

Hidromorfología en canales de aguas someras con cavidades laterales y transporte de sedimentos en suspensión

Juez, C.^{a1}, Buehlmann, I.^{a2}, Maechler, G.^{a3}, Schleiss, A. J.^{a4} y Franca, M. J.^{a5}

^{a1}Laboratory of Hydraulic Constructions (LCH), École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). E-mail: ^{a1}carmelo.juez@epfl.ch, ^{a4}anton.schleiss@epfl.ch, ^{a5}mario.franca@epfl.ch.

Línea temática A | Dinámica fluvial, de embalses, estuarios y humedales

RESUMEN

Este artículo presenta los resultados de una campaña de experimentos realizados en un canal abierto con cavidades laterales y alimentado con sedimentos finos. La motivación de este proyecto es estudiar la influencia de las cavidades laterales, como medida de restauración, en el transporte de material fino en suspensión. Con este propósito, se ha realizado la campaña experimental, cuyos ensayos cubren diferentes configuraciones de cavidades laterales rectangulares. Durante los experimentos, se realizaron las siguientes mediciones: i) PIV superficial, ii) medición de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión mediante turbidímetros, y iii) el pesado del sedimento retenido al final de los experimentos. Asimismo, se tomaron fotografías del interior de las cavidades para identificar las áreas de sedimentación. Las zonas primarias de deposición y eficiencia en la captura de sedimentos han sido relacionadas con las dimensiones características de las cavidades laterales. El efecto Seiche, que aparece en determinadas cavidades geométricas, genera un efecto de mezcla vertical que previene parte de la sedimentación que se podría esperar al incrementar el caudal.

Palabras clave | cavidades laterales en márgenes fluviales; sedimento fino; transporte de sedimento en suspensión; PIV superficial.

INTRODUCCIÓN

El curso natural de los ríos y su geometría ha sido tradicionalmente modificado de manera artificial con diferentes fines (agricultura, seguridad frente a inundaciones, producción de energía). Estas modificaciones afectan el transporte de sedimentos a lo largo de los ríos, alterando considerablemente su balance (Allan y Castillo, 2007; Schleiss et al., 2016). A su vez, estas alteraciones dan lugar a déficits o excesos de sedimentos que provocan respuestas morfológicas no deseadas como: erosión del lecho del río, o deposición de sedimentos y colmatación del lecho fluvial (Kondolf, 1997). Desde un punto de vista ecológico, la alteración del balance sedimentario ocasiona también desordenes en la fauna y flora acuática como: abundante crecimiento de algas (Von Bertrab et al., 2013), excesiva turbidez para los peces, o lecho armado que dificulta el desove de los peces (Wood y Armitage, 1997; Kemp et al., 2011).

Por otra parte, la canalización de los ríos da lugar a una geometría recta y monótona. Una manera de revitalizar y restaurar los ríos consiste en la excavación de cavidades en los márgenes del río. Estas cavidades generan zonas con diferentes velocidades que favorecen el desarrollo la vida acuática. Las áreas con bajas velocidades constituyen zonas de descanso, mientras que las zonas con altas velocidades fomentan el intercambio de nutrientes y oxígeno con el canal principal. Estas cavidades laterales también pueden jugar un papel en el cambio de la morfología del río, ya que pueden atrapar los sedimentos finos transportados por el flujo.

El impacto hidrodinámico de estas cavidades laterales en los márgenes de los ríos ha sido analizado ampliamente con anterioridad en numerosos estudios con diversos objetivos tales como: (i) el análisis del proceso de mezcla entre el canal primario y la cavidad, por medio de estudios experimentales (Uijttewaal et al., 2001; Kolyshkin y Ghidaoui, 2002; Le Coz et al., 2006; Weitbrecht et al., 2001 Rivière et al., 2010; Uijttewaal, 2014; Akutina, 2015; Mignot et al., 2016) y estudios numéricos

(Hinterberger et al., 2007; McCoy et al., 2008); la determinación de la fricción adicional generada por la forma no uniforme del margen del río (Meile et al., 2011; Sukhodolov, 2014); o (iii) la dinámica de colmatación interna por sedimento en espigones fluviales (Abad et al., 2008; Ten Brinke et al., 2004; Yossef y de Vriend, 2010; Henning y Hentschel, 2013). Sin embargo, existen pocos estudios experimentales donde además de la hidráulica de las cavidades laterales se incluya el transporte de sedimento fino en suspensión (Sukhodolov et al., 2014).

