

VALIDACIÓN DE SIMULACIONES NUMÉRICAS DEL FLUJO EN UNA CONFLUENCIA FLUVIAL.

Cecilia Pozzi Piacenza^a, Santiago Márquez Damian^b, I. Matías Ragessi^{a,c}, Horacio Herrero^{a,c}, Paloma Furlan^a y Carlos Marcelo García^{a,c}

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

^bCentro de Investigación de Métodos Computacionales, Predio CONICET Santa Fe, Colectora Ruta Nac. 168, Km 472, Paraje El Pozo, 3000 Santa Fe, Argentina.

^cConsejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - CONICET.

Resumen. Las confluencias son ambientes complejos presentes en los sistemas fluviales que juegan un rol importante en su hidrodinámica. La convergencia de dos o más flujos produce complicados patrones de movimiento de fluidos. Las características hidrodinámicas más relevantes son la formación de una interfase de mezcla y de estructuras de flujo coherentes de gran escala dentro de esta interfaz. Los procesos hidrodinámicos que se desarrollan en las interfaces de mezcla están gobernados por diferentes parámetros geométricos y del flujo. En este trabajo se presenta la simulación numérica del comportamiento hidrodinámico de una confluencia de dos flujos paralelos. Para ello se han implementado un modelo numérico tridimensional con el fin de evaluar el comportamiento del flujo para distintos 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). La implementación se ha realizado 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 coherentes observadas en el modelo experimental y en las simulaciones numéricas.

Palabras clave: Recursos Hídricos, confluencias fluviales, métodos numéricos y experimentales.

INTRODUCCIÓN

Las confluencias son elementos presentes en los sistemas fluviales que juegan un rol importante en su hidrodinámica y son ambientes complejos, ya que la convergencia de dos o más flujos produce complejos 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 coherentes de escalas mayores a la profundidad del flujo 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.

Herrero (2014) presentó 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 esa zona de mezcla presentan características similares 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 los alcances de esta similitud (Chang et al, 2011). A los fines de extender el estudio es que se realizó en primera instancia un modelo numérico bidimensional (Pozzi et al. 2014) cuya validación a través de datos experimentales arrojó un buen acuerdo en el campo del flujo medio y una buena representación del proceso de generación y desprendimiento de vórtices en la región aguas debajo de la confluencia. Sin embargo se observó la existencia de una zona de estancamiento de menor extensión en el modelo numérico respecto al experimental debido a la existencia de procesos tridimensionales incompatibles con el modelado bidimensional.

OBJETIVO

En este trabajo se presentan simulaciones numéricas bi y tridimensionales del comportamiento hidrodinámico de una confluencia de dos flujos paralelos utilizando dos modelos alternativos de simulación de las ecuaciones que describen este comportamiento. La validación de las distintas simulaciones se realiza a través del contraste con datos experimentales.

INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Los datos experimentales fueron medidos en un canal horizontal de sección rectangular de 1.5 m de ancho y 18 m de longitud, con paredes de mampostería con terminaciones de revoque fino y fondo de arena de diámetro nominal $d_{50} = 0.8$ mm, rigidizado mediante el cernido de una delgada capa de cemento en la zona de estudio para evitar erosiones locales durante las mediciones (Herrero, 2014). La instalación experimental se encuentra en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de la República (Uruguay). Como se observa en la Figura 1, para representar la configuración de flujo a ensayar se utilizó una tubería cilíndrica de policloruro de vinilo (PVC por sus siglas en inglés) de diámetro $D = 16$ cm, a la cual se le adosó un tabique divisor centrado respecto al tubo cilíndrico. De esta forma se dividió el canal generando una confluencia de flujos paralelos.



Figura 1.- Vista frontal (izq.) y en planta (der.) de la instalación experimental.

Configuraciones y condiciones de flujo.

