

CARACTERIZACIÓN DE ZONAS DE SEPARACIÓN DEL FLUJO EN UN CANAL CURVO CON FONDO PLANO MEDIANTE UNA SIMULACIÓN DETACHED EDDY SIMULATION (DES)

CHARACTERIZATION OF FLOW SEPARATION ZONES IN A CURVED CHANNEL WITH FLAT BOTTOM USING A DETACHED EDDY SIMULATION (DES)

I. Matías Ragessi^a, Leticia Tarrab^a, Jonathan Muchiut^{a,b}, Laura Motta Milesi^a,

Román Martino^{a,b}, Wernher Brevis^c y Andrés Rodríguez^{a,b}

^a LH - Laboratorio de Hidráulica, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina

^b Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología (IDIT CONICET/UNC). FCEFyN, Córdoba, Argentina.

^c Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental y Departamento de Minería, Pontificia Universidad Católica de Chile

E-mail: matia.ragessi@unc.edu.ar

Palabras Clave: flujo en curvas, DES, corrientes secundarias

Resumen: En los canales curvos, además de las clásicas celdas de corrientes secundarias, se desarrollan otras estructuras coherentes en zonas de separación del flujo cercanas a las márgenes. Estos procesos disminuyen el ancho efectivo del canal y son de importancia en los procesos de erosión de márgenes y en la morfodinámica de meandros fluviales. Los modelos numéricos de alta resolución espacio-temporal han permitido avanzar en la investigación de estas estructuras turbulentas. En este caso se aplicó un modelo con enfoque en resolver las grandes escalas de la turbulencia, Detached Eddy Simulation (DES), que combina la Simulación de Grandes Vórtices y las Ecuaciones de Navier-Stokes promediadas según Reynolds. Se investigaron los procesos de separación del flujo que ocurren cerca de las márgenes y se compararon con resultados de experimentos de laboratorio. El modelo DES permitió caracterizar procesos y estructuras coherentes con un nivel de detalle espacio-temporal mayor al que fue posible de medir en laboratorio.

Keywords: flow in curved channel, DES, secondary flow

Abstract: In curved channels, in addition to the classic secondary flow cells, other coherent structures develop in flow separation zones near the banks. These processes reduce the effective channel width and are of importance in bank erosion processes and in the morphodynamics of river meanders. High-resolution space-time numerical models have allowed for advancements in the investigation of these turbulent structures. In this case, a model focused on resolving large-scale turbulence, Detached Eddy Simulation (DES), which combines Large Eddy Simulation and Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations, was applied. Flow separation processes occurring near the banks were studied and compared with laboratory experiment results. The DES model enabled the characterization of processes and coherent structures at a spatial and temporal level greater than what was achievable through laboratory measurements.

1. INTRODUCCIÓN

Cambios abruptos en la dirección del flujo pueden dar lugar a la separación del flujo de las fronteras, como ocurre con frecuencia en formas de fondo en ríos y alrededor de estructuras ingenieriles como las pilas de puentes. También se ha observado la separación del flujo en curvas pronunciadas de ríos. En los canales curvos, además de las clásicas celdas de corrientes secundarias, se desarrollan otras estructuras coherentes en las zonas cercanas a las márgenes, las cuales son de importancia en los procesos de erosión de márgenes y en la morfodinámica de meandros fluviales. En particular, existen dos zonas en las cuales se desarrolla una separación del flujo en las márgenes y las mismas se encuentran relacionadas con el perfil de elevación de la superficie libre del flujo.

En el caso de curvas abruptas (cociente entre radio de la curva y el ancho del canal del orden de 1.5), cuando la curvatura de la margen aumenta fuertemente, el flujo tiende a alejarse de la margen interna impulsado por las fuerzas de inercia (y fuerzas centrífugas). La acumulación de masa en la margen externa provoca una inclinación transversal de la superficie del agua y un gradiente de presión que aumenta hacia la margen cóncava provocando que el flujo desarrolle una zona de separación del flujo en la margen interna a la salida de la curva. La separación del flujo ocurre típicamente aguas abajo del cambio máximo en la curvatura de la margen interna, observándose que el núcleo de velocidades más altas migra hacia la margen externa.

La zona de separación cercana a la margen interna se encuentra delimitada por una capa de corte altamente energética, en la cual se desarrolla una celda de circulación secundaria horaria adicional debido al gradiente de velocidades (van Balen et al., 2010; Kashyap et al., 2012). En esta zona se desarrollan grandes remolinos turbulentos cuyo crecimiento es impulsado por inestabilidades del tipo Kelvin-Helmholtz (KH) (Pope, 2000). Estos vórtices modifican la intensidad de la turbulencia y los esfuerzos de corte en la zona cercana a las márgenes y, en consecuencia, aumentaría la capacidad del flujo de transportar sedimentos. Se ha observado en simulaciones numéricas que estos vórtices se vuelven más coherentes cuando se incrementa el número de Reynolds (Koken et al., 2013).

