







# Evolución de la modelización numérica bidimensional del flujo en lámina libre a través del software Iber

## *Evolution of the two-dimensional numerical modelling of free surface flows through Iber software*

Marcos Sanz-Ramos <sup>a1\*</sup>, Esteban Sañudo <sup>b1</sup>, David López-Gómez <sup>c</sup>, Orlando García-Feal <sup>b2,d</sup>, Ernest Bladé <sup>a2</sup>, Luis Cea <sup>b3</sup>

<sup>a</sup>Institut Flumen, Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTech (UPC) – Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE), Gran Capità s/n, 08034 Barcelona, España.

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

<sup>c</sup>Centro de Estudios Hidrográficos. CEDEX. P.º Bajo de la Virgen del Puerto, 3. 28005 Madrid, España.

<sup>d</sup>Centro de Investigación Mariña, Universidade de Vigo, Environmental Physics Laboratory (CIM-EPhysLab), Campus Auga, Ourense, 32004, Spain

E-mail: <sup>a1\*</sup>marcos.sanz-ramo@upc.edu, <sup>b1</sup>e.sanudo@udc.es, <sup>c</sup>david.lopez@cedex.es, <sup>b2</sup>o.garcia.feal@udc.es, <sup>a2</sup>ernest.blade@upc.edu, <sup>b3</sup>luis.cea@udc.es

\*Autor para correspondencia

Recibido: 23/01/2025

Aceptado: 23/03/2025

Publicado: 30/04/2025

**Citar como:** Sanz-Ramos, M., Sañudo, E., López-Gómez, D., García-Feal, O., Bladé, E., Cea, L. 2025. Evolution of the two-dimensional numerical modelling of free surface flows through Iber software. *Ingeniería del agua*, 29(2), 114-131. <https://doi.org/10.4995/ia.2025.23259>

## RESUMEN

Iber es una herramienta de simulación hidráulica bidimensional surgida desde la academia para dar solución a problemas de ingeniería hidráulica y ambiental. Desde su nacimiento en 2010 se ha convertido en un software ampliamente aceptado para simular procesos hidrodinámicos de flujo en lámina libre. Este trabajo presenta la evolución de Iber y analiza las mejoras llevadas a cabo que actualmente permiten realizar simulaciones, completamente acopladas con la hidrodinámica, de transporte de sedimentos y calidad de aguas, de procesos hidrológicos a nivel de cuenca rural y urbana, de eco-hidráulica, etc. Los módulos y capacidades de cálculo implementados, así como las líneas de trabajo futuras, demuestran que la modelización hidrodinámica bidimensional todavía tiene un gran margen para el desarrollo de nuevas aplicaciones y mejoras. Iber sigue unas líneas de desarrollo con un enfoque eminentemente práctico, permitiendo a usuarios y usuarias realizar simulaciones cada vez más fidedignas al proceso físico a representar.

**Palabras clave** | Saint-Venant 2D; hidrodinámica; transporte; hidrología; Iber.

## ABSTRACT

*Iber is a two-dimensional hydraulic simulation tool developed from academia to solve problems in hydraulic and environmental engineering. Since its creation in 2010, it has become a widely accepted software for simulating hydrodynamic flow processes in free-surface flows. This work presents the evolution of Iber and analyzes the improvements that have been made, which now allow fully coupled simulations with hydrodynamics for sediment transport and water quality, hydrological processes at the rural and urban watershed level, eco-hydraulics, and more. The implemented modules and computational capabilities, as well as future lines of work, demonstrate that two-dimensional hydrodynamic modeling still has great potential for the development of new applications and improvements. Iber follows development paths with a strongly practical focus, allowing users to perform simulations that are increasingly faithful to the physical process being represented.*

**Key words** | Saint-Venant 2D; hydrodynamics; transport; hydrology; Iber.

## INTRODUCCIÓN

La simulación hidráulica bidimensional de flujo de agua someras es una técnica numérica actualmente consolidada, tanto en lámina libre como a presión. Existen en el mercado numerosos programas, tanto comerciales como de uso libre, que permiten caracterizar la dinámica del fluido (p. ej., velocidad, calado y presión). Entre los más populares destacan Hec-Ras, MIKE 21, CCHE2D, TELEMAC-2D, ISIS, SOBEK, BASEMENT, TUFLOW, FLO-2D, e Infoworks ICM (Tsakiris, 2014), demostrando ser herramientas de modelización hidráulica capaces de simular procesos de propagación de avenidas (Néelz y Pender, 2009, 2013), entre otros procesos hidrodinámicos o procesos que dependen de la hidrodinámica.

En 2010 se presentó públicamente el software Iber fruto de la unión de las herramientas existentes para el cálculo de flujo en aguas someras CARPA (Bladé, 2005) y Turbillon (Cea, 2005), y de su integración en el software de pre- y post-proceso GiD (Coll *et al.*, 2018). Iber surgió, por iniciativa del Centro de Estudios Hidrográficos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), a través de un consorcio de instituciones académicas y de investigación, entre las que se incluyen la Universidade da Coruña (UDC), la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) y el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE). Se ideó para ser fácil de usar por técnicos y especialistas en hidráulica, contando con una interfaz gráfica intuitiva, un flujo de trabajo sencillo y una capacidad de procesar resultados detallados que se pueden visualizar de forma gráfica y ser exportados a terceros programas.

Iber es una herramienta de modelización numérica especializada en la simulación de flujos de agua en ríos y estuarios desarrollada, principalmente, para estudiar procesos hidrodinámicos en aguas poco profundas. Distribuido gratuitamente ([www.iberaula.com](http://www.iberaula.com)), permite simular flujos permanentes y no permanentes, abordando de forma precisa situaciones complejas de flujo unidimensional y bidimensional. Ello queda patente en los distintos procesos de validación realizados en los trabajos previos (Bladé, 2005; Cea, 2005), así como en cumplimiento con los estándares propuestos por la Agencia del Medioambiente del Gobierno del Reino Unido (Flood and coastal erosion risk management research and development programme, 2025) para herramientas de modelización hidráulica (Cea *et al.*, 2020).

En el periodo 2010-2024 se han lanzado 31 versiones oficiales. Según Google Analytics, el número de descargas supera las 120 000 en más de 155 países. Cuenta con más de 39 000 usuarios registrados en [www.iberaula.com](http://www.iberaula.com), y cuya web tiene un tráfico que supera las 300 000 visitas únicas. Estos datos demuestran que se ha convertido en una herramienta clave para la ingeniería fluvial y la gestión de recursos hídricos, siendo ampliamente utilizada en estudios de dinámica fluvial, inundaciones, calidad del agua, procesos hidrológicos, drenaje urbano, erosión de suelos, eco-hidráulica, entre otros.

El presente trabajo tiene por objeto mostrar la evolución de Iber durante estos 15 primeros años de existencia. Se realiza un repaso desde su propósito y aplicaciones originales hasta las aplicaciones actuales y líneas de desarrollo futuras. Para ello se analizan en profundidad los módulos de cálculo y funcionales actuales, motivos para su desarrollo y aplicaciones. También se analiza, a través de un ejemplo, la evolución en términos de rendimiento global de la herramienta, desde el flujo de trabajo hasta los tiempos de computación.

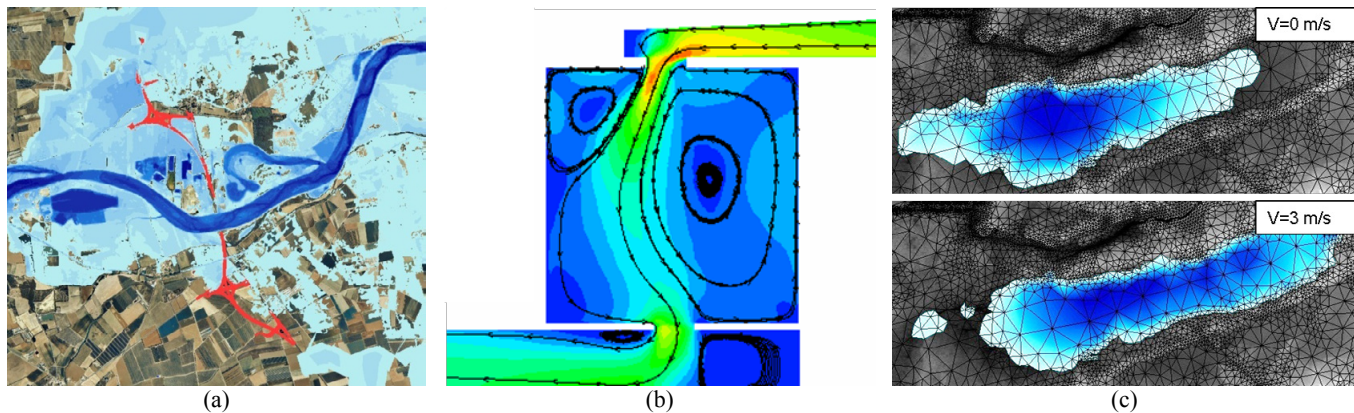
---

## EL SOFTWARE IBER

### Propósito y aplicaciones originales

Iber nació como herramienta numérica para la simulación del flujo de agua en lámina libre (Bladé *et al.*, 2014a). Estaba orientada –pero no limitada– a la modelización numérica de inundaciones fluviales (Bladé *et al.*, 2014b). Al tratarse de un modelo nacido desde la academia, su aplicación se enfocaba –y se sigue enfocando– a la investigación. Con el objetivo de representar adecuadamente flujos transcíticos (p. ej., resaltos hidráulicos), así como flujos en cauces torrenciales, regímenes irregulares y flujos turbulentos, Iber utiliza el método de volúmenes finitos y esquemas de Godunov (LeVeque, 2002; Toro, 2009) para resolver las ecuaciones de aguas poco profundas o *shallow water equations* bidimensionales (2D-SWE).

Es decir, Iber surgió como una herramienta de simulación numérica que permite predecir la evolución de variables hidráulicas como el calado, la velocidad promediada en la profundidad, el caudal, etc., considerando asimismo otras variables que influyen en la hidrodinámica, como la turbulencia o el viento, o dependientes de la hidrodinámica, como la fricción de fondo o el proceso de transporte de sedimentos. Este tipo de aproximación se muestra adecuada, en general, para la simulación del flujo en lámina libre en cauces naturales o canales y, en particular, para la delimitación de zonas inundables de carácter fluvial (máxima extensión, vía de intenso desagüe, etc.), corrientes de marea en estuarios, procesos de sedimentación y erosión por arrastre de partículas, flujos turbulentos y empuje del viento en masas de agua (Figura 1).



