

Simulación numérica con RiverFlow2D de posibles soluciones de mitigación de avenidas en el tramo medio del río Ebro

RiverFlow2D numerical simulation of flood mitigation solutions in the Ebro River

Echeverribar, I.^{a1}, Morales-Hernández, M.^{a2}, Lacasta, A.^{a3}, Brufau, P.^{a4}, García-Navarro, P.^{a5}

^aLIFTEC-CSIC, Universidad de Zaragoza. C/ María de Luna, Edif. Torres Quevedo, 50018 Zaragoza (España).

E-mail: ^{a1}iecheverribar@hotmail.com, ^{a2}mmorales@unizar.es, ^{a3}alacasta@unizar.es, ^{a4}brufau@unizar.es, ^{a5}pigar@unizar.es

Recibido: 02/09/2016

Aceptado: 22/11/2016

Publicado: 31/01/2017

RESUMEN

En este trabajo se presenta un estudio de medidas orientadas a la mitigación de avenidas en el tramo medio del río Ebro: limpieza de vegetación del cauce, uso de zonas de inundación controlada y construcción o re-adaptación de motas. Para ello se utiliza el software RiverFlow2D que resuelve las ecuaciones conservativas del flujo de superficie libre con un método de volúmenes finitos realizando los cálculos sobre GPU. Se comparan los resultados con medidas en estaciones de aforo e información extraída de ortofotos. La medida más efectiva, de las analizadas, ha resultado ser la eliminación de la vegetación en el cauce. Se demuestra que no sólo el área máxima inundada es menor en todo el tramo sino que también reduce la altura de agua hasta en 1 m. El resto de medidas tienen consecuencias locales y de poca entidad cuando los caudales pico son altos, aunque podrían resultar de utilidad para avenidas con caudales más bajos.

Palabras clave | avenida; simulación numérica; mitigación; flujo de superficie libre.

ABSTRACT

A study of measures oriented to flood mitigation in the mid reach of the Ebro river is presented: elimination of vegetation in the riverbed, use of controlled flooding areas and construction or re-adaptation of levees. The software used is RiverFlow2D which solves the conservative free-surface flow equations with a finite volume method running on GPU. The results are compared with measurements at gauge stations and aerial views. The most effective measure has turned out to be the elimination of vegetation in the riverbed. It is demonstrated that not only the maximum flooded area is narrower but also it reduces the water depth up to 1 m. The other measures have local consequences when the peak discharge is relatively high although they could be useful in case the discharge is lower.

Key words | flood; numerical simulation; mitigation; free surface flow.

INTRODUCCIÓN

En España las inundaciones son la catástrofe natural que genera mayores daños y costes económicos. Los daños por inundaciones se estiman en una media de 800 millones de euros anuales según el Consorcio de Compensación de Seguros y el Instituto Geológico y Minero de España¹. En el período 1971-2012 el 42.9% de los expedientes tramitados en seguros por catástrofes han sido debidos a daños por inundaciones, y a su vez constituyen el 60.3% del total de las indemnizaciones (ver Figura 1). Debido a la importancia que tienen los efectos de las inundaciones, en la Unión Europea en 2007 se creó una nueva directiva sobre la evaluación y gestión de las inundaciones y a España llegó en forma del Real Decreto 903/2010. La implantación de esta directiva considera necesario elaborar mapas de peligrosidad y riesgo de inundación (Comisión Técnica del Comité Español de la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres). La Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) ha publicado un portal monográfico de consulta del plan de gestión de Riesgo de Inundación (PGRI) aprobado el 15/01/2016; y un horizonte de aplicación hasta 2021 que contiene como una de las medidas, la predicción de avenidas aprendiendo de lo ocurrido en episodios anteriores, reordenando el uso del suelo en zonas inundables y adaptando elementos situados en estas zonas (Plan de Gestión del Riesgo de Inundación, CHE).

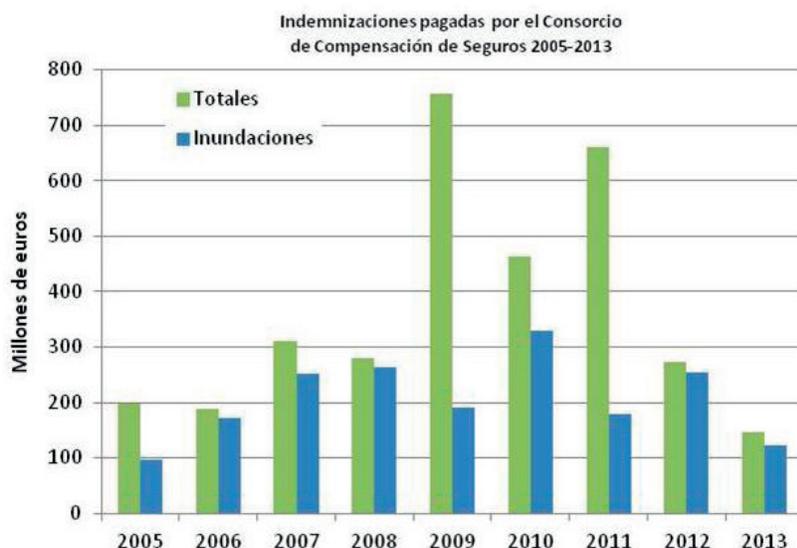


Figura 1 | Indemnizaciones en millones de euros totales (en verde) y sólo de inundaciones (en azul) pagadas por el Consorcio de Compensación de seguros entre los años 2005-2013.

Las medidas no estructurales destinadas a reducir el riesgo de inundación mediante la predicción necesitan de herramientas que sean capaces de reproducir situaciones anteriores de episodios de avenida para poder predecir situaciones futuras. Por ello, en este trabajo se van a presentar los resultados obtenidos de la simulación numérica de la avenida de Febrero del 2015 en el tramo medio del río Ebro desde Castejón de Ebro a Zaragoza. Posteriormente, se analizan posibles alternativas de intervención como limpieza de la vegetación en el cauce, zonas de inundación controlada o re-adaptación y construcción de motas en este tramo para analizar sus efectos y consecuencias y poder actuar antes de que se produzca una situación similar en el futuro.

Existen en el mercado internacional diferentes softwares de simulación de avenidas: HECRAS (Ahmad y Simonovich 2006), GUAD2D (Murillo *et al.*, 2007), MIKE (DHI, 2009), XPSWMM (Toriman *et al.*, 2009), LISFLOOD (Van der Knijff *et al.*, 2010), IBER (Bladé *et al.*, 2014), SOBEK (Suman y Akther, 2014), TELEMAT (Shang, 2014), Flood Modeller (Ahmadian *et al.*, 2015), RiverFlow2D (García *et al.*, 2015) entre otros. Unos representan el dominio espacial en 1D, otros lo hacen de forma acoplada 1D en el cauce 2D en las llanuras de inundación y otros en forma 2D de manera completa. Algunos resuelven las ecuaciones de flujo de superficie libre, otros modelos simplificados de las mismas. Los métodos numéricos utilizados para resolver estas ecuaciones también suelen ser diferentes según sean: elementos finitos, volúmenes finitos o diferencias finitas. Dentro del grupo

¹ <http://www.mapama.gob.es/es/agua/temas/gestion-de-los-riesgos-de-inundacion>

de volúmenes finitos nos podemos encontrar con modelos de onda o de flujos, implícitos o explícitos en la resolución temporal, dominios espaciales resueltos en celdas estructuradas o no estructuradas, cuadradas o triangulares, etc...

En este caso, se ha elegido RiverFlow2D, que calcula con un método de volúmenes finitos descentrado explícito sobre GPU. Es el último desarrollo de tecnología hidro-informática llevado a cabo por el Grupo de Hidráulica Computacional de la Universidad de Zaragoza². Una de las ventajas que lo diferencian del resto es que calcula sobre GPU (*Graphical Processing Unit*) lo que permite cálculos de dominios espaciales muy grandes en tiempos muy reducidos; impensable hasta hace poco tiempo en modelos 2D. Además, permite el cálculo sobre una malla triangular no estructurada adaptada al terreno; es conservativo, dando cero errores en volumen de agua; preciso y fiable ya que ha sido calibrado en numerosas ocasiones (Lacasta *et al.*, 2014, 2015). Este software ha permitido resolver de forma satisfactoria el reto numérico del cálculo de un dominio discretizado en 867672 celdas en el cual una avenida de 20 días se simula en 17 horas con GPU. Esto hace viable la predicción de inundaciones a tiempo real mientras que hasta ahora este tipo de cálculos costaban el tiempo natural de los días que se quisiesen simular; para el presente caso alrededor de 20 días.

