

Predicción de inundaciones originadas por precipitaciones extremas mediante el módulo hidrológico de Iber

González-Cao, J.^{a1}, García Feal, O.^{a2}, Crespo, A.J.C.^{a3}, Gómez-Gesteira, M.^{a4} y Cea, L.^b

^aEnvironmental Physics Laboratory (EPHYSLAB), Universidad de Vigo, Campus As Lagoas s/n, 32004, Orense, España: ^{a1}jgcao@uvigo.es,

^{a2}orlando@uvigo.es, ^{a3}alexboxe@uvigo.es ^{a4}mggesteira@uvigo.es.

^bEnvironmental and Water Engineering Group, Departamento de Ingeniería Civil, Universidade de Coruña, Campus Elviña s/n, Coruña, España.

Línea temática B | Hidrología, usos y gestión del agua. Riegos. Energía hidroeléctrica.

RESUMEN

Durante las últimas décadas el nordeste de España se ha visto afectado por grandes inundaciones causadas por eventos de precipitaciones extremas como las registradas en Octubre de 2012 en la cabecera del río Aragón. Este tipo de inundaciones están asociadas a fenómenos de escorrentía. Factores como la intensidad de la precipitación, su duración y distribución espacial así como la topografía del terreno junto con los tipos y usos del suelo pueden afectar a estos fenómenos. En este trabajo se ha empleado el código numérico Iber para reproducir el evento de precipitación extrema anteriormente citado. Se han desarrollado dos nuevas herramientas, una para la asignación automática de los coeficientes de Manning empleando los datos de usos de suelo del SIOSE y otra para la asignación de propiedades de infiltración, siguiendo el modelo del número de curva, mediante ficheros ráster. Los calados obtenidos numéricamente son similares a los registrados durante el evento.

Palabras clave | inundación; lluvia extrema; Iber; usos de suelo; infiltración; número de curva.

INTRODUCCIÓN

El estudio de inundaciones originadas por fenómenos de precipitaciones extremas es de crucial importancia para tratar de minimizar los riesgos a los que están sometidas tanto las personas como los bienes materiales que se pueden encontrar en las zonas en las que se producen dichos fenómenos. Durante las últimas décadas, en el nordeste de España, tanto áreas públicas como propiedades privadas se han visto afectadas por grandes inundaciones originadas por eventos de precipitaciones extremas. Por ejemplo, las precipitaciones registradas el 20 de Octubre de 2012 en las proximidades de la cabecera del río Aragón superaron los 200 mm en 24 horas causando daños de envergadura en las localidades de Canfranc, Villanúa y Castiello de Jaca. Las inversiones de las administraciones públicas para la recuperación de las márgenes del río en dichas localidades superaron el millón de euros. En la Figura 1 se muestran algunas de las consecuencias de las inundaciones provocadas por dicho evento.

Las inundaciones originadas por eventos de precipitaciones extremas están asociadas, principalmente, a fenómenos de transformación lluvia-escorrentía (NRCS, 2004^a). Son varios los factores que pueden influir de alguna manera en los procesos de lluvia-escorrentía. Algunos de ellos son la intensidad de la precipitación, su duración y su distribución espacial, las características topográficas del terreno en el cual se produce la precipitación así como los usos y tipos de suelo de la zona. Recientemente se han realizado muchos estudios con el fin de analizar este tipo de eventos como, por ejemplo, los de Bartholmes et al. (2009) o Silvestro y Revora, (2014) pero, a pesar de esto, las dificultades para predecir con anticipación (12 - 24 h previas al evento) este tipo de inundaciones en cuencas de tamaño pequeño-medio ($10 \text{ km}^2 \leq \text{área de la cuenca} \leq 1000 \text{ km}^2$) son todavía grandes.

En este trabajo se pretende reproducir numéricamente el evento registrado en Octubre de 2012 en la cabecera del río Aragón mediante la simulación de las lluvias y caudales registrados por las estaciones meteorológicas de la Confederación Hidrográfica del Ebro empleando el código numérico Iber (Bladé et al., 2014) con el fin de determinar la capacidad de este código para reproducir las inundaciones registradas durante el evento y proporcionar los resultados en un intervalo de tiempo

razonable. Para ello se han realizado las simulaciones del evento con mallas de distinta resolución y se han analizado los resultados obtenidos mediante diagramas de Taylor (Taylor, 2001). Como condiciones frontera del modelo se han empleado tanto los hietogramas como los hidrogramas experimentales registrados por la estación meteorológica que la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) tiene instalada en el tramo alto de la cuenca del río Aragón. La topografía de la zona de estudio se ha obtenido mediante una serie de ficheros *ráster* obtenidos de Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG).

Además se han desarrollado unas nuevas herramientas para la asignación automática, por un lado, de los usos de suelo a partir de los datos del Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo (SIOSE) del Ministerio de Fomento del Gobierno de España y, por otro, de los datos necesarios para caracterizar la infiltración del terreno siguiendo el método del Número de Curva (McCuen, 1982) del Soil Conservation Service (SCS) del Department of Primary Industries (DPI) del gobierno de EEUU. Los datos necesarios para la caracterización de la infiltración del suelo se obtuvieron de una serie de mapas del European Soil Data Centre (ESDAC). Asimismo, los resultados obtenidos considerando el modelo de infiltración del *CN* se comparan con los obtenidos considerando la infiltración despreciable.



Figura 1 | Efectos de las inundaciones provocadas por las precipitaciones extremas registradas en Octubre de 2012 en la tramo alto del río Aragón: A) Presa de Canfranc; B) Parque de la localidad de Villanúa; C) Barranco de Villanúa; D) Carretera N-330 en las proximidades de Villanúa.

MODELO HIDROLÓGICO

Para realizar el estudio del fenómeno de transformación de lluvia-escorrentía se ha empleado el modelo hidrológico implementado en el código numérico Iber (Bladé et al., 2014). Iber es un código numérico muy flexible que permite, por ejemplo, el análisis de la seguridad hidrológica asociada a presas (Areu-Rangel et al., 2017) y que considera el flujo por escorrentía superficial de forma espacialmente distribuida. La escorrentía subsuperficial, aunque actualmente implementada en el código (Cea et al., 2015), no se ha considerado en este trabajo. Iber permite la caracterización espacial de la topografía de la cuenca de estudio y de los usos de suelo. El modelo permite también la definición de precipitaciones variables en tiempo y en el espacio mediante la definición de los hietogramas característicos correspondientes. El cálculo de la escorrentía se ha realizado mediante la resolución de las ecuaciones de St. Venant 2D mediante el método de los volúmenes finitos. En Cea y Bladé (2015)

y Cea et al. (2016) se pueden encontrar validaciones del modelo de lluvia-escorrentía para diferentes condiciones de flujo y escalas espaciales.