**Figura 1** | Aplicaciones originales de Iber: (a) simulación de inundaciones e interacción con estructuras, (b) flujo turbulento en un tanque de floculación, (c) efecto del viento en el desplazamiento de masas de agua.

La modificación de las 2D-SWE es necesaria para poder simular el efecto de la turbulencia (Cea *et al.*, 2006, 2007a, 2007b) y del viento (Bladé *et al.*, 2014a; Ramos-Fuertes *et al.*, 2013) con la incorporación de esfuerzos debidos a las tensiones turbulentas y el empuje del viento en masas de agua, respectivamente. Para ello es necesario añadir nuevos términos fuente en la ecuación de conservación de cantidad de movimiento o *momentum* (Bladé *et al.*, 2014a). En este sentido, la simulación del flujo a través de estructuras hidráulicas tipo compuerta, vertedero, compuerta-vertedero y puentes –que suele simularse como compuerta-vertedero– también requiere de la modificación del *momentum* y transferencia de caudal, ya que las 2D-SWE pierden validez al no producirse velocidad uniforme en la profundidad ni presión hidrostática (Bladé *et al.*, 2009; Castro-Orgaz *et al.*, 2015; García-Alén *et al.*, 2021). Asimismo, desde sus orígenes Iber realizaba una aproximación simplificada al proceso de transformación lluvia-escorrentía mediante un módulo primigenio para la simulación de procesos hidrológicos (Juárez *et al.*, 2014), para lo cual es necesario modificar la ecuación de conservación de masa.

## Interfaz gráfica y flujo de trabajo

La interfaz gráfica que utiliza Iber está basada en el programa GiD (Coll *et al.*, 2018), un software de pre- y post-proceso para herramientas de modelización numérica en 1D, 2D y 3D. Iber se distribuye como un *problemtyp* único dentro de la interfaz GiD (Figura S1). Aunque ambos tienen líneas de desarrollo propias, se han retroalimentado para conseguir un software robusto, ágil y amigable (Figura S2).

GiD fue empleado en una versión previa de Iber llamada CARPA (Bladé, 2005), así como en los proyectos RAMFLOOD y RAMWASS (RAMFLOOD Project, 2024; RAMWASS, 2024). Debido a ello, y unido a las necesidades del CEDEX para con la simulación de inundaciones y reproducción de la hidráulica en modelos reducidos, se optó por adaptar el código fuente a los requerimientos de GiD. La unión de CARPA y Turbillón implicó una reestructuración importante del código, ya que GiD es el encargado de generar los archivos de entrada de Iber en base a los datos asignados a la malla de cálculo a través de la interfaz gráfica. Durante el proceso de cálculo es Iber el que genera los archivos de resultados, que luego son visibles en GiD.

El flujo de trabajo de Iber se puede dividir en 3 bloques (Figura 2): la generación del modelo (pre-proceso), la simulación (cálculo) y el análisis de resultados (post-proceso). Este proceso ha ido evolucionando con nuevos subprocesos y mejoras en cada uno de los pasos, pero se sigue manteniendo en la actualidad debido a su simplicidad y robustez.

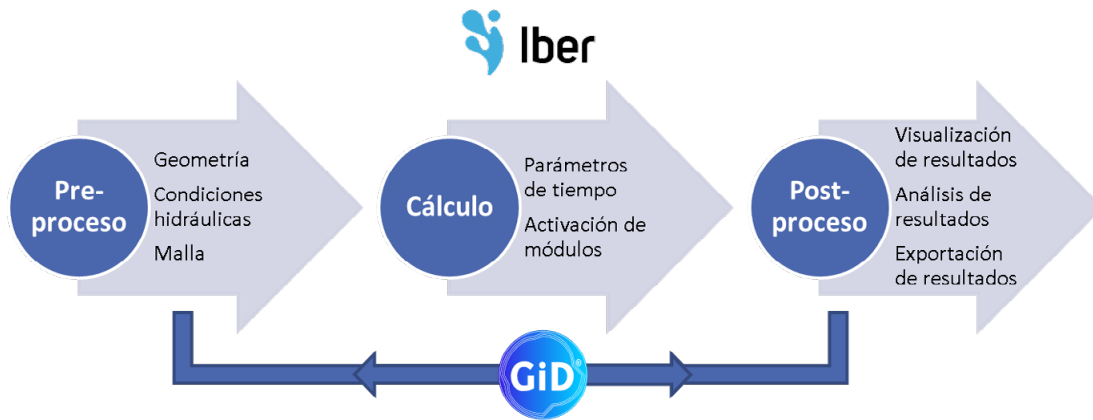


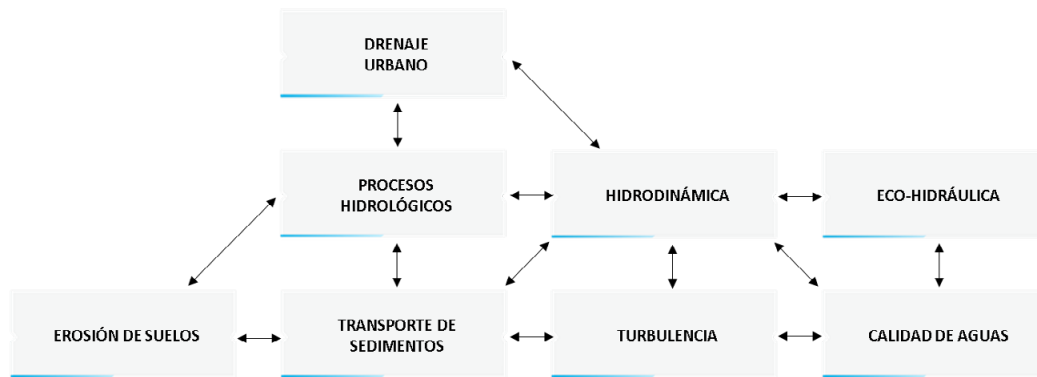
Figura 2 | Esquema del flujo de trabajo de Iber.

## EVOLUCIÓN

### Módulos principales de cálculo

El módulo principal de cálculo de Iber, y del que dependen el resto, es el módulo hidrodinámico (Figura 3). En él se resuelven las 2D-SWE, así como otras ecuaciones que permiten tener en cuenta procesos hidrodinámicos como el flujo a través de compuertas, vertederos, puentes, cubiertas, *culverts*, etc. El módulo hidrodinámico está en constante evolución con la incorporación de nuevos procesos que permiten llevar a cabo simulaciones más fidedignas al proceso físico. En la v2.0, Iber ya permitía calcular estructuras tipo puentes y *culverts*, así como considerar tramos cubiertos donde se produce flujo a presión mediante la extensión del método de la ranura de Preissmann (Preissmann, 1961), PSM en inglés, a dos dimensiones (Aragón-Hernández y Bladé, 2017; Bladé *et al.*, 2019b). Para la v2.5 se introdujo la posibilidad de implementar compuertas móviles con el tiempo y una condición de contorno tipo caudal escalonado, un elemento de utilidad para evaluar caudales crecientes en inundaciones fluviales o en ecohidráulica (Sanz-Ramos *et al.*, 2019a), así como la paralelización del código para realizar cálculos en la tarjeta gráfica, GPU en inglés, (García-Feal *et al.*, 2018). En la v3.0 se implementaron los módulos de Drenaje Urbano Dual (Aragón-Hernández, 2013; Aragón-Hernández y Bladé, 2017; Aranda *et al.*, 2021) y Erosión de Suelos (Cea *et al.*, 2024a; Uber *et al.*, 2021), así como mejoras en los módulos de Procesos Hidrológicos y Transporte de Sedimentos. Asimismo, en la v3.2 se realizaron mejoras notables en las estructuras tipo compuerta, vertedero, puentes, etc. (tipo condición interna), con la posibilidad de introducir las coordenadas de los puntos que se considerarían en el cálculo para evaluar las pérdidas de carga (García-Alén *et al.*, 2021), así como la transferencia de flujo a través de *culverts* (García-Alén *et al.*, 2023; Sopelana *et al.*, 2018).

Cabe destacar que hay cuatro módulos que interaccionan directamente con el Hidrodinámico modificando el comportamiento del flujo. Este sería el caso de la Turbulencia, que modifica el *momentum* mediante términos de disipación de energía. También lo haría el módulo de Transporte de Sedimentos (Bladé *et al.*, 2019a; Corestein *et al.*, 2014) y el de Erosión de Suelos (Cea *et al.*, 2024a), donde el fondo se vería modificado por procesos de erosión/sedimentación y, por ende, la hidrodinámica. Los Procesos Hidrológicos (Cea y Bladé, 2015) también modifican la hidrodinámica agregando agua por precipitación o eliminándola por pérdidas hidrológicas (infiltración, evapotranspiración, interceptación y retención), así como flujo subsuperficial que reincorporaría agua por exfiltración (Sanz-Ramos *et al.*, 2022a, 2022b). Finalmente, los procesos de Drenaje Urbano Dual, tanto con el motor



**Figura 3** | Esquema de módulos de cálculo de Iber 3.3.0 y su interrelación (adaptación de Sanz-Ramos *et al.*, 2022b).

propio (Aranda *et al.*, 2021) como con el acoplamiento entre Iber y SWMM (Sañudo *et al.*, 2020), modifican la hidrodinámica en aquellos puntos de transferencia de caudal entre la red de drenaje superficial y subterránea, y viceversa.

Analizando la evolución por módulos, los dos que acompañan a Iber desde su lanzamiento son el de Turbulencia y el de Transporte de Sedimentos, tanto por fondo como por suspensión (Arbat-Bofill *et al.*, 2014; Bladé *et al.*, 2014a, 2014b, 2019a; Cea *et al.*, 2014; Corestein *et al.*, 2014; Corestein y Bladé, 2013). Ambos provienen de desarrollos previos (Bladé, 2005; Cea, 2005), siendo el módulo de Turbulencia necesario para llevar a cabo simulaciones de transporte de sustancias por suspensión con garantías (Knight, 2013; Rastogi y Rodi, 1978; Rodi, 1980). Mientras que el módulo de Turbulencia, que incorpora diversos modelos de viscosidad turbulenta promediados en profundidad, no ha sufrido grandes evoluciones, el módulo de Transporte de Sedimentos ha ido incorporando diversas mejoras, así como la posibilidad de realizar los cálculos de forma paralelizada (Dehghan-Souraki *et al.*, 2024; López-Gómez *et al.*, 2024). Se han incorporado distintas formulaciones para evaluar la cantidad de sedimentos acarreado por el agua con granulometría uniforme, pasando de 5 en la v1.0 a 11 en la v3.0, hasta posibilitar el cálculo de transporte de sedimentos de fondo con granulometría no uniforme (Sanz-Ramos *et al.*, 2022b).