Por otra parte, la interacción entre el gradiente de presión en dirección centrípeta inducido por la inclinación transversal de la superficie del agua y la fuerza centrífuga conduce al desarrollo de una celda principal de flujo secundario inducida por la curvatura del canal. En esta celda, las velocidades tienen dirección centrífuga (hacia la margen externa) en la parte superior de la columna de agua y centrípeta (velocidades hacia la margen interna) en la parte inferior de la columna de agua. Este flujo secundario comienza a desarrollarse en la entrada de la curva, alcanza su pleno desarrollo en la curva y se debilita en la parte final del tramo curvo.

Adicionalmente, en la margen externa se observan celdas de flujo secundario (*outer-bank cells of secondary flow*) que tienen un sentido de rotación opuesto a la celda de corriente secundaria, que se desarrolla en la región central del canal (Blanckaert, 2015). Las celdas sobre la zona externa contribuyen a la estabilidad de la margen (Hey and Thorne, 1975; deVriend and Geldof, 1983; Blanckaert and de Vriend, 2005). Blanckaert and Graf (2004) encontraron que esta celda forma una zona de amortiguamiento que aleja el núcleo de velocidades máximas de la margen y la protege. A pesar de que esta zona de amortiguamiento en la margen externa es una pequeña porción de la sección transversal en la mayoría de los ríos, es de gran importancia porque afecta la distribución de esfuerzos de corte y los procesos de erosión. La intensidad de esta celda se incrementa con el caudal y la pendiente de la margen externa.

Los experimentos realizados por Blanckaert (2009, 2010, 2011) han permitido avanzar en la comprensión del comportamiento tridimensional del flujo turbulento en un canal curvo. Los resultados de las mediciones muestran patrones del flujo promediados en el tiempo. Los valores fueron obtenidos en una grilla gruesa la cual fue limitada por las técnicas e instrumentos de

medición y no permitió proveer información de esfuerzos de corte en bordes y dinámica espacial y temporal de las estructuras turbulentas que se desarrollan en zonas cercanas a las márgenes. Estas estructuras juegan un rol importante en las corrientes secundarias inducidas por curvatura, las celdas de corrientes secundarias en zonas cercanas márgenes, la turbulencia, la separación del flujo y los esfuerzos de corte (Whiting and Dietrich, 1993; Abad and Garcia, 2009; Constantinescu et al., 2011; Blanckaert et al., 2012, 2013).

A pesar de su importancia en lo que respecta a la erosión de las márgenes y a la morfodinámica de los ríos los procesos hidrodinámicos que ocurren cerca de la márgenes en canales abiertos curvos todavía son poco comprendidos (Blanckaert et al., 2012). Estos vacíos en el conocimiento se deben en gran medida a la falta de datos experimentales detallados.

Por otro lado, los modelos numéricos de alta resolución espacio-temporal han permitido avanzar en la investigación de estas estructuras turbulentas y su influencia en el flujo en el transporte de sedimentos y en la evolución temporal de la batimetría. En este caso se consideran los modelos con enfoque en resolver las grandes escalas de la turbulencia, como la Simulación de Grandes Vórtices (LES). Otra alternativa es utilizar una técnica combinada de Simulación de Grandes Vórtices y Ecuaciones de Navier-Stokes promediadas o Detached Eddy Simulation (DES). Las simulaciones numéricas basadas en las ecuaciones tridimensionales promediadas de Reynolds (RANS) no han logrado resolver satisfactoriamente el flujo en la zona cercana a la margen externa. Van Balen et al. (2010) y Koken et al. (2013) simularon mediante técnicas numéricas que resuelven pequeños vórtices el proceso de separación en la margen interna que fue medido experimentalmente por Blanckaert (2009). En los resultados se observaron celdas de corrientes secundarias en la zona cercana a la margen interna, mientras que los modelos RANS no lograron reproducir las celdas en la margen. Los modelos RANS predicen una única celda de corriente secundaria central que ocupa todo el ancho del canal y no logran resolver la celda adicional de corriente secundaria (en la margen interna) que se genera por la turbulencia y estructuras coherentes fluctuantes producidas en la zona de separación del flujo. La simulación precisa de esta celda de flujo secundaria adicional es un requisito para la simulación precisa del proceso de separación interna de bancos, incluido el desarrollo de la capa de corte que ocurre en la zona de separación del flujo.