Con objeto de analizar la influencia de las cavidades laterales en el balance sedimentario del río y en su morfología, se han realizado una campaña de experimentos en un canal abierto alimentado con sedimentos finos en un laboratorio. Estos experimentos cubren diferentes configuraciones de cavidades laterales rectangulares. Este estudio pretende responder a las siguientes cuestiones: (i) ¿Cuál es el impacto de las cavidades laterales sobre la hidrodinámica?, (ii) ¿Qué tipo de cavidad lateral se llenará rápidamente con sedimentos finos? y en consecuencia, ¿Se han de evitar en los proyectos de restauración?, y (iii) ¿Qué tipo de cavidad lateral se llenará parcialmente de sedimentos, favoreciendo la aparición de zonas con altas y bajas velocidades y potencial para diversos hábitats?.

MATERIAL Y MÉTODOS

Descripción del canal experimental

El conjunto de experimentos de laboratorio se ha llevado a cabo en un sistema hidráulico que trabaja en circuito cerrado. Los componentes de dicho sistema son: (i) un tanque situado aguas arriba, de dimensiones 2x1x1 m, que sirve como tanque de mezcla para los sedimentos, (ii) un canal rectangular abierto de dimensiones 7.5x1x1 m con una pendiente de 0.1% (pendiente típica de los flujos subcríticos en los valles Alpinos) y (iii) un tanque situado aguas abajo, de dimensiones 3.5x1x1 m, que sirve como colector del flujo saliente del canal. Posteriormente, el agua recogida en el tanque de aguas abajo es bombeada de nuevo aguas arriba. Un esquema del sistema hidráulico se muestra en la Figura 1.

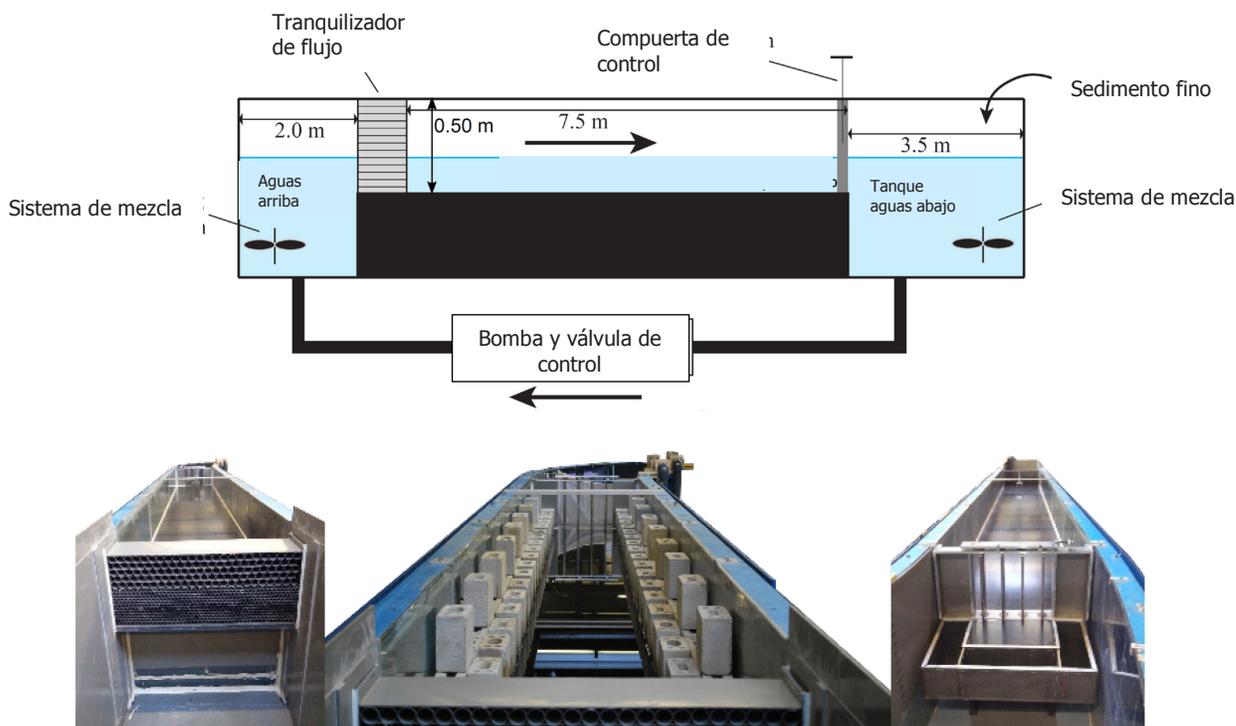


Figura 1 | Esquema del sistema hidráulico (arriba); vista aguas arriba del canal (abajo –izquierda); canal rectangular con los márgenes modificados (abajo –centro); vista aguas abajo del canal (abajo –derecha).

