscamos.

Se muestra en la Figura E.2 el tanto por ciento en volumen que se ha infiltrado respecto al volumen total que ha entrado a la cuenca. Lo que se deduce de esos valores es dos cosas; por un lado, tenemos el valor tan pequeño que supone la infiltración respecto a todo el volumen que entra a la cuenca, de ahí que no se vea diferencia entre hidrogramas. Y por otro lado, se tiene que para mayor duración del evento, menor es el efecto de la infiltración en este.

Para un evento de avenida en el río Ebro con una duración cercana o incluso en algunos casos superior al mes, la infiltración no es esperable que sea la causante de la desaparición en la salida de un volumen de agua considerable. No incluir la infiltración

en el modelo final también simplificará los cálculos y por tanto la duración final de la simulación, algo que además es de interés para este trabajo.



**Figura E.2: Relación porcentual entre el volumen infiltrado y el volumen entrante al sistema en los casos con infiltración y motas transversales.**

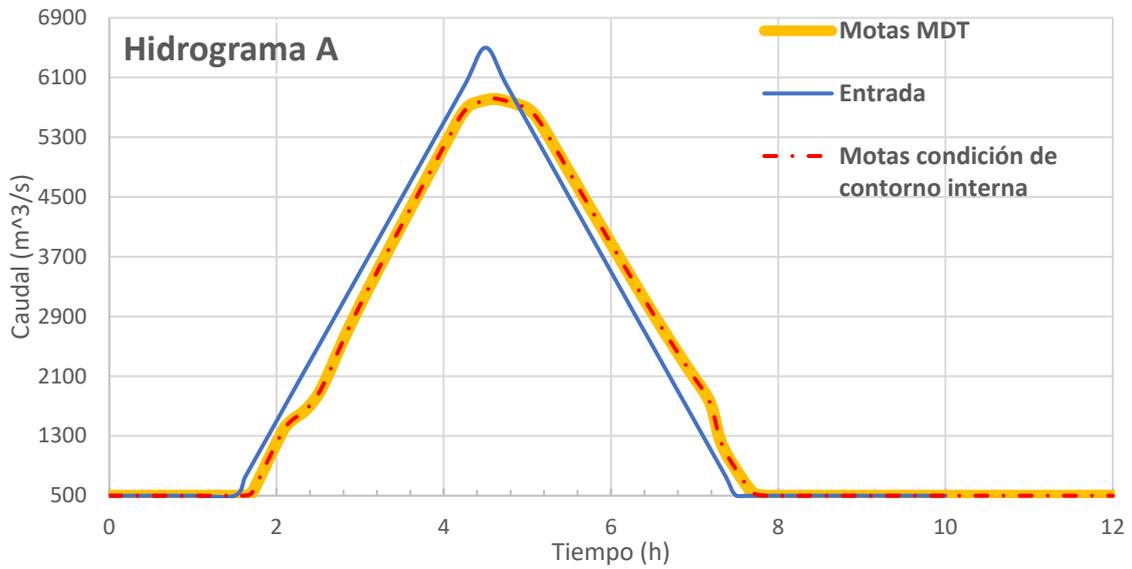
Visto esto, vamos a buscar el efecto en la colocación de motas, que aunque en estos casos ya estaba, se va a ser más cuidadoso con las condiciones de contorno externas como se explicará a continuación y además se va a emplear por primera vez la condición de contorno interna que se usará el caso real del río Ebro.

### **E.1.3. Caso test sin infiltración y motas transversales**

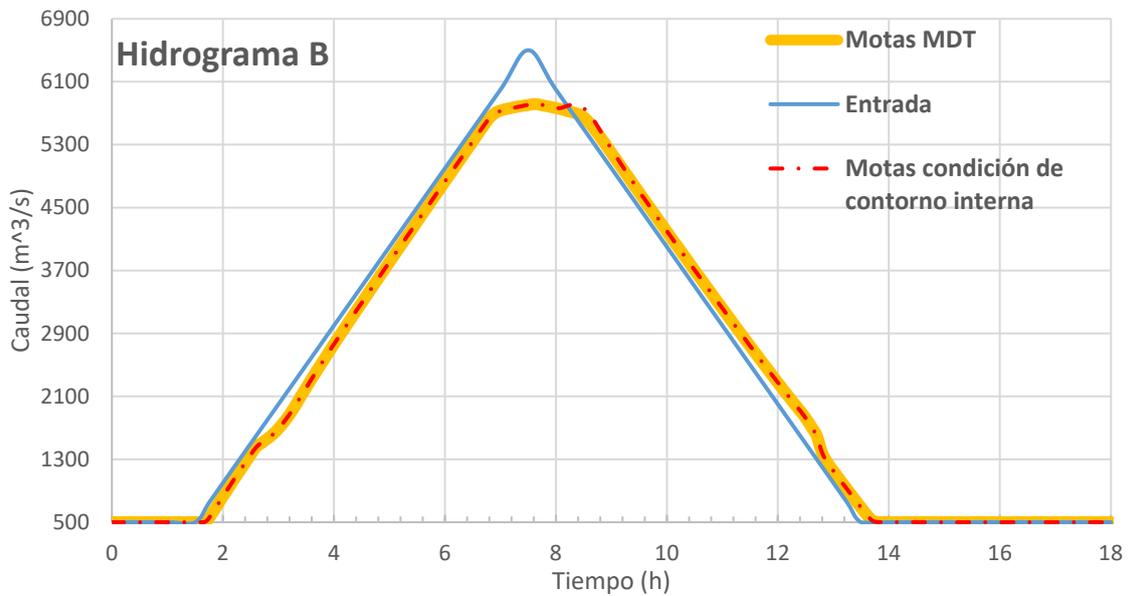
Con la colocación de las motas transversales y longitudinales generando en las llanuras diques que eviten el retorno o la salida del agua desbordada se pretender ver la forma del hidrograma a la salida y si esta tiene algún comportamiento especial.

Se plantean tres hidrogramas distintos, A, B y C; con tres tiempos de base distintos, 6, 12 y 24 horas respectivamente, y el mismo caudal máximo de  $6500 \text{ m}^3/\text{s}$ . Además, se compara el uso de la condición de contorno interna para definir las motas con el uso del propio modelo digital del terreno y una malla más fina alrededor de esas zonas.

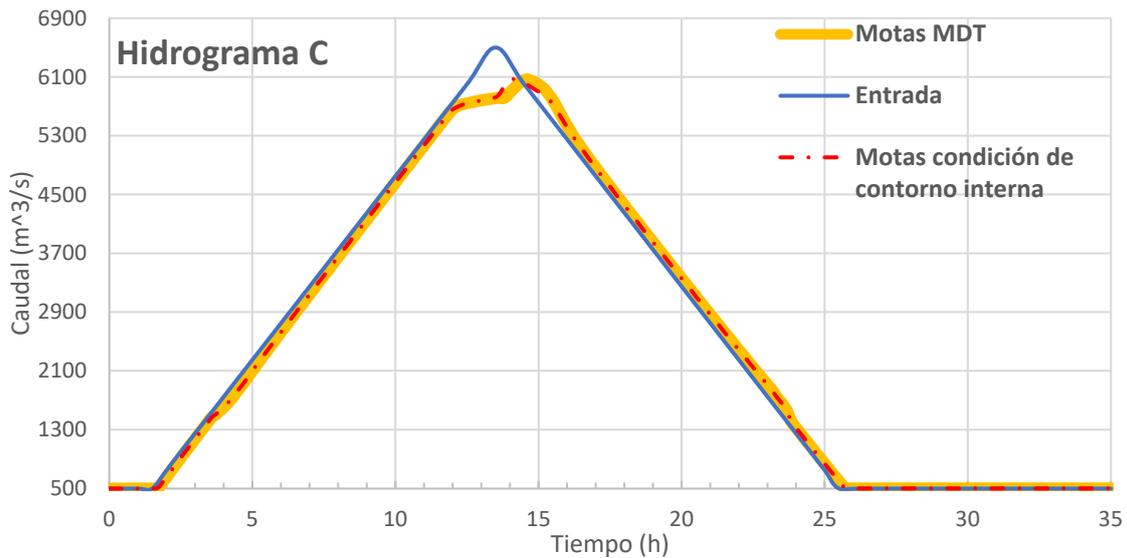
Como se muestra en las Figuras E.3, E.4 y E.5 el comportamiento de los hidrogramas a la salida es muy similar independientemente de que se emplee el modelo digital del terreno o la condición de contorno interna, algo ya demostrado en el artículo (Echeverribar *et al.* 2019). Ahora se requerirá comprobar si esto también es igual para un caso real como lo es el tramo Castejón-Zaragoza, donde el MDT puede presentar distintos fallos.



**Figura E.3: Hidrogramas correspondientes al caso con tiempo de base igual a 12 horas sin infiltración.**



**Figura E.4: Hidrogramas correspondientes al caso con tiempo de base igual a 18 horas sin infiltración.**



**Figura E.5: Hidrogramas correspondientes al caso con tiempo de base igual a 24 horas sin infiltración.**

La única diferencia que se aprecia está en el número de celdas empleadas y por tanto en el tiempo de resolución. Estos datos se muestran en la Tabla E.2. El número de celdas es muy aproximado en ambos casos, esto se debe a la simplicidad del caso. A pesar de esta pequeña diferencia, vemos como los tiempos de cálculo tienen diferencias apreciables salvo en el caso intermedio, en el que curiosamente son muy similares.

Motas como topografía 42.964 celdas	Motas como condición de contorno interna 44.042 celdas
Hidrograma A (6 horas)	
Tiempo de simulación (MM:SS) 09:48	Tiempo de simulación (MM:SS) 11:12
Hidrograma B (12 horas)	
Tiempo de simulación (MM:SS) 15:23	Tiempo de simulación (MM:SS) 15:56
Hidrograma C (24 horas)	
Tiempo de simulación (MM:SS) 32:46	Tiempo de simulación (MM:SS) 37:35

**Tabla E.2 Tabla de tiempos de simulación para los distintos casos test con motas transversales**

## F. Resultados de las simulaciones en el Ebro.

En este Anexo se verán los distintos resultados obtenidos para el tramo Castejón-Zaragoza. Se mostrarán por separado los resultados obtenidos para la configuración de las motas a partir de la información topográfica, y para la configuración de estas como condiciones de contorno internas.

Todas las simulaciones corresponden al mismo periodo de tiempo, comenzando el día 5 de abril a las 00:00 horas y finalizando el día 25 de ese mismo mes a las 00:00 horas, siendo un total de 480 horas simuladas. Con un caudal inicial de  $330 \text{ m}^3/\text{s}$  y un caudal máximo de  $2037 \text{ m}^3/\text{s}$  que se da transcurridas 263 horas y 15 minutos. Además se debe de recordar que los afluentes Jalón, Arba y Huecha se han considerado en las simulaciones, estos suponen aproximadamente un 10% del caudal total del río Ebro.

### F.1. Malla sin condiciones de contorno internas

Tal y como se explicaba en el Anexo C, se emplean tres configuraciones distintas para la malla. En todas ellas se utilizan las polilíneas *MeshBreakLine* para configurar las motas. En las dos primeras simulaciones se colocarán estas polilíneas a lo largo de una de las paredes de las motas, como se muestra en la Figura F.1. En esta figura se puede ver la diferencia entre esas dos configuraciones a simple vista. La diferencia en los tamaños de las celdas se debe al tamaño de vértice impuesto en la polilínea *MeshBreakLine* (Anexo C). Este tamaño es de 20 metros para la configuración de malla gruesa y de 10 metros para la configuración de malla fina, esto resultará en un total de 648.903 celdas para la primera y 954.673 para la segunda.

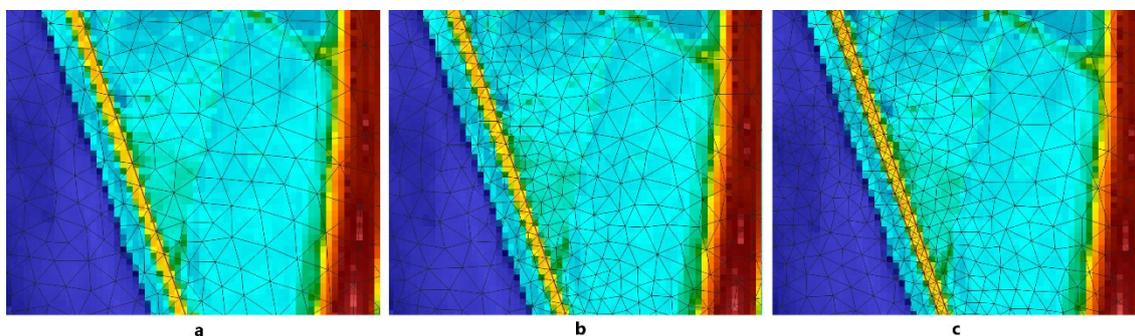


Figura F.1 Comparativa entre los distintos tipos de malla. Malla Gruesa (a), malla fina (b) y malla fina con doble polilínea (c).

La tercera de las configuraciones que se muestra en la Figura E.1 es una versión refinada de la malla fina. En esta se utiliza una segunda polilínea a lo largo de la otra pared de la mota. De esta forma se impone al mallador la creación de celdas que solo contengan las alturas correspondientes a la mota, de esta forma se debería de obtener un resultado más preciso que en el caso anterior. Esta configuración tiene un total de 1.088.881 celdas.

Incluso para la última de las configuraciones se debe tener en cuenta que las alturas que presenta el MDT pueden estar distorsionadas y por tanto llevar a resultados erróneos. Esto se puede deber a distintos factores, como la resolución del MDT o errores en la medición debidos a obstáculos, generalmente árboles, que se encuentren entre la superficie del terreno y en este caso el avión que realiza la medición utilizando tecnología LIDAR .

### F.1.1. Malla gruesa

La configuración de malla gruesa parte de la misma configuración base que partirán el resto de las simulaciones, la diferencia está en el empleo de las polilíneas *MeshBreakLine* con tamaños de arista de 20 metros para representar las motas.

Malla Gruesa	
Nº de celdas 648.903	Tiempo de simulación (D:HH:MM:SS) 0:19:46:58
Superficie promedio de las celdas [ $m^2$ ] 719	Caudal máximo [ $m^3/s$ ] 2.628

Tabla F.1: Datos característicos de la simulación con la configuración de malla gruesa

En la Tabla F.1 se muestra una tabla con datos relevantes de la simulación. Para una malla con un área de  $719 km^2$ , un número de celdas como el que se tiene es considerablemente bueno; así como el tiempo de simulación, que se puede considerar rápido. Pero estos datos por sí solos no sirven de nada, se requiere comprobar los hidrogramas y las manchas de inundación para poder asegurar que la simulación sea válida.

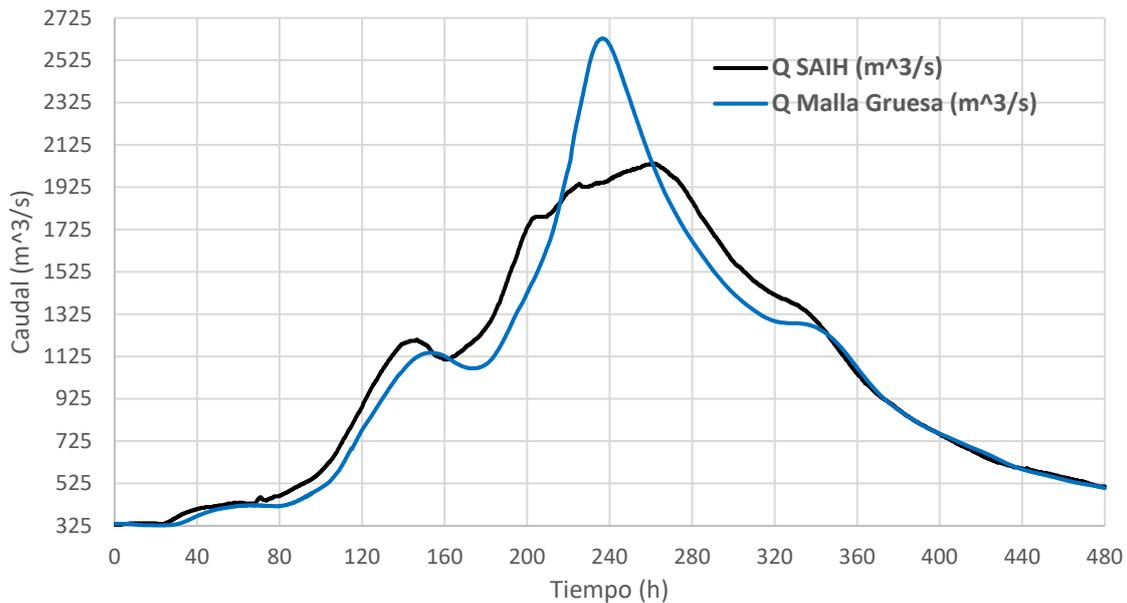
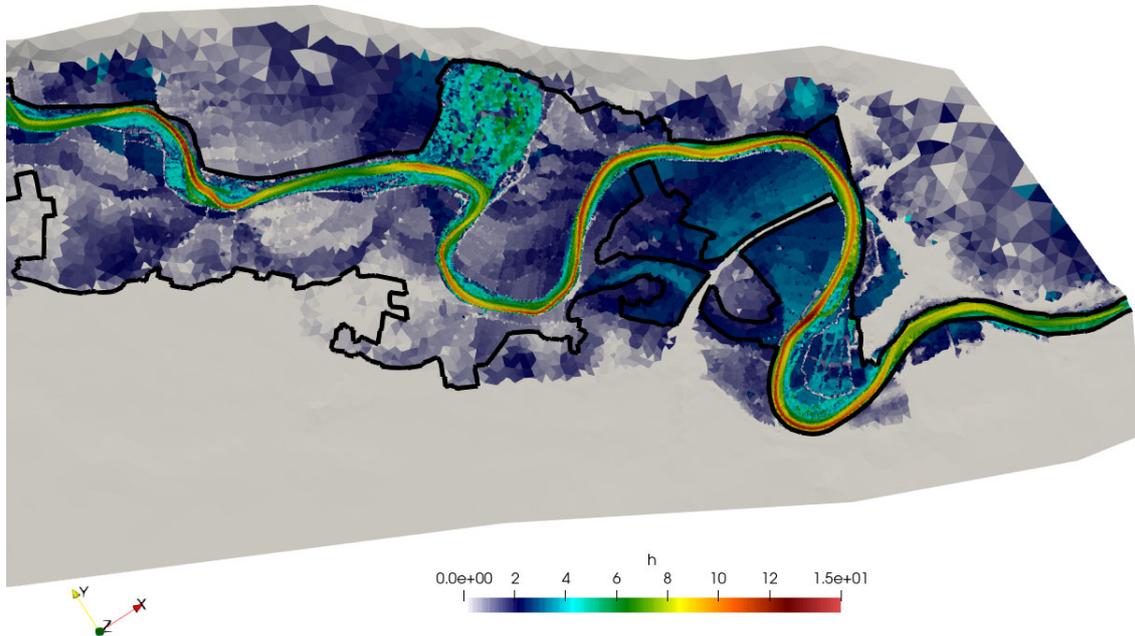


