

Implementación de embalses en cálculos hidrológicos con Iber

Implementation of reservoirs in hydrological calculations with Iber

Gonzalo García-Alén^{1*}, Orlando García-Feal^{2,b}, Luis Cea³ y Jerónimo Puertas⁴

¹Universidade da Coruña, Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Enxeñaría Civil (CITEEC), Elviña, 15071, A Coruña, España.

²Centro de Investigación Mariña, Universidade de Vigo, Environmental Physics Laboratory (CIM-EPhysLab), Campus Auga, Ourense, 32004, España.

E-mail: ^{1*}g.glores@udc.es, ^{2,b}orlando@uvigo.es, ³luis.ce@udc.es, ⁴jeronimo.puertas@udc.es.

*Autor para correspondencia

Recibido: 11/11/2022

Aceptado: 18/01/2023

Publicado: 31/01/2023

Citar como: García-Alén, G., García-Feal, O., Cea, L., Puertas, J. 2023. Implementation of reservoirs in hydrological calculations with Iber. *Ingeniería del agua*, 27(1), 59-72. <https://doi.org/10.4995/ia.2023.18750>

RESUMEN

La consideración del efecto laminador de los embalses en la evaluación de caudales de avenida es un aspecto fundamental en aquellas cuencas donde la hidrología está condicionada por la presencia de presas. En este trabajo se presenta la implementación de embalses y presas en el módulo hidrológico del modelo Iber, el cual resuelve las ecuaciones de aguas someras bidimensionales a escala de toda una cuenca. Para la modelización del caudal de salida del embalse se incluyen aliviaderos con y sin compuerta, desagües de fondo y la posibilidad de definir una curva de desagüe *ad hoc* que relacione el caudal de salida con el nivel del embalse. Como caso de estudio se modeló el efecto del embalse de Iznájar en la hidrología de la cuenca del río Genil, en España. Se consideraron tres hipótesis de cálculo con el fin de comparar el efecto de los diferentes órganos de desagüe definidos en esta nueva implementación en Iber. La metodología definida demuestra ser capaz de representar numéricamente los órganos de gestión del embalse y resolver así una limitación fundamental en el modelado de grandes cuencas con Iber.

Palabras clave | embalse; presa; hidrología; Iber; laminación; avenida.

ABSTRACT

Accounting for the flood routing effect of reservoirs in the assessment of flood discharges is essential in basins where the hydrology is conditioned by the presence of one or more dams. This paper presents the implementation of reservoirs and dams in the hydrological module of the software Iber, which solves the two-dimensional shallow water equations at the scale of an entire basin. Spillways with and without gates, low level outlets, and the possibility to define an ad hoc outflow curve relating the flow rate to the reservoir level are included. As a case study, the effect of the Iznájar reservoir on the hydrology of the Genil basin in Spain was modelled. Three scenarios were considered to compare the effect of the different outflow structures included in this new implementation in Iber. The defined methodology proves to be able to represent numerically the outflow structures, addressing a fundamental limitation in the modelling of large basins with Iber.

Key words | reservoir; dam; hydrology; Iber; lamination; flood.

INTRODUCCIÓN

La aplicación de modelos hidrológicos completamente distribuidos basados en las ecuaciones de aguas someras bidimensionales, también conocidas como 2D *Shallow Water Equations* (2D-SWE), es cada vez más habitual en las simulaciones lluvia-escorrentía a escala de cuenca (Costabile *et al.*, 2012; Liang *et al.*, 2015; Fernández-Pato *et al.*, 2018; Bellos *et al.*, 2020; Uber *et al.*, 2021; Cea, Álvarez, *et al.*, 2022; García-Alén *et al.*, 2022). Estos modelos presentan varias ventajas con respecto a los modelos agregados o semi-distribuidos, como la capacidad de incluir en sus cálculos la variabilidad espacial de la lluvia y de las propiedades físicas de la cuenca (Refsgaard, 1997). El desarrollo de modelos completamente distribuidos basados en las ecuaciones de aguas someras se ha visto potenciado por los recientes desarrollos en computación de alto rendimiento (HPC, por sus siglas en inglés) (Petaccia *et al.*, 2016; García-Feal *et al.*, 2018; Sanders y Schubert, 2019; Xia *et al.*, 2019), los cuales han permitido reducir considerablemente el coste computacional de las simulaciones.

Iber (Bladé-Castellet *et al.*, 2014; Bladé *et al.*, 2014) es una herramienta de simulación de flujo en lámina libre en régimen no-permanente. El modelo consta de distintos módulos entre los que se encuentran, entre otros, un módulo hidrodinámico y un módulo de hidrología. El módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad. El módulo hidrológico parte del módulo hidrodinámico para la resolución del movimiento de la escorrentía superficial sobre el terreno al que se le han añadido nuevos procesos como son la lluvia, la infiltración o el flujo subsuperficial. El esquema numérico DHD (Cea y Bladé, 2015) ha sido desarrollado de forma específica para la optimización del cálculo de escorrentía superficial en aplicaciones hidrológicas y se utiliza como motor de cálculo en el módulo hidrológico.

La precisión de los modelos hidrodinámicos puede verse deteriorada por la presencia de estructuras hidráulicas que interrumpen la circulación del flujo. A escala local, la presencia de vertederos o puentes pueden presentar un desafío para los modeladores, especialmente para aquellos modelos basados en las 2D-SWE (García-Alén *et al.*, 2021; Cea, Vila, *et al.*, 2022). A escala de cuenca, uno de los elementos más relevantes son los embalses. Según su capacidad de almacenamiento y de desagüe, son estructuras que pueden condicionar completamente el caudal de un río. Mientras que otros modelos ya permiten incluir este tipo de estructuras, p. ej. TETIS (Francés *et al.*, 2007), este no es el caso de Iber. Así, en este artículo se expone la metodología utilizada para la introducción del efecto de embalses en Iber. Partiendo de su módulo hidrológico, se ha implementado la posibilidad de definir un embalse como un depósito virtual capaz de almacenar y verter agua. Se han incorporado hasta 5 configuraciones diferentes para la definición del caudal de salida del embalse (órganos de desagüe): vertido libre por vertedero, vertedero con compuerta tipo Taintor, vertedero con compuerta tipo tajadera, desagüe de fondo y curva de desagüe *ad hoc*. Como caso de estudio se ha utilizado el embalse de Iznájar, localizado en el río Genil (España), que con una capacidad total de 981 hm³ es el embalse más grande de Andalucía. Se han considerado tres hipótesis de cálculo a partir de las diferentes configuraciones disponibles en esta nueva implementación.

METODOLOGÍA Y MATERIALES

Módulo hidrológico de Iber

El módulo hidrológico de Iber calcula la escorrentía superficial y su transformación a lo largo del dominio computacional con las mismas ecuaciones utilizadas para el cálculo de la hidrodinámica, i.e. las ecuaciones de aguas poco profundas bidimensionales (Ecuaciones 1, 2 y 3). Para el cálculo de procesos hidrológicos incluye términos de precipitación e infiltración, pudiéndose escribir como:

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

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) = -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - g \frac{n^2}{h^3} |q| q_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) = -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - g \frac{n^2}{h^3} |q| q_y \quad (3)$$

donde h es el calado de agua, q_x , q_y y $|q|$ son las dos componentes del caudal específico junto con su módulo, z_b es la cota de fondo, g es la aceleración de la gravedad, n es el coeficiente de Manning, R es la intensidad de precipitación y f es la tasa de infiltración de agua superficial en el subsuelo. Estas ecuaciones se resuelven mediante el método de volúmenes finitos utilizando el esquema numérico DHD para aplicaciones hidrológicas (Cea y Bladé, 2015). En la versión actual (Iber 3.2.0) se incluyen 5 modelos de infiltración (Sanz-Ramos *et al.*, 2022): Lineal, Green-Ampt, Número de Curva del SCS, Horton y SCS Continuo. Las 4 primeras formulaciones son bien conocidas en la literatura, mientras que la última es una variante del modelo SCS que permite recuperar capacidad de infiltración a lo largo del tiempo. Esta implementación está basada en la propuesta por Kannan *et al.* (2007). Además, se incluyen dos modelos de flujo subsuperficial, un modelo agregado y un modelo distribuido. El módulo hidrológico de Iber puede ser consultado en detalle en Sanz-Ramos *et al.* (2022).

