

SIMULACION NUMERICA Y EXPERIMENTAL DEL FLUJO EN UNA CONFLUENCIA

Cecilia Pozzi Piacenza^a, Horacio Herrero^a, Paloma Furlan^a, I. Matías Ragessi^a, Santiago Márquez Damian^b, Guillermo López^c, Francisco Pedocchi^c y Carlos Marcelo Garcia^a

^a*Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA). Laboratorio de Hidráulica de la Fac. Cs. Exactas, Físicas y Naturales de la Univ. Nacional de Córdoba, Argentina. cpozzi@efn.uncor.edu*

^b*Centro de Investigaciones en Mecánica Computacional (CIMEC), UNL/CONICET, Colectora Ruta Nac 168 / Paraje El Pozo, (3000) Santa Fe, Argentina*

^c*Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. Julio Herrera y Reissig 565, CP 11300, Montevideo, Uruguay.*

Palabras clave: Turbulencia, confluencias fluviales, métodos numéricos y experimentales.

Resumen. La caracterización de las estructuras turbulentas presentes aguas abajo de confluencias fluviales se ha llevado a cabo tradicionalmente en analogía con distintos procesos turbulentos estudiados en profundidad en mecánica de los fluidos. Uno de los flujos análogos que podría ser adoptado para la caracterización de estructuras turbulentas en confluencias cuyas geometrías en planta de los flujos de aproximación origina una zona de estancamiento aguas abajo de estos con un déficit de velocidad y una elevada transferencia lateral de cantidad de movimiento en la interfase de mezcla es el caso de estelas turbulentas generadas en flujos en presencia de un obstáculo. En este trabajo se detallan las simulaciones numéricas y experimentales realizadas a los fines de evaluar la conveniencia del uso de esta analogía al caracterizar flujos en presencia de un obstáculo y en una confluencia con características geométricas similares.

Para ello se ha implementado un modelo numérico que permite resolver las ecuaciones que caracterizan el flujo incompresible en un dominio simplificado (flujos de aproximación paralelos) y que está implementado en el código libre y abierto OpenFOAM(R) (Open Field Operation and Manipulation). El modelo numérico fue validado utilizando datos experimentales específicamente registrados para este estudio en un canal de sección rectangular a fondo rígido en las instalaciones del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay. En la etapa de validación se compararon los campos de velocidades longitudinales y los tiempos característicos de las estructuras turbulentas obtenidas en el modelo experimental y el simulado numéricamente para las dos configuraciones de flujo (flujo en presencia de un obstáculo y en una confluencia con características geométricas similares) obteniéndose un buen contraste en los resultados generados con ambos modelos (experimental y numérico).

Trabajos futuros prevén la utilización del modelo numérico para evaluar los rangos de condiciones geométricas (diámetro de la nariz de la confluencia y ángulo de aproximación) y de flujo (relación de caudales y momentos de flujo) para el cual la analogía propuesta es apropiada.

1 INTRODUCCIÓN

Las confluencias son elementos presentes en los sistemas fluviales que juegan un rol importante en la hidrodinámica de los mismos, y son ambientes complejos, ya que la convergencia de dos o más flujos produce complicados patrones de movimiento de fluidos.

Una característica hidrodinámica relevante de las confluencias fluviales es la formación de una interfase de mezcla entre los flujos convergentes y el desarrollo de estructuras turbulentas coherentes de gran escala dentro de esta interfaz (Constantinescu *et al.* 2011).

Estos procesos hidrodinámicos que se desarrollan en las interfaces de mezcla están gobernados por diferentes parámetros geométricos y del flujo, siendo los principales parámetros las relaciones de cantidad de movimiento y de velocidad entre los dos flujos convergentes, la magnitud de los ángulos entre los flujos de entrada y el canal aguas abajo, la densidad de las masas de fluidos de aproximación y los cambios en la batimetría en la entrada a la confluencia graduales (fondo concordantes) o bruscos (fondo no concordante). Debido a la gran cantidad de parámetros interactuando de manera conjunta, resulta complicado realizar de manera adecuada una correcta caracterización de la hidrodinámica en estos ambientes.

Una alternativa para analizar en forma simplificada las características hidrodinámicas de las interfaces de mezcla es realizar consideraciones teóricas de la mecánica de fluidos sobre cómo las interfaces de mezcla se desarrollan en flujos de corte poco profundos. Un caso citado es la caracterización del flujo en la interfase de mezcla en confluencias en forma análoga a los procesos hidrodinámicos que ocurren aguas abajo de un obstáculo (Rhoads y Sukhodolov, 2008).