Los modelos LES y DES han demostrado ser una poderosa herramienta para investigar la física del flujo en curvas y canales meandriformes de curvatura media y alta, en escala de laboratorio. Luego de ser validados con datos experimentales, tales modelos tienen la capacidad para describir el flujo, las estructuras turbulentas y los esfuerzos cortantes a un nivel de detalle que excede a las posibilidades de lograrlo en experimentos físicos. Koken et al. (2013) realizó una modelación del tipo DES de los procesos hidrodinámicos y mecanismos de erosión de sedimentos en una curva de un canal con batimetría plana y logró capturar numéricamente estas estructuras que no fueron posibles de medir experimentalmente y analizar el vínculo de ellas con los esfuerzos de corte y los mecanismos de erosión.

Este trabajo tiene como objetivo avanzar en el conocimiento de los procesos que ocurren en el flujo en un tramo de canal curvo, cerca de las márgenes, mediante experimentos a escala de laboratorio y simulaciones numéricas. Comprender estos procesos es importante para estimar la erosión local, ya que las fluctuaciones turbulentas pueden comprometer la estabilidad de las márgenes y contribuir a la erosión, incluso en aquellas zonas donde el valor del esfuerzo de corte medio se encuentra por debajo de los valores críticos que dan inicio al arrastre del sedimento.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los experimentos se realizaron en un canal de fondo fijo formado por dos curvas consecutivas en el Instituto de Hidromecánica de la Universidad de Karlsruhe, Alemania (Figura 1). Las mediciones corresponden al primer tramo curvo, de radio central $R=1.1$ m y ancho $B = 1.00$ m. La profundidad del flujo fue de $H = 0.097$ m, el caudal de $Q = 0.14$ l/s, el número de Reynolds de $Re = 13872$ y el número de Froude de $Fr=0.1$ (Tarrab, 2014). El abastecimiento de agua al canal se realiza a través de una bomba radial de 30 KW que opera con un caudal máximo de 200 l/s. La velocidad de rotación es controlada a través de un convertidor de frecuencia que permite regular continuamente la tasa de bombeo. El agua se introduce en el canal a través de 4 difusores. A los fines de paralelizar el flujo y evitar distorsiones iniciales en el ingreso del agua mismo, se coloca una malla metálica entre los difusores y el canal. Las mediciones de velocidades superficiales fueron obtenidas mediante Velocimetría por Seguimiento de Partículas (PTV, por sus siglas en inglés). El flujo fue sembrado con partículas de polipropileno de un diámetro aproximado de 2 mm y densidad de 0.9 g/cm³. Se utilizaron dos cámaras sincronizadas las cuales fueron colocadas perpendicularmente a la superficie del flujo. Las imágenes fueron adquiridas a una frecuencia de 10 Hz durante 240 segundos. Para el procesamiento de las imágenes se utilizaron los algoritmos descritos en Brevis et al. (2011).

Se desarrolló un modelo tridimensional completamente no-hidrostático Detached-Eddy Simulation (DES) utilizando el modelo Spallart-Almaras con la aproximación tapa rígida (*rigid-lid*) en la superficie libre. El código computacional utilizado pertenece al paquete libre y abierto OpenFOAM® (Open Field Operation and Manipulation, OpenCFD Ltd. 2005) (OpenCFD). Se utilizó el algoritmo PIMPLE (pimpleFoam en OpenFoam®) que fusiona los esquemas PISO (Issa, 1986) y SIMPLE (Patankar, 1980) para flujos no estacionarios, para densidad y viscosidad constantes.

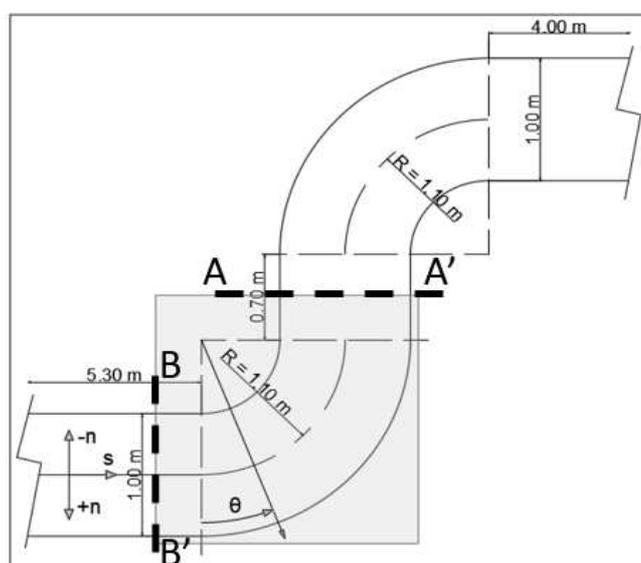


Figura 1: Instalación experimental y región de interés.