El empleo de Iber para la modelización de procesos de lluvia-escorrentía ya ha sido validado extensamente en trabajos anteriores a diferentes escalas que van desde los ensayos de laboratorio hasta cuencas de pequeño y mediano tamaño (Cea *et al.*, 2014; Fraga *et al.*, 2016, 2019; García-Alén *et al.*, 2022; Marcos *et al.*, 2020; Sanz-Ramos *et al.*, 2021).

Implementación de embalses y órganos de desagüe

La implementación numérica del efecto de un embalse se divide en 2 partes: la definición de las características del embalse y las de los órganos de desagüe. La geometría del embalse debe definirse en Iber como una superficie que abarque la totalidad de la extensión del embalse en planta. Para establecer esta superficie, se recomienda estimar los límites del embalse como la intersección del Modelo Digital del Terreno (MDT) y un plano horizontal equivalente a un nivel de agua en el embalse igual al NMN.

El embalse se modela como un depósito virtual cuyo volumen se actualiza en cada paso de tiempo mediante un balance de masa en el que se consideran los caudales de entrada y salida de agua del embalse, así como las pérdidas por infiltración y evaporación en el propio embalse. Así, en la superficie del embalse no se resuelven las 2D-SWE y, por tanto, el método de mallado y la resolución de la malla no son relevantes en dicha superficie. En cuanto a los valores de elevaciones que se establecen en los elementos del embalse, si bien estos no intervienen en el cálculo del balance de volumen de agua en el embalse, deben ser coherente con la topografía del resto del modelo y con la realidad altimétrica de la cuenca, permitiendo que el embalse sea un punto de confluencia de caudal. Además, la elevación de los elementos del embalse debe ser congruente con la elevación de los elementos del punto de vertido, con una diferencia de cota suficiente como para evitar que el caudal de salida del embalse se incorpore de nuevo al embalse como caudal de entrada. Más allá de esta diferencia de cota, la representación geométrica de la presa en la malla no tiene relevancia para el modelo, pues las características de la presa se definen por el usuario junto con las características del embalse. En general, es suficiente con utilizar un MDT que cuente con la geometría de la presa y donde la elevación del fondo en el embalse no supere la coronación de la presa.

La ecuación de balance de masa que se resuelve en el embalse se puede escribir como:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = Q_E - Q_S - Q_{Inf} - Q_{Evap} \quad (4)$$

donde V es el volumen de agua en el embalse en cada instante de tiempo, Q_E es el caudal de entrada en el embalse, Q_S es el caudal de salida del embalse por los órganos de desagüe, Q_{Inf} es el caudal infiltrado al terreno y Q_{Evap} es el caudal de agua que se pierde por evaporación en el embalse.

Para la definición del caudal de infiltración al subsuelo el usuario debe establecer una tasa de infiltración (mm/d) constante en el tiempo y constante en la superficie de agua de todo el embalse. El cálculo del caudal de evaporación es análogo al de infiltración, estableciéndose una tasa de evaporación (mm/d) constante en tiempo y espacio. Tanto el volumen infiltrado como evaporado se calcula en cada intervalo de tiempo en función de la tasa establecida y la superficie de agua en el embalse. Para ello el usuario debe definir la curva de llenado del embalse, donde se relaciona nivel, volumen y superficie de agua del embalse.

Se han considerado 5 configuraciones para definir el caudal desaguado en el embalse (Figura 1): vertido libre por aliviadero (Figura 1a), vertido por aliviadero con compuerta radial o tipo Taintor (Figura 1b), vertido por aliviadero con compuerta tipo

tajadera (Figura 1c), vertido por desagüe de fondo (Figura 1d) y curva de desagüe *ad hoc* que relaciona la capacidad de desagüe con el nivel de agua en el embalse.

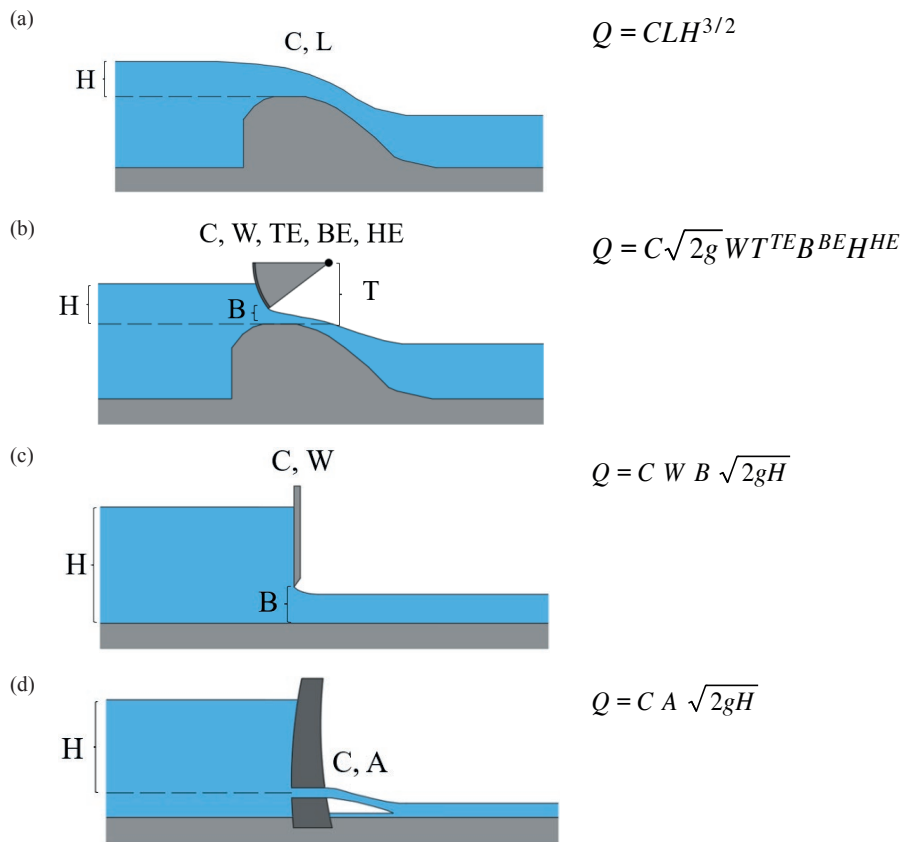


Figura 1 | Configuraciones consideradas para la definición del caudal desaguado en el embalse: (a) vertido libre, (b) aliviadero con compuerta radial, (c) aliviadero con compuerta tipo tajadera y (d) desagüe de fondo.

donde C es el coeficiente de vertido, L la longitud de vertido y H es la carga hidráulica (diferencia entre el nivel de agua en el embalse y la cota del aliviadero), HE es el exponente para la carga hidráulica, W es el ancho de la compuerta, T es la altura de eje de compuerta, TE es el exponente para la altura del eje de compuerta, B es la altura de abertura de la compuerta, BE es el exponente de abertura de compuerta y A es el área de desagüe.

