

# Desarrollo de una herramienta para simular obstrucciones en flujos con Iber

Bladé, E.<sup>a1</sup>, Sanz-Ramos, M.<sup>a2</sup>, Niñerola, D.<sup>a3</sup> y Dolz, J.<sup>a4</sup>

<sup>a1</sup>Institut Flumen (UPC-CIMNE), Universitat Politècnica de Catalunya – BarcelonaTech. Campus Nord.  
C/ Jordi Girona 1, Campus Nord (Ed. B0-S1) - 08034 - Barcelona (España)  
E-mail: <sup>a1</sup>ernest.blade@upc.edu, <sup>a2</sup>marcos.sanz-ramos@upc.edu, <sup>a3</sup>daniel.ninyerola@upc.edu, <sup>a4</sup>j.dolz@upc.edu.

Línea temática D | Estructuras hidráulicas

---

## RESUMEN

Los modelos de simulación hidráulica en lámina libre han supuesto un revulsivo para el análisis de inundaciones, entre otros. Su evolución está permitiendo realizar simulaciones cada vez más complejas, y por ende más realistas, a pesar de las simplificaciones que han sido necesarias para la obtención de las ecuaciones que gobiernan el flujo. La consideración de obstrucciones al flujo tales como vegetación, vehículos, etc., puede ser tratado de diferentes maneras (aumento de la rugosidad, secciones equivalentes, etc.). En este trabajo se presenta una nueva herramienta en Iber que permite simular obstrucciones al flujo considerando el porcentaje de obstrucción que suponen respecto a la sección completa. Se ha testado la herramienta mediante casos teóricos y reales con buenos resultados.

---

## INTRODUCCIÓN

La simulación de flujos de agua en lámina libre mediante modelos matemáticos está suponiendo un cambio de paradigma en la gestión del riesgo de inundación. La aparición en los años 80 del pasado siglo de modelos unidimensionales que permitían discretizar la zona de estudio en un número finito de secciones, y calcular el nivel y velocidad del agua en ellas, ha quedado relegada a un segundo plano por el uso de modelos bidimensionales.

Los bidimensionales se han popularizado en los últimos años gracias al incremento de potencia de cálculo de los ordenadores, a las capacidades y versatilidad que ofrecen y, sobre todo, a la menor incertidumbre para con los resultados obtenidos (Dimitriadis et al., 2016). Las posibilidades de cálculo han evolucionado de la mano de las necesidades del mundo académico y profesional. Se ha pasado de simular simples flujos en canales a resolver problemas en cauces muy complejos (p.ej. con presencia de edificios, de estructuras, de obras de drenaje, etc.) o en sistemas de acometida de agua para riego o centrales hidroeléctricas (p.ej. bocatomas; Bermúdez et al., 2017), y están ayudando en el pre-diseño de obras hidráulicas (p.ej. aliviaderos tipo “*morning glory*”; López et al., 2016), entre muchas otras.

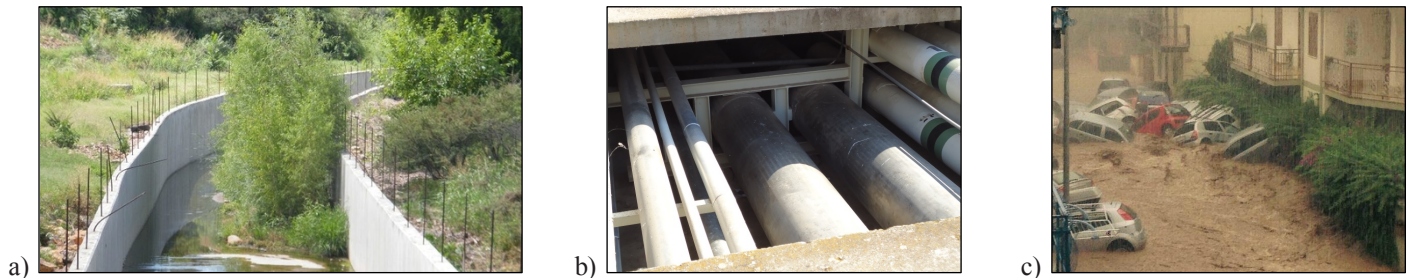
En los modelos bidimensionales la descripción del movimiento del flujo se realiza a través de las ecuaciones de Saint Venant 2D o ecuaciones de aguas someras (Cea et al., 2009). Estas ecuaciones se deducen de las ecuaciones de Navier-Stokes tras realizar el promedio temporal, para filtrar las fluctuaciones turbulentas (ec. Reynolds), y el promedio en la profundidad, para transformar las ecuaciones tridimensionales a bidimensionales (Tan, 1992; Toro, 2009). De esta última simplificación se desprende que el campo de velocidades es constante en la vertical (en  $x$  e  $y$ ).