El mallado del dominio se resolvió con el código libre Gmsh® (Geuzaine and Remacle, 2009). La discretización se resolvió con hexaedros de tamaño variable: entre 3 cm hasta 0.1 mm cercanos a la pared ($y^+ \sim 2$). La malla cuenta con 14,417,730 celdas. En la Figura 2 se presenta el dominio computacional y detalles de la malla cercano las paredes y fondo. En modelo se impuso una superficie rígida (*rigid-lid*) sin esfuerzos de corte para que no afecte al flujo interno. De esta manera es posible simplificar el esquema de modelación de dos fases (agua-

aire) simulando la superficie libre a otro a simple fase (agua). Esta simplificación permite reducir el esfuerzo computacional necesario y trabajar con un esquema de modelación menos complejo respecto a las condiciones de borde, parámetros físicos y ecuaciones a resolver. El cálculo se paralelizó en 4 nodos de 32 núcleos cada uno del clúster YAKU del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Hídricas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.

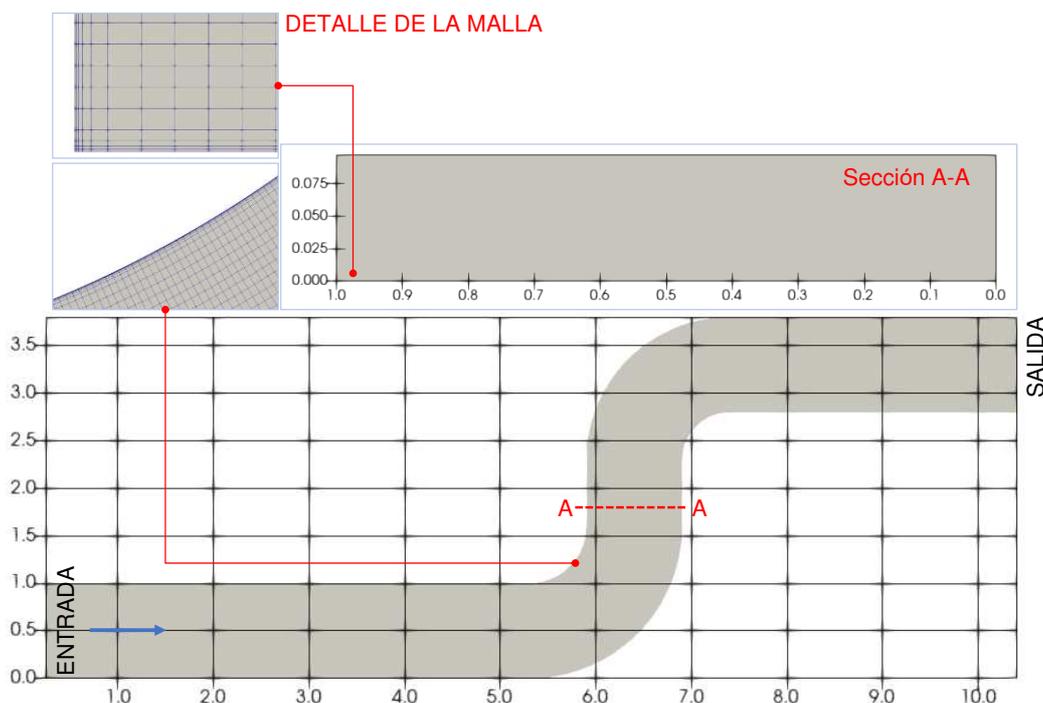


Figura 2: Dominio computacional y detalle de la malla en las zonas cercanas a paredes y fondo. Las dimensiones están en metros y las flecha azul indica el sentido de circulación del flujo.

3. RESULTADOS

En las Figura 3 y Figura 4 se presentan los campos superficiales de velocidad media, vorticidad media, velocidad longitudinal media y radial normalizados de los resultados experimentales y numéricos, respectivamente. En ambos campos de velocidad media total y longitudinal se observan zonas de máximas velocidades (Figura 3a y Figura 3b) de alrededor de 22 cm/s. El gradiente positivo general que se observa desde la margen externa hacia la interna en la mayor parte de la curva cambia abruptamente a la salida de la misma, donde se produce una separación del flujo en cercanía de la margen interna. El gradiente es máximo en la zona central del canal para los resultados experimentales (con tendencia hacia la margen externa hacia aguas abajo) mientras que el de los resultados numéricos es más suave.