El caudal de salida del embalse se establece definiendo los órganos de desagüe en el modelo. Geométricamente, estos se definen como segmentos que tienen como punto inicial un punto de la geometría del embalse y como punto final el punto de vertido de caudal en el modelo. Por razones de estabilidad numérica, las velocidades y calados que se alcanzan en este punto de desagüe pueden comprometer el tiempo de cálculo del modelo si el tamaño de los elementos de la malla en esa zona es pequeño y los caudales desaguados son elevados. Dado que la discretización temporal utilizada para resolver las ecuaciones hidrodinámicas en Iber está sujeta a la condición de estabilidad Courant-Friedrichs-Lewy (CFL), el paso de tiempo de integración temporal de las ecuaciones (Δt) es directamente proporcional al tamaño del elemento e inversamente proporcional a la celeridad de onda:

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{U + \sqrt{gh}} \quad (5)$$

donde Δx es una longitud característica del elemento de la malla, U es la velocidad del agua en dicho elemento, y h es el calado de agua en dicho elemento. Por lo tanto, el descargar todo el caudal en un único elemento podría aumentar enormemente el coste computacional del modelo. La solución que se ha tomado es establecer un radio de desagüe de caudal. Una vez fijado el punto de desagüe, se reparte el caudal de salida entre los elementos albergados por la circunferencia que tiene como centro el punto de

desagüe (P_d) y como radio el radio de desagüe (R_d) (Figura 2). Para establecer este radio en Iber, se ha fijado una relación empírica según la cual se toma por defecto el 50% de la longitud de la cresta de la presa.

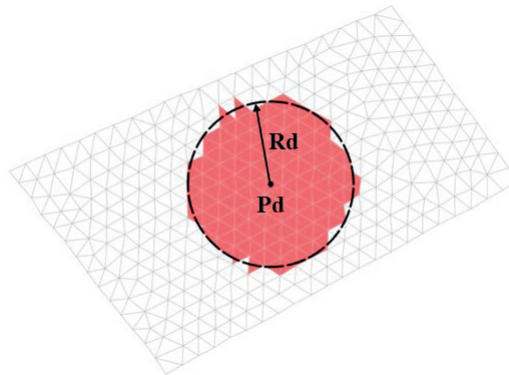


Figura 2 | Distribución espacial del caudal de salida del embalse. Una vez establecido el punto de desagüe (P_d) y el radio de desagüe (R_d), el caudal se reparte entre los elementos ubicados dentro de la circunferencia definida por el radio R_d (elementos rojos).

Interfaz gráfica

La integración de un embalse en el modelo numérico se realiza a través de dos bloques de ventanas gráficas en el preproceso de Iber: las relativas a la definición del embalse (Figura 3) y las relativas a la definición de los órganos de desagüe de la presa (Figura 4).

Para definir el embalse, en primer lugar es necesario definir sus características, y posteriormente asignárselas a una superficie del modelo. La geometría del embalse debe ser definida como una superficie independiente en el modelo. Las características del embalse que es posible definir son: la cota y longitud de coronación de la presa, la tasa de infiltración y evaporación que se produce en el propio embalse, la tipología de órganos de desagüe (o alternatively una curva de gasto global para todos los órganos de desagüe), la curva de llenado y el nivel inicial de agua en el embalse. Además de los órganos de desagüe ya comentados, se considera la posibilidad de que se produzca sobrevertido por coronación. Para ello es necesario definir la cota y longitud de la coronación de la presa. El sobrevertido por coronación se modela numéricamente como un vertido libre, por lo que es necesario definir el coeficiente de vertido correspondiente (por defecto se toma un valor de 1.6). Al igual que en los órganos de desagüe, es necesario establecer un punto de desagüe donde se producirá la descarga de caudal en el caso de que se produzca sobrevertido. En la modelización del caudal de desagüe de la presa se debe escoger entre: 1) aliviaderos y desagües de fondo; 2) curva global de desagüe.

La definición de los órganos de desagüe se realiza a través de dos ventanas gráficas: una para la definición de aliviaderos y desagües de fondo, y otra para las curvas de desagüe (Figura 4). En la primera se debe seleccionar la estructura que se desea modelar e indicar los parámetros necesarios para el cálculo del caudal desaguado. En las curvas de desagüe se debe establecer una tabla que asocie el nivel del embalse (cota) con el caudal de salida. Las filas de la tabla deben estar ordenadas según la variable nivel, pudiendo ser definida tanto en sentido creciente como decreciente. Para todos los órganos de desagüe es necesario definir un punto de entrada y un punto de salida de caudal. Mediante el punto de entrada se define automáticamente el embalse al cuál es asignado este órgano de desagüe. Debido a que todo el embalse se modela como un único depósito, no importa el lugar exacto en el que se defina el punto de entrada, mientras sea dentro de la superficie del embalse correspondiente. Con el punto de salida se establece el punto de desagüe del embalse, tal como se ha indicado anteriormente.

Caso de estudio

La cuenca del río Genil está localizada en el sur de España y cuenta con una extensión total de 8200 km² (Figura 5). El río nace en el término municipal de Gúejar Sierra, en la provincia de Granada, a 2834 m s.n.m., y desemboca en el río Guadalquivir a 47 m s.n.m., en el municipio de Palma del Río. El clima de la cuenca es árido, con una precipitación anual media de 500 mm y una

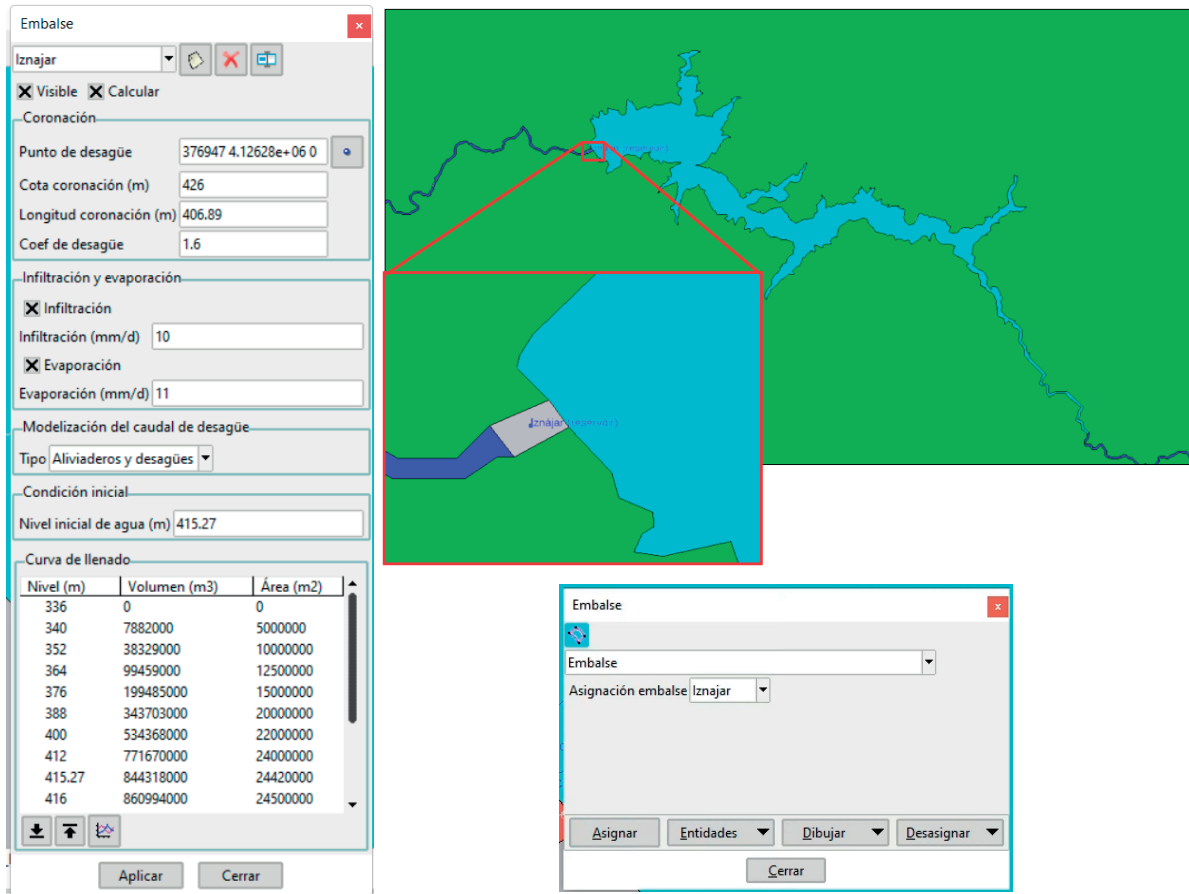


Figura 3 | Interfaz gráfica de preproceso para la definición de un embalse. A la izquierda, ventana para la definición de las características del embalse. A la derecha abajo, ventana de asignación de estas características a una superficie del modelo. A la derecha arriba, superficie del embalse (color celeste) y detalle de la visualización del punto de desagüe por coronación.

