

Modelación física y numérica del lavado de sedimentos en embalses

Sebastián Guillén-Ludeña^a, José M. Carrillo^a y Luis G. Castillo^a

^a Gupo Hidr@m, Dpto. de Ingeniería Minera y Civil, Paseo Alfonso XIII, 52, 30203, Universidad Politécnica de Cartagena, España, sebastian.guillen@upct.es, jose.carrillo@upct.es, luis.castillo@upct.es.

Línea temática | Hidrología y dinámica fluvial

RESUMEN

Este trabajo tiene como objeto evaluar la capacidad de los modelos hidrodinámicos existentes para la simulación del lavado de sedimentos en embalses mediante flushing. Se han realizado modelos numéricos con tres programas informáticos HEC-RAS, IBER, y FLOW-3D para reproducir un ensayo de flushing realizado a escala de laboratorio. Comparativamente, los resultados obtenidos con el modelo FLOW-3D son los que más se aproximan a las mediciones del laboratorio, mientras que los resultados obtenidos con HEC-RAS e IBER presentan diferencias con dichas mediciones. En el caso de HEC-RAS se observa una sobrestimación del transporte de fondo y de la erosión, aunque los resultados presentan tendencias similares a las del ensayo de referencia. En el caso de IBER, se observa una subestimación del transporte de fondo y la erosión con tendencias distintas a las mediciones de laboratorio. Estas diferencias serán investigadas en detalle en fases sucesivas.

Palabras clave | Flushing, sedimentación en embalses, simulación numérica, transporte de sedimentos.

INTRODUCCIÓN

La construcción de embalses tiene como objetivo a largo plazo la gestión eficiente del agua. Entre los usos principales de los embalses se encuentran el aumento de la garantía de suministro para consumo humano, industrial y agrícola, la producción hidroeléctrica, la regulación de ríos y la laminación de avenidas. No obstante, los embalses alteran la continuidad de los ríos reteniendo gran parte de los sedimentos transportados. Esta retención provoca un déficit de sedimentos aguas abajo de los embalses, que altera de forma negativa el ecosistema fluvial (Kondolf et al., 2014b). Además, a largo plazo, la sedimentación reduce la capacidad de almacenamiento de los embalses y, por tanto, su sostenibilidad y eficacia. En casos extremos, los sedimentos pueden llegar a bloquear los órganos de desagüe y comprometer así la seguridad del embalse (Syvitski and Milliman, 2007; Schleiss et al., 2016; Guillén-Ludeña et al., 2018a; b).

La Figura 1 muestra dos ejemplos de los potenciales efectos negativos asociados a la sedimentación en embalses: a) el aterramiento del vaso del embalse de Valdeinfierno en Lorca (España), que ha dado lugar a la pérdida casi total de su capacidad de almacenamiento; b) la obturación parcial de la toma de agua del embalse de Räterichsboden en Suiza, que obliga a los explotadores a realizar vaciados frecuentes para evitar su bloqueo. A nivel mundial, la pérdida anual de capacidad de los embalses por sedimentación, representa entre el 0.5% y el 1% de la capacidad total de almacenamiento (Schleiss et al., 2016), que es aproximadamente de $7 \cdot 10^6 \text{ hm}^3$. Según Schleiss et al. (2016), las tasas de sedimentación más elevadas corresponden a las regiones más áridas. Cobo (2008) estima que en el año 2025 la capacidad total de embalse en España se habrá reducido en un 12% de la capacidad original. En los embalses de la cuenca del Río Segura, en 1998, la pérdida de capacidad por sedimentación era de un 11% (Sanz Montero et al., 1998) respecto a su capacidad inicial (1223 hm^3). Estas cifras ponen de manifiesto la necesidad de considerar la sedimentación en la planificación y diseño de nuevos embalses, y en la operación y mantenimiento de los existentes.

Con objeto de minimizar los efectos negativos de la sedimentación, la gestión sostenible y eficaz de embalses debe procurar que estas estructuras hidráulicas sean lo más permeables posible al transporte de sedimentos. Este tipo de gestión repercutirá positivamente en la sostenibilidad, flexibilidad y seguridad de los embalses, así como en el balance de sedimentos aguas abajo. Además, una gestión sostenible y eficaz de los embalses contribuirá positivamente a la consecución de los Objetivos

de Desarrollo Sostenible de la Agenda para 2030 de Naciones Unidas (Naciones Unidas, 2015); concretamente los que se refieren a garantizar la disponibilidad de agua, el acceso a la energía y a la lucha contra la desertificación (objetivos 6, 7, y 15, respectivamente).