Configuraciones estudiadas

Inicialmente, en los laterales del canal se colocaron en hilera una sucesión de bloques de hormigón (0.25x0.10x0.19 m). De esta manera la anchura original del canal fue disminuida (ver configuraciones 1.0, 2.0 y 3.0 en la Figura 2). Esta primera configuración sin cavidades se estableció como el experimento de referencia. A continuación, diversas configuraciones de cavidades laterales fueron ensayadas al retirar de manera precisa diversos bloques de los márgenes del canal. El diseño de dichas configuraciones con cavidades rectangulares está inspirado en estudios preliminares (Morris, 1955; Meile et al. (2011); Juez et al. (2017)) y está caracterizado por tres dimensiones características: longitud de la cavidad, l ; distancia entre dos cavidades anexas, L ; y la profundidad interna de la cavidad, W . La combinación de dichos parámetros junto con la anchura del canal, b , da lugar a la definición de tres relaciones geométricas claves en su diseño: relación de aspecto, $AR=W/l$; relación de rugosidad, $RR=W/L$; y relación de expansión, $ER=(b+2W)/b$.

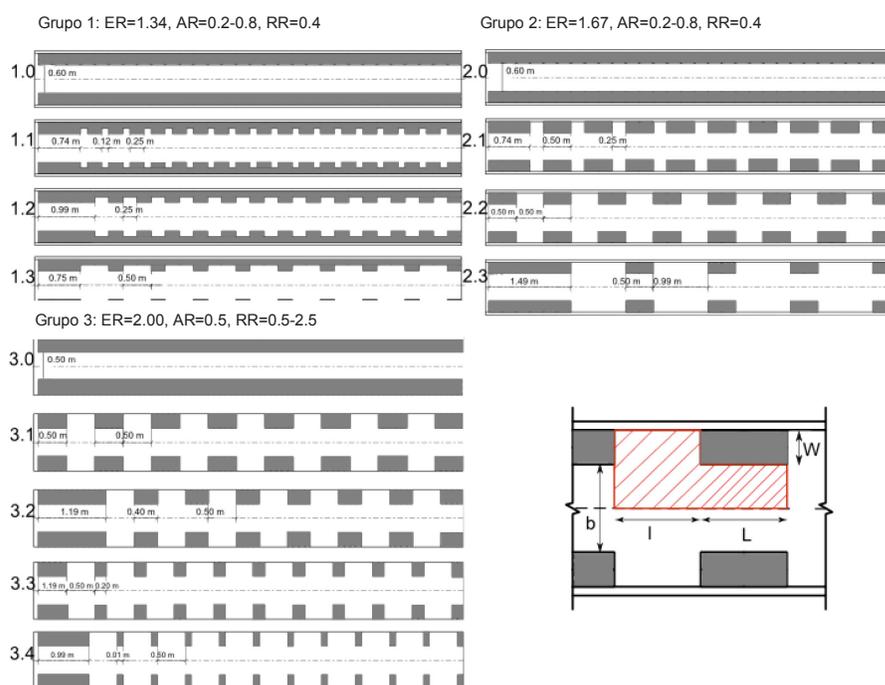


Figura 2 | Configuraciones geométricas ensayadas en el laboratorio y detalle de las dimensiones características utilizadas para diseñar las diferentes configuraciones de cavidades laterales.

Gracias a la definición de estas tres relaciones geométricas (AR, RR, ER) se han estudiado de manera sistemática 10 configuraciones geométricas simétricas con cavidades laterales en los márgenes del canal, ver Tabla 1.

Tabla 1 | Resumen de las relaciones geométricas consideradas en cada una de las configuraciones de cavidades laterales: relación de expansión (ER), relación de aspecto (AR) y relación de rugosidad (RR).

Grupo	Configuración	ER (-)	AR (-)	RR (-)
1	1.1	1.34	0.80	0.40
	1.2	1.34	0.40	0.40
	1.3	1.34	0.20	0.40
2	2.1	1.67	0.80	0.40
	2.2	1.67	0.40	0.40
	2.3	1.67	0.20	0.40
3	3.1	2.00	0.50	0.50
	3.2	2.00	0.50	0.60
	3.3	2.00	0.50	1.20
	3.4	2.00	0.50	2.50

Condiciones iniciales

En cada una de las configuraciones geométricas de cavidades laterales se testaron tres caudales diferentes, correspondientes a tres calados diferentes (tres relaciones de anchura de canal-calado, b/h). Los experimentos se desarrollaron bajo condiciones de aguas someras y flujo subcrítico y turbulento (ver Tabla 2).