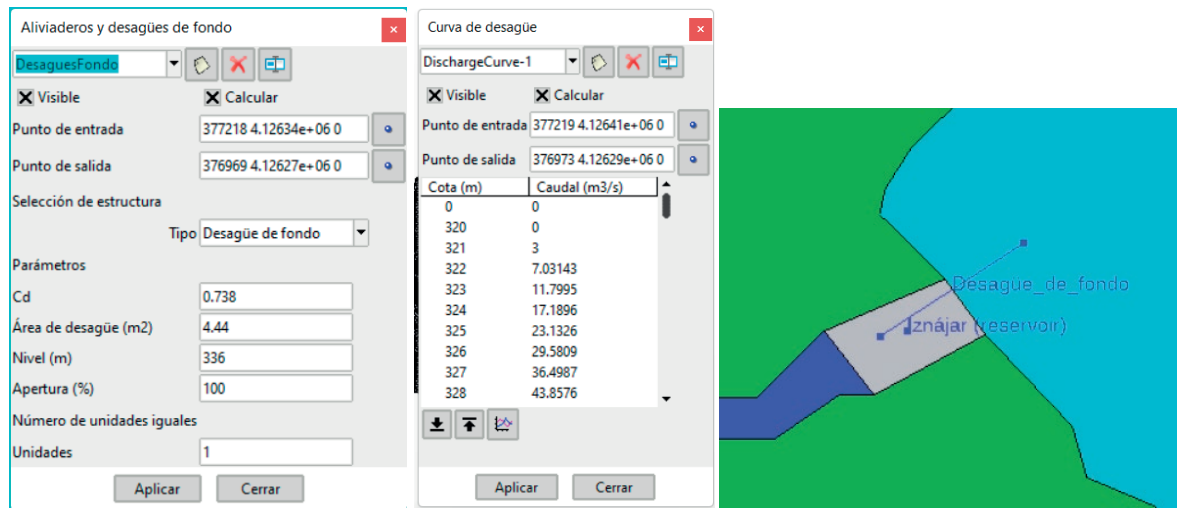


Figura 4 | Interfaz gráfica de preproceso para la definición de los órganos de desagüe. A la izquierda la ventana gráfica que permite la definición de los aliviaderos y desagües de fondo, en el centro la ventana que permite definir las curvas de desagüe, a la derecha un ejemplo de visualización de un órgano de desagüe (segmento azul) una vez ha sido definido.

precipitación diaria máxima anual media de 40 mm. La cubierta vegetal es muy variada, con cultivos anuales, pastizales, matorrales y bosques. Sin embargo, dado que la principal actividad económica de la zona es la agricultura, los cultivos de regadío y los olivares de secano ocupan una superficie importante de la cuenca (57%). En la zona central de la cuenca se localiza el embalse de Iznájar, con una capacidad total de 981 hm³. Este embalse lamina las crecidas ordinarias del río Genil y regula completamente el caudal del río aguas abajo, dividiendo la cuenca del río Genil en dos subcuencas de aproximadamente igual superficie.

La presa de Iznájar es de fábrica de hormigón en masa de tipo gravedad. El punto más bajo de la superficie general de cimentación de la presa se encuentra a la cota de 304.40 m s.n.m. La coronación se sitúa a la cota 426.00 m s.n.m., siendo la altura de la presa de 121.60 m. La longitud total de la presa en coronación es de 406.89 m. El aliviadero de la presa está compuesto por 8 vanos cerrados por compuertas tipo Taintor de estructura cajón, de dimensiones 13.50×6.00 m. Los desagües de fondo están constituidos por 7 tuberías de palastro de 2.38 m de diámetro. La capacidad de desagüe del aliviadero y de los desagües de fondo a Nivel Máximo Normal (NMN) es de 3000 m³/s y 928 m³/s, respectivamente.

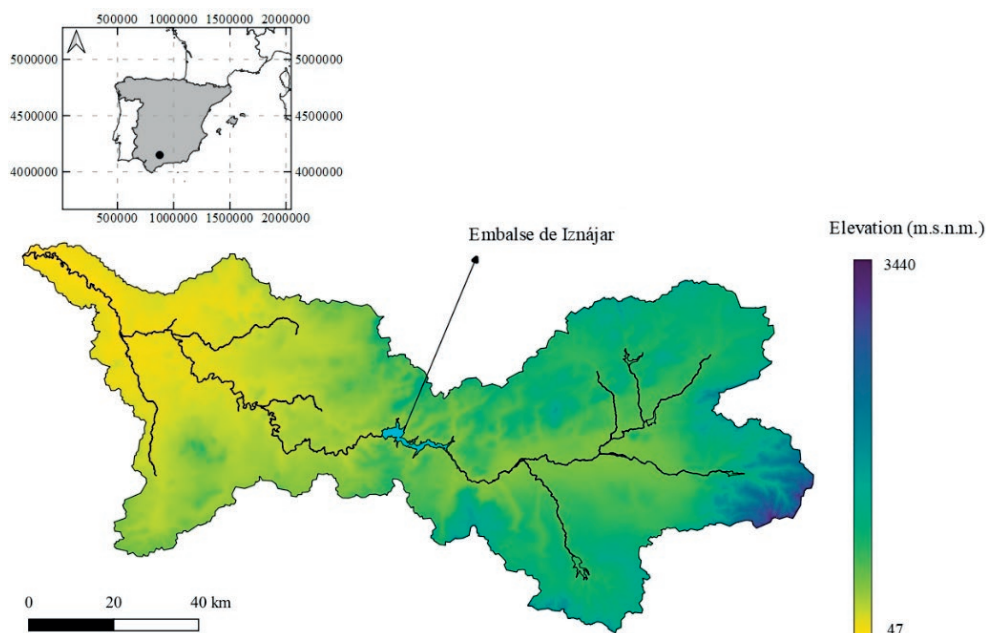


Figura 5 | Caso de estudio: Embalse de Iznájar en la cuenca del río Genil.