Las pérdidas por infiltración se han estimado mediante el modelo del número de curva (SCS) de los EEUU (McCuen, 1982). Según este modelo, la escorrentía (Q) se puede obtener de la siguiente forma:

$$\begin{cases} Q = F \frac{P - P_0}{S}; & P \geq P_0 \\ Q = 0; & P < P_0 \end{cases} \quad (1)$$

En donde F es la infiltración real posterior al encharcamiento, P es la precipitación, P_0 es el umbral de escorrentía (precipitación necesaria para que se produzca escorrentía) y S es la máxima infiltración potencial. Teniendo en cuenta que, por continuidad, $F = (P - P_0) - Q$ y que a partir de una serie de ensayos experimentales la relación entre el umbral de escorrentía y la máxima infiltración potencial (S) se puede considerar constante y aproximadamente igual a 0.2 (Ferrer et al, 1995), la escorrentía se puede expresar como:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}; P \geq P_0 \quad (2)$$

Mediante estudios empíricos el SCS obtuvo una relación entre S y un parámetro de referencia denominado número de curva (CN). Dicha relación se muestra en la Ecuación (3).

$$S = \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \cdot 25,4 \quad (3)$$

Tabla 1 | Tipos de suelo según el SCS.

Tipo de suelo SCS	Descripción
A	Suelos en los que el agua se infiltra rápidamente incluso cuando el grado de humedad es elevado. Usualmente su contenido en arcilla es menor del 10% y el de arena mayor del 90%. Habitualmente se encuentran muy drenados.
B	Suelos de capacidad de infiltración moderada cuando su grado de humedad es elevado. La composición de arcilla se encuentra entre el 10% y el 20% mientras que la de arena está típicamente entre el 50% y el 90%. Usualmente se encuentran bien drenados.
C	Suelos de capacidad de infiltración lenta cuando se encuentran muy húmedos. El contenido en arcilla está entre el 20% y el 40% y el de arena suele ser menor del 50%. Se encuentran imperfectamente drenados.
D	Suelos de infiltración muy lenta cuando se encuentran muy húmedos. El contenido en arcilla suele ser mayor del 40% y menor del 50% en arena.

El número de curva es un parámetro adimensional cuyos valores están tabulados y pueden variar entre 0 y 100. Cuanto mayor sea el número de curva menor será la infiltración del terreno. Para la obtención del número de curva se ha seguido la adaptación propuesta por Témez (1978) que emplea como parámetro de referencia el umbral de escorrentía P_0 . Este parámetro

es función del uso del suelo definidos por el SCS, el tipo de práctica de cultivo, la pendiente del terreno, el tipo de suelo y las condiciones de humedad del suelo previas a la precipitación. El tipo de práctica de cultivo se divide en dos grandes grupos en función de si el cultivo se realiza siguiendo las curvas de nivel o siguiendo las líneas de máxima pendiente del terreno. La pendiente del terreno se puede obtener a partir de los modelos digitales del terreno (MDT) definidos mediante ficheros tipo *ráster*. En la Tabla 1 se muestran los tipos de suelos clasificados en función de los grupos definidos por el SCS. Una detallada descripción de los usos de suelo definidos por el SCS se pueden consultar en NRCS (2004^b). En la Ecuación (4) se muestra la relación entre P_0 y CN obtenida por Témez (1978) para condiciones medias de humedad del suelo.

$$CN = \frac{5000}{50 - P_0} \quad (4)$$

La obtención de los valores del número de curva empleando ficheros tipos *ráster* requiere de un delicado tratamiento de los datos de los que se dispone a nivel internacional, es decir, así como la obtención de los fichero *ráster* de pendientes del terreno es una tarea relativamente sencilla a partir de los MDT de la cuenca de estudio, la existencia de multitud de clasificaciones tanto de usos de suelo como de tipos de suelo impide una obtención directa y sencilla de los ficheros *ráster* asociados a estas variable ya que es necesario definir criterios de conversión entre las distintas clasificaciones existentes que, en la mayoría de las ocasiones, no cubren los mismos rangos de valores. Por tanto, para este trabajo se ha obtenido un *ráster* aproximado de los valores del número de curva, empleando el software QGIS (QGIS, 2016), partiendo del *ráster* de pendientes obtenido a partir del MDT del terreno, del *ráster* de tipos de suelo obtenido de la clasificación de usos de suelo de Liedekerke et al. (2012) y asumiendo que el tipo de cultivo empleado en toda la zona de trabajo sigue las curvas de nivel del terreno. La Correspondencia adoptada entre los tipos de suelo definidos en la base de datos Liedekerke et al. (2012) y la empleada por el SCS se muestra en la Tabla 2. Asimismo, dada la complejidad a la hora de obtener una correspondencia entre los usos de suelo definidos por el SCS y los definidos por el SIOSE, se ha optado por emplear unos usos de suelos representativos de la cuenca. La condición de humedad del terreno se considera media. Para obtener los números de curva asociadas a otras condiciones de humedad del terreno se pueden aplicar las expresiones propuestas por Ponce y Hawkins (1996) para condiciones de humedad menores que la media (CN_I) y/o para condiciones de humedad mayores que la media (CN_{III}).

$$CN_I = CN(2.281 - 0.01281CN)^{-1} \quad (4)$$

$$CN_{III} = CN(0.427 - 0.005731CN)^{-1} \quad (5)$$

Tabla 2 | Correspondencia entre los tipos de suelo del SCS y los definidos por el European Soil Database.

Tipo de suelo SCS	Tipo de Suelo del European Soil Database
A	1R, 1C, 1S, 1L, 1H y 1M.
B	2.
C	3.
D	4W y 4D.

La definición de los usos de suelo y, por tanto, la obtención de los coeficientes de Manning de las distintas parcelas que forma la cuenca de estudio se ha realizado a partir de los archivos vectoriales del SIOSE descargados de la página web del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG). Estos archivos vectoriales dividen en la zona de estudio en parcelas en las que se define un uso combinado del terreno. Este uso combinado se codifica siguiendo la normativa del SIOSE según el tipo de parcela, los distintos usos de suelo individuales de dicha parcela y el porcentaje de ocupación de cada uso individual dentro de la parcela. En la Figura 2 se muestra un ejemplo del fichero vectorial de las distintas parcelas dentro de la cuenca de estudio

V Jornadas de Ingeniería del Agua. 24-26 de Octubre. A Coruña

junto con la codificación de una de ellas (sombreada en rojo): SIOSE_CODE: A(60ARR_30MTR_10CCH). Siguiendo la codificación del SIOSE la ocupación (en % de la superficie de la parcela) y usos individuales de la parcela serían:

- 60% de arbustos;
- 30% de matorral;
- 10% de canchales.

