

Simulación de avenidas mediante un modelo hidráulico/hidrológico distribuido en un tramo urbano del río Ginel (Fuentes de Ebro)

J. Fernández-Pato, A. Sánchez & P. García-Navarro

To cite this article: J. Fernández-Pato, A. Sánchez & P. García-Navarro (2019): Simulación de avenidas mediante un modelo hidráulico/hidrológico distribuido en un tramo urbano del río Ginel (Fuentes de Ebro), Ribagua, DOI: [10.1080/23863781.2019.1622473](https://doi.org/10.1080/23863781.2019.1622473)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/23863781.2019.1622473>



© 2019 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group on behalf of the International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR).



Published online: 26 Jun 2019.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 21



View Crossmark data [↗](#)

Simulación de avenidas mediante un modelo hidráulico/hidrológico distribuido en un tramo urbano del río Ginel (Fuentes de Ebro)

J. Fernández-Pato^{a,b}, A. Sánchez^c and P. García-Navarro^a

^aFluid Mechanics, LIFTEC(CSIC)-Universidad de Zaragoza, Zaragoza, Spain; ^bHydronia Europe, Madrid, Spain; ^cCYGSA, Madrid, Spain

ABSTRACT

En las últimas décadas, la simulación de diferentes procesos hidráulicos/hidrológicos ha constituido una herramienta de gran utilidad tanto en la prevención de riesgos como en la gestión de sus consecuencias. La predicción de caudales, calados y manchas de inundación para distintos episodios de ondas de avenida permite valorar la situación con antelación y proporciona información útil a la hora de tomar medidas de contención como, por ejemplo, la colocación óptima de diques para evitar o paliar daños. En este trabajo, se describe la aplicación de un modelo distribuido de simulación hidráulica basado en las ecuaciones 2D de aguas poco profundas a la simulación de ondas de avenida en un tramo urbano del río Ginel (Fuentes de Ebro). Mediante este modelo, se pueden obtener resultados de calado de agua y velocidad en cualquier punto del dominio de cálculo. El código está diseñado para aprovechar la potencia de las tarjetas gráficas (GPU) de última generación, proporcionando una simulación ágil y precisa y constituya el motor de cálculo del programa RiverFlow2D. Los resultados obtenidos permiten valorar las consecuencias de varias riadas con períodos de retorno de hasta 500 años.

KEYWORDS

Simulación hidráulica; modelo distribuido; flujo superficial; volúmenes finitos; avenidas

1. Introducción

La disciplina de la hidráulica computacional ha evolucionado enormemente en las últimas décadas gracias al incremento en la potencia de cálculo de los ordenadores personales. El desarrollo de nuevas técnicas experimentales también ha contribuido en gran medida a mejorar la calidad de los resultados numéricos de los modelos computacionales, ya que proporcionan una información detallada de los datos de partida como, por ejemplo, mapas digitales de terreno de alta resolución [1,2]. De manera alternativa, también existen modelos digitales de terreno de resolución media pero de libre acceso, como por ejemplo el AW3D30 de Japón [3] o el SRTM [4] de la NASA. La suma de estos dos factores, potencia y precisión de los datos de partida, ha convertido a la simulación hidráulica computacional en una herramienta fundamental para predecir los efectos de riadas, avenidas extraordinarias, roturas de presas, etc., además de servir como guía para la elaboración de planes de riesgo y mitigación de daños.

Los modelos de simulación se pueden clasificar en dos grandes grupos, agregados y distribuidos. La diferencia principal entre ambos reside en el hecho de que en los modelos agregados el flujo se calcula como una función del tiempo en un punto concreto mientras que, en un modelo distribuido, el flujo se calcula como una función

del espacio y del tiempo [5]. A su vez, dentro de los modelos distribuidos se puede establecer una división entre modelos 1D promediados en la sección y modelos 2D promediados en la vertical. Los modelos agregados se emplean habitualmente en aplicaciones hidrológicas. En este trabajo se aplica un modelo hidrodinámico de tránsito distribuido 2D promediado en la dirección vertical, debido a la posibilidad de resolver simultáneamente el calado y dos componentes de la velocidad del flujo en cada celda de cálculo. La discretización espacial detallada de la topografía del terreno mediante una malla de cálculo permite realizar simulaciones precisas de flujo de agua superficiales en geometrías complejas como la considerada en este artículo. También es posible introducir de manera natural estructuras hidráulicas como pueden ser los puentes, de forma que sea posible considerar su efecto sobre el flujo. La importancia de la correcta evaluación de los impactos en zonas urbanas implica la necesidad de obtener herramientas numéricas lo suficientemente complejas para representar los procesos físicos presentes [6–11].

Desde otro punto de vista, los modelos hidrodinámicos se pueden subdividir en modelos de onda dinámica, basados en las ecuaciones de aguas poco profundas (shallow water) y onda difusiva, en los que no se tienen en cuenta las aceleraciones [11–14].

Una de las mayores dificultades que se presenta al trabajar con flujos superficiales es el correcto tratamiento de los frentes seco-mojado. Esto constituye un reto importante al diseñar un modelo número preciso, fiable y conservativo, ya que este tipo de situaciones pueden conllevar la aparición de velocidades sin sentido físico en la frontera seco-mojado, provocando inestabilidades en la solución numérica y la necesidad de una reducción drástica en el paso de tiempo [15–17].

Otra preocupación a tener en cuenta cuando se emplean modelos distribuidos de simulación es el tiempo de cálculo, ya que normalmente se requiere una malla con un número elevado de celdas para obtener resultados precisos. Este factor, junto con la complejidad numérica del sistema de ecuaciones de aguas poco profundas en 2D, hace que el número de cálculos en cada paso de tiempo sea muy elevado. Con el objetivo de reducir el tiempo de computación, en este trabajo se emplea un algoritmo de resolución de las ecuaciones implementado en GPU [18], que es capaz de aprovechar la potencia de las tarjetas gráficas para reducir el tiempo de cálculo.

La aplicación realista que se presenta en este trabajo consiste en la simulación de dos ondas de avenida de períodos de retorno de 100 y 500 años en un tramo del río Ginel a su paso por la localidad zaragozana de Fuentes de Ebro. La información topográfica disponible se ha mejorado mediante la medida in campo de más de 800 puntos de elevación, con el objetivo de representar lo más fielmente posible la topografía del terreno y, de esta forma, aprovechar al máximo las capacidades de un modelo distribuido de simulación. Los resultados obtenidos para las dos avenidas simuladas se presentan en forma de extensiones de la mancha de inundación, infiltración acumulada en el terreno e hidrogramas de caudal en secciones de control. En el año 2008 se llevó a cabo un estudio similar mediante la herramienta de cálculo HEC-RAS [19], obteniéndose mapas de inundabilidad bajo los dos mismos supuestos de ondas de avenida, pero sin considerar uno de los puentes presentes en el dominio, lo que generó un efecto de taponamiento en la zona de aguas abajo del dominio [20]. Dado que este caso de estudio carece de medidas experimentales que puedan servir de validación para el modelo, se presentan dos ejemplos de validación del modelo de simulación en casos test de laboratorio consistentes en la modelización a escala de cuencas urbanas simplificadas [21,22].

