



EVALUACIÓN NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO DE CONFLUENCIAS FLUVIALES

Cecilia Pozzi Piacenza¹, Horacio Herrero^{1,2}, C. Marcelo García^{1,2}, Paloma Furlan¹, I. Matías Ragessi¹ y Santiago Márquez Damian².

1CETA (Centro de Estudios y Tecnologías del Agua). Laboratorio de Hidráulica. FCEFYN – UNC

Av Filloy s/n. Ciudad Universitaria, (5000) Córdoba, Argentina.

E-mail: cpozzi@efn.uncor.edu - Web: www.efn.uncor.edu

2Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

3CIMEC (Centro de Investigaciones en Mecánica Computacional), UNL – CONICET.

Colectora Ruta Nacional 168 / Paraje El Pozo, (3000) Santa Fe, Argentina

RESUMEN

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

Los 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, su densidad, la magnitud de los ángulos entre los flujos de entrada y el canal aguas abajo y los cambios en la batimetría en la entrada a la confluencia. En este trabajo se presenta inicialmente la validación de un modelo matemático implementado un modelo numérico perteneciente al código libre y abierto OpenFOAM(R) (Open Field Operation and Manipulation) contrastando sus resultados con los datos experimentales presentados en Herrero et al. 2013. Luego se presentan los resultados de un análisis de sensibilidad, realizado con simulaciones numéricas, para cambios en el flujo.

ABSTRACT

The confluences are complex environments present in river systems that have an important role in the hydrodynamics of the same, as the convergence of two or more streams produces complicated fluid motion patterns. Relevant hydrodynamic feature is the formation of an interface between the flows mix and developing convergent turbulent structures consistent scale within this interface (Constantinescu et al. 2011).

Hydrodynamic processes taking place in the mixing interfaces are governed by different flow and geometric parameters, being the main parameters momentum and speed between the two flows converging, density, the magnitude of the angles between the inflow and the downstream channel and changes in the bathymetry at the entrance to the confluence. This paper first presents the validation of a mathematical model OpenFOAM(R) (Open Field Operation and Manipulation) with the experimental data presented in Herrero et al. 2013. Following are the results from the study of a sensitivity analysis, numerical simulations performed for flow changes.

INTRODUCCIÓN

Las confluencias fluviales han adquirido un gran interés para su estudio por parte de la comunidad científica, ya que los procesos hidrodinámicos que ocurren en la zona de unión de dos tributarios tienen influencia en diferentes aspectos tales como morfológicos, dando origen

a zonas de erosión y sedimentación, como así también aspectos referidos a patrones de mezcla de los flujos provenientes de los tributarios. Las variables que gobiernan estos procesos se pueden clasificar en variables geométricas, del flujo y del fluido. La complejidad de la caracterización del flujo en confluencias ha llevado a que su análisis requiera el uso de analogías con casos estudiados con mayor detalle en la mecánica de los fluidos, como el caso del flujo aguas abajo de un obstáculo sugerida por Rhoads y Sukhodolov (2008) a partir de observaciones en una pequeña confluencia fluvial. Sin embargo es necesario extender el estudio a diferentes condiciones geométricas y del flujo, de forma tal de evaluar la conveniencia del uso de esta analogía en esas condiciones (Chang et al, 2011). En este trabajo se presenta un análisis de sensibilidad, realizado con simulaciones numéricas, del comportamiento de la hidrodinámica del flujo combinando distintas alternativas de variables geométricas y del flujo. Para ello se ha implementado un modelo numérico perteneciente al código libre y abierto OpenFOAM(R) (Open Field Operation and Manipulation).

OBJETIVO

En este trabajo se evalúa, mediante el uso de modelos numéricos validados con datos experimentales, la sensibilidad de la hidrodinámica del flujo en confluencias para diferentes condiciones geométricas y del flujo.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología utilizada se basó primeramente en reproducir a través de una modelación matemática en volúmenes finitos los resultados experimentales obtenidos en una instalación de laboratorio. Una vez calibrado y validado el modelo matemático con esos datos experimentales se analizó el cambio en la configuración del flujo (relaciones de cantidad de movimiento). En la simulación se ha utilizado el código PisoFoam perteneciente al código libre y abierto OpenFOAM(R) que resuelve las ecuaciones completas de Navier Stokes y Continuidad para flujo incompresible, 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).