Para cada una de los usos dentro de la parcela se tiene un coeficiente de Manning individual (C_{ARR} , C_{MTR} y C_{CCH}) obtenido siguiendo las recomendaciones objeto propuestas en MAPAMA (2011). El coeficiente de Manning combinado (C_{comb}) de la parcela se obtiene de

$$C_{comb} = 0.6C_{ARR} + 0.3C_{MTR} + 0.1C_{CCH} \quad (6)$$

de forma general, esta ecuación se puede escribir

$$C_{comb}^j = \sum_{i=1}^N Per_i^j C_i \quad (7)$$

en donde C_{comb}^j hace referencia al coeficiente de Manning individual de la parcela j , Per_i^j hace referencia al porcentaje de ocupación del uso i en la parcela j y C_i es el coeficiente de Manning individual del uso i . El número de parcelas de la cuenca varía desde 1 hasta $j=J$, y el número de usos individuales varía desde 1 hasta $i=I$.

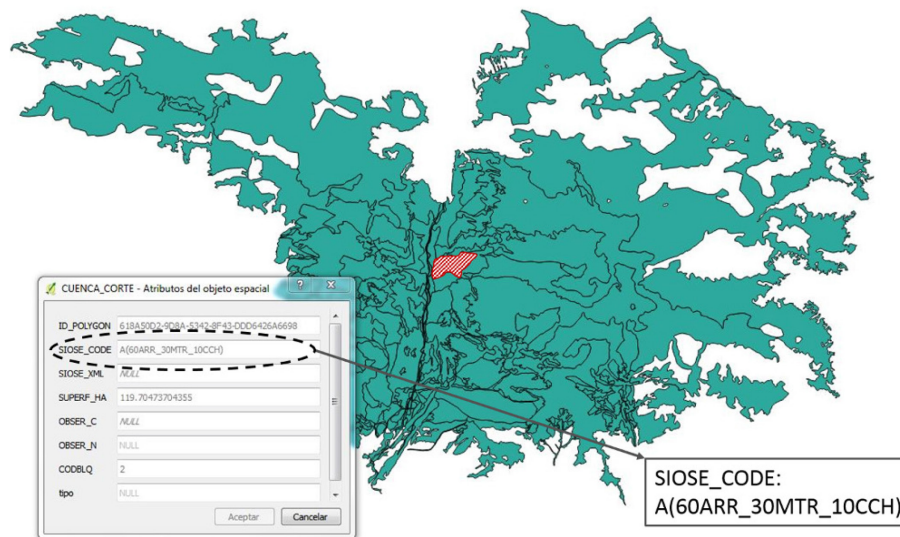


Figura 2 | Archivo vectorial de usos de suelo de las parcelas de la cuenca de estudio definido por el SIOSE y código de uso combinado de una de las parcelas de la zona de estudio.

El cálculo del coeficiente de Manning combinado de cada una de las parcelas definidas por el SIOSE se realiza automáticamente por medio de una nueva aplicación que toma como entrada los códigos de cada una de las parcelas y los coeficientes de Manning individuales definidos por el SIOSE. Una vez que se obtienen los coeficientes de Manning combinados de cada parcela, éstos se asignan de forma automática a Iber a través de un código Matlab y de la propia herramienta existente en Iber para la asignación de rugosidades del terreno mediante ficheros ráster.

CUENCA DE ESTUDIO

La cuenca del río Aragón considerada en este trabajo se encuentra situada en la provincia de Huesca, en las proximidades del término municipal de Villanúa, en el nordeste de España. El río Aragón nace en el ibón de Escalar, situado en el valle de Astún, y termina desembocando en el río Ebro en la localidad de Milagro. García-Ruiz et al. (1985) determinaron la composición litológica de la cuenca de río Aragón, dentro de la Comunidad Autónoma de Aragón, como: flysch 40,8%, calizas 23,2%, margas 18,4%, arcillas 10,3%, areniscas 4,3%, pizarras 1,8%, y conglomerados 1,2%. Esta clasificación litográfica se corresponde con la cuenca total del río Aragón dentro de la comunidad autónoma de Aragón. El clima en el tramo alto del río es muy húmedo observándose precipitaciones medias próximas a los 1700 mm (Del Valle et al., 2007) mientras que en el tramo medio/bajo el clima es más cálido y seco. La superficie total de la cuenca de estudio es de aproximadamente 58 km². En la Figura 3 se muestra la localización de la cuenca de estudio. La topografía de la cuenca muestra zonas extremadamente abruptas, como corresponde a la zona de alta montaña en la que se encuentra, alternada con zonas de escasa pendiente en la zona del pueblo de Villanúa. Esta configuración favorece la formación de inundaciones durante los eventos de lluvias extremas. La elevación del terreno varía desde los 900 m, en el punto más bajo, hasta cerca de los 2800 en el punto de máxima elevación. Los datos de caudal de entrada del río Aragón y del hietograma que se emplean como condición de entrada para el modelo numérico se obtienen a partir de la serie temporal de datos registrados por la estación meteorológica de Aragón-Canfranc de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHEBRO) localizada en la entrada de la cuenca de estudio (Coordenadas UTM ETRS89: 702637,6; 4732667). En la Figura 4 se muestra la topografía de la zona de estudio y la localización de la estación meteorológica de entrada a la cuenca.

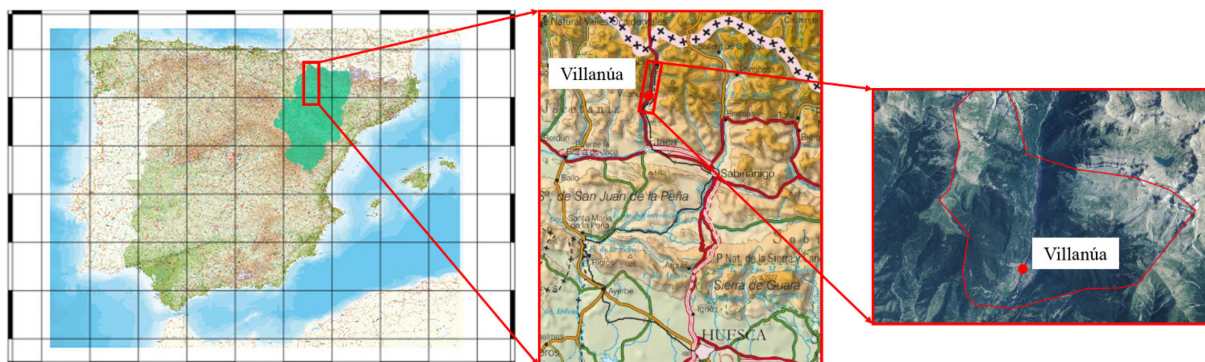


Figura 3 | Localización de la cuenca del río Aragón.

