

**PRIMER CONGRESO IBEROAMERICANO DE PROTECCIÓN, GESTIÓN,
EFICIENCIA, RECICLADO Y REÚSO DEL AGUA**

**PRIMER SEMINARIO DE UNIVERSALIZACIÓN DEL ACCESO AL AGUA
APTA PARA EL CONSUMO HUMANO**

**USO DE MODELOS NUMÉRICOS Y MODELOS FÍSICOS APLICADOS A
CAUCES NATURALES. CASO CONFLUENCIA DEL ARROYO LA CAÑADA Y EL RÍO
SUQUÍA, PROVINCIA DE CÓRDOBA.**

Santiago Ochoa, Teresa Reyna, Santiago Reyna, María Lábaque, Marcelo García, Horacio Herrero.
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Univ. Nacional de Córdoba
saog2105@hotmail.com - +543515741821 - Córdoba, Argentina.

RESUMEN:

En este proyecto se estudian los procesos hidrodinámicos unidimensionales y bidimensionales en el curso fluvial formado en la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía. Se han considerado los softwares HEC-RAS (1D, US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center) e IBER (2D, Gobierno de España. Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente). Se revisará la formulación y método de cálculo de cada modelo matemático aplicando un análisis de sensibilidad de las variables claves en la resolución del problema numérico. Se cuenta con datos de las variables hidrodinámicas obtenidas en laboratorio a través del modelo físico de la confluencia del arroyo La Cañada y el río Suquía; modelo que se encuentra localizado en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba, estos datos servirán para realizar la correcta calibración y validación de los modelos matemáticos considerados. Se incluirá la descripción de los instrumentos de medición que fueron utilizados.

PALABRAS CLAVES: Hidrodinámico, Unidimensional, Bidimensional.

ABSTRACT:

In this project there are studied the one-dimensional and two-dimensional hydrodynamic processes in the river course formed at the confluence of the *Cañada* brook and the *Suquía* river. Regarding software used, HEC-RAS (1D, US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center) and IBER (2D, Spain Government. Water and Environment Engineering Group) have been considered. The formulation and calculation method of each mathematical model will be studied using a sensitivity analysis of the key variables involved in the numerical resolution of the problem. Hydrodynamic data were obtained in laboratory through the physical model of the confluence of the *Cañada* brook and the *Suquía* River that is located in the Hydraulics Laboratory of the National University of Cordoba. This data is used to perform the correct calibration and validation of the mathematical models considered. In addition, the description of the measuring instruments that were used is included.

Key Words: Hydrodynamic Unidimensional, Bidimensional

1 INTRODUCCIÓN:

En el análisis hidrodinámico fluvial están presentes una gran cantidad de variables a ser consideradas en el comportamiento de flujo. Las vinculadas a la descripción del flujo como calado, velocidades, tensiones de corte, pendiente de fondo, etc. Las que relacionan al material que compone los bordes del río en el fondo y en las márgenes como la composición granulométrica y vegetación. La componente de transporte de sedimentos y contaminantes puede también estar presente en el análisis de ríos.

La necesidad de estudiar fenómenos más complejos en donde la hipótesis de unidimensionalidad se aleja demasiado de la realidad y en donde la importancia del proyecto lo justifique, y la observación, que en la naturaleza se encuentran muchas situaciones donde el flujo parece ser efectivamente no unidimensional, condujeron al desarrollo de los esquemas hidrodinámicos bidimensionales y tridimensionales. (Lábaque, 2010)

Estudios y observaciones de confluencias en cauces naturales han mostrado comportamientos con características similares (todos con ancho-profundidad pequeño); en la Figura 1 se presentan las características de confluencias explicadas a continuación: (Herrero, 2011)

- Zona de estancamiento del flujo inmediatamente aguas abajo de la punta de la confluencia.
- Una capa de corte y una interface de mezcla en la combinación de los dos flujos. La capa de corte ha sido definida como una zona de intensa turbulencia por diferencias de cantidad de movimiento entre los flujos confluentes (Rhoads y Sukhodolov, 2008); y se observa como una estrecha franja dentro de la sección transversal del flujo orientada verticalmente, perpendicular al fondo del canal, y en la que se registran elevados niveles de energía cinética turbulenta.
- Separación del flujo aguas abajo de la zona de estancamiento y en las caras de aguas abajo de los escalones de los tributarios en la boca de la confluencia.
- Aceleración del flujo alcanzando su máxima velocidad cuando se unen los dos tributarios.
- Recuperación del flujo aguas abajo de la confluencia.
- Corrientes secundarias en la zona de convergencia del flujo asociada a su curvatura.