Figura F.2: Hidrogramas real y simulado (MG) en la estación de Aforo A011 – Zaragoza. Malla gruesa con motas como topografía

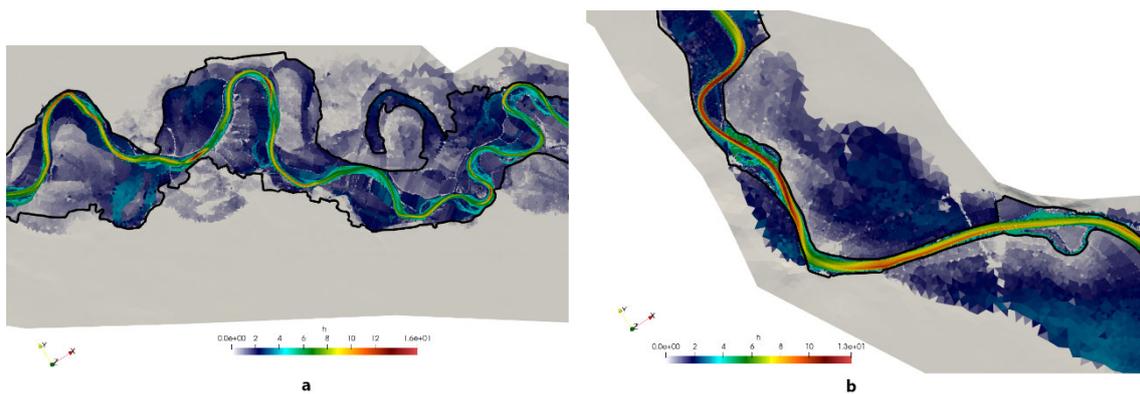
Como se puede observar en la Figura F.2, el hidrograma a la salida de Zaragoza no es aceptable. Sobre la hora 25 comienza a desfasarse de los valores obtenidos por el SAIH, ralentizándose para posteriormente forma un pico de  $2628 m^3/s$  a las 236 horas y 30 minutos del comienzo de la avenida. Como se ve en los hidrogramas, el comportamiento es radicalmente opuesto, mientras que la avenida real tuvo una crecida de caudal suave a partir de la hora 200, la avenida simulada mantiene la misma pendiente que tenía anteriormente.

Estos resultados tan dispares eran esperables, la resolución de la malla es demasiado gruesa en zonas relevantes como lo son las motas y sus proximidades. Si nos fijamos en algunas zonas de la Figura F.3, podemos ver como a la llegada de Zaragoza hay zonas que se han inundado que no deberían haberlo hecho. En la imagen se ve una línea negra que marca las zonas que se inundaron durante la avenida real para poder diferenciar ambas manchas y comparar así el grado de validez de los resultados.



**Figura F.3: Manchas de inundación a la llegada a Zaragoza. Malla gruesa con motas como topografía**

Otros dos puntos interesantes son las zonas de Pradilla de Ebro y de Tudela. Estas zonas como se pueden ver en la Figura F.4 tienen más superficie inundada de la que deberían, sobre todo en la zona de Tudela, donde el agua debería de ir completamente encauzada y no lo va.



**Figura F.4: Manchas de inundación en las proximidades de Pradilla de Ebro (a) y Tudela (b) . Malla gruesa con motas como topografía**

A continuación, se procederá a refinar la malla en la búsqueda de una mejora en los resultados, particularmente los del hidrograma de salida. Otros resultados como los valores de los niveles en las estaciones de aforo o las comparaciones de las manchas de agua para las distintas configuraciones de la malla se mostrarán en el punto 1.4 una vez se hayan explicado todos los casos.

### F.1.2. Malla fina

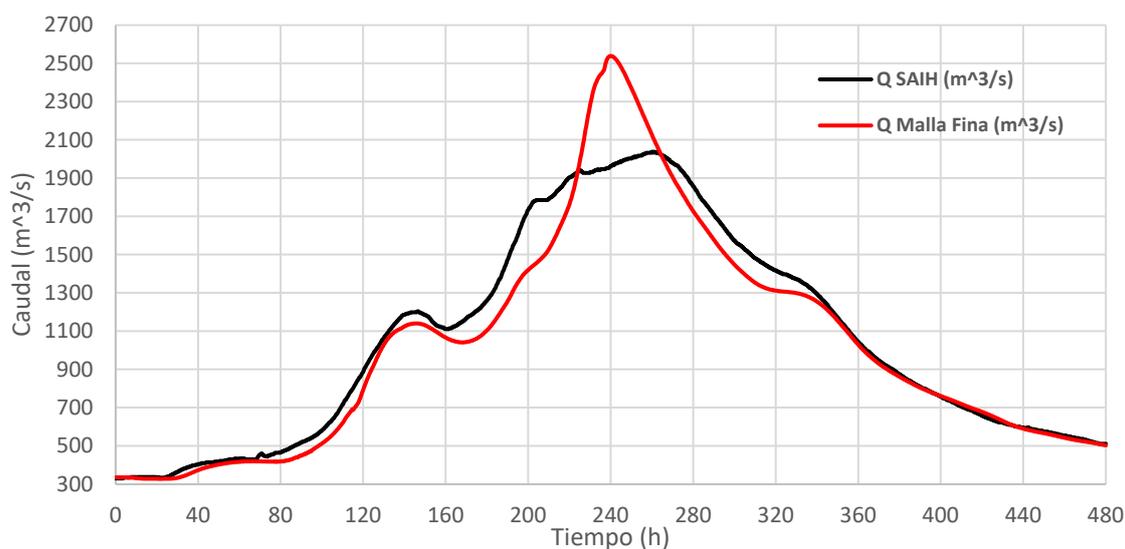
Para esta segunda configuración se empleará una malla fina consistente, como se ha explicado al comienzo de este anexo, en modificar el valor de los tamaños de arista asignado a las polilíneas *MeshBreakLine* (ver Anexo C). Se pasará así de un tamaño de arista de 20 metros a uno de 10 metros para representar las motas de manera más precisa en esta nueva configuración.

Malla Fina	
Nº de celdas	Tiempo de simulación (D:HH:MM:SS)
954.673	1:19:58:34
Superficie promedio de las celdas [ $m^2$ ]	Caudal máximo [ $m^3/s$ ]
488	2.539

**Tabla F.2: Datos característicos de la simulación con la configuración de malla fina**

Como se puede ver en la Tabla F.2, la simple modificación del tamaño de las aristas ha supuesto un gran cambio en toda la malla. El número total de celdas ha aumentado en un 47 %, lo que a su vez se traduce en una reducción de la superficie promedio de las celdas del 33 %. Todo esto supone un incremento del 120 % en el tiempo de resolución de la simulación.

Para la superficie total de análisis  $719 km^2$ , el número de celdas es muy elevado; así como el tiempo de resolución. Los cambios en la malla conllevan una mejora en los resultados tal y como se mostrará a continuación con el hidrograma a la salida y las manchas de inundación en distintos puntos; aun así, se sigue estando muy lejos de tener un resultado aceptable y se van a requerir algunos cambios en la malla que serán expuestos en el punto 1.3 de este Anexo E.



**Figura F.5: Hidrogramas real y simulado (MF) en la estación de Aforo A011 – Zaragoza. Malla fina con motas como topografía**

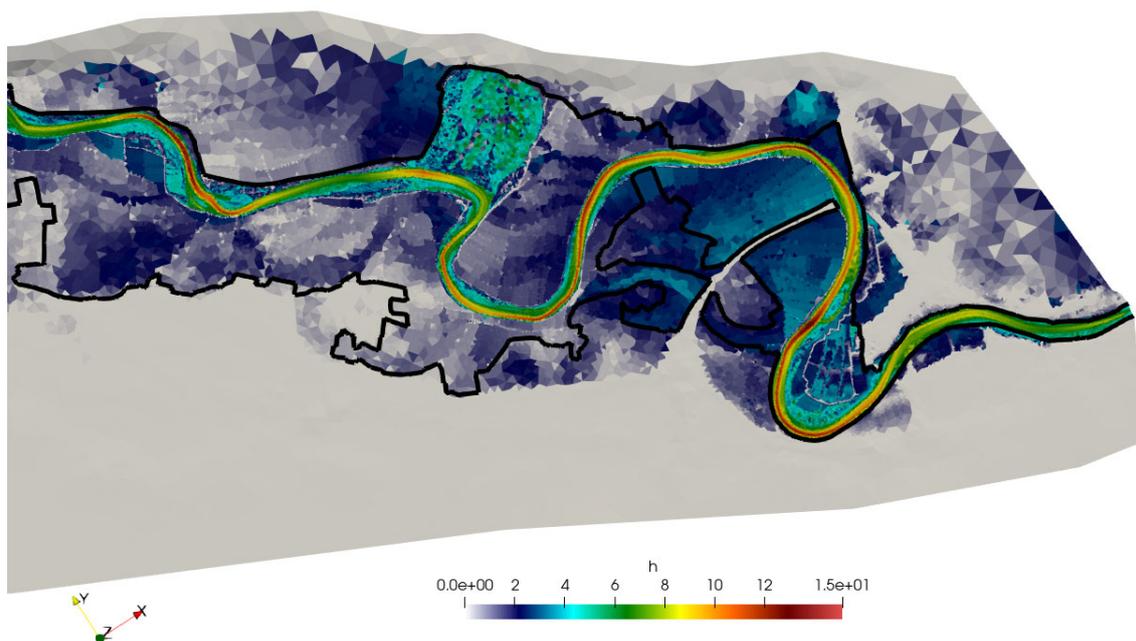
En la Figura F.5 se muestra el hidrograma a la salida de Zaragoza. Este ha mejorado con respecto a los resultados que se obtenían en la configuración de malla gruesa; sin embargo, los resultados siguen sin ser aceptables. Nuevamente sobre la hora

25 comienza a desfasarse de los valores obtenidos por el SAIH, pero esta vez se mantiene bastante próximo a esos valores hasta la hora 160. A partir de ahí se ralentiza como ocurría con la otra configuración, para posteriormente forma un pico de  $2539 \text{ m}^3/\text{s}$  a las 242 horas del comienzo de la avenida, unas 25 horas antes de lo debido. Como se ve en los hidrogramas, aunque el comportamiento es mejor que en la configuración anterior, la forma del hidrograma sigue siendo radicalmente opuesta en la zona más delicada de este.

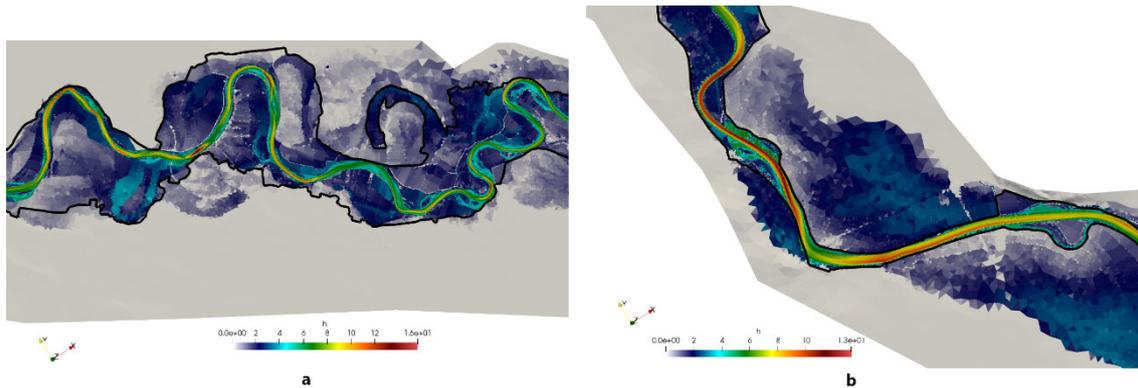
Estos malos resultados no eran tan esperables como los anteriores, pues se esperaba una mejora significativa en la representación de las motas y por tanto en el hidrograma que finalmente no se ha dado.

Si nos fijamos en algunas zonas de la Figura F.6 se puede ver como a la llegada de Zaragoza sigue habiendo zonas que están inundadas y que no deberían estarlo; aunque es cierto que el calado de agua en esas zonas es menor que para la configuración anterior.

Como se había visto anteriormente, otras dos zonas de conflicto son las cercanías de Pradilla de Ebro y de Tudela. Estas zonas como se pueden ver en la Figura F.7 tienen más superficie inundada de la que deberían, al igual que antes. En esta zona, y a diferencia de Zaragoza, no vemos que al menos la altura del agua se haya reducido considerablemente respecto a la configuración anterior. Por tanto el refinamiento de la malla no ha surgido efecto en esta zona.



**Figura F.6: Manchas de inundación a la llegada a Zaragoza. Malla fina con motas como topografía**



**Figura F.7: Manchas de inundación en las proximidades de Pradilla de Ebro (a) y Tudela (b) . Malla fina con motas como topografía**

Ahora se procederá a refinar una última vez la malla buscando una mejora en la representación de las motas que nos acerque a los resultados provistos por el SAIH, particularmente del hidrograma de salida. Los valores de nivel en el resto estaciones de aforo y las comparaciones de las manchas de agua para las distintas configuraciones de la malla se mostrarán en el punto 1.4.

### F.1.3. Malla fina doble

Para esta tercera configuración se desdoblamos las polilíneas *MeshBreakLine*, de modo que se tienen dos líneas para cada mota. Como se ha explicado al inicio de este Anexo, esta configuración asegura que las motas están bien representadas por una serie de celdas contenidas por estas polilíneas. Estas celdas a priori no deberían de contener alturas del terreno que no correspondan a la altura de las motas; como se verá más adelante esto no es cierto debido a errores del MDT. El tamaño de arista sigue siendo de 10 metros ya que ha resultado ser la mejor de las anteriores configuraciones. A esta nueva configuración se la ha decidido llamar malla fina doble.

Se va a simular una cuarta configuración cuya única diferencia con la anterior, malla fina doble, es la aplicación de un factor al coeficiente de Manning, este factor será de 1,15. Visto que los picos de los hidrogramas sucedían antes de lo debido, se decide aplicar este factor con la intención retrasar la aparición del valor máximo que actualmente sucede unas 20/30 horas antes de lo debido según los datos del SAIH.

Malla Fina Doble	
Nº de celdas	Tiempo de simulación (D:HH:MM:SS)
1.088.881	1:18:03:48
Superficie promedio de las celdas [ $m^2$ ]	Caudal máximo [ $m^3/s$ ]
428	2.361

**Tabla F.3: Datos característicos de la simulación con la configuración de malla fina doble**

En la Tabla F.3 se muestra como la creación de estas nuevas polilíneas paralelas a las anteriores aumenta el número de celdas en un 14 %, mientras que la superficie de estas se reduce en un 12 %. Podría resultar extraño que el tiempo de la simulación sea menor pese a tener más celdas; sin embargo, hay que tener en cuenta que los ángulos

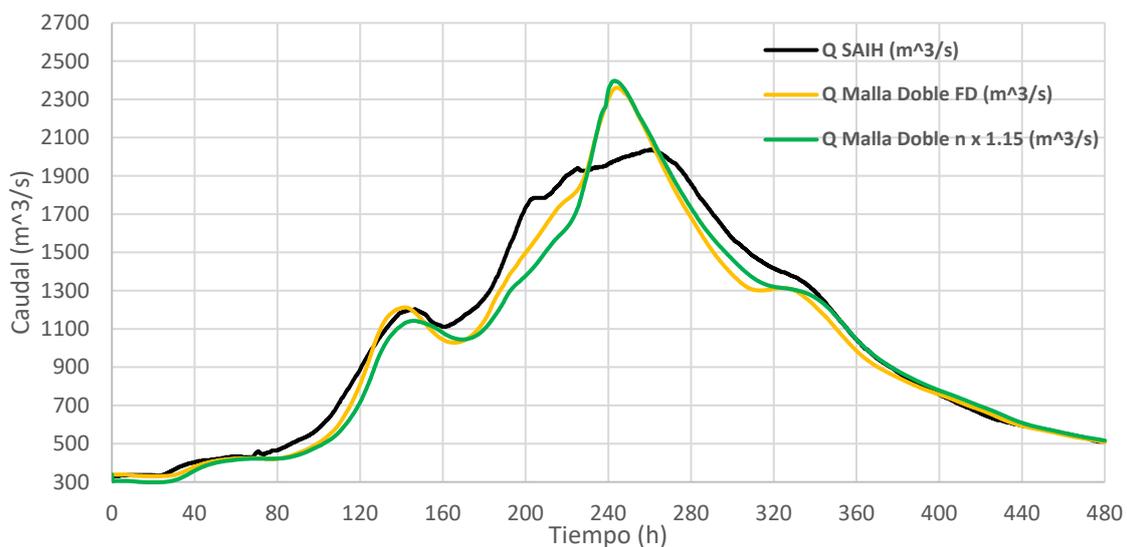
internos de las celdas son un factor importante a la hora de resolver el sistema. Por tanto, esta nueva configuración genera unas celdas más orgánicas que la anterior. Además, el valor de caudal máximo se ha reducido considerablemente respecto al caso anterior; por tanto, se puede deducir que esta configuración es mejor.

Los datos de la configuración a la que se aplica el factor de 1,15 se muestran en la Tabla F.4. Tanto el número de celdas como la superficie promedio de estas no van a variar. Lo que sí cambia es el tiempo de simulación, que se amplía dos horas respecto a la configuración de malla fina doble. Esto se debe a la aplicación de un factor sobre el coeficiente de Manning en todas las celdas del dominio. Según los datos de la tabla, el valor del caudal máximo se ha incrementado, lo cual hace pensar que estos resultados son peores; sin embargo se debe esperar al análisis del hidrograma ya que el objetivo era retrasar ese valor máximo.

