

## **Evaluación de modelos hidrodinámicos para representar flujos en cauces naturales**

*Santiago Aurelio Ochoa García, Teresa Reyna, Santiago Reyna, Marcelo García, Antoine Patalano, María Labaque*

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sársfield 1613, Córdoba, Argentina, 5016.

Autores para correspondencia: saog2105@hotmail.com

Fecha de recepción: 3 de noviembre de 2014 - Fecha de aceptación: 14 de noviembre de 2014

### **RESUMEN**

El flujo libre se presenta cuando los líquidos fluyen por la acción de la gravedad y solo están parcialmente confinados por un contorno sólido. En la predicción de las variables de flujo para diferentes condiciones tiene gran importancia el desarrollo de modelos y simulaciones numéricas hidrodinámicas con precisión adecuada que permiten la correcta planificación de obras. Se ha estudiado el uso de modelos analíticos en la solución de fenómenos de mecánica de los fluidos, que están basados en las leyes de conservación de masa, momento y energía. Según sea el grado de simplificación al que se pueda llegar, manteniendo el nivel de precisión y verificando un buen comportamiento de lo modelado respecto a la naturaleza, se tienen los esquemas hidrodinámicos unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales. Las confluencias son ambientes complejos ya que la convergencia de flujos produce complicados patrones de movimiento de fluidos. En este trabajo se presenta la formulación, métodos de solución y metodologías en general para el desarrollo de modelos físicos y matemáticos en flujos a superficie libre. Para ello se estudió la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía en la Ciudad de Córdoba.

Palabras clave: Confluencia, modelos hidrodinámicos, modelos físicos.

### **ABSTRACT**

The free flow occurs when the liquid flows by gravity and only partially confined by a solid circle. In the prediction of the flow variables for different conditions is of great importance to develop hydrodynamic models and numerical simulations with adequate precision to allow proper planning of works. We have studied the use of analytical models in solving phenomena fluid mechanics, which are based on the laws of conservation of mass, momentum and energy. Depending on the degree of simplification that can be reached while maintaining the level of accuracy and verify what good behavior modeled on the nature, there are one-dimensional, two-dimensional and three-dimensional hydrodynamic schemes. A confluence is a complex adaptive convergence since complicated flow parameters produce fluids movement. In this paper the formulation, solution methods and methodologies for developing overall physical and mathematical models for free surface flows is presented. For this study the confluence of the La Cañada stream and Suquía River both of the City of Córdoba.

Keywords: Confluence, hydrodynamic models, physical models.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Un sistema fluvial se estructura en cuencas hidrográficas y en una red de drenaje compuesta por un sistema jerarquizado de cursos fluviales, desde pequeños surcos hasta ríos, que confluyen unos en

otros hasta configurar el colector principal de la cuenca. Es así que, 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 interface de mezcla entre los flujos convergentes y el desarrollo de estructuras turbulentas coherentes de gran escala dentro de esta interfaz (Pozzi Piacenza *et al.*, 2013).

El río Suquía o Primero nace de las confluencias de los ríos San Antonio y Cosquín a los que se les une el de Los Chorrillos y el arroyo de Las Mojarras. Su cuenca activa está limitada al norte por el dorso de La Cumbre; al sur, por la cresta de la Sierrita o Cordón de Santiago, que la separa de la cuenca del río Anizacate; al oeste, por las divisorias de las aguas del río Pintos, de la Pampa de San Luis y de la Sierra Grande. Antes de su paso por la ciudad de Córdoba, el Suquía se encuentra regulado con el embalse San Roque. Además sufre varias obstrucciones a lo largo de su recorrido con el azud El Diquecito y diversos puentes fuera y dentro de la metrópolis. Sus afluentes generan con sus crecidas problemas importantes aguas arriba del Dique San Roque y el mismo río los genera aguas abajo en su tramo por la ciudad (Lábaque, 2010).

El arroyo La Cañada nace en la depresión tectónica de La Lagunilla y cruza la parte sur de la ciudad, de S.O. a N.E., para finalmente desaguar en el Suquía. Este arroyo de aspecto inofensivo por su escaso caudal, fue el causante de varias y desastrosas inundaciones a lo largo de la historia de la ciudad de Córdoba; la última ocurrió en la década del treinta, motivando la construcción de diques laterales en su recorrido ciudadano que han permitido controlar eficientemente el comportamiento del arroyo en épocas de crecidas violentas (Barbeito & Quintana, 1998). La longitud aproximada del río Suquía es de unos 200 kilómetros (si se considera como su nacimiento al dique San Roque) y el ancho promedio de su cauce es de 200 metros. El arroyo La Cañada posee aproximadamente 28 kilómetros de longitud (la canalización en el centro de la ciudad que deriva a la desembocadura en el río Suquía es de aproximadamente 3 kilómetros de longitud) y tiene un ancho medio de 20 metros. El caudal medio anual en la confluencia es de  $9,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , con máximo promedio anual de  $19,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  y mínimo promedio anual de  $3,76 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . En condiciones de estiaje el caudal se reduce considerablemente, aunque aumenta de modo abrupto cuando se producen lluvias (Gizzi, 2012). La confluencia del arroyo La Cañada con el río Suquía se ubica alrededor de las coordenadas  $31^{\circ}24'22'' \text{ S}$  y  $64^{\circ}11'20'' \text{ O}$ , a una altura aproximada de 384 metros sobre el nivel del mar.



**Figura 1.** Modelo Físico Suquía-Cañada (Fuente: Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba).

Dentro del proyecto de sistematización del cauce en la confluencia, planteado por La Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba, se tomó la decisión de construir un modelo físico a escala con el objetivo de modelar diferentes condiciones de caudales para distintos periodos de retorno y de esta manera verificar el correcto funcionamiento de las obras propuestas. El modelo físico hidráulico Suquía-Cañada (Fig. 1) es de tipo tridimensional con semejanza de Froude ejecutado en escala no distorsionada de longitudes  $L = 1:40$ . Este modelo permite analizar el tramo del río Suquía comprendido entre los puentes Centenario y Avellaneda como se puede observar en la Fig. 2, de aproximadamente 1000 metros de longitud, con un ancho efectivo variable de 70 a 280 metros en prototipo, incluyendo la desembocadura del arroyo La Cañada y el parque Las Heras localizado aguas abajo del mencionado arroyo.