Para la modelización numérica de este caso de estudio se han definido los usos de suelo en la cuenca de acuerdo al mapa de usos de suelo del CORINE Land Cover 2018 (European Union Copernicus Land Monitoring Service, 2018) y las recomendaciones de la Guía Metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (Sánchez y Lastra, 2011), la cual propone un valor de coeficiente de Manning para cada uno de los usos de suelo del CORINE (Figura 6a). Aunque para este caso de estudio se han asumido estos valores de rugosidad, se ha observado que en modelos de flujo superficial basados en las ecuaciones de aguas someras bidimensionales los valores de rugosidad son comúnmente más altos que los utilizados para los cauces de ríos (Cea *et al.*, 2010; Fraga *et al.*, 2013; Sanz-Ramos *et al.*, 2021). La topografía se ha establecido a partir del Modelo Digital del Terreno (MDT) con resolución espacial de 25 m proporcionado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN-CNIG, 2021). Para la discretización del dominio computacional se ha utilizado una malla no estructurada de 180 K elementos triangulares no uniformes. En la geometría del modelo se ha definido una superficie diferente para la red de drenaje, estableciéndose un tamaño de elemento igual a 50 m en los cauces principales y un tamaño igual a 800 m en el resto del modelo. Esta red de drenaje se ha calculado a partir del MDT de 25 m antes mencionado y tomando una superficie mínima de drenaje que permitiera representar los principales cauces de la cuenca sin comprometer el número de elementos de la malla de cálculo. Como modelo de infiltración se ha utilizado el Número de Curva del SCS. El valor del Número de Curva (CN) se ha definido de forma distribuida en la cuenca a partir de los valores de umbral de escorrentía establecidos por el Gobierno Español en la definición del mapa de caudales máximos en régimen

natural (CAUMAX) (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2013). Se han asumido condiciones normales de humedad antecedente, siendo el valor medio de CN en la cuenca igual a 72 (Figura 6b).

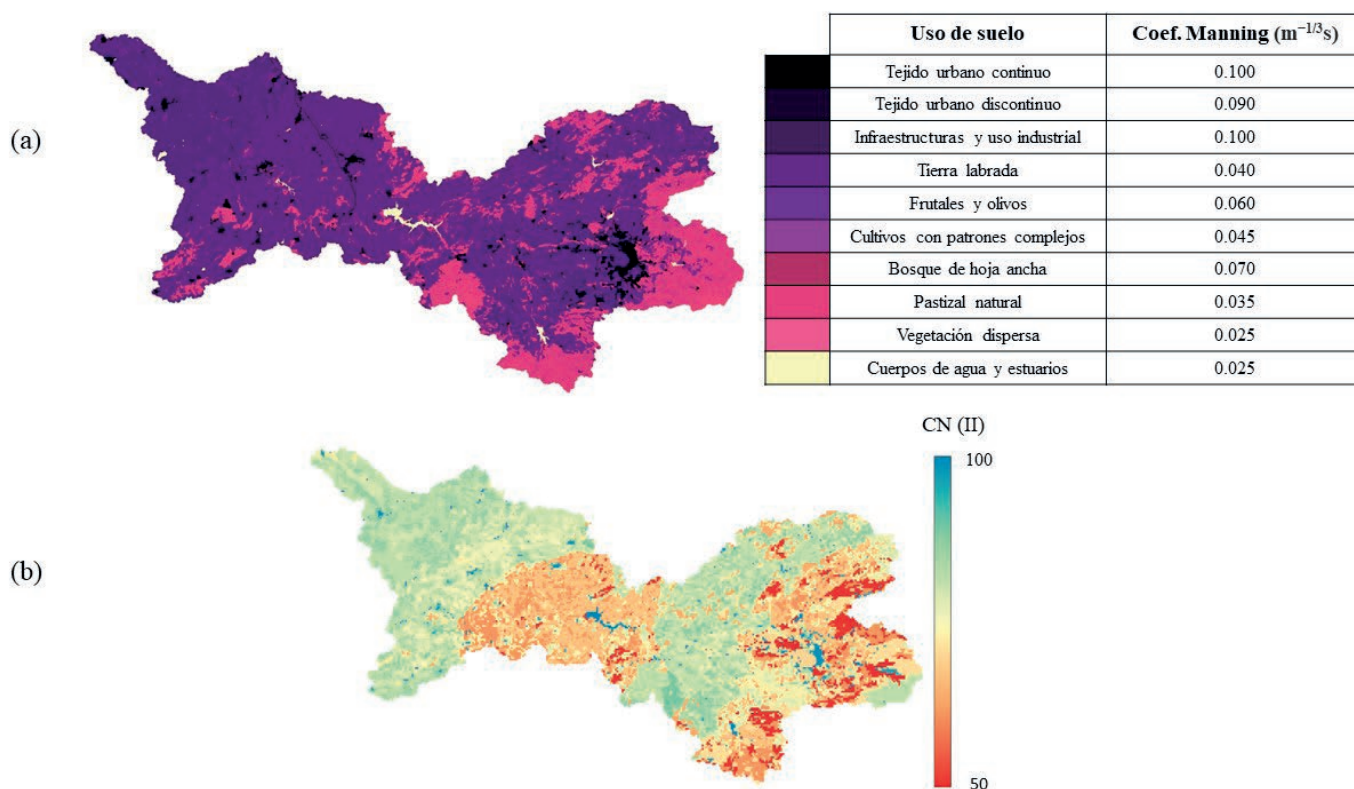


Figura 6 | Distribución espacial de (a) los usos de suelo y (b) valores de Número de Curva establecidos en el modelo. En el caso de los usos de suelo se ha añadido la equivalencia de cada uso de suelo con el coeficiente de rugosidad asumido en la modelización.

Para la definición de la lluvia de diseño se ha calculado el hietograma correspondiente a un periodo de retorno de 10 años. Este hietograma se estimó de acuerdo al método de bloques alternos, utilizando el procedimiento definido por la Instrucción 5.2-IC “Drenaje superficial” (Ministerio de Fomento; Dirección General de Carreteras, 2019). En lugar de establecer un hietograma constante para toda la cuenca, se ha definido sobre la cuenca una malla de 500 celdas de tamaño 5×5 km en las cuales, de manera independiente en cada celda, se ha obtenido un hietograma de duración igual a 72 horas con un intervalo de bloques de 2 horas. Así, se han generado 36 archivos ráster –uno por cada bloque del hietograma– con el valor de cada una de las celdas en cada uno de los bloques del hidrograma. Estos archivos ráster son utilizados para definir la lluvia de diseño de forma distribuida en el modelo numérico. Además, se ha introducido un factor reductor para transformar los valores puntuales de lluvia en valores areales sobre toda la cuenca, ya que es muy poco probable que se produzca la lluvia de 10 años de periodo de retorno de forma simultánea en toda una cuenca (Cea y Fraga, 2018). Para la evaluación de este factor se ha utilizado la fórmula de Témez incluida en la monografía del CEDEX “Recomendaciones para el cálculo hidrometeorológico en avenidas” (Ferrer-Polo, 2000). Si bien esta forma de definir la lluvia no se corresponde con ningún evento real, se considera adecuada para este caso de estudio con el que se pretende ejemplificar el funcionamiento del módulo de embalses.

Se han considerado tres hipótesis de cálculo representativas de las capacidades del módulo de embalses implementado. En todas ellas, la geometría del embalse ha sido definida a partir del MDT, tomando la superficie equivalente a un nivel de agua de 422 m, un valor ligeramente superior al NMN del embalse (421.06 m). Además de las tres hipótesis con embalse, se considera una “hipótesis 0” en la que no se incluye el embalse, y que ha sido utilizada para comparar los resultados obtenidos en las diferentes hipótesis:

- Hipótesis 0 (Hip. 0): Modelo sin embalse. No se considera el embalse de Iznájar en el modelo. Por lo tanto, en esta modelización numérica la representación del embalse queda limitada a las elevaciones proporcionadas por el MDT. Así, la laminación de la avenida queda condicionada al resguardo que existe entre la cota de coronación (426 m) y el nivel del embalse en el momento en el que se tomaron los datos de elevaciones (422 m).
- Hipótesis 1 (Hip. 1): Nivel inicial de embalse igual a la cota de alivio, con los aliviaderos abiertos totalmente. Solo se considera el desagüe de caudal a través de los aliviaderos. Dado que el nivel inicial del embalse coincide con el nivel de alivio, todo el volumen de agua que entra al embalse acaba por ser aliviado.
- Hipótesis 2 (Hip. 2): Nivel inicial de embalse igual a la cota de alivio, aliviaderos abiertos y tres desagües de fondo abiertos desde el inicio de la simulación. Esta hipótesis parte de las condiciones definidas en la Hip 1 pero añadiendo además la salida de caudal a través de tres de los desagües de fondo. Al existir este desagüe de caudal desde el instante inicial de la simulación, se producirá un resguardo que permitirá reducir el pico de caudal de entrada al embalse.
- Hipótesis 3 (Hip. 3): Nivel inicial de embalse igual a la cota de alivio y caudal de desagüe definido a partir de curva de desagüe *ad hoc*. En esta última hipótesis se considera una curva de desagüe directamente definida por el usuario. La capacidad de desagüe es ligeramente inferior a la Hip. 2. La curva ha sido definida en Iber como una tabla que relaciona nivel de agua con caudal de salida discretizándose la curva en intervalos de nivel iguales a 1 m. Cuando el nivel del embalse se encuentra comprendido entre dos intervalos de la tabla, el modelo interpola linealmente entre los dos valores de caudal establecidos (Figura 7).

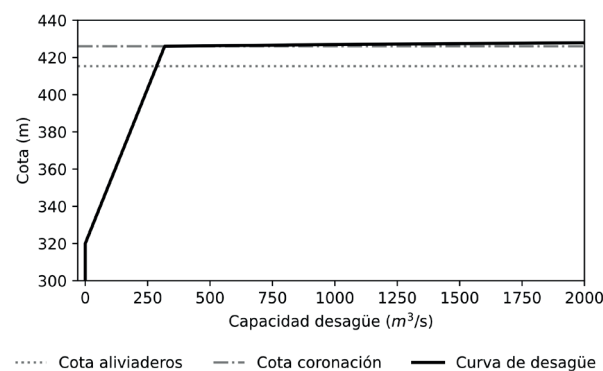


Figura 7 | Curva de desagüe definida *ad hoc* para la modelización de la Hipótesis 3.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 8 muestra los hidrogramas calculados en el punto de cierre de la cuenca (P1) y a la salida del embalse de Iznájar (P2), para cada una de las hipótesis consideradas. En el resultado de la Hip. 1 se puede observar como el primer pico del hidrograma en P1 coincide con el que se produce cuando no hay embalse (Hipótesis 0). Este primer pico en P1 está producido por la superficie de la cuenca ubicada aguas abajo del embalse, por lo que mientras no aumenta el nivel del embalse (provocando el desagüe por aliviaderos) las condiciones del modelo son las mismas que las del modelo sin embalse. El segundo pico del hidrograma en P1, en comparación con la Hip. 0, tiene un caudal punta menos pronunciado. Pese a que en esta hipótesis el nivel inicial del embalse se encuentra a la cota de vertido de los aliviaderos, se produce un cierto efecto laminador del embalse. En cuanto a la Hip. 2, se observa que la apertura de los desagües de fondo desde el inicio de la simulación provoca un aumento del primer pico del hidrograma en P1. Además, el caudal desaguado por los desagües de fondo desde el inicio del evento permite que el embalse cuente con un volumen de resguardo que da lugar a un segundo pico del hidrograma muy inferior al que se produce en las hipótesis Hip. 0 e Hip. 1. Por último, en la Hip. 3 el primer pico del hidrograma aumenta de forma análoga a lo visto en la Hip. 2, sin embargo, dado que en esta

hipótesis no se tiene en cuenta el desagüe por aliviaderos y que el nivel del embalse no alcanza la coronación del mismo, el segundo pico del hidrograma se ve completamente laminado por el embalse.

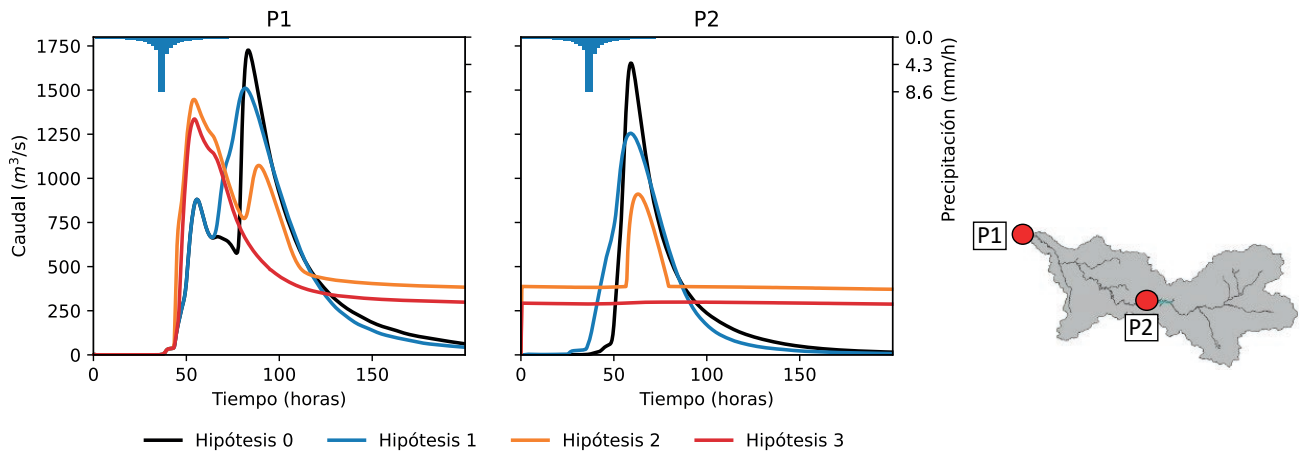


Figura 8 | Hidrogramas en el cierre de la cuenca (P1) y a la salida del embalse (P2) en las hipótesis de cálculo consideradas. En negro el resultado para la hipótesis 0 en la que no se considera el embalse; en azul, amarillo y rojo, los resultados obtenidos en las hipótesis de cálculo 1, 2 y 3, respectivamente.

La figura 9 presenta la variación del nivel del embalse (izquierda), junto con la capacidad de desagüe (derecha) de cada una de las tres hipótesis consideradas. Se puede observar cómo el nivel máximo del embalse en la Hip. 2 es inferior al de la Hip. 1, vertiendo apenas por aliviaderos gracias al resguardo generado por los desagües de fondo. Además, queda patente el efecto de los aliviaderos que no se ha considerado en la Hip. 3, donde el nivel del embalse se mantiene muy superior al obtenido en las hipótesis 2 y 1. El hecho de no considerar el vertido por aliviaderos en la Hip. 3 queda también claro en la relación cota-capacidad de desagüe, donde se observa que en las otras dos hipótesis el caudal de salida asciende rápidamente cuando se alcanza la cota de los aliviaderos. El nivel del embalse no se aproxima a la cota de coronación en ninguna de las hipótesis, por lo que no se ha producido sobrevertido por coronación.