2. Modelo matemático

2.1. Flujo superficial

Para la simulación presentada en este artículo, se han considerado las ecuaciones 2D de aguas poco profundas o

shallow water equations [17,23]. Estas ecuaciones representan la conservación de masa y momento promediados en la dirección vertical. El sistema de ecuaciones se puede expresar de la siguiente manera:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = -f \quad (1)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{h} + \frac{1}{2}gh^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) = gh (S_{0x} - S_{fx}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y^2}{h} + \frac{1}{2}gh^2 \right) = gh (S_{0y} - S_{fy}) \quad (3)$$

donde las variables conservadas h , $q_x = hu$ y $q_y = hv$ representan el calado de agua (m) y los caudales unitarios en las direcciones x e y , respectivamente, con u y v (m/s) las componentes del vector velocidad \mathbf{u} a lo largo de las direcciones x e y . La aceleración de la gravedad está representada por g (m/s²). Los términos fuente de la parte derecha de las ecuaciones se escriben en función de las pérdidas por infiltración en el suelo f (m/s) y las pendientes del fondo z (m) en las direcciones x e y , S_{0x} y S_{0y} , respectivamente, las cuáles vienen dadas por:

$$S_{0x} = -\frac{\partial z}{\partial x}, \quad S_{0y} = -\frac{\partial z}{\partial y} \quad (4)$$

Los términos S_{fx} , S_{fy} representan las pendientes de fricción en ambas direcciones, aquí escritas en función del coeficiente de rugosidad de Manning n :

$$S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}, \quad S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (5)$$

2.2. Modelo de infiltración

En este trabajo se ha empleado el modelo de Horton [24] para calcular las pérdidas de agua superficial por infiltración. Este modelo propone una ecuación exponencial para modelar la capacidad de infiltración del suelo f (m/s):

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (6)$$

donde f_0 y f_c son las capacidades de infiltración inicial y final (m/s) y k es una constante que representa la rapidez con la que decrece la capacidad de infiltración (s⁻¹).

Los parámetros de este modelo no tienen una base física clara, por lo que no es posible una estimación de sus valores a partir de las propiedades geológicas del

suelo y deben ser estimados mediante un proceso de calibración con datos experimentales. En [25] y [26] se pueden encontrar tablas de valores para estos parámetros en función del tipo de suelo. El modelo de Horton se aplica en cada una de las celdas de cálculo de la malla computacional, por lo que cada celda podrá tener una tasa de infiltración diferente en función de sus parámetros de infiltración y de la disponibilidad de agua superficial sobre la misma [27].

Adicionalmente, resulta interesante calcular la cantidad total de agua infiltrada o infiltración acumulada F (m) hasta un tiempo t , simplemente integrando la ecuación (6):

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt = f_c t + \frac{f_0 - f_c}{k} (1 - e^{-kt}) \quad (7)$$

El sistema de ecuaciones (1)–(3) se puede considerar hiperbólico y, en este trabajo, su solución numérica se obtiene mediante un esquema de volúmenes finitos que trabaja sobre mallas triangulares adaptadas al terreno descrito en detalle en [17,28]. Una de las principales dificultades numéricas a abordar en problemas hidráulicos/hidrológicos es la correcta resolución de los frentes de seco-mojado, los cuales se resuelven correctamente gracias a un control dinámico del paso de tiempo, garantizando un error de conservación de masa del orden de la precisión de máquina. La implementación del algoritmo numérico de resolución en GPU [18] permite reducir el tiempo de computación mediante el aprovechamiento de la potencia de las tarjetas gráficas para reducir el tiempo de cálculo.

3. Caso test 1: Lluvia sobre una cuenca de laboratorio

En este caso test se pretende validar el modelo numérico y la robustez del algoritmo de secado/mojado mediante la comparación con las medidas de laboratorio presentadas en [21]. Se supone una precipitación constante de 300 mm/h durante 20 s en todo un dominio impermeable donde se colocan varios obstáculos. El coeficiente de rugosidad de Manning se establece en 0.016. Todos los contornos se considerarán cerrados a excepción de la frontera inferior en donde se integrará el caudal a la salida para su comparación con el caudal experimental. Se supone que los obstáculos son mucho más altos que la profundidad de agua previsible, por lo que se tratan como agujeros en la malla computacional. La Figura 1 (izquierda) muestra el mapa de elevación en una proyección tridimensional y la malla computacional triangular no estructurada de 8925 celdas empleada. La

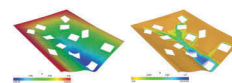


Figura 1. Mapa de elevaciones y malla de cálculo (izquierda). Resultados numéricos para el calado en el tiempo $t = 75$ s.

Figura 1 (derecha) muestra una instantánea del calado en el tiempo $t = 75$ s correspondiente a una situación con numerosos frentes seco/mojado, que son resueltos por el esquema numérico sin generar ningún tipo de inestabilidad. La Figura 2 muestra la comparación entre los hidrogramas de salida computacional y experimental. Se observa una gran similitud entre los resultados numéricos y la curva de caudal experimental.

4. Caso test 2: Inundación de un distrito urbano a escala

En este caso test se considera la simulación numérica de un distrito urbano a escala de laboratorio, cuyo ensayo experimental se detalla en [22]. Los edificios (cuadrados de 0.15 m de lado) se disponen ordenados siguiendo un patrón alterno en una reproducción a escala reducida de una cuenca fluvial (Figura 3). La información de la topografía se ha obtenido a partir de un modelo digital de terreno (DTM) de 0.15 m de resolución. Las avenidas se generaron elevando el nivel de agua en la región aguas arriba del dominio y fueron caracterizadas en la simulación mediante una medida del caudal frente al tiempo (Figura 4). Los datos experimentales de calado se tomaron mediante sondas colocadas en 10 posiciones diferentes, dispuestas de forma que se permita observar las características del flujo en todo momento (Figura 5). A la salida del dominio no se impone ninguna condición de contorno, de forma que el flujo pueda salir libremente. De acuerdo con [22], se ha seleccionado para todo el dominio un coeficiente de rugosidad de Manning $n = 0.0162$, correspondiente al cemento. En cuanto a los detalles computacionales, la Figura 6 muestra las dos mallas triangulares que se han elegido para las simulaciones. En la primera malla (M1), los edificios se definen como paredes sólidas, por lo que malla se adapta a la forma de los edificios, tal como se muestra en la parte izquierda de la Figura 6. En la segunda malla (M2), los edificios se representan mediante elevaciones en el terreno (Figura 6, derecha).

La Figura 7 muestra una representación tridimensional del calado en el instante $t = 15$ s para las mallas M1 y M2, mientras que en la Figura 8 se puede ver la evolución temporal del calado en la posición de las sondas para ambas mallas (líneas gris y negra), así como los puntos

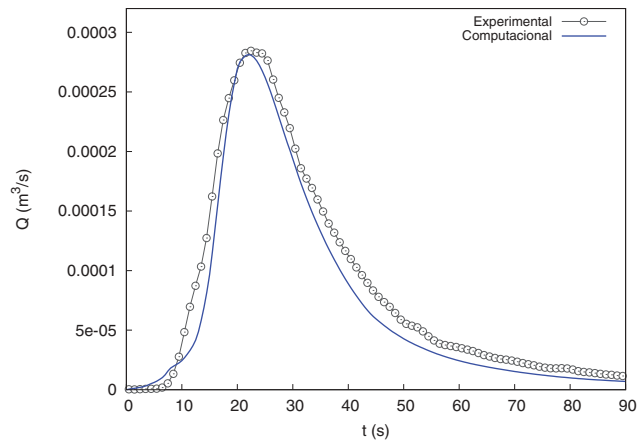


Figura 2. Hidrogramas computacional y experimental.

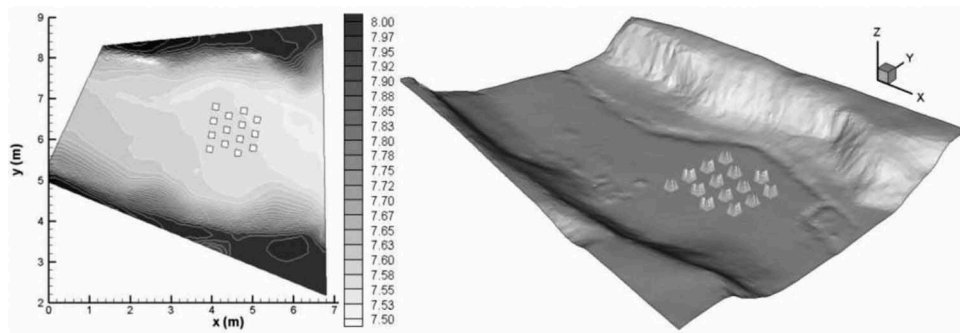


Figura 3. Representación del dominio computacional considerado junto con la distribución alterna de las edificaciones.