Herrero *et al.* (2013) presentaron una investigación experimental de laboratorio sobre una confluencia fluvial con geometría simple y fondo concordante, en la cual se evaluaron las características hidrodinámicas en la interfase de mezcla, verificando que los procesos turbulentos observados en la zona de mezcla son análogos a los que se desarrollan aguas abajo de un obstáculo. Sin embargo es necesario extender el estudio a diferentes condiciones geométricas y del flujo, de forma tal de evaluar la conveniencia del uso de la analogía (Chang *et al.*, 2011).

2 OBJETIVO

En este trabajo se detallan las simulaciones numéricas y experimentales realizadas a los fines de evaluar la conveniencia de caracterizar el flujo en la interfase de mezcla en confluencias en forma análoga a los procesos hidrodinámicos que ocurren aguas abajo de un obstáculo. Para ello se ha implementado un modelo numérico que permite resolver las ecuaciones que caracterizan el flujo incompresible en dominios simplificados (flujo de aproximación paralelos y flujo alrededor de una pila cilíndrica) y que está implementado en el código libre y abierto OpenFOAM(R) (Open Field Operation and Manipulation). El modelo numérico fue validado utilizando datos experimentales específicamente registrados para este estudio. En la etapa de validación se comparan campos de velocidades longitudinales y los tiempos característicos de las estructuras turbulentas obtenidas en el modelo experimental y el simulado numéricamente para las dos configuraciones de flujo (flujo en presencia de un obstáculo y en una confluencia con características geométricas similares).

3 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Los datos experimentales fueron medidos en un canal horizontal de sección rectangular de 1.5m de ancho y 18m de longitud, a fondo rígido (Herrero et al, 2013). La instalación experimental se encuentra en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de la República (Uruguay). Para representar las tipologías o configuraciones de flujos a ensayar se utilizó una tubería cilíndrica de policloruro de vinilo (PVC por sus siglas en inglés) de 16 cm de diámetro que representa la pila (Figura 1). Para representar la confluencia se agregó un tabique divisor centrado respecto al tubo cilíndrico, de esta forma se dividió el canal generando la confluencia (Figura 2).



Figura 1.- Vista frontal (izq.) y en planta (der.) de la configuración I): flujo en presencia de un obstáculo.



Figura 2.- Vista frontal (izq.) y en planta (der.) de la configuración II): confluencia de flujos paralelos.

3.1 Configuraciones y condiciones de flujo.

Se representaron diversos escenarios, modificando la configuración de aproximación del flujo (I - flujo alrededor de un obstáculo y II - flujos paralelos) en el canal de ensayo. La condición de flujo analizada fue: caudal $Q = 80$ l/s y profundidad de flujo $H = 0.26$ m. Para la configuración de flujos en paralelo (II) la distribución del flujo fue de 50% del caudal fluyendo por cada tributario. Para la condición experimental ensayada, el flujo de aproximación puede describirse con los siguientes parámetros hidráulicos: Velocidad de aproximación (U_m) de 0.21 m/s (configuración I) y 0.23 m/s (configuración II); Números de Reynolds ($Re = U_m \cdot H / \nu$ donde ν es la viscosidad cinemática del agua) iguales a 53333 y 59701 (para la configuración I y II, respectivamente) y Froude ($Fr = U_m / (g \cdot H)^{0.5}$) iguales a 0.13 y 0.14 (para la configuración I y II, respectivamente).

Para caracterizar experimentalmente el flujo para ambas configuraciones de flujo se utilizaron modernas técnicas de medición. Con un Perfilador de Velocidad por Ultrasonido

(UVP por sus siglas en inglés) se midieron: a) Perfiles verticales medios de velocidades longitudinales y verticales en los flujos de aproximación; y b) series temporales de velocidad longitudinal del flujo en perfiles horizontales localizados a mitad de la profundidad del flujo distribuidos en todo el ancho del canal (con una separación entre ellos de 0.15 m), en un área ubicada hasta 50 cm aguas abajo del obstáculo. También se utilizó un Velocímetro Acústico Doppler (ADV por sus siglas en inglés) para medir series temporales de las tres componentes del vector velocidad del flujo en distintas localizaciones aguas abajo de los obstáculos, en particular a lo largo de la zona de estancamiento y de la interfase de mezcla (Figura 3).

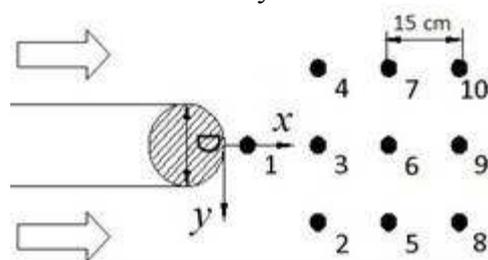


Figura 3.- Ubicación de los puntos de medición con Velocímetros acústicos Doppler. Distancias en [cm].