Los modelos hidrodinámicos bidimensionales “puros” tan solo ofrecen como resultados la altura de agua ( $h$ ) y el campo de velocidades ( $v_x$  y  $v_y$ ). Pero la necesidad de resolver problemas cada vez más complejos ha llevado a su continuo desarrollo, de manera que se han ido incorporando pequeñas modificaciones para poder simular flujos a través de vertederos, compuertas, puentes, etc. En algunos casos los modelos incorporan también módulos de cálculos adicionales para la turbulencia, el transporte de sedimentos, la dispersión de contaminantes, la rotura de balsas, etc.

En todos estos casos se considera que el flujo, en toda la columna de agua, fluye como un único bloque, es decir, no se consideran obstáculos que modifiquen el flujo (excepto la topografía). No sería posible, a priori, simular obstrucciones en el

flujo tales como p.ej. pilas de puentes o edificios. No obstante, el empleo de mallas adaptables a contornos específicos, como edificios o pilas de puentes, ha permitido representar este tipo de elementos como huecos en la malla.

Sin embargo, obstrucciones localizadas o que solo afectan en un rango de alturas concreto, como vegetación densa en el cauce o canal (Figura 1a), tuberías u otros elementos embebidos en las secciones (Figura 1b) o, en un caso extremo, obstáculos de gran envergadura como vehículos (Figura 1c), no quedarían correctamente representadas ya que el flujo puede transitar por debajo, por encima o a través de ellas.



**Figura 1** | Diferentes tipos de obstrucciones. a) Cauces artificiales o naturales con crecimiento de vegetación. b) Galerías de servicio ocupadas por tuberías y otros elementos. c) Vehículos en calles, ramblas, arroyos o encauzamientos (fuente: diversas).

En todos estos casos se produce la reducción de la sección bruta por donde el flujo circula debido a la obstrucción (sección útil). Para dar solución a esta casuística, se ha desarrollado una herramienta de cálculo para la simulación del flujo que permite considerar obstrucciones mediante el modelo Iber (Bladé et al., 2014). Esta herramienta, denominada “Ocupación” permite definir una o varias zonas cuyo paso al flujo quede reducido por elementos obstruyan la sección.

## MATERIAL Y MÉTODOS

Una obstrucción puede ser considerada, de forma general, como cualquier elemento que impida la libre circulación del flujo, que modifique bruscamente su comportamiento o que, en caso de existir, provoque diferencias sustanciales en la lámina de agua. Las obstrucciones pueden encontrarse de manera natural (p.ej. vegetación en el cauce o canal) o de manera artificial (p.ej. elementos que reduzcan la sección hidráulica en canales, calles, etc., como tuberías, vehículos, etc.).

En este sentido, los edificios pueden ser considerados obstrucciones al flujo, tanto en zonas rurales como urbanas. En este aspecto, han sido varios los autores que han desarrollado técnicas para estimar el comportamiento del flujo a gran escala mediante el concepto de “porosidad” (Guinot y Soares-Frazaõ, 2006; Lhomme et al., 2006; McMillan y Brasington, 2007; Soares-Frazaõ et al., 2008; entre otros).