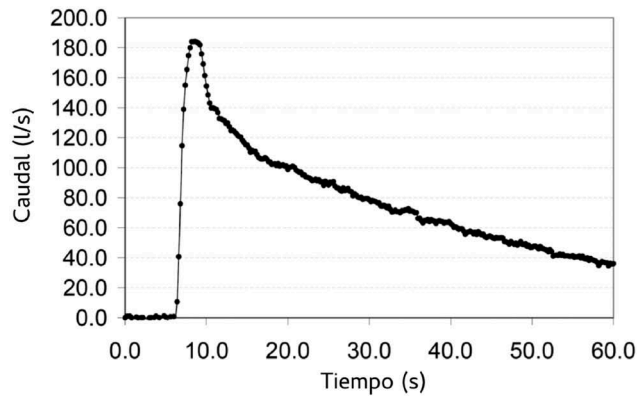


Figura 4. Hidrograma de entrada para el Caso test 2.

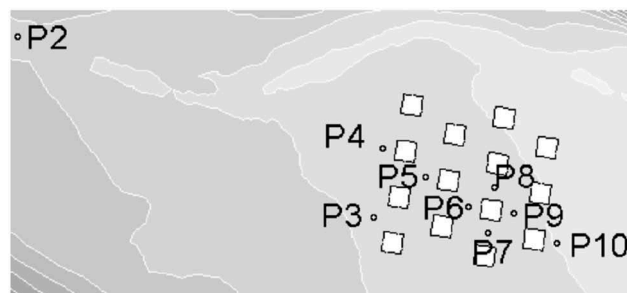


Figura 5. Posición de las sondas y disposición de los edificios para el Caso test 2.

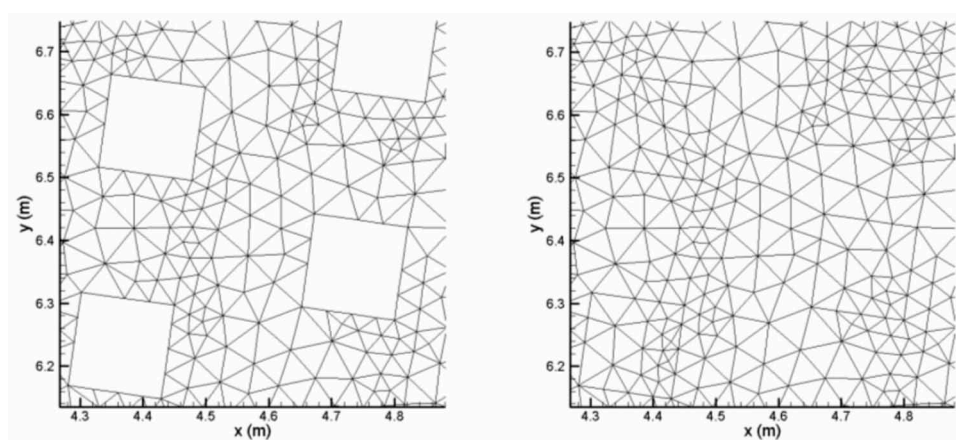


Figura 6. Detalle de las mallas computacionales M1 y M2.

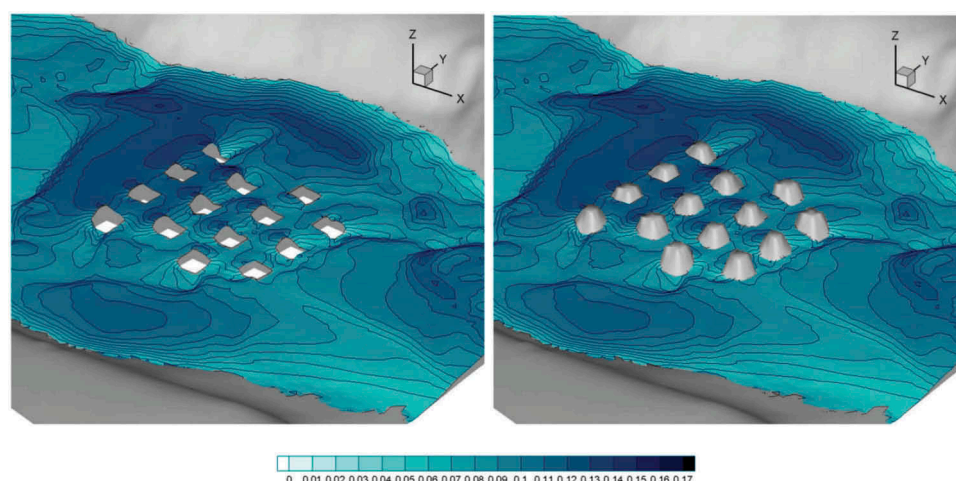


Figure 7. Representación tridimensional del calado en el instante $t = 15$ s en las mallas M1 y M2.

experimentales (círculos). En general, se observa una gran coincidencia entre los resultados numéricos y los datos experimentales para los dos tipos de malla. Cabe destacar también que la malla M2 no predice una situación de sobrepasamiento de los edificios en ningún momento.

5. Aplicación a un caso real: Fuentes de Ebro

5.1. Área de estudio

El río Ginel es un afluente del río Ebro por su margen derecha. La cuenca se sitúa en la zona central de la depresión del Ebro y posee una superficie de 77.3 km^2 con una morfología alargada y orientación SW-NE [29] (Figura 9). La longitud de la cuenca es de 17.3 km y las altitudes en el nacimiento y a la desembocadura son 328 m.s.n.m. y 165 m.s.n.m. , respectivamente, lo que supone una pendiente media del 0.9% .

El interés de este trabajo se centra en el paso del río Ginel por la localidad de Fuentes de Ebro, por lo que se limitará el estudio a un tramo de unos 1400 m de río, en el cual se simularán los efectos de dos avenidas fluviales con períodos de retorno de 100 años (T_{100}) y 500 años (T_{500}). La Figura 10 (izquierda) muestra el mapa de elevaciones de la región de estudio, así como la posición de las dos secciones de control en las cuales se integrará el caudal volumétrico para las dos avenidas simuladas. En la Figura 10 (centro) se muestra la distribución en tres regiones del coeficiente de rugosidad de Manning: (1) En la zona del cauce se considerará un valor de 0.04 , ya que se trata de un cauce limpio en general, con zonas pedregosas, sin depresiones profundas y con algo de vegetación en las orillas. La vegetación en el propio cauce es escasa o directamente nula en la mayor parte del tramo de estudio; (2) El suelo de la zona urbana está asfaltado prácticamente en su totalidad, salvo algunas