3.2 Resultados experimentales.

En las Figuras 4 y 5 se muestran las velocidades medias longitudinales adimensionalizadas con la velocidad media del flujo de aproximación aguas abajo del obstáculo (configuración de flujo I) y de la nariz de la confluencia (configuración de flujo II), respectivamente. En esas Figuras, las progresivas transversales (y) fueron adimensionalizadas con la longitud característica de la configuración (D).

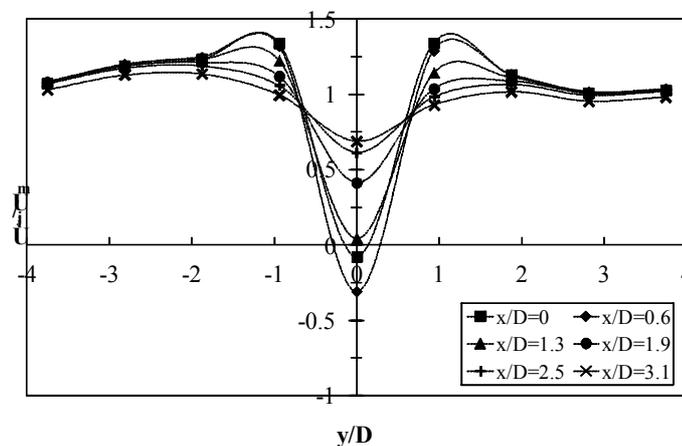


Figura 4.- Perfiles transversales de velocidades medias longitudinales adimensionalizadas registradas experimentalmente en la zona de mezcla aguas abajo del obstáculo para distintas localizaciones i,j .

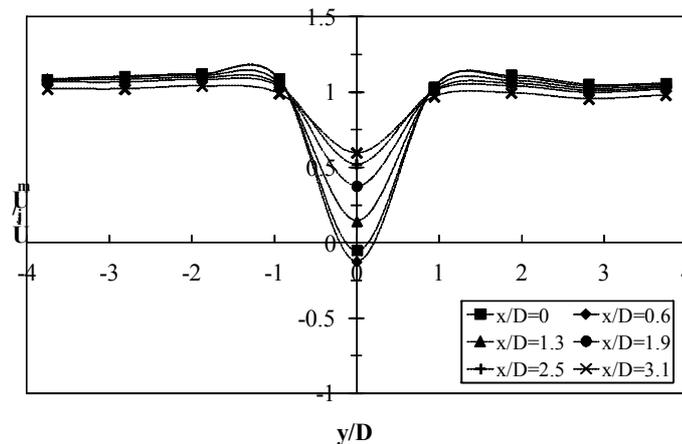


Figura 5.- Perfiles transversales de velocidades medias longitudinales adimensionalizadas registradas experimentalmente en la zona de mezcla aguas abajo de la confluencia para distintas localizaciones i,j .

Del contraste de las caracterizaciones de flujo medio representadas en las Figuras 4 y 5 se deduce que los campos medios observados para la configuración I (flujo en presencia de un obstáculo) presentan valores similares (diferencia de menos de 5%) a los observados para la configuración II (confluencia de flujos paralelos) en distancias mayores de 2 diámetros aguas abajo del obstáculo. Además, ambas configuraciones de flujo presentan un déficit de la velocidad longitudinal en el centro de la zona de mezcla (zona de estancamiento). Para la configuración I la longitud de esta zona es mayor que la generada en la configuración II. Esto se debe a la aceleración experimentada por el flujo en su paso alrededor del obstáculo y es una característica que no se observa en la confluencia. El proceso de generación y desprendimiento de vórtices en la región aguas abajo para ambas configuraciones de flujo es similar.

En la Figura 6 se incluye resultados de la visualización de los procesos turbulentos presentes en la interfase de mezcla aguas abajo de la confluencia. Diferentes trazadores (colorantes) fueron inyectados en cada uno de los flujos paralelos aguas arriba de la zona de estancamiento de la confluencia. Se puede observar que las características turbulentas de los procesos turbulentos observados en la zona de mezcla son análogos a los que se desarrollan aguas abajo de un obstáculo.



Figure 6.- Visualización del flujo en la interfase de mezcla aguas abajo de la confluencia de flujos paralelos.

Así se valida experimentalmente la conveniencia de caracterizar el flujo en la interfase de

mezcla en confluencias en forma análoga a los procesos hidrodinámicos que ocurren aguas abajo de un obstáculo.

4 MODELACION NUMERICA DEL FLUJO

4.1 Descripción del modelo numérico computacional utilizado.

En este trabajo se ha implementado un modelo numérico computacional en volúmenes finitos desarrollado en el código libre y abierto OpenFOAM(R) (Open Field Operation and Manipulation, OpenFoam Team, 2007). En las simulaciones se ha utilizado el esquema de simulación “ *pisoFoam*” que resuelve la ecuaciones completas de Navier Stokes y Continuidad para flujo incompresible a una sola fase en condiciones de densidad y viscosidad constantes, sin modelo de cierre de turbulencia, con discretizaciones en espacio y tiempo pequeñas de manera de simular los procesos físicos presentes (por ejemplo, desprendimiento de vórtices). La implementación del modelo numérico fue del tipo bidimensional.