**Figura 2.** Área de aplicación del modelo físico de la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía.

En el análisis de la hidrodinámica fluvial están presentes una gran cantidad de variables a ser consideradas en el comportamiento del flujo. Las vinculadas a la descripción como los son variables de profundidad, velocidades, tensiones de corte, pendiente de fondo, etc; y las que relacionan al material que compone los bordes del río en el fondo y en las márgenes como la composición granulométrica y vegetación. A continuación se presenta la Ecuación de Continuidad para flujos incompresibles y las Ecuaciones de Conservación de Momento de Navier Stokes con sus términos principales y escritos en notación tensorial:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \hat{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

Donde  $u_i$  y  $u_j$  son las componentes de velocidad ( $u_1 = u$ ,  $u_2 = v$  y  $u_3 = w$ ) en las direcciones de los ejes cartesianos  $x_i$  y  $x_j$  ( $x_1 = x$ ,  $x_2 = y$ ,  $x_3 = z$ );  $\hat{p}$  es la presión piezométrica, que incluye, los términos de la fuerza de presión y gravitacionales;  $t$  es el tiempo si se considera flujo no estacionario y  $\nu$  la viscosidad cinemática (García & Niño, 2003).

## 2. ESQUEMAS NUMÉRICOS

Para la resolución aproximada de las ecuaciones de Navier-Stokes se han introducido varias simplificaciones que conducen a modelos que pueden ser aplicados a problemas prácticos en la ingeniería. Una de estas aproximaciones es conocida como las ecuaciones de Saint-Venant o ecuaciones de Onda en Aguas Superficiales. Los flujos en canales abiertos y ríos son típicos ejemplos que pueden ser tratados con esquemas unidimensionales, en estos casos es usual que el principal interés sea determinar la variación longitudinal de las propiedades del flujo en la dirección de la corriente.

La versión unidimensional de las ecuaciones de Saint-Venant se obtiene integrando las ecuaciones de continuidad y de Navier-Stokes en la sección transversal del flujo, asumiendo presión hidrostática en la dirección normal al fondo del cauce. Sin embargo, la suposición de un flujo unidimensional puede no ser válida en varias aplicaciones de flujo a superficie libre, como por ejemplo en canales no prismáticos, donde se tienen grandes variaciones en el alineamiento y sección transversal del canal; en estos casos es posible simplificar las ecuaciones de Navier-Stokes a un esquema bidimensional cuando en el análisis considerado se obtengan resultados con una razonable precisión. La versión bidimensional de estas ecuaciones es obtenida promediando con respecto a la profundidad las ecuaciones de continuidad y de Navier-Stokes, tal que las ecuaciones resultantes describan el movimiento del fluido en un plano paralelo al fondo del canal (Chaudhry, 2007).

Para el caso en estudio se consideraron tres software diferentes para la solución del problema planteado (HEC-RAS, IBER y DELFT3D).

### 2.1. *Modelo Unidimensional HEC-RAS*

HEC-RAS 4.1.0 (River Analysis System 4.1.0) es un programa cuya principal función es la delineación de planicies de inundación, es decir calcular el nivel del agua en cada sección transversal en el tramo de un río o canal artificial. El flujo puede ser permanente o no permanente. Además de calcular los niveles de agua en cada sección, HEC-RAS tiene la capacidad de calcular otras variables hidráulicas como la socavación en los elementos de apoyo de un puente para el diseño de la cimentación de los mismos, así como el transporte de sedimentos y contaminantes (US Army Corps of Engineers, 2010). HEC-RAS utiliza el método del paso estándar para el cálculo de los niveles de agua en cada sección transversal en el flujo estacionario. Para estos es necesario conocer las secciones transversales, la distancia entre las secciones transversales, el coeficiente de Manning en cada porción de cada sección transversal, el o los caudales de diseño y la condición de borde. Si el flujo es subcrítico, la condición de borde a usar es aguas abajo; si el flujo es supercrítico, la condición de borde a usar es aguas arriba. En un tramo sólo es necesario conocer una condición de borde, a menos que el flujo sea mixto. En este caso, se debe contar con una condición de borde aguas arriba y otra aguas abajo (Chaudhry, 2007).

### 2.2. *Modelo Bidimensional IBER*

IBER es un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen no-permanente, y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial. El rango de aplicación de IBER abarca la hidrodinámica fluvial, la simulación de rotura de presas, la evaluación de zonas inundables, el cálculo de transporte de sedimentos y el flujo de marea en estuarios. El módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad, también conocidas como 2D Shallow Water Equations (2D-SWE) o ecuaciones de St. Venant bidimensionales. Dichas ecuaciones asumen una distribución de presión hidrostática y una distribución relativamente uniforme de la velocidad en profundidad. La hipótesis de presión hidrostática se cumple razonablemente en el flujo en ríos, así como en las corrientes generadas por la marea en estuarios. Asimismo, la hipótesis de distribución uniforme de velocidad en profundidad se cumple habitualmente en ríos y estuarios, aunque pueden existir zonas en las que dicha hipótesis no se cumpla debido a flujos locales tridimensionales o a cuñas salinas. En estos casos es necesario estudiar la extensión de dichas zonas y su posible repercusión en los resultados del modelo (FLUMEN, 2012).