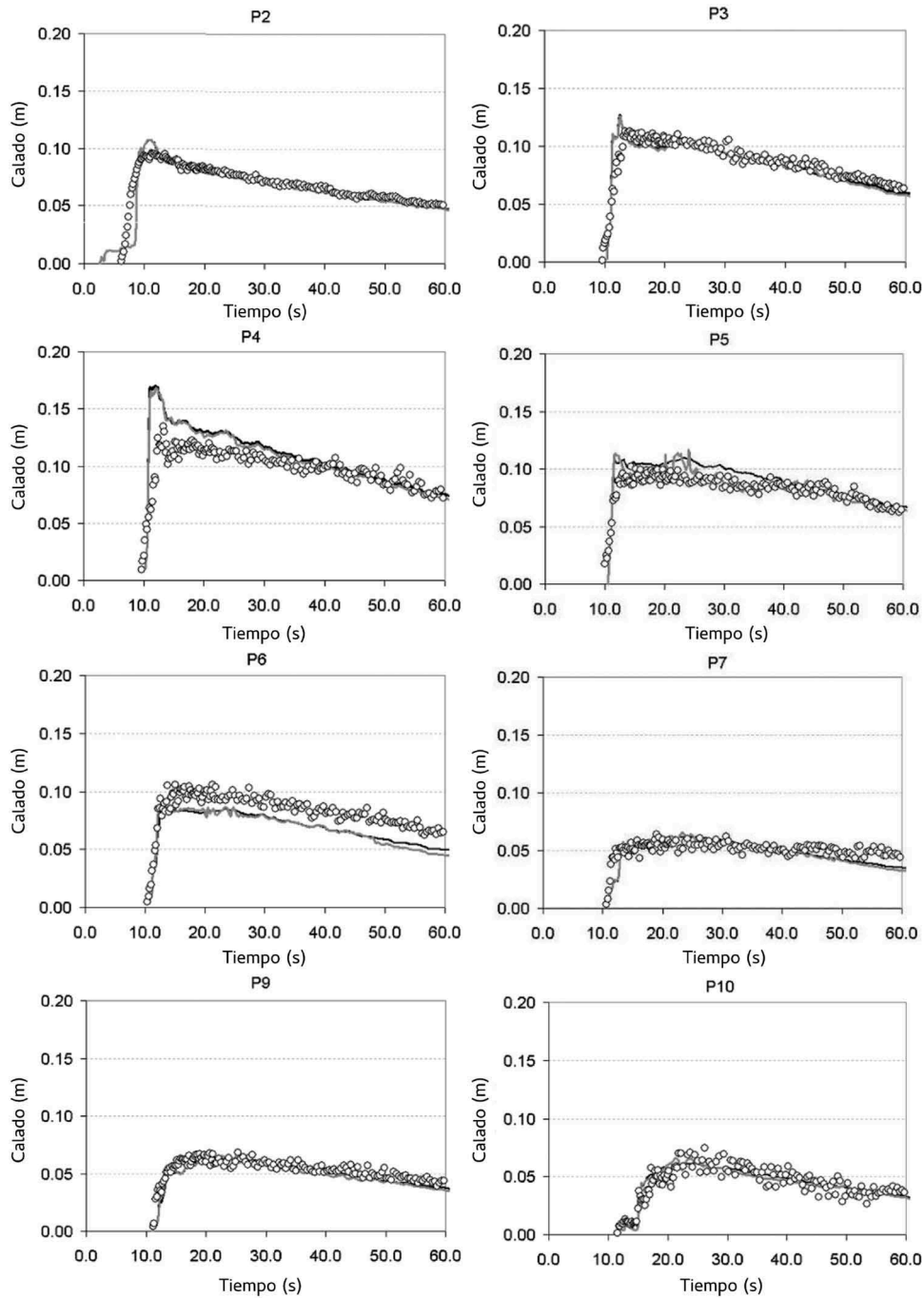


Figura 8. Evolución temporal del calado en la posición de las sondas. Comparación entre los resultados numéricos para las mallas M1 (negro) y M2 (gris) y los datos experimentales (puntos).

zonas de poca extensión en las que el pavimento es de cemento sin pulir, por lo que para esta región se tomará un valor de 0.016 para el coeficiente de Manning; (3) Por último, la región aguas abajo del dominio está formada por varias zonas de cultivo y de vegetación silvestre de tamaño medio, por lo que se considerará un valor de 0.05, ligeramente superior al de la zona del cauce bien definido [5]. El mapa de regiones con diferentes parámetros de infiltración se ha diseñado en función de la tipología de

suelos presente en la región y se muestra en la [Figura 10](#) (derecha). La [Tabla 1](#) muestra los valores numéricos de los parámetros de infiltración de Horton elegidos para estas tres zonas en base a las recomendaciones presentes en la literatura [25,26].

El dominio computacional se discretiza mediante una malla de cálculo refinada localmente de aproximadamente 150000 celdas triangulares. De esta forma, se puede tener una mayor exactitud de cálculo en las zonas

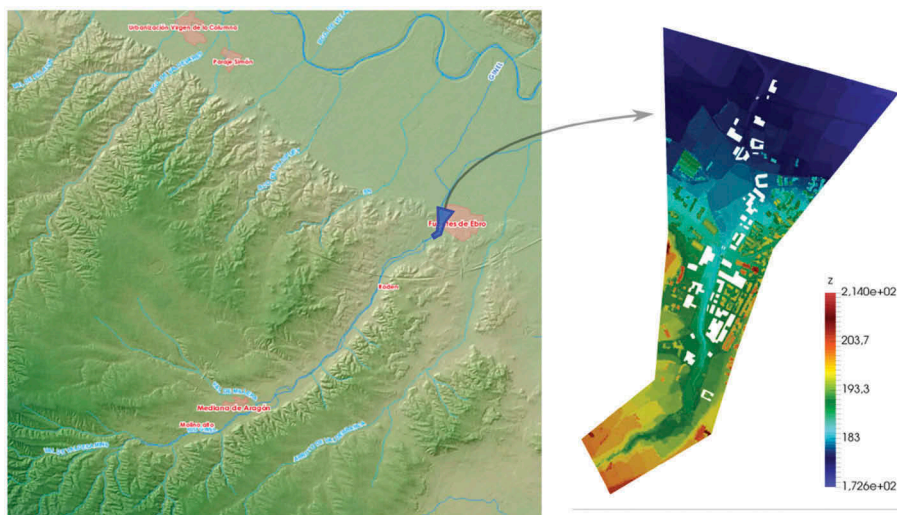


Figura 9. Situación geográfica del río Ginel (Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro).

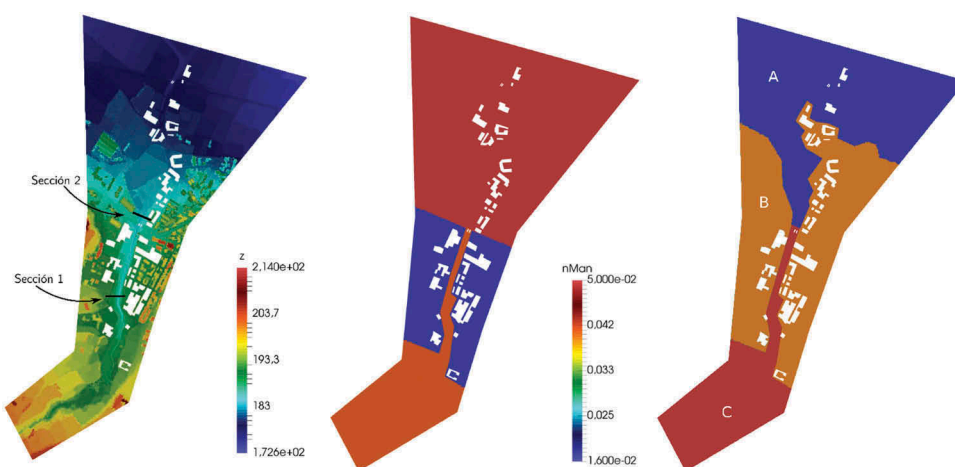


Figura 10. Mapas de los datos de partida distribuidos: Elevación del terreno y secciones de control (izquierda), coeficientes de rugosidad de Manning (centro) y regiones de infiltración (derecha).

Tabla 1. Parámetros del modelo de infiltración de Horton para las zonas consideradas.

Zona	k (s^{-1})	f_0 (m/s)	f_c (m/s)
A	0.0001	$1.9 \cdot 10^{-6}$	$1.0 \cdot 10^{-6}$
B	0.0001	$1.9 \cdot 10^{-8}$	$1.0 \cdot 10^{-8}$
C	0.0001	$1.9 \cdot 10^{-7}$	$1.0 \cdot 10^{-7}$

de más interés, como pueden ser el cauce del río o la parte urbana del terreno. El límite del refinamiento lo marca la resolución del Modelo Digital de Terreno (MDT) de partida ($2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$), por lo que se ha tomado dicho valor como tamaño mínimo para los lados de las celdas triangulares. Refinar más allá de este nivel no generaría variaciones en los resultados numéricos, aunque sí incrementaría notablemente el coste computacional.

Este hecho constituye la razón de que no se muestren resultados en una malla de cálculo más fina. El punto de partida para la discretización espacial ha sido un MDT proporcionado por el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), obtenido mediante un vuelo LIDAR con una densidad de 0.5 puntos/m^2 . Esta información ha sido completada con con 842 medidas topográficas *in situ*, realizadas con taquímetro. La Figura 11 muestra la malla de cálculo empleada, así como dos detalles del refinamiento en zonas de especial relevancia. Todo el contorno del dominio se considera como una frontera abierta que permite el paso libre del agua hacia el exterior a excepción de la sección del cauce aguas arriba, en donde se imponen los hidrogramas de entrada de caudal.