MATERIAL Y MÉTODOS

En esta sección se incluye una descripción breve del programa de simulación numérica de flujo de superficie libre RiverFlow2D que se ha utilizado en este estudio y cuyo detalle se puede consultar en las referencias que se indican a lo largo del texto. También contiene la descripción completa del caso de estudio, la malla sobre la que se ha calculado la avenida de 2015 y las soluciones de mitigación, el mapa de los usos del suelo y datos necesarios para llevar a cabo el cálculo como son las condiciones iniciales y las condiciones de contorno.

RiverFlow2D

El estudio de simulación de avenidas y mitigación se realiza con este programa de cálculo, en el cual se resuelven las ecuaciones del flujo de superficie libre 2D, también llamadas de aguas poco profundas, que son el promedio en la vertical de las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento de Navier-Stokes, asumiendo la hipótesis de presión hidrostática en la vertical y que se pueden escribir en su forma compacta como

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

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

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

con

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

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

² <http://ghc.unizar.es>

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

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

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

$$A_i \frac{(\mathbf{U}_i^{n+1} - \mathbf{U}_i^n)}{\Delta t} + \sum_{k=1}^{NE} (\mathbf{E} \mathbf{n} - \mathbf{S})_k^* l_k = 0 \quad (5)$$

donde NE es el número de celdas vecinas de la celda i y A_i representa el área de dicha celda. A través de la linealización de Roe (Roe, 1981) es posible obtener una matriz Jacobiana del flujo $\mathbf{E} \mathbf{n}$ de dimensiones $m \times m$ ($m=3$ para el caso 2D) cuyos valores propios $\tilde{\lambda}_k^m$ y vectores propios $\tilde{\mathbf{e}}^m$ (Morales *et al.*, 2013) permiten escribir la actualización en cada celda para cada instante de tiempo (Ecuación (6)).

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

donde l_k representa la longitud de la pared k y $\tilde{\mathbf{e}}_k$ expresa de manera compacta las contribuciones de flujos y términos fuente en dicha pared k (Morales *et al.*, 2013). El significado de la expresión (4) es simple: las variables conservadas en cada celda i en el instante de tiempo siguiente $n+1$ dependen directamente del valor que tenían en el instante anterior de tiempo, n , y de las contribuciones provenientes de las celdas colindantes a través de los lados, k , de la misma. Por último, debido al carácter explícito del método utilizado es necesaria una condición de estabilidad para el paso de tiempo. Para ello se restringe con la condición de CFL de manera que

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

donde

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

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

Descripción del caso de estudio: tramo medio río Ebro

De toda la extensión que tiene la cuenca del río Ebro, se plantea en este estudio el tramo medio desde Castejón de Ebro a Zaragoza. El dominio aguas arriba y aguas abajo queda delimitado por las estaciones de aforo que hay en ambas poblaciones y que servirán para introducir sus medidas como condiciones de contorno. En la Figura 2 se muestra una imagen del dominio a calcular con una extensión de 744 km². A pesar de que la distancia en línea recta entre los límites del dominio es de casi 90 km, la longitud total del cauce alcanza los 125 km aproximadamente. Como poblaciones destacadas que cuentan también con estaciones de aforo se encuentran Tudela, Novillas y Alagón. Las medidas recogidas en estas poblaciones servirán para validar los resultados numéricos obtenidos con el programa de cálculo.



Figura 2 | Vista en plano del dominio de cálculo desde Castejón de Ebro a Zaragoza destacando poblaciones intermedias que cuentan con estación de aforo.

Malla de cálculo

Para poder construir la malla de cálculo en cuyos centros de celda obtendremos los valores de todas las variables (h, u, v) del dominio espacial para cada paso de tiempo necesitamos las coordenadas (x, y, z) de la zona a estudiar. Para ello se ha partido de un MDT (Modelo Digital de Terreno) de resolución $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ obtenido del Instituto Geográfico Nacional (IGN³). En este MDT no se recoge el fondo del río puesto que la lámina de agua dificulta la toma de datos, así que se ha realizado una reconstrucción del cauce interpolando datos de secciones batimétricas medidas a lo largo de este tramo (Caviedes-Voullième *et al.*, 2014).

A partir de los datos anteriores se ha construido una malla triangular no estructurada cuyo tamaño mínimo de celda tiene una longitud de 5 m. La anchura del dominio se ha elegido de 12.5 km en su parte más ancha y de 3.54 km en su parte más estrecha, de forma que la lámina de inundación nunca llegue a los contornos. En estas zonas alejadas, donde el agua tiene poca probabilidad de llegar, se han impuesto celdas de longitud de lado 250 m. Finalmente, se obtiene una malla con 867672 triángulos. Se puede apreciar un detalle de la misma cerca de Castejón de Ebro en la Figura 3.

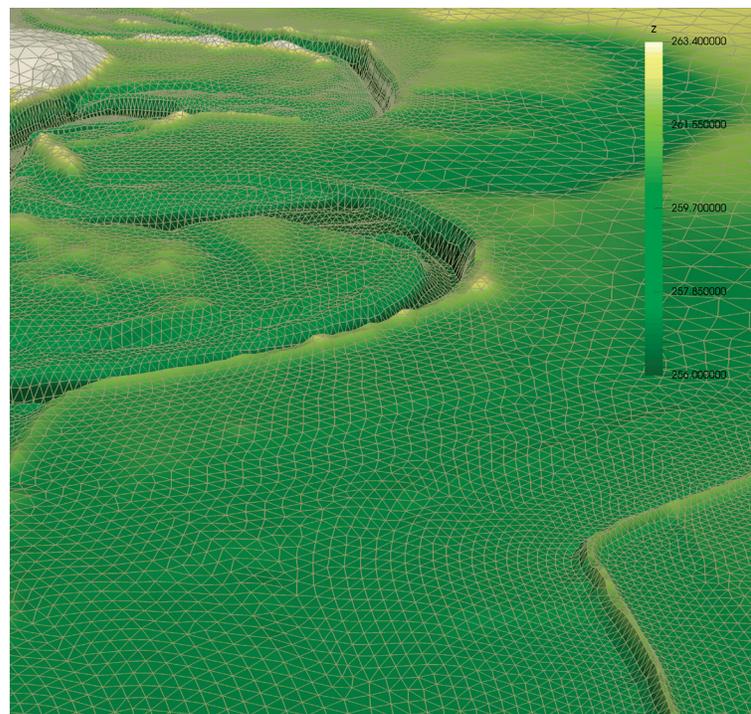


Figura 3 | Detalle de la malla de cálculo en una zona del dominio cercana a Castejón de Ebro.

³ <http://www.ign.es/ign/layoutIn/modeloDigitalTerreno.do>

Mapa de usos del suelo

El dato del uso del suelo es muy importante a la hora de simular estos fenómenos ya que el flujo de agua viene gobernado por la pendiente del fondo y el rozamiento por fricción del mismo. La pérdida de energía del flujo por fricción se tiene en cuenta en lo que llamamos comúnmente coeficiente de rozamiento de Manning. Por ello, se ha dividido el dominio en diferentes regiones y a cada una de ellas se le ha asignado un coeficiente de rozamiento de Manning diferente según el uso del suelo en esa zona, incluido el cauce del río; siguiendo la literatura consultada sin proceder a la calibración del modelo. Aquí se han distinguido entre 7 tipos distintos de uso del suelo que se recogen en la Tabla 1. En la Figura 4 se muestra un mapa con los valores de los coeficientes de rozamiento de Manning utilizados para distinguir los diferentes usos del suelo por regiones.

Tabla 1 | Coeficiente de rozamiento asignado a cada región según el tipo de suelo.

Uso del suelo	Coeficiente de rozamiento de Manning (n) (s/m ^{1/3})
Cauce de río	0.035
Arbustos	0.04
Medio boscosa	0.045
Boscosa (soto)	0.06
Campo	0.028
Galacho (agua estancada)	0.024
Urbano	0.05

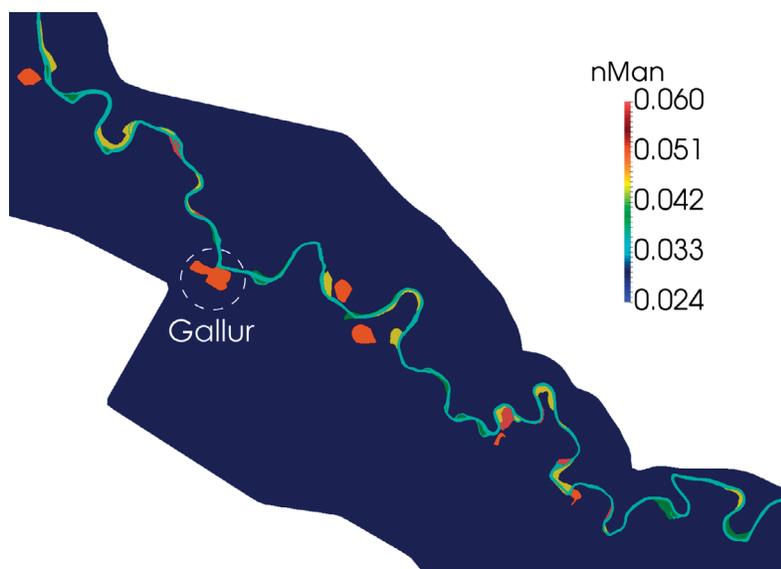


Figura 4 | Mapa de valores de coeficiente de rozamiento de Manning según el uso del suelo.