Tabla 2 | Resumen de las condiciones iniciales para cada uno de los tres caudales testados.

Caudal (l/s)	Q ₁ = 4.8	Q ₂ = 8.5	Q ₃ = 15.0
Calado, h (m)	0.035	0.050	0.070
Relación b/h (-)	17.26	12.08	8.63
Velocidad (m/s)	0.22	0.29	0.35
Número de Froude (-)	0.44	0.45	0.48
Número de Reynolds (-)	28487	50568	80645
Concentración de sedimento (g/l)	0.50	1.00	1.50
Duración de los experimentos (h)	3.00	4.00	5.00

El sedimento utilizado para los ensayos consistió en un material plástico y artificial (para evitar problemas de crecimiento de algas y en consecuencia problemas de cohesión entre partículas) con $d_{50} = 0.2$ mm. La concentración de sedimento elegida se correspondió con la máxima capacidad portante del flujo para el caudal seleccionado.

Técnicas experimentales

Las técnicas experimentales utilizadas durante el desarrollo de los ensayos de laboratorio consistieron en: la aplicación de PIV superficial, la medición de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión mediante turbidímetros, y el pesado del sedimento retenido al final de los experimentos. Asimismo, se tomaron fotografías del interior de las cavidades para identificar las áreas de sedimentación.

RESULTADOS

Patrones de flujo

Los resultados obtenidos con PIV superficial en el interior de las cavidades y en la zona anexa del canal principal se muestran en la Figura 3 para la configuración geométrica 2.1. Gracias a esta técnica se obtienen valores de velocidades longitudinales y transversales instantáneas ($u'v'$) y sus correspondientes campos de velocidades promediados en el tiempo. Se utilizó una escala adimensional para caracterizar la cavidad: x/l , y/l , siendo l la longitud de la cavidad. Con estas mediciones de velocidad se calcularon posteriormente los campos medios de vorticidad, $\bar{\omega} = \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}$, y los esfuerzos cortantes de Reynolds, $\overline{u'v'}$.

Dependiendo de la relación de aspecto de la cavidad, AR, la cavidad lateral es caracterizada por la formación de uno o dos vórtices, que pueden ocupar total o parcialmente la cavidad. Cuanto menor es el valor de AR menos probabilidad hay de que se genere más de un vórtice en el interior de la cavidad.

Para cada una de las configuraciones y caudales testados se observa que el vórtice principal tiene una rotación en sentido horario. Este vórtice suele estar localizado en la parte de aguas abajo de la cavidad: el flujo proveniente del canal principal se introduce en la cavidad hasta tocar la pared interna ($x/l=1.0$), donde se es forzado a cambiar de dirección y recorrer la pared

inferior interna ($y/l=0.0$), para volver a emerger pasada una distancia y de esta manera reincorporarse al flujo del canal principal. Los campos de velocidad mostrados en la Figura 3 indican un flujo uniforme y unidimensional en el canal principal, mientras que en la cavidad se produce una aceleración del flujo en la zona de mezcla (zona de interacción entre el flujo del canal principal y la cavidad). Al incrementar el caudal se observa una elongación de la zona de mezcla, que posibilita una mayor interacción entre el canal principal y la cavidad.