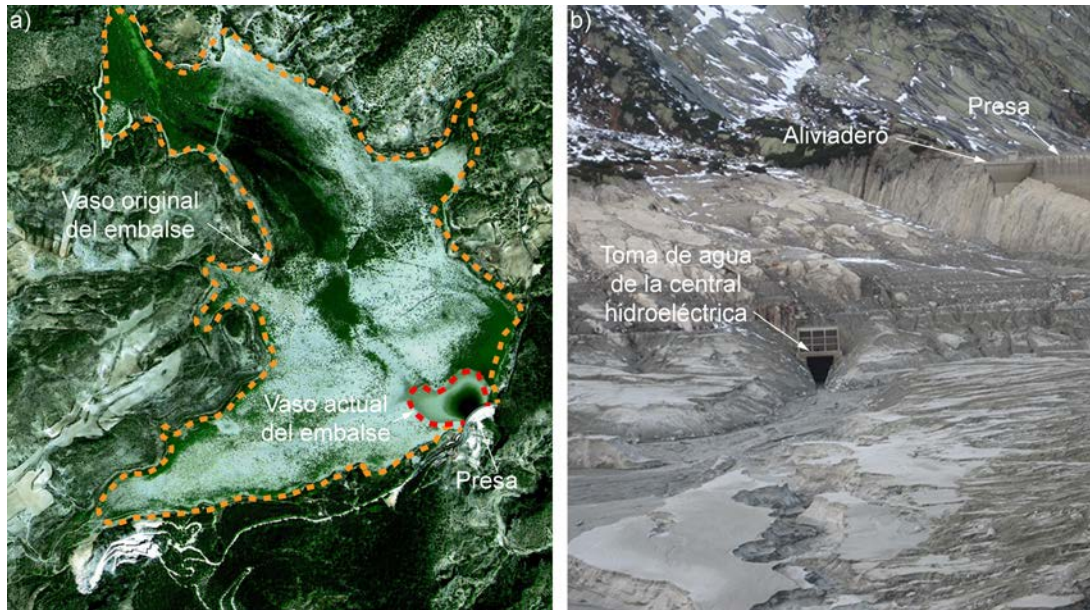


Figura 1 | a) Vista aérea del embalse de Valdeinfierno en Lorca (España) Fuente: Romero Díaz (2007) b) Vista de la toma de la central hidroeléctrica del embalse de Räterichsboden en Suiza. Cortesía: G. De Cesare

Existen varias soluciones técnicas para mitigar los efectos negativos asociados a la sedimentación en embalses, ofreciendo resultados muy diferentes en cuanto a eficacia. Este proyecto se centra en la técnica de evacuación de sedimentos mediante vaciado total o parcial del embalse, también conocida como flushing. Esta técnica ha sido calificada como una de las más eficaces en cuanto al volumen de sedimentos evacuados en relación al volumen de agua desembalsado (Morris and Fan, 1998; Schleiss et al., 2016). El proceso de flushing ha sido estudiado de forma sistemática a partir de datos obtenidos en laboratorio (Lai and Shen, 1996; Samto Atmodjo, 2012) y en embalses reales (Atkinson, 1996; Wang et al., 2005; Kondolf et al., 2014a; Castillo et al., 2015; Espa et al., 2016). Estos estudios se centran principalmente en la caracterización de la formación y evolución del cono y del canal de erosión durante el flushing. Sin embargo, pocos estudios analizan de manera sistemática la capacidad de los modelos numéricos existentes para la modelización del flushing (Castillo et al., 2015; Gibson and Boyd, 2016; Esmaili et al., 2017). En este contexto, este estudio pretende evaluar tres modelos numéricos (HEC-RAS, IBER, y FLOW-3D) como herramientas para la modelización del flushing.

MATERIAL Y MÉTODOS

La metodología seguida en este estudio consiste en la modelización numérica de un ensayo llevado a cabo por Lai and Shen (1996) en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de California en Berkeley. Este ensayo se realizó en un canal rectangular de 50 m de longitud y 2.44 m de anchura. Este canal era alimentado en el extremo de aguas arriba mediante una bomba que tomaba agua del extremo de aguas abajo, formando un circuito cerrado. A 20 m del extremo de aguas abajo y centrada en el canal, se instaló una compuerta móvil de 0.15 m de ancho y 0.25 m de altura. Aguas arriba de la compuerta, el fondo del canal se elevó 0.60 m con respecto al fondo original del canal. Sobre este fondo elevado se extendía una cama uniforme de sedimentos de 0.10 m de espesor sobre la que se excavó un canal de 0.06 m de profundidad y 0.04 m de anchura. El sedimento empleado fue cáscara de nuez con densidad $\rho_s = 1390 \text{ kg/m}^3$, diámetro característico $d_{50} = 1.25 \text{ mm}$, y coeficiente de gradación 1.18.

En dicho ensayo, se llenó lentamente la parte del canal situada aguas arriba de la compuerta. A continuación, se estableció el régimen permanente, configurando el caudal $Q_0 = 0.56$ l/s en la bomba y abriendo la compuerta hasta que el caudal evacuado a través de la compuerta fuese igual a Q_0 . Una vez establecido el régimen permanente, se abrió la compuerta a una velocidad de 5 cm/min hasta alcanzar un máximo de 10 cm y se esperó hasta que se vaciara el volumen de agua contenido aguas arriba de la compuerta. El tiempo de duración del ensayo fue de 30 minutos.

Durante el ensayo, se realizaron las siguientes mediciones:

- Nivel de agua aguas arriba de la compuerta. Estas mediciones se tomaron cada 2 minutos con sensores ultrasónicos situados sobre el eje central del canal a 0.15 m y 7 m aguas arriba de la compuerta.
- Muestras de agua y sedimento aguas abajo de la compuerta para caracterizar el hidrograma y sedimentograma de vaciado. Estas muestras se tomaron con una frecuencia de entre 2.5 y 5 segundos.