Malla Fina Doble con Manning x 1,15	
Nº de celdas 1.088.881	Tiempo de simulación (D:HH:MM:SS) 1:20:07:48
Superficie promedio de las celdas [ $m^2$ ] 428	Caudal máximo [ $m^3/s$ ] 2.398

**Tabla F.4: Datos característicos de la simulación con la configuración de malla fina doble con un factor aplicado a Manning de 1,15**

Recordar que para la superficie total del dominio, el número de celdas es muy elevado; así como el tiempo de resolución. A pesar de la mejora en los resultados se va a ver a continuación que se sigue estando muy lejos de tener un resultado aceptable que se ajuste a los valores reales.

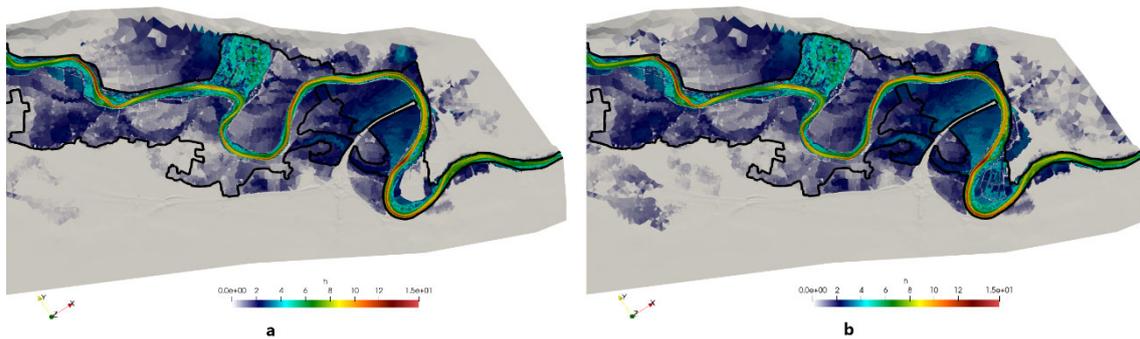


**Figura F.8: Hidrogramas real y simulados (MF) en la estación de Aforo A011 - Zaragoza. Malla fina doble y n x 1,15 con motas como topografía**

El hidrograma mostrado en la Figura F.8 correspondiente a la salida de Zaragoza contiene los resultados de las dos configuraciones que se han explicado en este punto del anexo. Se ve que los resultados han mejorado con respecto a las configuraciones

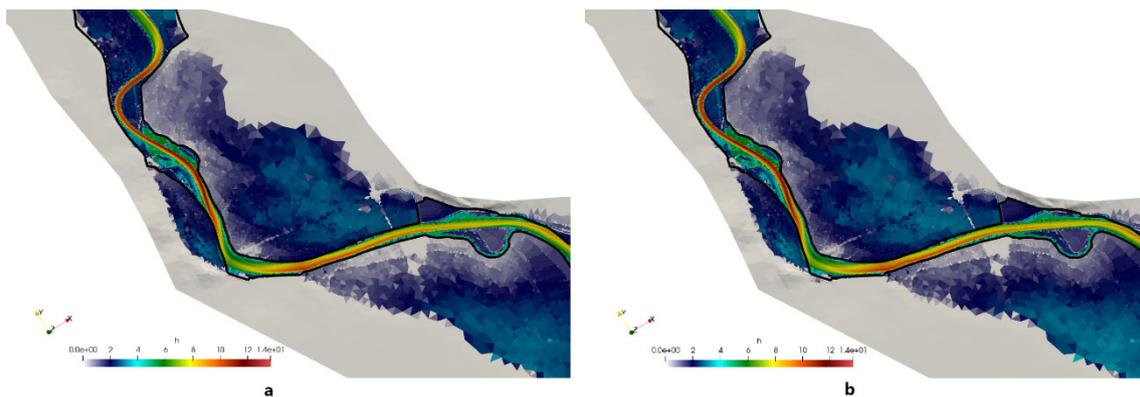
anteriores aunque siguen sin ser aceptables. Durante las 180 primeras horas los hidrogramas muestran unos resultados muy similares a los del SAIH. A partir de ese momento, ambas simulaciones se ralentizan y se despegan de los valores recogidos por el SAIH. Comparando ambas configuraciones vemos como la aplicación de un factor al coeficiente  $n$  de Manning no ha surgido el efecto deseado e incluso se puede afirmar que el resultado es peor.

Pese a la mejora, el comportamiento del hidrograma en la zona clave sigue siendo muy distinto de lo esperado, tanto cuantitativa como cualitativamente, por tanto no se puede considerar como óptima esta configuración. A continuación se van a analizar las manchas de agua para ver sobre que zonas se han producido las mejoras.



**Figura F.9: Manchas de inundación a la llegada a Zaragoza. Malla Doble Fina (a) y Malla Fina Doble con factor  $n$  de Manning  $\times 1,15$  (b) . Malla fina doble y  $n \times 1,15$  con motas como topografía**

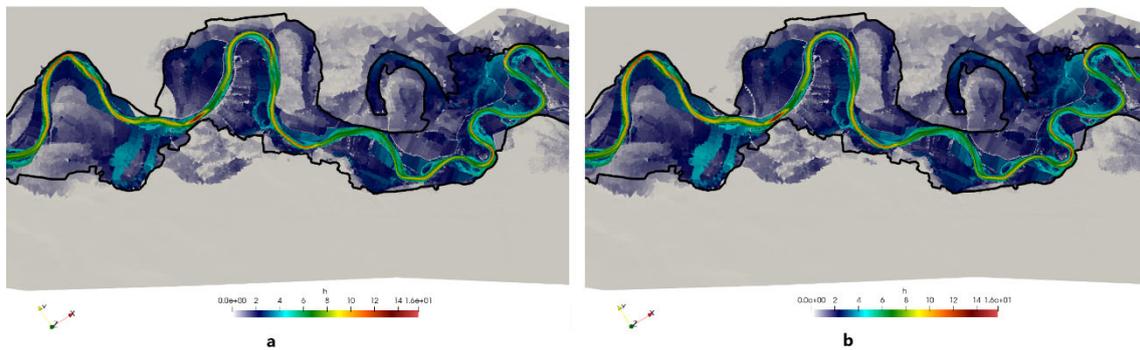
En la Figura F.9 tenemos una comparativa entre las manchas de aguas para las dos últimas configuraciones empleadas en la zona próxima a la salida en Zaragoza. Como se observa, la ciudad de Zaragoza ya no se ve inundada como es esperable; sin embargo en otras zonas a penas se han reducido las manchas de inundación que ocupan zonas fuera de las marcas proporcionadas por el SAIH.



**Figura F.10: Manchas de inundación en las proximidades de Tudela. Malla Doble Fina (a) y Malla Fina Doble con factor  $n$  de Manning  $\times 1,15$  (b) . Malla fina doble y  $n \times 1,15$  con motas como topografía**

En otra de las zonas conflictivas, Tudela, que se muestra en la Figura F.10, se puede ver como el calado se ha reducido en ambos casos con respecto a las configuraciones de malla gruesa y malla fina. A pesar de esto el agua que circula por esta zona debería estar encauzada, tal y como marcan las líneas negras correspondientes a los datos del SAIH, cosa que no ocurre para ninguna de las configuraciones actuales.

Por último, en la Figura F.11 vemos la zona de Pradilla de Ebro, donde se ve una reducción considerable del calado en ambas situaciones, pero esto no es suficiente para adecuarse a las marcas negras.



**Figura F.11: Manchas de inundación en las proximidades de Pradilla de Ebro. Malla Doble Fina (a) y Malla Fina Doble con factor  $n$  de Manning  $\times 1,15$  (b) . Malla fina doble y  $n \times 1,15$  con motas como topografía**

Pese a las mejoras de las correcciones propuestas no se ha conseguido adecuar las machas de aguas a los datos que se recogieron durante la avenida. Tampoco se ajusta ni cuantitativa ni cualitativamente ninguno de los hidrogramas tanto de calado (vistos hasta ahora), como los de nivel que se verán a continuación en este anexo.

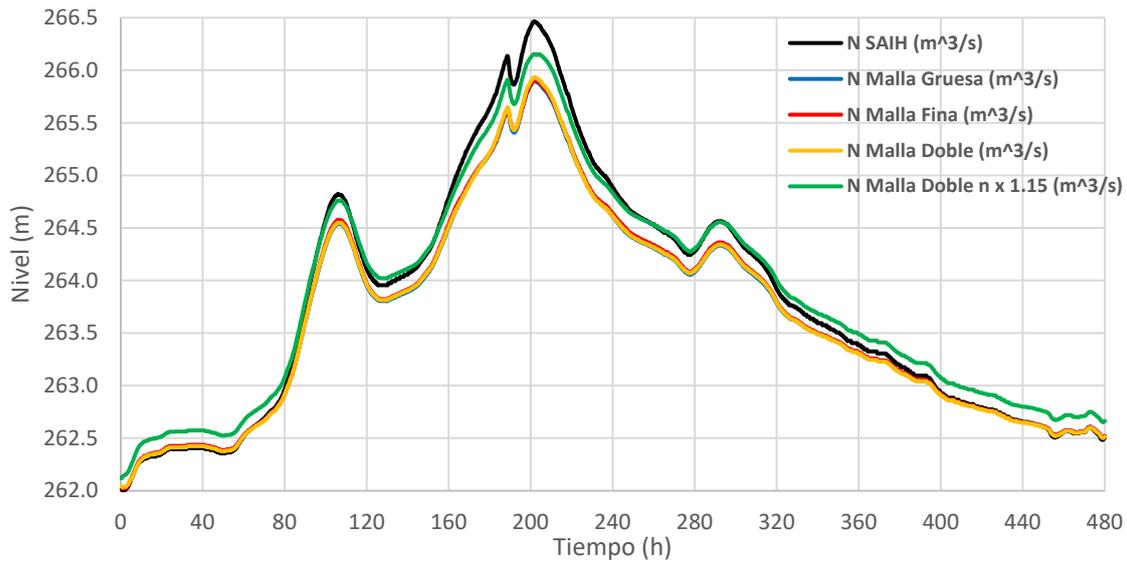
Como solución se propone un cambio en la manera de representar las motas. En el punto 2 de este Anexo F se explicarán y se mostrarán los resultados correspondientes a este cambio.

#### **F.1.4. Comparación de resultados**

Se van a mostrar en este punto los distintos hidrogramas de nivel para todas las estaciones de aforo de la cuenca que se encuentran en el tramo del río Ebro Castejón-Zaragoza. Se van a mostrar en el orden en el que se encuentran desde la zona más alta, Castejón, hasta la zona más baja, Zaragoza.

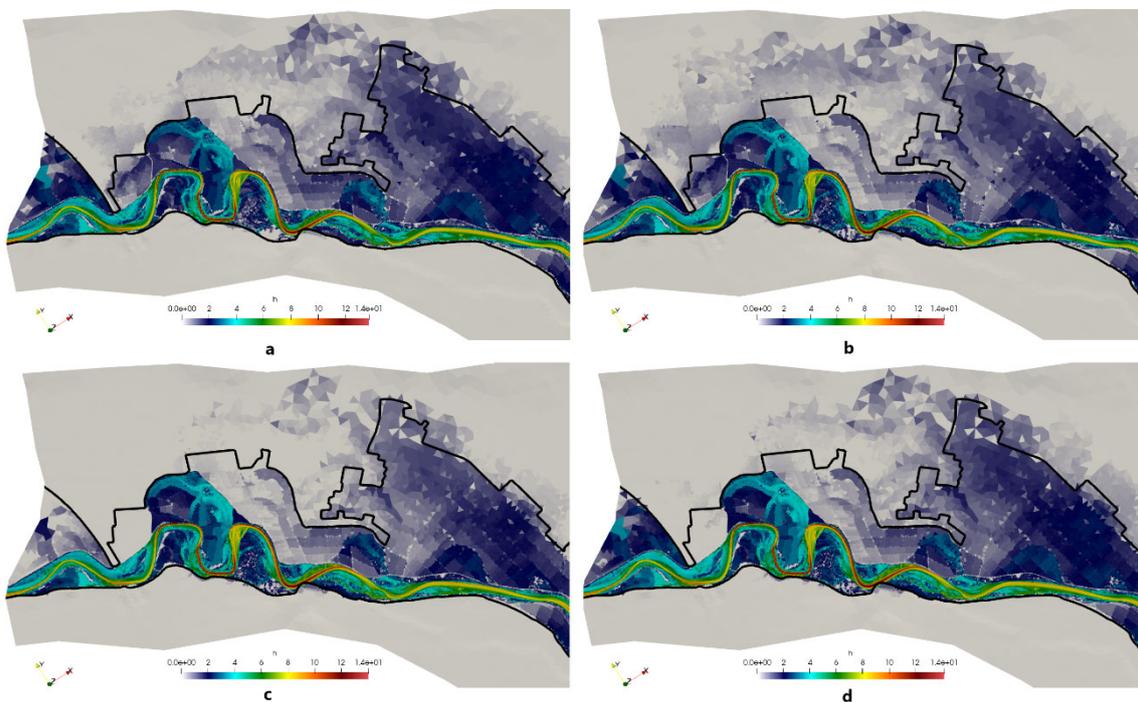
Para simplificar las explicaciones vamos a denominar configuración 1 a la configuración de malla gruesa, configuración 2 a la configuración de malla fina, configuración 3 a la configuración de malla fina doble y configuración 4 a la configuración de malla fina doble con la aplicación de un factor de 1,15 al coeficiente  $n$  de Manning. Además, las figuras correspondientes a las manchas de agua contienen cuatro imágenes a, b, c y d que se corresponden a las configuraciones 1, 2, 3 y 4 respectivamente.

En la primera Figura F.12 tenemos la comparativa de niveles en la estación de aforo de Castejón. Como se ve, salvo la configuración 4, todas son bastante similares entre ellas. Pese a que aquí es la configuración 4 la que se adapta mejor a los valores del SAIH, se ha visto que a la salida no ocurre lo mismo. Aun así todas las configuraciones se ajustan correctamente, como es esperable en una estación que se encuentran al principio del dominio.



**Figura F.12: Niveles real y simulados en la estación de Aforo A002 – Castejón. Comparación para motas como topografía**

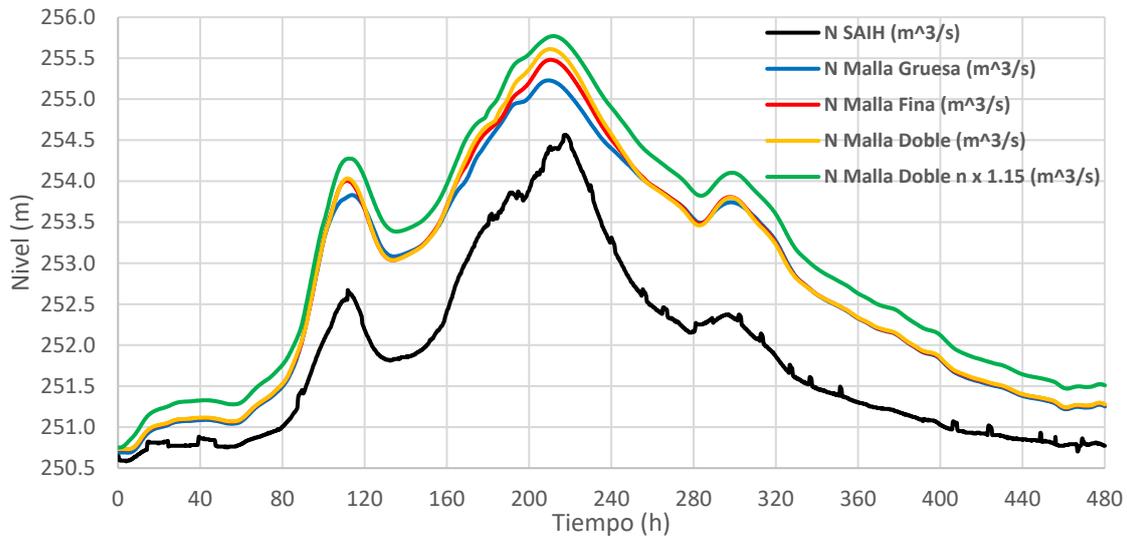
La Figura F.13 nos muestra las manchas de agua en esta zona. Vemos que los casos ‘a’ y ‘b’ apenas tienen diferencias y ambos tienen zonas inundadas que no les corresponden. ‘c’ y ‘d’ mejoran esto; aunque en ‘c’ vemos zonas secas al inicio que no deberían estarlo a la vez tiene zonas secas en la parte superior que ‘d’ tiene mojadas. Se ve así que ambas configuraciones tienen efectos positivos y negativos por igual para esta zona.



**Figura F.13: Manchas de inundación a la altura de Castejón en la hora 210. Comparación para motas como topografía**

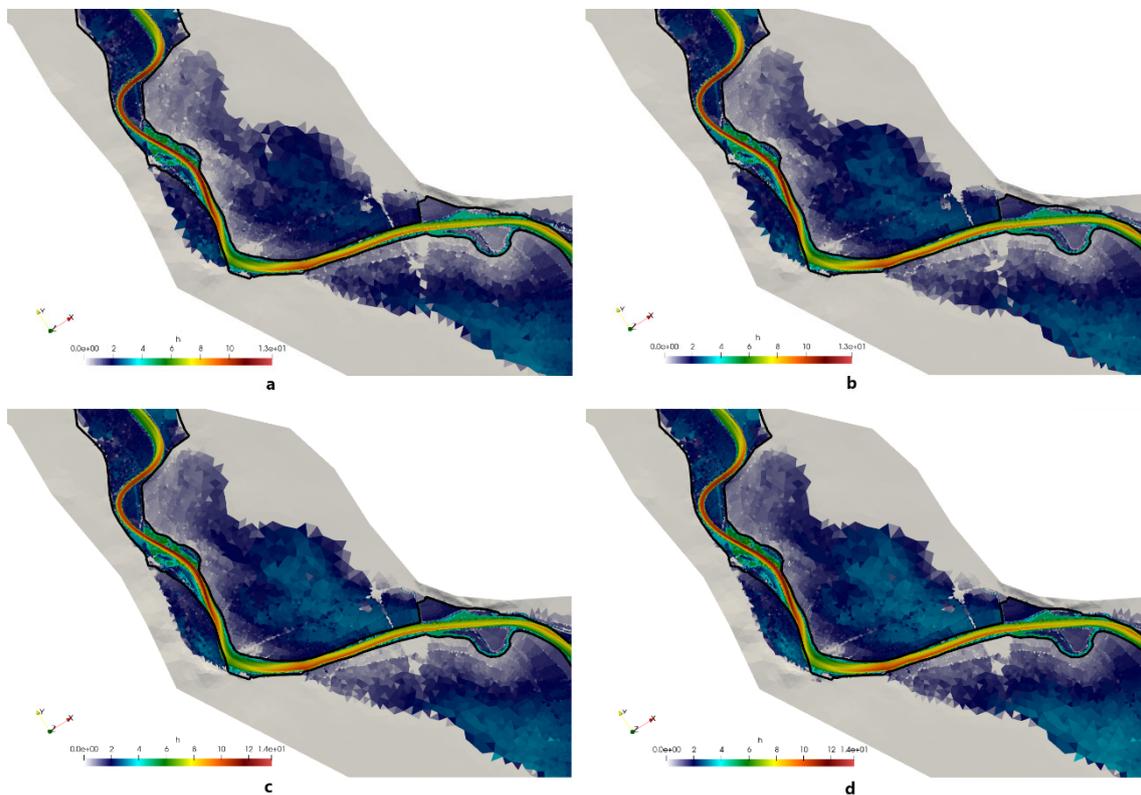
Observando unos kilómetros más abajo, nos encontramos con la estación de aforo de Tudela, Figura F.14. En esta vemos como desde la hora 80 hasta prácticamente el final de la simulación, los valores tienen entre metro y metro y medio de diferencia con los del

SAIH. Entre sí la diferencia no es muy grande, y vemos que el efecto que se aprecia es el incremento del calado conforme se refina más la malla.