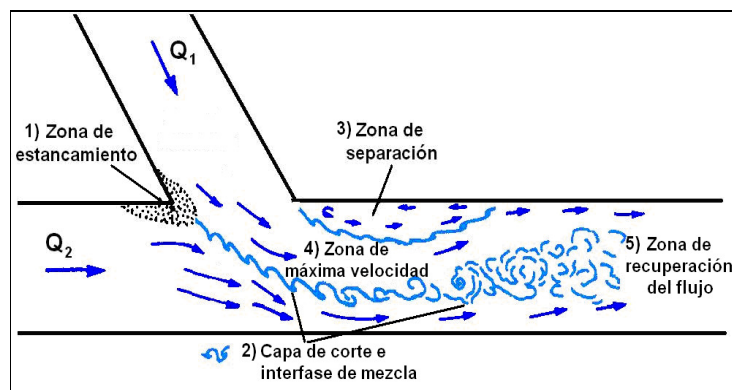


Figura 1.- Zonificación del comportamiento de una confluencia. (Best, 1987)

2 ANTECEDENTES:

2.1 Área de Estudio:

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. En la actualidad sus aguas se encuentran represadas por el dique San Roque. 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. La región que tiene como base de desarrollo a las aguas del río Suquía, es relativamente pequeña, pero dentro de ella se encuentra ubicada la segunda concentración demográfica de la República Argentina (Ciudad de Córdoba), con una actividad industrial de gran solidez e importancia, un importante centro turístico, gran actividad agrícola, actividad ganadera y alguna actividad minera. Antes de su paso por la ciudad de Córdoba el Suquía se encuentra regulado aguas arriba 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 SW a NE, 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, 1998). A continuación en la Figura 2 se presenta el área de influencia del presente estudio:



Figura 2.- Área de Influencia.

2.2 Modelo Físico Suquía-Cañada:

Para la validación de los modelos matemáticos se contará con datos del modelo físico Suquía-Cañada. Este modelo físico hidráulico es de tipo tridimensional con semejanza de Froude ejecutado en escala no distorsionada de longitudes $EL=1:40$, permiten analizar el tramo del río Suquía, comprendido entre los puentes Centenario y Avellaneda, de aproximadamente 1000 m de desarrollo, con un ancho efectivo variable de 70 a 280 m en prototipo, incluyendo la desembocadura del arroyo La Cañada y el parque Las Heras localizado aguas abajo del mencionado arroyo. Las obras modeladas se encuentran incluidas dentro del proyecto de sistematización del cauce del río Suquía, el cual comprende la reparación y readecuación del cauce principal y su llanura de inundación. A continuación en la Figura 3 se presenta el modelo físico ubicado en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba:



Figura 3.- Modelo físico confluencia Río Suquía – Arroyo La Cañada.

3 TÉCNICAS EXPERIMENTALES

3.1 Velocímetro Acústico Doppler – ADV

El Velocímetro Acústico Doppler – ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) es un instrumento versátil de alta precisión utilizado para medir la velocidad puntual cuasi instantánea tridimensional del flujo, en una variedad de condiciones, como ser instalaciones de laboratorios, ríos, estuarios, y océanos. El ADV utiliza la tecnología Doppler para medir velocidades de flujos en un pequeño volumen de medición localizado entre 5 y 10 cm del instrumento. El Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba dispone de un MicroADV marca Sontek de 16 MHz. El volumen de medición estándar para el MicroADV es un cilindro con un diámetro de 4.5 mm y una altura de 5.6 mm, siendo estas dimensiones fijas para el instrumento ya que no pueden ser modificadas por el usuario. El rango de velocidad a monitorear que el instrumento dispone es programable por el usuario, y va desde ± 3 a ± 250 cm/s. El MicroADV de 16 MHz muestrea valores de velocidad con una frecuencia de hasta 250 Hz, pero son registrados los datos con frecuencias de hasta 50 Hz luego de un promedio digital para disminuir los niveles de ruido. Los elementos principales del MicroADV son: 1. La sonda (donde se encuentran los emisores y receptores de la señal acústica), 2. El módulo de acondicionamiento de la señal y 3. El módulo de procesamiento de la señal. En la Figura 4 se presenta el instrumento ADV descrito:



Figura 4.- ADV marca Sontek.