Condiciones iniciales y de contorno

A la hora de simular un estado transitorio del flujo se necesita partir de unas condiciones iniciales debido a la imposibilidad de calcular en continuo. Se ha elegido partir de un estado estacionario del caudal que figura como inicial en el hidrograma de avenida. De esta forma se comete un pequeño error en la condición inicial pero se subsana rápidamente cuando llega la onda de avenida.

Como condición de contorno aguas arriba se impone el hidrograma registrado en la estación de aforo de Castejón de Ebro que recoge los caudales que circularon en Castejón en la avenida de febrero del 2015 y contiene un primer pico de unos $1750 \text{ m}^3/\text{s}$ y otro a los 4 días de $2600 \text{ m}^3/\text{s}$. En total el evento duró 21 días aproximadamente y el hidrograma se muestra en la Figura 5. El tiempo de cálculo de esta simulación fue de 17 h.

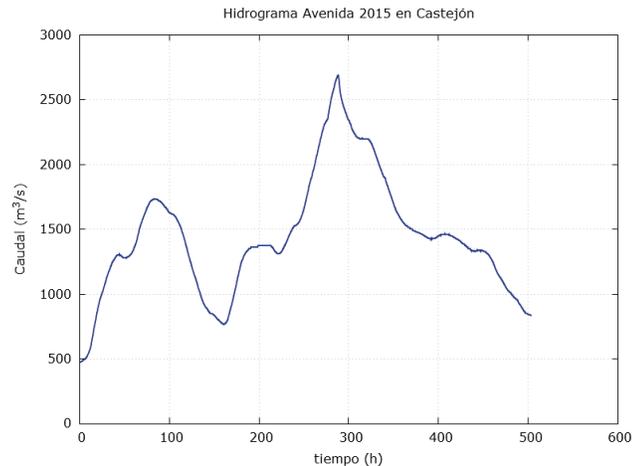


Figura 5 | Hidrograma registrado en la avenida de Febrero del 2015 en Castejón de Ebro.

Como condición de contorno aguas abajo se ha impuesto la curva de aforo (ver Figura 6) obtenida de las medidas históricas registradas en la estación de Zaragoza situada en el puente de la autopista A-2 sobre el Ebro.

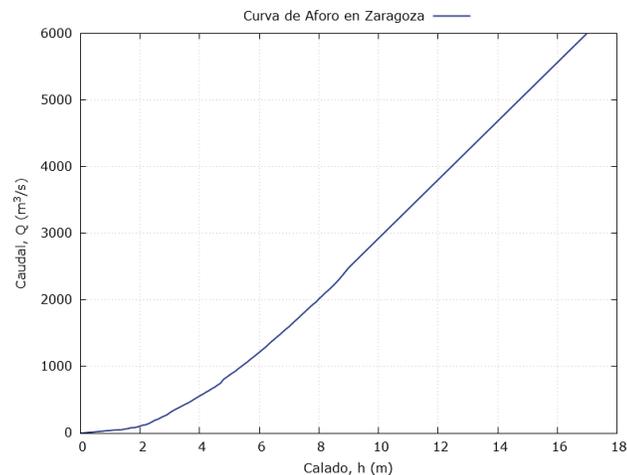


Figura 6 | Curva de aforo obtenida de las medidas históricas registradas en la estación de aforo del puente de la autopista A-2 en Zaragoza.

RESULTADOS

A través de vuelos aéreos realizados durante la inundación de Febrero del 2015 en el río Ebro se dispone de la extensión de área inundada diferenciando terreno seco de mojado. Esta información nos ha sido facilitada por la Confederación Hidrográfica del Ebro, al igual que datos de topografía, y datos registrados en las estaciones de aforo disponibles en este tramo del río. Todo ello permite poder comparar los resultados numéricos obtenidos con RiverFlow2D con los datos observados, exponiendo los resultados en este apartado.

Avenida de Febrero del 2015

En primer lugar se presenta la comparación de los resultados numéricos con lo observado en términos de área inundada (Figura 7). En color verde se observa la topografía del terreno, en color azul se muestra el calado obtenido de la simulación numérica, en marrón se encuentra la mancha observada de la inundación real y en rosa la intersección de ambas.

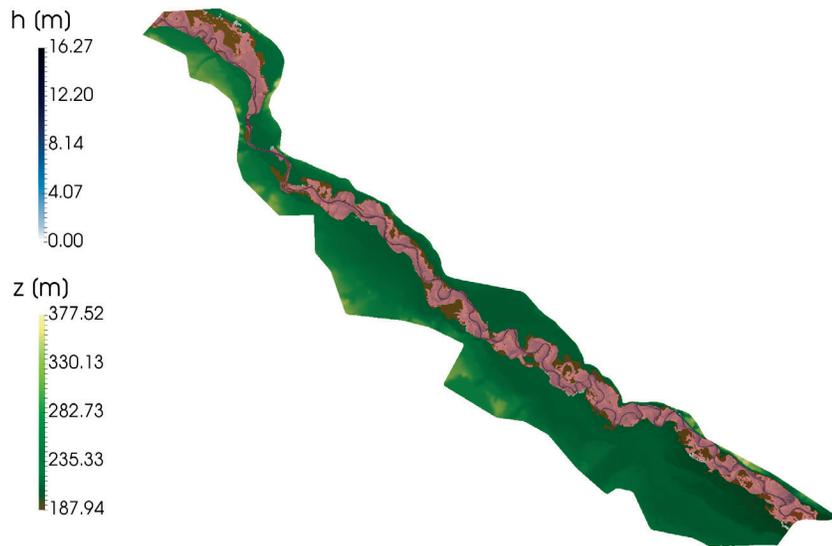


Figura 7 | Comparación del área máxima de inundación observada (marrón), calculada (azul) e intersección de ambas (rosa) correspondiente a la avenida de Febrero del 2015.

Se ha cuantificado el ajuste entre los resultados y lo observado mediante el índice de área inundada (Bates y De Roo, 2000) y se ha obtenido una concordancia del 84.3%.

En la Figura 8 se muestra la evolución temporal del nivel superficial en las poblaciones de Tudela y Novillas localizadas en la Figura 2.

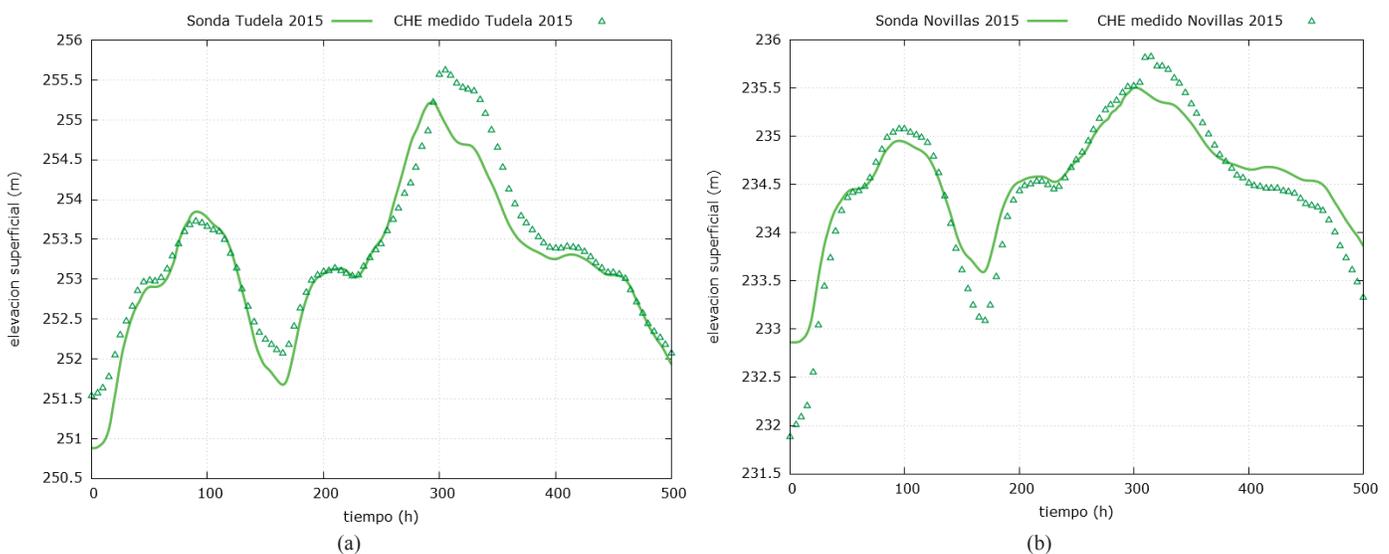


Figura 8 | Comparación de los resultados numéricos y lo observado en la evolución temporal de la lámina de agua en a) Tudela y b) Novillas correspondiente a la avenida de Febrero del 2015.