En la Figura 1 se observa la malla de cálculo utilizada en la configuración geométrica de la confluencia de flujos paralelos modelada.

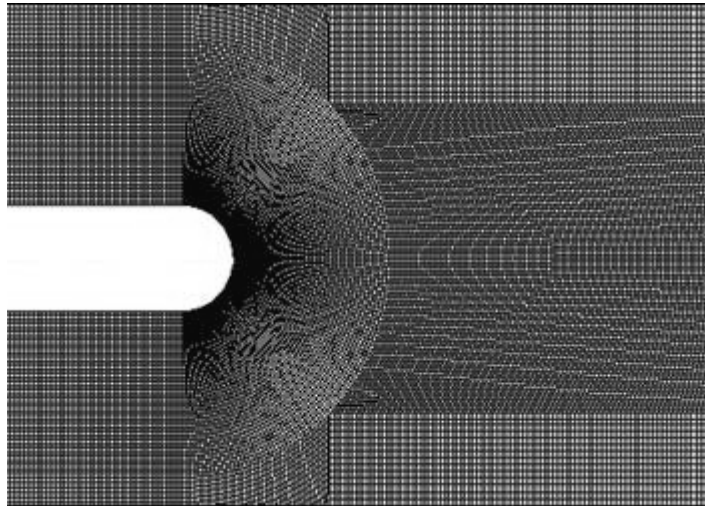


Figura 1.- Malla de volúmenes finitos utilizada para la configuración simulada.

La malla utilizada en las simulaciones se compone de volúmenes de tamaño variable. 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 cercanas a la nariz de la confluencia y aguas abajo de la misma. Se trabajó incrementando el tamaño de los elementos en las zonas de menor interés del dominio. La malla de volúmenes finitos empleada está conformada por 308920 elementos, se arribó a esta configuración luego de un largo proceso de mejoras en el mallado.

Los datos experimentales utilizados en la validación del modelo numérico fueron medidos en un canal horizontal de sección rectangular de 1,5m de ancho (Herrero et al, 2013). La Figura 2 muestra la instalación experimental de la confluencia con un diámetro de nariz de 0,16m. Las mediciones de velocidad fueron realizadas con dos modernas técnicas: velocímetro acústico Doppler (ADV) y perfilador ultrasónico de velocidad (UVP).

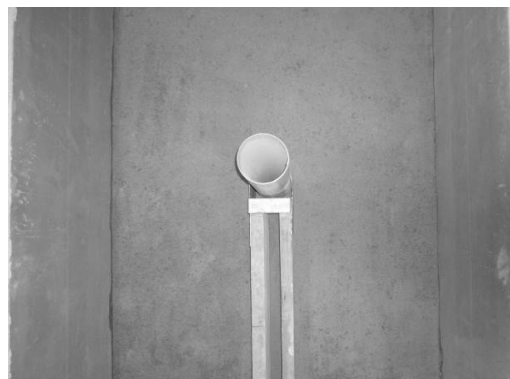


Figura 2.- Vista frontal (izq.) y en planta (der.) de la instalación experimental.

Las Figuras 3 y 4 muestran la visualización de la estructura del flujo para un caudal de 80 l/s (40 l/s en cada tributario con un tirante de 0,26m y velocidades medias de aproximación de 0,23m/s) y el campo de velocidad media aguas abajo de la confluencia registrado con UVP en un plano horizontal a 14 cm del fondo.



Figura 3.- Visualización de las estructuras del flujo para un caudal 40 l/s en cada tributario

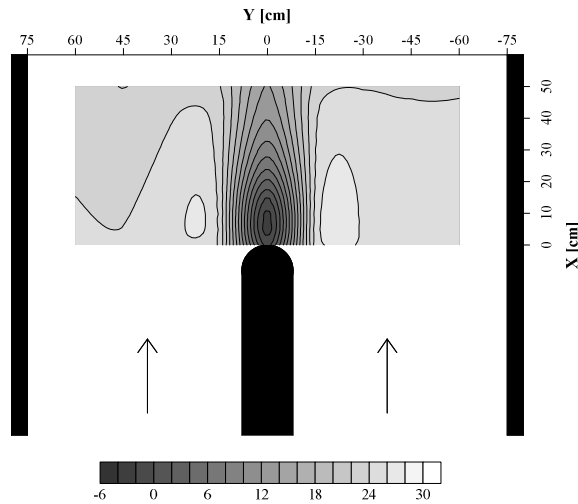


Figura 4.- Campo de velocidad media longitudinal registrado con UVP aguas abajo de la confluencia en un plano horizontal a 14 cm del fondo. Caudal de 40 l/s en cada tributario