3.2 Tubo Pitot:

El tubo Pitot determina velocidades medias y puntuales de flujo a partir de la medición de presión estática y total, lo que permite determinar la presión dinámica y de esa forma calcular la velocidad de circulación de un fluido. Consiste en un pequeño tubo con la entrada orientada en

contra del sentido de la corriente del fluido como muestra la Figura 5. La velocidad del fluido en la entrada del tubo se hace nula, al ser un punto de estancamiento, convirtiendo su energía cinética en energía de presión, lo que da lugar a un aumento de presión dentro del tubo de Pitot. Dicha presión de agua, hace que ésta ascienda en el tubo, hasta que la presión de la columna de agua equilibre la energía de velocidad del agua y de presión. Combinando el tubo de Pitot y un tubo piezométrico se tiene un solo instrumento llamado tubo de Pitot estático. De esta forma el tubo de Pitot mide la presión total y el tubo piezométrico mide la presión estática. Como resultado se puede obtener la presión dinámica como la diferencia de estas dos.

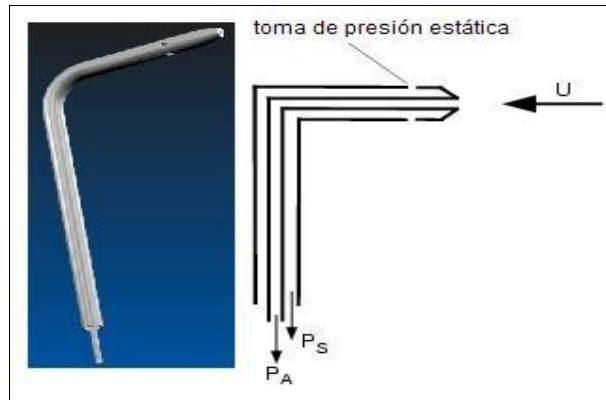


Figura 5.- Tubo de Pitot estático.

El tubo de Pitot tiene que ser calibrado en laboratorio, esto para obtener el coeficiente C_d (coeficiente de velocidad del tubo Pitot) que permite obtener velocidades próximas a la real. Las velocidades que se obtienen son velocidades medias puntuales en una sola dirección (unidimensionales), a partir de la ecuación [1]; donde U =velocidad, g =aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2) y ΔH = presión dinámica (diferencia de la presión total y la presión estática).

$$U = C_d * \sqrt{2 * g * \Delta H} \quad [1]$$

4 MODELOS MATEMÁTICOS:

4.1 Modelo Hidrodinámico Unidimensional HEC-RAS:

El 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 de calcular el nivel del agua en cada sección transversal en el tramo de un río o canal artificial. En la actual versión el flujo puede ser permanente o no permanente. Además de calcular los niveles de agua en cada sección, el HEC-RAS tiene la capacidad de calcular la socavación en los elementos de apoyo de un puente para el diseño de la cimentación de los mismos. El ingreso de datos es sencillo porque las ventanas en entorno Windows permiten introducir los datos de manera ordenada. Este programa de cómputo es el sucesor del HEC-2, originalmente programado en FORTRAN IV por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de Norteamérica (Us Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center, 2010).