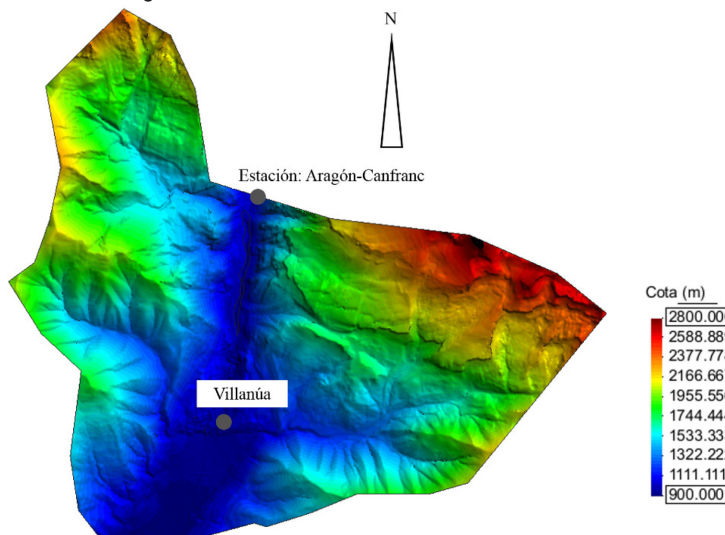


Figura 4 | Topografía de la cuenca de estudio y localización de la estación meteorológica de Aragón-Canfranc.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la simulación numérica del fenómeno de precipitación extrema objeto de estudio se empleó el código Iber (Bladé et al., 2014). Con el fin de realizar un análisis de sensibilidad del problema con la resolución de la malla, el dominio numérico de la cuenca se ha discretizado definiendo cuatro mallas en función del tamaño medio de los elementos que la forman: Malla de Referencia (Ref.), Malla A, Malla B y Malla C. El número aproximado de elementos (en miles) de cada una de ellas es: 800, 300, 100 y 60. En la figura 5 se muestra un detalle de la malla Ref. en la zona del pueblo de Villanúa. Los resultados se analizaron mediante diagramas de Taylor (Taylor, 2001).



Figura 5 | Detalle de la malla Ref. definida para las simulaciones numéricas en las proximidades de la localidad de Villanúa.

Las condiciones frontera definidas son:

- Caudal de entrada del río Aragón en el punto de localización de la estación meteorológica de Aragón-Canfranc;
- Hietograma obtenido a partir de los datos de observación de la estación meteorológica de Aragón-Canfranc. El hietograma se aplica en todo el dominio de la simulación;
- Salida en la zona de aguas abajo del río Aragón una vez superado el tramo de la localidad de Villanúa.

Las condiciones de entrada de caudal y el hietograma empleados como condición de entrada se muestran en la Figura 6.

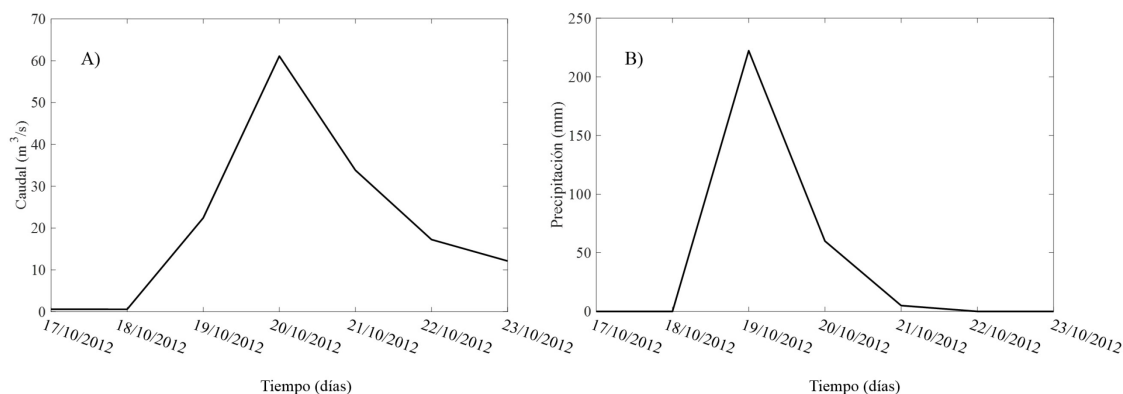


Figura 6 | Series temporales de las condiciones de entrada definidas en el dominio numérico para el caudal (A) y para el hietograma (B) obtenidos a partir de los datos registrados en la estación meteorológica de Aragón-Canfranc.

Los usos de suelo se asignaron de forma automática, empleando la nueva metodología, expuesta en el apartado anterior, a partir de los datos de usos de suelo obtenidos de ficheros vectoriales obtenidos del SIOSE. En la Figura 7 se muestran los usos de suelo obtenidos con la nueva metodología.

En la figura 7 se puede apreciar una de las ventajas de la asignación de usos de suelo con la nueva metodología: con la nueva asignación automática es posible asignar más de 200 usos de suelo distintos a partir de los datos del SIOSE. La asignación de un número tan elevado de usos de suelo siguiendo la metodología clásica (manual) no sería funcional ya que el tiempo necesario para realizarla sería muy elevado en relación al tiempo de la simulación. Por tanto, con esta nueva metodología de asignación automática de usos de suelo, la caracterización de usos de suelo se realiza de una forma más precisa y mucho más rápida que con la metodología clásica.

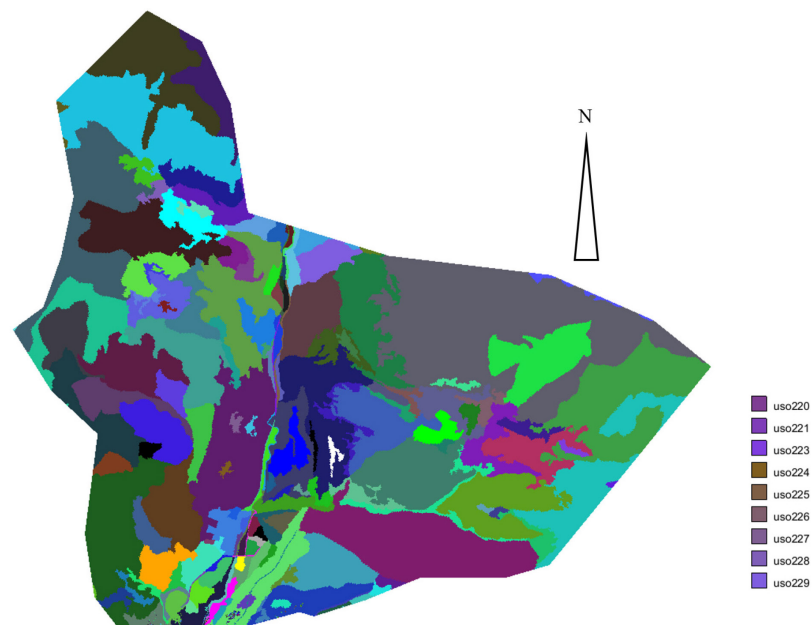


Figura 7 | Usos de suelo definidos de forma automática empleando la nueva metodología.