Se representaron experimentalmente diversos escenarios y en este trabajo se presentan los resultados obtenidos para la condición de mayor caudal y profundidad del flujo ($Q = 80$ l/s y $H = 0.26$ m) con una distribución del flujo de 50% del caudal fluyendo por cada tributario. Para esta condición, el flujo de aproximación puede describirse con los siguientes parámetros hidráulicos: Velocidades de aproximación (U_m) 0.23 m/s; Números de Reynolds ($Re = U_m.H/\nu$) donde ν es la viscosidad cinemática del agua) igual a 59701, Número de Reynolds del obstáculo ($Re_D = U_m.D/\nu$) igual a 36800, y Froude ($Fr = U_m / (g.H)^{0.5}$) de 0.14, en condiciones de régimen subcrítico. Asumiendo la validez de la hipótesis de similitud entre el comportamiento del flujo en la interfaz de mezcla de una confluencia con las características del flujo detrás de un obstáculo, el Re_D simulado en este trabajo se encuentra en un rango que garantiza una frecuencia adimensional de desprendimientos de estructuras coherentes (Número de Strouhal) constante igual a 0.2. Valores de Re_D menores a 300 se encuentra en un régimen denominado “laminar”, en el cual la frecuencia adimensional crece con Re_D (Schewe, 1983).

Para caracterizar experimentalmente el 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 longitudinales localizados a mitad de la profundidad del flujo distribuidos en todo el ancho del canal (con una separación entre ellos de 0.15 m definida arbitrariamente), 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 2).

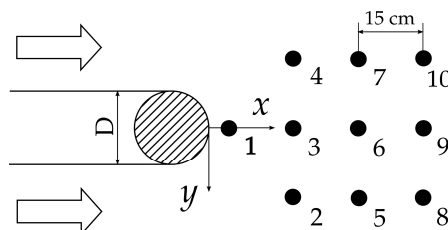


Figura 2.- Ubicación de los puntos de medición con velocímetros acústicos Doppler.

Resultados experimentales.

En la Figura 3 se muestran en la región aguas abajo de la confluencia las velocidades medias longitudinales obtenidas experimentalmente adimensionalizadas con la velocidad media del flujo de

aproximación. En relación a la incertidumbre de los valores medidos experimentalmente, García et al (2006) mostraron que el coeficiente de variación de los valores medios de velocidad del flujo registrados con ADV están en el orden del 1%. En la Figura 3, las progresivas transversales (y) fueron adimensionalizadas con la longitud característica correspondiente al diámetro de la confluencia (D).

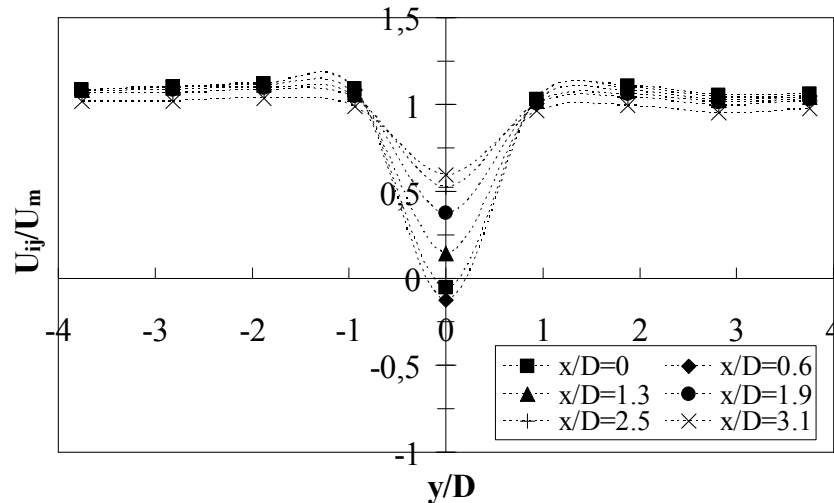


Figura 3.- Perfiles transversales de velocidades medias longitudinales U adimensionalizadas registradas experimentalmente en la zona de mezcla aguas abajo de la confluencia para distintas localizaciones i, j .

En la Figura 4 se incluye el resultado 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 en la visualización la zona de estancamiento y el proceso de formación y desprendimiento de vórtices aguas abajo de la confluencia.



Figure 4.- Visualización del flujo en la interfase de mezcla aguas abajo de la confluencia de flujos paralelos.

MODELACION NUMERICA DEL FLUJO

Descripción de los modelos numéricos computacionales utilizados.

En este trabajo se han utilizado dos modelos numéricos computacionales alternativos de simulación de las ecuaciones que describen el flujo turbulento utilizando un esquema de volúmenes finitos, ambos desarrollados en el código libre y abierto OpenFOAM(R) (Open Field Operation and

Manipulation, OpenFOAM Team, 2007).