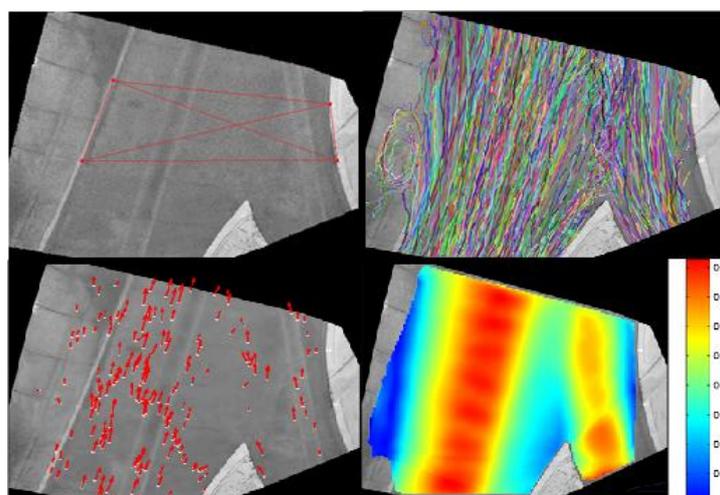
### 2.3. Modelo Tridimensional DELFT3D

DELFT3D-FLOW es una herramienta hidrodinámica multidimensional (2D o 3D) de simulación que calcula el flujo no estacionario y fenómenos de transporte que resultan de las mareas, movimiento en ríos y forzamiento meteorológico en una forma rectangular o una red equipada límite curvilínea (DELTAIRES, 2012). DELFT3D resuelve las ecuaciones no lineales en aguas poco profundas. Las ecuaciones de aguas someras (SWE por sus siglas en inglés: Shallow Water Equations) se obtienen promediando la ecuación de Navier-Stokes en la dirección vertical. Varias hipótesis se han hecho para derivar estas ecuaciones: la hipótesis principal es que la escala de longitud horizontal es mucho mayor que la escala de longitud vertical. Esta suposición reduce la ecuación de momento vertical a una ecuación de la presión hidrostática. Mientras que esto es una suposición válida en la resolución gruesa, se debe tomar un cuidado adicional en los casos de resoluciones muy finas, así como en aquellos casos en los que la interacción de flujo de fluido con la batimetría en la parte inferior es el proceso dominante. En estas regiones, la velocidad vertical juega un papel importante en la mezcla, e incluso en el transporte de la energía (Abouali, 2013).

## 3. TÉCNICAS EXPERIMENTALES

Velocimetría por Seguimiento de Partículas - PTV: El método de la velocimetría por seguimiento de partículas (PTV - Particle Tracking Velocimetry) es una forma de medición no intrusiva de donde se obtiene el campo de velocidades superficiales instantáneas del flujo (velocidades bidimensionales), con alta resolución temporal y espacial. La técnica se basa en determinar el desplazamiento de las partículas que son sembradas en el flujo (asumiendo que las partículas se desplazan a la velocidad del flujo) a partir del análisis de imágenes digitales registradas a intervalos constantes de tiempo " $\Delta t$ ". Se utiliza un marco de referencia Lagrangiano y permite la determinación del campo de velocidades basándose en la determinación del desplazamiento de cada partícula trazadora individual (Cenedese & Querzoli, 1997).

Para la caracterización del flujo en el modelo físico en los alrededores de la confluencia se realizaron mediciones con la técnica de PTV (también se procesaron datos de mediciones con Tubo Pitot y Velocímetro Acústico Doppler obtenidos en estudios previos (Gizzi, 2012)); a continuación en la Fig. 3 se presentan los resultados obtenidos después del procesamiento de la información de entrada, proceso de cálculo principal, filtrado de los resultados y post-procesamiento.



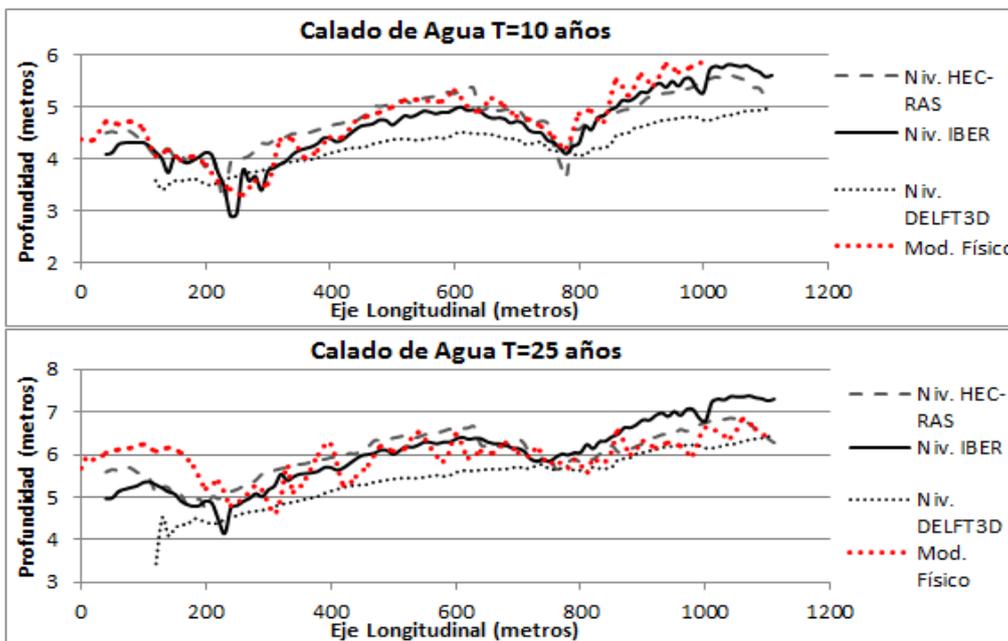
**Figura 3.** Procesamiento y resultados de la velocidad media superficial en el plano obtenidos a través de la técnica de PTV.