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Figura 5 se muestran los resultados de la simulación numérica realizada para un caudal total de 80 l/s (40 l/s en cada tributario). Se observa que la simulación realizada reproduce los principales procesos físicos observados durante los experimentos (ver también Figura 3).

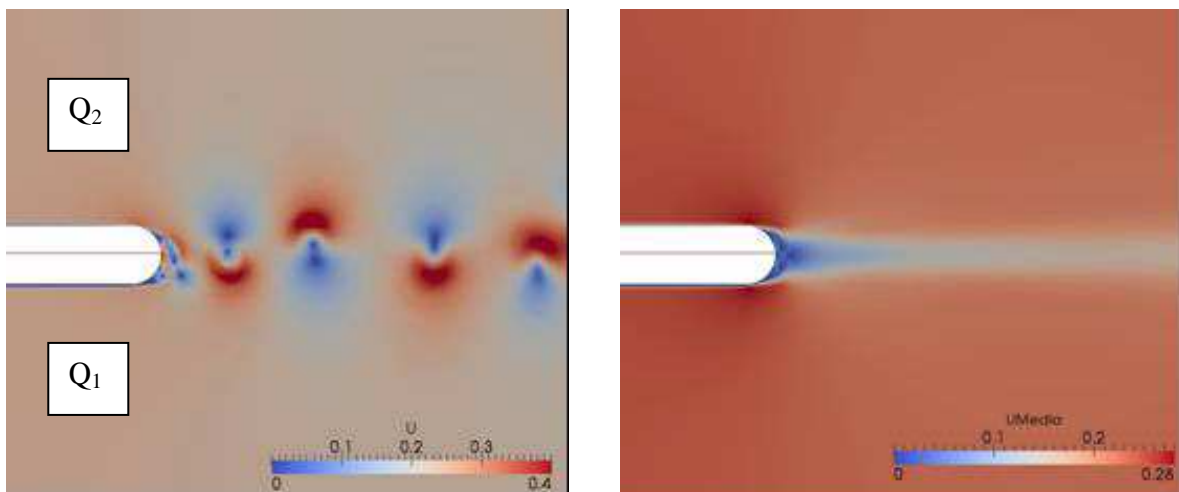


Figura 5.- Campo instantáneo de velocidades de flujo en m/s (izq.). Campo medio de velocidades de flujo en m/s (der.). Diámetro de la nariz = 0,16 m. Caudales de 40 l/s en cada tributario, $Q_1 = Q_2$

Con el fin de evaluar la evolución temporal del flujo aguas abajo de la confluencia 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 y se determinó la frecuencia característica de las fluctuaciones del flujo (frecuencia en la cual se encuentra el pico de energía) y con ella se determinó el número de Strouhal en cada localización. Este número adimensional relaciona los parámetros característicos de las fluctuaciones del flujo (frecuencia o longitud de onda) con parámetros del flujo medio (velocidad media). La Tabla 1 muestra los resultados para un caudal de 80 l/s (40 l/s en cada tributario, $Q_1 = Q_2$), lo que corresponde a una relación de cantidad de movimiento de 1. La ubicación de los puntos en los que se extrajeron series de velocidad se muestran en la Figura 6.

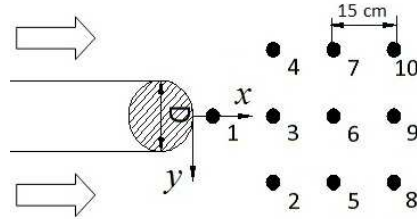


Figura 6.- Ubicación de puntos de medición. Distancias en [cm]

En la Tabla 1 se muestran las frecuencias características de las fluctuaciones del flujo obtenidas mediante el análisis espectral de las series de tiempo obtenidas en la insatación experimental. Se presentan también los correspondientes números de Strouhal para cada localización.