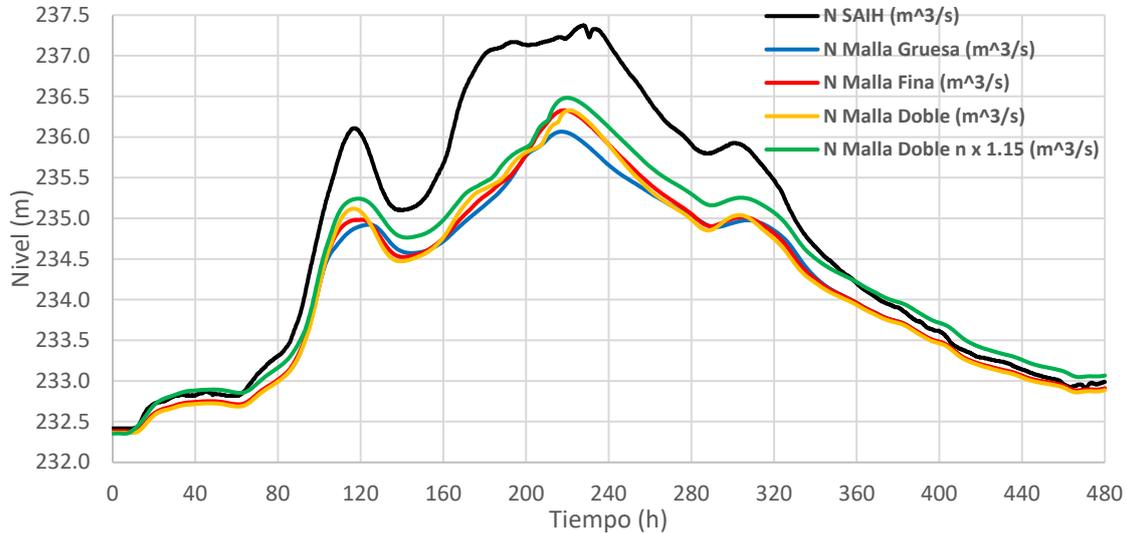
**Figura F.14: Niveles real y simulados en la estación de Aforo A284 – Tudela. Comparación para motas como topografía**

Se ha comentado que conforme se refina la configuración de la malla los valores del nivel en Tudela aumentan y se alejan de los marcados por el SAIH. Es curioso el efecto negativo del refinamiento en esta zona y se observa en las imágenes de la figura F.15 como el volumen de agua en las llanuras está aumentando junto al refinamiento de la malla; justo al contrario de cómo se esperaría. Es posible que a nivel global la malla este más refinada y sin embargo esta zona no se vea afectada por ese mayor refinamiento.



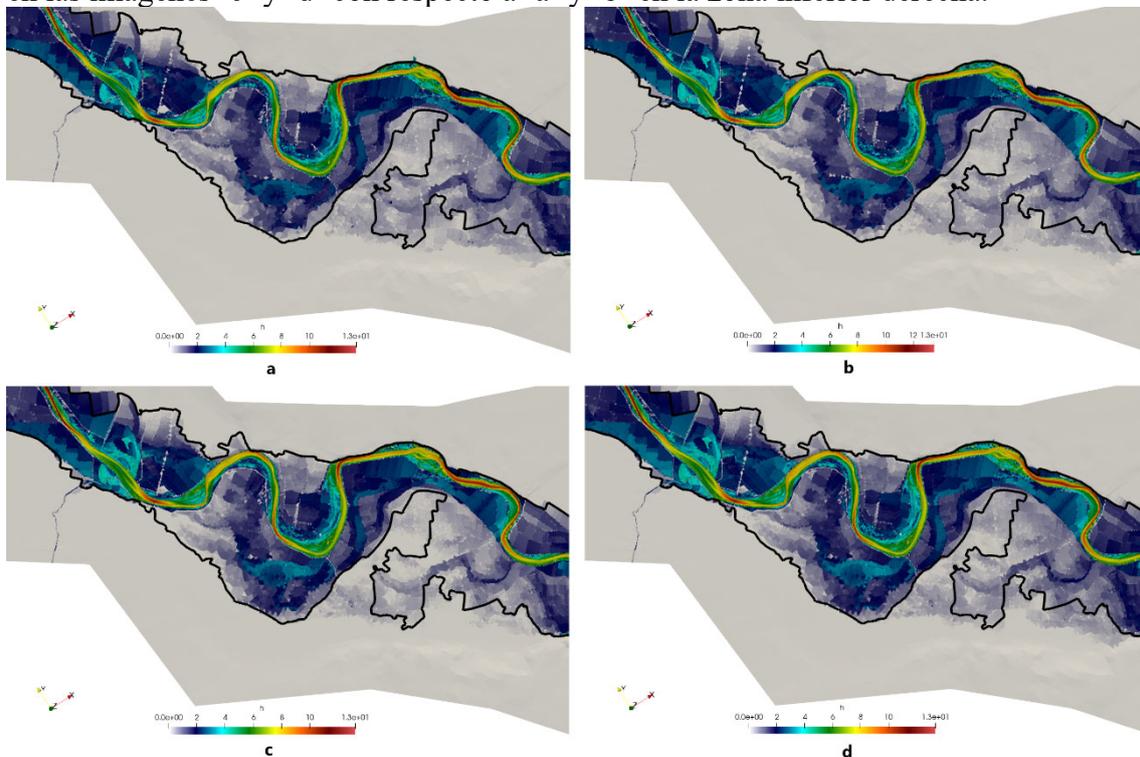
**Figura F.15: Manchas de inundación a la altura de Tudela en la hora 210. Comparación para motas como topografía**

El aforo de Novillas de la Figura F.16 muestra justo la situación contraria a la de Tudela. En este caso, los hidrogramas correspondientes a la simulación están por debajo de lo marcado por el SAIH. Sin embargo, aquí si vemos como a mayor refinamiento, menor distancia entre los valores simulados y los del SAIH. Se puede comentar también que cualitativamente hablando, las figuras no se comportan de forma similar; ya que se debería de ver un valle entre la hora 180 y la 220 aproximadamente.



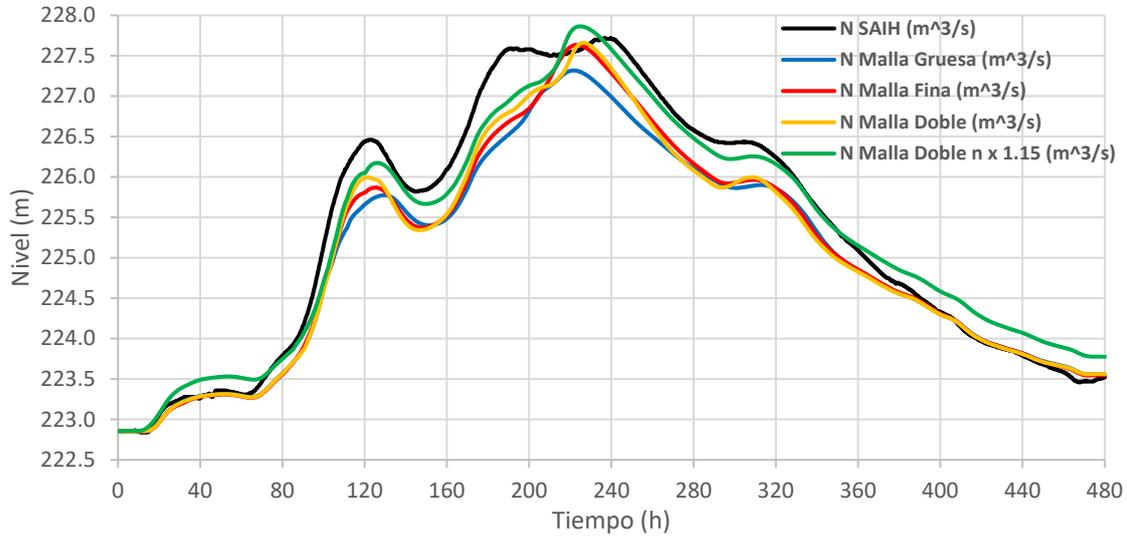
**Figura F.16: Niveles real y simulados en la estación de Aforo A285 – Novillas. Comparación para motas como topografía**

Pese a la distancia entre hidrogramas y al comportamiento distinto entre ambos, se puede ver como las manchas de inundación de la Figura F.17 para esa zona están bastante ajustadas a los límites de la inundación real. También se aprecia una leve mejora en las imágenes ‘c’ y ‘d’ con respecto a ‘a’ y ‘b’ en la zona inferior derecha.



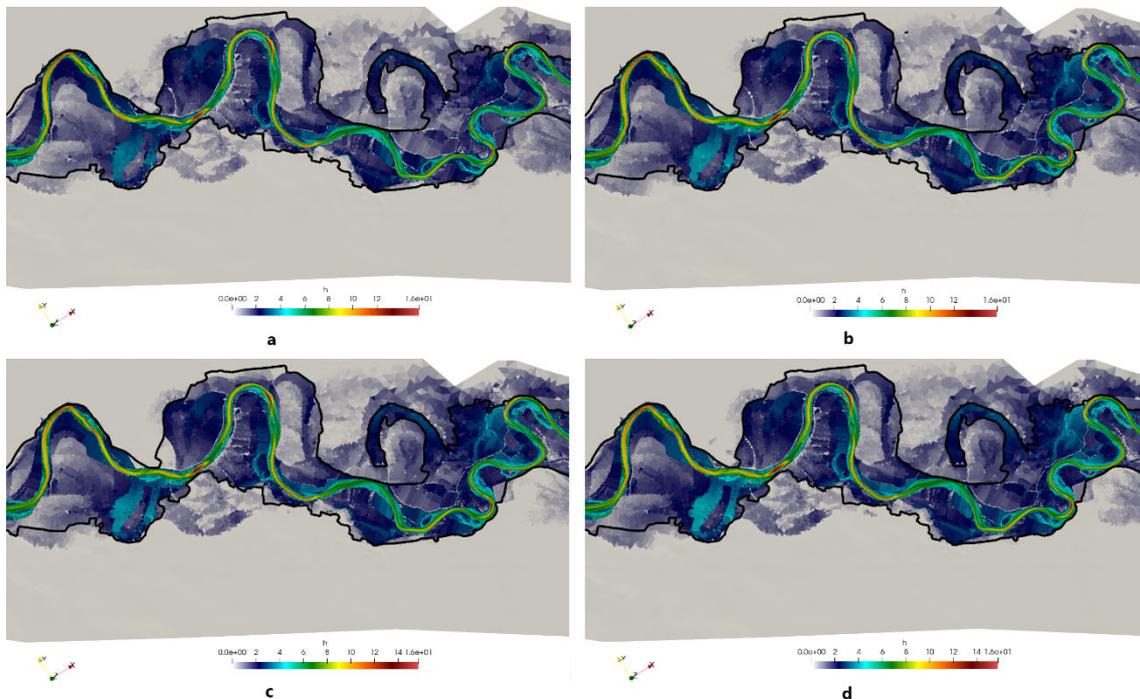
**Figura F.17: Manchas de inundación a la altura de Novillas en la hora 220. Comparación para motas como topografía**

En los hidrogramas de la estación de aforo de Pradilla de Ebro, Figura F.18, se ve que la distancia entre los valores del SAIH y los obtenidos por la simulación se han reducido, particularmente para las dos últimas configuraciones, donde se consigue aumentar el nivel con las mejoras en la malla. Aun así, se ve un comportamiento ligeramente distinto como ocurría en Novillas, en este caso entre las horas 200 y 240.



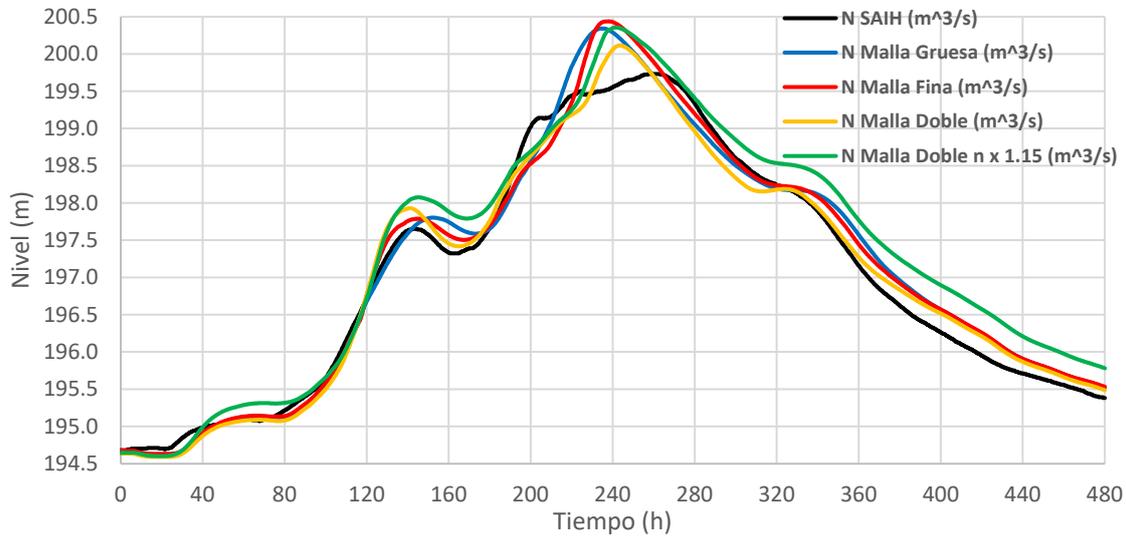
**Figura F.18: Niveles real y simulados en la estación de Aforo A340 – Pradilla de Ebro. Comparación para motas como topografía**

Las manchas de inundación de la zona de Pradilla de Ebro, Figura F.19, muestran una primera mitad ajustada a los límites registrados, y una segunda donde se inunda más superficie de la debida. Conforme se refina la malla se aprecia una mejora en la parte derecha inferior, a la vez que se empeora la zona derecha superior en menor medida.



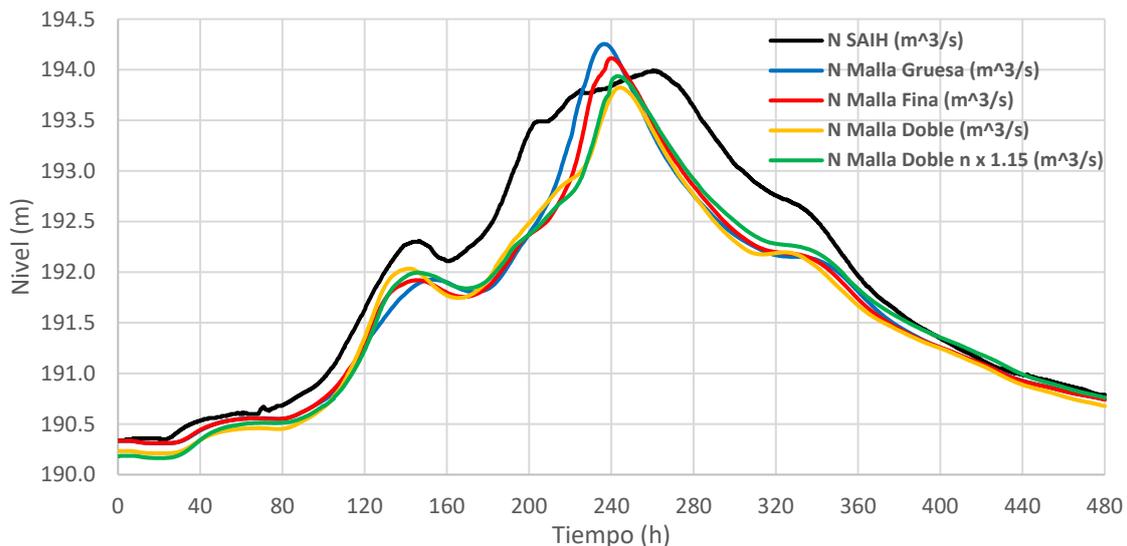
**Figura F.19: Manchas de inundación a la altura de Pradilla de Ebro en la hora 230. Comparación para motas como topografía**

Por último están los aforos en Zaragoza, el primero de ellos se encuentra en el puente Ronda Norte a la entrada de la ciudad y el segundo de ellos, que además es la salida del contorno, se encuentra en el puente de Santiago. En el aforo de Ronda Norte, Figura F.20, se ve un comportamiento muy ajustado a los valores del SAIH para todas las configuraciones; siendo la peor la última de ellas, donde se aplica un factor de 1,15 al coeficiente n de Manning. Esta exactitud se rompe como ocurría en los dos aforos anteriores y al igual que pasa en el Aforo de Zaragoza, Figura F.21.