En la imagen superior izquierda de la Fig. 3 se presenta la cuadrícula que será de utilidad en la rectificación de las imágenes obtenidas con la técnica de PTV; en la imagen superior derecha de la Fig. 3 se pueden observar todas las trayectorias de las partículas analizadas para obtener las variables de velocidad. En la imagen inferior izquierda de la Fig. 3 los vectores de velocidad obtenidos en el plano y finalmente en la imagen inferior derecha un esquema con áreas coloreadas que representa la velocidad media en la superficie del flujo medida mediante la técnica del seguimiento de partículas.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

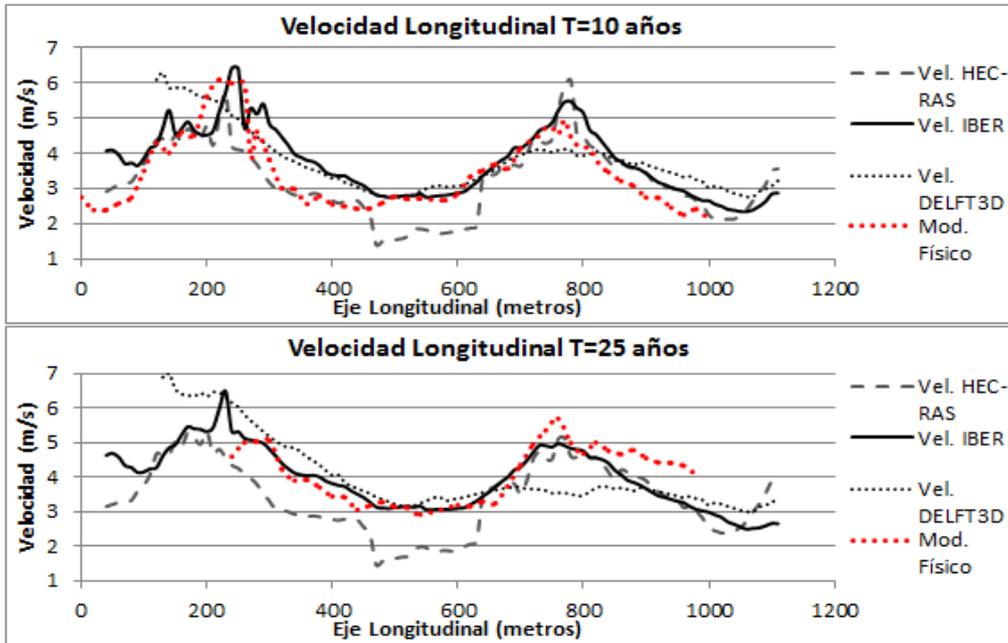
Las condiciones de flujo consideradas en el estudio corresponden a periodos de retorno de 10 y 25 años; el caudal para el tramo del río Suquía para 10 años es:  $Q_{10} = 454 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  y para 25 años es:  $Q_{25} = 675 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , el caudal para el tramo del arroyo La Cañada para 10 años es:  $Q_{10} = 210 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  y para 25 años es:  $Q_{25} = 328 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . El caudal total en la confluencia para los escenarios considerados fue de  $Q_{10} = 664 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  y  $Q_{25} = 1003 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (Reyna, 1999).

Antes del proceso de calibración en cada uno de los modelos seleccionados, se analizó la sensibilidad de los parámetros en la formulación de los esquemas numéricos considerados, y se observó a través del análisis de sensibilidad que en los tres modelos la variable de resistencia al flujo es determinante en los resultados. En el esquema de cálculo unidimensional a través del paso estándar (HEC-RAS) las variables con mayor sensibilidad a ser tomadas en cuenta son los coeficientes de expansión y contracción para flujos estacionarios en cada una de las secciones y la tolerancia en los niveles calculados de la línea de energía. En los modelos bidimensional y tridimensional (IBER y DELFT3D) los esquemas de cálculo son similares: resuelven las ecuaciones promediadas de Navier-Stokes o ecuaciones de Reynolds a través del método de volúmenes finitos por lo que la malla de cálculo (que se obtiene a través del Modelo Digital del Terreno) y las variables de paso de tiempo son los parámetros que tendrán efectos determinantes en los resultados.



**Figura 4.** Resultados de profundidad de agua a lo largo del eje del río Suquía obtenidos en los modelos numéricos y físico.

El parámetro que tomó mayor importancia en la calibración de los modelos numéricos de este flujo a superficie libre es el valor de la rugosidad; en general, para la selección de este coeficiente se deben conocer los factores que ejercen mayor influencia y las relaciones entre ellos (la rugosidad superficial o de la pared del revestimiento, la presencia de vegetación, la irregularidad de la sección, la alineación del canal en planta, la sedimentación o socavación, obstrucciones, el tamaño y forma del canal, el tirante y caudal, el material en suspensión y la carga de fondo (Chow, 1994)). A continuación en la Fig. 4 se muestran los resultados de profundidad de agua y en la Fig. 5 los de la velocidad media longitudinal; resultados de los modelos numéricos aplicados y los datos medidos en el modelo físico.



**Figura 5.** Resultados de velocidad media longitudinal a lo largo del eje del río Suquía obtenidos en los modelos numéricos y físico.