Tabla 1.- Frecuencias características de las fluctuaciones del flujo y Número de Strouhal (St) en cada localización para la dirección longitudinal (x) y transversal (y). Resultados experimentales. $Q_1 = Q_2 = 40\text{l/s}$.

Loc	Resultados experimentales			
	Frec Pico x [Hz]	Frec Pico y [Hz]	St x	St y
1		0.28		0.20
2	0.27	0.27	0.19	0.19
3		0.26		0.18
5	0.30	0.32	0.21	0.22
6		0.33		0.23
8	0.31	0.31	0.22	0.22
9		0.26		0.18

A los fines de evaluar la sensibilidad de la hidrodinámica para distintas configuraciones del flujo en una confluencia es que, una vez validado el modelo matemático en base a las mediciones experimentales, se realizaron simulaciones para varios escenarios en cuanto a la relación de cantidad de movimiento.

En la Tabla 2 se presenta un resumen de los escenarios modelados.

Tabla 2.- Escenarios simulados.

escenario	Q_1 (l/s)	Q_2 (l/s)	Relación de Momentun	Diferencia de velocidad adimensional
1	40	40	1	0
2	50	30	2	0.25
3	60	20	3	0.50
4	70	10	7	0.75

Siguiendo el mismo esquema presentado en la Figura 6 se realizó el análisis espectral para las series extraídas en cada uno de los casos analizados. Los resultados de frecuencias características para la dirección longitudinal y transversal se muestran en la Figura 6 y 7 respectivamente

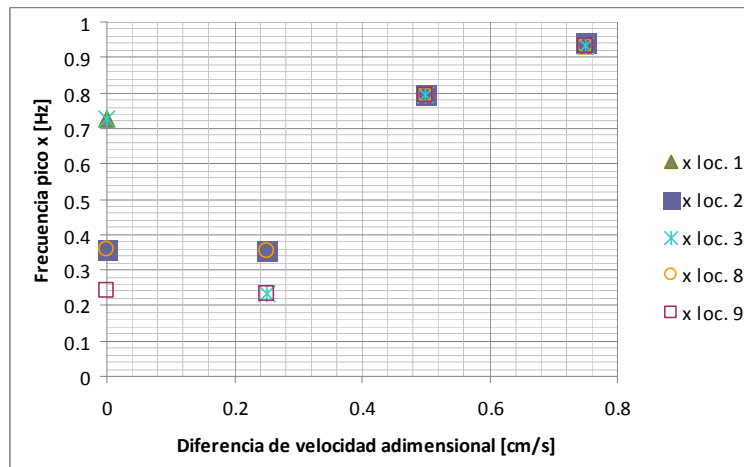


Figura 7.- Frecuencias características de las fluctuaciones del flujo en cada localización para la dirección longitudinal (x). Resultados numéricos en todos los casos de análisis.

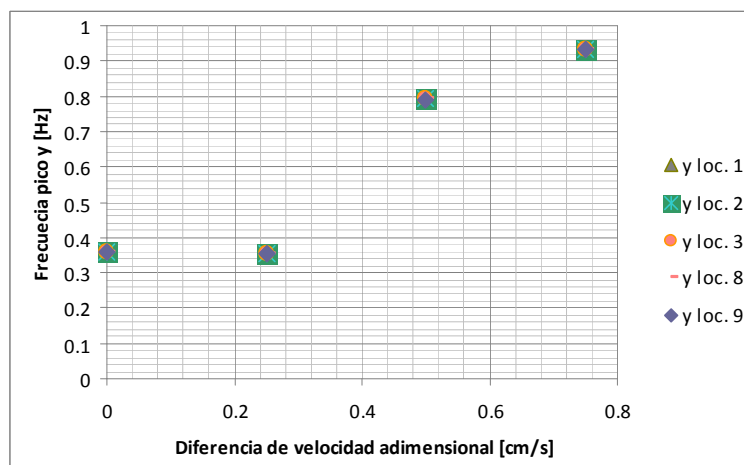


Figura 8.- Frecuencias características de las fluctuaciones del flujo en cada localización para la dirección transversal (y). Resultados numéricos en todos los casos de análisis.