4.2 Malla de volúmenes finitos.

La malla utilizada en las simulaciones se compone de volúmenes de tamaño variable. En las Figuras 7 y 8 se muestran las discretizaciones del dominio empleadas para las dos configuraciones de flujo (I y II, respectivamente). Para ambas configuraciones de flujo se han utilizado elementos de un tamaño mínimo de 2 mm de lado a un máximo de 2 cm. Los elementos de menores dimensiones se utilizaron en las áreas de mallado ubicadas cerca del obstáculo y aguas abajo de la confluencia para las configuraciones I y II, respectivamente. Se trabajó incrementando el tamaño de los elementos en las zonas de menor interés del dominio. Las mallas de volúmenes finitos utilizadas están conformadas por 78400 elementos y 308920 elementos para las configuraciones I (obstáculo) y II (confluencia), respectivamente. Esta discretización del dominio es la que surge luego de realizar el análisis de sensibilidad presentado a continuación en el punto 4.4.

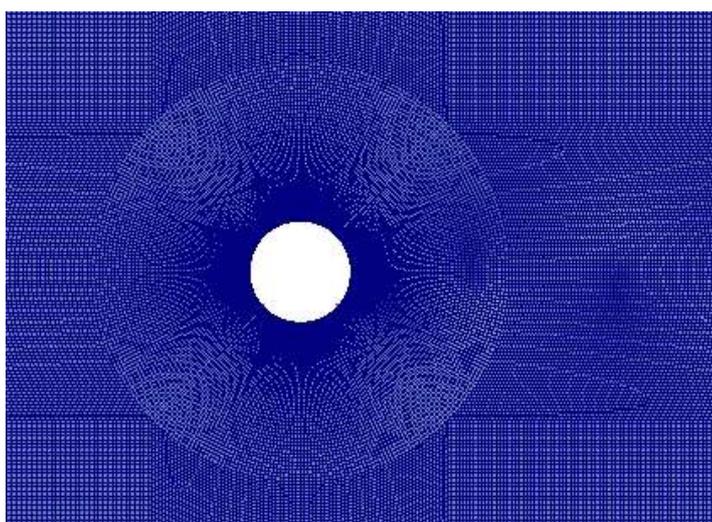


Figura 7.- Malla de volúmenes finitos utilizada para la configuración I): flujo en presencia de un obstáculo.

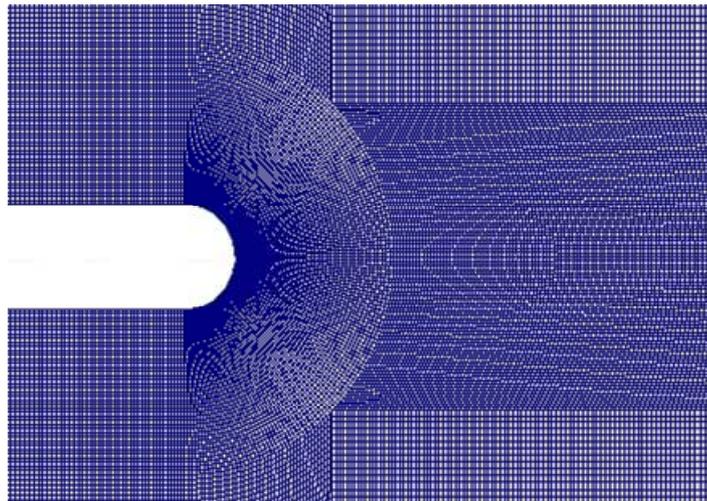


Figura 8.- Malla de volúmenes finitos utilizada para la configuración II): confluencia de flujos paralelos.

4.3 Condiciones iniciales y de borde

Debido que se implementó el esquema de simulación “PisoFoam” de OpenFoam se establecieron condiciones de iniciales y de borde para las variables: presión (p) y velocidad instantánea (U) que para este caso se hace igual a la media (U_m). Se estableció como valores iniciales iguales a cero las variables en todo el dominio salvo las zonas donde se estableció condiciones de borde específicas. Las condiciones de borde se detallan a continuación: a) Condiciones a la entrada: gradiente de presión nulo y valores de velocidad media medidos experimentalmente en el canal experimental; b) Condiciones a la salida: se calculó la presión estática media para la zona correspondiente a la salida del modelo y se estableció gradiente de velocidades igual a cero; c) Condiciones en paredes: gradiente de presión nulo y se estableció que las velocidades sean iguales a cero.

La simulación es de tipo bidimensional, se impone como vacía (“empty”) la tercera dimensión en las condiciones de borde.