Las velocidades longitudinales obtenidas con la simulación numérica (Figura 3e) muestran que sobre la margen externa en la entrada de la curva se produce una zona adicional de separación del flujo. Esta zona de separación sería causada por el gradiente de presiones adverso en el sentido de la corriente, que causa una desaceleración del flujo en esa zona y por lo tanto una separación. Se observa que el modelo numérico sobreestima esta zona (considerando velocidades menores cerca de la margen) con respecto a las mediciones experimentales (Figura 3f). Esto podría ser debido a que, en los experimentos, las partículas sembradas (para implementar la técnica PTV) también se separan en estas zonas impidiendo la cuantificación de velocidades por la ausencia de partículas. Además, debido a que la inclinación de la superficie libre de agua

disminuye la componente radial de la velocidad, existe cierta suavización del efecto de la zona de separación medida mediante la técnica PTV.

En cuanto a las velocidades radiales modeladas y medidas, ambas muestran un comportamiento similar en cuanto a su distribución y sus valores máximos (Figura 3g y 3h). En la entrada de la curva se encuentran dirigidas hacia la margen interna. Esto se debe a que la aceleración y la desaceleración longitudinal que ocurren en la margen interna y externa, respectivamente, son de tal magnitud que ocurre un movimiento transversal unidireccional desde la región externa hacia la interna por razones de continuidad de flujo másico. Luego se invierten dirigiéndose a la margen externa. En el caso de las velocidades modeladas, se observa sobre la margen externa una zona de velocidades radiales negativas, las cuales indicarían la presencia de una celda adicional de corriente secundaria con sentido de giro antihorario (contrario al sentido de giro de la celda de canal principal) en la zona cercana a la margen externa y en la superficie del agua. Esta celda fue descrita en la introducción del presente trabajo y, según [Blanckaert et al. \(2012\)](#), depende de las características de la margen externa como la rugosidad, pendiente y profundidad.

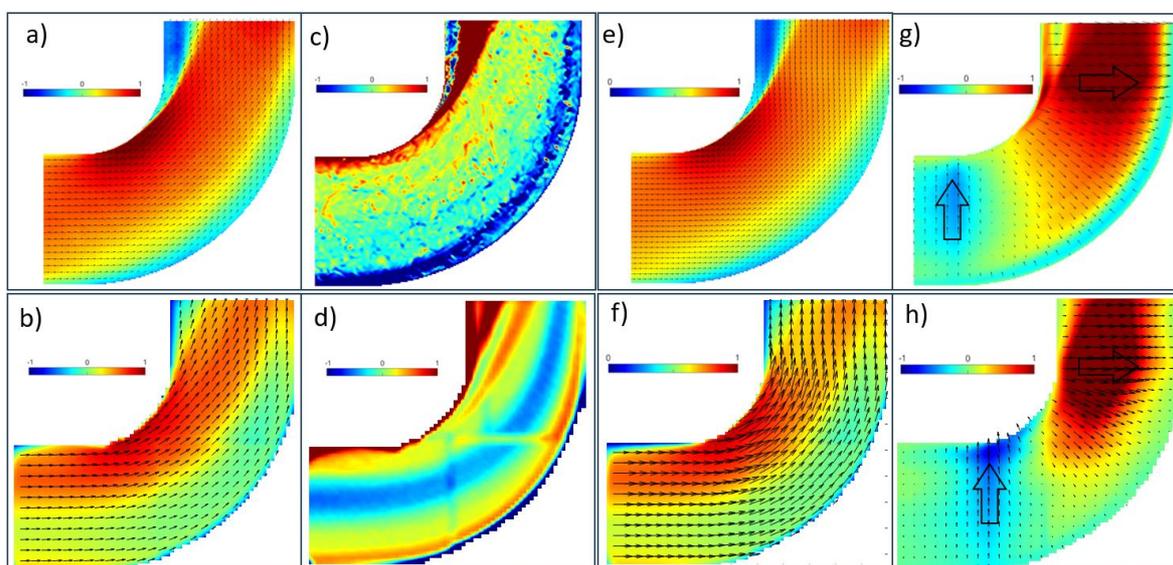


Figura 3: Arriba: simulación numérica. Abajo: medición experimental. (a,b) Campo superficial de velocidad media; (c,d) vorticidad media; (e,f) velocidad longitudinal media y (g,h) velocidad radial. Resultados normalizados con los valores máximos de cada variable.