Del análisis de las figuras presentadas anteriormente se observa que a medida que la diferencia de velocidad se hace mas grande (aumento del caudal dominante) se produce un aumento en las frecuencias con la consecuente disminución de energía en el espectro. Los resultados numéricos han permitido evaluar frecuencias en la dirección x que no fueron relevadas experimentalmente. Las localizaciones 1 y 3 presentan elevados valores de frecuencias respecto a los resultados experimentales, se presume que esta deficiencia se debe a la presencia de fenómenos tridimensionales (en la zona de estancamiento) que dominan el comportamiento del flujo en esas zonas específicas del dominio.

Para evaluar los efectos del cambio en la relación de momentum en la evolución de la velocidad media longitudinal se extrajeron cuatro perfiles transversales a la dirección del flujo. La ubicación de los perfiles en el dominio se presenta en el esquema de la Figura 9.

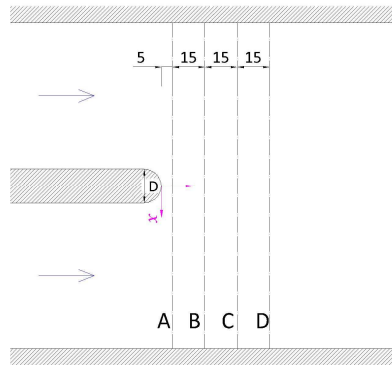


Figura 9.- Ubicación de perfiles transversales de velocidad media. Distancias en [cm].

En la Figura 10 se presentan los perfiles de velocidad media longitudinal (U) adimensionalizados respecto a la velocidad de aproximación (U_a) para la relación de momentum 1, en este caso caudales iguales a 40 l/s en cada tributario. La línea punteada en la figura representa la proyección de la posición de la nariz de la confluencia. En la figura se han contrastado los resultados numéricos (representados en línea continua) con los relevados experimentalmente con UVP (representados con puntos).

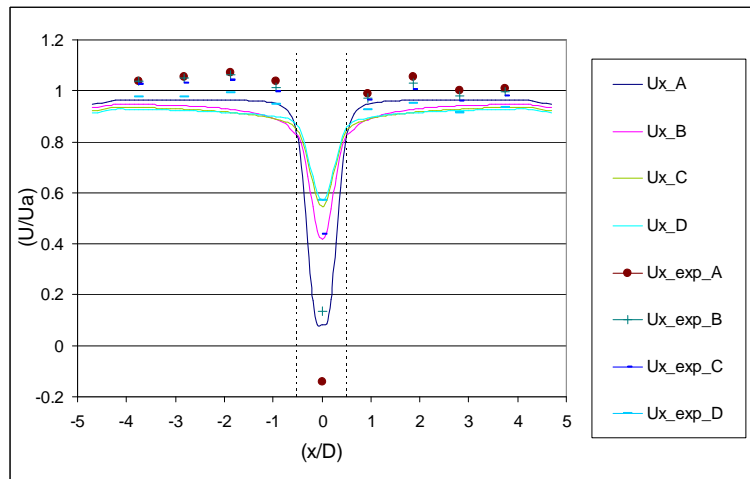


Figura 10.- Perfiles de velocidad media longitudinal del flujo adimensionalizados (resultados numéricos y experimentales).
Diámetro de la nariz = 0.16 m. Caudales de tributarios, $Q_1 = 40$ l/s; $Q_2 = 40$ l/s

Del contraste de las caracterizaciones de flujo medio representadas en la Figuras 10 se deduce que los campos medios observados para la confluencia de flujos paralelos con relación de momentum 1 presentan valores similares a los experimentales en distancias mayores de 2 diámetros aguas debajo de la confluencia. En el centro de la zona de mezcla (zona de estancamiento) el flujo presenta un déficit de la velocidad longitudinal respecto de los valores relevados experimentalmente. El proceso de generación y desprendimiento de vórtices en la región aguas debajo de la confluencia flujo es similar

En las Figuras 11 a 13 se muestran campos instantáneos de velocidades de flujo simulados para distintas configuraciones del flujo (diferentes relaciones de caudales de los tributarios).