En este estudio, se han utilizado 3 modelos numéricos para la simulación del ensayo detallado anteriormente: un modelo unidimensional (HEC-RAS v.5.05), un modelo bidimensional (IBER v.2.4.3), y un modelo tridimensional (FLOW-3D v.11.2). Para la calibración de los modelos se han tenido en cuenta las mediciones de nivel de agua a 0.15 m y 7 m aguas arriba de la compuerta, así como el hidrograma líquido de salida en la compuerta.

Modelo unidimensional HEC-RAS

La geometría implementada en el modelo unidimensional reproduce el canal experimental en toda su longitud (50 m), con una sección rectangular de ancho 2.44 m constante en todo el canal. El canal se discretiza mediante 102 secciones transversales separadas entre sí por una distancia que varía entre 1 m y 0.15 m. Siendo las más cercanas aquellas situadas en las proximidades de la compuerta. La sección transversal situada a 20 m del extremo de aguas abajo es del tipo “Inline-Structure” con una compuerta centrada de 0.15 m de anchura y 0.25 m de altura. La Figura 2 muestra una vista en planta y un perfil longitudinal de la geometría del modelo en HEC-RAS. Para el cálculo se ha utilizado el módulo no permanente (“Unsteady”) con transporte de sedimentos, para el que se ha utilizado un intervalo de cálculo de $\Delta t = 1$ segundo. Los sedimentos se han modelado mediante su diámetro característico ($d_{50} = 1.25$ mm) y su densidad ($\rho_s = 1390$ kg/m³). Para el cálculo del transporte de sedimentos se ha considerado la ecuación de Meyer-Peter and Müller (1948).

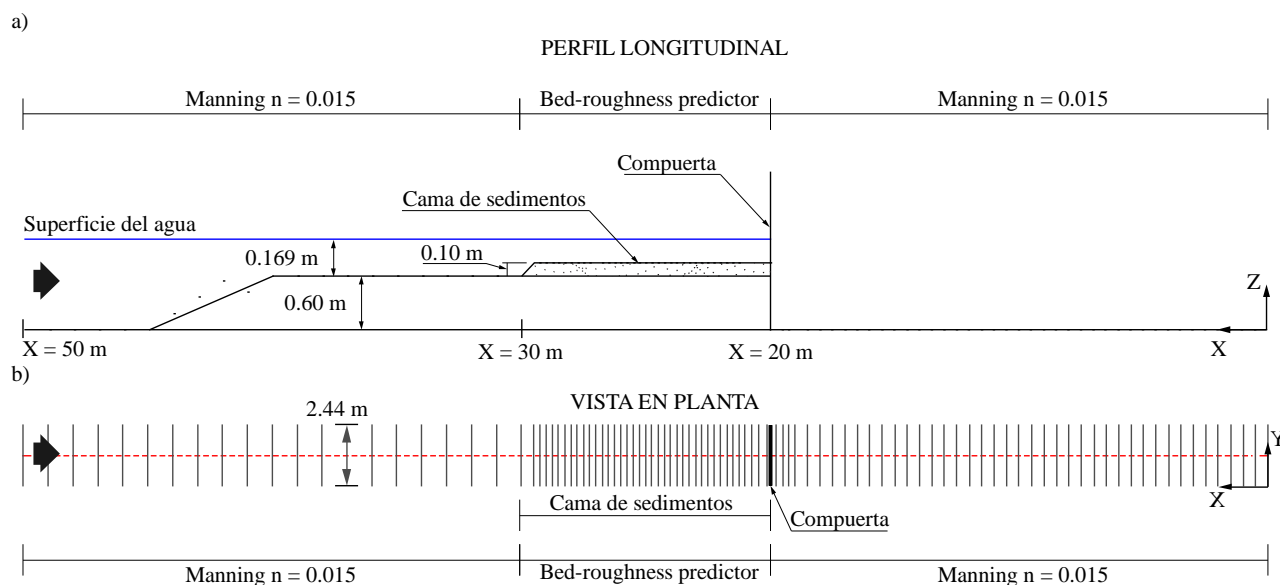


Figura 2 | a) Perfil longitudinal y b) vista en planta de la geometría implementada en el modelo unidimensional HEC-RAS

Las condiciones de contorno para este modelo consisten en: i) un caudal líquido constante e igual a Q_0 en el extremo de aguas arriba, ii) un caudal sólido nulo y constante en el extremo de aguas arriba, y iii) calado normal en el extremo de aguas abajo