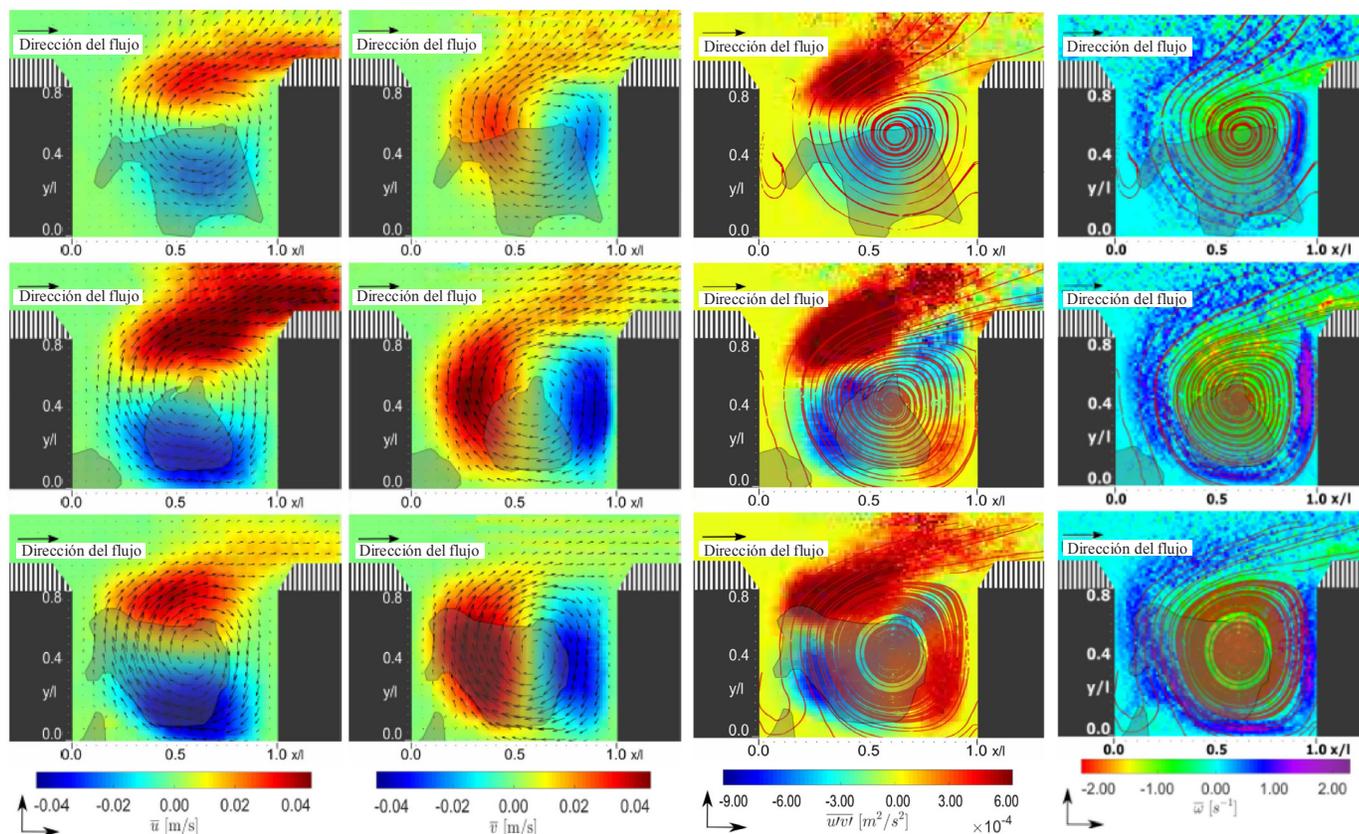


Figura 3 | Configuración geométrica 2.1. Campo de velocidades longitudinal promediado en el tiempo junto con los vectores de velocidad (izquierda); campo de velocidades transversal promediado en el tiempo junto con los vectores de velocidad (centro-izquierda); campo medio de esfuerzos cortantes de Reynolds junto con líneas de corriente (centro-derecha); campo medio de vorticidad junto con líneas de corriente (derecha). Los resultados para los diferentes caudales están representados de arriba a abajo y de 4.8 a 15 l/s. El área sombreada indica la región donde los sedimentos se depositan al final del experimento. En la región rayada no había información disponible para aplicar la técnica de PIV superficial.

Por otra parte, el análisis de los campos de esfuerzos cortantes y vorticidad permiten detectar dos tendencias entre las diferentes configuraciones geométricas: (i) para las configuraciones geométricas con elevadas relaciones de forma y expansión ($AR > 0.5$ y $ER > 0.5$), al incrementar el caudal se observa un incremento de los esfuerzos cortantes y de la vorticidad (ver configuración geométrica 2.2 en la Figura 3); (ii) para las configuraciones geométricas con pequeñas relaciones de forma y expansión ($AR < 0.5$ y $ER < 0.5$), el incremento del caudal no se traduce inmediatamente en un incremento de esfuerzo y cortante, sino que al contrario, se reduce (ver configuración geométrica 1.2 en la Figura 4). Este hecho se debe principalmente al efecto Seiche (Tuna et al. 2013), debido a que el flujo del canal principal es perturbado por la geometría de las cavidades laterales y esto genera una onda de resonancia transversal a la dirección del flujo. Dicha onda transversal viaja de la pared interna de una cavidad ($y/l=0.0$) hasta la pared interna de la cavidad opuesta. La presencia de este efecto tiene un efecto disipador, ya que parte de la energía del flujo se disipa en un proceso de mezcla vertical asociado a la onda resonante del Seiche.