Se simplificó el problema a un modelo 2D debido a que en las mediciones experimentales se observaron velocidades muy pequeñas en la dirección de la profundidad del canal (velocidades en z en las mediciones) en relación a las registradas para las componentes x e y (longitudinal y transversal).

El tiempo de simulación utilizado fue de 400 s para todas las condiciones con un paso de tiempo Δt de 0.005 s. El paso de cálculo Δt se eligió en función de las frecuencias de los desprendimientos de vórtices observados en los experimentos y el tiempo total de corrida de manera de visualizar por lo menos 30 de las mayores estructuras turbulentas en el dominio (escala característica de tiempo del orden de 4 segundos). Los valores numéricos de las condiciones de borde se establecieron de acuerdo a los establecidos durante las actividades experimentales (ver sección anterior 3.1).

4.4 Selección del esquema de modelación óptimo.

Para seleccionar el esquema de modelación óptimo se realizó un análisis de sensibilidad evaluando los efectos de cambios realizados en algunos parámetros del esquema de modelación sobre los campos de flujos simulados:

- Se mejoró la discretización del dominio colocando elementos de menor tamaño en la zona cercana a la confluencia y aumentando el tamaño los elementos hacia las

- fronteras del modelo para mantener constante el número de elementos;
- Se incorporaron más iteraciones del ciclo PISO del esquema de simulación incrementando de 2 a 6 la cantidad de iteraciones;
 - Se implementó una corrección por falta de ortogonalidad de la malla debido a que en la zona cercana al extremo de la confluencia se encuentran elementos de curvatura variable;
 - Se amplió el dominio aguas abajo de la confluencia dado que se presumía una influencia de la condición de borde de aguas abajo. La longitud máxima del dominio aguas abajo de la confluencia evaluada fue equivalente a 10 diámetros del obstáculo.
 - Se realizaron cambios en los esquemas de cálculo (Euler por CrankNicholson) y cambios en el esquema Gauss linear;

Para cada alternativa se realizó un análisis comparativo respecto del caso testigo. Se analizó la evolución del campo de velocidad instantáneo y medio a lo largo de la simulación y el comportamiento de la velocidad media a lo largo de un perfil longitudinal ubicado en el eje central del dominio de cálculo (Kai Fan, 2005). Del análisis realizado surgió la conveniencia de mejorar la discretización y conformación de la malla apuntando a una tipología más eficiente logrando una mejor descripción de las estructuras turbulentas. Los resultados mejoran al incrementar la longitud del dominio ya que disminuye la influencia de la condición de borde sobre el campo de flujo instantáneo y medio, y se observa una zona de estancamiento relativamente mayor al caso testigo. La corrección por falta de ortogonalidad no ha reportado mejoras respecto al caso testigo. El cambio en la cantidad de interacciones y los esquemas de cálculo produce una mejora en la representación del campo de velocidad.

4.5 Resultados de las Simulaciones Numéricas

Las Figuras 9 y 10 muestran los campos instantáneos (para $T = 400$ s) de las magnitudes de velocidades de flujo [m/s] para la configuración I (flujo en presencia de un obstáculo) y para la configuración II (confluencia de flujos paralelos). Estos campos de flujos simulados numéricamente presentan un buen acuerdo con los evaluados experimentalmente representando las principales características del flujo: zonas de estancamiento; de aceleración del flujo, de generación y de desprendimiento de vórtices.

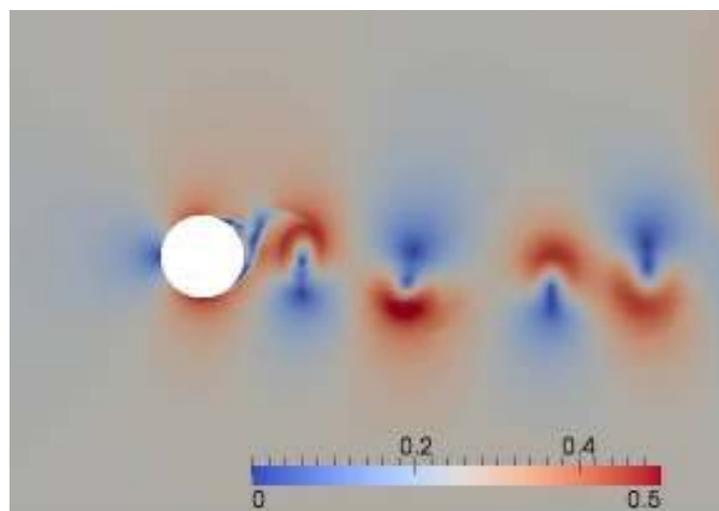


Figura 9.- Campo instantáneo de las magnitudes de velocidades de flujo [m/s] para la configuración I): flujo en presencia de un obstáculo, para $T = 400$ s. Caudal $Q = 80$ l/s.