con una pendiente de fricción $S_f = 0.005$. Además, se ha establecido como condición interna la velocidad de apertura de la compuerta según el ensayo de Lai and Shen (1996). Como condición inicial se establece, aguas arriba de la compuerta, una altura de agua de 0.169 m con respecto al fondo no erosionable, lo que resulta en un calado inicial de 0.069 m respecto a la superficie de la cama de sedimentos. El tramo comprendido entre la compuerta y la sección situada a 10 m aguas arriba de aquella es erosionable hasta 0.10 m de profundidad. En el resto del canal el fondo no es erosionable. Para la rugosidad de fondo se distinguen tres tramos: i) aguas arriba del fondo erosionable en donde la rugosidad es caracterizada por un coeficiente de Manning constante y de valor 0.015, ii) el tramo de fondo erosionable, aguas arriba de la compuerta, en donde la rugosidad se modela mediante la función “Bed roughness predictor” según el criterio de van Rijn (1984), y iii) aguas abajo de la compuerta en donde la rugosidad se caracteriza por un coeficiente de Manning constante y de valor 0.015. El valor del coeficiente de Manning se obtiene de aplicar la fórmula de Nikuradse para un $d_{50} = 1.25$ mm. La función “Bed-roughness predictor” de HEC-RAS permite considerar el efecto de las formas de fondo en el cálculo de la resistencia hidráulica.

Para la calibración del modelo se han ajustado los siguientes parámetros:

- Los coeficientes de desagüe sumergido y libre de la compuerta ($Cq_s = 0.683$ y $Cq_l = 3$, respectivamente).
- El umbral y el exponente del módulo de cálculo “Mixed Flow Regime”. Este módulo está basado en la metodología “Local Partial Inertia Technique” (Fread et al., 1996) y contribuye a la estabilidad del cálculo de flujos no permanentes. Los valores adoptados son 0 para el umbral y 1 para el exponente.
- La ponderación de las condiciones hidrodinámicas en cada sección transversal con respecto a las secciones de aguas arriba y aguas abajo. HEC-RAS permite promediar los valores hidrodinámicos de una sección con los de las secciones de aguas arriba y aguas abajo, asignando unos pesos específicos a cada una. Los pesos específicos adoptados en este estudio son 0.5 para la sección principal y 0.5 para la sección de aguas abajo.

Modelo bidimensional IBER

En IBER, la geometría reproduce la parte del canal situada aguas arriba de la compuerta, siendo la propia compuerta la condición de contorno de aguas abajo (Figura 3). La malla es estructurada con elementos cuadrados de 0.025 m de lado, lo que resulta en un total de 117110 elementos.

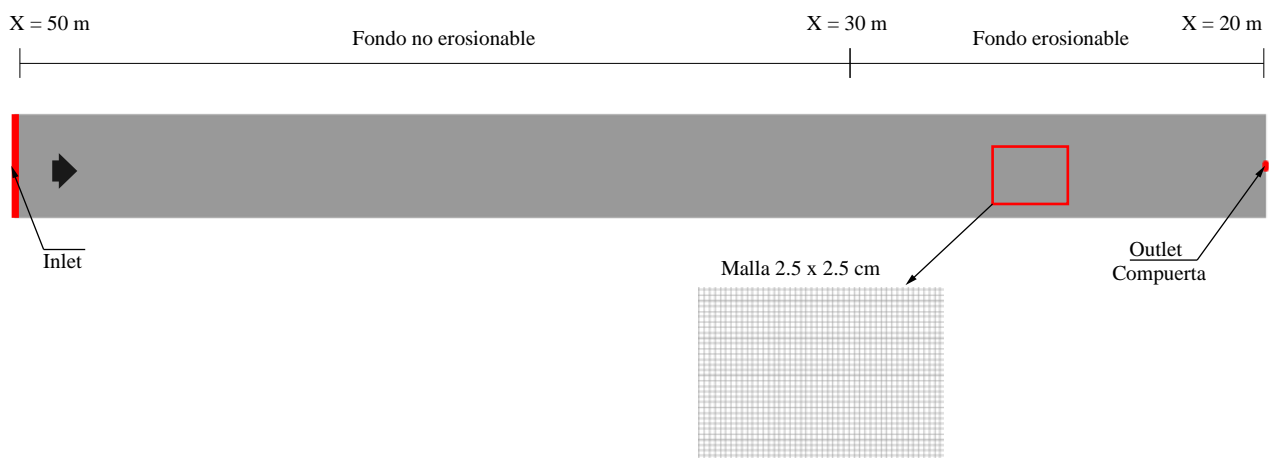


Figura 3 | Vista en planta de la geometría implementada en el modelo bidimensional IBER.

Como condiciones de contorno se han establecido: i) un caudal líquido constante e igual a Q_0 en el extremo de aguas arriba, ii) un caudal sólido nulo y constante en el extremo de aguas arriba, y iii) la evolución temporal de la elevación de la superficie del agua en el extremo de aguas abajo, aplicada en una anchura de 0.15 m y centrada en el canal. Esta evolución se obtiene de las mediciones realizadas por Lai and Shen (1996). Al igual que en el modelo unidimensional, la condición inicial consiste en una altura de agua de 0.169 m y el fondo es erosionable hasta 0.10 m de profundidad en un tramo de 10 m aguas

arriba de la compuerta. La rugosidad de fondo es constante en toda la geometría y es caracterizada por un valor de Manning de 0.015. Los sedimentos se han modelizado mediante su diámetro característico ($d_{50} = 1.25$ mm), ángulo de rozamiento interno (35°), y su densidad ($\rho_s = 1390$ kg/m³). Para la calibración del modelo se han ajustado los siguientes parámetros:

- El esquema numérico. En este estudio se ha utilizado un esquema de Roe de segundo orden
- El valor máximo del número de Courant (CFL), que se ha fijado en 0.7.
- El modelo de turbulencia, para el que se ha adoptado un modelo $k-\varepsilon$ de primer orden.