Para la obtención de los valores del *CN* asociados a la cuenca de estudio se ha partido del *ráster* de pendientes de la cuenca, el tipo de suelo definido por el SCS, el tipo de cultivo y los usos de suelo del SIOSE. Concretamente, en relación a los usos de suelo, como se ha comentado en el primer apartado de este trabajo, dada la complejidad de la relación entre las tablas de uso de suelo del SCS y del SIOSE, simplemente se han tenido en cuenta unos usos de suelo representativos de la cuenca. De esta manera el *ráster* obtenido con los números de curva es un *ráster* aproximado pero que sirve para mostrar la posibilidad de la asignación automática de los valores característicos del modelo de *CN* para infiltración de una forma similar al método explicado para la asignación automática de los usos de suelo. La obtención del *ráster* final de los números de curva se realiza siguiendo la metodología expuesta en Ferrer et al. (1995).

La Figura 8 muestra el *ráster* de pendientes de la cuenca reclasificado siguiendo las especificaciones de Ferrer et al. (1995) obtenido a partir del MDT de la zona de estudio. La Figura 8 muestra que en la mayor parte de la zona de estudio la pendiente del terreno es mayor que el 3% salvo en pequeñas zonas dentro del centro de la población de Villanúa.

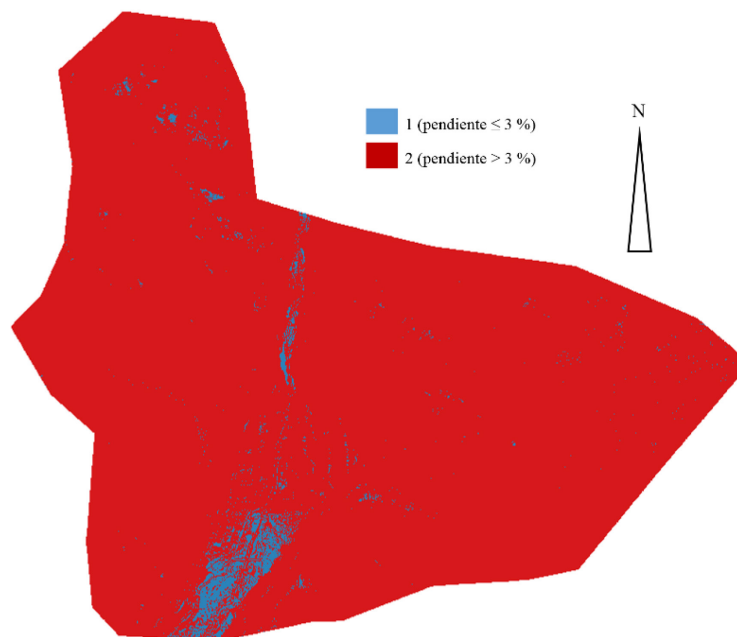


Figura 8 | Ráster de pendientes de la cuenca de estudio reclassificado según Ferrer et al. (1995).

El *ráster* de tipo de suelo se obtiene atendiendo a la clasificación hidrológica de los usos de suelo del SCS (NRCS, 2004^b). Atendiendo a dicha clasificación la cuenca de estudio se puede considerar como suelo de tipo A. En la Figura 9 se muestra la clasificación del tipo de suelo a partir de los datos *ráster* obtenidos del Liedekerke et al. (2012). Esta base de datos dispone de multitud de información sobre las propiedades físico/químicas de los suelos de la Unión Europea. La gran cantidad de datos es, en parte, una de las desventajas que presenta dicha base de datos ya que no se dispone de una información clara del significado de cada uno de los parámetros que proporciona, además de que muchos de los datos incluidos no se ajustan a la información requerida para la obtención de los datos necesarios para el uso del modelo de infiltración del número de curva.

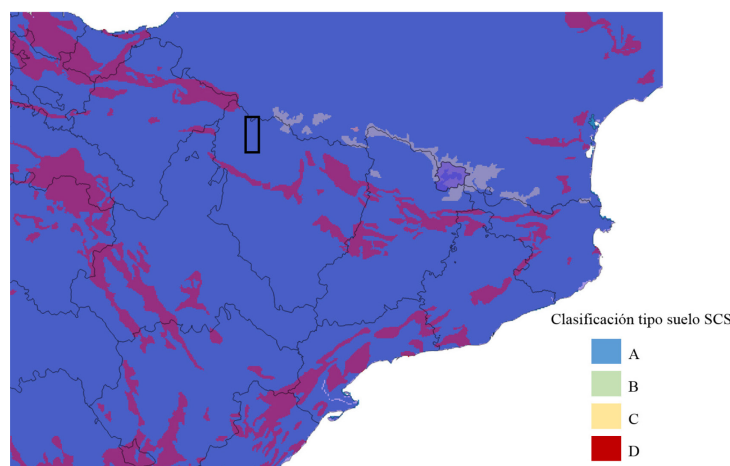


Figura 9 | Tipos de suelo según la clasificación SCS obtenidos a partir de la base de datos de Liedekerke et al. (2012). El área recuadrada se corresponde con la cuenca de estudio del río Aragón.

El *ráster* de tipo de cultivo se considera, por simplicidad, constante e igual a cultivos que siguen las líneas de nivel del terreno. El *ráster* de los usos de suelo empleado para el cálculo del *ráster* del *CN* se obtendrá considerando unos usos de suelo representativos de la cuenca de estudio. Este *ráster* de usos de suelo será una versión simplificada por lo que no considerará todos los usos de suelo obtenidos con la herramienta para la asignación automática de usos de suelo. El *ráster* final del *CN* obtenido se muestra en la Figura 10.

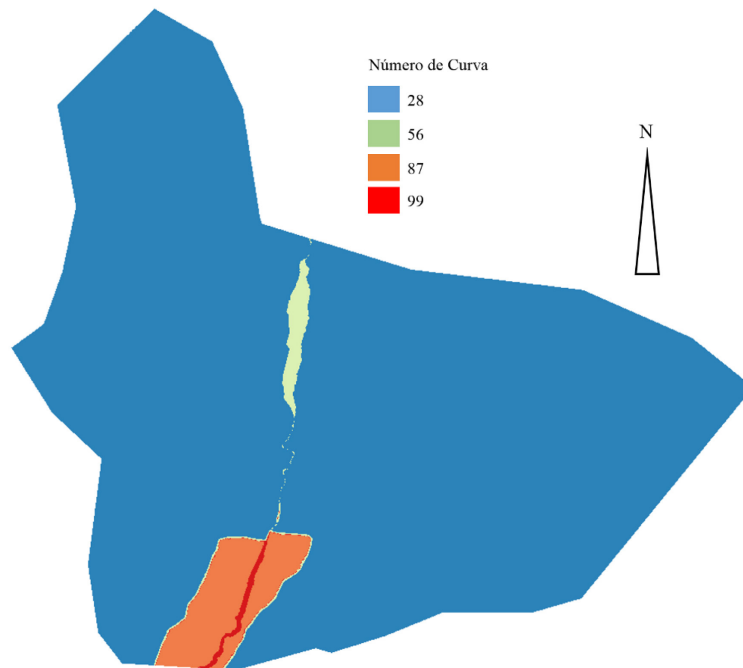


Figura 10 | Ráster de números de curva para la cuenca de estudio.