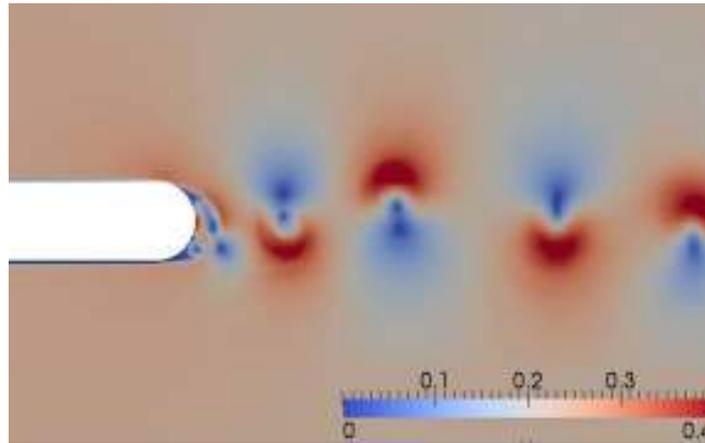


Figura 10.- Campo instantáneo de las magnitudes de velocidades de flujo [m/s] para la configuración II): confluencia de flujos paralelos, para $T = 400s$. Caudal $Q = 80$ l/s

En las Tablas 1 y 2 se muestran, para un caudal de 80 l/s y para las dos configuraciones de flujo ensayadas (configuración I: flujo en presencia de un obstáculo y configuración II: confluencia de flujos paralelos) los valores de velocidades longitudinales medias determinados experimentalmente y utilizando simulaciones numéricas para las localizaciones indicadas en la Figura 3.

Para ambas configuraciones de flujo, las velocidades medias simuladas muestran una buena aproximación respecto a los datos experimentales, aunque para la zona de estancamiento se observa una mayor diferencia en los puntos 1 y 3, debido a que la zona de estancamiento simulada numéricamente es de menor longitud mientras que en el punto 9 (ubicado a 0,50 m del obstáculo) se obtiene una buena aproximación.

Tabla 1.- Velocidades longitudinales medias determinadas experimentalmente y con simulaciones numéricas en cada localización indicada en la Figura 3. Configuración I): flujo en presencia de un obstáculo. $Q = 80$ l/s

<i>pto.</i>	<i>resultado experimental</i> <i>vmx[cm/s]</i>	<i>simulación numérica</i> <i>vmx[cm/s]</i>
1	-5.74	2.03
2	23.56	24.28
3	-1.05	12.49
5	18.83	23.63
6	14.39	16.73
8	19.09	22.80
9	16.50	18.79

Tabla 2.- Velocidades longitudinales medias determinadas experimentalmente y con simulaciones numéricas en cada localización indicada en la Figura 3. Configuración II): Confluencia de flujos paralelos. Q = 80 l/s

<i>pto.</i>	<i>resultado experimental vmx[cm/s]</i>	<i>simulación numérica vmx[cm/s]</i>
1	-2.91	2.03
2	22.50	21.32
3	2.47	9.38
5	22.26	21.44
6	13.53	12.84
8	21.97	21.69
9	16.98	14.68

Finalmente se realizó un análisis cuantitativo complementario con el fin de evaluar la evolución temporal del flujo para las dos configuraciones simuladas. Para ello se realizó un análisis espectral de la series temporales de velocidad de flujo (longitudinal – x y transversal - y) medidas y simuladas para diversos puntos del dominio (ver Figura 3) y se determinó la frecuencia característica de las fluctuaciones del flujo (frecuencia en la cual se encuentra el valor máximo del espectro de energía) y en base a esos resultados se calculó el número de Strouhal en cada localización. El análisis espectral de las series temporales de velocidades de flujo medidas y simuladas muestra valores de frecuencias características (frecuencias donde se destaca un valor máximo de energía) del orden esperado en el flujo aguas abajo de un obstáculo aunque los valores del número de Strouhal simulados numéricamente son superiores a los experimentales. En la Tabla 3 se muestran los resultados de las frecuencias características de las fluctuaciones del flujo y los números de Strouhal (St) estimados para la dirección longitudinal y transversal, en las localizaciones presentadas en la Figura 3. Se presentan los resultados para el caso de la configuración II (Confluencia de flujos paralelos). En los casos que no se detallan valores de frecuencias características (estimadas ya sea a través de experimentos o simulaciones numéricas) no se detectaron valores máximos de energía que se destaquen claramente.