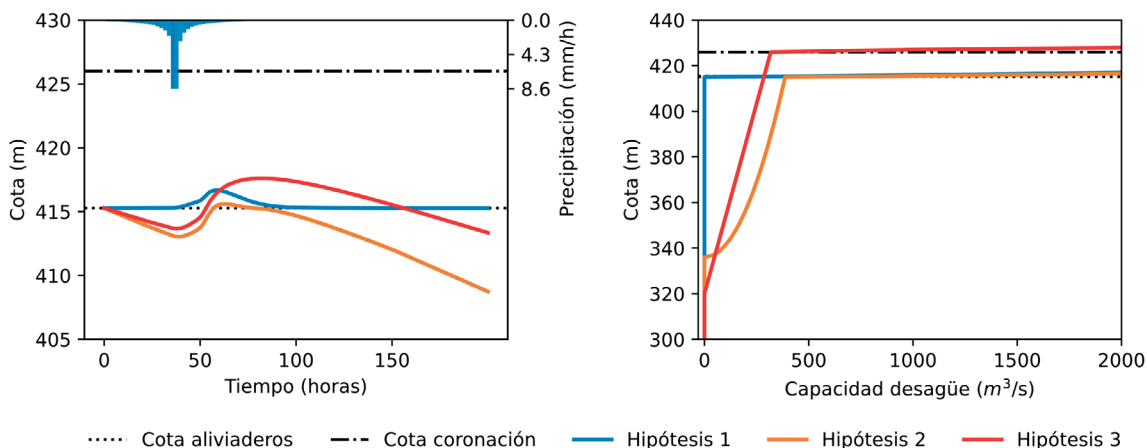


Figura 9 | A la izquierda, variación del nivel del embalse durante la simulación de las tres hipótesis de cálculo consideradas. A la derecha, relación cota-capacidad de desagüe de las tres hipótesis consideradas. En azul, amarillo y rojo, hipótesis 1, 2 y 3, respectivamente.

El efecto de la distribución de caudal a través del radio de desagüe aparece representado en la figura 10. En esta figura se presenta el resultado de calado, en el mismo paso de tiempo, para un modelo en el que no se incluye la distribución espacial

del caudal (sin Rd, izquierda) y el mismo caso añadiendo este reparto (con Rd, derecha). Sin la distribución del caudal de salida encontramos un máximo de calado igual a 4.9 m en el elemento en el que se sitúa el punto de desagüe (Pd). Mediante el reparto de caudal entre varios elementos, el calado máximo se reduce en más de la mitad hasta los 2.1 m. Sin embargo, el hecho de asumir esta distribución del caudal provoca que el modelo pierda veracidad en los elementos incluidos en el radio de desagüe. Esta simplificación tiene un carácter puramente numérico, ya que ayuda a evitar inestabilidades en el modelo y pasos de tiempo muy pequeños debido a la condición CFL. Se asume como válida dado que esta primera implementación de la modelización de embalses no está orientada al cálculo de fenómenos locales en embalses, si no a la modelización de su efecto laminador a escala de cuenca.

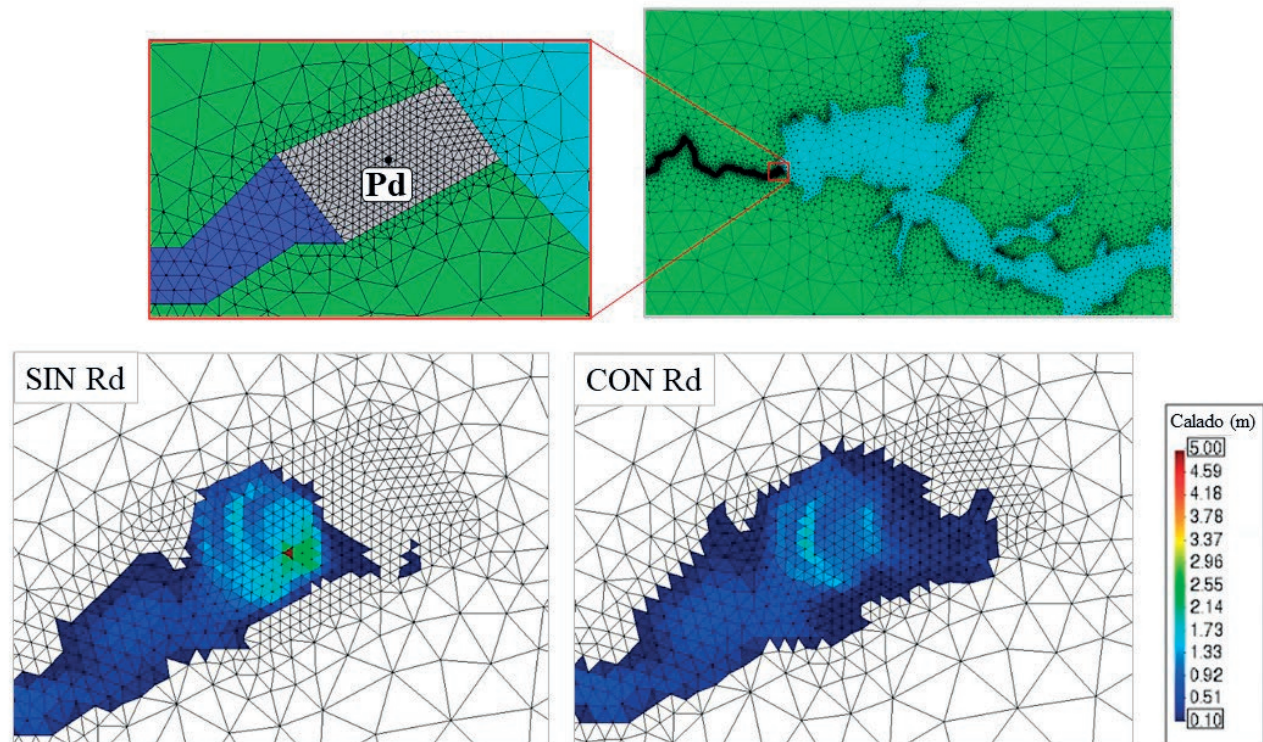


Figura 10 | Resultado de calado en un mismo paso de tiempo para un modelo en el que no se aplica el radio de desagüe -Rd- (izquierda) y el mismo modelo con reparto de caudal a través del Rd (derecha). Pd: Punto de desagüe.

En el postprocesado de los resultados en Iber se ha incorporado que, si se selecciona la visualización de la cota de agua en el análisis de la hidráulica del modelo, en la superficie del embalse se muestre un valor constante en toda la superficie e igual al nivel del embalse en cada paso de tiempo. En el caso de que se seleccione el calado en lugar de cota de agua, en la superficie del embalse se mostrará en todos los pasos de tiempo un valor de calado nulo.

CONCLUSIONES

En este estudio se han presentado las nuevas implementaciones llevadas a cabo en el software Iber para el cálculo del efecto laminador de los embalses, con el objetivo de mejorar las capacidades del modelo para la simulación hidrológica a escala de cuenca. Para ello se ha implementado la posibilidad de definir embalses como depósitos virtuales capaces de almacenar agua y regular el caudal que pasa a través de ellos. Además, se han definido herramientas que permiten establecer diferentes órganos de desagüe de la presa. Como caso de estudio se ha modelado la cuenca del río Genil y el embalse de Iznájar. Mediante la consideración de 3 hipótesis de cálculo se ha mostrado el efecto laminador que tiene el embalse y los diferentes órganos de desagüe de la presa. A

fecha de publicación de este artículo, se está trabajando en la inclusión de este nuevo desarrollo en las futuras versiones públicas del modelo Iber.

En la modelización hidrológica a nivel de cuenca, es imprescindible contar con una correcta representación del efecto de los embalses presentes en la cuenca, especialmente cuando estos condicionan fuertemente la laminación del caudal. La inclusión de este módulo de embalses en Iber elimina esta limitación del modelo y permite así no solo llevar a cabo simulaciones numéricas más fieles a la realidad, sino también simulaciones donde se consideren diferentes configuraciones de funcionamiento de los órganos de desagüe de los embalses.

AGRADECIMIENTOS

La investigación que aquí se presenta ha sido financiada por el proyecto EAPA_45/2018_AA-FLOODS.