RiverFlow2D permite capturar de una forma precisa el tiempo de llegada de los picos y los valores máximos de los mismos, magnitudes de gran interés en la predicción de avenidas, a localizaciones concretas; como son en este caso las poblaciones de Tudela y Novillas. Se han elegido estas dos poblaciones porque disponen de estaciones de aforo donde poder calibrar los resultados numéricos. En el tiempo inicial se puede observar una pequeña discrepancia en los valores de nivel superficial que rápidamente es subsanada por el modelo. Esto se debe a la elección de las condiciones iniciales en las que se impone el nivel alcanzado por el estacionario correspondiente al primer valor de caudal del hidrograma de entrada (ver Figura 5), ya que como no se calcula en continuo no se conocen los datos iniciales de nivel en el río.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que los coeficientes de rozamiento de Manning elegidos para realizar estas simulaciones se obtienen de la literatura; se esperaría que realizando una calibración exhaustiva de los mismos se pudiera incluso mejorar el ajuste de la evolución temporal del calado en determinadas poblaciones.

A continuación, en la Figura 9 se muestran mapas de vectores de velocidad en $t=40, 80, 160$ y 314 h en los alrededores de la población de Alagón (ver Figura 2). Los primeros tiempos muestran la llegada de la onda de inundación y el tiempo correspondiente a 314 h es el instante de máxima inundación.

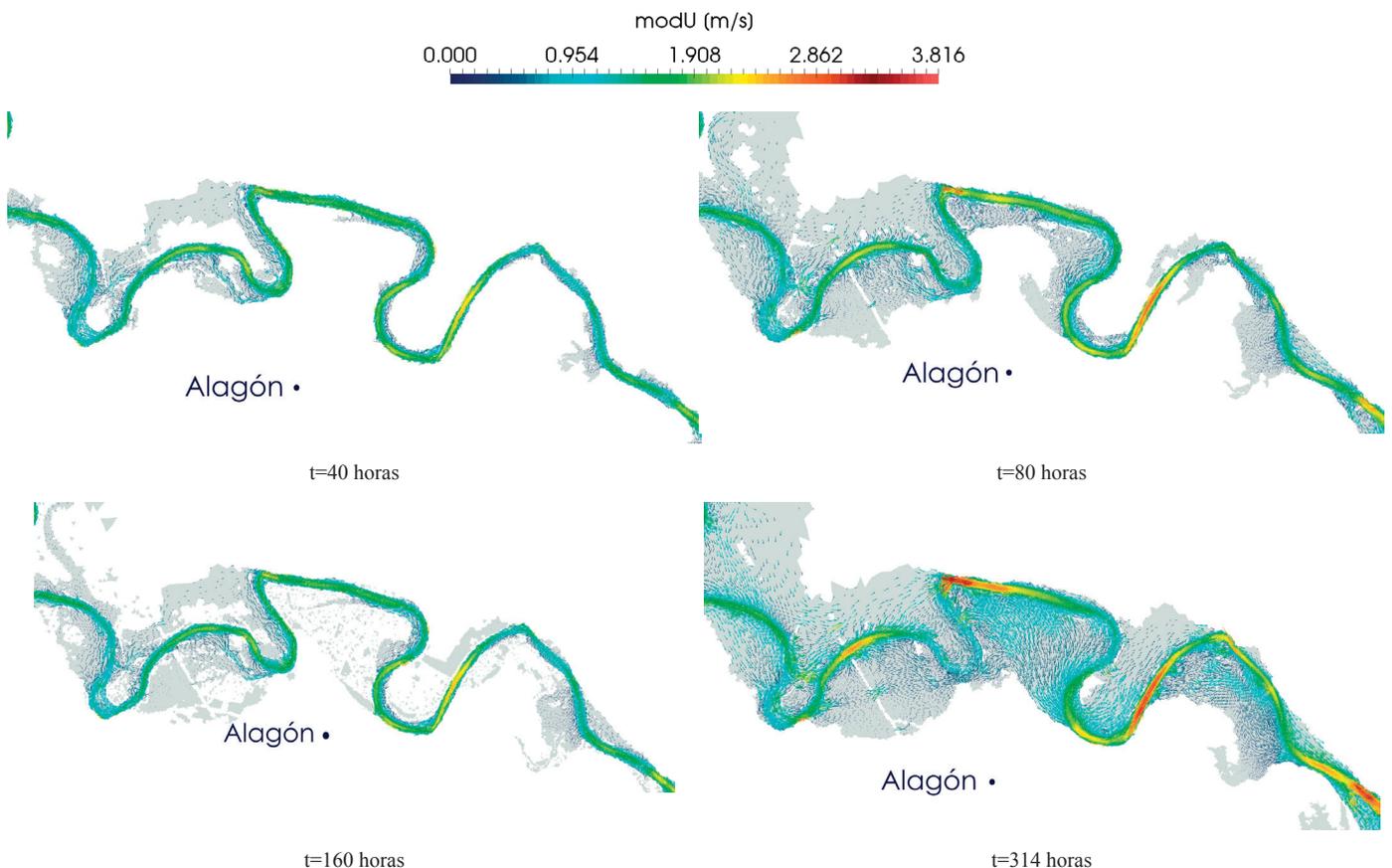


Figura 9 | Mapa de velocidades y líneas de nivel del módulo de la velocidad en diferentes instantes de tiempo correspondientes a los resultados numéricos obtenidos en la avenida de Febrero del 2015.

Se puede observar en la Figura 9 que en $t=80$ h la inundación es mayor que en $t=160$ h debido a que el hidrograma de entrada (ver Figura 5) presenta dos picos. Se muestran las direcciones de propagación de la onda de inundación en esta zona y las zonas de velocidad menores y mayores que afectarían a la erosión y sedimentación en el cauce.

En la Figura 10 podemos ver la evolución en representación 3D del flujo sobre el terreno a la altura de Castejón de Ebro a), punto donde se impone la condición de contorno aguas arriba; y en Boquiñeni b) punto medio entre Novillas y Alagón (ver Figura 2).

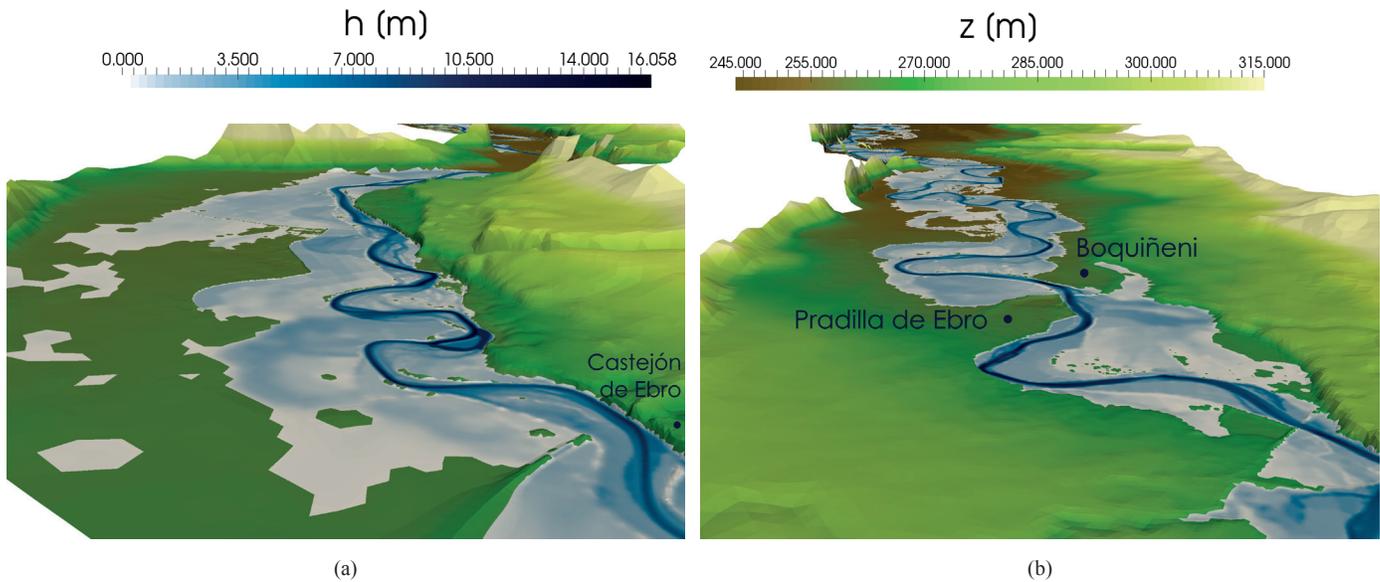


Figura 10 | Vista tridimensional del área máxima inundada obtenida numéricamente sobre el terreno a la altura de a) Castejón y b) Boquiñeni en la avenida de Febrero del 2015.