Si bien existía un módulo de Procesos Hidrológicos en la v1.0 de Iber, este era relativamente simple y solo permitía modificar la ecuación de conservación de masa mediante procesos de precipitación y pérdidas tipo infiltración. No fue hasta la v2.1 que el módulo se mejoró notablemente permitiendo no solo incorporar precipitación mediante hietogramas y rasters, sino también el cálculo del transporte por escorrentía superficial con un esquema numérico propio, el DHD (Cea y Bladé, 2015). Este esquema permite capturar la generación de escorrentía con límites secado-mojado de la décima de milímetro o inferior sin problemas de estabilidad numérica (Bermúdez *et al.*, 2017; Cea *et al.*, 2024b; Cea y Bladé, 2015; Fraga *et al.*, 2019; García-Alén *et al.*, 2022, 2023, 2024; Montalvo *et al.*, 2024; Olivares-Cerpa *et al.*, 2022; Sañudo *et al.*, 2020; Sanz-Ramos *et al.*, 2017, 2018, 2020a, 2021a, 2022a). En la v2.5 se lanzó también la versión paralelizada de este módulo (García-Feal *et al.*, 2018). Posteriormente, en la v3.0, se realizó una mejora substancial que convertiría este módulo en un modelo acoplado hidrológico-hidráulico completamente distribuido (Sanz-Ramos *et al.*, 2022b).

En orden cronológico, según su lanzamiento, estarían el resto de módulos oficiales de Iber: Calidad de Aguas (v2.3), Eco-hidráulica (v2.5), Erosión de Suelos (v3.0) y Drenaje Urbano Dual con un motor de cálculo propio (v3.0) y con un motor de cálculo acoplado con SWMM para el cálculo de flujo en la red de drenaje subterránea (v3.3).

El módulo de Calidad de Aguas (Cea *et al.*, 2016) se presentó como la principal novedad de la v2.3, lo que fue un salto natural en la simulación del transporte de sustancias que ya se venía haciendo con el módulo de Transporte de Sedimentos por carga en suspensión. Sin embargo, este módulo incorpora no solo el transporte por procesos de difusión/advección, sino también la reacción de la propia sustancia con procesos hidrodinámicos, con otras sustancias y agentes atmosféricos. En la versión original se podían simular la salinidad, temperatura, coliformes, oxígeno disuelto, DBOC y nitrógeno en sus 3 formas (orgánico, amoniacal y nitrato/nitritos). Desde la v2.6 hasta la v3.3, además de las sustancias anteriores, se pueden simular otras sustancias como el fósforo orgánico e inorgánico, fitoplancton, pH y metales, tanto en su versión secuencial como paralelizada (García-Feal *et al.*, 2020).

Los trabajos para convertir a Iber en una herramienta de simulación Eco-hidráulica se llevaron a cabo desde las primeras versiones (Bermúdez *et al.*, 2012; Puertas *et al.*, 2012), pero no fue hasta la v2.5 que se integró completamente en la interfaz (Sanz-Ramos *et al.*, 2019a). Con el fin de agilizar el cálculo de las variables eco-hidráulicas, se decidió integrarlo completamente en el código fuente de Iber en vez de realizar las operaciones directamente desde el post-proceso de la interfaz (aunque esta opción no se descarta). La versión 3.0 supuso un cambio substancial para con el proceso de cálculo con la integración del módulo Eco-hidráulico en la versión paralelizada (Sanz-Ramos *et al.*, 2023a). Con el fin de dotar de mayor versatilidad al módulo, en la v3.3 se reestructuró el código y se implementaron nuevos criterios de hábitat y curvas de idoneidad.

La v3.0 de Iber conllevó, a nivel de módulos de cálculo, el desarrollo del código para la simulación de procesos de Erosión de Suelos y de Drenaje Urbano Dual (Sanz-Ramos *et al.*, 2022b). Ambos se alimentan del módulo de Procesos Hidrológicos y, por tanto, permite un proceso de cálculo también de carácter acoplado y completamente distribuido.

El módulo de Erosión de Suelos resuelve la ecuación de conservación de sedimento, tanto para granulometrías uniformes como no uniformes, para sedimento cohesivo y no cohesivo. El movimiento de partículas de sedimento se produce por el impacto de la lluvia con el terreno y por fricción con el fondo (Costabile *et al.*, 2024; Uber *et al.*, 2021), permitiéndose el cálculo tanto en la versión secuencial como paralelizada (Cea *et al.*, 2024a).

El módulo de Drenaje Urbano Dual se desarrolló en versiones primigenias de Iber (Aragón-Hernández, 2013; Aragón-Hernández y Bladé, 2017), pero no fue hasta la v3.0 cuando se integró completamente en la software tras un profundo tratamiento del código y, sobre todo, el desarrollo necesario para integrarlo en la interfaz gráfica (Aranda *et al.*, 2023; Sanz-Ramos *et al.*, 2022b). Finalmente, en la v3.3 se dio un salto de calidad importante al acoplar dos motores de cálculo para realizar simulaciones de drenaje urbano dual junto con el software SWMM (Sañudo *et al.*, 2020). El drenaje de la red de pluviales superficial se resuelve con Iber y su módulo de Procesos Hidrológicos, mientras que el drenaje de la red subterránea se realiza con SWMM, existiendo flujo en ambas direcciones y, por tanto, convirtiendo este módulo en una herramienta de simulación de drenaje urbano dual completamente acoplada (Montalvo *et al.*, 2024; Sañudo *et al.*, 2024).

La Tabla S1 muestra las principales evoluciones y mejoras llevadas a cabo en cada uno de los módulos de cálculo de Iber. Los módulos se han ordenado cronológicamente según la versión en la que aparecieron por primera vez, así como sus actualizaciones, considerando únicamente la versión principal (i.e. X.Y.Z, siendo “Z” las versiones intermedias donde se corrigen errores y gazapos).

## Submódulos y otras funcionalidades para el cálculo

En la órbita del software se enmarcan una serie de submódulos de cálculo y funcionalidades que complementan los procesos de simulación de Iber. Este sería el caso del efecto del viento en masas de agua, que se puede simular desde la v1.0 añadiendo un esfuerzo cortante adicional al término fuente de las 2D-SWE. Fue mejorado en la v1.6 incluyendo la posibilidad de definir la altura del sensor de viento y el valor del coeficiente de la ecuación (Bladé *et al.*, 2014a). Para ello es necesario introducir las componentes  $x$  e  $y$  de la dirección del viento, ejerciendo un efecto en la hidrodinámica que permite desplazar masas de agua (Ramos-Fuertes *et al.*, 2013).

El cálculo de la vía de intenso desagüe (VID) está implementado desde la primera versión de Iber, en cumplimiento con los requerimientos de la normativa vigente en aquella época. Se trata de una funcionalidad que se mejoró en la v2.4.1, con una definición más precisa de la zona a evaluar, y en la v3.3.0, con un nuevo criterio. Así, Iber permite evaluar, sobre el mismo modelo, un escenario en el que la zona inundable se limita mediante un polígono, una línea (normalmente el eje del río) y un ancho o según un criterio hidráulico (Sanz-Ramos *et al.*, 2020b).

Otro submódulo de cálculo sería el de formación de brechas (Sanz-Ramos *et al.*, 2023b), que ya se incluyó en la v1.6 (versión beta). Esta funcionalidad modifica, según las especificaciones de la Guía Técnica (MITECO, 2021), la elevación de los nodos de la malla de cálculo a fin y efecto de generar una brecha que permita la transferencia del flujo. Es ampliamente utilizada para la simulación de rotura de presas y balsas (Álvarez *et al.*, 2017; Dysarz *et al.*, 2024; Sanz-Ramos *et al.*, 2019b, 2023b, 2024a). Las principales novedades se llevaron a cabo en la v2.0, con la posibilidad de realizar roturas encadenadas, y en la v3.0, con el cálculo selectivo de brechas para facilitar el cálculo multi-escenario en el mismo modelo.

La simulación de flujo a presión se puede llevar a cabo desde la v1.8 con la extensión del método de la ranura de Preissmann a dos dimensiones. Este submódulo permite limitar la altura del flujo y considerar una sobrepresión dentro del conducto, de modo que es posible considerar tramos cubiertos de canales, ríos, encauzamientos, etc. (Bladé *et al.*, 2019b). Desde la v3.0 también se puede simular el flujo a presión mediante la *two-component pressure approach*, TPA (Cea y López-Núñez, 2021), dotando al modelo de distintas aproximaciones (Sanz-Ramos *et al.*, 2022c).

Se han realizado diversas mejoras para agilizar los tiempos totales de cálculo y el espacio utilizado en disco por todos los archivos que Iber necesita para calcular y que genera como resultados, tanto principales como auxiliares. Desde la v1.0 hasta la v1.3 siempre se escribían los resultados en todos los elementos del dominio de cálculo, aunque no existiese flujo. Ello implicaba la generación de archivos de resultados relativamente grandes. Con la opción “No resultados en elementos secos” implementada en la v1.3, y habilitada por defecto a partir de la v1.7, se consigue una reducción notable del tamaño del archivo de resultados principal, sobre todo en modelos no optimizados (i.e. modelos cuya extensión de la inundación máxima está considerablemente alejada de los contornos del modelo). En esta línea, en la v2.5 se introdujo otra funcionalidad que permite a usuarios y usuarias no escribir resultados auxiliares (“Resultados ASCII”), y que está desactiva por defecto. Se trata de una serie de archivos que guardan información en bruto, no comprimidos, cuya función principal es permitir continuar el cálculo hidrodinámico de modelos ya calculados (i.e. la opción “Continuar” que hace las funciones de calentamiento del modelo o “hot start”) y ser accesibles para una revisión detallada. En contrapartida, en la v3.3.1, se implementó la funcionalidad de importar las condiciones iniciales hidrodinámicas (calado y velocidad) mediante archivos raster, lo que permite continuar la simulación desde cualquier situación hidrodinámica ya simulada.