Los dos puentes que se encuentran dentro del dominio de la simulación se han tenido en cuenta mediante la

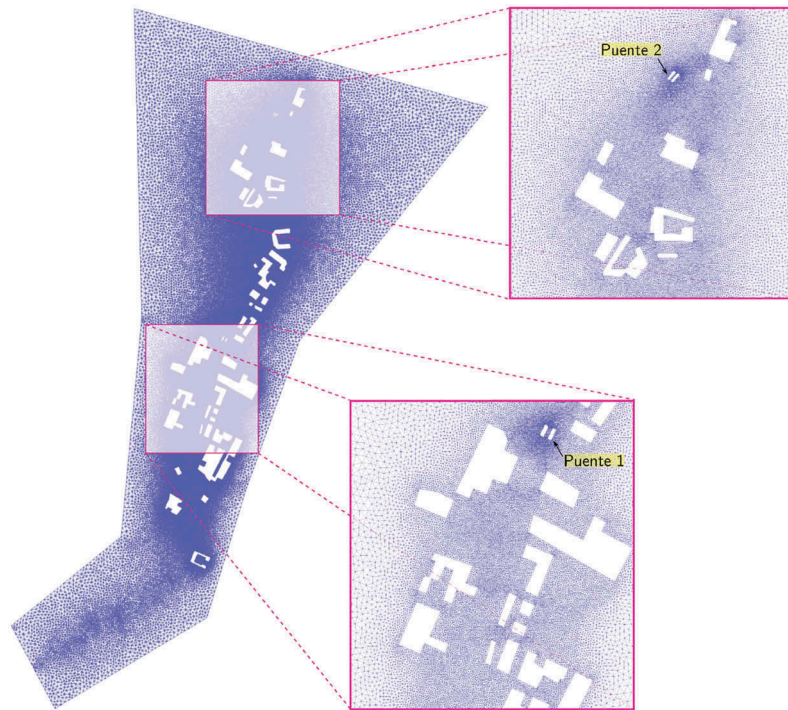


Figura 11. Malla de cálculo localmente refinada.

modelización de sus pilares principales en la malla de cálculo (Figura 11). El refinamiento de la malla alrededor de los pilares permite realizar una discretización adecuada de esta región tan sensible y obtener resultados numéricos fiables. El procedimiento utilizado para modelar los puentes implica que solamente se incluyen las pilas de los puentes, lo que significa que se asume que el flujo siempre estará en régimen de lámina libre. Un procedimiento más detallado para esta estructura hidráulica mejoraría las predicciones de calado y caudal en las cercanías del puente cuando éste se ve presurizado. Aguas abajo del segundo puente (sección 2), el río Ginel no tiene un cauce definido y el flujo se distribuye de manera dispersa siguiendo la topografía natural del terreno.

El uso de un modelo distribuido de simulación numérica para el flujo superficial permite calcular todas las variables hidráulicas e hidrológicas, como el calado h , las velocidades u, v o la tasa de infiltración f de manera individual para todas las celdas de la malla, por lo que la información disponible es ahora el calado y las dos componentes de la velocidad en cada celda simultáneamente. Esto es común a todos los modelos 2D de onda dinámica.

5.2. Resultados numéricos

En esta sección se presentan los resultados numéricos para las dos avenidas simuladas de períodos de retorno

de 100 años (T100) y 500 años (T500). La condición de contorno de entrada se supone una función triangular para el caudal con una duración de 10 horas y unos caudales máximos de $52 \text{ m}^3/\text{s}$ para la avenida T100 y $102 \text{ m}^3/\text{s}$ para la avenida T500. El resto de contornos permanecen abiertos para que el agua pueda salir con libertad del dominio. Como condición inicial, se supondrá un dominio completamente seco ($h = 0$ en todas las celdas de cálculo).

Las Figuras 12 y 13 muestran la evolución temporal de la avenida sobre el cauce principal del río y la llanura de inundación para los dos caudales máximos simulados. En las Figuras 14 y 15 se representa de forma ampliada en dos regiones de interés la comparación de los resultados numéricos para ambas avenidas. Como era de esperar, tanto los valores de calado como la mancha de inundación son mucho mayores para la avenida T500. A pesar de ello, en ambos casos el centro del núcleo urbano no sufre ninguna inundación y el agua queda encauzada prácticamente en su totalidad. En el caso del la avenida T500, el puente sobre la carretera se ve completamente desbordado, lo que provoca la inundación parcial de la zonal final del área de estudio, como se puede ver en la Figura 15 (derecha). En este caso, la acumulación de agua en los muros del puente 1 genera calados máximos de unos 3.7 m.

La Figura 16 muestra una comparación de la infiltración acumulada F en la parte final del dominio,

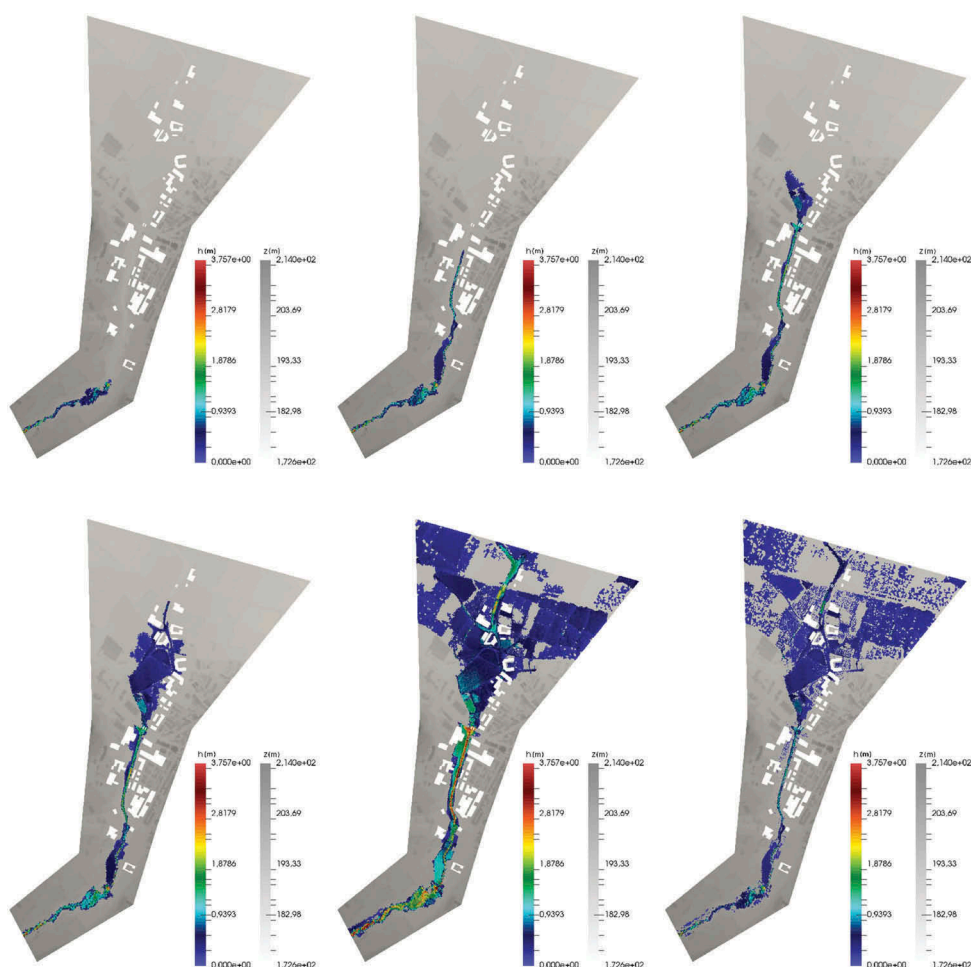


Figura 12. Resultados numéricos para el calado correspondientes a la avenida T100 para los tiempos $t = 0.6$ h, 1 h, 1.3 h, 1.6 h, 5 h y 10 h.

que es la más susceptible de sufrir inundaciones, por lo que previsiblemente será la región donde la infiltración cobre más importancia. Se observa que, en general, los valores de F son más elevados en la avenida T500. En concreto, en la avenida T100 se infiltraron 6560 m^3 en las 10 horas de simulación, mientras que en la avenida T500 fueron 7193 m^3 . Estas cantidades representan aproximadamente un 0.73% y un 0.4% del total del volumen de agua introducido en el dominio en las avenidas T100 y T500, respectivamente.