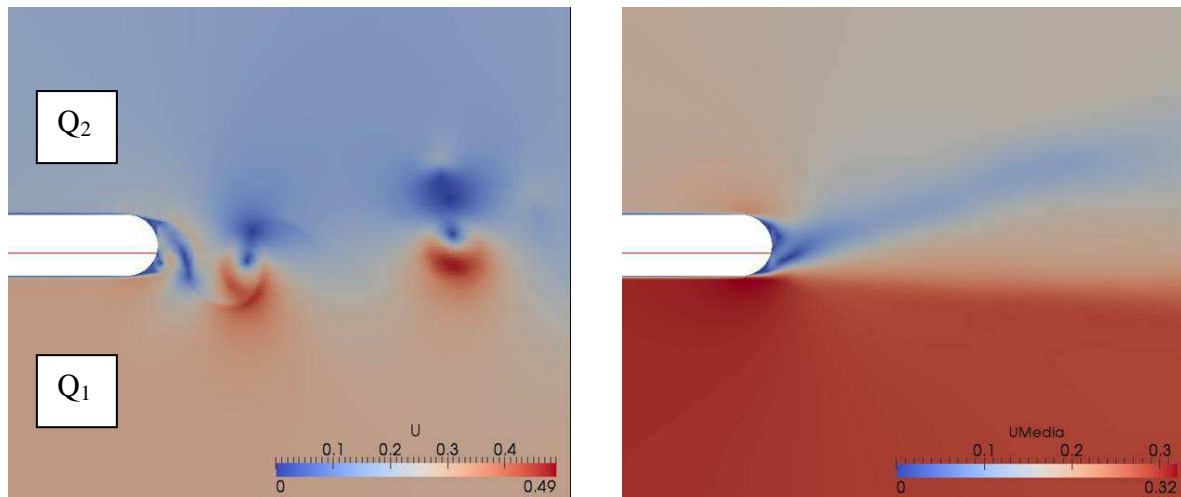


Figura 11.- Campo instantáneo de velocidades de flujo en m/s (izq.). Campo medio de velocidades de flujo en m/s (der.).
 Diámetro de la nariz = 0.16m. Caudales de tributarios, Q1 = 50l/s; Q2= 30l/s

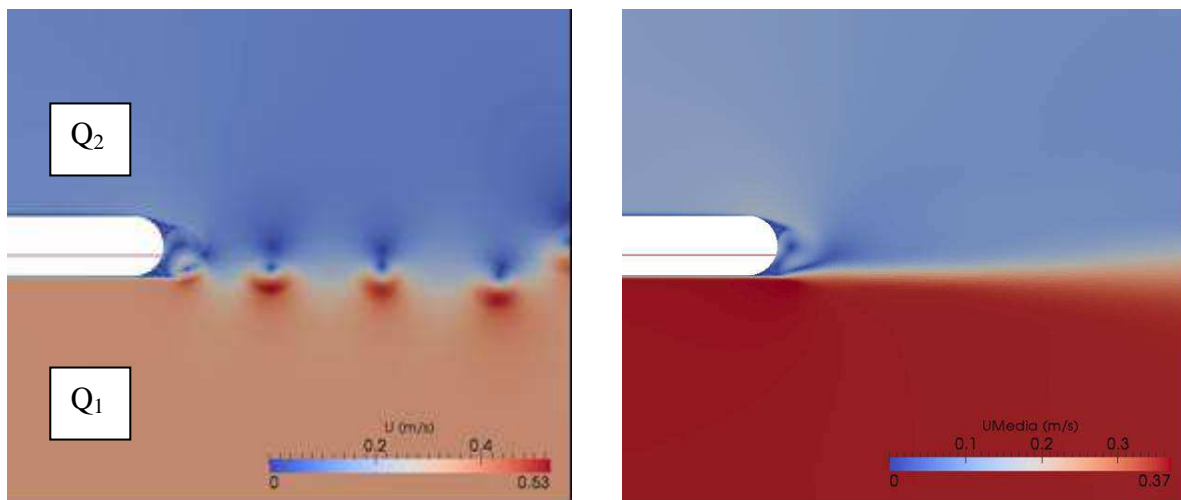


Figura 12.- Campo instantáneo de velocidades de flujo en m/s (izq.). Campo medio de velocidades de flujo en m/s (der.).
 Diámetro de la nariz = 0.16m. Caudales de tributarios, Q1 = 60l/s; Q2= 20l/s