Los parámetros empleados para la simulación numérica se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3 | Parámetros empleados para la simulación numérica con Iber.

Parámetro	Valor
Tiempo máximo de simulación (días)	2,3
Tipo de esquema numérico	Segundo Orden
CFL	0,45
Límite Seco-Mojado (m)	0,001
Método de secado	Por Defecto

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presenta el análisis realizado mediante diagramas de Taylor de los caudales de salida de la cuenca de estudio obtenidos en las simulaciones numéricas empleando las cuatro mallas anteriormente citadas junto con los tiempos de cálculo asociados a cada una de las mallas. Se muestran también la evolución temporal de los calados obtenidos numéricamente en dos zonas de interés de la cuenca de estudio (parque de Villanúa y piscifactoría aguas debajo de la población) y la superficie inundada en el escenario analizado. Los calados se comparan con imágenes correspondientes a la fecha de la inundación y la superficie inundada se compara con las superficie inundable correspondiente a un periodo de retorno de 500 años obtenida de la base de datos del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI).

Caudales de salida de la cuenca de estudio

Los diagramas de Taylor correspondientes a los hidrogramas de salida obtenidos con las cuatro mallas analizadas y empleando la metodología automática de usos de suelo, junto con los tiempos de cálculo (runtimes) obtenidos con cada una de las mallas se muestran en la Figura 11.

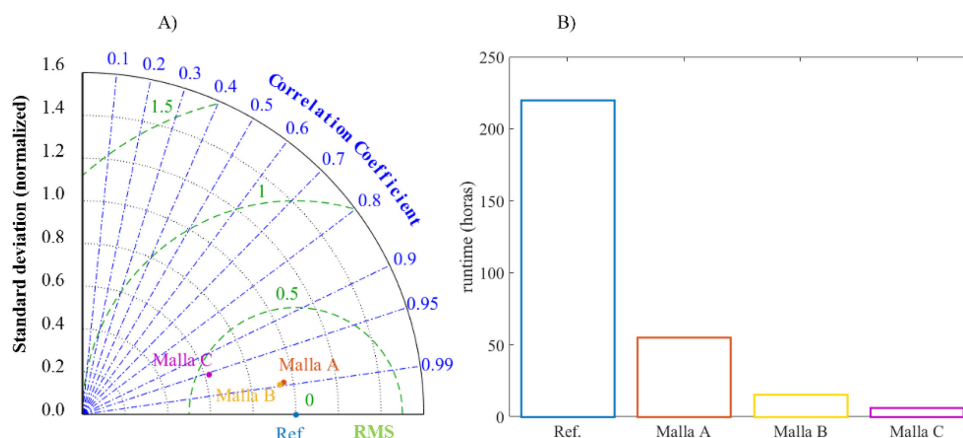


Figura 11 | Diagramas de Taylor de los hidrogramas de salida de la cuenca de estudio (A) y tiempos de cálculo (B) asociados a cada una de las mallas.

La Figura 11 muestra que, a medida que la resolución de la malla aumenta, los hidrogramas de salida tienden al obtenido con la resolución más alta (malla Ref.). Los diagramas de Taylor muestran que, teniendo como referencia la malla Ref., tanto la malla A como la malla B proporcionan unas series temporales del caudal de salida muy próximas a la referencia. Los tiempos de cálculo (runtimes) mostrados en la Figura 11 ponen de manifiesto que los tiempos de cálculo se incrementan a medida que la resolución de la malla aumenta pasando de las 6,5 horas para el caso de malla C hasta las cerca de 220 horas (9 días) para el caso de malla Ref. Los tiempos de cálculo obtenidos con las mallas A y B son de 55 horas (2,3 días), para el primero, y de 15,5 horas para el segundo. Este último valor de runtime está dentro del rango de valores considerados para poder considerar que la anticipación es suficiente (24-48 horas). Por tanto, se puede considerar que el hidrograma obtenido con la Malla B representa razonablemente bien el hidrograma de salida de la cuenca de estudio con tiempos de cálculo razonables.

En la Figura 12 se muestran los hidrogramas de salida de la cuenca obtenidos con la Malla B empleando la asignación automática de usos de suelo. Se presentan los resultados obtenidos considerando el modelo simplificado de infiltración siguiendo el modelo de número de curva y sin considerar infiltración. Los tiempos de simulación se han extendido hasta las 110 horas con el fin de tener una visión completa del hidrograma de salida de la cuenca.

La Figura 12 muestra que el caudal pico obtenido con el modelo que no considera la infiltración ($\approx 220 \text{ m}^3/\text{s}$) es menor que el obtenido con el modelo que considera infiltración ($\approx 250 \text{ m}^3/\text{s}$). Estos caudales de pico se alcanzan en un tiempo próximo a las 50 horas en los dos casos considerados. Por otro lado, el volumen de agua escurrido (área encerrada por la curva de Q_{out} de la Figura 12) para el modelo que no considera la infiltración es de $2,42 \text{ m}^3$ mientras que el asociado al modelo que considera infiltración es menor que el anterior e igual a $2,06 \text{ m}^3$. Esta diferencia entre los volúmenes escurridos ($0,36 \text{ m}^3$) es debida al fenómeno de infiltración.

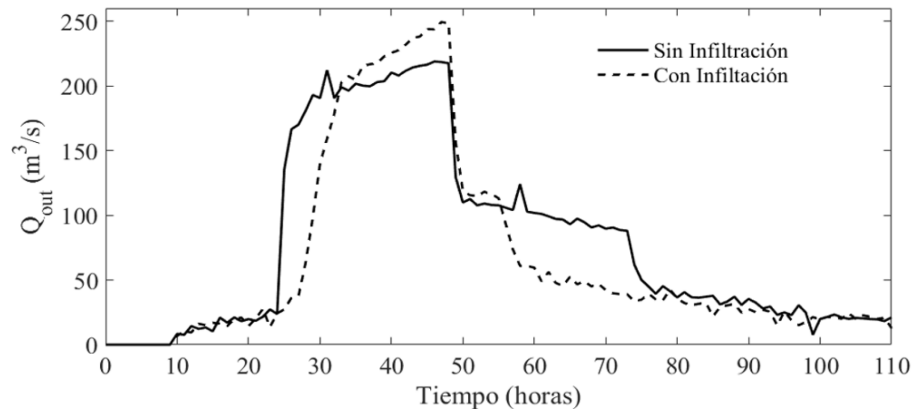


Figura 12 | Caudales de salida con asignación automática de usos de suelo (línea continua) y con asignación automática considerando infiltración (línea a trazos).