El principal avance en términos de computación fue la paralelización del código de Iber empleando, para ello, técnicas de computación de alto rendimiento (o *High Performance Computing*, HPC en inglés), concretamente la *general-purpose computing on graphics processing unit* (GPGPU). Ello ha permitido pasar de realizar los cálculos en la unidad central de computación (CPU, en inglés) a realizarlos en la unidad gráfica de computación (GPU, en inglés). Con la GPU se obtienen reducciones en los tiempos de computación de la centésima parte de los obtenidos con la versión no paralelizada. Actualmente, todo ello se lleva a cabo para tarjetas gráficas NVIDIA, concretamente aquellas que cuentan con arquitectura CUDA (*compute unified device architecture*), y para todos los módulos de cálculo de Iber (Cea *et al.*, 2024a; Dehghan-Souraki *et al.*, 2024; García-Feal *et al.*, 2018, 2020; Sanz-Ramos *et al.*, 2023a). Esto ha supuesto un salto notable en el alcance, resolución y nivel de detalle de los modelos numéricos, pasando de modelos de unos pocos miles a millones de elementos con tiempos de computación asequibles (unas pocas horas) y densidades de malla superiores a los 5000 elementos por hectárea (Cea *et al.*, 2024b; Dehghan-Souraki *et al.*, 2024; Fernández-Nóvoa *et al.*, 2023; García-Alén *et al.*, 2023, 2024; Sanz-Ramos *et al.*, 2020b, 2023a). Ello está permitiendo generar desde sistemas de alerta temprana (Fernández-Nóvoa *et al.*, 2020; Fraga *et al.*, 2020, 2021) hasta sistemas que sirven para entrenar modelos basados en técnicas de inteligencia artificial (Farfán-Durán *et al.*, 2024; Farfán y Cea, 2021, 2022, 2023; López-Chacón *et al.*, 2023; Sanz-Ramos *et al.*, 2024a; Silva-Cancino *et al.*, 2022, 2024b, a). Adicionalmente, para aquellos usuarios que no cuenten con una GPU adecuada, Iber también implementa una paralelización para sistemas multi-CPU de memoria compartida basada en OpenMP (García-Feal *et al.*, 2018). Esto permite aprovechar los recursos que ofrecen los procesadores multinúcleo que se encuentran en la gran mayoría de equipos informáticos. No obstante, las mejoras típicas que se obtienen con la paralelización CPU son sensiblemente menores a las obtenidas con GPU.

A pesar de las mejoras en los tiempos de computación, la construcción del modelo sigue siendo un paso imprescindible y que necesariamente requiere tiempo para obtener un modelo óptimo desde el punto de vista computacional. En este sentido, el abanico de posibilidades que ofrece GiD como herramienta de pre-proceso es extensa. En la v1.0, además de construir el modelo de forma manual (puntos/nodos, líneas/aristas, superficies/elementos), ofrecía 20 alternativas para importar geometrías y mallas de cálculo. En la v3.3 este número se amplía hasta 34 posibilidades, desde geometrías basadas en CAD (*Computer Aided Design*), como \*.dxf y \*.shp, hasta el uso de librerías GDAL (*Geospatial Data Abstraction Library*), pasando por nubes de puntos (con posibilidad de triangulación posterior) y mallas de cálculo generadas con terceros programas, como STL (*Standard Triangle Language* o *Standard Tessellation Language*). La v1.0 de Iber ya ofrecía herramientas propias para la importación y tratamiento de modelos digitales del terreno (MDT) para la creación semi-automática de modelos numéricos. Este sería el caso de la funcionalidad RTIN (*Right-Triangulated Irregular Network*) que permite, a partir de un MDT, generar un modelo tan solo indicando el tamaño máximo y mínimo del lado del triángulo y una tolerancia entre la altura del nodo y la del MDT. En la v2.1, habida cuenta del

tamaño de los archivos y tiempo necesarios para su creación, se implementó la posibilidad de crear directamente mallas de cálculo, lo que mejoró notablemente dicha funcionalidad y redujo notablemente el tamaño del modelo. En este sentido, y en colación con los estándares actuales de generación de MDT a partir de datos LiDAR (*light detection and ranging*), se integró en Iber la herramienta “LAZtoMDT” creada por el CEDEX (2020), y que permite no solo cargar archivos de nubes de puntos bajo el estándar LAS (ficheros \*.las o su versión comprimida \*.laz) generados por el Instituto Geográfico Nacional (Instituto Geográfico Nacional, 2023), sino también generar un MDT filtrando todos los puntos que no sean del terreno y/o considerados como edificios (para generar modelos digitales de elevaciones, MDE).

La Tabla S2 muestra las principales evoluciones y mejoras llevadas a cabo en los principales submódulos y funcionalidades Iber. Éstos se han ordenado cronológicamente según la versión en la que aparecieron por primera vez, así como sus actualizaciones, considerando únicamente la versión principal (i.e. X.Y.Z, siendo “Z” las versiones intermedias donde se corrigen errores y gazapos).

## Esquemas y tratamientos numéricos

Como se ha indicado anteriormente, Iber emplea el método de volúmenes finitos (FVM, en inglés) para resolver las 2D-SWE. El FVM (LeVeque, 2002; Tan, 1992) es uno de los más extendidos y comúnmente utilizados en dinámica de fluidos computacional (CFD, en inglés) debido a que es un método especialmente adecuado para resolver ecuaciones de conservación como las SWE. Se caracteriza por permitir la discretización del dominio de cálculo empleando mallas tanto estructuradas como no estructuradas de  $n$  lados (aunque en Iber se limita a 3 y 4 lados) y por ser capaz de resolver flujo rápidamente variado (régimen subcrítico/supercrítico, cambios de régimen, etc.) y variable (resaltos móviles, ondas de choque no estacionarias, etc.). La resolución de las ecuaciones se realiza mediante esquemas de Godunov con el solucionador de Riemann aproximado de Roe (Roe, 1986; Toro, 2009), explícitos en tiempo, tanto de primer orden como de alta resolución (Bladé, 2005; Bladé y Gómez-Valentín, 2006; Cea, 2005). Se emplea un tratamiento descentrado del término fuente pendiente de fondo y centrado para el resto de términos fuente.

En la v1.0 Iber incorporaba 4 esquemas numéricos: uno de primer orden y tres de segundo orden, estos últimos de gran utilidad para simular convenientemente zonas de recirculación o con gradientes de velocidad importantes. El esquema de primer orden, que aún se conserva en las versiones modernas, es el esquema descentrado de Roe. Respecto a los esquemas de segundo orden tan solo se mantiene el de Minmod, mientras que el de Superbee y van Leer se ocultaron en la v2.0. A partir de la v2.1 se introdujo el esquema DHD (Cea y Bladé, 2015) orientado a mejorar el cálculo de Procesos Hidrológicos, concretamente el de transformación lluvia-escorrentía y propagación de escorrentía superficial en laderas, con calados del orden de milímetros o inferiores. Brevemente, este esquema fusiona el gradiente de presión hidrostática con la pendiente del lecho en un solo término que depende del gradiente de la superficie libre. Con este enfoque, cuando la superficie libre es horizontal, se obtiene de forma natural un equilibrio exacto entre la pendiente del lecho y el gradiente de presión hidrostática. Como resultado, se logran simulaciones más estables, eficientes y rápidas (hasta 1,5 veces) en comparación con otros esquemas FVM tradicionales (Cea y Bladé, 2015; Sanz-Ramos *et al.*, 2018, 2020a). En la v2.6 se mejoró este esquema para realizar cálculos a nivel de cuenca hidrográfica, dando lugar al esquema DHD [basin].

Para el módulo de Calidad de aguas (Cea *et al.*, 2016) existen, además de los esquemas numéricos para la resolución de las 2D-SWE, tres esquemas numéricos para la solución del transporte de sustancias por convección-difusión: primer orden, Gamma y MUSCL. El de primer orden es una discretización clásica *upwind*, mientras que Gamma y MUSCL son esquemas de segundo orden (LeVeque, 2002; Toro, 2009). En las primeras versiones se podía escoger el esquema a emplear por cada sustancia, así como otros parámetros comunes (el coeficiente de dispersión y número de Schmidt), lo que podía conllevar incongruencias numéricas. Es por ello que desde la v3.0 estos parámetros, así como el esquema numérico, son comunes para todas las sustancias simuladas por el módulo de Calidad de aguas.

El avance y evolución de frentes secado-mojado, y mojado-secado, suele ser un problema habitual en la resolución de los términos de conservación de masa, en especial en geometrías irregulares (Al-Ghosoun *et al.*, 2019; Cea *et al.*, 2007b; Liang y Borthwick, 2009). Su correcto tratamiento es esencial para evitar oscilaciones numéricas y la pérdida de masa. Por un lado, se debe definir el límite secado-mojado ( $\varepsilon_{wd}$ ) en función del dominio de cálculo, la geometría del problema a estudiar, el rango de calados esperados y el tamaño de malla. Todo ello tiene que estar enfocado a conseguir un compromiso entre el tiempo de cálculo

y la representatividad del fenómeno a reproducir. Valores reducidos de  $\varepsilon_{wd}$  ofrecen una mejor representatividad de la propagación del flujo en detrimento a un mayor tiempo de cálculo, mientras que valores elevados empeoran la representatividad, pero reducen el coste computacional al requerir menos operaciones por haber más elementos considerados como secos. Se trata de un parámetro esencial, por lo que se encuentra en todas las versiones de Iber.

En este sentido, cuando en un paso de tiempo un elemento tiene un calado pequeño podría, en el siguiente paso de tiempo, pasar a tener un calado negativo (porque sale más agua de la que entra). Es, por tanto, necesario definir un método de secado, es decir, un algoritmo que controle cómo se debe tratar el flujo cuando un elemento pasa de tener un valor de calado superior al umbral  $\varepsilon_{wd}$  (mojado) a un valor inferior de dicho umbral (seco). Hasta la v1.6, Iber no permitía seleccionar el método de secado, siendo empleado el método “por defecto” que consiste en almacenar, en caso de que se produzca, el valor del calado negativo. Dicho elemento vuelve a estar mojado cuando se llena hasta alcanzar el valor de  $\varepsilon_{wd}$ . Se trata de un método robusto, que conserva la masa y que apenas tiene repercusiones en el tiempo de cálculo. En la v1.7 se introdujeron los métodos de secado “hidrológico” y “estricto”. El primero consiste en realizar un escalado de los caudales de salida de tal manera que se evite la generación de calados por debajo de  $\varepsilon_{wd}$  sin incrementar el tiempo de computación, mientras que el segundo impide en todo momento que se produzcan calados negativos reduciendo el paso de tiempo, lo que puede incrementar notablemente el tiempo computacional.