Se utilizó la aplicación “ 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.

Este modelo se ha utilizado para distintas configuraciones del dominio: a) configuración 1: bidimensional, y b) configuración 2 y 3: tridimensional. La configuración 1 corresponde a un modelo bidimensional a una sola fase en condiciones de densidad y viscosidad constantes, en la configuración 2 se liberó la tercera dimensión utilizando el mismo esquema de cálculo, finalmente la configuración 3 corresponde a la de un modelo de tipo LES para flujo incompresible en una sola fase en condiciones de densidad y viscosidad constantes (Pozzi et al, 2014)

Al observar en los resultados la existencia de frecuencias de desprendimiento superiores a las registradas experimentalmente además de la presencia de zonas de elevada presión en la cercanía de la nariz de la confluencia se ha comenzado evaluar que los modelos utilizados hasta el momento no representan de forma adecuada el flujo al realizar análisis puntuales (análisis de frecuencias características de los desprendimientos), a pesar de haber obtenido muy buenos resultados en la representación del flujo medio.

De esta forma es que se ha comenzado a trabajar en la denominada Configuración 4 tridimensional, modelando la superficie libre

En la Tabla 1 se presenta un resumen de las configuraciones utilizadas.

Tabla 1.- Configuraciones modeladas.

| <i>Configuración del modelo numérico</i> | <i>Dominio</i> | <i>Ecuaciones simuladas numéricamente</i> |
|--|----------------|---|
| Configuración 1 | 2D | Navies Stokes + continuidad (ecuaciones completas sin modelo de cierre) |
| Configuración 2 | 3D | Navies Stokes + continuidad (ecuaciones completas sin modelo de cierre) |
| Configuración 3 | 3D | Navies Stokes + continuidad (cierre turbulento LES) |
| Configuración 4 | 3D | Navies Stokes + continuidad (cierre turbulento LES, a superficie libre) |

Dominio de simulación y malla de volúmenes finitos.

La malla utilizada en las simulaciones se compone de volúmenes de tamaño variable. En todos los casos se ha trabajado con la misma malla de volúmenes finitos de base, incorporando para las configuraciones 2 y 3 la discretización en la tercera dimensión. En la Figura 5 se muestra una vista de la geometría de la confluencia y un detalle de la discretización del dominio empleado en las simulaciones. La malla está conformada por hexaedros. Se han utilizado, en planta, 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 del mallado ubicadas aguas abajo de la confluencia. Se trabajó incrementando en forma gradual el tamaño de los elementos en las zonas de menor interés del dominio.

Para las simulaciones tridimensionales (configuraciones 2 y 3) se utilizó de base la malla bidimensional (en planta), se extendió la tercera dimensión en vertical con 52 elementos que aumentan su tamaño desde la zona inferior del canal hacia la superficie libre, de 3 mm a 6 mm cubriendo 0.26 m. Las mallas de volúmenes finitos se conformaron por 308920 elementos para el caso bidimensional y 5619040 elementos para el caso tridimensional.

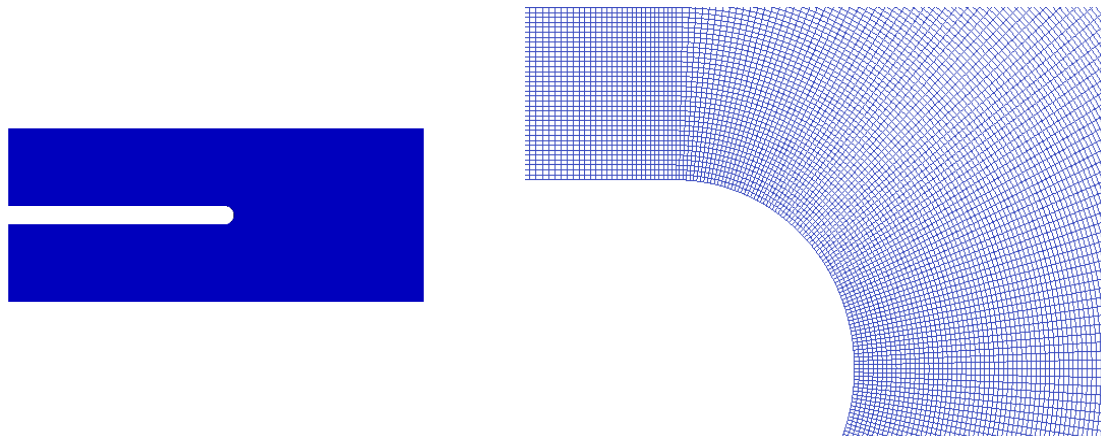


Figura 5.- Vista en planta de la geometría (izq.) y detalle de la malla de volúmenes finitos en la zona de la nariz de la confluencia (der.).