Tabla 2.- Frecuencias características de las fluctuaciones del flujo y Número de Strouhal (St) en cada localización para las componentes longitudinal (x) y transversal (y) de la velocidad del flujo. Resultados experimentales y numéricos. Configuración II): Confluencia de flujos paralelos. Q = 80 l/s

<i>loc.</i>	<i>resultados experimentales</i>				<i>resultados numéricos</i>			
	<i>fx [1/s]</i>	<i>fy [1/s]</i>	<i>Sx</i>	<i>Sy</i>	<i>fx [1/s]</i>	<i>fy [1/s]</i>	<i>Sx</i>	<i>Sy</i>
1		0.28		0.20		0.36		0.25
2	0.27	0.27	0.19	0.19	0.36	0.36	0.25	0.25
3		0.26		0.18		0.36		0.25
8	0.31	0.31	0.22	0.22	0.36	0.36	0.25	0.25
9		0.26		0.18		0.36		0.25

Los resultados presentados en la Tablas 1, 2 y 3 se obtuvieron luego del análisis de sensibilidad realizado para seleccionar el esquema de modelación óptimo (ver sección 4.4), en el cual se obtuvo una mejora significativa en los patrones de flujo medio y en las frecuencias características de las fluctuaciones de flujo. Sin embargo se reportan mayores diferencias en la distribución del flujo medio en la zona de estancamiento (localizaciones 1 y 3) y se estima que en esa zona en particular un modelo tridimensional representará mucho mejor el flujo debido a la mayor influencia de procesos físicos tridimensionales presentes en esa zona. Se encuentra en proceso de cálculo la simulación tridimensional, utilizando la misma estrategia de modelación (sin modelo de cierre de turbulencia con resoluciones espaciales y temporales suficientes para captar los procesos turbulentos de mayor escala).

En las Figuras 11 y 12 se muestran los espectros de energía resultantes del análisis de frecuencias realizados sobre las series de velocidades longitudinal y transversal del flujo (respectivamente) simulada numéricamente para la localización 2 indicada en la Figura 3. En ambas figuras se evidencia, a través de la representación logarítmica en el eje de las frecuencias, el valor de la frecuencia característica con el mayor valor en el espectro de energía.

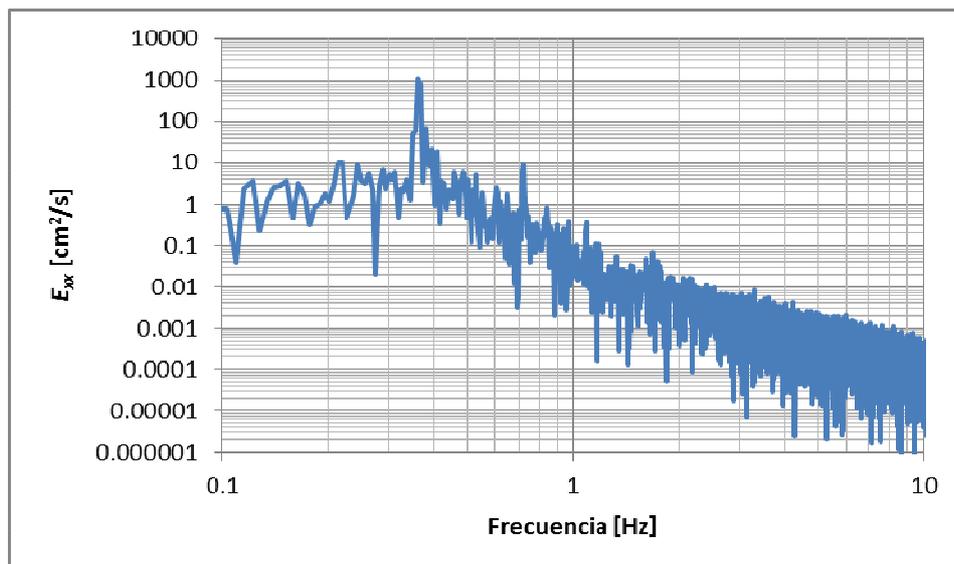


Figura 11.- Espectro de energía calculado para la serie temporal de la componente longitudinal (x) de la velocidad del flujo . Configuración II): confluencia de flujos paralelos, Caudal $Q = 80$ l/s