Sin embargo el presente estudio se centra en el desarrollo de una herramienta cálculo que permita representar adecuadamente el comportamiento hidráulico a pequeña escala. En general, los fenómenos locales que provocan las obstrucciones son, a igualdad de otros factores, un incremento de la velocidad (similar al efecto de un estrechamiento) y un llenado más rápido en secciones sin salida de agua.

### Módulo “ocupación”

Las obstrucciones han sido tratadas como una reducción de la sección bruta ( $S_{bruta}$ ) pues suponen una ocupación, en planta y alzado, del volumen libre que dispone el flujo para circular. Este tratamiento se ha realizado en la ecuación de continuidad (Ecuación 1), donde el área en planta del elemento de la malla donde existe ocupación se ve modificada por el coeficiente reductor ( $\alpha$ ) que incluye el índice de ocupación,  $i_o$  (Ecuación 2).

$$\frac{\delta h}{\delta t} + \frac{\delta q_x}{\delta x} + \frac{\delta q_y}{\delta y} = 0 \quad (1)$$

$$\alpha = (1 - i_o) \quad (2)$$

donde  $h$  es el calado,  $q_x$  y  $q_y$  son los flujos en la dirección X e Y respectivamente,  $\alpha$  es el coeficiente reductor e  $i_o$  es el cociente entre la sección útil ( $S_{\text{útil}}$ ) y la sección bruta ( $S_{\text{bruta}}$ ).

Internamente el modelo modifica el calado en el instante  $n+1$  ( $h_i^{n+1}$ ) a partir del calado en el tiempo  $n$  ( $h_i^n$ ), teniendo en cuenta la variación de masa de agua entrante y saliente ( $Q_{i,k}^n$ ) del elemento  $i$  por cada uno de sus lados ( $n_i$ ), y donde se ha modificado el área del volumen finito ( $V_i$ ) mediante el coeficiente reductor  $\alpha$  (Ecuación 3).

$$h_i^{n+1} = h_i^n - \frac{\Delta t}{\alpha V_i} \sum_{k=1}^{n_i} Q_{i,k}^n \quad (3)$$

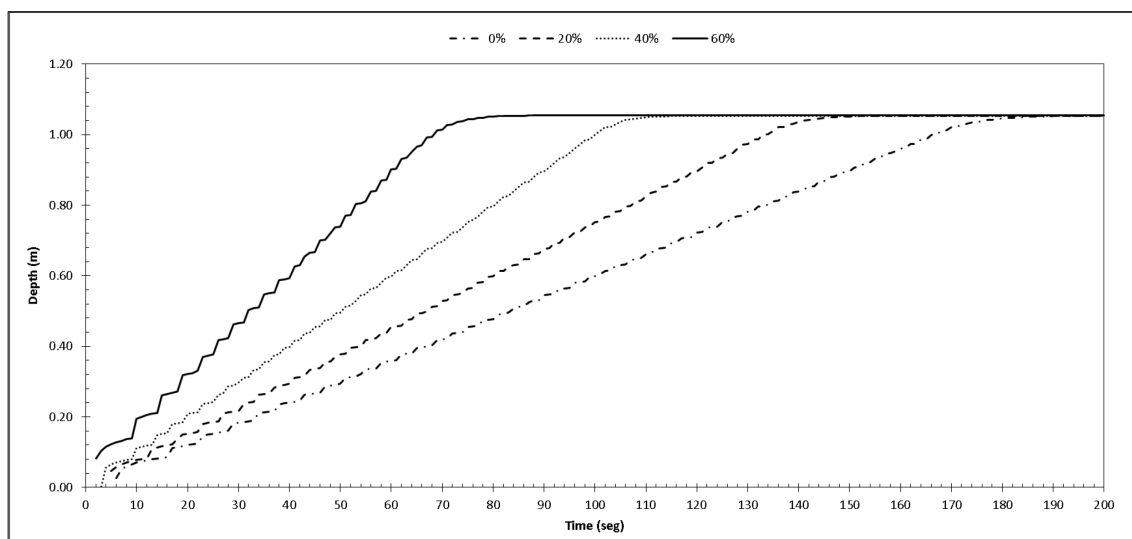
A continuación se muestran algunos casos teóricos para demostrar las bondades de este nuevo método para simular obstrucciones.