El HEC-RAS y su antecesor, el HEC-2, utilizan el método del paso estándar para el cálculo de los niveles de agua en cada sección transversal en el flujo estacionario. Para éstos 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, 2008). El método del paso estándar se basa en la resolución de la ecuación de energía (ecuación [2]):

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 * v_2}{2 * g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 * v_1}{2 * g} \quad [2]$$

Dónde: Z_1 , Z_2 la elevación del fondo del canal; Y_1 , Y_2 la profundidad del flujo; a_1 , a_2 el coeficiente de carga de la Velocidad; V_1 , V_2 la velocidad media de la sección; g =aceleración de la gravedad (9.81 m/s²) y h_e =perdida de carga. La pérdida de carga de energía es la suma de pérdida de carga por fricción y pérdidas por expansión-contracción (pérdidas locales).

4.2 Modelo Hidrodinámico 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 (Manual de Referencia Hidráulica, IBER).

En el módulo hidrodinámico se resuelven las ecuaciones de conservación de la masa (ecuación [3]) y de momento en las dos direcciones horizontales (ecuación [4] y [5]):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = M_s \quad [3]$$

$$\frac{\partial h U_x}{\partial t} + \frac{\partial h U_x^2}{\partial x} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} - \frac{g}{\rho} \frac{h^2}{2} \frac{\partial p}{\partial x} + 2\Omega \text{sen } \lambda U_y + \frac{\partial h \tau_{xx}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial y} + M_x \quad [4]$$

$$\frac{\partial h U_y}{\partial t} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial x} + \frac{\partial h U_y^2}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} - \frac{g}{\rho} \frac{h^2}{2} \frac{\partial p}{\partial y} + 2\Omega \text{sen } \lambda U_x + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}^e}{\partial y} + M_y \quad [5]$$

Donde h es el calado, U_x , U_y son las velocidades horizontales promediadas en profundidad, g es la aceleración de la gravedad, Z_s es la elevación de la lámina libre, τ_s es la fricción en la superficie libre debida al rozamiento producido por el viento, τ_b es la fricción debido al rozamiento del fondo, ρ es la densidad del agua, Ω es la velocidad angular de rotación de la tierra, λ es la latitud del punto considerado, τ_{xx}^e , τ_{xy}^e , τ_{yy}^e son las tensiones tangenciales efectivas horizontales, y M_s , M_x , M_y son respectivamente los términos fuente/sumidero de masa y de momento, mediante los cuales se realiza la modelización de precipitación, infiltración y sumideros.

5 RESULTADOS:

Las simulaciones se realizaron para periodos de retorno de 10 y 25 años (figura 6 y figura 7); el caudal para el tramo del río Suquía: $Q_{10}=454 \text{ m}^3/\text{seg}$ y $Q_{25}=575 \text{ m}^3/\text{seg}$, el caudal para el tramo del Arroyo La Cañada $Q_{10}=210 \text{ m}^3/\text{seg}$ y $Q_{25}=328 \text{ m}^3/\text{seg}$. El caudal total en la confluencia para los escenarios considerados fue de $Q_{10}=664 \text{ m}^3/\text{seg}$ y $Q_{25}=1003 \text{ m}^3/\text{seg}$ (Reyna, 1999). En la calibración de los modelos matemáticos se pudo llegar a la conclusión de que la variable con mayor sensibilidad era la rugosidad de fondo de Manning, se consideró esta variable como semidistribuida en el espacio; los valores se dividieron en tres clases: Canal de Fondo (Hormigón) = 0,025; Césped Corto en las Riveras de Inundación = 0,03 y Áreas fuera del Cauze (Calles Residenciales) = 0.04. A continuación en la Figura 6 se presenta la evolución del espejo de agua en la longitud del río Suquía para un periodo de retorno de 10 años, en donde se comparan los resultados de algunos puntos medidos en el Modelo Físico Suquía – Cañada con los resultados de los modelos matemáticos HEC-RAS (1D) e IBER (2D); se obtuvo que los errores relativos están muy cercanos al 3%. De igual manera en la Figura 7 se presenta la evolución de la cota para un periodo de retorno de 25 años, el error relativo para este escenario es menor al 5% respecto de los datos obtenidos en el modelo físico. También, en la Figura 7; se puede observar la línea de tendencia del relevamiento del pelo de agua realizado por la Universidad Nacional de Córdoba y la DiPAS de un evento ocurrido el Domingo 12 de Marzo del año 2000; evento que fue asociado a un periodo de retorno de 25 años (Castelló y otros, 2001).