Para la simulación tridimensional adicionando el modelado de la superficie libre, se incorporaron en la coordenada (z) vertical, 10 elementos de modo de simular una capa de aire de 3 cm de espesor. Los elementos de esta porción de la malla disminuyen su tamaño hacia la superficie libre de manera de captar el comportamiento de la interfaz agua aire. De modo que actualmente la configuración de la malla cuenta con más de 6 millones de celdas (Figura 6).

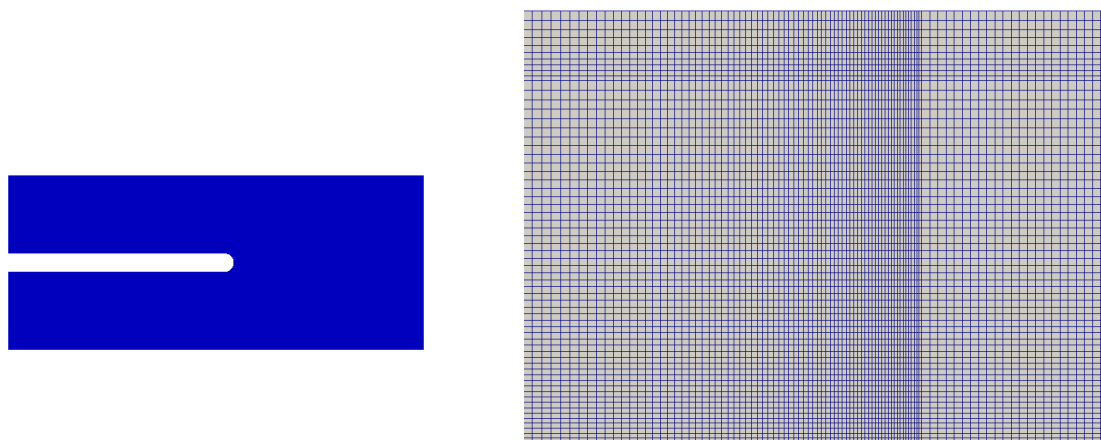


Figura 6.- Vista en planta de la geometría (izq.) y detalle de la malla de volúmenes en la tercera dimensión coordenada z , los elementos de la zona superior de la imagen representan el volumen de superficie libre incorporado al modelo (der.).

1.1 Condiciones iniciales y de borde

Para las configuraciones 1 y 2 se utilizó la aplicación “PisoFoam” de OpenFOAM(R), se establecieron condiciones iniciales y de borde para las variables: presión y velocidad instantánea que para estos casos se hace igual al valor medio medido en el flujo de aproximación. Se estableció como valores iniciales iguales a cero las variables en todo el dominio salvo las zonas donde se

establecieron condiciones de borde específicas.

Para la configuración 2 (3D) se impuso, sobre la base de observaciones experimentales, una superficie rígida sin esfuerzos de corte (con deslizamiento) para que no afecte al flujo interno (la condición slip en inglés). De esta manera es posible simplificar el modelo de dos fases (agua-aire) a una fase (agua), al simular la superficie libre. Esta simplificación permite reducir el esfuerzo computacional necesario y trabajar con un modelo menos complejo respecto a las condiciones de borde, parámetros físicos y ecuaciones a resolver. La configuración 2 permitió evaluar cambios en la zona de estancamiento.

Para la configuración 3 se utilizó una simulación de tipo LES, el modelo utilizado para incorporar el aporte a las fluctuaciones turbulentas de las escalas de flujo más pequeñas fue el de Smagorinsky adoptando en este caso los ajustes de Márquez Damián y Nigro (2010). Para las condiciones iniciales se partió del campo obtenido en la configuración 2.

El tiempo de simulación utilizado fue de 250 s (iniciando en $t=0$ 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 se definió 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).