### Proceso de validación. Llenado

A fin de conocer si el modelo refleja adecuadamente el proceso de llenado, se diseñaron 4 canales iguales de 3.33 metros de largo y 0.5 metros de ancho completamente horizontales. El índice de ocupación de cada uno de ellos fue de 0, 20, 40 y 60 % en toda su longitud.

Se impusieron como condiciones de contorno la entrada de caudal por uno de los extremos ( $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y la salida en régimen subcrítico como vertedero a cota 1 m por el otro. El objetivo fue evaluar si el proceso de llenado era más rápido en los casos con ocupación diferente de cero y, además, si el tiempo de llenado coincidía con el tiempo teórico.

Los canales tenían un volumen neto de 1.667, 1.333, 1.000 y  $0.667 \text{ m}^3$  para los índices de ocupación de 0, 20, 40 y 60 %, respectivamente. En base al caudal entrante, los tiempos teóricos de llenado son de 166.7, 133.3, 100.0 y 66.7 segundos, respectivamente.



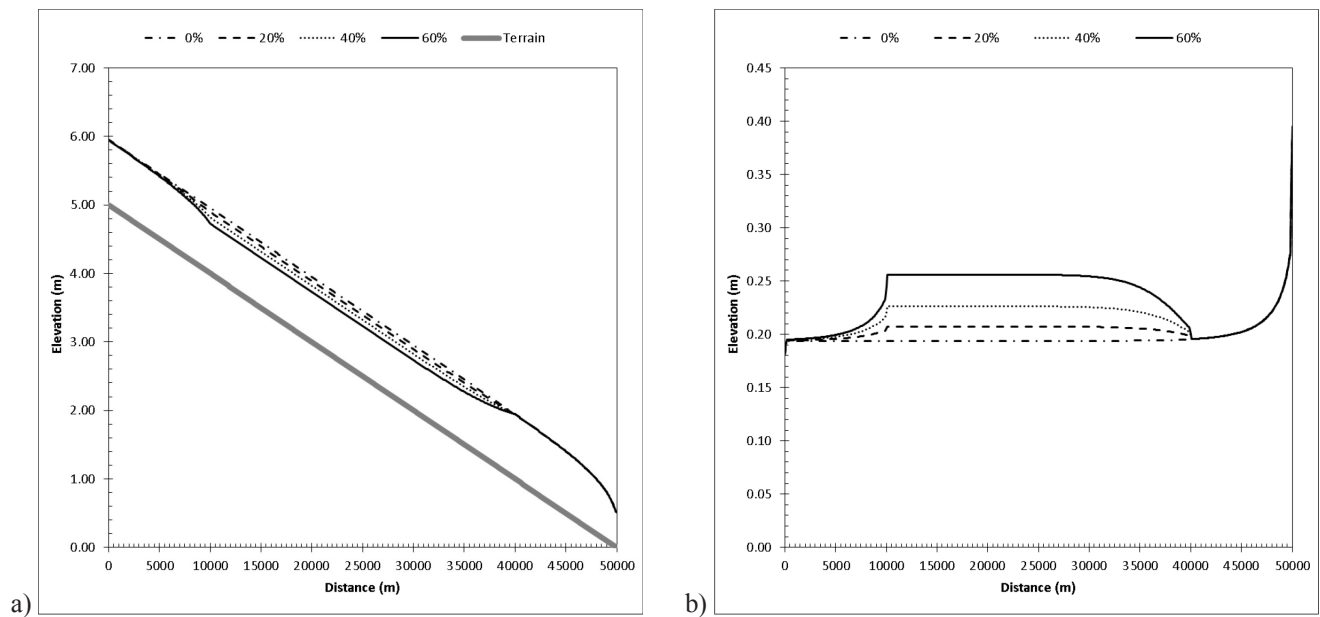
**Figura 2** | Análisis del proceso de llenado del canal para índices de ocupación del 0 % (- · - ·), del 20 % (- - -), del 40 % (· · ·) y del 60 % (—). Evolución del calado en cada uno de los canales.