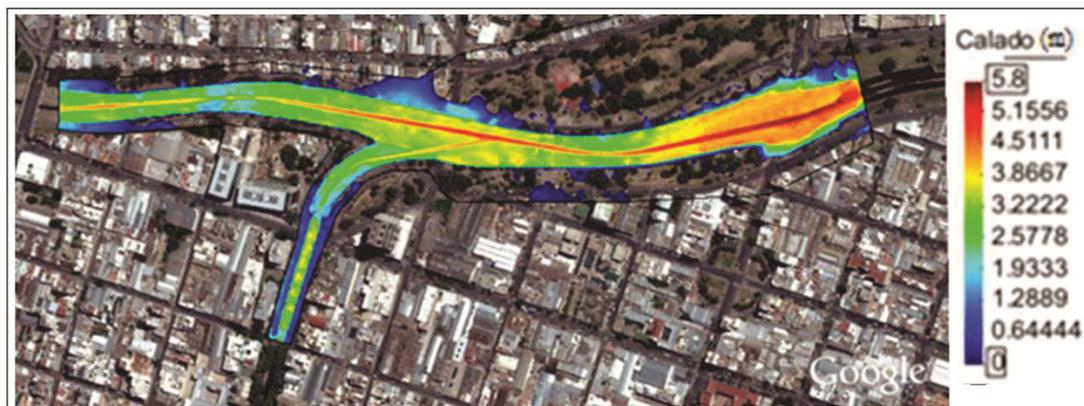
En los resultados mostrados en las Figs. 4 y 5 se puede ver claramente que los niveles y velocidades de agua obtenidos en IBER respecto a los medidos en el modelo físico arrojan tendencias bastante similares. Respecto a los resultados obtenidos en el modelo unidimensional HEC-RAS, se puede observar en las Figs. 4 y 5 que lo calculado en este modelo representa un aceptable estado de forma respecto a los datos medidos, aunque subestima las velocidades en los sectores de máximos y mínimos. Otra observación importante es que, los resultados obtenidos en el modelo tridimensional DELFT estiman adecuadamente los valores máximos y mínimos de las variables de velocidad, aunque se subestiman las profundidades en el flujo y también se presenta una deficiencia en la tendencia de forma respecto a los datos medidos a lo largo del modelo físico del río Suquía.

Es así que, con la ayuda de 7 índices estadísticos (Tabla 1) para la calibración y validación de tres modelos numéricos hidrodinámicos: HEC-RAS (1D), IBER (2D) y DELFT (3D) se llegó a la caracterización de las variables del flujo en el dominio estudiado para eventos de retorno de 10 y 25 años, se concluyó, que el esquema numérico que representó el problema con mayor aproximación de los resultados respecto a los datos observados fue el modelo hidrodinámico bidimensional IBER.

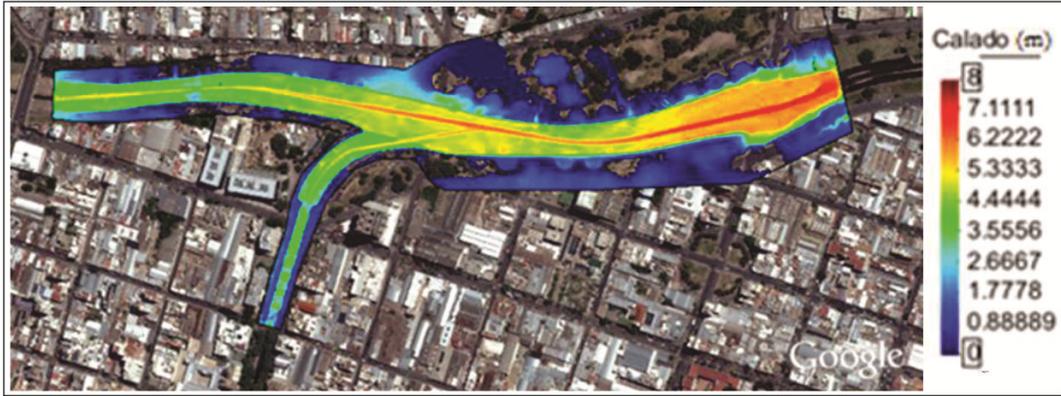
Se presenta en las Figs. 6 y 7 los resultados del calado de agua en los alrededores de la confluencia del arroyo La Cañada con el río Suquía obtenidos en IBER, resultados que son de utilidad en la delineación de los sectores inundados en periodos de retorno de 10 y 25 años, respectivamente. En las Figs. 8 y 9 se presentan un esquema de la velocidad media en el plano donde se pudo diferenciar Zonas de Estancamiento, Zonas de Recirculación y Zonas de Desborde para los periodos de recurrencia de 10 y 25 años en los alrededores de la confluencia.

**Tabla 1.** Análisis estadístico de los resultados de nivel y velocidad calculados por los modelos numéricos HEC-RAS, IBER y DELFT3D comparados con los medidos en el modelo físico Suquiá-Cañada para los periodos de retorno correspondientes a 10 y 25 años.