Modelo tridimensional FLOW-3D

Las simulaciones tridimensionales se han realizado en el programa de diferencias finitas FLOW-3D. Con el fin de reproducir de forma adecuada el volumen almacenado aguas arriba de la compuerta, la geometría considera el canal situado aguas arriba de la compuerta (30 m de longitud). Por simplicidad, en el plano central se consideró una condición de simetría, permitiendo reducir el tamaño de mallado de los elementos en el dominio considerado (Figura 4). Con el fin de independizar los resultados del tamaño de mallado, se realizaron simulaciones con mallados de 0.03, 0.04 y 0.05 m.

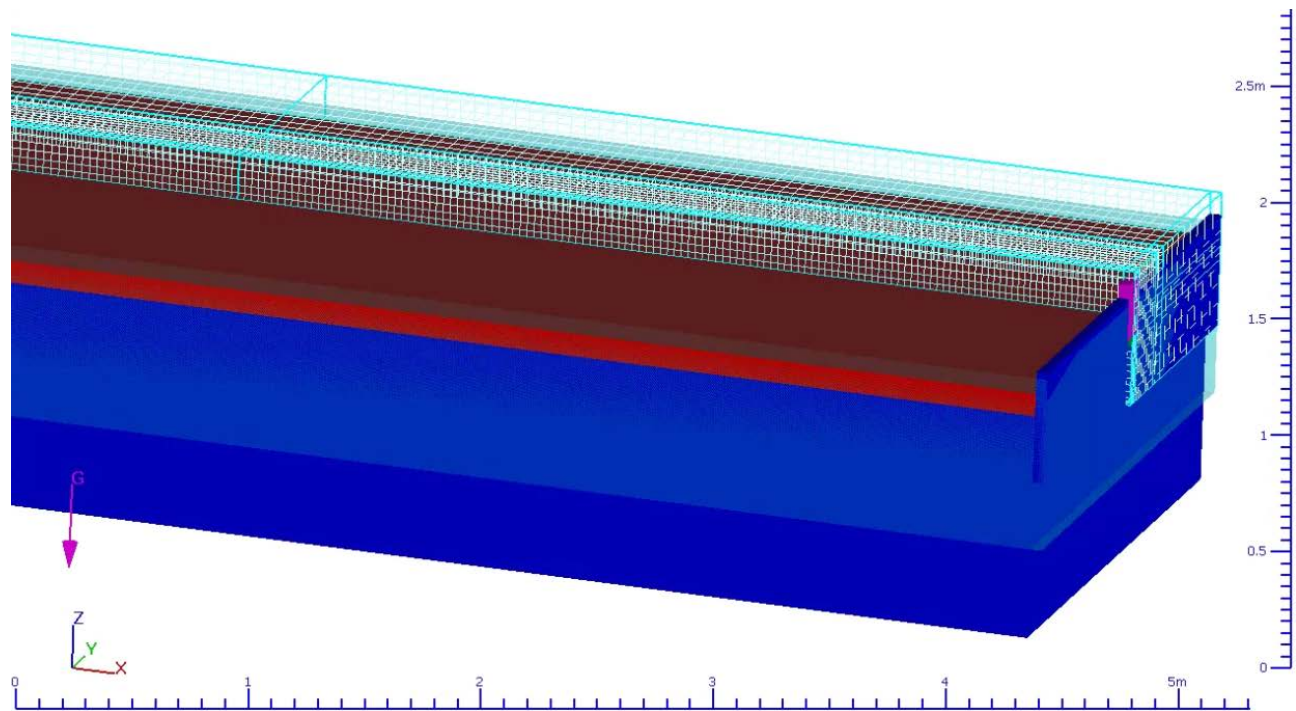


Figura 4 | Detalle del dominio fluido y mallado en la proximidad de la compuerta considerado en FLOW-3D

Como condiciones de contorno se establecen: i) un caudal líquido constante e igual a Q_0 en el extremo de aguas arriba, ii) condición de flujo supercrítico en la salida, y iii) velocidad de apertura de la compuerta con un modelo GMO (General Moving Object) que reproduce la velocidad de apertura de 5 cm por minuto indicada por Lai and Shen (1996). Como condición inicial se consideró el nivel aguas arriba de la compuerta al inicio del experimento (0.169 m). Dentro de las opciones del modelo Sediment Scour (Wei et al., 2014), se optó por usar la definición del número crítico de Shields mediante la ecuación de Soulsby and Whitehouse (1997). Para modelizar los sedimentos se incluyó el diámetro y densidad, así como un ángulo de reposo de 35° . La rugosidad del fondo se calculó con una relación 2.5 del d_{50} (valor recomendado). El coeficiente de Richardson-Zaki se dejó en la unidad (valor por defecto). En base a simulaciones numéricas previas de flushing (Castillo et al., 2015), como modelo de transporte de sedimentos se optó por la ecuación de Meyer-Peter and Müller junto al modelo de turbulencia RNG $k-\varepsilon$.