Para la configuración 4 se utilizó una simulación de tipo LES, pero al modelar la superficie libre se utilizó la aplicación “interFoam” de OpenFOAM(R), aplicada a la malla de volúmenes finitos y dos fluidos incompresibles, isotérmicos y no miscibles con un enfoque de captura de la interfaz basada en la fracción de fase. Para incorporar el aporte de las fluctuaciones turbulentas se continuó utilizando el modelo Smagorinsky con los mismos ajustes adoptados para la configuración 3. Dado que se simula la superficie libre por primera vez para este caso los resultados presentados son preliminares. Las condiciones de borde guardan similitud con las de la configuración 3 salvo que al modelar la superficie libre se incorpora una nueva condición de borde alpha (fase), inicializando el campo con un volumen de agua y otro de aire, de manera de modelar la interacción aire agua en la superficie libre

Resultados de las Simulaciones Numéricas

Las Figuras 7 a 9 muestran tres campos instantáneos de las magnitudes de velocidades de flujo [m/s] en la confluencia para las tres configuraciones modeladas. Estos campos de flujo simulados numéricamente presentan visualmente un buen acuerdo con los observados experimentalmente representando las principales características del flujo: zonas de estancamiento; de aceleración del flujo, de generación y de desprendimiento de vórtices.

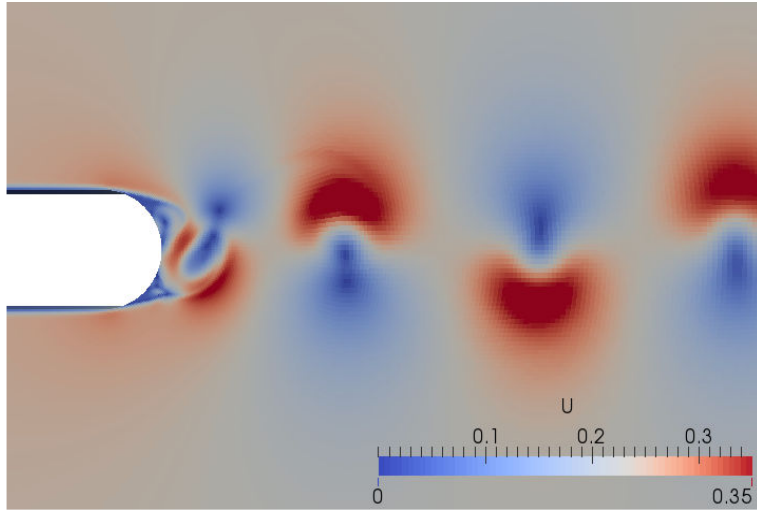


Figura 7.- Campo instantáneo de las magnitudes de velocidades de flujo [m/s] para la config. 1 (2D).

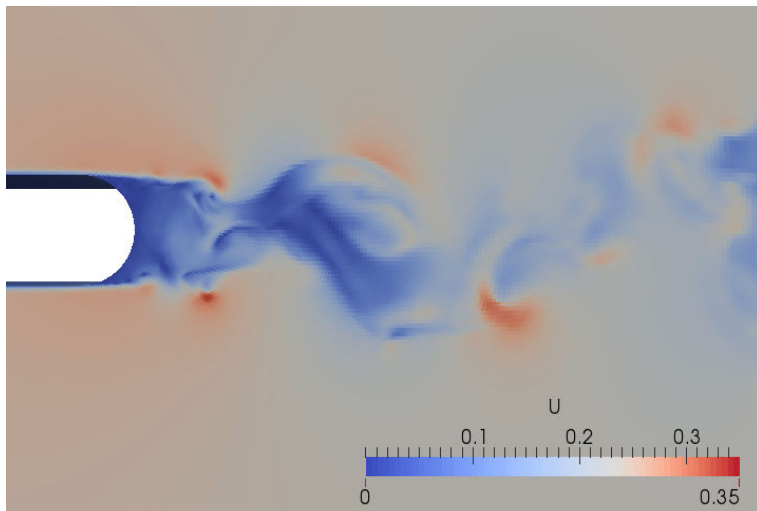


Figura 8.- Campo instantáneo de las magnitudes de velocidades de flujo [m/s] para la config. 2 (3D).