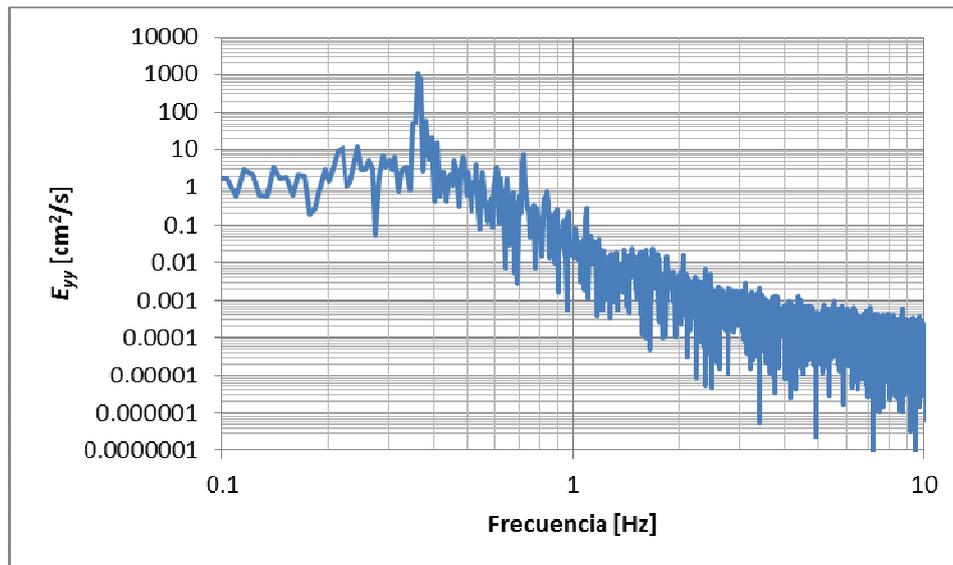


Figura 12 Espectro de energía calculado para la serie temporal de la componente transversal (y) de la velocidad del flujo. Configuración II): confluencia de flujos paralelos, Caudal $Q = 80$ l/s

5 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

El modelo numérico computacional implementado para simular (con las mismas condiciones hidráulicas) dos diferentes configuraciones de flujos (configuración I: flujo en presencia de un obstáculo y configuración II: confluencia de flujos paralelos) reproduce los principales procesos físicos observados durante los experimentos, logrando representar adecuadamente las zonas de estancamiento, de aceleración del flujo, y la formación y desprendimiento de vórtices.

Del contraste entre las caracterizaciones de las dos condiciones de flujo analizadas, se deduce que los campos medios observados para la configuración I (flujo en presencia de un obstáculo) presentan valores similares (diferencia de menos de 5%) a los observados para la configuración II (confluencia de flujos paralelos) en distancias mayores de 2 diámetros aguas abajo del obstáculo. Además, ambas configuraciones de flujo presentan déficit de la velocidad generada por la presencia de una zona de estancamiento aunque la longitud de esa zona es menor para la configuración II. El proceso de generación y desprendimiento de vórtices en la región aguas abajo para ambas configuraciones de flujo es similar. Los resultados presentados en este trabajo permiten definir similitudes y diferencias en los procesos hidrodinámicos presentes en el flujo en la interfase de mezcla en confluencias y en el flujo que ocurre aguas abajo de un obstáculo.

En lo que se refiere específicamente al esquema de modelación numérica adoptado se concluye que la extensión del dominio de cálculo, una mejor discretización del dominio y el cambio en los esquemas de cálculo resultaron en mejoras en los campos de velocidad instantánea y media simulados aproximando mejor las características observadas durante la actividad experimental. Sin embargo, se propone utilizar un esquema de simulación numérica tridimensional para evaluar si la existencia de una zona de estancamiento de menor extensión en el modelo numérico respecto al experimental puede deberse a la existencia de procesos tridimensionales incompatibles con la modelación bidimensional presentada en este trabajo. Además se evalúa también a futuro la posibilidad de implementar un esquema de modelación

que simule numéricamente las ecuaciones promediadas de Navier Stokes según Reynolds (RANS) que resulte óptimo para bajos números de Reynolds.

REFERENCIAS

- Chang, W. Y., G. Constantinescu, W. F. Tsai, and H. C. Lien (2011), Coherent structure dynamics and sediment erosion mechanisms around an in-stream rectangular cylinder at low and moderate angles of attack. *Water Resour. Res.*, 47. W12532, doi: 10.1029/2011WR010586.
- Constantinescu, G., S. Miyawaki, B. Rhoads, A. Sukhodolov, and G. Kirkil (2011). Structure of turbulent flow at a river confluence with momentum and velocity ratios close to 1: Insight provided by an eddy resolving numerical simulation, *Water Resour. Res.*, 47, W05507, doi:10.1029/2010WR010018.
- Herrero, H., García C, López G, Pedocchi F. (2013). Evaluación experimental de una analogía para la caracterización del flujo turbulento en confluencias. III Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica, Santa Fe, Argentina.
- Kai Fan, L. (2005). Simulation of Flow around Bluff Bodies and Bridge Deck Sections using CFD. Tesis de Doctorado. Universidad de Nottingham, Inglaterra. 251pp.
- OpenFoam Team (2007): "User Guide". OpenFoam Foundation. <http://www.opencfd.co.uk/openfoam/>
- Rhoads, B. L. y Sukhodolov, A. N. (2008). Lateral momentum flux and the spatial evolution of flow within a confluence mixing interface, *Water Resour. Res.* 44 , W08440, doi:10.1029/2007WR006634.