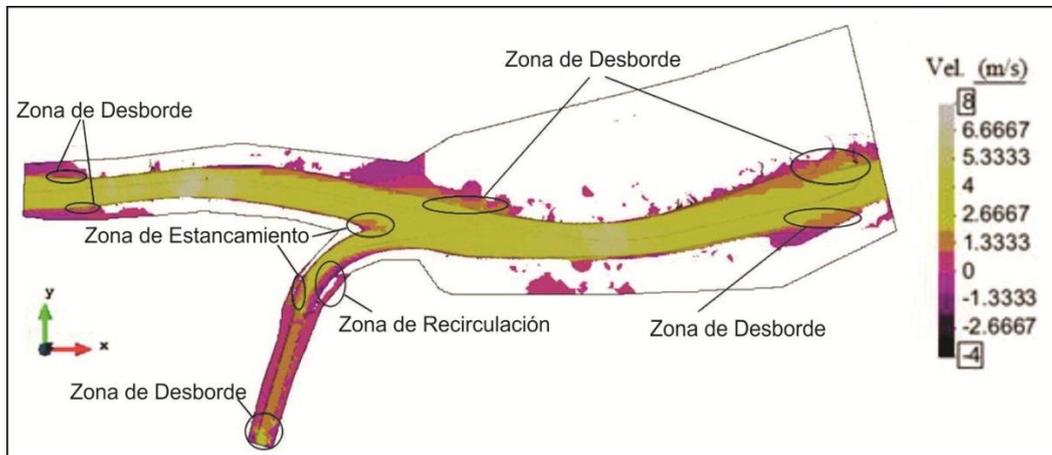
	Niveles HEC-RAS 10 años	Niveles IBER 10 años	Niveles DELFT3D 10 años
Error Porcentual (%)	5.1288	5.7355	12.6638
Error Medio Absoluto (MAE)	0.2337	0.2502	0.5399
Error Medio Cuadrado (RRMSE)	0.0664	0.0645	0.1306
Coefficiente de Eficiencia (EF <sub>2</sub> )	0.7690	0.7822	0.1794
Coefficiente de Determinación (CD)	1.8316	1.2632	1.1955
Desviación Media (BIAS)	0.0096	0.1783	0.4898
Coefficiente de Determinación Múltiple (R <sup>2</sup> )	0.7921	0.8662	0.8461
	Niveles HEC-RAS 25 años	Niveles IBER 25 años	Niveles DELFT3D 25 años
Error Porcentual (%)	5.9477	7.5590	9.9991
Error Medio Absoluto (MAE)	0.3408	0.4380	0.4832
Error Medio Cuadrado (RRMSE)	0.0744	0.0925	0.1183
Coefficiente de Eficiencia (EF <sub>2</sub> )	0.1833	-0.2621	-0.9678
Coefficiente de Determinación (CD)	0.9251	0.4540	0.3954
Desviación Media (BIAS)	-0.0637	-0.0544	0.4655
Coefficiente de Determinación Múltiple (R <sup>2</sup> )	0.3757	0.4298	0.3714
	Velocidad HEC-RAS 25 años	Velocidad IBER 25 años	Velocidad DELFT3D 25 años
Error Porcentual (%)	13.5210	10.0868	19.9284
Error Medio Absoluto (MAE)	0.3741	0.3833	0.7678
Error Medio Cuadrado (RRMSE)	0.1344	0.1220	0.2211
Coefficiente de Eficiencia (EF <sub>2</sub> )	0.7583	0.5858	-0.3600
Coefficiente de Determinación (CD)	0.9631	1.2050	1.0013
Desviación Media (BIAS)	0.1568	0.1575	0.2204
Coefficiente de Determinación Múltiple (R <sup>2</sup> )	0.7978	0.6345	0.1109



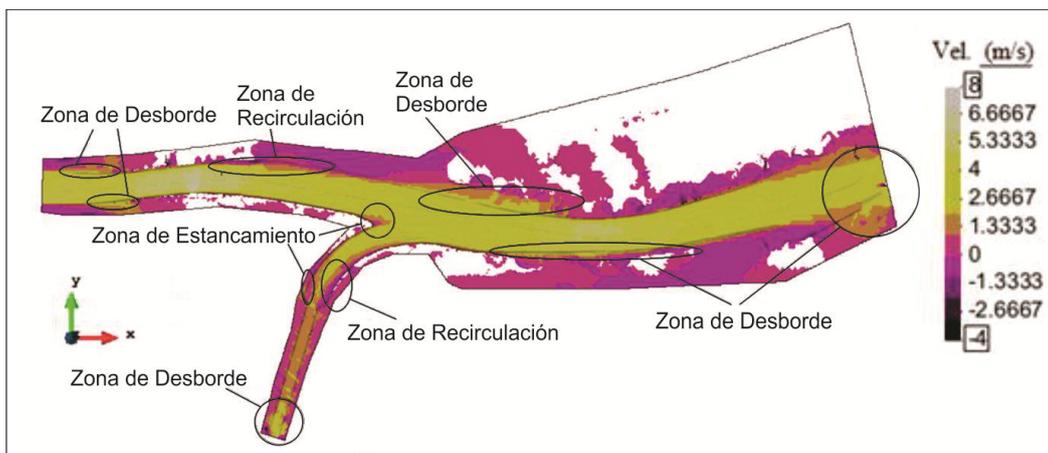
**Figura 6.** Esquema de áreas coloreadas del calado de agua para un período de retorno de 10 años, resultados obtenidos en el modelo numérico bidimensional IBER aplicado a la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquiá.



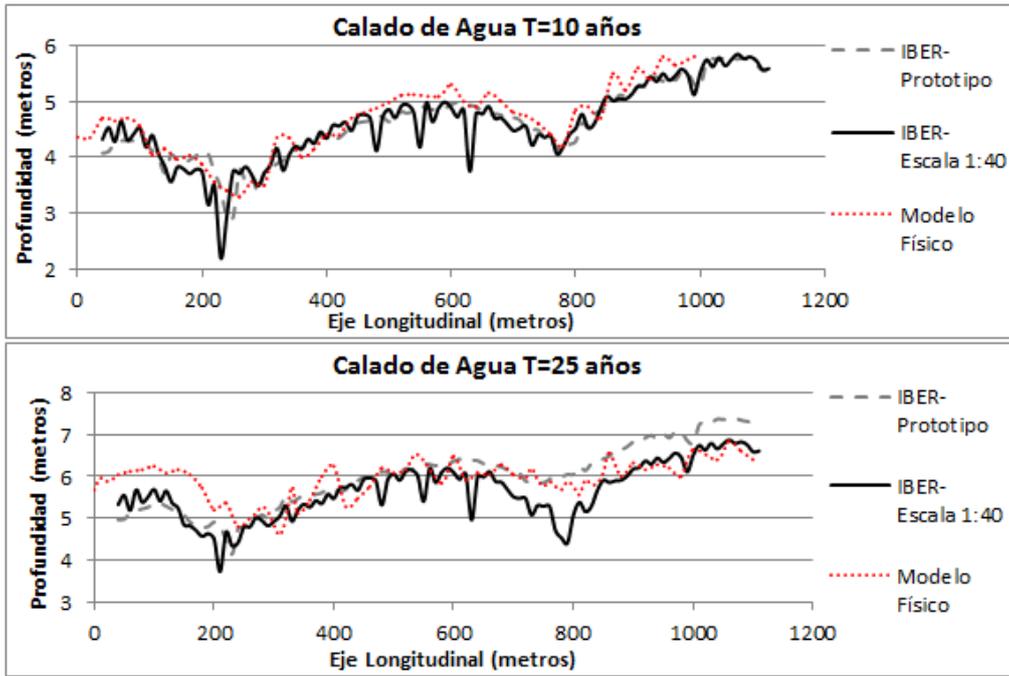
**Figura 7.** Esquema de áreas coloreadas del calado de agua para un período de retorno de 25 años, resultados obtenidos en el modelo numérico bidimensional IBER aplicado a la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía.