---

## RENDIMIENTO

Con el objetivo de ejemplificar los avances llevados a cabo en Iber desde la v1.0, se ha realizado la simulación de una avenida tomando como caso de estudio real la desembocadura de la Riera de la Bisbal, un arroyo de carácter torrencial situado en el NE de la Península Ibérica que transcurre cerca de un entorno urbano (Figura S3). Para ello, se generó una geometría formada por cinco superficies, que luego se importó en modelos calculados con versiones posteriores, empleando la misma discretización del dominio de cálculo (37 297 elementos triangulares) y datos de entrada. De este modo fue posible simular la propagación de una avenida de diseño de 500 años de periodo de retorno con todas las versiones oficiales de Iber, tanto con el código secuencial como paralelizado, empleando la misma computadora y tarjeta gráfica.

El objetivo de este análisis es evaluar, independientemente de la computadora, cómo se ha optimizado Iber para llevar a cabo un tipo concreto de simulación (hidrodinámica, la base del resto de módulos de Iber). Los autores son conscientes de que las capacidades de los ordenadores también han evolucionado, por lo que un modelo calculado con Iber 1.0 en 2010 posiblemente requeriría, para la discretización empleada, tiempos de computación mayores a los presentados. Es por ello que los resultados que se muestran a continuación se expresan en porcentaje y se analizan de forma cualitativa. Los resultados cuantitativos se muestran en el Material Suplementario (Figura S4 y Figura S5).

## Construcción del modelo

El modelo se definió a partir de las herramientas propias de GiD, con la creación de polígonos que definen las distintas áreas de acuerdo a los usos del suelo y densidad de elementos que se asignarán con posterioridad. Este procedimiento se justifica por las dimensiones de la zona de estudio, de unas 19 ha, pero puede no resultar práctico para dominios mayores, en especial para tramos de río de varios kilómetros, ríos enteros o cuencas hidrográficas.

Para este fin, como se ha indicado, Iber ya dispone de herramientas de importación de geometrías/mallas que agilizan considerablemente la construcción del modelo. Asimismo, la asignación del coeficiente de rugosidad de Manning a través del concepto de “usos del suelo”, que en este modelo se implementó manualmente, puede hacerse automáticamente desde la primera versión de Iber mediante la importación de un archivo ráster.

## Rendimiento computacional y espacio en disco del modelo

Este apartado muestra, de forma indirecta, las mejoras realizadas en el código para obtener modelos numéricos óptimos desde el punto de vista computacional y de uso de recursos. Iber guarda cada modelo en una carpeta de extensión \*.gid, por lo que se

evaluó el espacio en disco de toda la carpeta, así como del archivo de resultados, en especial cuando la funcionalidad “No resultados en elementos secos” está activada y “Resultados ASCII” está desactivada.

El tiempo de computación de la simulación se ha dividido en cinco: el tiempo que tarda GiD en generar los archivos que requiere Iber para calcular ( $\Delta t_{ini}$ ), el tiempo que tarda Iber en leer los ficheros de entrada e inicializar la simulación ( $\Delta t_{check}$ ), el tiempo neto de computación ( $\Delta t_{com}$ ), el tiempo total de simulación ( $\Delta t_{sim} = \Delta t_{check} + \Delta t_{com}$ ) y el tiempo total desde que se lanza el cálculo y acaba la simulación ( $\Delta t_{TOT} = \Delta t_{sim} + \Delta t_{check}$ ).

Los cambios en  $\Delta t_{ini}$ , que se mantuvieron entre el 0.16 y el 0.5 % del  $\Delta t_{TOT}$ , no se pueden apreciar con el modelo construido porque el tiempo necesario para la creación de los archivos depende, principalmente, del número de elementos, tipo de condiciones de contorno y módulos de cálculo activados. Para modelos con un número de elementos del orden de centenas de miles o millones,  $\Delta t_{ini}$  adquiriría un peso relevante dentro del  $\Delta t_{TOT}$ , incluso superando a  $\Delta t_{com}$  en casos en los que el modelo esté optimizado. En este sentido, en la v3.3 se mejoró el código reduciendo  $\Delta t_{ini}$  a la décima parte.  $\Delta t_{check}$ , que corresponde a las comprobaciones de Iber para con las conectividades de los elementos y los vértices, suponía entorno al 3% de  $\Delta t_{TOT}$  hasta la v2.0. Las mejoras continuas han permitido reducir  $\Delta t_{check}$  a la décima parte, sobre todo a partir de la v2.1 con una aceleración considerable en las comprobaciones. Actualmente,  $\Delta t_{ini}$  y  $\Delta t_{check}$  son despreciables en términos de tiempos totales de computación ya que  $\Delta t_{com}$  supone más del 99% de  $\Delta t_{TOT}$  para la versión secuencial. Cuando se ejecutan los cálculos con la versión paralelizada,  $\Delta t_{ini}$  y  $\Delta t_{check}$  ganan peso (~5-10 %) porque  $\Delta t_{com}$  se reduce notablemente. En este caso, tan solo se obtuvieron aceleraciones en  $\Delta t_{com}$  del orden de 15-21 veces debido al reducido número de elementos. El rendimiento de la computación paralelizada con GPUs se incrementa notablemente cuando el número de elementos se incrementa y la frecuencia de escritura de resultados se reduce, obteniéndose aceleraciones superiores a 100 veces (García-Feal *et al.*, 2018; Sanz-Ramos *et al.*, 2023a).

El espacio en disco del modelo calculado con la v1.0 ocupa 660 MB, siendo un valor que se mantiene para modelos creados hasta la v2.4. Es a partir de Iber 2.5 cuando el tamaño del modelo se reduce notablemente (~60%). Esto se debe, principalmente, a que la opción “Resultados ASCII” está desactivada por defecto. Es decir, los resultados ASCII, a pesar de no incrementar el tiempo total de computación ( $\Delta t_{TOT}$ ), suponen un uso considerable de los recursos porque se trata de archivos sin compresión que proporcionan información de las variables hidráulicas para cada elemento y paso de tiempo. En este sentido, con la incorporación de la opción “No resultados en elementos secos” el archivo de resultados se reduce entorno al 35%. Es decir, con las versiones actuales de Iber los modelos alcanzan tasas de reducción del tamaño en disco de casi el 80% respecto a la versión original, a pesar de que el número de archivos contenidos en la carpeta del modelo ha pasado de 34 a más de 80 (sin activar módulos y funcionalidades adicionales). Esta optimización es fundamental para modelos de varios millones de elementos y/o cuando es necesario hacer simulaciones en cascada con metodologías tipo Montecarlo, generar una base de datos suficientemente representativa para alimentar modelos de inteligencia artificial o calibrar modelos numéricos (Bladé *et al.*, 2019a; Dehghan-Souraki *et al.*, 2024; Farfán-Durán *et al.*, 2024; García-Alén *et al.*, 2024; Silva-Cancino *et al.*, 2022, 2024a).

## VERSIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS

Iber, aun siendo un software nacido y desarrollado desde la academia, evoluciona para dar soluciones vanguardistas a problemas reales de ingeniería civil y ambiental. Como se ha mostrado, los campos de aplicación actuales de Iber abarcan la hidráulica (inundaciones fluviales, gestión de canales, etc.), la hidrología (ciclo hidrológico, inundaciones pluviales, etc.), la eco-hidráulica (planificación hidrológica, caudales ambientales, etc.), la gestión de cuencas (producción de sedimentos, control de inundaciones, etc.), la morfodinámica fluvial (transporte de sedimentos, procesos de erosión/sedimentación, etc.), el transporte y propagación de contaminantes (calidad de aguas), drenaje urbano dual (flujo superficial, flujo en red, flujo en tejado, etc.), entre otras.

Como versiones inminentes, fruto de diversos trabajos de investigación y transferencia de tecnología, se encontraría un nuevo módulo de transporte de flotantes, la paralelización del módulo Iber-SWMM (Sañudo *et al.*, 2025) y su integración Sistemas de Información Geográfica (SIG), un nuevo módulo hidrodinámico para flujos no Newtonianos, la adaptación del módulo de Drenaje Urbano para la simulación de redes de canales a cielo abierto y transporte de sedimentos, y el acoplamiento entre Iber y PEST. Asimismo, futuras versiones también dispondrán del código paralelizado para tarjetas gráficas AMD.

El módulo de transporte de madera, denominado IberWOOD (Ruiz-Villanueva *et al.*, 2014c), permite la simulación acoplada de la hidrodinámica y madera (troncos) tanto por flotación como por arrastre. El transporte de madera se simula mediante una malla lagrangiana donde los troncos se representan como líneas y cuyo movimiento está completamente acoplado con la hidrodinámica (Ruiz-Villanueva *et al.*, 2014a, 2014a, 2015, 2016).

La integración del motor Iber-SWMM en un sistema de información geográfica de uso libre como QGIS (Sañudo-Costoya *et al.*, 2024), a través del plugin Giswater (Torret y Medina, 2014), permitirá una definición acoplada de todos los elementos del drenaje urbano, a partir de bases de datos georreferenciadas existentes, y una visualización avanzada de los resultados hidráulicos, tanto en superficie (mapas de profundidades, velocidades o peligrosidades) como en la red de drenaje (vertidos cerca de masas de agua o inundaciones de arquetas).

La simulación de flujos no Newtonianos se está llevando a cabo mediante la adaptación del esquema numérico de Roe, concretamente con cambios en los términos fuente del *momentum* (Sanz-Ramos *et al.*, 2023d) y, además, la incorporación de diferentes modelos reológicos (Sanz-Ramos *et al.*, 2023c). Este nuevo módulo, denominado IberNNF, permite simular el estado dinámico y estático de fluidos –no agua– obteniendo una superficie libre del flujo no horizontal, característico de fluidos no Newtonianos, incluso en geometrías irregulares y pendientes pronunciadas. Los campos de aplicación van desde la simulación de avalanchas de nieve (Sanz-Ramos *et al.*, 2021b, 2023d), rotura de presas y propagación de relaves mineros (Sanz-Ramos *et al.*, 2024b, c) y flujos hiperconcentrados (Ruiz-Villanueva *et al.*, 2019), pero también puede aplicarse a flujos de derrubio, lahares, etc.

Actualmente se están llevando a cabo mejoras en el módulo de Drenaje Urbano que permitirán, por un lado, resolver la hidrodinámica en canales abiertos como cerrados con geometrías rectangulares, circulares y trapezoidales y, por otro lado, integrar el módulo de Transporte de Sedimentos para realizar simulaciones completamente acopladas en 1D.