Para la calibración del modelo se han considerado los siguientes parámetros (Flow Science Inc., 2016):

- a) El parámetro Bed Load Coeficiente del modelo entre 5.3 y 10 (valor por defecto 8 para la ecuación de Meyer-Peter and Müller).
- b) El parámetro Entrainment Coefficient del modelo entre 0.01 y 0.05 (valor por defecto 0.018).
- c) El parámetro Maximum Packing Fraction del modelo entre 0.6 y 0.8 (por defecto, 0.64).

RESULTADOS

Figura 5 muestra los resultados de los tres modelos junto con las mediciones realizadas por Lai and Shen (1996). Estos resultados son el nivel de la superficie del agua a 0.15 m y 7 m aguas arriba de la compuerta, el hidrograma líquido de salida en la compuerta, y la concentración de sedimentos en dicho hidrograma. En general, los resultados que mejor se ajustan a las mediciones de Lai and Shen (1996) son aquellos obtenidos con FLOW-3D, mientras que los resultados obtenidos con IBER presentan mayores diferencias con dichas mediciones.

Así, en la evolución del nivel de agua a 0.15 m aguas arriba de la compuerta (Figura 5a), los resultados obtenidos con HEC-RAS y FLOW-3D presentan valores muy similares a las mediciones, mientras que los obtenidos con IBER sobreestiman el nivel de agua a partir del minuto 14 de simulación.

Con respecto a la evolución del nivel de agua a 7.00 m aguas arriba de la compuerta (Figura 5b), los resultados obtenidos con FLOW-3D reflejan mejor dicha evolución, mientras que los resultados obtenidos con HEC-RAS e IBER difieren de las mediciones de forma significativa a partir del minuto 20 de simulación. A partir de este instante, los resultados obtenidos por HEC-RAS presentan un patrón descendente al igual que las mediciones, aunque más pronunciado que el de estas; mientras que los resultados obtenidos por IBER presentan un patrón plano que contrasta con el patrón descendente de las mediciones.

El hidrograma de salida obtenido con FLOW-3D es el que mejor se ajusta a las mediciones de Lai and Shen (1996), aunque presenta un pico que no es reflejado por estas (Figura 5c). Esto puede ser debido a que la frecuencia de muestreo (2 minutos) no fue suficiente para caracterizar dicho pico. El hidrograma obtenido con HEC-RAS presenta unos resultados similares a las mediciones hasta el minuto 16 de simulación, a partir del cual sobreestima el caudal con respecto a los valores de Lai and Shen (1996). El valor pico de este hidrograma es inferior al obtenido con FLOW-3D, aunque se produce en el mismo instante. El hidrograma obtenido con IBER está ligeramente retrasado respecto a las mediciones y presenta un valor pico inferior a los obtenidos con los otros modelos.

En cuanto a la concentración de sedimentos en el hidrograma de salida (Figura 5d), los resultados que mejor se ajustan a las mediciones de Lai and Shen (1996) son aquellos obtenidos con FLOW-3D, aunque presentan valores inferiores a dichas mediciones. Los resultados obtenidos con HEC-RAS presentan un patrón similar a las mediciones de Lai and Shen (1996) aunque sobreestiman los valores de concentración. En el caso de IBER, los valores de concentración obtenidos con este modelo son significativamente inferiores a los medidos por Lai and Shen (1996) y su evolución temporal difiere también de la observada en dichas mediciones.

A la vista de estos resultados, se puede decir que el modelo HEC-RAS tiende a sobreestimar el transporte de sedimentos y, por tanto, la erosión del fondo. Esta sobreestimación da lugar a niveles de agua inferiores a los medidos aguas arriba de la compuerta y a valores de concentración superiores a los obtenidos por Lai and Shen (1996) (Figura 5b,d). Por el contrario, el modelo IBER tiende a subestimar el transporte de sedimentos y la erosión de fondo, lo que resulta en niveles de agua superiores a los medidos aguas arriba de la compuerta y valores de concentración muy inferiores a las mediciones de Lai and Shen (1996) (Figura 5b,d).