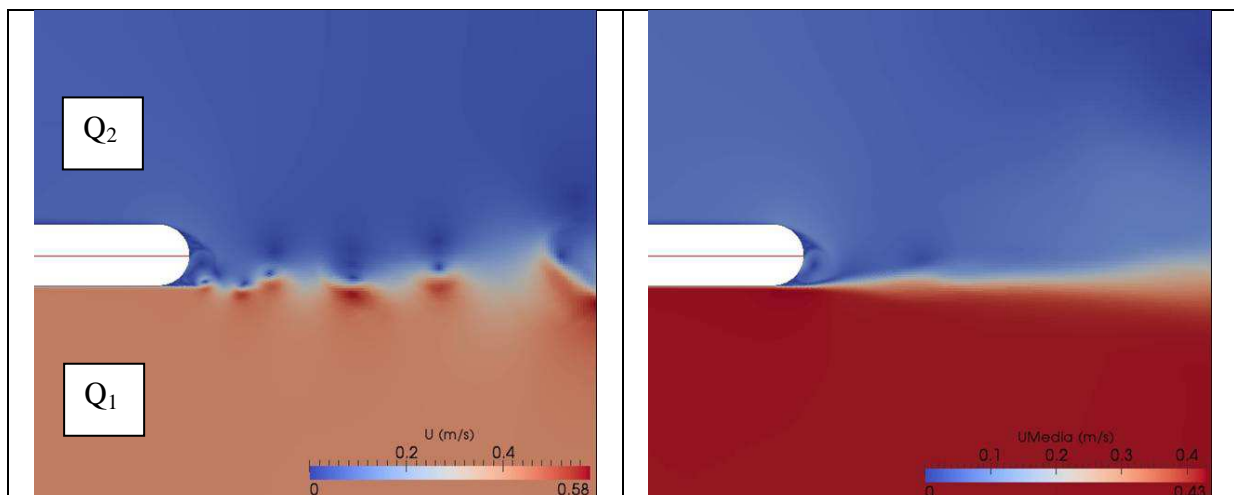


Figura 13.- Campo instantáneo de velocidades de flujo en m/s (izq.). Campo medio de velocidades de flujo en m/s (der.).
 Diámetro de la nariz = 0.16m. Caudales de tributarios, Q1 = 70l/s; Q2= 10l/s

En los campos de velocidad simulados se observa que a medida que la relación de caudales aumenta la posición de la capa de corte cambia (se inclina hacia el tributario con menor

caudal) como así también disminuyen las escalas (dimensiones) de las estructuras turbulentas.

En las Figuras 14 a 16 se muestran los perfiles de velocidad media del flujo adimensionalizados respecto a la velocidad de aproximación. Los perfiles presentados corresponden al esquema presentado en la Figura 9. En abscisas se presentan las localizaciones respecto del eje longitudinal del canal adimensionalizadas respecto al diámetro de la confluencia y en ordenadas las velocidades medias numéricas adimensionalizadas respecto de la velocidad de aproximación. La línea punteada en las figuras representa la proyección de la posición de la nariz de la confluencia.

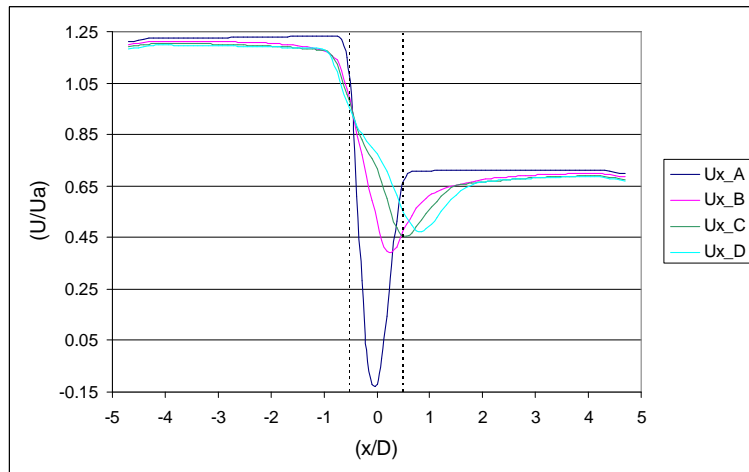


Figura 14.- Perfiles de velocidad media longitudinal del flujo adimensionalizados. Diámetro de la nariz = 0.16 m. Caudales de tributarios, $Q_1 = 50$ l/s; $Q_2 = 30$ l/s