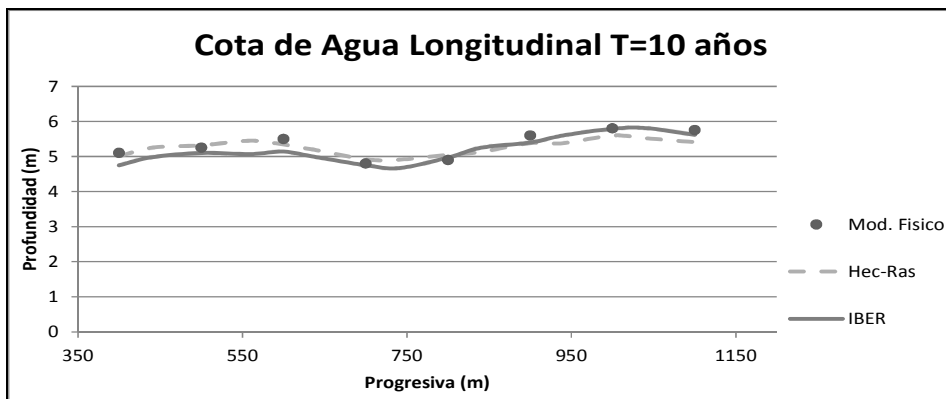


Figura 6.- Evolución del pelo de agua en el río Suquía para un periodo de retorno de 10 años.

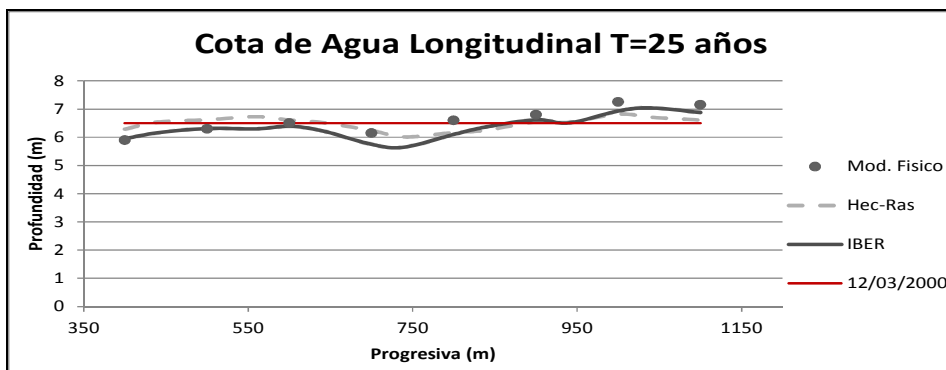


Figura 7.- Evolución del pelo de agua en el río Suquía para un periodo de retorno de 25 años.

A continuación en la Figura 8 se presenta la evolución de las velocidades medias longitudinales correspondientes a algunas secciones transversales del río Suquía para un periodo de retorno de 10 años. Al comparar los resultados de los modelos matemáticos y los datos medidos en

el modelo físico con las técnicas de ADV y tubo de Pitot, se obtuvo un error relativo de alrededor el 10%.

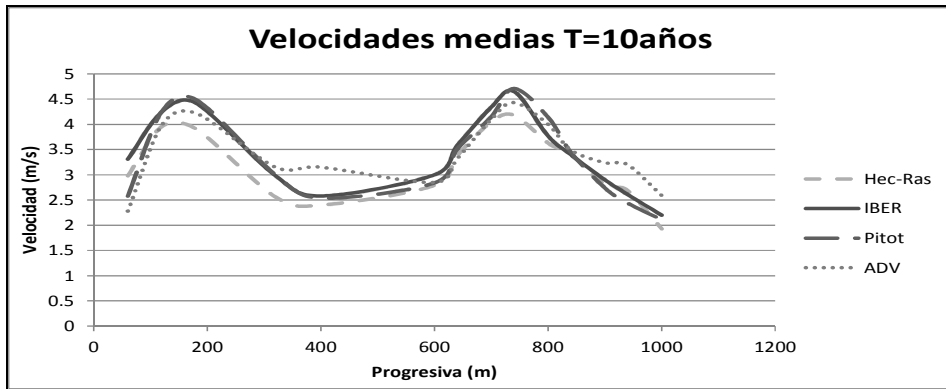


Figura 8.- Velocidades medias longitudinales en cada sección del río Suquía para un periodo de retorno de 25 años.