La Figura 2 muestra la evolución de la lámina de agua (calado) en cada uno de los canales. Se puede comprobar que el proceso de llenado se encuentra acorde con los tiempos teóricos y, por tanto, el modelo reproduce adecuadamente este fenómeno.

### Proceso de validación. Aceleración del flujo

La aceleración del flujo es otro fenómeno que se produce cuando existe una obstrucción. La evaluación de éste se llevó a cabo mediante 4 canales de 50000 metros de largo y 50 metros de ancho, con una pendiente del 0.1 ‰. El caudal circulante se definió constante de  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  de valor y la condición de salida fue vertido libre. La rugosidad del fondo se fijó en  $0.05 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1/3}$ . Bajo estas condiciones, el calado normal se desarrolla para 1 m sobre la solera.

Se evaluaron 4 valores de ocupación diferente, entre 0 y 60 % (incrementos de 20), en 4 canales situados en paralelo. La longitud del tramo con ocupación fue de 30000 metros y se ubicó en la parte central de los canales, de modo que no hubiese influencia de las condiciones de contorno y permitiese desarrollar adecuadamente el nuevo calado en el tramo ocupado.



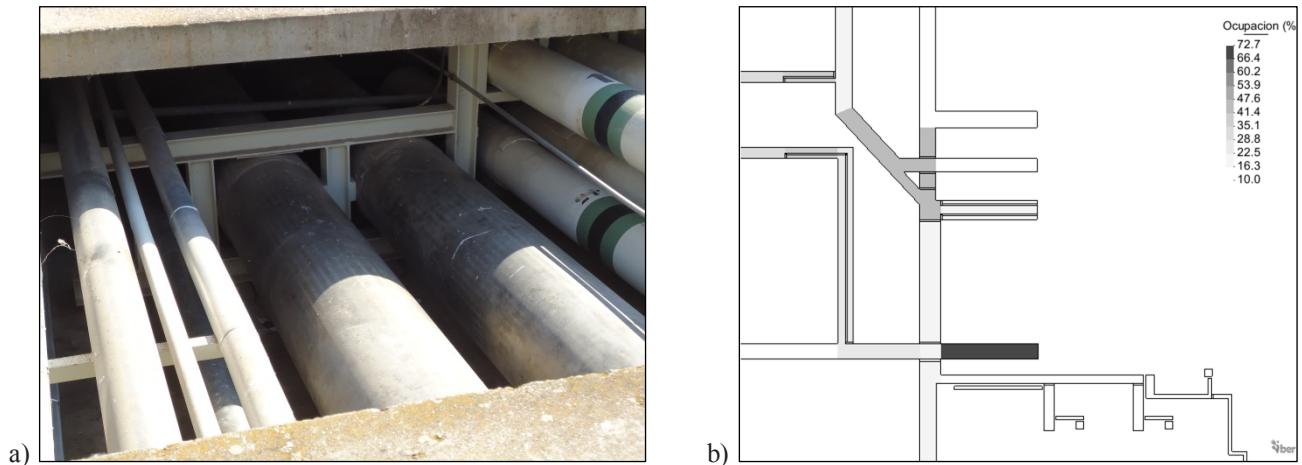
**Figura 3** | Análisis del proceso de aceleración del flujo para índices de ocupación del 0, 20, 40 y 60 %. a) Cota de agua y b) velocidad a lo largo del canal.