El acoplamiento de Iber con algoritmos de optimización se está llevando a cabo mediante el módulo Iber-PEST (García-Alén *et al.*, 2024), que permite abordar el problema de calibrar modelos físicamente basados en tiempos de computación reducidos. Todo el proceso de calibración, completamente integrado en la interfaz de Iber, se sintetiza en la definición de los parámetros a calibrar, datos observados (p. ej., un hidrograma) y los parámetros de PEST (Doherty, 2004) para alcanzar el mejor ajuste. Cuando se alcanza el valor objetivo, el proceso de simulación se detiene proporcionando los parámetros hidrológicos e hidráulicos que mejor se ajustan según los datos proporcionados y criterios fijados.

---

## CONCLUSIONES

Iber es una herramienta de modelización numérica bidimensional del flujo en lámina libre nacida y evolucionada desde la academia que actualmente ofrece soluciones vanguardistas a problemas de ingeniería hidráulica, hidrológica y ambiental. En el periodo 2010-2024 se han lanzado 31 versiones en las que se han incluido, además de los módulos originales (hidrodinámica, turbulencia y transporte de sedimentos), nuevas capacidades de cálculo que permiten llevar a cabo de simulaciones cada vez más complejas. Destacan la simulación de procesos hidrológicos-hidráulicos completamente distribuidos a nivel de cuenca rural y urbana, la evaluación y propagación de contaminantes en ríos y estuarios, la determinación del hábitat potencial útil para peces y su evolución espacio-temporal, la estimación de la capacidad de generación y arrastre de sedimentos en cuencas, el drenaje urbano dual, la rotura de presas y balsas, entre otras.

La evolución de Iber no se limita al desarrollo, validación y aplicación de nuevos módulos de cálculo, ya que también ha ido mejorando en términos de tiempos computacionales y espacio en disco. La versión 1.3 permitió reducir el tamaño del archivo de resultados en un 35% con la funcionalidad “No resultados en elementos secos”, llegando actualmente casi al 50%. A partir de la v2.0, y en especial en la v2.5 con la no escritura de archivos ASCII, el tamaño de los modelos se redujo más de la mitad manteniendo el mismo tamaño en el archivo de resultados. La v2.5 también supuso una mejora substancial en los tiempos computacionales con la irrupción de la versión paralelizada, consiguiendo aceleraciones superiores a 100 veces.

Los módulos y capacidades de cálculo implementados, así como las líneas de trabajo futuras, demuestran que la modelización hidrodinámica bidimensional todavía tiene un gran potencial de desarrollo. Iber sigue líneas de desarrollo con una visión eminentemente práctica, permitiendo a usuarios y usuarias realizar simulaciones cada vez más fidedignas al proceso físico

a representar. Y todo ello, se puede hacer con una única herramienta numérica, empleando el mismo flujo de trabajo para simular procesos hidrodinámicos cada vez más complejos y cuyas capacidades están a la par de otras herramientas numéricas existentes.

---

## AGRADECIMIENTOS

La evolución de Iber a lo largo de sus 15 años de vida ha ido a distintas velocidades. El soporte económico para su desarrollo ha sido variable y discontinuo, condicionado por los ciclos económicos. El desarrollo y mantenimiento de la herramienta ha sido posible, en parte, gracias a la ilusión y el esfuerzo de muchas personas integradas permanentemente o temporalmente en los grupos GEAMA, Flumen y CIMNE, a los que los autores quieren mostrar su agradecimiento. Asimismo, los autores quieren agradecer la financiación recibida a través distintos proyectos por parte del Centro de Estudios Hidrográficos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), la Dirección General del Agua (DGA) y la Agencia Estatal de Investigación (AEI). Esta publicación forma parte del proyecto “DRAIN - Digital RAIN. Un modelo integrado de drenaje urbano” (CPP2021-008756) financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades/Agencia Estatal de Investigación/10.13039/501100011033/ y por el “Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia de España: Next Generation EU/PRTR de la Unión Europea”. O. García-Feal ha contado con el apoyo del contrato postdoctoral “Juan de la Cierva” (JDC2022-048667-I), financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea “NextGenerationEU”/PRTR.

---

## MATERIAL SUPLEMENTARIO

El material suplementario está disponible en <https://polipapers.upv.es/index.php/IA/article/view/23259/17370>

---

## REFERENCIAS

- Al-Ghosoun, A., Herty, M., Seaid, M. 2019. A new numerical treatment of moving wet/dry fronts in dam-break flows, *J. Appl. Math. Comput.*, 59, 489–516, <https://doi.org/10.1007/s12190-018-1189-5>
- Álvarez, M., Puertas, J., Peña, E., Bermúdez, M. 2017. Two-Dimensional Dam-Break Flood Analysis in Data-Scarce Regions: The Case Study of Chipembe Dam, Mozambique, *Water*, 9, 432, <https://doi.org/10.3390/w9060432>
- Aragón-Hernández, J.L. 2013. *Modelación numérica integrada de los procesos hidráulicos en el drenaje urbano*. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya. <https://doi.org/10.5821/dissertation-2117-95059>
- Aragón-Hernández, J.L., Bladé, E. 2017. Modelación numérica de flujo mixto en conductos cerrados con esquemas en volúmenes finitos. *Tecnol. y ciencias del agua*, 08, 127–142, <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-03-08>
- Aranda, J.Á., Beneyto, C., Sánchez-Juny, M., Bladé, E. 2021. Efficient Design of Road Drainage Systems, *Water*, 13, 1661, <https://doi.org/10.3390/w13121661>
- Aranda, J.Á., Sánchez-Juny, M., Sanz-Ramos, M., Beneyto, C. 2023. Design of Drainage Downspouts Systems over a Road Embankment, *Water*, 15, 3529, <https://doi.org/10.3390/w15203529>
- Arbat-Bofill, M., Palau, A., Sánchez-Juny, M., Bladé, E., Niñerola, D., Dolz Ripollés, J. 2014. Hydrodynamics of Ribarroja Reservoir (Ebro River, Spain): Water temperature, water velocities and water age. In *Proceeding of the International Conference on Fluvial Hydraulics (River Flow 2014)*. Lausanne: Taylor & Francis Group (pp. 1737-1744). <https://doi.org/10.13140/2.1.3271.5522>
- Bermúdez, M., Cea, L., Puertas, J., Sopenana, J., López, F., Vigo, M.Á. 2012. Desarrollo de una herramienta para la determinación del Hábitat fluvial con Iber, in: *I Workshop Iber 2012*.

- Bermúdez, M., Neal, J.C., Bates, P.D., Coxon, G., Freer, J.E., Cea, L., Puertas, J.J., Bermudez, M., Neal, J.C., Bates, P.D., Coxon, G., Freer, J.E., Puertas, J.J., Bermúdez, M., Neal, J.C., Bates, P.D., Coxon, G., Freer, J.E., Cea, L., Puertas, J.J. 2017. Quantifying local rainfall dynamics and uncertain boundary conditions into a nested regional-local flood modelling system, *Water Resour. Res.*, 53, 2770–2785, <https://doi.org/10.1002/2016WR019903>
- Bladé, E. 2005. *Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado con esquemas en volúmenes finitos en una y dos dimensiones*, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.
- Bladé, E., Gómez-Valentín, M. 2006. Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado en una y dos dimensiones, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. *Monografía CIMNE n° 97*, Junio 2006, 227 pp.
- Bladé, E., Sánchez-Juny, M., Sánchez, H.P., Niñerola, D., Gómez-Valentín, M. 2009. *Modelación numérica en ríos en régimen permanente y variable una visión a partir del modelo HEC-RAS*, Edicions UPC.
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., Coll, A. 2014a. Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Rev. Int. Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ing.*, 30, 1–10, <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G. 2014b. Modelización numérica de inundaciones fluviales. *Ingeniería del agua*, 18, 68, <https://doi.org/10.4995/ia.2014.3144>
- Bladé, E., Sánchez-Juny, M., Arbat, M., Dolz, J. 2019a. Computational Modeling of Fine Sediment Relocation Within a Dam Reservoir by Means of Artificial Flood Generation in a Reservoir Cascade. *Water Resour. Res.*, 55, 3156–3170, <https://doi.org/10.1029/2018WR024434>
- Bladé, E., Sanz-Ramos, M., Dolz, J., Expósito-Pérez, J., Sánchez-Juny, M. 2019b. Modelling flood propagation in the service galleries of a nuclear power plant. *Nucl. Eng. Des.*, 352, 110180, <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.110180>
- Castro-Orgaz, O., Roldán, J., Dolz, J. 2015. Resalto Hidráulico Ondulatorio. *Ingeniería del Agua*, 19, 63, <https://doi.org/10.4995/ia.2015.3321>
- Cea, L. 2005. *An unstructured finite volume model for unsteady turbulent shallow water flow with wet-dry fronts: numerical solver and experimental validation*, Tesis Dr. Universidad da Coruña.
- Cea, L., Bladé, E. 2015. A simple and efficient unstructured finite volume scheme for solving the shallow water equations in overland flow applications. *Water Resour. Res.*, 51, 5464–5486, <https://doi.org/10.1002/2014WR016547>
- Cea, L., López-Núñez, A. 2021. Extension of the two-component pressure approach for modeling mixed free-surface-pressurized flows with the two-dimensional shallow water equations. *Int. J. Numer. Methods Fluids*, 93, 628–652, <https://doi.org/10.1002/flid.4902>
- Cea, L., French, J.R., Vázquez-Cendón, M.E. 2006. Numerical modelling of tidal flows in complex estuaries including turbulence: An unstructured finite volume solver and experimental validation. *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 67, 1909–1932, <https://doi.org/10.1002/nme.1702>
- Cea, L., Pena, L., Puertas, J., Vázquez-Cendón, M.E., Peña, E. 2007a. Application of Several Depth-Averaged Turbulence Models to Simulate Flow in Vertical Slot Fishways. *J. Hydraul. Eng.*, 133, 160–172, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:2\(160\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:2(160))
- Cea, L., Puertas, J., Vázquez-Cendón, M.E. 2007b. Depth averaged modelling of turbulent shallow water flow with wet-dry fronts. *Arch. Comput. Methods Eng.*, 14, 303–341, <https://doi.org/10.1007/s11831-007-9009-3>
- Cea, L., Bladé, E., Corestein, G., Fraga, I., Espinal, M., Puertas, J. 2014. Comparative analysis of several sediment transport formulations applied to dam-break flows over erodible beds, in: *EGU General Assembly 2014*.