**Figura F.20: Niveles real y simulados en la estación de Aforo A311 – Ronda Norte. Comparación para motas como topografía**

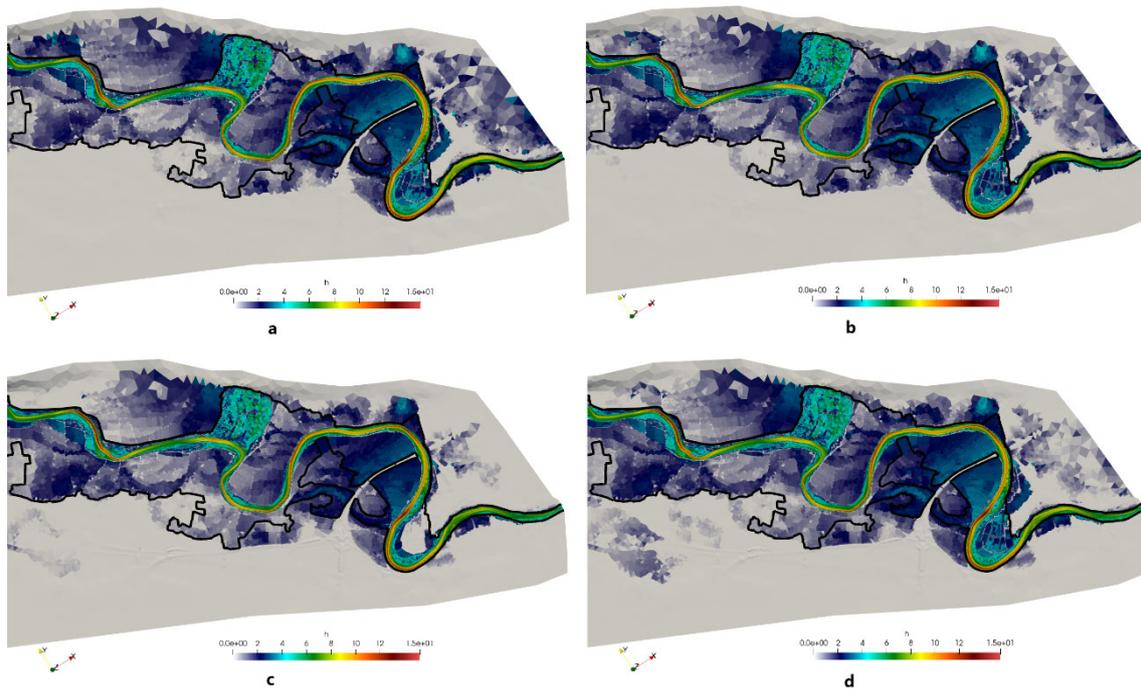
Entre el aforo de Zaragoza y el de Ronda Norte se ve que los resultados han empeorado y hay distintos errores a lo largo de todo el hidrograma de nivel. Estos errores son los mismos que se han comentado para los distintos hidrogramas de caudal de los puntos previos a este.



**Figura F.21 Niveles real y simulados en la estación de Aforo A011 – Zaragoza. Comparación para motas como topografía**

En la Figura F.22 se muestran ambas zonas junto a la llegada a Zaragoza. Se ve que la mejora en la malla reduce los errores en la ciudad de Zaragoza (parte derecha) y

en la parte superior izquierda. En esta zona se ve un claro efecto negativo al aplicar el factor de 1,15 al coeficiente de Manning.



**Figura F.22: Manchas de inundación a la altura de Zaragoza en la hora 240. Comparación para motas como topografía**

Lo último que se muestra en la Figura F.23 es una comparación de las distintas manchas de agua para la hora 240 a lo largo de todo el tramo Castejón-Zaragoza.

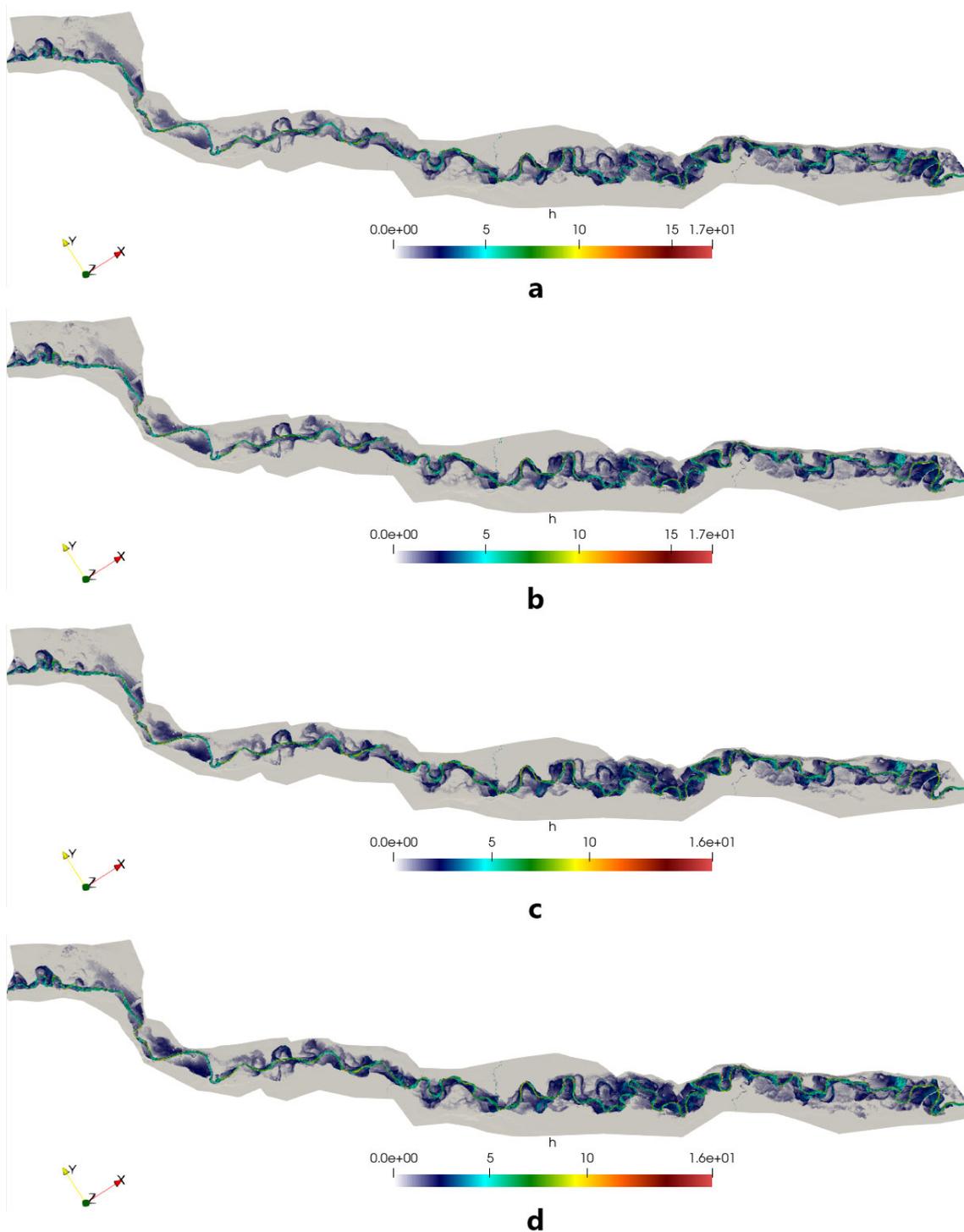


Figura F.23: Manchas de inundación en el tramo Castejón-Zaragoza en la hora 240. Comparación para motas como topografía

## F.2. Malla con condiciones de contorno internas

Como se ha explicado en el Anexo A, la mejora propuesta para reducir el número de celdas de la malla a la vez que se mejora la representación de las motas, el elemento más sensible, consiste en el uso de la condición de contorno interna, vertedero o *Weir*. El uso de vertederos permite la pérdida de resolución en la malla en puntos críticos como son las motas, sin perder o incluso mejorando la precisión de los resultados.

Se van a realizar un total de 4 simulaciones. La primera de ellas servirá como base de las otras, y consiste en sustituir las polilíneas *MeshBreakLine* por polilíneas *Weir*, tal y como se explicaba en el Anexo C. La configuración de la que se parte es la configuración de malla gruesa y aparte de esta modificación, el resto de la configuración es la misma. En la segunda configuración se van a realizar una serie de mejoras en función de lo observado en los primeros resultados. Se explicará más detalladamente a continuación, pero, de manera simplificada, consiste en cambiar el tamaño de algunas motas y modificar la malla en determinados puntos.

La tercera y cuarta configuración consisten en aplicar dos factores al coeficiente de Manning, 1,25 y 1,15 respectivamente. La idea es retrasar la llegada a Zaragoza y por tanto cuadrar los hidrogramas. Esto mismo se hacía en el caso anterior, pero únicamente con un factor de 1,15. Solo se empleaba ese factor debido a que fue en este punto donde se vio que ese era el más efectivo de ambos. Aunque como se verá a continuación sus efectos son muy distintos si se usan o no vertederos.

### F.2.1. Configuración Original

La configuración original, tal y como se ha explicado anteriormente, parte de la configuración de malla gruesa; en esta se sustituyen las polilíneas *MeshBreakLine* con tamaños de arista de 20 metros por polilíneas *Weir* con el mismo tamaño de arista. Las elevaciones de estas polilíneas se obtienen observando las alturas del MDT a lo largo de las motas. Es posible que los valores del MDT no sean correctos por defectos en la toma de estos o en su procesado posterior, por ello es posible que se requiera modificar los valores de las alturas posteriormente.

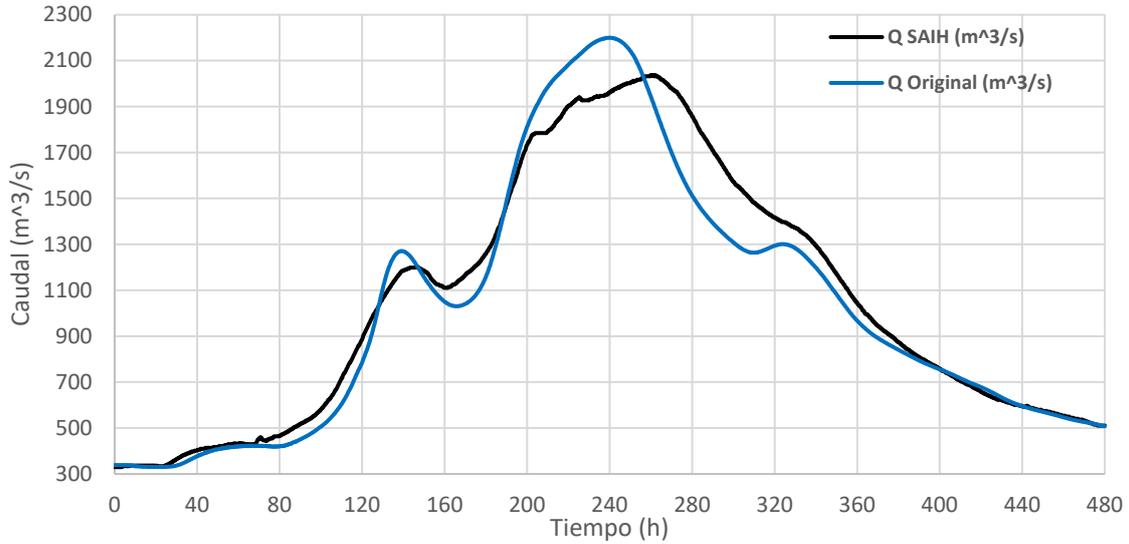
Malla con vertederos en su configuración original	
Nº de celdas	Tiempo de simulación (D:HH:MM:SS)
577.173	0:19:08:19
Superficie promedio de las celdas [ $m^2$ ]	Caudal máximo [ $m^3/s$ ]
808	2.200

**Tabla F.5: Datos característicos de la simulación con la configuración original de la malla empleando vertederos**

En la Tabla F.5 se muestra datos relevantes de la simulación. Para una malla con un área de  $719 km^2$  tenemos un número de celdas considerablemente bueno; así como el tiempo de simulación que se puede considerar rápido. Si los comparamos con la configuración de malla gruesa estaríamos en unas 70.000 celdas menos y por tanto una superficie promedio mayor. Además, el tiempo de simulación se ha reducido y al caudal máximo es unos  $400 m^3/s$  menor. Estos datos por sí solos no sirven de nada, pero parecen estar mejorando considerablemente. Para ver los resultados reales se van a comprobar los hidrogramas y las manchas de inundación.

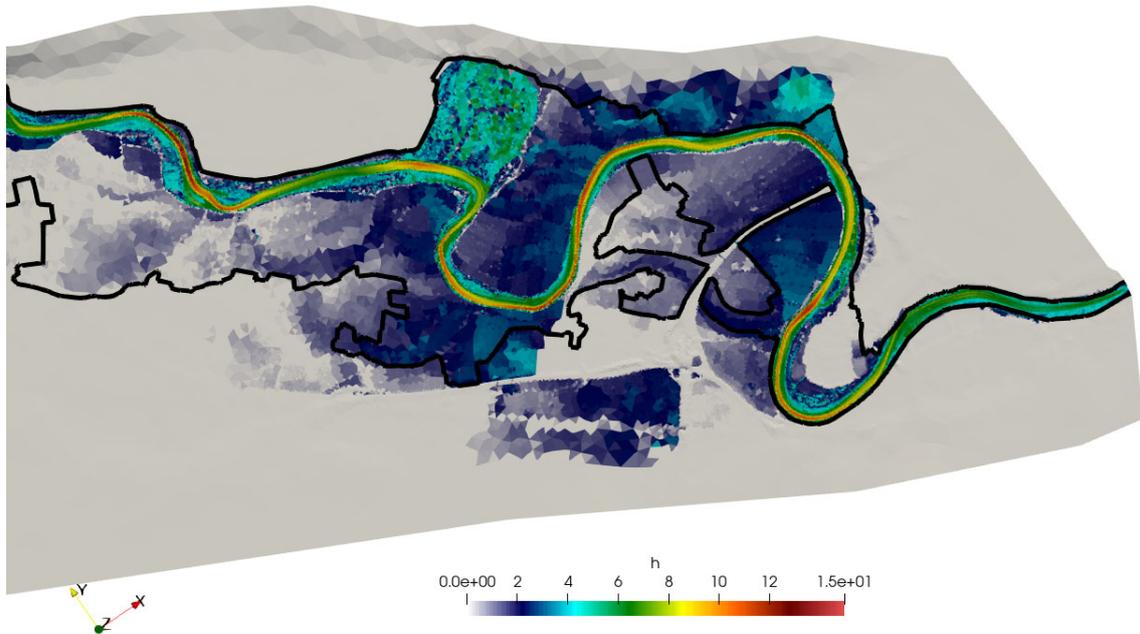
En la Figura F.24 se muestra el hidrograma en la salida de Zaragoza. Se puede apreciar una mejora muy significativa en comparación con cualquiera de los otros casos analizados hasta el momento. Vemos que esta vez la forma del hidrograma se adapta de manera mucho más precisa en la situación más delicada. Aun así se tienen dos problemas a los cuales se debe de buscar una solución. En primer lugar, el hidrograma está desfasado

entre las horas 240 y 360 de la simulación. Y en segundo lugar, se sigue produciendo un valor de caudal máximo unos  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  mayor.



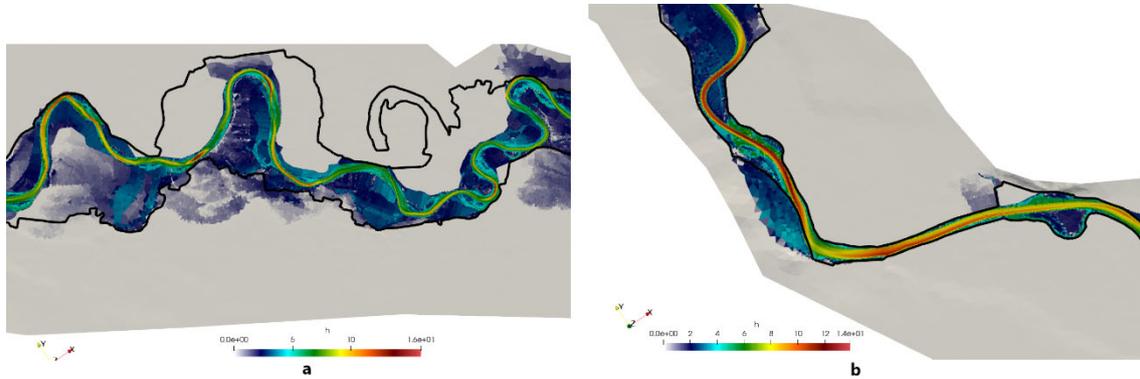
**Figura F.24: Hidrogramas real y simulado (Conf. Original) en la estación de Aforo A011 – Zaragoza. Malla original con motas como c.c. interna**

Si se observa la mancha de inundación en la hora 260 para las proximidades a Zaragoza, Figura F.25, se puede ver cómo hay dos zonas conflictivas. Por un lado, en la parte inferior se ve una mancha de agua fuera de sitio; esta supone un error importante puesto que para llegar ahí debe de pasar por encima de una autopista. Por otra parte tenemos una zona en la derecha que se corresponde a la EXPO de Zaragoza, que está seca y no debería estarlo; esto es una señal de que esa mota tiene una altura por encima de lo debido.



**Figura F.25: Manchas de inundación a la llegada a Zaragoza. Malla original con motas como c.c. interna**

En la Figura F.26 vemos dos zonas que anteriormente eran de conflicto. En Tudela (b) se puede observar cómo se ha corregido casi al completo el error en esta zona. Anteriormente se inundaban todas las llanuras de la zona. Si se observa Pradilla de Ebro (a), se ve como en algunas zonas la altura de las motas es excesiva y por ello hay zonas que deberían estar inundadas y no lo están. Estos errores en las alturas se deben de intentar corregir en la siguiente simulación.