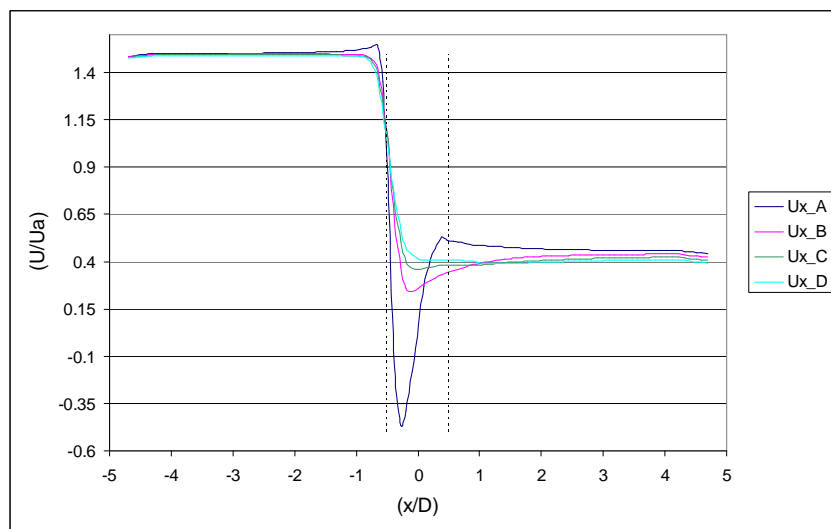


Figura 15.- Perfiles de velocidad media longitudinal del flujo adimensionalizados. Diámetro de la nariz = 0.16 m. Caudales de tributarios, $Q_1 = 60$ l/s; $Q_2 = 20$ l/s

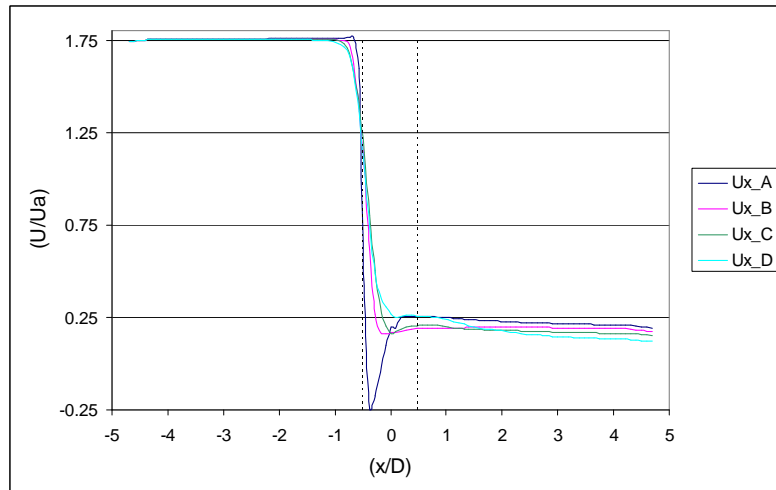


Figura 16.- Perfiles de velocidad medida longitudinal del flujo adimensionalizados. Diámetro de la nariz = 0.16 m. Caudales de tributarios, $Q_1 = 70$ l/s; $Q_2 = 10$ l/s

CONCLUSIONES

El modelo numérico implementado reproduce los principales procesos físicos observados durante los experimentos, logrando representar adecuadamente la formación de vórtices y la capa de corte.

El análisis espectral de la series temporales de velocidades de flujo medidas y simuladas muestra valores de frecuencias características del orden a los esperados en el flujo aguas abajo de un obstáculo aunque los valores del número de Strouhal simulados son superiores a los experimentales.

Simulaciones realizadas para distintas condiciones de flujo muestran que a medida que la relación de caudales aumenta la posición de la capa de corte cambia como así también las escalas (dimensiones) de las estructuras turbulentas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

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.

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.