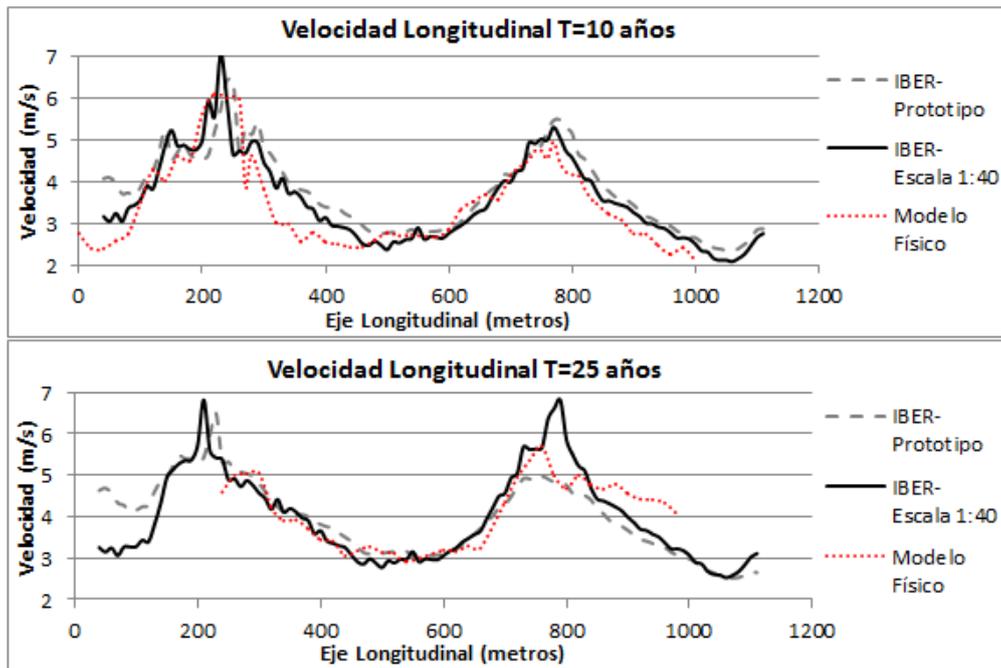
**Figura 8.** Esquema de áreas coloreadas de la velocidad media en el plano para un período de retorno de 10 años, resultados obtenidos en el modelo numérico bidimensional IBER aplicados a la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía.



**Figura 9.** Esquema de áreas coloreadas de la velocidad media en el plano para un período de retorno de 25 años, resultados obtenidos en el modelo numérico bidimensional IBER aplicados a la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía.



**Figura 10.** Resultados calculados en tamaño de prototipo y a escala de longitudes 1:40 de la profundidad de agua en dirección del eje longitudinal del río Suquía.



**Figura 11.** Resultados calculados en tamaño de prototipo y a escala de longitudes 1:40 de la velocidad media a lo largo del eje longitudinal del río Suquía.

En la Fig. 10 se presentan los resultados calculados en tamaño de prototipo y a escala de longitudes 1:40 de la profundidad de agua en dirección del eje longitudinal del río Suquía; y en la Fig. 11 los resultados calculados en tamaño de prototipo y a escala de longitudes 1:40 de la velocidad media del flujo en dirección del eje longitudinal del río Suquía para los períodos de retorno considerados (10 y 25 años); se observan las mismas tendencias en los datos y errores no mayores al

10%, por lo que se puede concluir que los efectos de escala en el modelo respecto al prototipo observados en los alrededores de la confluencia del arroyo La Cañada con el río Suquía y calculados con el modelo numérico bidimensional IBER tienen errores tolerables para este fenómeno.

## 5. CONCLUSIONES

Técnicas experimentales para obtener las magnitudes de las variables de flujo en el modelo físico de fondo fijo de la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía (Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba) han sido tomadas en cuenta. Se aplicó la técnica de PTV (Velocimetría por Seguimiento de Partículas - Particle Tracking Velocimetry) para el periodo de retorno de 25 años; se midió la velocidad media en el plano superficial del flujo con esta técnica entre las progresivas 240 a 980 metros del tramo correspondiente al río Suquía, se obtuvo velocidades con esta técnica experimental en 35 secciones transversales. También se utilizaron datos de mediciones realizadas en estudios previos con la técnica del ADV y Tubo Pitot correspondientes al período de retorno de 10 años entre la progresiva 0 a 1000 metros el modelo físico del río Suquía. Los datos obtenidos fueron procesados y utilizados en la calibración y validación de los modelos numéricos aplicados.

A través del análisis de sensibilidad de las variables en los modelos numéricos HEC-RAS, IBER y DELFT3D, se llegó a la conclusión de que la variable de mayor importancia en la calibración de un flujo a superficie libre es la rugosidad o resistencia que se ejercen las paredes y el fondo del canal en el flujo. El valor propuesto de la rugosidad al calibrar cada uno de los modelos numéricos con los datos experimentales obtenidos en el modelo hidráulico de la confluencia, es el de una rugosidad de Manning de 0,02 en el cauce y de 0,04 en las riberas de inundación.