Hasta aquí se muestran las comparaciones de lo observado junto a los resultados numéricos en la avenida que tuvo lugar en Febrero del 2015. A continuación se van a presentar las comparaciones en los mismos términos (calado, velocidad, extensión de la lámina de agua,...) de lo que ocurre al aplicar las medidas de mitigación que se proponen entre las muchas que existen.

Limpeza de la vegetación del cauce

Para poder modelizar esta medida se ha generado un nuevo mapa de rozamiento cambiando el coeficiente asignado al cauce del río. Limpiar la vegetación del río equivale a disminuir el rozamiento del flujo con el fondo del cauce. Se han llevado a cabo simulaciones con diferentes escenarios que corresponden a las situaciones que se recogen en la Tabla 2, desde la original a ir limpiando progresivamente el cauce y por tanto disminuyendo el coeficiente de rozamiento. También se ha contemplado la posibilidad de no tomar ninguna medida en el cauce y que éste se llenara de más vegetación, traducido a aumentar el coeficiente de rozamiento. Merece la pena destacar la diferencia entre el dragado del río (cambio en la morfología de las secciones batimétricas) y la limpieza del mismo, que se traduce en un cambio en el coeficiente de rozamiento.

Tabla 2 | Coeficiente de rozamiento asignado al cauce del río según el grado de limpieza considerado.

Situación del cauce	Coeficiente de rozamiento de Manning (n) (s/m ^{1/3})
Original	0.035
Limpio con algunas piedras y plantas	0.03
Limpio	0.025
Muy limpio y liso	0.02
Sin limpiar	0.038

Para analizar las consecuencias que tienen en la lámina de agua, en el área inundada y en los tiempos de llegada de la onda de avenida, se ha recogido información numérica de evolución temporal de la altura de agua en 4 puntos a lo largo del dominio, incluyendo puntos en el cauce y puntos en las llanuras de inundación (ver Figura 11). A continuación se muestra una comparación

del área inundada máxima en $t=314$ h obtenida de la simulación con los diferentes coeficientes de rozamiento propuestos en la Tabla 2 (azul claro) comparados con el área inundada calculada originalmente (azul oscuro) (Figura 12).

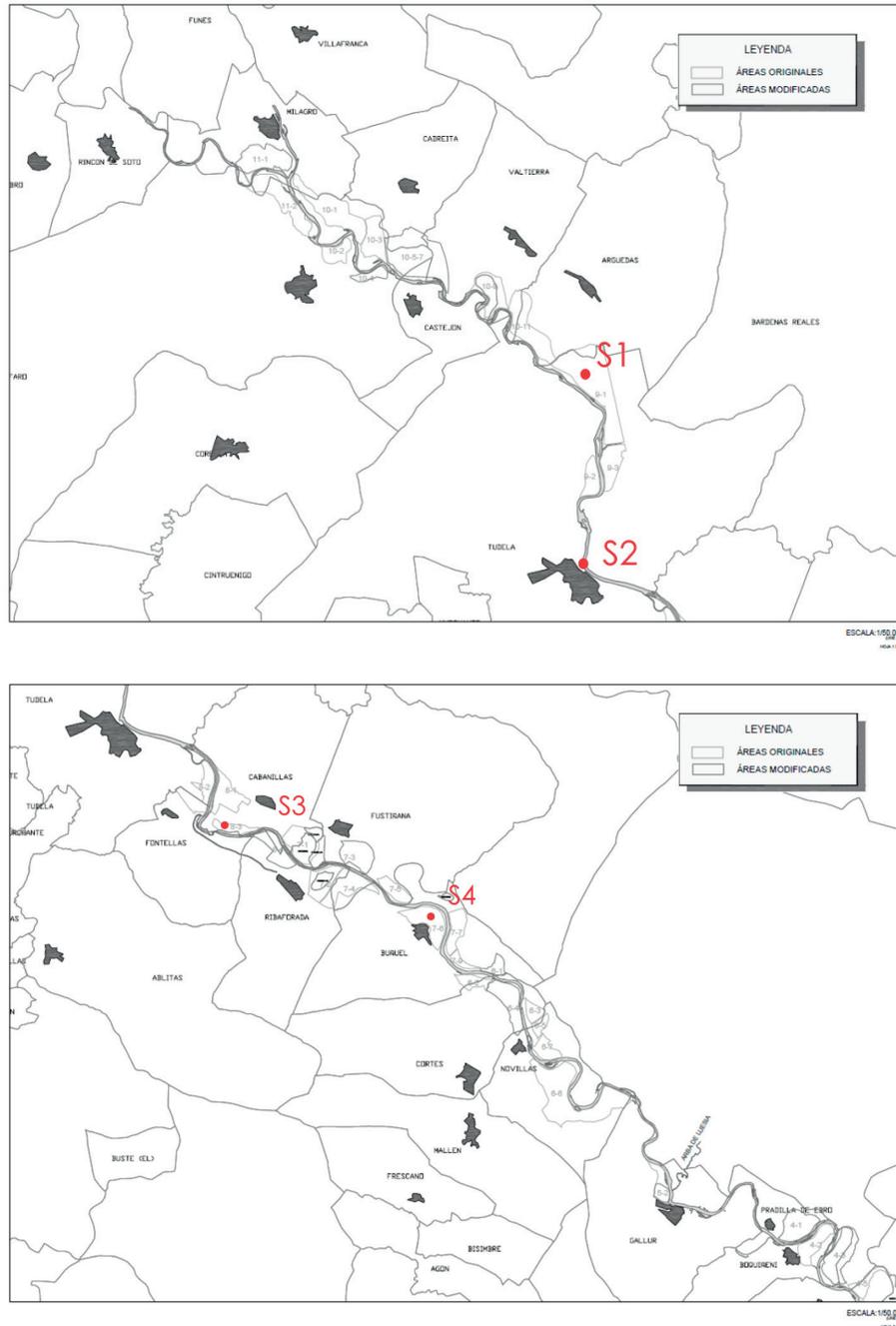


Figura 11 | Puntos de control a lo largo del dominio donde se comparan los hidrogramas observados y calculados.