La vorticidad para ambos resultados (Figura 3c y 3d) es localmente positiva sobre la margen interna y negativa sobre la margen externa. Sin embargo, el gradiente de velocidades más intenso del campo experimental provoca una vorticidad negativa a lo largo de todo el canal (Figura 3d), lo que el modelo numérico no logra reproducir (Figura 3c). Se observa en la zona de separación ubicada a la salida sobre la margen interna una capa de corte en ambos casos, con la diferencia que en el caso numérico se genera una región de recirculación (Figura 3c). En el caso experimental se observaron inestabilidades de la zona de separación del flujo asociadas con oscilaciones de baja frecuencia de la capa de corte, denominados por algunos investigadores como “flapeo” ([Simpson, 1989](#)). Existe una región de vorticidad negativa en contacto con la margen interna del canal en los resultados numéricos que no se hace presente en los resultados experimentales, posiblemente por el hecho de que el flujo de esa zona carece de un sembrado uniforme de partículas trazadoras (se alejan hacia la margen externa). En los resultados experimentales (Figura 3d) se observan dos patrones de vorticidad positivos en la salida separados por una región con vorticidad prácticamente nula. La zona de vorticidad nula es el resultado del promedio temporal de la oscilación de la capa de corte, alternando en el espacio zonas con

vorticidades positivas y negativas. Si se analizan las vorticidades instantáneas promediadas cada 2 s medidas experimentalmente (Figura 4b, d y f), es posible construir un ciclo de este “flapeo” con período de 12 s. En la Figura 4b (instante $t=0$ s) se observa junto a la capa de corte una zona vorticidad negativa que limita la zona de separación del flujo de otra zona de vorticidad positiva. En la Figura 4d ($t= 6$ s) la zona de vorticidad negativa desaparece casi en su totalidad, desvaneciéndose también la capa de corte y finalmente en Figura 4f ($t=12$ s) vuelve a formarse la capa de corte delimitada por una zona con vorticidades negativas. Los resultados numéricos en los distintos instantes de tiempo (Figuras 4a, c y e) muestran oscilaciones de la vorticidad, pero no se observa fluctuación de la capa de corte que delimita la zona de separación del flujo.

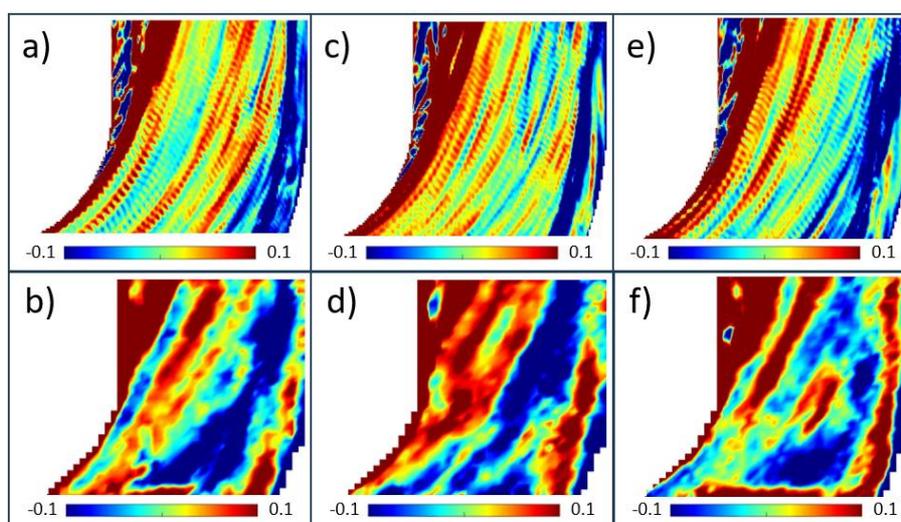


Figura 4: Evolución de la vorticidad [1/s] en el tiempo para el caso numérico (arriba) experimental (abajo), $t=0$ s (a,b), $t=6$ s (c,d) y $t=12$ s (e,f).