- Cea, L., Bermúdez, M., Puertas, J., Bladé, E., Corestein, G., Escolano, E., Conde, A., Bockelmann-Evans, B., Ahmadian, R. 2016. IberWQ: new simulation tool for 2D water quality modelling in rivers and shallow estuaries. *J. Hydroinformatics*, 18, 816–830, <https://doi.org/10.2166/hydro.2016.235>
- Cea, L., Bladé, E., Sanz-Ramos, M., Fraga, I., Sañudo, E., García-Feal, O., Gómez-Gesteira, M., González-Cao, J. 2020. *Benchmarking of the Iber capabilities for 2D free surface flow modelling*, Universidade da Coruña. Servizo de Publicacións, 52 pp., <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497640>
- Cea, L., García-Feal, O., Nord, G., Piton, G., Legouët, C. 2024a. Implementation of a GPU-enhanced multiclass soil erosion model based on the 2D shallow water equations in the software Iber. *Environ. Model. Softw.*, 179, 106098, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.106098>
- Cea, L., Álvarez, M., Puertas, J. 2024b. Using integrated hydrological–hydraulic modelling and global data sources to analyse the February 2023 floods in the Umbeluzi Catchment (Mozambique). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 24, 225–243, <https://doi.org/10.5194/nhess-24-225-2024>
- CEDEX. 2020. Manual CEDEX\_LAZtoMDT.v.1.0, 5 pp.
- Coll, A., Pasenau, M., Escolano, E., Perez, J.S., Melendo, A., Monros, A., Gárate, J. 2018. [www.gidhome.com](http://www.gidhome.com)
- Corestein, G., Bladé, E. 2013. Validación del módulo de transporte de sedimentos de fondo - Modelo Iber, in: *III Jornadas de Ingeniería del Agua: la protección contra los riesgos hídricos*, 27–34.
- Corestein, G., Bladé, E., Niñerola, D. 2014. Modelling bedload transport for mixed flows in presence of a non-erodible bed layer, in: *River Flow 2014*, 1611–1618, <https://doi.org/10.1201/b17133-214>
- Costabile, P., Cea, L., Barbaro, G., Costanzo, C., Llana, M., Vericat, D. 2024. Evaluation of 2D hydrodynamic-based rainfall/runoff modelling for soil erosion assessment at a seasonal scale. *J. Hydrol.*, 130778, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130778>
- Dehghan-Souraki, D., López-Gómez, D., Bladé-Castellet, E., Larese, A., Sanz-Ramos, M. 2024. Optimizing sediment transport models by using the Monte Carlo simulation and deep neural network (DNN): A case study of the Riba-Roja reservoir, *Environ. Model. Software*, 175, 105979, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.105979>
- Doherty, J. 2004. PEST model-independent parameter estimation user manual, Watermark Numer. Comput. Brisbane, Aust., 3338, 3349.
- Dysarz, T., Sanz-Ramos, M., Wicher-Dysarz, J., Jaskuła, J. 2024. Potential effects of internal dam-break in Stare Miasto Reservoir in Poland. *J. Hydrol. Reg. Stud.*, 53, 101801, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101801>
- Farfán-Durán, J.F., Heidari, A., Dhaene, T., Couckuyt, I., Cea, L. 2024. Surrogate-Assisted Evolutionary Algorithm for the Calibration of Distributed Hydrological Models Based on Two-Dimensional Shallow Water Equations. *Water*, 16, 652, <https://doi.org/10.3390/w16050652>
- Farfán, J.F., Cea, L. 2021. Coupling artificial neural networks with the artificial bee colony algorithm for global calibration of hydrological models. *Neural Comput. Appl.*, <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05601-3>
- Farfán, J.F., Cea, L. 2022. Improving the predictive skills of hydrological models using a combinatorial optimization algorithm and artificial neural networks. *Model. Earth Syst. Environ.*, 9, 1103–1118, <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01540-1>
- Farfán, J.F., Cea, L. 2023. Regional streamflow prediction in northwest Spain: A comparative analysis of regionalisation schemes. *J. Hydrol. Reg. Stud.*, 47, 101427, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101427>
- Fernández-Nóvoa, D., García-Feal, O., González-Cao, J., de Gonzalo, C., Rodríguez-Suárez, J.A., del Portal, C.R., Gómez-Gesteira, M. 2020. MIDAS: A New Integrated Flood Early Warning System for the Miño River. *Water (Switzerland)*, 12, <https://doi.org/10.3390/W12092319>

- Fernández-Nóvoa, D., González-Cao, J., Figueira, J.R., Catita, C., García-Feal, O., Gómez-Gesteira, M., Trigo, R.M. 2023. Numerical simulation of the deadliest flood event of Portugal: Unravelling the causes of the disaster. *Sci. Total Environ.*, 896, 165092, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165092>
- Flood and coastal erosion risk management research and development programme. <https://www.gov.uk/government/organisations/flood-and-coastal-erosion-risk-management-research-and-development-programme>, last access: 1 February 2025.
- Fraga, I., Cea, L., Puertas, J. 2019. Effect of rainfall uncertainty on the performance of physically-based rainfall-runoff models Running title Keywords Acknowledgments 1 Introduction. *Hydrol. Process.*, 33, 160–173, <https://doi.org/10.1002/hyp.13319>
- Fraga, I., Cea, L., Puertas, J. 2020. MERLIN: a flood hazard forecasting system for coastal river reaches. *Nat. Hazards*, 100, 1171–1193, <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03855-7>
- Fraga, I., Cea, L., Puertas, J., Mosqueira, G., Quinteiro, B., Botana, S., Fernández, L., Salsón, S., Fernández-García, G., Taboada, J. 2021. MERLIN: Una nueva herramienta para la predicción del riesgo de inundaciones en la demarcación hidrográfica Galicia-Costa. *Ingeniería del agua*, 25, 215, <https://doi.org/10.4995/ia.2021.15565>
- García-Alén, G., García-Fonte, O., Cea, L., Pena, L., Puertas, J. 2021. Modelling Weirs in Two-Dimensional Shallow Water Models. *Water*, 13, 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. *J. Hydrol.*, 612, 128182, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128182>
- García-Alén, G., García-Feal, O., Cea, L., Puertas, J. 2023. Implementación de embalses en cálculos hidrológicos con Iber. *Ingeniería del Agua*, 27, 59–72, <https://doi.org/10.4995/ia.2023.18750>
- García-Alén, G., Montalvo, C., Cea, L., Puertas, J. 2024. Iber-PEST: Automatic calibration in fully distributed hydrological models based on the 2D shallow water equations. *Environ. Model. Softw.*, 177, 106047, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.106047>
- García-Feal, O., González-Cao, J., Gómez-Gesteira, M., Cea, L., Domínguez, J., Formella, A. 2018. An Accelerated Tool for Flood Modelling Based on Iber. *Water*, 10, 1459, <https://doi.org/10.3390/w10101459>
- García-Feal, O., Cea, L., González-Cao, J., Domínguez, J.M., Gómez-Gesteira, M. 2020. IberWQ: A GPU Accelerated Tool for 2D Water Quality Modeling in Rivers and Estuaries. *Water*, 12, 413, <https://doi.org/10.3390/w12020413>
- Instituto Geográfico Nacional. <https://www.ign.es>, last access: 4 June 2023.
- Juárez, J.I.I., Arganis, M.L.L., Domínguez, R., Esquivel, G., Bladé, E., Dolz, J., Sánchez-Tueros, H., Corestein, G. 2014. Comparación del hidrograma de salida de una cuenca con un modelo hidráulico y un modelo distribuido, in: *XXIII Congreso Nacional de Hidráulica*.
- Knight, D.W. 2013. River hydraulics - a view from midstream. *J. Hydraul. Res.*, 51, 2–18, <https://doi.org/10.1080/00221686.2012.749431>
- LeVeque, R.J. 2002. *Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems*, Cambridge University Press, <https://doi.org/10.1017/CBO9780511791253>
- Liang, Q., Borthwick, A.G.L. 2009. Adaptive quadtree simulation of shallow flows with wet–dry fronts over complex topography. *Comput. Fluids*, 38, 221–234, <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2008.02.008>
- López-Chacón, S.R., Salazar, F., Bladé, E. 2023. Combining Synthetic and Observed Data to Enhance Machine Learning Model Performance for Streamflow Prediction. *Water*, 15, 2020, <https://doi.org/10.3390/w15112020>
- López-Gómez, D., De Blas-Moncalvillo, M., Cuéllar-Moro, V. 2024. Herramientas para la gestión sostenible de la sedimentación en el embalse de Marmolejo (España). *Ingeniería del Agua*, 28, 1–16, <https://doi.org/10.4995/ia.2024.20376>