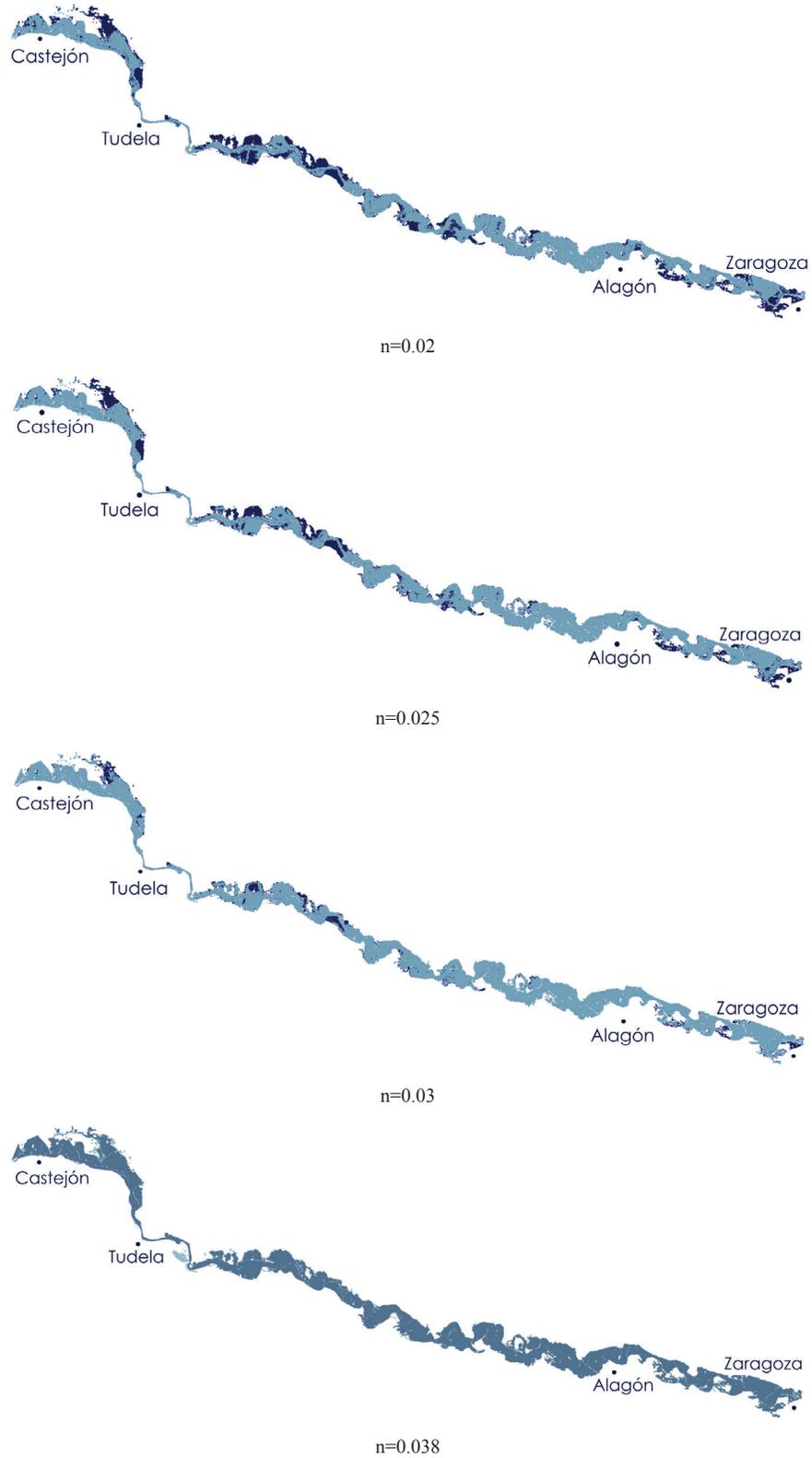


Figura 12 | Área máxima inundada correspondiente a $t=314$ h en diferentes escenarios de limpieza de vegetación del cauce (azul claro) comparados con el área inundada calculada originalmente (azul oscuro).

Se observan diferencias en el área máxima inundada según el coeficiente de rozamiento impuesto en el cauce pero sólo de forma cualitativa. Para poder analizar bien esta medida se necesita cuantificarla en términos de altura de agua alcanzada en puntos determinados. Por ello se presenta la evolución temporal del calado en las sondas S1, S2, S3 y S4 (Figura 13) localizadas en la Figura 11.

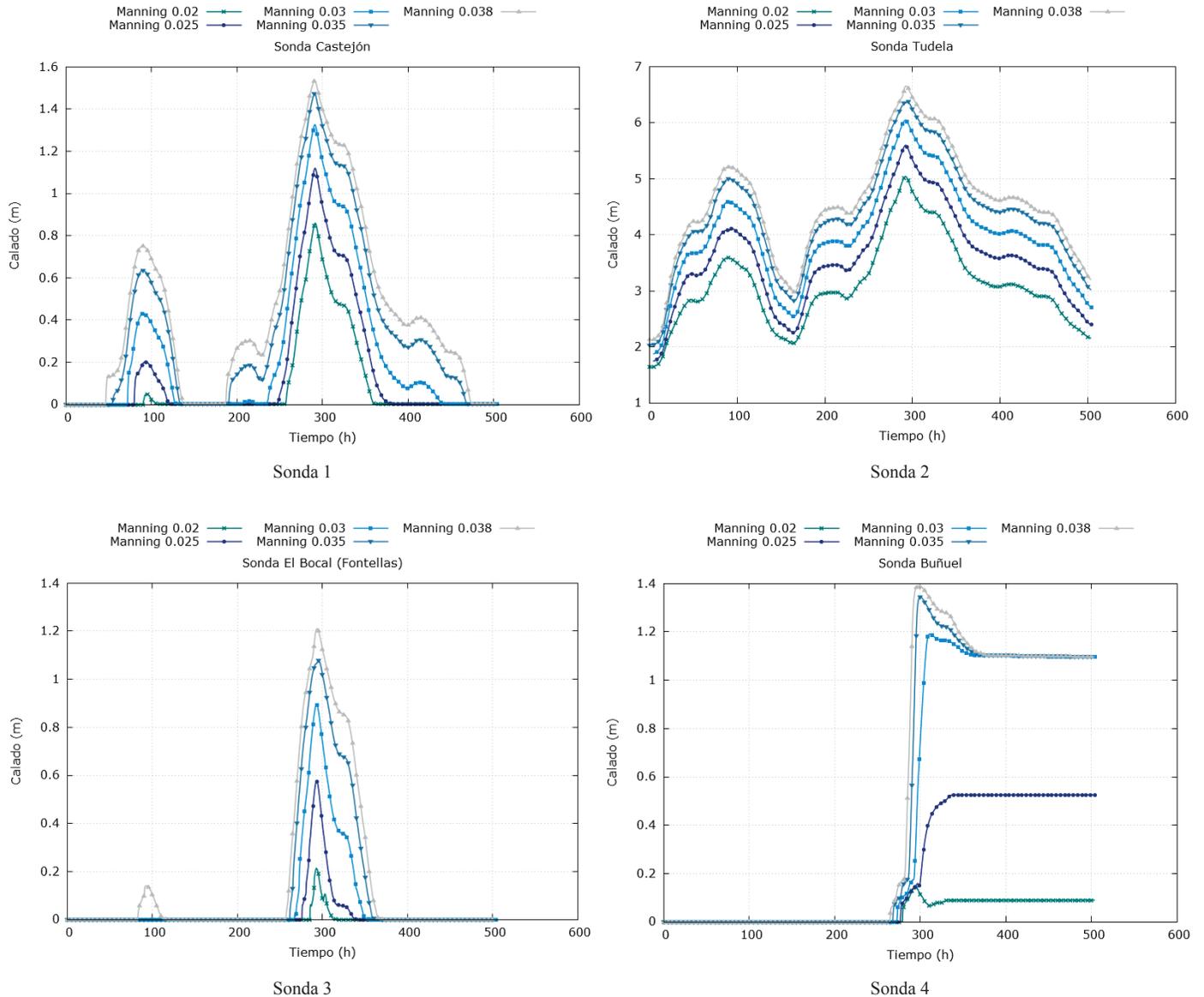


Figura 13 | Evolución temporal del calado en sondas S1, S2, S3 y S4 en escenarios de diferente grado de limpieza de vegetación del cauce del río.

Valores del coeficiente de rozamiento de Manning bajos implican que el flujo puede avanzar más rápidamente y por tanto corresponde a los valores más pequeños de calado; y por el contrario, cuando los valores del coeficiente de rozamiento de Manning son altos el flujo se ve frenado y la lámina de agua se levanta, correspondiendo a los valores más altos de calado; llegando a poder establecer una diferencia entre zonas secas y mojadas. Por ejemplo, en la sonda 3 se puede observar que durante el primer pico de la avenida (ver Figura 5) existe una zona que sólo se ve inundada cuando el coeficiente de rozamiento es $n=0.038$.

Zonas de inundación controlada

Las zonas de inundación controlada (ZIC) son espacios cuya inundación se favorece y regula con compuertas con el objetivo de laminar la avenida aguas abajo. Estas áreas están propuestas para estudio por la Confederación Hidrográfica del Ebro (ver Figura 14), y de todas ellas se han elegido dos: cerca de Buñuel (7-6) y cerca de Ribaforada (7-4) y (7-2). Las compuertas pueden ser colocadas a favor de la pendiente con lo cual se consigue que la entrada de agua sea rápida; o a contrapendiente para que la entrada de agua sea menos dañina para el terreno.

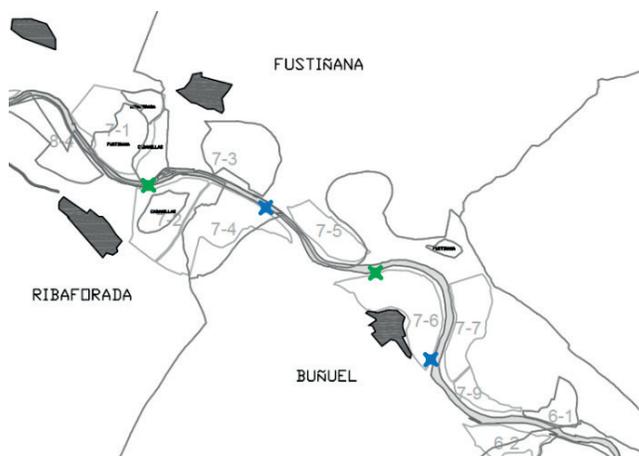


Figura 14 | Localización de las ZIC con compuertas a favor de la pendiente (verde) y a contrapendiente (azul).