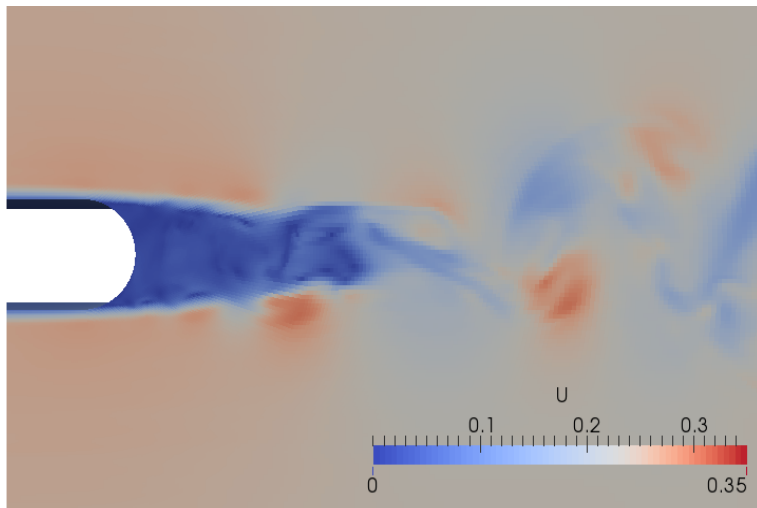


Figura 9.- Campo instantáneo de las magnitudes de velocidades de flujo [m/s] para la config.3 (3D_LES).

Como se observa en las Figuras 8 y 9, las simulaciones 3D representan de mejor manera el desarrollo de la zona de estancamiento respecto al modelo 2D, y una mejor aproximación a la visualización experimental, (ver Figura 4). La Figura 6 muestra una sobreestimación de la intensidad de las fluctuaciones de velocidad generadas por los desprendimientos de estructuras coherentes, comparado con las observaciones experimentales. Así, cualitativamente se ha obtenido una importante mejora en la caracterización del flujo medio específicamente en la zona de estancamiento.

En la Tabla 2 se muestran los valores de velocidades longitudinales medias U determinados experimentalmente y utilizando simulaciones numéricas para las localizaciones indicadas en la Figura 2. Sólo se incluyen en esta tabla los puntos localizados en la línea central del canal (1, 3, 6, 9) y hacia la margen derecha (2, 5, 8).

Tabla 2.- Velocidades longitudinales medias vmx en cada localización indicada en la Figura 3. $Q = 80$ l/s. El coeficiente de variación de los valores medios de velocidad del flujo registrados con ADV están en el orden del 1%. (García et al, 2006).

| <i>Pto.</i> | <i>Resultado experimental</i> | <i>Configuración 1 Simulación numérica 2D</i> | <i>Configuración 2 Simulación numérica 3D</i> | <i>Configuración 3 Simulación numérica 3D con LES</i> |
|-------------|-------------------------------|---|---|---|
| | <i>U [cm/s]</i> | <i>U [cm/s]</i> | <i>U [cm/s]</i> | <i>U [cm/s]</i> |
| 1 | -2.91 | 4.58 | -2,59 | -0.5 |
| 2 | 22.50 | 20.86 | 23.00 | 24.1 |
| 3 | 2.5 | 10.53 | 1.67 | -3.2 |
| 5 | 22.3 | 20.23 | 21.81 | 22.6 |
| 6 | 13.5 | 10.31 | 13.95 | 13.0 |
| 8 | 21.97 | 20.23 | 21.50 | 22.3 |
| 9 | 16.98 | 10.31 | 16.78 | 15.7 |

Las velocidades medias longitudinales 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 en el caso de la simulación bidimensional, debido a que la zona de estancamiento simulada numéricamente es de menor longitud mientras que en los puntos 8 y 9 (ubicados a 0.50 cm del obstáculo y en la calle de vórtices) se obtiene una mejor aproximación. Al pasar a simulaciones tridimensionales, con y sin cierre turbulento se puede apreciar una mejora importante en la simulación de los valores de las velocidades longitudinales, principalmente utilizando la configuración 2.