En la Figura 9 y Figura 10 se presenta la profundidad del pelo de agua obtenido en el modelo IBER para un periodo de retorno de 10 y 25 años respectivamente; también, en la Figura 11 y Figura 12 las velocidades medias horizontales obtenidas en los escenarios correspondientes:

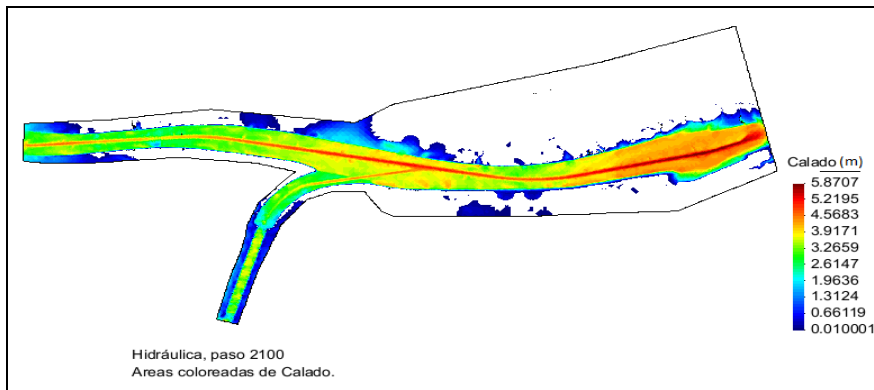


Figura 9.- Profundidad del flujo (T=10 años).

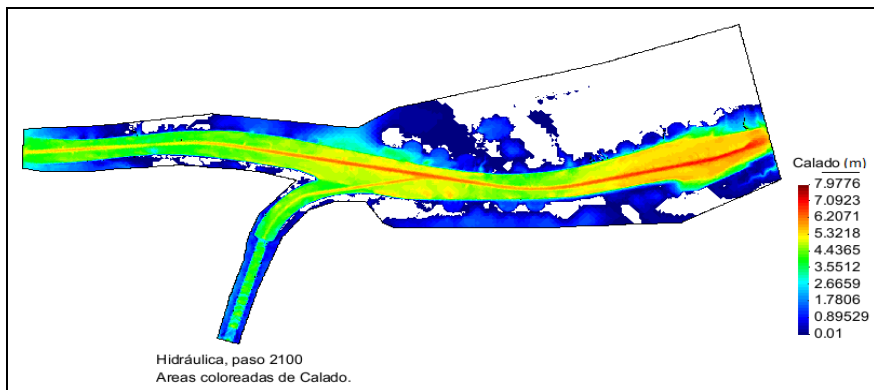


Figura 10.- Profundidad del flujo (T=25 años).

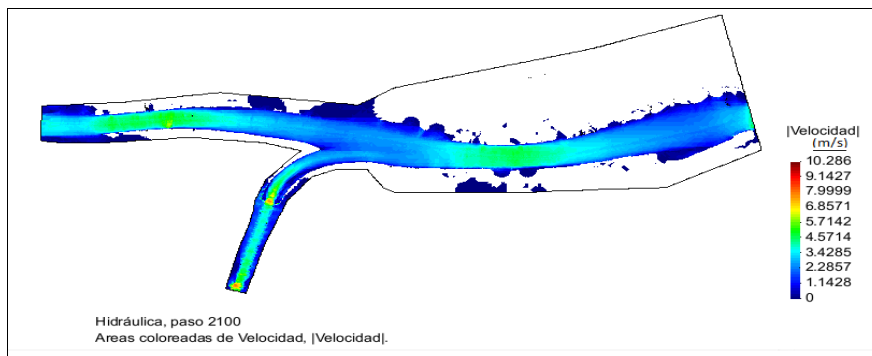


Figura 11.- Velocidad media (T=10 años).