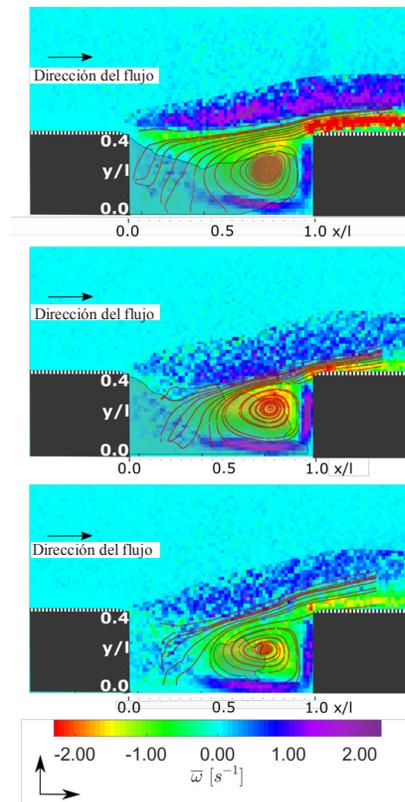


Figura 4 | Campo medio de vorticidad junto con líneas de corriente para la configuración 1.2. Los resultados para los diferentes caudales están representados de arriba a abajo y de 4.8 a 15 l/s. El área sombreada indica la región donde los sedimentos se depositan al final del experimento. En la región rayada no había información disponible para aplicar la técnica de PIV superficial.

Patrones de flujo

Durante el desarrollo de los experimentos, la concentración de sedimento en suspensión fue registrada de manera continua en dos puntos del canal: aguas arriba y aguas abajo. Posteriormente se realizó una media de ambas medidas y se normalizó con la concentración inicial considerada en cada ensayo (0.5, 1.0 ó 1.5 g/l). De esta manera, se pudo obtener la dinámica de sedimentación para cada caso (ver Figura 5). Para todas las condiciones experimentales ensayadas se observó un decaimiento inicial rápido de la concentración. Posteriormente, la concentración de sedimento se estabilizó hasta alcanzar un valor de equilibrio al final de cada experimento. Se observó que para las configuraciones geométricas con una relación de aspecto pequeña ($AR < 0.5$), la velocidad de decaimiento de la concentración de sedimento en suspensión fue mayor y el equilibrio se alcanzó antes.

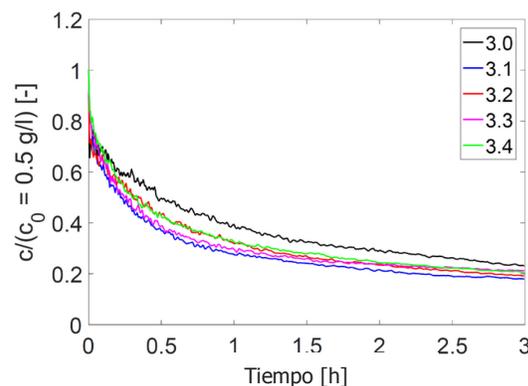


Figura 5 | Configuraciones geométricas para el grupo 2. Decaimiento temporal de la concentración de sedimento en suspensión. Los resultados son mostrados para el caudal de 4.8 l/s.

Captura de sedimento por las cavidades

Para analizar la dinámica de captura de sedimento por las cavidades laterales, los sedimentos depositados (o atrapados) por las cavidades fueron recogidos al final de cada ensayo. La masa total de material fue posteriormente dividida por el área ocupada por las cavidades obteniendo de esta manera una tasa de captura (g/cm^2). La Figura 6 muestra las tasas de captura de sedimento para cada una de las configuraciones geométricas estudiadas.

La relación de forma, AR, es el parámetro geométrico más relevante a la hora de valorar la eficiencia en la tasa de captura. Para valores de $\text{AR} > 0.5$, las tasas de captura son menores (ver grupos 1 y 2). El caudal intermedio, 8.5 l/s, es el caudal que obtiene las mayores tasas de captura con independencia de la configuración geométrica considerada.