A fines de analizar la evolución temporal de los campos de flujo y de vorticidad y describir la fluctuación temporal de la posición de la capa de corte, se elaboraron gráficos (Figura 5) que muestran la acumulación temporal de diferentes variables en 2 secciones transversales: una en la entrada de la curva (Sección A-A) y otra en la salida de la curva (Sección B-B). En la entrada de la curva (Figuras 5a, b y c), se observa que la evolución temporal de las velocidades y la vorticidad de los resultados experimentales no son similares a los resultados numéricos (en este último existen menos oscilaciones de los valores en el tiempo). Por otra parte, a la salida de la curva (Figuras 5d y 5e), se observa comportamientos similares en lo que respecta a velocidades longitudinales y radiales. En la zona cercana a la margen interna de la curva, el modelo numérico permite estimar el comportamiento del flujo a diferencia de las mediciones en las cuales el sembrado de partículas fue dificultoso de realizar en esa zona, por lo cual las diferencias en esa zona podrían ser consecuencia de ausencia de trazadores. En cuanto a la vorticidad (Figura 5f), la evolución temporal de la misma en los resultados experimentales en el perfil a la salida de la curva, permite comprender el desarrollo de 2 zonas de vorticidad positiva separadas por una zona de vorticidad negativa, observando que la zona de vorticidad positiva que se encuentra más separada de la margen interna fluctúa en el tiempo.

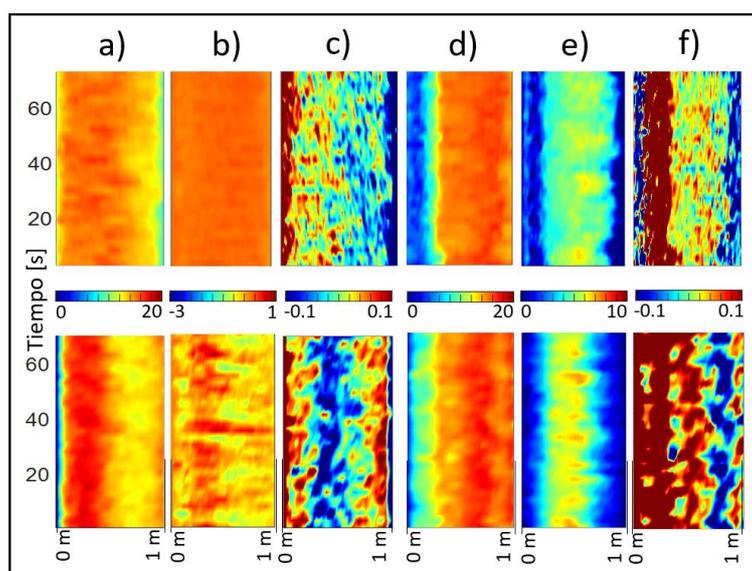


Figura 5: Evolución de perfiles temporales de flujo. Arriba: simulaciones numéricas. Abajo: resultados experimentales. Entrada de la curva (sección A-A): a) Velocidades longitudinales, b) velocidades radiales, c) vorticidad. Salida (sección B-B): d) Velocidades longitudinales, e) velocidades radiales, f) vorticidad. Velocidades en [cm/s] y vorticidad en [1/s].

4. CONCLUSIONES

Se reprodujeron satisfactoriamente mediante un modelo tridimensional DES los procesos hidrodinámicos que se desarrollan en una curva abrupta de fondo plano de laboratorio. En comparación con los resultados experimentales, los resultados de las simulaciones numéricas predicen adecuadamente la distribución de las velocidades medias superficiales y la zona de separación de flujo observada experimentalmente. La distribución velocidades superficiales y la vorticidad vertical permitieron caracterizar dos zonas de separación del flujo en coincidencia con gradientes de presiones adversos, una sobre margen externa a la entrada del canal y una sobre margen interna a la salida del canal. En esta última zona, se presenta una capa de corte que se separa el núcleo de altas velocidades de la zona retardada ubicada cerca de la margen interna de la curva. Esta capa de corte induce la formación de vórtices altamente energéticos que fluctúan en el tiempo. Si bien la zona de separación media temporal fue caracterizada adecuadamente, el modelo numérico no logra reproducir satisfactoriamente.

El análisis de los perfiles temporales del flujo en una sección ubicada en la salida de la curva permitió analizar la evolución de velocidad longitudinal, radial y vorticidad del dominio estudiado para el caso numérico y experimental. En ambos casos se observan fluctuaciones del perfil en la zona central del flujo, pero solamente en el caso experimental se observan oscilaciones de la capa de corte ubicada en la zona de separación que ocurre a la salida del flujo sobre la margen interna.