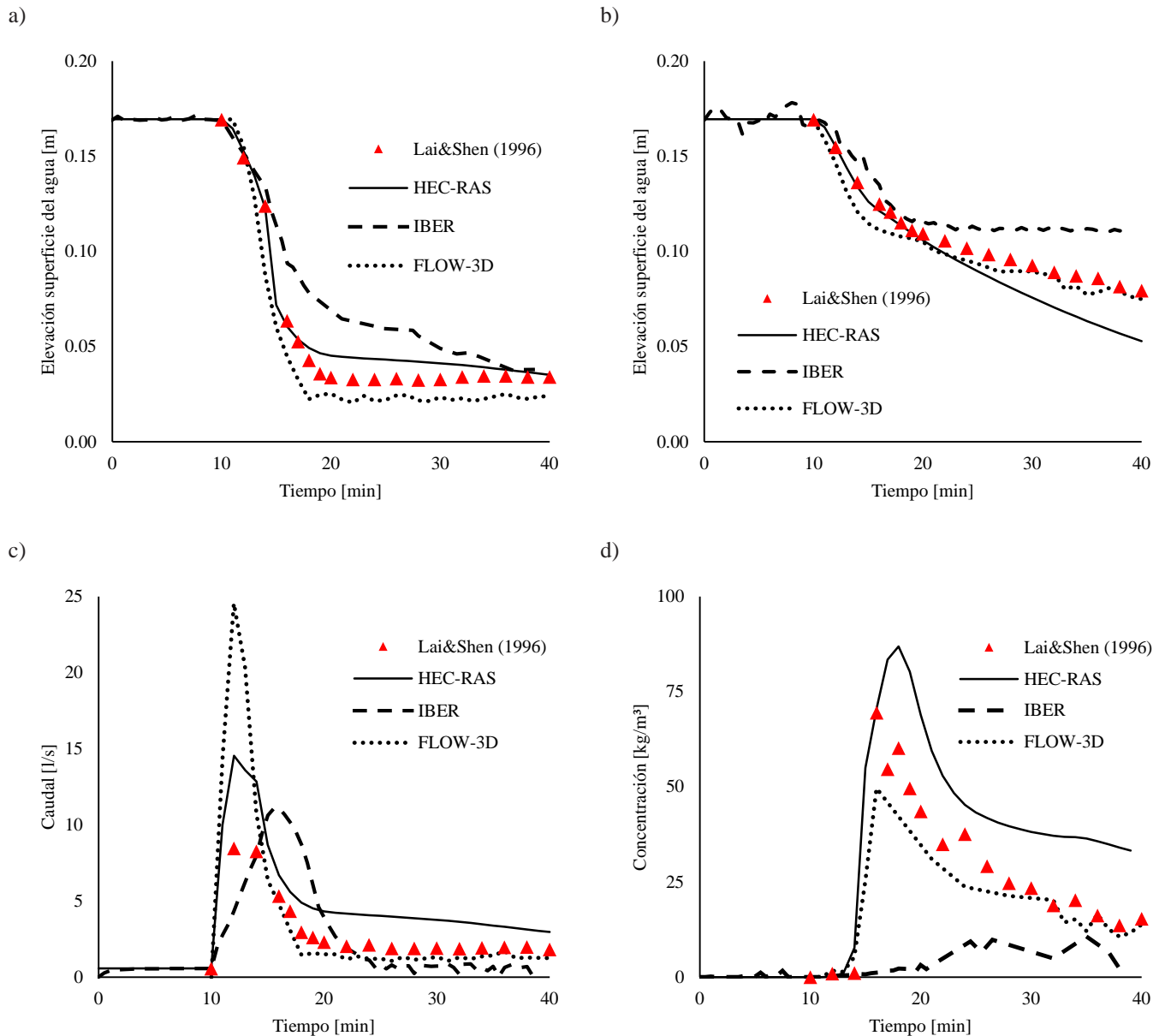


Figura 5 | a) Evolución del nivel de agua a 0.15 m aguas arriba de la compuerta ($X = 20.15$ m). b) Evolución del nivel de agua a 7.00 m aguas arriba de la compuerta ($X = 27.00$ m). c) Hidrograma de salida en la compuerta ($X = 20$ m). d) Evolución de la concentración de sedimentos en el hidrograma de salida en la compuerta ($X = 20$ m).

CONCLUSIONES

Con objeto de analizar la capacidad de diversos modelos hidrodinámicos existentes para la simulación del flushing, se han realizado tres modelos numéricos de un mismo ensayo de laboratorio con HEC-RAS (unidimensional), IBER (bidimensional) y FLOW-3D (tridimensional).

Durante la calibración de los modelos se ha puesto de manifiesto el carácter altamente transitorio (no permanente) del flushing, que da lugar a fuertes gradientes de velocidad y calado. Esto combinado con el transporte de sedimentos hace la calibración de los modelos sea un proceso laborioso, y requiera de un conocimiento especializado de las opciones de calibración de cada uno de los modelos.

Los resultados obtenidos con el modelo FLOW-3D son los que más se aproximan a las mediciones realizadas en el ensayo de referencia, mientras que los obtenidos con HEC-RAS e IBER presentan diferencias con dichas mediciones. Así, los resultados obtenidos con HEC-RAS tienden a sobreestimar el transporte de sedimentos y la erosión, mientras que los resultados obtenidos con IBER tienden a subestimarlos. Estas diferencias se pueden atribuir a una calibración insuficiente de estos modelos. En este sentido, parámetros como los coeficientes de desagüe de la compuerta, los parámetros del módulo de cálculo (LPI) así como los coeficientes de la fórmula de transporte de sedimentos deben ser revisados en el modelo de HEC-RAS. De la misma manera, en IBER, el tamaño de malla, el esquema de cálculo y del modelo de turbulencia deben ser ajustados con el fin de intentar obtener resultados más próximos al modelo físico.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco del proyecto EFISED, y está financiado por el programa Saavedra Fajardo (20403/SF/17) de la Fundación Séneca de la Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia.