Como se observa en la Figura 3, se produce un efecto “estrechamiento” asociado a la reducción de sección útil en el canal. Por consiguiente, el flujo se acelera (Figura 3b) y la lámina de agua se reduce. Al tratarse de un canal en régimen lento, pierde velocidad a medida se acerca de nuevo al tramo sin ocupación. El incremento de velocidad hacia el final del canal se atribuye a la condición de salida impuesta (vertido libre).

### Caso de estudio

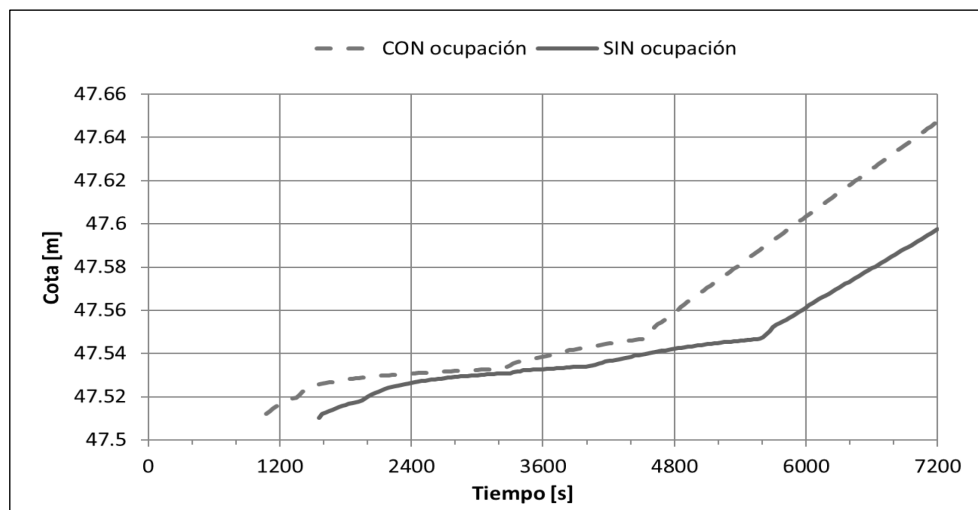
La herramienta se puso a prueba con un caso de estudio real que constaba de una serie de canales interconectados. En dichos canales existían diferentes niveles de ocupación debido a la presencia de tuberías, cableado y sus elementos de sujeción (Figura 4a). El objeto del estudio fue conocer, en diferentes puntos de control, el tiempo que tardaba el frente de onda en alcanzar una determinada cota.

El grado de ocupación variaba en cada sección, e incluso dentro de una misma sección, haciendo bastante difícil la descripción geométrica mediante un modelo 3D. Teniendo en cuenta que el nivel de ocupación varió entre el 10 y el 72.7 %, fue necesario el empleo de un modelo 2D que pudiese tener en cuenta esta casuística.



**Figura 4** | Caso de estudio. a) Situación actual de los canales donde se llevó a cabo el estudio y b) representación del nivel de ocupación (en tanto por ciento).

La importancia de este fenómeno quedó reflejada en los resultados. En todos los puntos analizados se obtuvo tiempos de llegada al punto de control más bajos. En función del caudal circulante y el lugar de entrada de agua, y de la ubicación del punto de control, las diferencias fueron notables, con más de 20 minutos en algunos puntos (Figura 5). Estos resultados fueron los esperables al realizar la simulación de una serie de canales cuya sección útil era menor que la sección bruta.



**Figura 5** | Caso de estudio a) Situación actual de los canales donde se llevó a cabo el estudio y b) velocidad a lo largo del canal.

## CONCLUSIONES

Las obstrucciones son elementos que modifican las condiciones hidráulicas del flujo. Sus efectos sobre la hidrodinámica son muy variados, y van desde cambios en el nivel de agua hasta fenómenos locales.