Del análisis cualitativo y cuantitativo de los resultados de los modelos numéricos HEC-RAS, IBER y DELFT3D; y con la ayuda de siete índices estadísticos que relacionan estos resultados respecto a los datos experimentales obtenidos en el modelo físico de la confluencia, índices con valores aceptables en los tres modelos numéricos antes citados, se llegó a la conclusión de que el modelo hidrodinámico bidimensional IBER es el que representa de la mejor manera los resultados calculados respecto a los observados; el motivo de esta mejor representación, se explica por la característica de la confluencia estudiada que presenta propiedades de aguas poco profundas o flujos de superficie libre en aguas someras, con la relación de ancho-profundidad pequeña donde dominan los procesos bidimensionales y por lo tanto se obtienen buenos resultados al promediar las variables verticales respecto a la profundidad del flujo.

Con los resultados de los esquemas de las áreas inundadas obtenidos en el modelo hidrodinámico bidimensional IBER, se identificaron las áreas que serían afectadas al considerar lluvias en los periodos de recurrencia correspondientes a 10 y 25 años en los alrededores de la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía; el área afectada en el evento de 25 años abarca una gran inundación de las vías de la costanera (aproximadamente de un metro de profundidad), así como se afecta a construcciones aledañas a las riberas de inundación; mientras que, para el periodo de retorno de 10 años, se observa que el agua transitará en su mayoría por las riberas de inundación del mismo río sin que se afecte con gravedad las estructuras y vías aledañas.

Analizando los resultados de los campos de velocidad en el plano, se observó que la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía tiene un comportamiento similar al de confluencias observadas en estudios e investigaciones previas (confluencias con relación de ancho-profundidad pequeña); así se observó bien definida la zona de estancamiento del flujo inmediatamente aguas abajo de la punta de la confluencia, las zonas de capa de corte (en las paredes del canal del río Suquía y en la curvatura del arroyo de la Cañada antes de la confluencia) y la interfase de mezcla en la combinación de los dos flujos también fueron ubicadas, se observó separación del flujo aguas abajo de la zona de estancamiento y en las zonas cercanas al pequeño vertedero existente en La Cañada; la aceleración del flujo alcanzando su máxima velocidad después de la confluencia y zonas de recuperación del flujo aguas abajo de esta zona de aceleración también fueron bien definidas.

Finalmente, del análisis de los resultados del flujo en la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía; resultados calculados en el modelo hidrodinámico bidimensional IBER con datos de entrada en tamaño de prototipo y en escala reducida a 1:40 (escala de longitudes no distorsionada respecto a la vertical), se concluyó que los efectos de escala no afectan a los resultados calculados, por lo que se observó que las variables de interés son representativas y tienen las mismas tendencias en todos los escenarios considerados. Del análisis estadístico de las variables calculadas respecto a los datos observados se concluyó que existen mayores diferencias en los efectos de escala de los resultados al considerar un periodo de retorno de 25 años, mientras que uno de 10 años presenta menores diferencias.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al grupo de trabajo por su colaboración, en especial a la Dra. Teresa Reyna por brindar todo su tiempo para que cada trabajo tenga calidad óptima. Se agradece el apoyo financiero de la Secretaria de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Córdoba y de la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación del Ecuador.

## REFERENCIAS

- Abouali, M., 2013. Developing a nested hydrodynamical model for San Diego bay, using DELFT3D and DELFTDASHBOARD. Tesis de Maestría, Computation Science Research Center, Department of Mathematics and Statistics, San Diego State University, 49 pp. Disponible en [http://sdsu-dspace.calstate.edu/bitstream/handle/10211.10/3978/Abouali\\_Mohammad.pdf?](http://sdsu-dspace.calstate.edu/bitstream/handle/10211.10/3978/Abouali_Mohammad.pdf?)
- Barbeito, L.O., S.F. Quintana, 1998. *Carta geológica geomorfológica de la Ciudad de Córdoba y su Entorno*. Córdoba, Argentina.
- Cenedese, A., G. Querzoli, 1997. Lagrangian statistics and transilient matrix measurements by PTV in a convective boundary layer. *Meas. Sci. Technol.*, 8(12), 1553.
- Chaudhry, M.H., 2007. *Open-Channel Flow* (2nd ed.). Springer, New York, NY, 523 pp.
- Chow, V.T., 1994. *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw Hill Interamericana, S.A., 337 pp. Disponible en <http://es.scribd.com/doc/33259919>.
- DELTAIRES, 2012. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. *DELFT3D-FLOW User Manual*, 497 pp. Delft, The Netherlands 2012.
- FLUMEN, 2012. Manual de referencia hidráulico IBER, 59 pp. Disponible en <http://es.scribd.com/doc/241700077/Manual-Referencia-Hidraulico-Iber>.
- García, M., Y. Niño, 2003. Flow and transport equations in surface waters. *CEE 498 Environmental Hydrodynamics*, College of Engineering, University of Washington, WA, USA.
- Gizzi, S.L., 2012. Caracterización experimental del flujo en el modelo físico tridimensional del Río Suquía. *Informe Técnico Final de Practicas Supervisadas para el grado de Ingeniería Civil*. Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- Lábaque, M., 2010. Propuesta para la confección de planes de emergencia por rotura de presas en la Provincia de Córdoba. Aplicación al dique San Roque. *Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba*; Córdoba, Argentina.
- Pozzi Piacenza, C. H. Herrero, P. Furlan, I.M. Ragessi, S.M. Damian, G. López, F. Pedocchi, C.M. García, 2013. Simulación numérica y experimental del flujo en una confluencia. Asociación Argentina de Mecánica Computacional. *Mecánica Computacional*, XXXII, 3727-3739.
- Reyna, S., 1999. *Obra: Avenida Costanera Margen Sur. Tramo Puente Sagrada Familia - Puente Turín*. Informe final. Área de Hidrología e Hidráulica, Universidad Nacional de Córdoba.

US Army Corps of Engineers, 2010. HEC-RAS: River analysis system hydraulic reference manual. Version 4.1.0., 417 pp. Disponible en [http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documentation/HEC-RAS\\_4.1\\_Reference\\_Manual.pdf](http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documentation/HEC-RAS_4.1_Reference_Manual.pdf).