**Figura F.26: Manchas de inundación en las proximidades de Pradilla de Ebro (a) y Tudela (b) . Malla original con motas como c.c. interna**

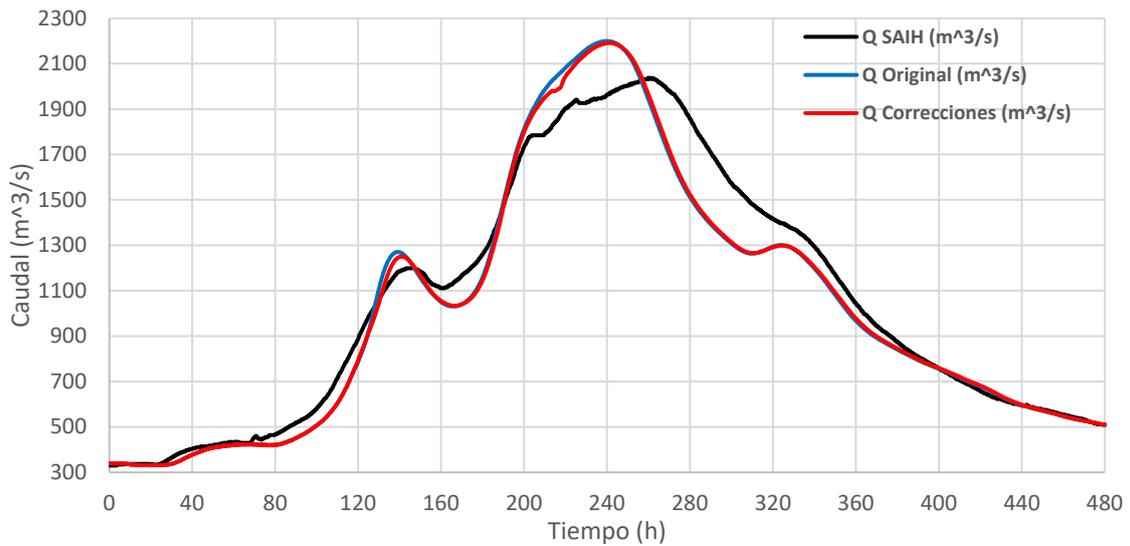
### F.2.2. Correcciones en malla y vertederos

Para esta segunda configuración se van a variar algunas aturas de las motas en función de lo observado en las manchas de agua. Además, en la salida de Zaragoza se van a realizar las modificaciones pertinentes en la malla con la intención de evitar que el agua pase por encima de la autopista. Por lo demás, el resto de la configuración se mantendrá igual.

Malla con vertederos corregida	
Nº de celdas	Tiempo de simulación (D:HH:MM:SS)
578.087	0:19:22:13
Superficie promedio de las celdas [ $m^2$ ]	Caudal máximo [ $m^3/s$ ]
807	2.191

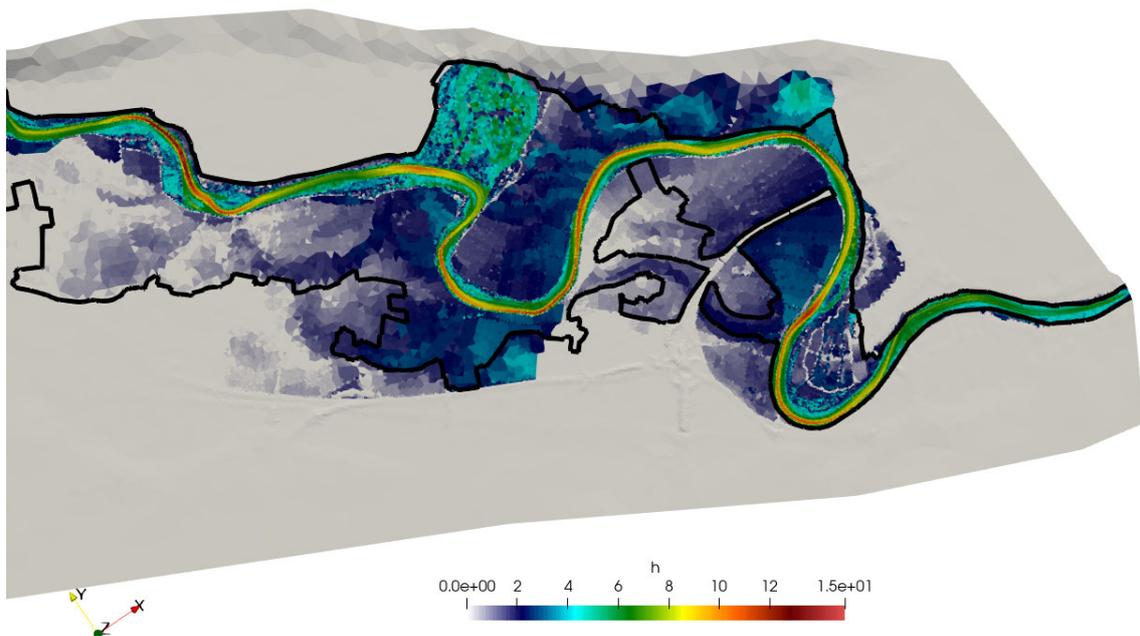
**Tabla F.6: Datos característicos de la simulación con las correcciones en la malla y los vertederos**

En la Tabla F.6 vemos como apenas se ha modificado el número de celdas, esperable ya que es una zona muy pequeña la que se modifica. Tampoco varía considerablemente el tiempo de resolución ni el valor máximo del caudal. Por tanto, cualquier mejora en los resultados será aceptable, visto que no supone un sacrificio en el tiempo de resolución muy alto.



**Figura F.27: Hidrogramas real y simulados (Conf. Original y Conf. Correcciones) en la estación de Aforo A011 – Zaragoza. Malla original y malla corregida con motas como c.c. interna**

En la Figura F.27 se ve como el hidrograma para la configuración corregida a penas cambia respecto a la original. Se ven unas pequeñas correcciones en los valores máximos, pero el retraso en el hidrograma no se ha corregido.



**Figura F.28: Manchas de inundación a la llegada a Zaragoza. Malla corregida con motas como c.c. interna**

Si se observa las manchas de agua en las proximidades de Zaragoza en la Figura F.28, se puede ver que se han corregido los dos puntos conflictivos que se tenían, y en general la superficie mojada se corresponde a la que debería ser según los datos que se tienen de aquella inundación (línea negra).

En los puntos de conflicto en Pradilla de Ebro y Tudela que se muestran en la Figura F.29 se puede ver como a penas se han corregido los errores que se tenían

anteriormente pese a haber modificado las alturas de las motas. Se requerirían nuevas modificaciones en las alturas, pero esto no arreglaría el problema del retraso en la llegada a Zaragoza. Por eso, se va a probar a aumentar el rozamiento del terreno y así retrasar la llegada.

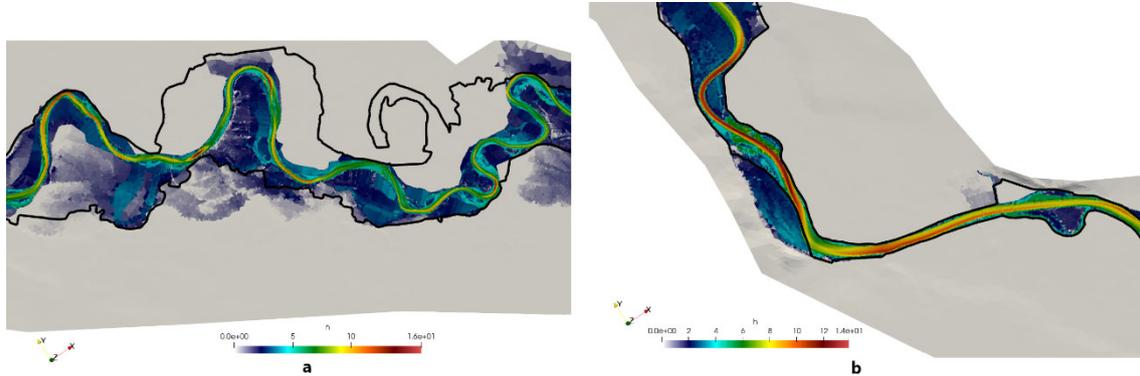


Figura F.29: Manchas de inundación en las proximidades de Pradilla de Ebro (a) y Tudela (b) . Malla corregida con motas como c.c. interna

### F.2.3. Alteración de los coeficientes n de Manning

Para la tercera y cuarta configuración, se parte de la corrección que se ha hecho en la segunda configuración sobre la malla. Además se van a probar dos factores que se aplicarán sobre el coeficiente de Manning. El primero de ellos aumentará el valor en un 25 % y el segundo en un 15%; es decir, factores de 1,25 y 1,15. La idea es retrasar la llegada del agua a Zaragoza y conseguir de esta forma, el efecto de retraso sobre los valores de la configuración anterior, a la vez que se busca reducir los valores del caudal debido a ese retraso. De manera más simple se puede entender como la llegada del mismo volumen de agua pero en un tiempo mayor.

Malla con vertederos con Manning x 1,25	
Nº de celdas	Tiempo de simulación (D:HH:MM:SS)
578.087	0:20:33:09
Superficie promedio de las celdas [ $m^2$ ]	Caudal máximo [ $m^3/s$ ]
807	2.230

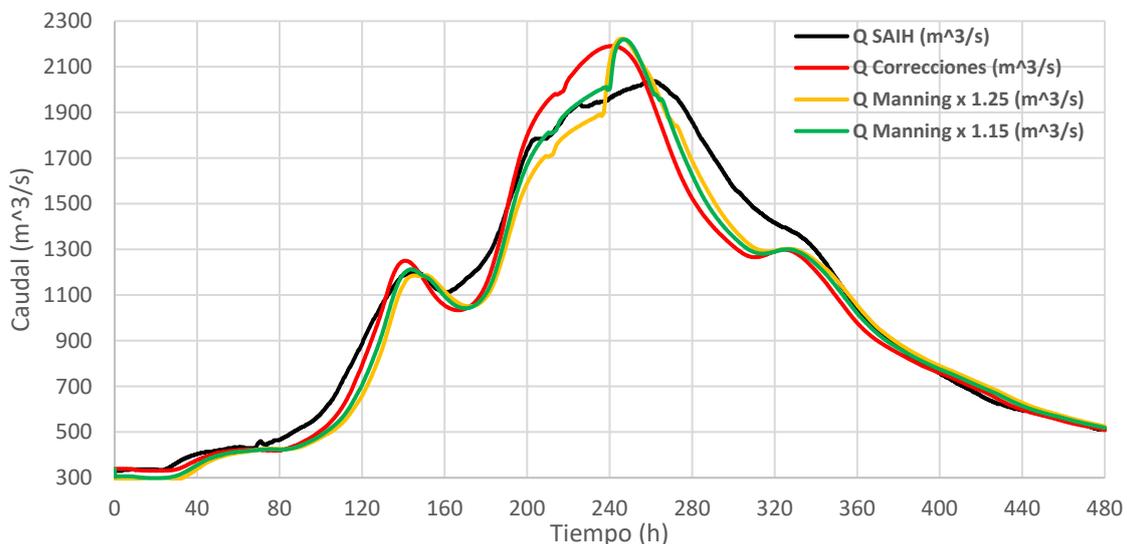
Tabla F.7: Datos característicos de la simulación con la configuración corregida con un factor aplicado a Manning de 1,25

En la Tablas F.7 y F.8 se muestran los resúmenes de las configuraciones 3 y 4 respectivamente. Como se ha comentado, la configuración de la que parte es la corrección hecha sobre la configuración original. Los valores máximos de caudal aumentan pero estos no representan en sí mismo nada. Por su parte para el factor de 1,25 el tiempo de resolución aumenta en 1 hora; mientras que para el factor de 1,15 lo hace en 4 horas. Es interesante que para un menor factor, el tiempo de resolución sea mayor.

Malla con vertederos con Manning x 1,15	
Nº de celdas 578.087	Tiempo de simulación (D:HH:MM:SS) 0:23:15:15
Superficie promedio de las celdas [ $m^2$ ] 807	Caudal máximo [ $m^3/s$ ] 2.220

**Tabla F.8: Datos característicos de la simulación con la configuración corregida con un factor aplicado a Manning de 1,15**

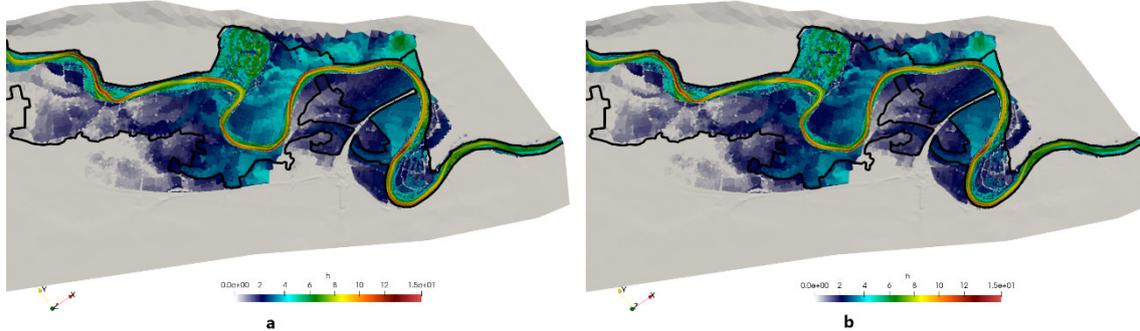
Observando la Figura F.30, donde se comparan los hidrogramas para estas dos nuevas configuraciones y comparándolas con los resultados de la configuración corregida, vemos como el comportamiento mejora sustancialmente en algunas partes del hidrograma. En primer lugar, notar que el factor 1,15 es mejor que el de 1,25, por eso se ha empleado este en las configuraciones sin vertederos y no el de 1,25. Por otra parte, se observa que el hidrograma se retrasa en su descenso, comportamiento deseado, pero no lo hace en la medida esperada y sigue lejos de los valores del SAIH. Por último, en la subida vemos como los tres hidrogramas están constantemente pegados (salvos en breves instantes); sin embargo, vemos como en la hora 240 ambas configuraciones tienen un crecimiento prácticamente a  $90^\circ$  para juntarse con los valores de la configuración corregida y a partir de ahí descender. Este comportamiento puede parecer extraño pero ya se ha visto antes. Si se recuerda el Anexo E de este trabajo, donde se explicaban una serie de casos test, se puede ver que este comportamiento también estaba ahí. Este comportamiento del hidrograma se corresponde a un retorno de agua al cauce que previamente había salido en otro punto. A continuación, y con el uso de las manchas de agua, se explicará dónde puede estar este error.



**Figura F.30: Hidrogramas real y simulados (Conf. Correcciones, Manning x1,15 y x1,25) en la estación de Aforo A011 – Zaragoza. Malla corregida, n x 1,15 y n x 1,25 con motas como c.c. interna**

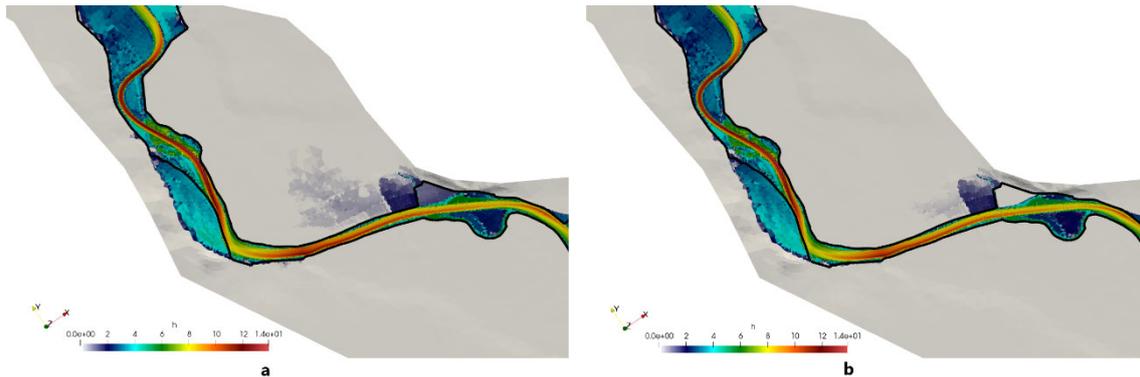
Si se observan las manchas de agua utilizando la herramienta ParaView (ver Anexo G), de donde se obtienen las imágenes de la Figura F.31, se ve que hay una zona montañosa en la parte superior que no debería estar inundada. Esta zona ya se inundaba

antes, pero si se observan los valores del nivel de agua en la margen derecha de esa zona entre las motas y la zona montañosa, se ve que se supera el nivel de las motas. Por tanto, en esta zona retorna el agua al cauce, generando ese efecto de subida brusca en el hidrograma. Esto solo ocurre en estas dos configuraciones. Por lo demás, la mancha de inundación es similar a los casos anteriores, y a priori es bastante correcta.



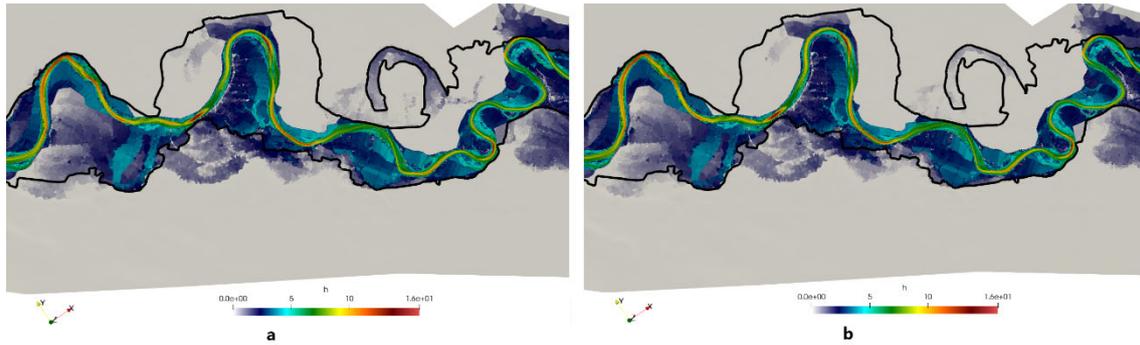
**Figura F.31: Manchas de inundación a en Zaragoza. Manning x 1,25 (a) y Manning x 1,15 (b). Motas como c.c. interna**

Si observamos la zona conflictiva de Tudela en la Figura F.32, se observa que ha empeorado ligeramente en la zona final del tramo, particularmente para el factor de 1,25 (a). Si que se advierte un mayor nivel de agua, pero esta sigue encauzada.



**Figura F.32: Manchas de inundación en Tudela. Manning x 1,25 (a) y Manning x 1,15 (b) ). Motas como c.c. interna**

En la última de las zonas de conflicto, Pradilla de Ebro, que se muestra en la Figura F.33, se puede ver una ligera mejora en las manchas de agua, donde zonas que antes no se veían inundadas ahora si lo hacen. La mejora es muy leve y a cambio se empeoran zonas en la salida. Por tanto, se tendrá que ir a observar los valores de los hidrogramas de nivel en esos puntos.