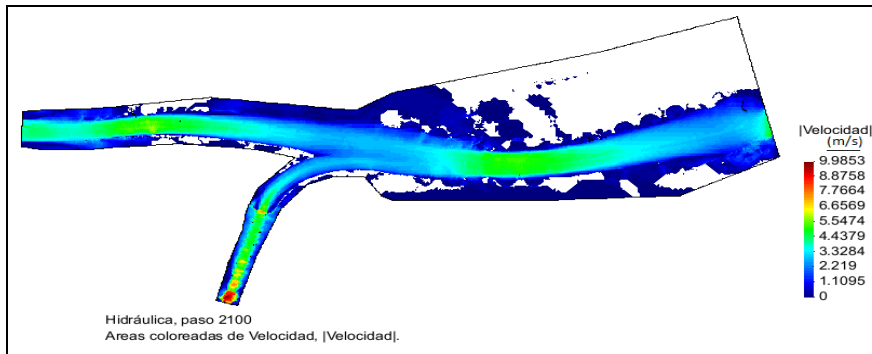


Figura 12.- Velocidad media (T=25 años).

6 CONCLUSIONES

Los resultados de los niveles de agua obtenidos en los modelos matemáticos HEC-RAS (1D) e IBER (2D) para periodos de retorno de 10 y 25 años tienden a los obtenidos en el modelo físico, con un error relativo no mayor al 5%. Las velocidades en los modelos numéricos para el periodo de retorno de 10 años se comportan con tendencias similares a las medidas por técnica de ADV y tubo de Pitot, con un error relativo del 10%; de esto se concluye que los modelos matemáticos fueron calibrados satisfactoriamente.

En el proceso de calibración se observó que la variable con mayor influencia en los resultados es la rugosidad de fondo de Manning, la misma que fue distribuida espacialmente en la malla del modelo digital del terreno en tres clases: 1) Canal de Fondo (Hormigón) = 0,025; 2) Césped Corto en las Riveras de Inundación = 0,03 y 3) Áreas fuera del Cauce (Calles Residenciales) = 0.04.

En el modelo bidimensional IBER se observó (Figura 11 y Figura 12) que el flujo cumple con las características de confluencias en cauces naturales con ancho-profundidad pequeño; en las figuras se aprecia claramente la zona de estancamiento, la zona de mezcla y la zona de recuperación del flujo aguas abajo de la confluencia.

El uso de un modelo matemático tridimensional para obtener la distribución de velocidades vertical es de vital importancia para la caracterización detallada del flujo en confluencias.

La falta de información de campo y en especial de esta zona importante de la Ciudad de Córdoba plantea a las instituciones relacionadas con la planificación hídrica la necesidad del emprendimiento de campañas de aforo.

La información que se obtenga de las campañas de aforo permitirá ser usada para el pronóstico de desastres con un menor grado de incertidumbre.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barbeito, O. L.; Quintana Salvat, F. (1998). “Carta Geológica Geomorfológica de la Ciudad de Córdoba y su Entorno. Fotointerpretación”. v.7, n.1, p.324 - 339, ISSN/ISBN: 03277410. Córdoba, Argentina.

Castelló, E.; Miatelo, F.; Moya, G.; Orso, M. (2001). “Flujo a Superficie Libre Avanzado”. Universidad Nacional de Córdoba.

Chaudhry, M. H. (2008). “Open-Channel Flow”. New York: SPRINGER SCIENCE + BUSINESS MEDIA.

Herrero, H. (2011). “Inestabilidades en Aguas Someras en Confluencias”. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Córdoba.

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. Universidad Nacional de Córdoba.

Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente. (2012). “Manual de Referencia Hidráulico”. Gobierno de España. IBER.

Reyna, S. (1999). “Informe Final. Obra: Avenida Costanera Margen Sur. Tramo Puente Sagrada Familia – Puente Turín”. Área Hidrología e Hidráulica.

Rhoads, B. L. y Sukhodolov, A. (2008). “Lateral momentum flux and the spatial evolution of flow within a confluence mixing interface”, Water Resources Research, Vol. 44, w08440, doi: 10.1029/2007wr006634.

US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. (2010). “River Analysis System Hydraulic Reference Manual”. Version 4.1.