REFERENCIAS

- Bellos, V., Papageorgaki, I., Kourtis, I., Vangelis, H., Kalogiros, I., Tsakiris, G. 2020. Reconstruction of a flash flood event using a 2D hydrodynamic model under spatial and temporal variability of storm. *Natural Hazards*, 101(3), 711–726. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03891-3>
- Bladé-Castellet, E., Cea, L., Corestein, G. 2014. Modelización numérica de inundaciones fluviales. *Ingeniería Del Agua*, 18(1), 68. <https://doi.org/10.4995/ia.2014.3144>
- 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 Metodos Numericos Para Calculo y Diseno En Ingenieria*, 30(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Cea, L., 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. <https://doi.org/10.1002/2014WR016547>
- Cea, L., Fraga, I. 2018. Incorporating Antecedent Moisture Conditions and Intraevent Variability of Rainfall on Flood Frequency Analysis in Poorly Gauged Basins. *Water Resources Research*, 54(11), 8774–8791. <https://doi.org/10.1029/2018WR023194>
- Cea, L., Legout, C., Darboux, F., Esteves, M., Nord, G. 2014. Experimental validation of a 2D overland flow model using high resolution water depth and velocity data. *Journal of Hydrology*, 513, 142–153. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.052>
- Cea, L., Garrido, M., Puertas, J., Jácome, A., Del Río, H., Suárez, J. 2010. Overland flow computations in urban and industrial catchments from direct precipitation data using a two-dimensional shallow water model. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 62(9), 1998–2008. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.746>
- Cea, Luis, Álvarez, M., Puertas, J. 2022. Estimation of flood-exposed population in data-scarce regions combining satellite imagery and high resolution hydrological-hydraulic modelling: A case study in the Licungo basin (Mozambique). *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 44, 101247. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101247>
- Cea, L., Vila, G., García-Alén, G., Puertas, J., Pena, L. 2022. Hydraulic Modeling of Bridges in Two-Dimensional Shallow Water Models. *Journal of Hydraulic Engineering*, 148(8), 6022006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001992](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001992)
- Costabile, P., Costanzo, C., Macchione, F. 2012. Comparative analysis of overland flow models using finite volume schemes. *Journal of Hydroinformatics*, 14(1), 122–135. <https://doi.org/10.2166/hydro.2011.077>
- European Union Copernicus Land Monitoring Service. 2018. European Union, Copernicus Land Monitoring Service. *Eur. Environ. Agency*.

- Fernández-Pato, J., Morales-Hernández, M., García-Navarro, P. 2018. Implicit finite volume simulation of 2D shallow water flows in flexible meshes. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 328, 1–25. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2017.08.050>
- Ferrer-Polo, F.J. 2000. *Recomendaciones para el cálculo hidrometeorológico de avenidas*. CEDEX. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.
- Fraga, I., Cea, L., Puertas, J. 2013. Experimental study of the water depth and rainfall intensity effects on the bed roughness coefficient used in distributed urban drainage models. *Journal of Hydrology*, 505, 266–275. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.10.005>
- Fraga, I., Cea, L., Puertas, J. 2019. Effect of rainfall uncertainty on the performance of physically based rainfall–runoff models. *Hydrological Processes*, 33(1), 160–173. <https://doi.org/10.1002/hyp.13319>
- Fraga, I., Cea, L., Puertas, J., Suárez, J., Jiménez, V., Jácome, A. 2016. Global sensitivity and GLUE-based uncertainty analysis of a 2D-1D dual urban drainage model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 21(5), 1–11. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001335](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001335)
- Francés, F., Vélez, J.I., Vélez, J.J. 2007. Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, 332(1–2), 226–240. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.06.032>
- García-Alén, G., García-Fonte, O., Cea, L., Pena, L., Puertas, J. 2021. Modelling Weirs in Two-Dimensional Shallow Water Models. *Water*, 13(16), 2152. <https://doi.org/10.3390/w13162152>
- García-Alén, G., González-Cao, J., Fernández-Nóvoa, D., Gómez-Gesteira, M., Cea, L., Puertas, J. 2022. Analysis of two sources of variability of basin outflow hydrographs computed with the 2D shallow water model Iber: Digital Terrain Model and unstructured mesh size. *Journal of Hydrology*, 612, 128182. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128182>
- García-Feal, O., González-Cao, J., Gómez-Gesteira, M., Cea, L., Domínguez, J.M., Formella, A. 2018. An accelerated tool for flood modelling based on Iber. *Water (Switzerland)*, 10(10), 1–23. <https://doi.org/10.3390/w10101459>
- IGN-CNIG. 2021. *Instituto Geográfico Nacional*. Centro de Descargas Del CNIG. <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>
- Kannan, N., Santhi, C., Williams, J.R., Arnold, J.G. 2007. Development of a continuous soil moisture accounting procedure for curve number methodology and its behaviour with different evapotranspiration methods. *Wiley InterScience*, 2274(November 2008), 2267–2274. <https://doi.org/10.1002/hyp.6811>
- Liang, D., Özgen, I., Hinkelmann, R., Xiao, Y., Chen, J.M. 2015. Shallow water simulation of overland flows in idealised catchments. *Environmental Earth Sciences*, 74(11), 7307–7318. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4744-5>
- Marcos, S.R., Belén, M.C., Ernest, B., Irene, S., Arnau, A., Hélène, R., Romu, R. 2020. NRCS-CN Estimation from Onsite and Remote Sensing Data for Management of a Reservoir in the Eastern Pyrenees. *Journal of Hydrologic Engineering*, 25(9), 5020022. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001979](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001979)
- Ministerio de Fomento; Dirección General de Carreteras. 2019. *NORMA 5.2–IC de la Instrucción de carreteras, Drenaje superficial*. Boletín Oficial del Estado, núm. 136, de 5 de junio de 2018, PP. 58028 a 58030. [https://www.boe.es/eli/es/res/2018/03/26/\(3\)](https://www.boe.es/eli/es/res/2018/03/26/(3))
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 2013. *Mapa de Caudales Máximos (CAUMAX, v2.3)*. CEDEX. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.
- Petaccia, G., Leporati, F., Torti, E. 2016. OpenMP and CUDA simulations of Sella Zerbino Dam break on unstructured grids. *Computational Geosciences*, 20(5), 1123–1132. <https://doi.org/10.1007/s10596-016-9580-5>
- Refsgaard, J.C. 1997. Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, 198(1–4), 69–97. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03329-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03329-X)
- Sánchez, F.J., Lastra, J. 2011. Guía metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables. *Madrid, Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino*.

Sanders, B.F., Schubert, J.E. 2019. PRIMo: Parallel raster inundation model. *Advances in Water Resources*, 126, 79–95. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.02.007>

Sanz-Ramos, M., Bladé, E., González-Escalona, F., Olivares, G., Aragón-Hernández, J.L. 2021. Interpreting the Manning Roughness Coefficient in Overland Flow Simulations with Coupled Hydrological-Hydraulic Distributed Models. *Water*, 13(23), 3433. <https://doi.org/10.3390/w13233433>

Sanz-Ramos, M., Cea, L., Bladé, E., López-Gómez, D., Sañudo, E., García-Alén, G., Aragón-Hernández, J.L. 2022. *Iber v3. Manual de referencia e interfaz de usuario de las nuevas implementaciones*. Centre Internacional de Mètodes Numèrics a l'Enginyeria (CIMNE). <https://doi.org/10.23967/iber.2022.01>

Uber, M., Nord, G., Legout, C., Cea, L. 2021. How do modeling choices and erosion zone locations impact the representation of connectivity and the dynamics of suspended sediments in a multi-source soil erosion model? *Earth Surf. Dynam.*, 9(1), 123–144. <https://doi.org/10.5194/esurf-9-123-2021>

Xia, X., Liang, Q., Ming, X. 2019. A full-scale fluvial flood modelling framework based on a high-performance integrated hydrodynamic modelling system (HiPIMS). *Advances in Water Resources*, 132, 103392. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.103392>