Las dos secciones de control (Figura 10) registran los hidrogramas mostrados en la Figura 17. Se puede observar como la sección 2, situada aguas abajo del puente de la carretera, registra un descenso del caudal pico. Esto se debe al desbordamiento lateral del río en esa zona, debido al efecto de taponamiento del puente.

Los resultados presentados en esta sección no se pueden comparar con ningún evento real, ya que se carece de datos sobre avenidas de similares características en la región de

estudio. Por otro lado, sería interesante realizar un análisis de incertidumbre de los resultados numéricos [30] para el cual, resulta especialmente útil la implementación del modelo en GPU. Esto permite ahorrar un tiempo de cálculo considerable en las numerosas repeticiones que se requieren en el análisis.

La Tabla 2 muestra los tiempos de cálculo (t_c) para las dos simulaciones (T100 y T500) empleando distintas implementaciones de RiverFlow2D: CPU sin paralelizar, CPU paralelizada en cuatro núcleos y GPU. En la avenida T100 se consigue una ganancia de un factor 50,3 de la GPU frente a la versión en CPU sin paralelizar y de 13,6 frente a la versión paralelizada en cuatro núcleos. En la avenida T500, estas ganancias son de 51,0 y 13,8, respectivamente.

6. Conclusiones

En este trabajo se han presentado varias aplicaciones de un modelo distribuido de simulación numérica basado en

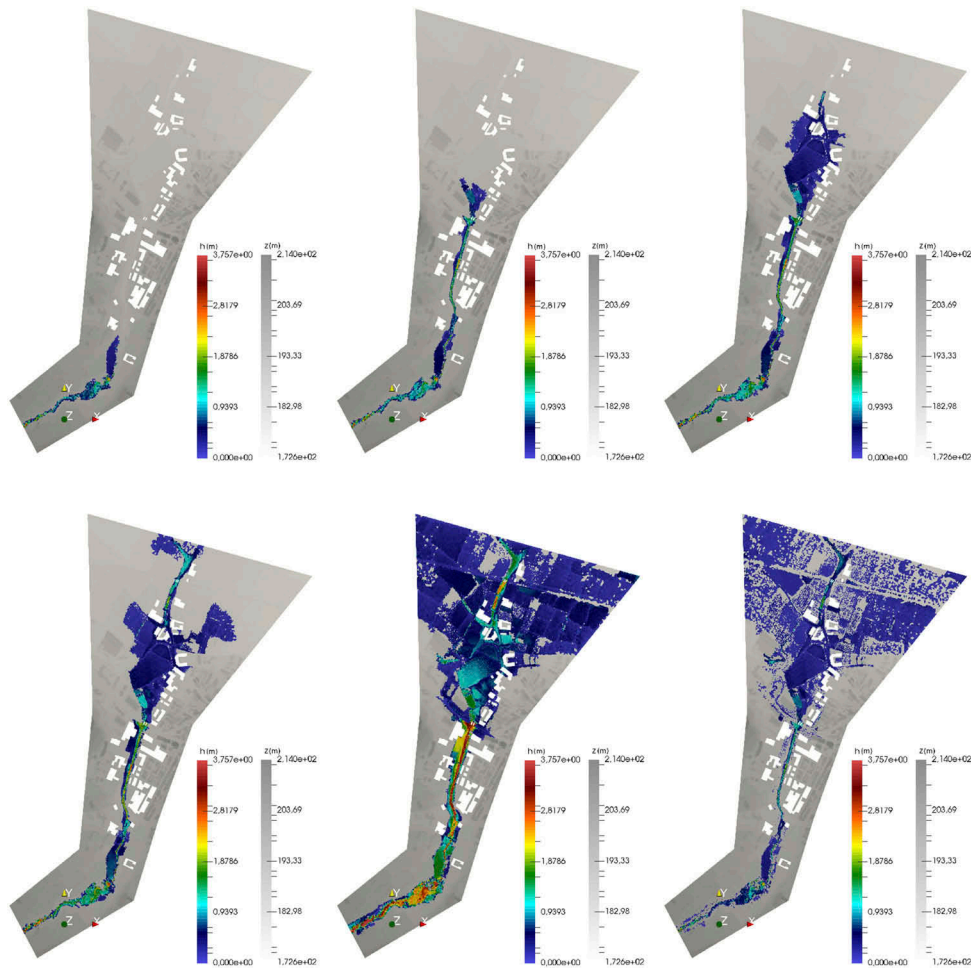


Figura 13. Resultados numéricos para el calado correspondientes a la avenida T500 para los tiempos $t = 0.6$ h, 1 h, 1.3 h, 1.6 h, 5 h y 10 h.

las ecuaciones bidimensionales de aguas poco profundas. Mediante dos casos test de zonas urbanas a escala de laboratorio se ha validado el modelo, tanto en la predicción de la respuesta de salida de la cuenca en forma de hidrograma como de valores distribuidos e instantáneos del calado de agua. En ambos casos, los resultados concuerdan satisfactoriamente con las medidas experimentales disponibles. Posteriormente, se ha aplicado el modelo a un tramo urbano del río Ginel, a su paso por la localidad de Fuentes de Ebro (Zaragoza). Se han simulado dos avenidas fluviales con tiempos de retorno característicos de estudios de inundación en la zona (100 y 500 años). La topografía del MDT disponible se ha complementado con más de 800 medidas de campo tomadas *in situ* en zonas de especial relevancia. Adicionalmente, se han diseñado mapas con diferentes zonas de rozamiento e infiltración en función de las características del terreno, lo que permite representar con una mayor fidelidad estas dos características del terreno. Los dos puentes que se encuentran dentro del

dominio de la simulación se han tenido en cuenta mediante la modelización de sus pilares principales en la malla de cálculo.

Los resultados obtenidos para ambas avenidas muestran que el cauce principal del río no se desborda a su paso por el centro de la localidad. En ambos casos, las extensiones de la mancha de agua son similares en esta zona, aunque los calados son significativamente mayores en la avenida T500. Solamente se ven parcialmente afectadas algunas casas próximas a la ribera a la entrada del pueblo. El puente sobre la carretera (Puente 1) genera un cierto taponamiento en el caso de la avenida de mayor magnitud, llegando a desbordar en el tiempo de máximo caudal y generando inundaciones leves en la parte final del dominio.

El uso de la programación en GPU para el desarrollo del código permite agilizar sensiblemente los cálculos y reducir el tiempo de simulación, por lo que la combinación de ambos factores (modelo 2D + GPU) se convierte en una herramienta muy versátil capaz de realizar predicciones de