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. El análisis espectral de las series temporales de velocidades de flujo medidas y simuladas con todas las configuraciones muestran valores de frecuencias aún elevados comparándolos con los registrados en el modelo experimental. Al analizar estos resultados se comenzó a trabajar con la hipótesis vinculada a simular la superficie libre, debido a que a pesar de no observarse grandes fluctuaciones en el perfil del flujo en los ensayos experimentales es posible que la evaluación de una nueva condición de borde (interacción con al superficie libre) mejore los resultados del análisis de frecuencias.

En la Figura 10 se presentan los primeros resultados de las modelaciones simulando la interacción con la superficie libre. En la Figura 8 se observa la configuración del campo alpha.agua. El campo alpha.agua mostrado en la figura muestra, para el campo de velocidad de todo el volumen modelado las celdas que contienen una mezcla de agua y aire, siendo 0 agua y 1 aire. A pesar de que las simulaciones son preliminares se puede observar la existencia de pequeñas ondas que dan cuenta de la presencia de ambos fluidos en el campo modelado.

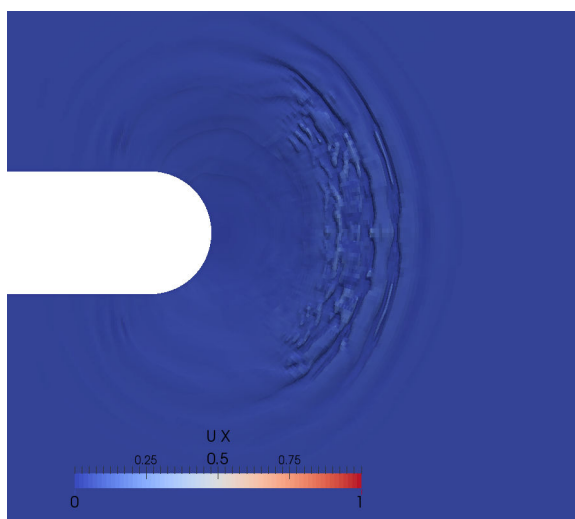


Figura 10.- Campo alpha.agua para el dominio analizado para la configuración 4 (3D_LES) a superficie libre.

En la Figura 11 se muestra el campo instantáneo de velocidades del flujo para 1.5 seg. de simulación, se observan velocidades del orden de las esperadas. Se presenta este intervalo de la simulación ya que es donde se produce un problema de convergencia que interrumpe la modelación. Al observar el campo instantáneo en la dirección X, Figura 12, se observa la presencia de celdas con altísimas velocidades en comparación a las relevadas experimentalmente. Actualmente se está trabajando realizando mejoras en la malla de volúmenes finitos ya que es posible que la presencia de estos elementos alargados provoquen la divergencia del modelo.

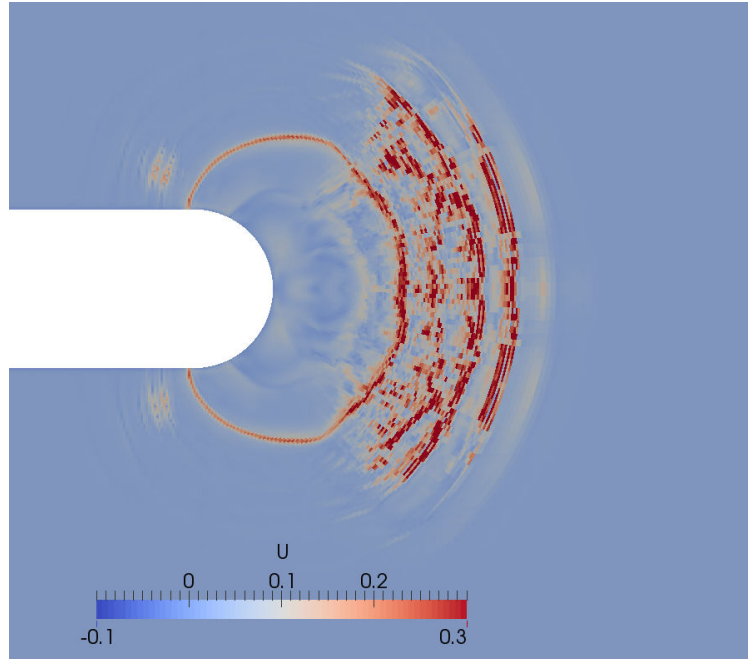


Figura 11.- Campo instantáneo de las magnitudes de velocidades de flujo [m/s] para la configuración 4 (3D_LES) a superficie libre.