REFERENCIAS

- Atkinson, E. (1996). *The feasibility of Flushing Sediment from Reservoirs. Report OD 137*.
- Castillo, L. G., Carrillo, J. M., and Álvarez, M. A. (2015). Complementary Methods for Determining the Sedimentation and Flushing in a Reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(11), 05015004. doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001050
- Cobo, R. (2008). Los sedimentos de los embalses españoles. *Ingeniería Del Agua*, 15(4), 231–241.
- Esmaili, T., Sumi, T., Kantoush, S., Kubota, Y., Haun, S., and Rütther, N. (2017). Three-Dimensional Numerical Study of Free-Flow Sediment Flushing to Increase the Flushing Efficiency: A Case-Study Reservoir in Japan. *Water*, 9(11), 900. doi:10.3390/w9110900
- Espa, P., Brignoli, M. L., Crosa, G., Gentili, G., and Quadroni, S. (2016). Controlled sediment flushing at the Cancano Reservoir (Italian Alps): Management of the operation and downstream environmental impact. *Journal of Environmental Management*, 182, 1–12. doi:10.1016/j.jenvman.2016.07.021
- Fread, D. L., Jin, M., and Lewis, J. M. (1996). An LPI Numerical Implicit Solution for Unsteady Mixed-Flow Simulation. In *North American Water and Environment Congress & Destructive Water, ASCE, Anaheim, California* (pp. 22–28).
- Gibson, S., and Boyd, P. (2016). Monitoring, measuring, and modeling a reservoir flush on the Niobrara River in the sandhills of Nebraska, c, 1448–1455.
- Guillén-Ludeña, S., Manso, P. A., Schleiss, A. J., Schwegler, B., Stamm, J., and Fankhauser, A. (2018a). Sediment balance of a cascade of alpine reservoirs based on multi-decadal data records. In A. Paquier & N. Rivière (Eds.), *River Flow 2018 - Ninth International Conference on Fluvial Hydraulics* (Vol. 40). doi:10.1051/e3sconf/20184003012
- Guillén-Ludeña, S., Manso, P., and Schleiss, A. (2018b). Multidecadal Sediment Balance Modelling of a Cascade of Alpine Reservoirs and Perspectives Based on Climate Warming. *Water*, 10(12), 1759. doi:10.3390/w10121759
- Kondolf, G. M., Gao, Y., Annandale, G. W., Morris, G. L., Jiang, E., Zhang, J., ... Yang, C. T. (2014a). Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents. *Earth's Future*, 2(5), 256–280. doi:10.1002/2013EF000184
- Kondolf, G. M., Rubin, Z. K., and Minear, J. T. (2014b). Dams on the Mekong: Cumulative sediment starvation. *Water Resources Research*, 50(6), 5158–5169. doi:10.1002/2013WR014651
- Lai, J.-S., and Shen, H. W. (1996). Flushing sediment through reservoirs. *Journal of Hydraulic Research*, 34(2), 237–255. doi:10.1080/00221689609498499
- Meyer-Peter, E., and Müller, R. (1948). Formulas for bed-load transport. In *Proceedings of the 2nd Meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research* (pp. 39–64).
- Morris, G. L., and Fan, J. (1998). *Reservoir sedimentation handbook: design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use*. (1.04.). New York: McGraw-Hill Book Co.

- Naciones Unidas. (2015). Objetivos de Desarrollo Sostenible. 17 Objetivos para transformar nuestro mundo. *Agenda 2030*.
- Romero Díaz, A. (2007). Las inundaciones. In *Atlas Global de la Región de Murcia* (LaVerdad., pp. 250–260). Murcia.
- Samto Atmodjo, P. (2012). The Effect of Water Level on The Effectiveness of Sediment Flushing. *International Journal Waste of Resources*, 2(2), 20–31.
- Sanz Montero, M. E., Avendaño, C., Cobo, R., and Gómez, J. L. (1998). Determinación de la erosión en la Cuenca del Segura a partir de los sedimentos acumulados en sus embalses. *Geogaceta*, 23, 135–138.
- Schleiss, A. J., Franca, M. J., Juez, C., and De Cesare, G. (2016). Reservoir sedimentation. *Journal of Hydraulic Research*, 54(6), 595–614. doi:10.1080/00221686.2016.1225320
- Soulsby, R. L., and Whitehouse, R. J. S. W. (1997). Threshold of sediment motion in Coastal Environments. In *Combined Australian Coastal Engineering and Port Conference, EA* (pp. 149–154).
- Syvitski, J. P. M., and Milliman, J. D. (2007). Geology, Geography, and Humans Battle for Dominance over the Delivery of Fluvial Sediment to the Coastal Ocean. *The Journal of Geology*, 115(1), 1–19. doi:10.1086/509246
- van Rijn, L. C. (1984). Sediment Transport, Part III: Bed forms and Alluvial Roughness. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(12), 1733–1754. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:12(1733)
- Wang, G., Wu, B., and Wang, Z.-Y. (2005). Sedimentation problems and management strategies of Sanmenxia Reservoir, Yellow River, China. *Water Resources Research*, 41(9), 1–17. doi:10.1029/2004WR003919
- Wei, G., Brethour, J., Grünzner, M., and Burnham, J. (2014). *The Sedimentation Scour Model in FLOW-3D*. *Flow Science Report 03-14*.