La Figura 12 pone de manifiesto la influencia de la consideración de la infiltración en el modelo de lluvia-escorrentía. El *ráster* de números de curva es aproximado, por tanto, los resultados sólo pretenden poner de manifiesto la necesidad de considerar la infiltración en modelo de lluvia escorrentía.

Mapas de calado y superficies inundables

Los valores de cota agua y superficie inundada experimentales observadas durante las inundaciones no fueron registrados por lo que la comparación entre los valores obtenidos numéricamente y los registrados durante el evento es esencialmente cualitativa, es decir, basada en fotografías y videos de la zona durante el evento.

Los calados obtenidos numéricamente junto con la superficie inundable correspondiente a un periodo de retorno de 500 años se presentan en la Figura 13. Los resultados numéricos presentan una razonable concordancia con las superficies inundadas registradas durante el evento analizado.

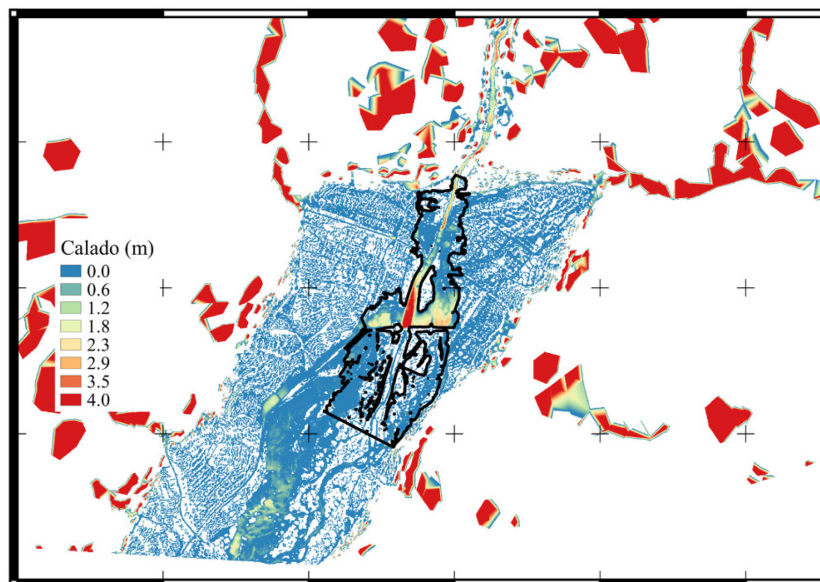


Figura 13 | Mapas de calado y zonas inundables (área delimitada por línea continua) correspondiente a un periodo de retorno de 500 años.

En la Figura 14 se muestra la evolución temporal de la cota de agua, obtenida numéricamente, en la zona del parque de Villanúa (dentro de la localidad) y en la zona de la piscifactoría (aguas debajo de Villanúa) junto con las imágenes

correspondientes a las mismas zonas en distintos instantes de la inundación. En esta figura solamente se muestra la evolución del caudal hasta el tiempo igual a 55 horas para simplificar la notación. En ambos casos los valores máximos de cota de agua son similares a los que se pueden desprender de las imágenes correspondientes a la inundación.

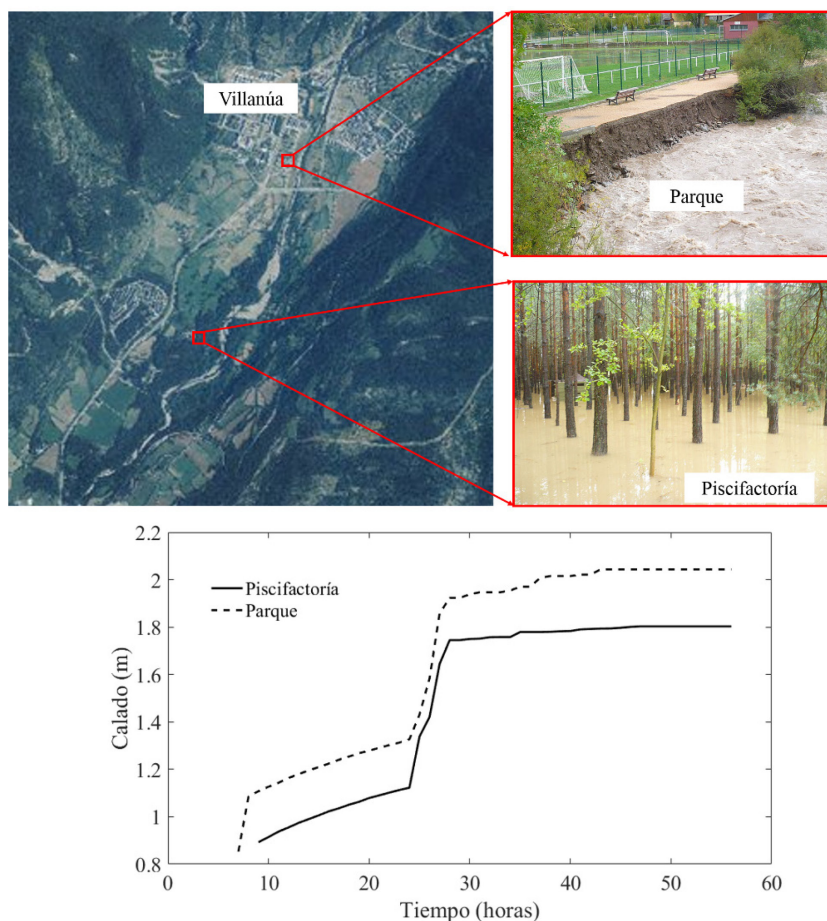


Figura 14 | Evolución de calados en parque de Villanúa (línea trazos) y en la zona de piscifactoría (línea continua) aguas abajo del núcleo urbano e imágenes correspondientes a la inundación.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha tratado de reproducir las inundaciones producidas en Villanúa en Octubre de 2012. El cálculo hidrológico se ha realizado mediante el código Iber el cual resuelve de forma numérica las ecuaciones de St. Venant 2D. Las condiciones de caudales de entrada y precipitaciones se han obtenido a partir de los datos experimentales registrados en la estación meteorológica que la Confederación Hidrográfica del Ebro tiene instalada en la zona de estudio. La topografía de la zona se ha obtenido a partir de los ficheros *ráster* de la zona. Los distintos usos de suelo y, por tanto, la definición de los coeficientes de Manning de la cuenca de estudio se han obtenido mediante una nueva metodología. Esta nueva metodología de asignación de usos de suelo calcula y asigna de forma automática los coeficientes de Manning a partir de los usos de suelos combinados definidos en la base de datos del SIOSE. Esta metodología automática supone una nueva aportación al modelo Iber. Además, se ha desarrollado un nuevo método para la asignación mediante ficheros *ráster* de los parámetros del terreno asociados al modelo de infiltración del Número de Curva. Se ha realizado un análisis de los resultados obtenidos con una serie de mallas con distinta resolución mediante diagramas de Taylor.