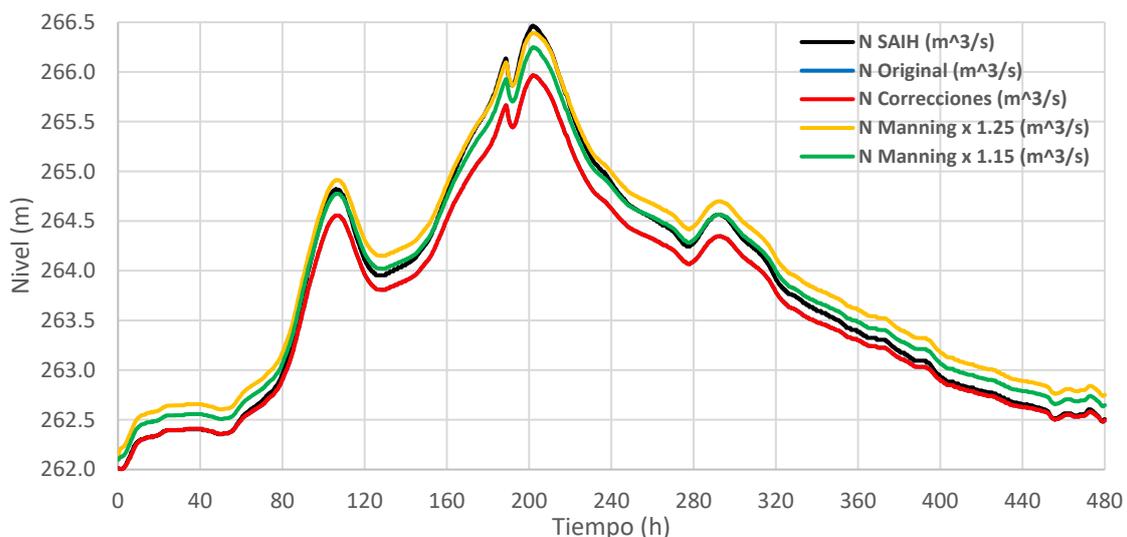
**Figura F.33: Manchas de inundación en Pradilla de Ebro. Manning x 1,25 (a) y Manning x 1,15 (b). Motas como c.c. interna**

#### F.2.4. Comparación de resultados

A continuación, se van a mostrar en este punto del Anexo los distintos hidrogramas de nivel para todas las estaciones de aforo de la cuenca que se encuentran en el tramo del río Ebro Castejón-Zaragoza. Se van a disponer en el orden en el que se encuentran, desde la zona más alta en Castejón, hasta la zona más baja en Zaragoza.

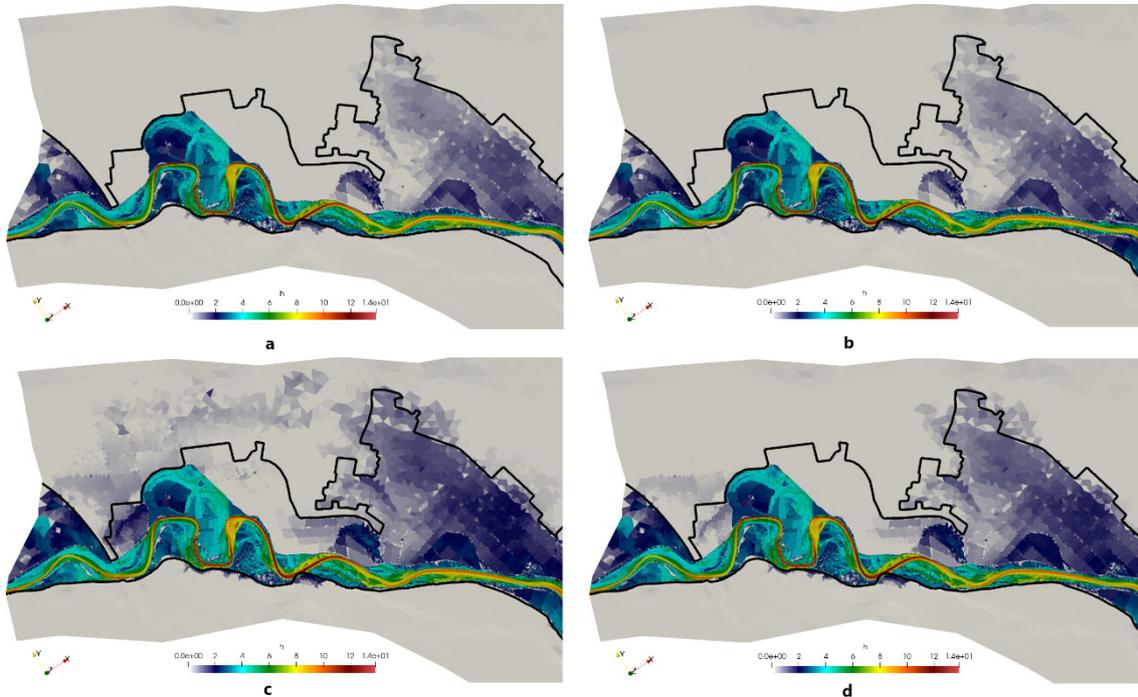
Al igual que se hizo en el punto 1.4, para simplificar las explicaciones se va a denominar configuración 1 a la configuración original, configuración 2 a la configuración en la cual se han aplicado las correcciones, configuración 3 a la configuración que partiendo de la anterior se le aplica un factor de 1,25 al coeficiente de Manning y configuración 4 a la que se aplica un factor de 1,15 al coeficiente de Manning. Las figuras correspondientes a las manchas de agua contienen cuatro imágenes a, b, c y d que se corresponden a las configuraciones 1, 2, 3 y 4 respectivamente.

La Figura F.34 muestra la comparativa de niveles en la estación de aforo de Castejón. Las dos primeras configuraciones están solapadas; así como las dos últimas. Se ve que los resultados están muy próximos a los valores del SAIH. Las dos primeras lo están al comienzo y al final, y las otras dos lo están en la zona intermedia. Era esperable para una estación que se encuentran al principio del dominio estos buenos resultados.



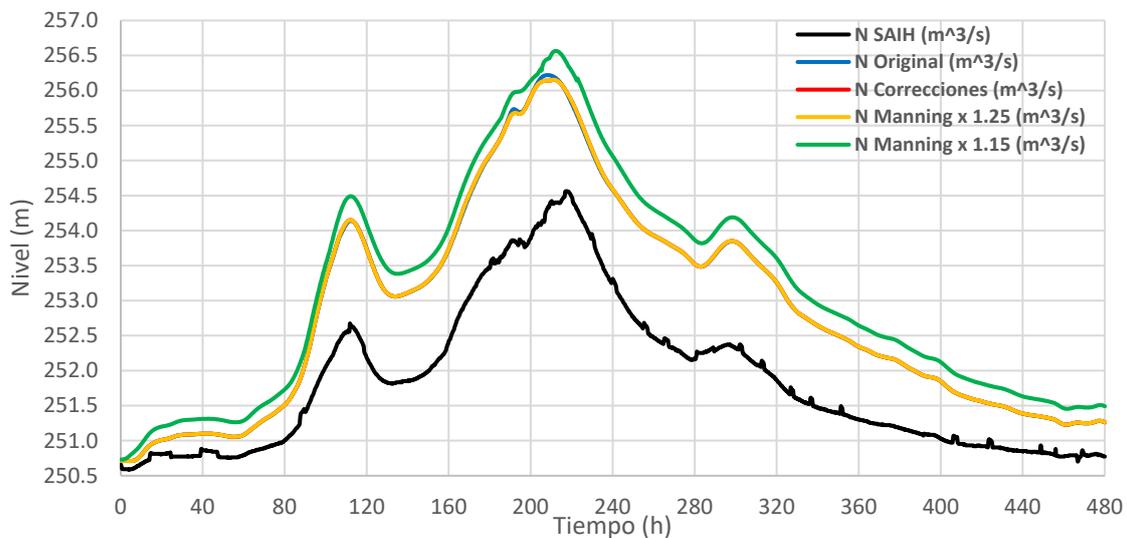
**Figura F.34: Niveles real y simulados en la estación de Aforo A002 – Castejón. Comparación para motas como condición de contorno interna**

La Figura F.35 muestra las manchas de agua en la zona de Castejón a la entrada del contorno. Se ve que todas las configuraciones tienen un comportamiento similar. Es de destacar varias zonas que no se inundan y si debiesen hacerlo, es posible que la altura de las motas en estas zonas sea errónea. Ciertamente es que las configuraciones 3 (c) y 4 (d) si inundan algunas de esas zonas.



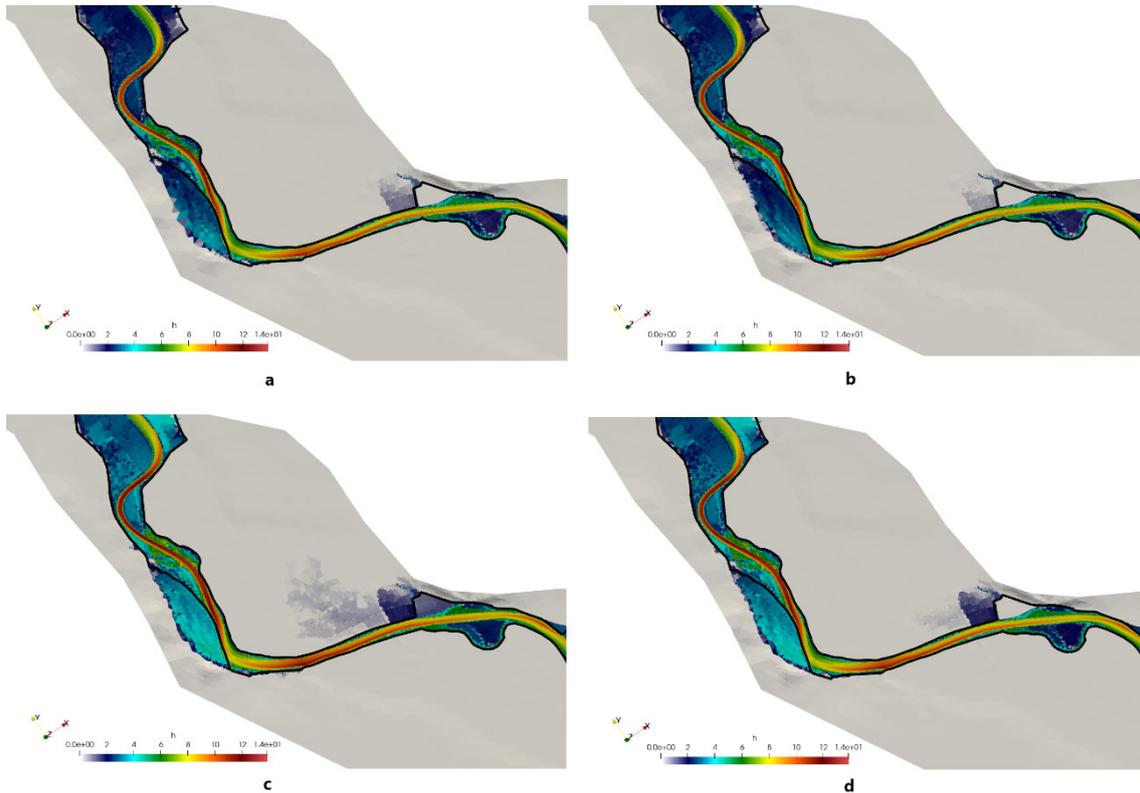
**Figura F.35: Manchas de inundación a la altura de Castejón en la hora 210. Comparación para motas como condición de contorno interna**

Unos kilómetros más abajo se encuentra la estación de aforo de Tudela, Figura F.36. En ella se ve que todas las configuraciones resultan en los mismos niveles, excepto la cuarta configuración, que se despega de las anteriores algo menos de medio metro desde el inicio. La diferencia de estas con los valores del SAIH a partir de la hora 80 y hasta el final es entorno al metro, metro y medio.



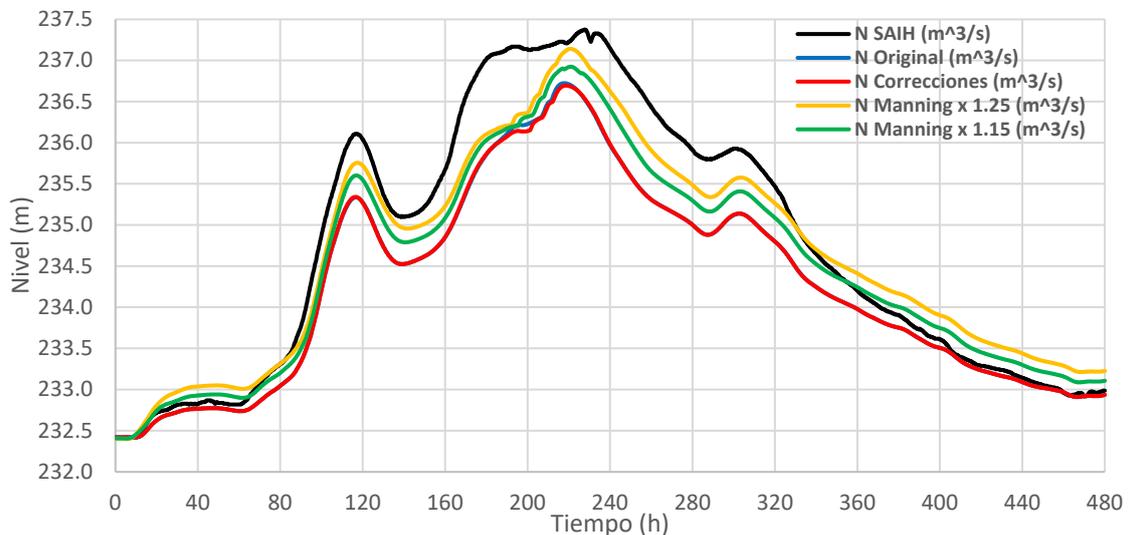
**Figura F.36: Niveles real y simulados en la estación de Aforo A284 – Tudela. Comparación para motas como condición de contorno interna**

Pese a la discrepancia de niveles, las manchas de agua que se muestran en las imágenes de la Figura F.37 son correctas y solo hay fallos en las zonas central y final.



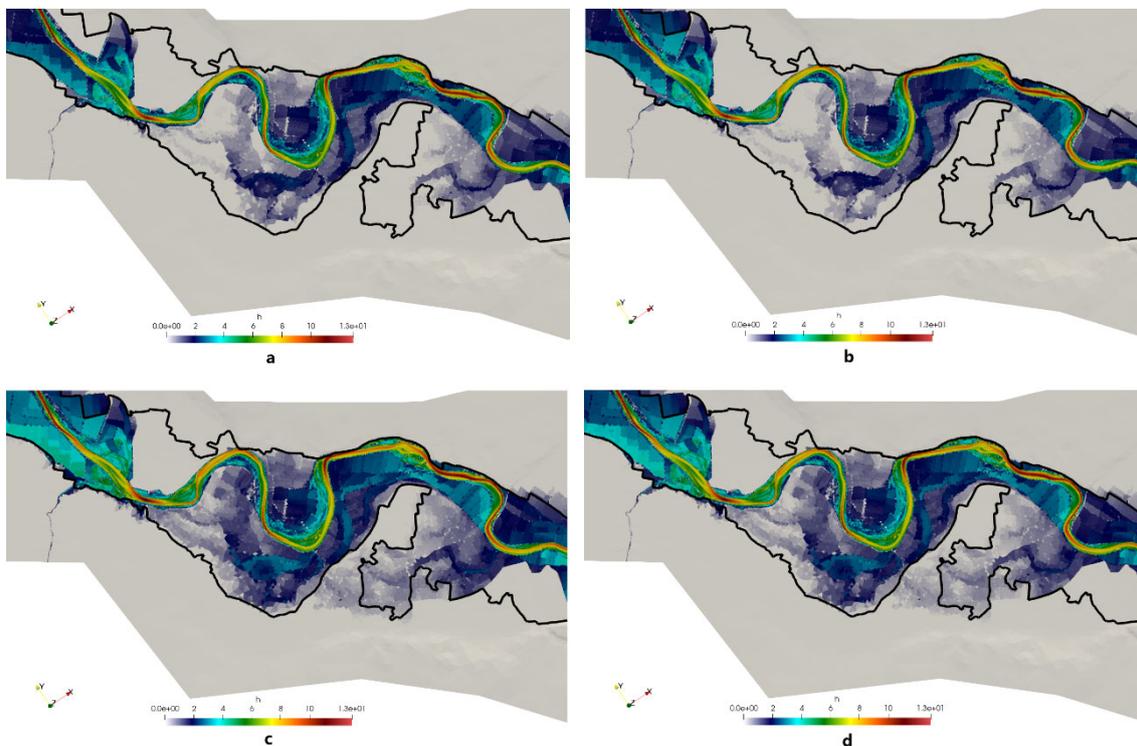
**Figura F.37: Manchas de inundación a la altura de Tudela en la hora 210. Comparación para motas como condición de contorno interna**

El aforo de Novillas de la Figura F.38 muestra la situación contraria a Tudela. En este los hidrogramas correspondientes a las simulaciones están por debajo de lo debido. Sin embargo, en estos si se ve algo de diferencia entre configuraciones, siendo la tercera la mejor. Se debe comentar también que cualitativamente hablando las figuras se comportan de forma distinta a como lo hace la del SAIH; se debería de ver un valle de la hora 180 a la 240 aproximadamente; sin embargo, ese valle se corta en la hora 200 para formar un pico.



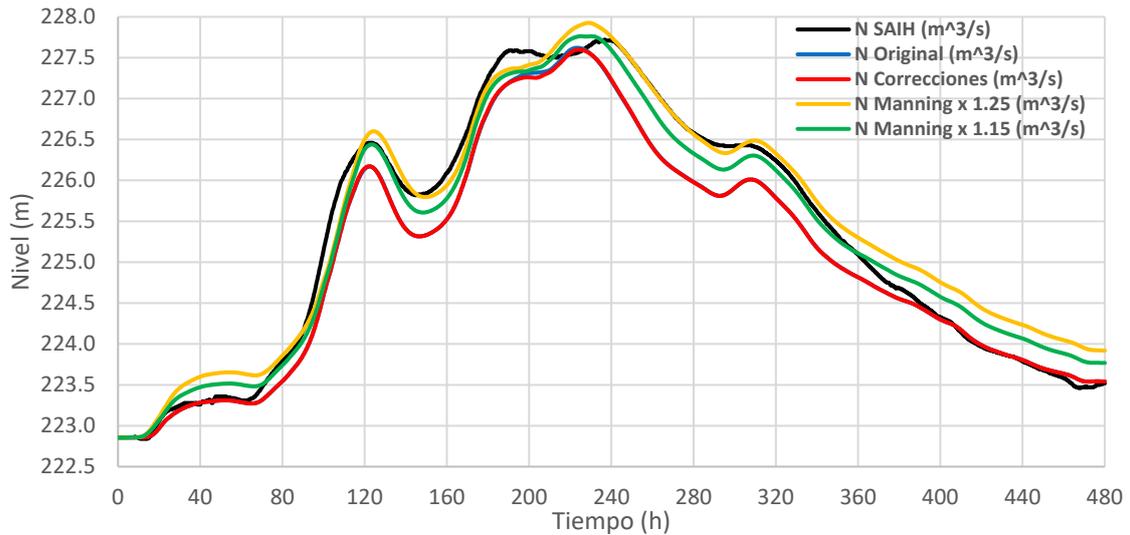
**Figura F.38: Niveles real y simulados en la estación de Aforo A285 – Novillas. Comparación para motas como condición de contorno interna**

Aunque las manchas de inundación no llegan a los límites recogidos de la inundación real en varias de las zonas próximas a Novillas, tal y como se en la Figura F.39, los resultados de nivel son mejores que en las configuraciones sin vertederos. Se aprecia también una mejora en las machas de las imágenes ‘c’ y ‘d’ con respecto a las de ‘a’ y ‘b’; esto se corresponde a lo visto en los hidrogramas de nivel.