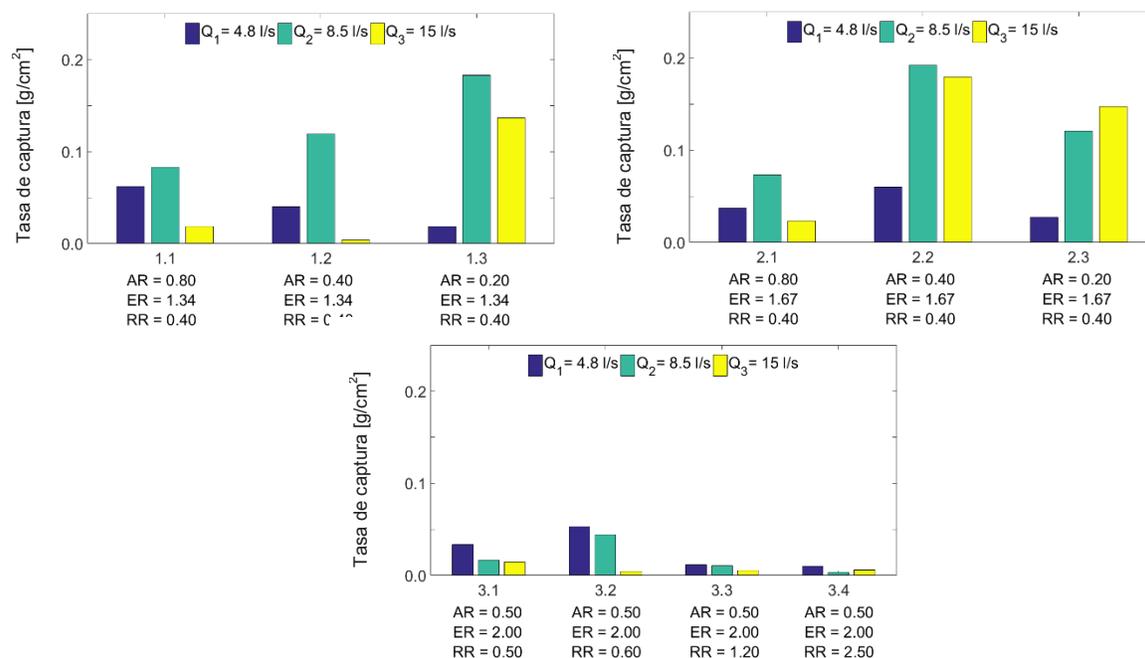


Figura 6 | Tasa de captura para cada una de las configuraciones geométricas de cavidades laterales y para cada uno de los caudales considerados.

CONCLUSIONES

La relación de aspecto, AR, es el parámetro geométrico más relevante para caracterizar las cavidades laterales, tanto desde un punto de vista hidráulico como morfológico. Es un parámetro importante a la hora de determinar: la posición y número de vórtices generados en el interior de la cavidad así como la magnitud de la tasa de captura.

Por otra parte, merced a los resultados de este trabajo se puede concluir que: las cavidades con parámetros de relación de aspecto pequeños ($\text{AR} < 0.5$), relación de expansión elevados ($\text{ER} > 0.5$) y baja relación de rugosidad ($\text{RR} < 0.5$) presentan unas tasas de captura elevadas y por lo tanto, se llenan rápidamente con sedimentos finos y deberían evitarse en los proyectos de restauración de márgenes fluviales. Cavidades laterales con mayores relaciones de forma ($\text{AR} > 0.5$) y mayores relaciones de rugosidad ($\text{RR} > 0.5$) permiten que la cavidad se llene parcialmente y mucho más lentamente. Este tipo de situaciones son las ideales para los proyectos de restauración, puesto que posibilitan la aparición de zonas con velocidades diferenciadas en el interior de las cavidades.

Por otra parte, la magnitud del caudal impuesto en el canal juega también un papel relevante en los procesos de sedimentación en el interior de las cavidades. El caudal intermedio, 8.5 l/s, proporciona la mayor tasa de captura de sedimento.

El efecto Seiche genera un efecto de mezcla vertical que previene parte de la sedimentación que se podría esperar al incrementar el caudal y en consecuencia, la cantidad de sedimento transportado por el flujo.

Por último, los patrones de flujo obtenidos con la técnica de PIV superficial muestran una buena correlación con los patrones de sedimentación observados. El área del interior de las cavidades donde se encuentra el vórtice principal, se corresponde con el área de sedimentación primaria. Las regiones donde la velocidad es máxima también se corresponden con áreas sin sedimentación.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el programa FP7-PEOPLE-2013-ITN (Marie Curie Actions) de la Unión Europea, proyecto 607394-SEDITRANS. Asimismo, los autores agradecen el apoyo de la Oficina Federal para el Medio Ambiente de Suiza (FOEN).