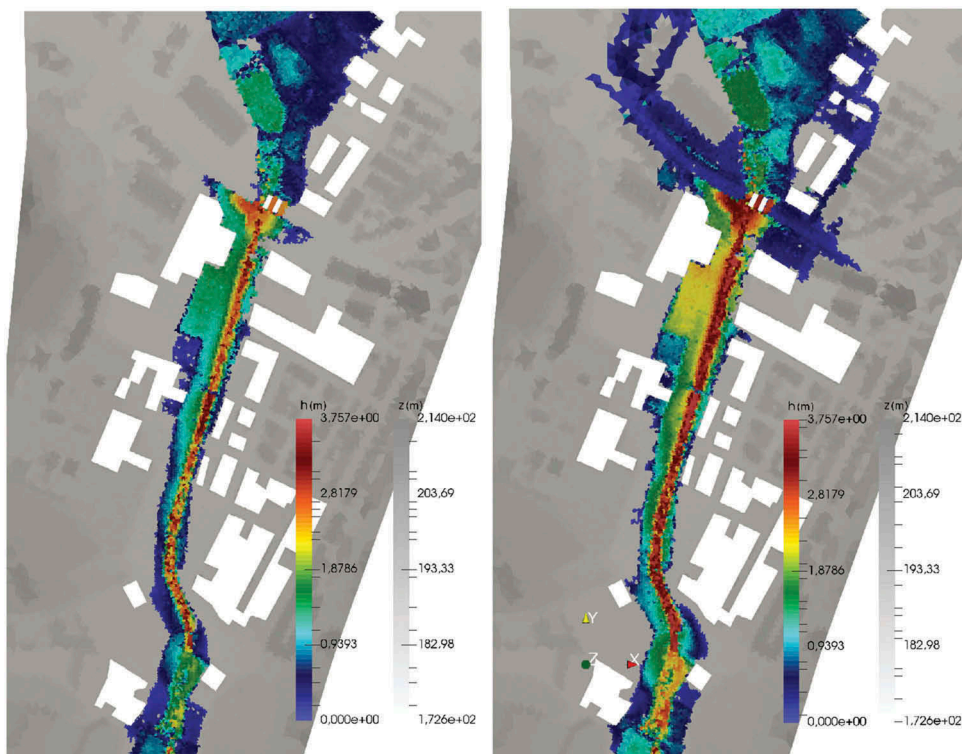


Figura 14. Comparación en detalle de los resultados numéricos de calado correspondientes a las avenidas T100 (izquierda) y T500 (derecha) en el pico de la crecida ($t = 5$ h) en el entorno del puente de la carretera.

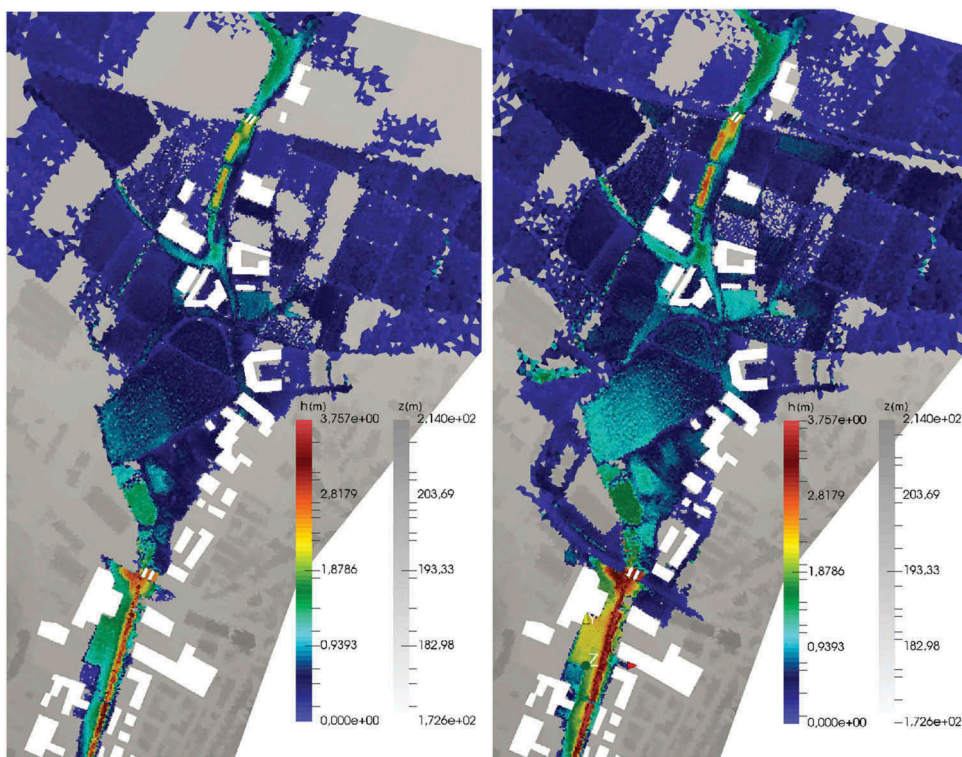


Figura 15. Comparación en detalle de los resultados numéricos de calado correspondientes a las avenidas T100 (izquierda) y T500 (derecha) en el pico de la crecida ($t = 5$ h) en el entorno del puente del ferrocarril.

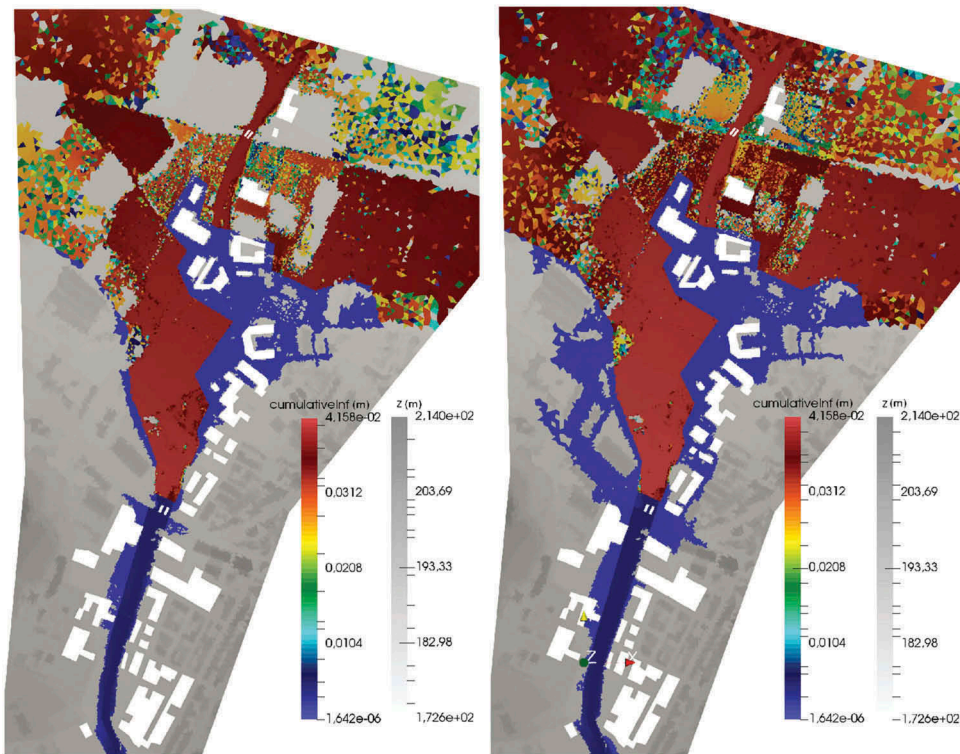


Figura 16. Comparación en detalle de los resultados numéricos de infiltración acumulada correspondientes a las avenidas T100 (izquierda) y T500 (derecha) tras el paso de la crecida ($t = 10$ h) en el entorno del puente del ferrocarril.

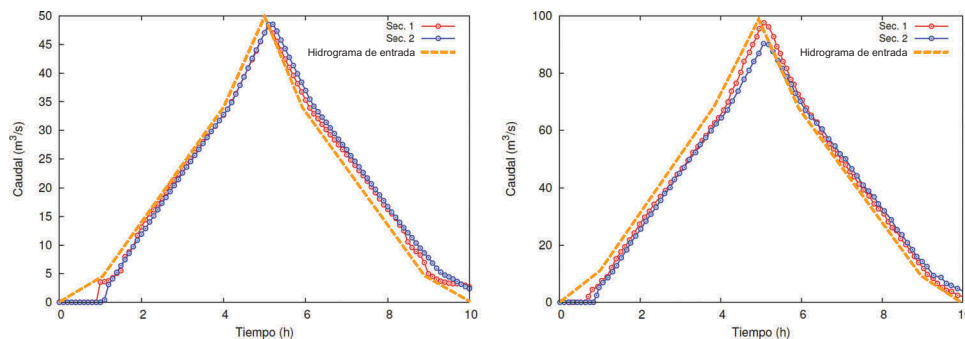


Figura 17. Hidrogramas registrados en las dos secciones de control correspondientes a las simulaciones de las avenidas T100 (izquierda) y T500 (derecha).

Tabla 2. Tiempos de cálculo.