La región con mayor discrepancia entre el modelo experimental y numérico es la inmediata a la margen externa a lo largo de toda la curva. Esto podría deberse al error inducido por la inclinación de la superficie libre de agua (que disminuye la componente radial de la velocidad) en el modelo experimental y, en paralelo, el efecto de la tapa rígida (y las presiones que genera como consecuencia) en el modelo numérico.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Abad, J., Garcia, M. H. Experiments in high-amplitude Kinoshita meandering channel: 1. Implications of bend orientation on mean and turbulent flow structure, *Water Resour. Res.*, 45, W02401, doi:10.1029/2008WR007016, 2009.
- Blanckaert, K. Saturation of curvature induced secondary flow, energy losses and turbulence in sharp open-channel bends. Laboratory experiments, analysis and modelling, *J. Geophys. Res.*, 114, F03015, doi:10.1029/2008JF001137, 2009.
- Blanckaert, K. Topographic steering, flow recirculation, velocity redistribution and bed topography in sharp meander bends, *Water Resour. Res.*, 46, W09506, doi:10.1029/2009WR008303, 2010.
- Blanckaert, K. Hydrodynamic processes in sharply curved river bends and their morphological implications, *J. Geophys. Res.*, 116, F01003, doi:10.1029/2010JF001806, 2011.
- Blanckaert, K. "Flow separation at convex banks in open channels". *J. Fluid Mech.*, 779, 432–467, 2015.
- Blanckaert, K., de Vriend, H. J. Turbulence structure in sharp open channel bends, *J. Fluid Mech.*, 536, 27–48, 2005.
- Blanckaert, K., Duarte, A., Chen, Q., Schleiss, A. J. "Flow processes near smooth and rough (concave) outer banks in curved open channels". *J. Geophys. Res.* 117, F04020, 2012.
- Blanckaert, K., Graf, W. H. "Momentum transport in sharp open-channel bends." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 130(3), pp. 186-198, 2004.
- Blanckaert, K., Kleinhans, M. G., McLelland, S. J., Uijttewaal, W. S. J., Murphy, B. J., van de Kruijs, A., Parsons, D. R., Chen, Q. Flow separation at the inner (convex) and outer (concave) banks of constant-width and widening open-channel bends, *Earth Surf. Processes Landforms*, 38, 696–716, doi:10.1002/esp.3324, 2013.
- Brevis, W., Niño, Y., Jirka, G, H. "Integrating cross-correlation and relaxation algorithms for particle tracking velocimetry." *Experiments in Fluids*, 135–147, 2011.
- Constantinescu, G., Koken, M., Zeng, J. The structure of turbulent flow in an open channel bend of strong curvature with deformed bed: Insight provided by detached eddy simulation, *Water Resour. Res.*, 47, W05515, doi:10.1029/2010WR010114, 2011.
- de Vriend, H. J., Geldof, H. J. Main flow velocity in short and sharply curved river bends, Rep. 83-6, Lab. Fluid Mech., Dep. Civ. Eng., Delft Univ. Technol. Delft, Netherlands, 1983.
- Geuzaine, C., Remacle, J. F. Gmsh: A 3-D element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 79(11), 1309-1331, 2009.
- Hey, R. D., Thorne, C. R. "Secondary flows in river channels". *Area 7*, pp. 191-195, 1975.
- Issa, R. I. "Solution of the Implicitly Discretised Fluid Flow Equations by Operator-Splitting". *J. Comput. Phys.*, Vol. 62, pp. 40–65, 1986.
- Kashyap, S., Constantinescu, C. D. Rennie, G. Post, Townsend, R. Influence of channel aspect ratio and curvature on flow, secondary circulation and bed shear stress in a rectangular channel bend, *J. Hydraul. Eng.*, 138(12), 1045–1059, 2012.
- Koken, M., Constantinescu, G., Blanckaert, K. "Hydrodynamic processes, sediment erosion mechanisms, and Reynolds- number-induced scale effects in an open channel bend of strong curvature with flat bathymetry. *J. Geophys. Res.* 118, 1–17, 2013.
- OpenCFD. <http://www.opencfd.co.uk/openfoam/>
- Patankar, S. V. "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow". Hemisphere publishing corporation, Taylor and Francis Group, New York, 1980.
- Pope, S. *Turbulent Flows*, Cambridge University Press, U.K, 2000.

- Simpson, R. L. Turbulent boundary-layer separation. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 21, 205–234, 1989.
- Tarrab, L. Corrientes Secundarias en Cauces Naturales Inducidas por Curvatura, Tesis de Maestría, FCEFN – UNC, Córdoba, Argentina, 2014.
- van Balen, W., Blanckaert, K., Uijttewaal, W. S. J. “Analysis of the role of turbulence in curved open-channel flow at different water depths by means of experiments, LES and RANS.” *J. Turbulence*, 11(12), 1–34, 2010.
- Whiting, P. J., W. E. Dietrich (), Experimental studies of bed topography and flow patterns in large amplitude meanders. 2. Mechanisms, *Water Resour. Res.*, 29(11), 3615–3622, 1993.