REFERENCIAS

- Abad, J., Rhoads, B., Guneralp, I., Garcia, M. 2008. Flow structure at different stages in a meander-bend with bendway weirs. *Journal of Hydraulic Research*, 134(8), 1052-1063.
- Akutina, Y. 2015. Experimental investigation of flow structures in a shallow embayment using 3D-PTV. *PhD Thesis*. McGill University, Montréal.
- Allan, J.D., Castillo, M.M. 2007. Stream ecology: structure and function of running waters. Springer, Netherlands.
- Henning, M., Hentschel, B. 2013. Sedimentation and flow patterns induced by regular and modified groynes on the River Elbe, Germany. *Ecohydrology*, 6(4), 598-610.
- Hinterberger, C., Frohlich, J., Rodi, W. 2007. Threedimensional and depth-averaged large eddy simulations of some shallow water flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(8), 857-872.
- Juez, C., Buhmann, I, Maechler, G., Schleiss, A. J., Franca, M. J. 2017. Transport of suspended sediments under the influence of bank macro-roughness. *Earth Surface Processes and Landforms*. Under review.
- Kemp, P., Sear, D., Collins, A., Naden, P., Jones, I. 2011. The impacts of ne sediment on riverine fish. *Hydrological Processes*, 25, 1800-1821.
- Kolyshkin, A.A., Ghidaoui, M.S. 2002. Gravitational shear instabilities in compound and composite channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(12), 1076-1086.
- Kondolf, G.M. 1997. Hungry water: Effects of dams and gravel mining on river channels. *Environnemental Management*, 21(4), 533-551.
- Le Coz, J., Brevis, W., Niño, Y. 2006. Open-channel side-cavities: A comparison of field and flume experiments. In River Flow 2006, Two Volume Set: Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, Lisbon, Portugal, 6-8 September 2006 (p. 145). CRC Press.
- McCoy, A., Constantinescu, G., Weber, L.J. 2008. Numerical investigation of ow hydrodynamics in a channel with a series of groynes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(2), 157-172.
- Meile, T., Boillat, J.-L., Schleiss, A.J. 2011. Flow resistance caused by large-scale bank roughness in a channel. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(12), 1588-1597.
- Mignot, E., Cai, W., Launay, G., Rivière, N., Escauriaza C. 2016. Coherent turbulent structures at the mixing-interface of a square open-channel lateral cavity. *Physics of Fluids*, 28, 045104.
- Morris, M.H. 1955. A new concept of flow in rough conduits. *Transactions American Society of Civil Engineers*, 120, 373-410.

- Rivière, N., Garcia, M., Mignot, E., Travin, G. 2010. Characteristics of the recirculation cell pattern in a lateral cavity. Presented at the River Flow, ISBN 978-3-939230-00-7.
- Schleiss, A.J., Franca, M.J., Juez, C., De Cesare, G. 2016. Reservoir sedimentation, *Journal of Hydraulic Research*, pages 1-20.
- Sukhodolov, A. 2014. Hydrodynamics of groyne fields in a straight river reach: insight from field experiments. *Journal of Hydraulic Research*, 52(1), 105-120.
- Ten Brinke, W.B.M., Schulze, F., Van Der Veer, P. 2004. Sand exchange between groyne-field beaches and the navigation channel of the dutch rhine: the impact of navigation versus river flow. *River Research and Applications*, 20, 899-928.
- Tuna, B., Tinar, E., Rockwell, D. 2013. Shallow flow past a cavity: globally coupled oscillations as a function of depth. *Experiments and Fluids*, 54, 1586.
- Uijtewaal, W.S.J. 2014. Hydrodynamics of shallow flows: application to rivers. *Journal of Hydraulic Research*. 52, 157-172.
- Uijtewaal, W.S.J., Lehmann, D.V., Mazijk, A.V. 2001. Exchange processes between a river and its groyne fields: Model experiments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(11), 928-936.
- Von Bertrab, M.G., Krein, A., Stendera, S., Thielen, F., Hering, D. 2013. Is fine sediment deposition a main driver for the composition of benthic macroinvertebrate assemblages? *Ecological Indicators*, 24, 589-598.
- Weitbrecht, V., Jirka, G.H. 2001. Flow patterns and exchange processes in dead zones of rivers, in: Proceedings of the congress-international association for hydraulic research. pp. 439-445.
- Wood, P.J., Armitage, P.D. 1997. Biological effects of fine sediment in the lotic environment. *Environmental Management*. 21, 203-217.
- Yossef, M.F.M., de Vriend, H.J. 2010. Sediment Exchange between a River and Its Groyne Fields: Mobile-Bed Experiment. *Journal of Hydraulic Engineering*. 136, 610-625.