Se han simulado todas las opciones posibles: uso de las ZIC actuando de forma individual o conjunta con compuertas aguas arriba; y de igual forma con compuertas aguas abajo haciendo un total de 6 simulaciones diferentes. Los resultados más significativos se recogen en la Figura 15 donde se representa la diferencia entre la extensión de la lámina de inundación cuando se usan o no estas zonas con las compuertas a favor de la pendiente (abajo) o en contrapendiente (arriba) en la ZIC (7-6) cerca de Buñuel. En casi todo el tramo no se aprecian diferencias, lo cual nos hace deducir que el efecto de estas zonas es local y no afecta al resto. Por otro lado, como podríamos suponer, si la compuerta está a favor de la pendiente, esta ZIC se llena y observamos que cerca de Buñuel llegaría menos agua. Por el contrario, si la compuerta está a contrapendiente habría menos agua en zonas anteriores y llegaría más agua a Buñuel. El comportamiento en la otra ZIC es similar. Podemos concluir que esta medida no tiene efectos globales en el alcance de la avenida; por una parte, porque los caudales son muy altos y las zonas ya se veían inundadas por la propia avenida; y por otro lado porque los efectos son muy locales.

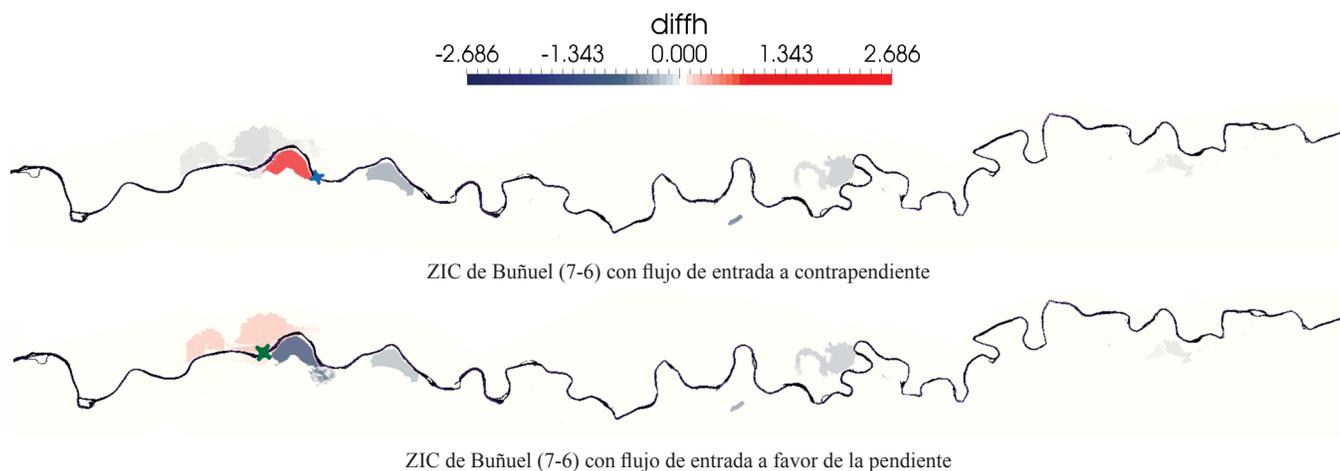


Figura 15 | Diferencia de las áreas inundadas en la ZIC (7-6) de Buñuel con compuertas a favor de la pendiente (abajo) y a contrapendiente (arriba). Las cruces verde y azul representan las respectivas posiciones de las compuertas.

Re-adaptación y construcción de motas en zonas localizadas

Otra medida de mitigación que se contempla es la protección de una zona concreta por ser éste espacio protegido, por contener una población, etc... En nuestro caso se ha elegido estudiar la población de Buñuel. Para ello se refuerza y se alarga la mota que protege dicha población. El objetivo de la simulación de esta medida es doble: conocer si la reconstrucción de la mota es capaz de frenar la avenida y que no entre en la población y al mismo tiempo saber cómo afecta esta medida a las poblaciones aguas abajo.

En la Figura 16 se representa el área inundada sobre el terreno cerca de la zona de Buñuel para el tiempo correspondiente a máxima inundación. A la izquierda con la mota que existe en la actualidad; a la derecha con la mota reforzada en altura y alargada un tramo en longitud. Se puede observar que la reconstrucción de la mota favorece la protección de la población de Buñuel y lo que es igual de importante, no afecta al resto del tramo. Se puede observar que la mancha de inundación es la misma fuera de esta zona concreta.

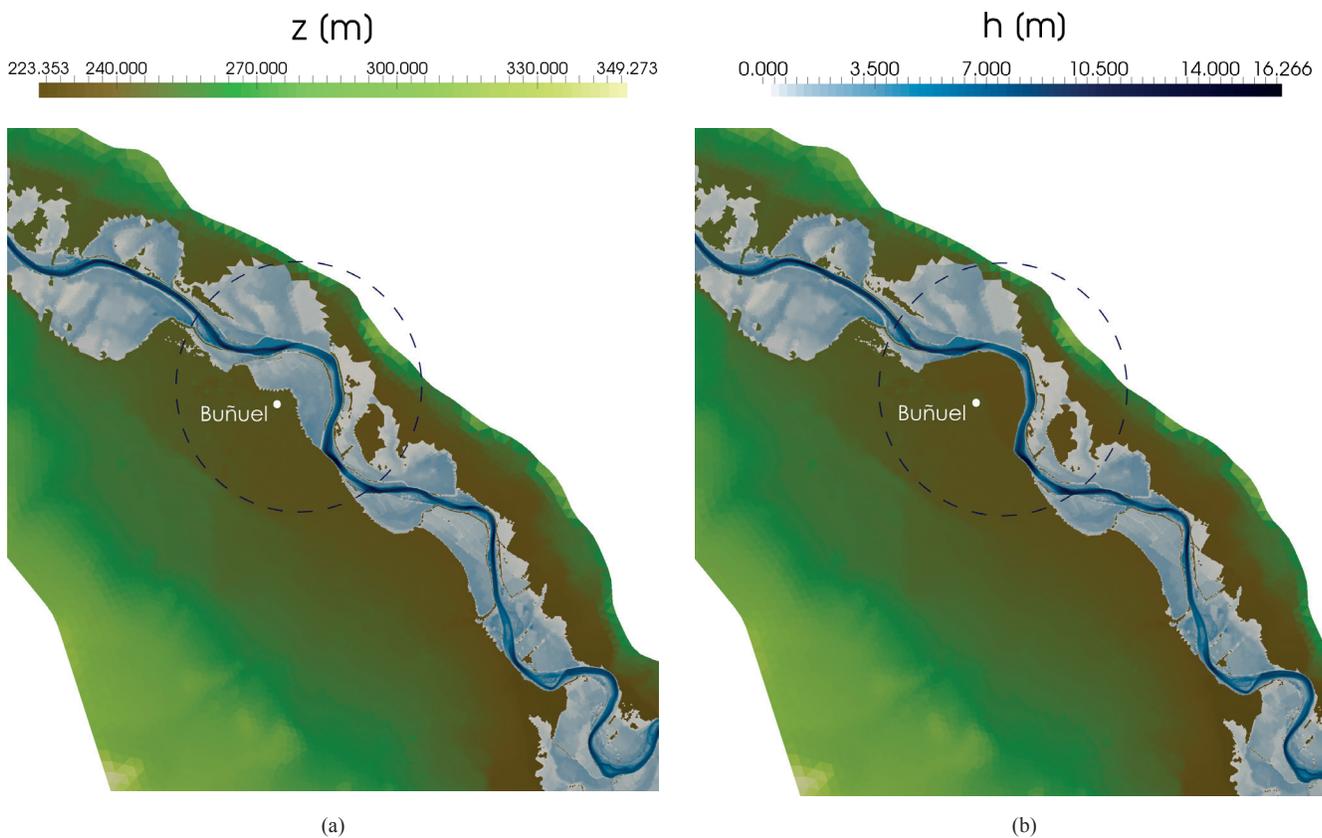


Figura 16 | Comparación del área inundada alrededor de la población de Buñuel con la mota actual (a) y con la mota reforzada (b).

Por último, en la Figura 17 se muestra la diferencia de altura de agua obtenida del cálculo de la avenida con la mota original y con la mota reconstruida. El color rojo indica diferencias positivas de calado (tras la aplicación de la medida hay más calado) y el azul diferencias negativas. Las zonas que no se encuentran coloreadas (blanco) representan zonas en las que el calado coincide. Se observa cómo la mayor diferencia se encuentra en la zona que ha quedado protegida influyendo mínimamente en dos zonas de la llanura de inundación aguas abajo, mientras que el resto del dominio no presenta cambios.