	CPU-1 core (Intel i7-4770@3.40 Ghz)	CPU-4 core (Intel i7-4770@3.40 Ghz)	GPU (NVIDIA Tesla c2075)
t_c (T100) (h)	89,53	24,15	1,78
t_c (T500) (h)	143,89	38,89	2,82

fenómenos hidráulicos/hidrológicos de una manera ágil y precisa. Adicionalmente, esta agilidad de cálculo permite reducir el enorme tiempo computacional requerido por un análisis exhaustivo de incertidumbre a la hora de validar los resultados numéricos.

Acknowledgments

El presente trabajo está parcialmente financiado por el Gobierno de Aragón mediante el Fondo Social Europeo. Esta investigación también ha sido apoyada por el Proyecto de Investigación CGL2015-66114-R del Ministerio de Economía

y Competitividad (MINECO). El autor principal también desea agradecer al MINECO por su beca de investigación DI-14-06987. Los autores agradecen al Ayuntamiento de Fuentes de Ebro su buena disposición a la hora de facilitar información técnica sobre la región.

Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the authors.

Funding

This work was supported by the Ministerio de Economía y Competitividad [CGL2015-66114-R, DI-14-06987].

Notes on contributor

J. Fernández-Pato: Licenciado en Física y Doctor Ingeniero por la Universidad de Zaragoza. Su investigación se centra fundamentalmente en las siguientes líneas: desarrollo de métodos implícitos para flujos superficial y subterráneo, acoplamiento entre modelos hidráulicos, simulación de procesos hidrológicos, implementación de resolutores lineales de sistemas de ecuaciones y aplicación de nuevas técnicas matemáticas a la simulación hidráulica/hidrológica. Antonio Sánchez: Licenciado en Ciencias Geológicas (1983-1988), Postgrado en Ingeniería del Medio Ambiente (1997) y Master en Ingeniería de los Recursos Hídricos (curso 2016-2017). 29 años de experiencia en proyecto y control y vigilancia de grandes obras hidráulicas y líneas de Alta Velocidad. Ha participado en la redacción de varias publicaciones para congresos y jornadas de presas e hidrogeología. Pilar García-Navarro: Desde 2010, catedrática en Mecánica de Fluidos en la Universidad de Zaragoza (España). Coordinadora de 12 proyectos de investigación. Participación en 17 proyectos de investigación. Supervisión de 12 tesis doctorales completas. Más de 90 contribuciones a congresos. Organizadora de 3 workshops internacionales. Su actividad investigadora se centra en el campo específico de los modelos numéricos para la simulación precisa y eficiente de casos realistas con aplicaciones en ingeniería.

References

- [1] Rabus B, Eineder M, Roth A, et al. The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *ISPRS J Photogramm Remote Sens.* 2003;57(4):241–262.
- [2] Chen J, Chen J, Liao A, et al. Global land cover mapping at 30 m resolution: A pixel-based operational approach. *ISPRS J Photogramm Remote Sens.* 2015;103:7–27. *Global Land Cover Mapping and Monitoring.*
- [3] Tadono T, Ishida H, Oda F, et al. Precise global dem generation by alos prism. *ISPRS Anal Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci.* 2014;2(4):71–76.
- [4] Farr TG, Rosen PA, Caro E, et al. The shuttle radar topography mission. *Rev Geophys.* 2007;45(2).
- [5] Chow V, Maidment D, Mays L. *Applied hydrology.* McGraw-Hill Civil Engineering Series, New York: MCGRAW-HILL Higher Education; 1988.
- [6] Hsu M, Chen S, Chang T. Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system. *J Hydrol.* 2000;234(1):21–37.
- [7] Mark O, Weesakul S, Apirumanekul C, et al. Potential and limitations of 1d modelling of urban flooding. *J Hydrol.* 2004;299(3):284–299. *Urban Hydrology.*
- [8] Schmitt TG, Thomas M, Ettrich N. Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems. *J Hydrol.* 2004;299(3):300–311. *Urban Hydrology.*
- [9] Sampson CC, Fewtrell TJ, Duncan A, et al. Use of terrestrial laser scanning data to drive decimetric resolution urban inundation models. *Adv Water Res.* 2012;41:1–17.
- [10] Yu D, Coulthard TJ. Evaluating the importance of catchment hydrological parameters for urban surface water flood modelling using a simple hydro-inundation model. *J Hydrol.* 2015;524:385–400.
- [11] Courty LG, Pedrozo-Acuña A, Bates PD. Itzi (version 17.1): an open-source, distributed gis model for dynamic flood simulation. *Geosci Model Dev.* 2017;10(4):1835–1847.
- [12] Bates P, Roo AD. A simple raster-based model for flood inundation simulation. *J Hydrol.* 2000;236(1):54–77.
- [13] Leandro J, Chen A, Schumann A. A 2d parallel diffusive wave model for floodplain inundation with variable time step (p-dwave). *J Hydrol.* 2014;517:250–259.
- [14] Guidolin M, Chen AS, Ghimire B, et al. A weighted cellular automata 2d inundation model for rapid flood analysis. *Environ Modell Software.* 2016;84:378–394.
- [15] Murillo J, García-Navarro P, Burguete J, et al. The influence of source terms on stability, accuracy and conservation in two-dimensional shallow flow simulation using triangular finite volumes. *Int J Numer Methods Fluids.* 2007;54:543–590.
- [16] Burguete J, García-Navarro P, Murillo J. Friction term discretization and limitation to preserve stability and conservation in the 1D shallow-water model: application to unsteady irrigation and river flow. *Int J Numer Methods Fluids.* 2008;58(4):403–425.
- [17] Murillo J, García-Navarro P. Weak solutions for partial differential equations with source terms: application to the shallow water equations. *J Comput Phys.* 2010;229:4327–4368.
- [18] Lacasta A, Morales-Hernández M, Murillo J, et al. An optimized gpu implementation of a 2d free surface simulation model on unstructured meshes. *Adv Eng Software.* 2014;78:1–15.
- [19] Brunner G. *HEC-RAS river analysis system. Hydraulic reference manual.* US Army Corps of Engineers, Washington DC; 1995. (Report).
- [20] Marín-López J. Estudio de inundabilidad de barrancos en el municipio de fuentes de ebro. ayuntamiento de fuentes de ebro (zaragoza). Ayuntamiento de Fuentes de Ebro (Zaragoza), Fuentes de Ebro (Zaragoza); 2008. (tech. rep.).
- [21] Cea L, Garrido M, Puertas J. Experimental validation of two-dimensional depth-averaged models for

- forecasting rainfall-runoff from precipitation data in urban areas. *J Hydrol.* **2010**;382(1–4):88–102.
- [22] Testa G, Zuccalà D, Alcrudo F, et al. Flash flood flow experiment in a simplified urban district. *J Hydraul Res.* **2007**;45(sup1):37–44.
- [23] Vreugdenhil C. Numerical methods for shallow water flow. Netherlands: Kluwer Academic Publishers; **1994**.
- [24] Horton R. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Trans Am Geophys Union.* **1933**;14(1):446–460.
- [25] Rawls W, Yates P, Asmussen L. Calibration of selected infiltration equation for the georgia coastal plain. Agriculture Research Service, New Orleans; **1976**. (Report ARS-S-113).
- [26] ASCE. Hydrology handbook. 2nd ed. American Society of Civil Engineers (ASCE), New York; **1996**.
- [27] Fernández-Pato J, Caviedes-Voullième D, García-Navarro P. Rainfall/runoff simulation with 2d full shallow water equations: sensitivity analysis and calibration of infiltration parameters. *J Hydrol.* **2016**;536:496–513.
- [28] García-Navarro P, Murillo J, Fernández-Pato J, et al. The shallow water equations and their application to realistic cases. *Environ Fluid Mech.* **2019** Jan.
- [29] CHE. Aplicación del índice hidrogeomorfológico IHG en la cuenca del Ebro. Confederación Hidrográfica del Ebro, Zaragoza (Spain); **2010**. (Report).
- [30] Rodríguez-Rincón JP, Pedrozo-Acuña A, Breña Naranjo JA. Propagation of hydro-meteorological uncertainty in a model cascade framework to inundation prediction. *Hydrol Earth Syst Sci.* **2015**;19(7):2981–2998.