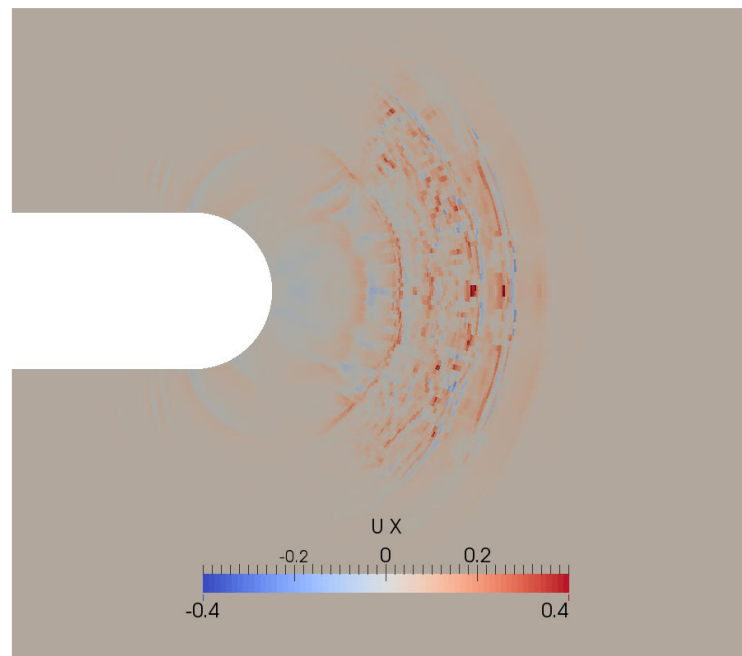


Figura 12.- Campo instantáneo de las magnitudes de velocidades de flujo para la dirección X (U_x) [m/s] para la configuración 4 (3D_LES) a superficie libre.

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En el avance en la complejidad del modelo numérico utilizado, pasando de simulación 2D a 3D, se han observado mejoras substanciales en la configuración de zona de estancamiento al incluir en la simulación la tercera dimensión en la representación de una zona de estancamiento como la observada en la evaluación experimental.

Del contraste entre las simulaciones realizadas, se deduce que los campos medios observados

para la configuración 1 representan de forma adecuada el campo del flujo medio en general, sin embargo presenta un déficit de la velocidad generada por la presencia de una zona de estancamiento de menor longitud que la experimental, debido a la presencia de fenómenos tridimensionales. La simulación del proceso de generación y desprendimiento de vórtices en la región aguas abajo es similar al observado experimentalmente. Las simulaciones tridimensionales (con y sin modelo de cierre de la turbulencia) presentaron un muy buen acuerdo al analizar el campo del flujo medio simulado en la zona de estancamiento y su contraste con el relevado en el canal experimental.

El análisis espectral de las series de tiempo para las 3 configuraciones de flujo presenta frecuencias características de las fluctuaciones de mayor escala (desprendimientos de vórtices) superiores a las observadas experimentalmente.

Se presentaron los avances en la simulación del flujo a superficie libre en la confluencia. La interacción de las dos fases se ha logrado de forma adecuada.

Se deben realizar mejoras en la discretización de la malla de volúmenes finitos a los fines de mejorar la convergencia del modelo matemático en particular para la simulación a superficie libre (configuración 4).

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.
- 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.
- García C., Jackson P., y García M. (2006). Confidence intervals in the determination of turbulence parameters. *Experiment in Fluids*. 40: 514 – 522.
- Herrero, H. (2014). Evolución espacial y temporal de la hidrodinámica en confluencias fluviales. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. Marzo de 2014. 119 págs.
- Márquez Damián, S y Nigro, N. (2010). Comparison of single phase laminar and large eddy simulation (LES) solvers using the OpenFoam suite. *Mecánica Computacional Vol XXIX*, págs3721-3740.
- OpenFOAM(R) Team (2007): “User Guide OpenFOAM(R), Foundation. <http://www.openfd.co.uk/openfoam/>
- Pozzi Piacenza, C.; Marquez Damian, S.; Herrero, M.; Ragessi, M.; Furlan, P.; Garcia, C..(2014). Evaluación de simulaciones y tridimensionales del flujo en una confluencia fluvial. *Mecánica Computacional Vol XXXIII*.