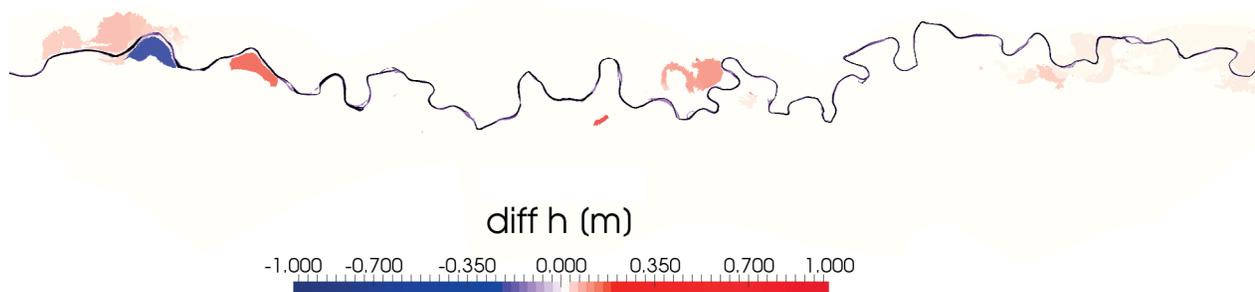


Figura 17 | Diferencias en el calado en todo el dominio usando la mota real y la mota reconstruida. Diferencias positivas (rojo) implican más cantidad de agua tras la aplicación de la medida.

CONCLUSIONES

El modelo de simulación de flujo de superficie libre RiverFlow2D sobre GPU ha demostrado ser eficiente, preciso, rápido y fiable y de gran utilidad práctica a la hora de simular inundaciones y medidas de mitigación. Su ventaja principal es su capacidad de cálculo de dominios espacio-temporales grandes en tiempos de cálculo reducidos. Podríamos concluir que en un dominio de dimensiones aproximadas $125 \text{ km} \times 12 \text{ km}$ discretizado en una malla de 800000 celdas triangulares, una avenida de 15 días se calcula en 15 horas aproximadamente; o lo que es lo mismo, en 1 hora de cálculo podemos predecir lo que va a suceder en las siguientes 24 horas. No se habla únicamente de rapidez, sino también de precisión, ya que los resultados numéricos han sido comparados con medidas observadas dando pequeñas diferencias. Y por último, al hablar de fiabilidad, merece la pena destacar que se trata de un método de cálculo conservativo que proporciona cero errores en volumen de agua.

En cuanto al caso estudiado (inundación del 2015 del tramo medio del río Ebro), se han obtenido los resultados numéricos de la simulación comparándolos con las medidas observadas en los puntos en los que esto ha sido posible obteniendo una buena aproximación a la realidad. Posteriormente se han analizado tres posibles medidas de mitigación que puede servir de ayuda en el futuro: limpieza de vegetación del cauce, uso de zonas de inundación controlada y construcción o re-adaptación de motas. De todas estas medidas analizadas, la más efectiva ha resultado ser la eliminación de la vegetación del cauce. En las figuras se observa cómo el área máxima inundada va disminuyendo en todo el tramo conforme el cauce se encuentra más limpio; y a la vez cómo el área máxima inundada aumentaría en el caso de que no se tome ninguna medida y sobre el cauce aparezca más vegetación. Además no sólo se ha comparado el área máxima inundada sino también cómo se ve afectada la altura de agua en algunos puntos situados dentro y fuera del cauce y otros situados en la llanura de inundación, observando cómo en la situación más favorable (cauce muy limpio), la altura de agua puede disminuir hasta 1 m.

El resto de las medidas de mitigación estudiadas en este tramo del río Ebro (zonas de inundación controlada cerca de Buñuel y Ribaforada con compuertas a favor y a contra-pendiente; o refuerzo de motas en regiones concretas por ser éstas espacios protegidos o poblaciones importantes), han resultado tener consecuencias locales en esa zona y no afectan a ninguna variable en el resto del dominio, por lo que se puede concluir que no existen efectos de disminución de calado a lo largo del dominio como se buscaba, cuando los caudales pico son altos; aunque podrían resultar ser medidas útiles para caudales más bajos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se encuentra en el marco del proyecto de investigación CGL2015-66114-R financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación/FEDER. Los autores quieren agradecer también a la Confederación Hidrográfica del Ebro por su disponibilidad de consulta y gestión de datos.

REFERENCIAS

- Ahmad, S., Simonovic, S. 2006. An intelligent decision support system for management of floods. *Water Resources Management*, 20(3), 391-410. doi:10.1007/s11269-006-0326-3
- Ahmadian, R., Falconer, R. A., Wicks, J. 2015. Benchmarking of flood inundation extent using various dynamically linked one- and two-dimensional approaches. *Journal of Flood Risk Management*, 1-15. doi:10.1111/jfr3.12208
- Bates, P. D., De Roo, A. P. J. 2000. A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of Hydrology*, 236(1-2), 54-77. doi:10.1016/S0022-1694(00)00278-X
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-cendón, E., Dolz, J., Coll, A. 2014. Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1), 1-10. doi:10.1016/j.rimni.2012.07.004
- Brufau, P., García-Navarro, P. 2001. Modelo de simulación bidimensional de transitorios en aguas superficiales: aplicación a roturas de presa. *Ingeniería Civil*, 121, 33-40.
- Caviedes-Voullième, D., Morales-Hernández, M., López-Marijuan, I., García-Navarro, P. 2014. Reconstruction of 2D river beds by appropriate interpolation of 1D cross-sectional information for flood simulation. *Environmental modelling & software*, 61, 206-228. doi:10.1016/j.envsoft.2014.07.016
- Comisión Técnica del Comité Español de la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres, Dirección general de protección civil y emergencias, Ministerio del interior, Gobierno de España. *Reducción del riesgo de desastres*, nº 3 enero-abril 2016. <http://www.proteccioncivil.org>.
- DHI. 2009. MIKE 21 Flow Model. Hydrodynamic Module Scientific Documentation. MIKE by DHI, 2009.
- García, R., Restrepo, P., Dewese, M., Ziemer, M., Palmer, J., Thornburg, J., Murillo, J., Morales, M., García-Navarro, P., Lacasta, A. 2015. Advanced GPU Parallelization for two-dimensional operational river flood forecasting. *Proceedings of the 36th IAHR World Congress*, Junio 28-Julio 3. The Hague, The Netherlands.
- Lacasta, A., Morales-Hernández, M., Murillo, J., García-Navarro, P. 2014. An optimized GPU implementation of a 2D free surface simulation model on unstructured meshes. *Advances in engineering software*, 78, 1-15. doi:10.1016/j.advengsoft.2014.08.007
- Lacasta, A., Juez, C., Murillo, J., García-Navarro, P. 2015. An efficient solution for hazardous geophysical flows simulation using GPUs. *Computers & Geosciences*, 78, 63-72. doi:10.1016/j.cageo.2015.02.010
- Morales-Hernández, M., García-Navarro, P., Burguete, J., Brufau, P. 2013. A conservative strategy to couple 1D and 2D models for shallow water flow simulation. *Computers & Fluids*, 81, 26-44. doi:10.1016/j.compfluid.2013.04.001
- Murillo, J., Brufau, P., García-Navarro, P., Rodríguez, M., Andrés-Urrutia, A. 2007. A mathematical model for numerical simulation of shallow water flow: description and practical application of Guad2D. *Proceedings of the Environmental Informatics and System Research Congress (Enviroinfo 2007)*, September 12-14, Warsaw, Poland, 409-416.
- Plan de Gestión del Riesgo de Inundación, Confederación Hidrográfica del Ebro. <http://www.chebro.es/PGRI>. Último acceso: enero 2017.
- Roe, P. L. 1981. Approximate Riemann solvers, parameter vectors and difference schemes. *Journal of Computational Physics*, 43(2), 357-372. doi:10.1016/0021-9991(81)90128-5
- Shang, Z. 2014. High performance computing for flood simulation using Telemac based on hybrid MPI/OpenMp parallel programming. *International Journal of modeling, simulation and scientific computing*, 5(4), 1-13.
- Suman, A., Akther, F. 2014. River Flood Modelling Using SOBEK: A Case Study from Ciliwung Catchment, Indonesia. *International Journal of Engineering Research*, 3(11), 662- 668. doi:10.17950/ijer/v3s11/1108

Toriman, M.E., Hassan, A.J., Gazim, M.B., Mokhtar, M., Mastura, S.A., Jaafar, O., Karim, O., Aziz, N.A. 2009. Integration of 1-d Hydrodynamic Model and GIS Approach in Flood Management Study in Malaysia. *Research Journal of Earth Sciences*, 1(1), 22-27.

Van der Knijff, J.M., Younis, J., De Roo, A.P.J. 2010. LISFLOOD: a GIS-based distributed model for river basin scale water balance and flood simulation. *International Journal of Geographical Information Science*, 24(2), 189-212. doi:10.1080/13658810802549154