- MITECO. 2021. Guía técnica para la clasificación de presas. Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico (MITECO). Madrid, España, 53 pp.
- Montalvo, C., Reyes-Silva, J.D., Sañudo, E., Cea, L., Puertas, J. 2024. Urban pluvial flood modelling in the absence of sewer drainage network data: A physics-based approach. *J. Hydrol.*, 634, 131043, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131043>
- Néelz, S., Pender, G. 2009. Desktop review of 2D hydraulic modelling packages. Science Report: SC080035, Environment Agency, Horison House, Deanery Road, Bristol, BS1 9AH, 63 pp.
- Néelz, S., Pender, G. 2013. *Benchmarking the latest generation of 2D hydraulic modelling packages*. Science Report: SC120002, Environment Agency, Horison House, Deanery Road, Bristol, BS1 9AH, 194 pp.
- Olivares-Cerpa, G., Russo, B., Martínez-Puentes, M., Bladé, E., Sanz-Ramos, M. 2022. “SUDS-lineales” para reducir el riesgo de inundación considerando escenarios de Cambio Climático. *Ingeniería del Agua*, 26, 77–90, <https://doi.org/10.4995/ia.2022.17058>
- Preissmann, A. 1961. Propagation des intumescences dans les canaux et rivières, in: *Ist Congrès Association Francaise de Calcul*, Grenoble, AFC, Paris, France, September, 433–442.
- Puertas, J., Cea, L., Bermúdez, M., Pena, L., Rodríguez, Á., Rabuñal, J.R., Balairón, L., Lara, Á., Aramburu, E. 2012. Computer application for the analysis and design of vertical slot fishways in accordance with the requirements of the target species. *Ecol. Eng.*, 48, 51–60, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.05.009>
- RAMFLOOD Project. <https://www.cimne.com/ramflood/>, last access: 13 August 2024.
- Ramos-Fuertes, A., Marti-Cardona, B., Bladé, E., Dolz, J. 2013. Envisat/ASAR Images for the Calibration of Wind Drag Action in the Doñana Wetlands 2D Hydrodynamic Model. *Remote Sens.*, 6, 379–406, <https://doi.org/10.3390/rs6010379>
- RAMWASS. <https://www.cimne.com/ramwass/>, last access: 13 August 2024.
- Rastogi, A.K., Rodi, W. 1978. Predictions of heat and mass transfer in open channels. *J. Hydraul. Div.*, 104, 397–420. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0004962>
- Rodi, W. 1980. *Turbulence Models and their Applications in Hydraulics – A State of the Art Review*, Delft, The Netherlands.
- Roe, P.L. 1986. A basis for the upwind differencing of the two-dimensional unsteady Euler equations, Eds.: Morton, Baines, Oxford Univ. Press, 55–80 pp.
- Ruiz-Villanueva, V., Bodoque, J.M., Díez-Herrero, A., Bladé, E. 2014a. Large wood transport as significant influence on flood risk in a mountain village. *Nat. Hazards*, 74, 967–987, <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1222-4>
- Ruiz-Villanueva, V., Bladé Castellet, E., Díez-Herrero, A., Bodoque, J.M., Sánchez-Juny, M. 2014b. Two-dimensional modelling of large wood transport during flash floods. *Earth Surf. Process. Landforms*, 39, 438–449, <https://doi.org/10.1002/esp.3456>
- Ruiz-Villanueva, V., Bladé, E., Sánchez-Juny, M., Marti-Cardona, B., Díez-Herrero, A., Bodoque, J.M. 2014c. Two-dimensional numerical modeling of wood transport. *J. Hydroinformatics*, 16, 1077, <https://doi.org/10.2166/hydro.2014.026>
- Ruiz-Villanueva, V., Díez Herrero, A., Bodoque del Pozo, J.M., Blade Castellet, E., Sanchez Juny, M. 2015. Large Wood Transport Influence on Flash Flood Risk in a Mountain Village in Central Spain, in: *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 3*, Springer International Publishing, Cham, 123–126, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-09054-2\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-319-09054-2_23)
- Ruiz-Villanueva, V., Piégay, H., Gurnell, A.M., Marston, R.A., Stoffel, M. 2016. Recent advances quantifying the large wood dynamics in river basins: New methods and remaining challenges. *Rev. Geophys.*, 54, 611–652, <https://doi.org/10.1002/2015RG000514>
- Ruiz-Villanueva, V., Mazzorana, B., Bladé, E., Bürkli, L., Iribarren-Anacona, P., Mao, L., Nakamura, F., Ravazzolo, D., Rickenmann, D., Sanz-Ramos, M., Stoffel, M., Wohl, E. 2019. Characterization of wood-laden flows in rivers. *Earth Surf. Process. Landforms*, 44, 1694–1709, <https://doi.org/10.1002/esp.4603>

Sañudo-Costoya, E., García-Feal, O., Cea, L., Puertas, J., Sanz-Ramos, M., Bladé, E., Torret, X., Guzmán, M., Marques, P., Pi, N., Romero, A.P. 2024. DRAIN Project: an integrated urban drainage model in QGIS with Iber-SWMM, in: *16th International Conference on Urban Drainage*, 4.

Sañudo, E., Cea, L., Puertas, J. 2020. Modelling Pluvial Flooding in Urban Areas Coupling the Models Iber and SWMM. *Water (Switzerland)*, 12, 2647, <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w12092647>

Sañudo, E., Cea, L., Puertas, J., Naves, J., Anta, J. 2024. Large-scale physical facility and experimental dataset for the validation of urban drainage models. *Hydrol. Process.*, 38, <https://doi.org/10.1002/hyp.15068>

Sañudo, E., García-Feal, O., Hagen, L., Cea, L., Puertas, J., Montalvo, C., Alvarado-Vicencio, R., Hofmann, J. 2025. IberSWMM+: A high-performance computing solver for 2D-1D pluvial flood modelling in urban environments. *J. Hydrol.*, 651, 132603, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132603>

Sanz-Ramos, M., Bladé, E., Amengual, A., Romero, R., Roux, H. 2017. Implementation and calibration of a distributed hydrological model based on the finite volume method, in: *10th HyMeX Workshop*, 142–143.

Sanz-Ramos, M., Amengual, A., Bladé, E., Romero, R., Roux, H. 2018. Flood forecasting using a coupled hydrological and hydraulic model (based on FVM) and high-resolution meteorological model. *E3S Web Conf.*, 40, 8, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184006028>

Sanz-Ramos, M., Bladé, E., Palau-Ibars, A., Vericat, D., Ramos-Fuertes, A. 2019a. IberHABITAT: evaluación de la idoneidad del Hábitat Físico y del Hábitat Potencial Útil para peces. Aplicación en el río Eume. *Ribagua*, 6, 158–167, <https://doi.org/10.1080/23863781.2019.1664273>

Sanz-Ramos, M., Olivares Cerpa, G., Bladé, E. 2019b. Metodología para el análisis de rotura de presas con aterramiento mediante simulación con fondo móvil. *Ribagua*, 6, 138–147, <https://doi.org/10.1080/23863781.2019.1705198>

Sanz-Ramos, M., Martí-Cardona, B., Bladé, E., Seco, I., Amengual, A., Roux, H., Romero, R. 2020a. NRCS-CN Estimation from Onsite and Remote Sensing Data for Management of a Reservoir in the Eastern Pyrenees. *J. Hydrol. Eng.*, 25, 05020022, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001979](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001979)

Sanz-Ramos, M., Bladé, E., Escolano, E. 2020b. Optimización del cálculo de la Vía de Intenso Desagüe con criterios hidráulicos, *Ingeniería del agua*, 24, 203, <https://doi.org/10.4995/ia.2020.13364>

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

Sanz-Ramos, M., Andrade, C.A., Oller, P., Furdada, G., Bladé, E., Martínez-Gomariz, E. 2021b. Reconstructing the Snow Avalanche of Coll de Pal 2018 (SE Pyrenees). *GeoHazards*, 2, 196–211, <https://doi.org/10.3390/geohazards2030011>

Sanz-Ramos, M., Olivares, G., Bladé, E. 2022a. Experimental characterization and two-dimensional hydraulic-hydrologic modelling of the infiltration process through permeable pavements. *Rev. Int. Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ing.*, 38, <https://doi.org/10.23967/j.rimni.2022.03.012>

Sanz-Ramos, M., Cea, L., Bladé, E., López-Gómez, D., Sañudo, E., Corestein, G., García-Alén, G., Aragón-Hernández, J. 2022b. Iber v3. Reference manual and user's interface of the new implementations, CIMNE, <https://doi.org/10.23967/iber.2022.01>

Sanz-Ramos, M., López-Núñez, A., Cea, L., Bladé, E. 2022c. Modelling pressurized flow through hydraulic structures and bridges using a 2D-SWE-based model, in: *Proceedings of the 39th IAHR World Congress*, 3729–3736, <https://doi.org/10.3850/IAHR-39WC252171192022447>

Sanz-Ramos, M., López-Gómez, D., Bladé, E., Dehghan-Souraki, D. 2023a. A CUDA Fortran GPU-parallelised hydrodynamic tool for high-resolution and long-term eco-hydraulic modelling. *Environ. Model. Softw.*, 161, 105628, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105628>

- Sanz-Ramos, M., Bladé, E., Silva-Cancino, N., Salazar, F., López-Gómez, D., Martínez-Gomariz, E. 2023b. A Probabilistic Approach for Off-Stream Reservoir Failure Flood Hazard Assessment. *Water*, 15, 2202, <https://doi.org/10.3390/w15122202>
- Sanz-Ramos, M., Bladé, E., Sánchez-Juny, M. 2023c. El rol de los términos de fricción y cohesión en la modelización bidimensional de fluidos no Newtonianos: avalanchas de nieve densa. *Ingeniería del Agua*, 27, 295–310, <https://doi.org/10.4995/ia.2023.20080>
- Sanz-Ramos, M., Bladé, E., Oller, P., Furdada, G. 2023d. Numerical modelling of dense snow avalanches with a well-balanced scheme based on the 2D shallow water equations. *J. Glaciol.*, 69(278) 1–17, <https://doi.org/10.1017/jog.2023.48>
- Sanz-Ramos, M., Bladé, E., Silva-Cancino, N., Salazar, F. 2024a. Avances en Iber para la clasificación de balsas: proyecto ACROPOLIS. *Ingeniería del Agua*, 28, 47–63, <https://doi.org/10.4995/ia.2024.20609>
- Sanz-Ramos, M., Bladé, E., Sánchez-Juny, M., Dysarz, T. 2024b. Extension of Iber for Simulating Non-Newtonian Shallow Flows: Mine-Tailings Spill Propagation Modelling. *Water*, 16, 2039, <https://doi.org/10.3390/w16142039>
- Sanz-Ramos, M., Vales-Bravo, J.J., Bladé, E., Sánchez-Juny, M. 2024c. Reconstructing the spill propagation of the Aznalcóllar mine disaster. *Mine Water Environ.*, 43, <https://doi.org/10.1007/s10230-024-01000-5>
- Silva-Cancino, N., Salazar, F., Sanz-Ramos, M., Bladé, E. 2022. A Machine Learning-Based Surrogate Model for the Identification of Risk Zones Due to Off-Stream Reservoir Failure. *Water*, 14, 2416, <https://doi.org/10.3390/w14152416>
- Silva-Cancino, N., Salazar, F., Bladé, E. 2024a. ACROPOLIS: A graphical user interface for classification of risk for off-stream reservoirs using machine learning. *SoftwareX*, 26, 101657, <https://doi.org/10.1016/j.softx.2024.101657>
- Silva-Cancino, N., Salazar, F., Bladé, E., Sanz-Ramos, M. 2024b. Influence of breach parameter models on hazard classification of off-stream reservoirs. *Water Sci. Eng.*, 48, <https://doi.org/10.1016/j.wse.2024.05.001>
- Sopelana, J., Cea, L., Ruano, S. 2018. A continuous simulation approach for the estimation of extreme flood inundation in coastal river reaches affected by meso- and macrotides. *Nat. Hazards*, 93, 1337–1358, <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3360-6>
- Tan, W.Y. 1992. *Shallow Water Hydrodynamics*, first Edit., Elsevier Science, 433 pp.
- Toro, E.F. 2009. *Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics*, Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 738 pp., <https://doi.org/10.1007/b79761>
- Torret, X., Medina, V. 2014. PostgreSQL y PostGIS 2.0 aplicados al mundo de la ingeniería hidráulica y fluvial, in: *VIII Jornadas de SIG libre*, 11.
- Tsakiris, G. 2014. Flood risk assessment: concepts, modelling, applications. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 1361–1369, <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1361-2014>
- 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. Dyn.*, 9, 123–144, <https://doi.org/10.5194/esurf-9-123-2021>