El tratamiento de estos elementos en modelos de simulación hidráulica es complejo, siendo los modelos 3D los que representan con mayor detalle el funcionamiento hidráulico en los tramos con ocupación. Sin embargo los dilatados tiempos de cálculo y la dificultad geométrica inherente a las obstrucciones, no permite su empleo de un modo seguro en términos de modelización.

Es por ello que se ha presentado un módulo de cálculo denominado “ocupación” que permite simular tramos con obstrucciones, en base al modelo bidimensional Iber. Estos han sido tratados mediante la modificación de la ecuación de continuidad, incidiendo en el volumen real del elemento de la malla.

Su validación se ha llevado a cabo, de manera cualitativa y cuantitativa, mediante ejemplos simples. Asimismo, se ha puesto a prueba la herramienta con un caso real cuya geometría estaba formada por una serie de canales interconectados con diferentes grados de ocupación. Los resultados en todos los casos fueron los esperados.

Sus aplicaciones no se limitan a obstrucciones completas, es decir, a toda su columna como ha sido en los casos mostrados. El método de volúmenes finitos permite cierta flexibilidad para poder modificar las ecuaciones que gobiernan el flujo en función, por ejemplo, de la altura de agua. En este sentido, la obstrucción podría tenerse en cuenta de manera mucho más real teniendo en cuenta su posición exacta en alzado, de manera que se aplique la reducción de sección bruta tan solo cuando se alcance dicha elevación.

---

## REFERENCIAS

- Bermúdez, M., Cea, L., Puertas, J., Conde, A., Martín, A., Baztán, J., 2017. Hydraulic model study of the intake-outlet of a pumped-storage hydropower plant. *Eng. Appl. Comput. Fluid Mech.* 11, 483–495. doi:10.1080/19942060.2017.1314869
- 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. *Rev. Int. Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ing.* 30, 1–10. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004
- Cea, L., Vázquez-Cendón, E., Puertas, J., 2009. El método de volúmenes finitos aplicado a problemas de ingeniería fluvial y costera. *La Gac. la RSME* 12, 71–93.
- Dimitriadis, P., Tegos, A., Oikonomou, A., Pagana, V., Koukouvinos, A., Mamassis, N., Koutsoyiannis, D., Efstratiadis, A., 2016. Comparative evaluation of 1D and quasi-2D hydraulic models based on benchmark and real-world applications for uncertainty assessment in flood mapping. *J. Hydrol.* doi:10.1016/j.jhydrol.2016.01.020
- Guinot, V., Soares-Frazão, S., 2006. Flux and source term discretization in two-dimensional shallow water models with porosity on unstructured grids. *Int. J. Numer. Methods Fluids* 50, 309–345. doi:10.1002/flid.1059
- Lhomme, J., Soares-Frazão, S., Guinot, V., Zech, Y., 2006. Large-scale urban floods modelling and two-dimensional shallow water models with porosity. *7th Int. Conf. Hydroinformatics* 8.
- López, D., Díaz, R., Rebollo, J.J., Ramos, T., Andrés, F.R., Berga, M.I., 2016. Aplicación del método SPH al estudio hidráulico de estructuras. Análisis hidrodinámico del aliviadero en pozo de la presa de Nagore (Navarra). *RIBAGUA - Rev. Iberoam. del Agua* 3, 1–7. doi:10.1016/j.riba.2016.03.001
- McMillan, H.K., Brasington, J., 2007. Reduced complexity strategies for modelling urban floodplain inundation. *Geomorphology* 90, 226–243. doi:10.1016/j.geomorph.2006.10.031
- Soares-Fraza, S., Lhomme, J., Guinot, V., Zech, Y., 2008. Two-dimensional shallow-water model with porosity for urban flood modelling. *J. Hydraul. Res.* 46, 45–64. doi:10.1080/00221686.2008.9521842
- Tan, W., 1992. *Shallow Water Hydrodynamics*. Elsevier Science.
- Toro, E.F., 2009. *Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/b79761