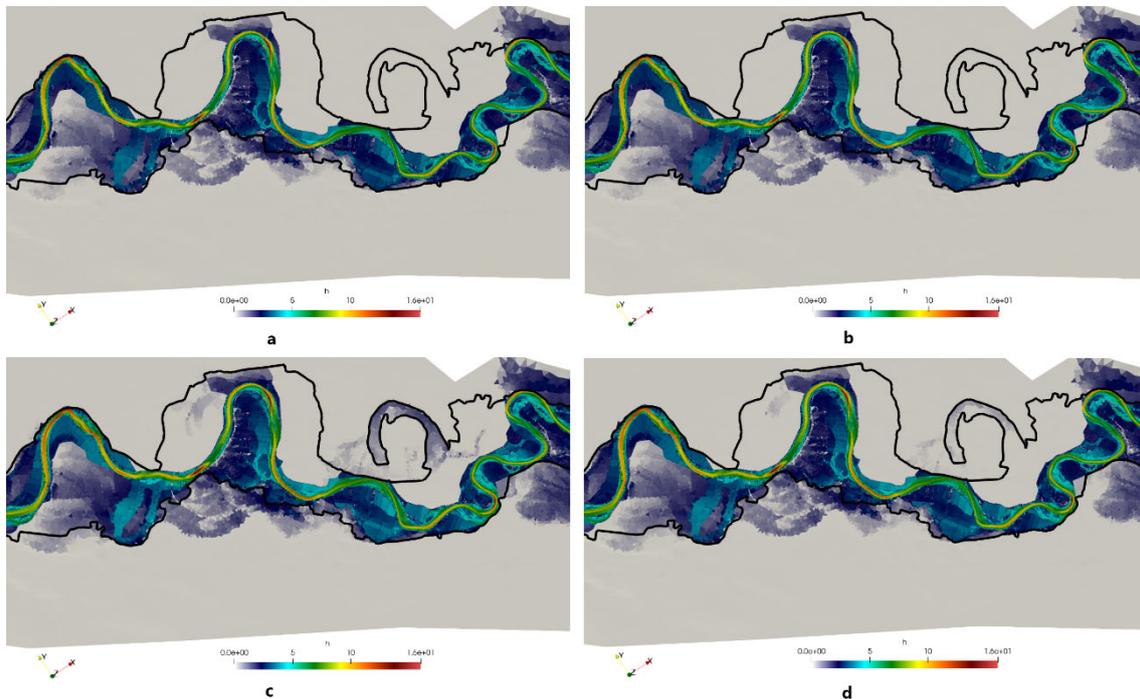
**Figura F.39: Manchas de inundación a la altura de Novillas en la hora 230. Comparación para motas como condición de contorno interna**

En los hidrogramas de la estación de aforo de Pradilla de Ebro, Figura F.40, se ve que la distancia entre los valores del SAIH y los obtenidos por la simulación están cada vez más cerca, particularmente para las dos últimas configuraciones donde las diferencias son mínimas. El comportamiento a nivel cualitativo también es muy similar al del SAIH.



**Figura F.40: Niveles real y simulados en la estación de Aforo A340 – Pradilla de Ebro. Comparación para motas como condición de contorno interna**

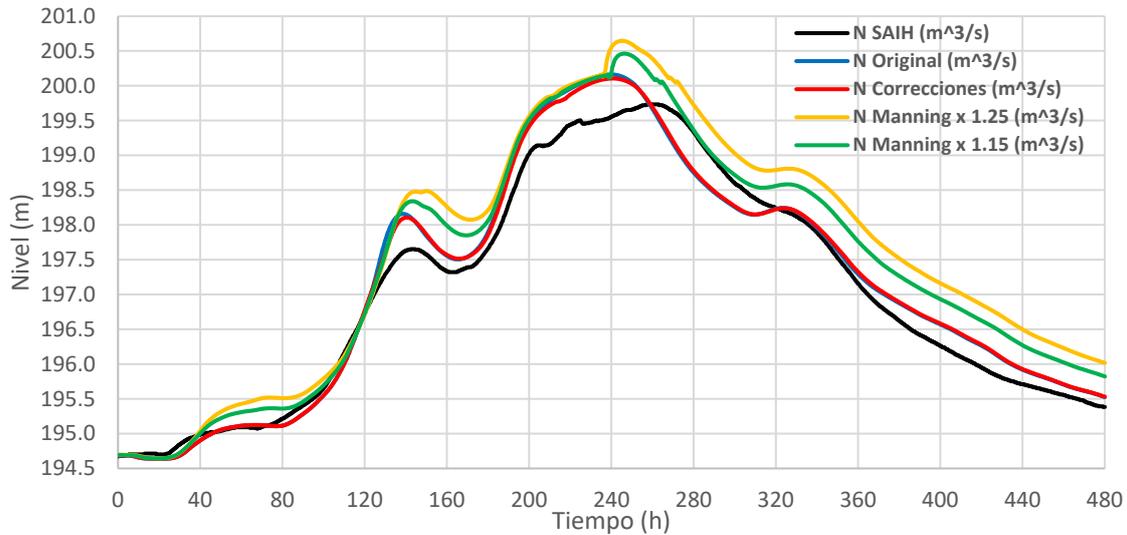
La Figura F.41 muestra como las zonas inundadas en estas configuraciones son menores que para las configuraciones sin uso de vertederos. Si se recuerda esas configuraciones, el agua ocupaba las superficies fuera de los límites marcados por las líneas negras; por tanto, se empeoran y se mejoran cosas a la vez, globalmente como se ve en el hidrograma de nivel de esta zona, el resultado es mejor para estas configuraciones con vertederos.



**Figura F.41: Manchas de inundación a la altura de Pradilla de Ebro en la hora 230. Comparación para motas como condición de contorno interna**

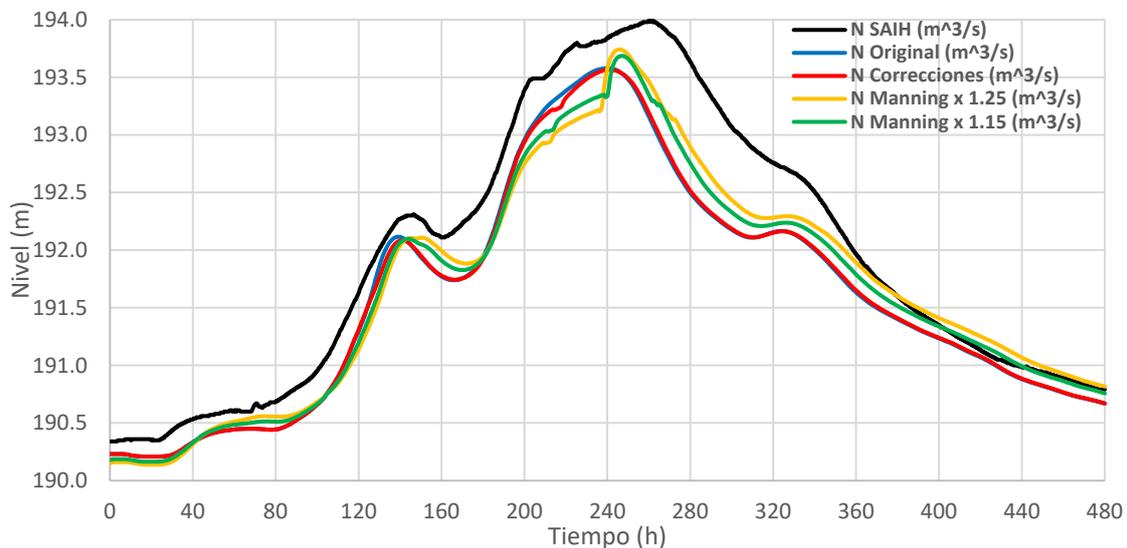
Finalmente se tiene los aforos en Zaragoza, ya se ha comentado que el primero de ellos se encuentra en el puente Ronda Norte y el segundo de ellos en el puente de Santiago. En el aforo de Ronda Norte, Figura F.42, se ve un comportamiento más ajustado a los

valores del SAIH para todas las configuraciones; particularmente son las dos primeras configuraciones las que muestran los mejores resultados para esta zona.



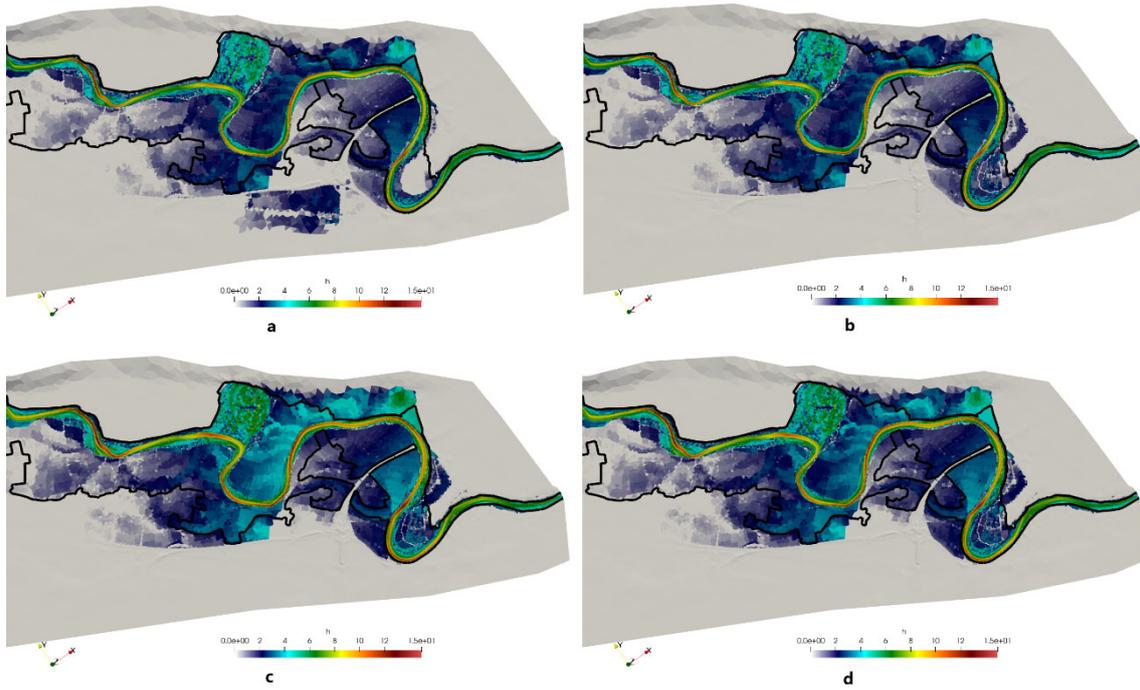
**Figura F.42: Niveles real y simulados en la estación de Aforo A311 – Ronda Norte. Comparación para motas como condición de contorno interna**

Entre el aforo de Zaragoza y el de Ronda Norte se ve un cambio en los resultados. Ahora los hidrogramas, Figura F.43, están por debajo del nivel marcado por el SAIH en todos los casos. A diferencia de lo que ocurría con los hidrogramas de caudal, en los de nivel los mejores resultados parecen marcarlos las dos primeras configuraciones. Pero se sigue viendo una tendencia en las simulaciones, particularmente en las dos primeras configuraciones, a alcanzar antes de lo debido el valor máximo, generando así un desfase en los datos a partir de la hora 240.



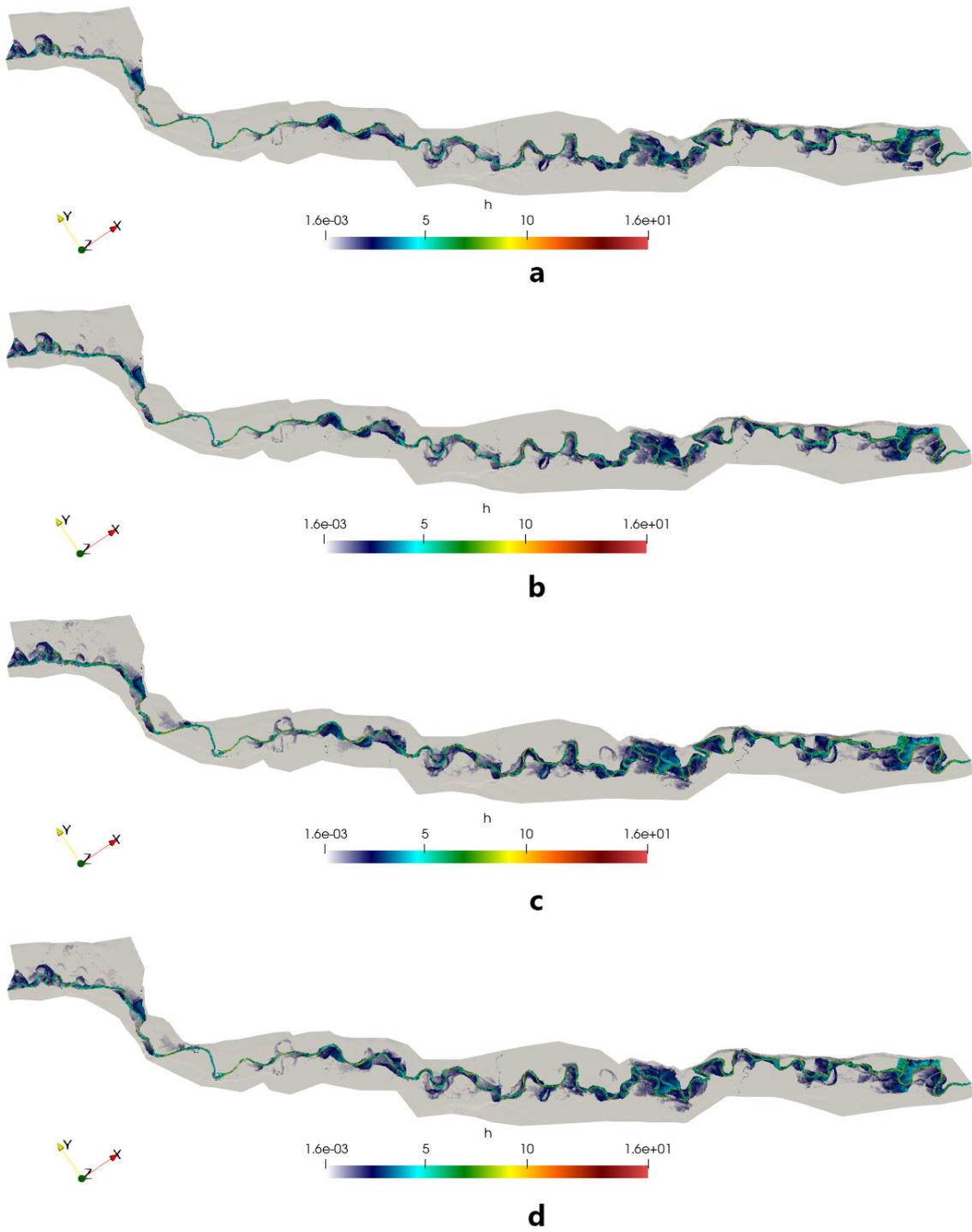
**Figura F.43: Niveles real y simulados en la estación de Aforo A011 – Zaragoza. Comparación para motas como condición de contorno interna**

En la Figura F.44 se muestran ambas zonas junto a la llegada a Zaragoza. Se ve un menor nivel en las llanuras previas a la ciudad de Zaragoza para las dos primeras configuraciones. Como se ha destacado anteriormente, la imagen ‘a’ tiene un error en la parte inferior que se ha subsanado en el resto de las configuraciones.



**Figura F.44: Manchas de inundación a la altura de Zaragoza en la hora 270. Comparación para motas como condición de contorno interna**

Lo último que se muestra en la Figura F.45 es una comparación de las distintas manchas de agua para la hora 260 a lo largo de todo el tramo Castejón-Zaragoza.



**Figura F.45: Manchas de inundación en el tramo Castejón-Zaragoza en la hora 260. Comparación para motas como condición de contorno interna**

## G. Software de visualización: ParaView

ParaView es un software de visualización y análisis de datos multiplataforma de código abierto. ParaView permite crear visualizaciones rápidamente para analizar datos utilizando técnicas cualitativas y cuantitativas. La exploración de datos se puede realizar de forma interactiva en 3D o mediante programación utilizando las capacidades de procesamiento por lotes de ParaView.

Pese a los múltiples tipos de ficheros que admite ParaView, en este trabajo se han empleado ficheros .VTK generados por el programa RiverFlow2D tal y como se explica en el Anexo B. Estos ficheros son generados según la frecuencia seleccionada y pueden ser cargados a ParaView por lotes, de modo que se pueda visualizar la evolución en el tiempo de todas las variables contenidas en estos ficheros. Este aspecto de ParaView es muy útil para el estudio de un evento de avenida aunque requiere de muchos recursos computacionales debido a la gran cantidad de celdas y por tanto de datos.

Por tanto, el programa ParaView ha sido de gran utilidad en este trabajo para las siguientes tareas:

- Representación tridimensional de las variables del problema, permitiendo un análisis visual de las áreas inundadas.
- Además de las observaciones cualitativas que se pueden hacer, también se puede hacer un análisis cuantitativo de las variables representadas. Como ejemplo, el análisis de las velocidades de la lámina de inundación, representando tanto la dirección como el módulo de estas.
- La carga de varios estados en el programa permite representar la evolución temporal de las variables y por tanto se permite la representación en formato vídeo.
- ParaView permite una mayor precisión y facilidad a la hora de visualizar los resultados respecto a QGIS.
- Se permite calcular nuevos parámetros a partir de las variables que ya se tiene, permitiendo representar por ejemplo el número adimensional de Froude que nos permite conocer el tipo de flujo dominante en la lámina de agua.