El análisis de los diagramas de Taylor pone de manifiesto la necesidad de emplear mallas lo suficientemente finas como para poder capturar los fenómenos de escorrentía que aparecen en la cuenca. Los campos de calado obtenidos numéricamente se aproximan razonablemente bien a los observados experimentalmente. Además las superficies inundadas obtenidas

numéricamente son de un orden de magnitud similar a las zonas inundadas definidas para el período de retorno de 500 años definido por el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI) del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

A partir de los resultados obtenidos se puede considerar a Iber como una herramienta muy adecuada para la predicción de inundaciones originadas por eventos de lluvias extremas.

Con el fin de mejorar las capacidades de Iber para el análisis de este tipo de problemas es necesario, entre otros aspectos, la reducción de los tiempos de cálculo además de facilitar el acceso a datos del terreno que puedan tener influencia en los resultados. Respecto al incremento a la velocidad de cálculo de Iber actualmente se está trabajando en la implementación del código en C++ con el fin de, posteriormente, desarrollar una versión del código en CUDA para tratar de aprovechar la capacidad de cálculo de las GPU (tarjetas gráficas). La experiencia en códigos numéricos similares muestra que las aceleraciones obtenidas migrando desde FORTRAN a CUDA pueden llegar a valores cercanos a x100. La hibridación con el código DualSPHysics (Crespo et al., 2015) es otra tarea que puede permitir tanto acelerar los cálculos como ampliar el campo de aplicación tanto de Iber como de DualSPHysics. Con relación al acceso a los datos del terreno como, por ejemplo, los asociados al modelo de infiltración del número de curva se puede decir que, por un lado, la existencia de múltiples codificaciones distintas a las definidas por SCS como, por otro, la ingente cantidad de datos existentes, muchas veces sin una fácil aclaración de su significado, perjudica claramente la utilización de los mismos penalizando, de alguna forma, la capacidad de los modelos numéricos a la hora de predecir con exactitud los campos de calado y superficies inundadas observados en eventos experimentales. Por tanto es necesario que las administraciones responsables de la gestión de estos datos lleguen a acuerdos para su homogeneización y facilitar su uso a los investigadores involucrados en este campo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue cofinanciado por la Comisión Europea dentro del proyecto “IMDROFLOOD (Water JPI - WaterWorks 2014)” y por la Xunta de Galicia con el proyecto “Programa de Consolidación e Estructuración de Unidades de Investigación Competitivas (Grupos de Referencia Competitiva) GRC2013-001”. A.J.C. Crespo está financiado mediante una beca Ramón y Cajal del ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España (RYC-2013-12617).

REFERENCIAS

- Areu-Rangel, O.S., González-Cao, J. Crespo, A.J.C., Bonasi, R. 2017. Numerical modelling of hydrological safety assignment in dams with IBER. *Sustainable Water Resources Management*, doi: 10.1007/s40899-017-0135-2.
- Bartholmes, J.C., Thielen, J., Ramos, M.H., Gentilini, S. 2009. The European flood alert system EFAS – Part 2: statistical skill assessment of probabilistic and deterministic operational forecasts. *Hydrology and Earth System Sciences* 13, 141–153.
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., 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.
- Cea, L. y Bladé, E. 2015. A simple and efficient unstructured finite volume scheme for solving the shallow water equations in overland flow applications. *Water Resources Research* 51(7), 5464-5486.
- Cea, L., Fraga, I., Puertas, J., Álvarez, M., Bermúdez, M., Coquerez, S., Salsón, S., Pettazzi, A. 2015. Influencia de la densidad espacial de estaciones pluviométricas y de la disponibilidad de datos radar en los hidrogramas de tormenta calculados con un

modelo hidrológico distribuido: Aplicación a una cuenca de 24 Km² en el Noroeste de España. *IV Jornadas de Ingeniería del Agua, JIA2015*, Octubre 21-22, Córdoba, España.

Cea, L., Legout, C., Grangeon, T., Nord, G. 2016. Impact of model simplifications on soil erosion predictions: application of the GLUE methodology to a distributed event-based model at the hillslope scale. *Hydrological Processes*, 30(7), 1096-1113

Crespo, A.J.C., Domínguez, J.M., Rogers, B.D., Gómez-Gesteira, M., Longshaw, S., Canelas, R., Vacondio, R., Barreiro, A., García-Feal, O. 2015. DualSPHysics: open-source parallel CFD solver on SPH. *Computer Physics Communications* 187, 204-216.

Del Valle, J.; Ollero, A.; Sánchez, M. (2007). *Atlas de los ríos de Aragón*. Prames, S.A, Zaragoza, España.

Ferrer, M., Rodríguez, J., Estrela, T. 1995. Generación automática del número de curva con sistemas de información geográfica. *Ingeniería del Agua* 2(4), 43-58.

García-Ruiz, J. M., Puigdefabregas, J.; Creus, J. 1985. *Los recursos hídricos superficiales del Altoaragón*, 2. Instituto de Estudios Altoaragoneses. CSIC, Huesca, España.

MAPAMA. 2011. *Guía metodológica para el desarrollo del sistema nacional de cartografía de zonas inundables*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Secretaría General Técnica, Madrid, España.

Liedekerke, M.V., Jones, A., Panagos, P. 2006. *ESDBv2 Raster Library – a set of rasters derived from the European Soil Database distribution v2.0*. European Commission and the European Soil Bureau Network.

McCuen, R.H. (1982). *A Guide to Hydrologic Analysis using SCS Methods*. Prentice-Hall. 110 pp.

NRCS. 2004^a. *National Engineering Handbook: Part 630: Hydrology: Chapter 10: Estimation of direct runoff from storm rainfall*. Natural Resources Conservation Service, Washington D.C., USA.

NRCS. 2004^b. *National Engineering Handbook: Part 630: Hydrology: Chapter 7: Hydrological Soil Groups*. Natural Resources Conservation Service, Washington D.C., USA.

Ponce, V.M., Hawkins, R.H. 1996. Runoff curve number: Has it reached maturity? *Journal of Hydrologic Engineering*, 1(1). 11-18.

QGIS Development Team. 2016. *QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation Project.

Silvestro, F., Reborá, N., Ferraris, L. 2011. Quantitative flood forecasting on small and medium size basins: a probabilistic approach for operational purposes. *Journal of Hydrometeorology* 12 (6), 1432–1446.

Taylor, K.E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research* 106, 7183-7192.

Temez, J.R. 1978. *Cálculo Hidrometeorológico de Caudales de Avenida en Pequeñas Cuencas Naturales*. MOPU, Madrid, España.