



EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA HIDRODINÁMICA Y PROCESOS DE MEZCLA EN LA CONFLUENCIA DE LOS RÍOS TERCERO Y SALADILLO

Horacio Herrero¹, Carlos M. García¹, Antoine Patalano¹, Ricardo Szupiany²

¹Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, UNC.
Av Filloy s/n, Ciudad Universitaria, CP 5000, Córdoba, Argentina.

E-mail: hsherrero@yahoo.com.ar - Web: <http://www.efn.uncor.edu/investigacion/hidraulica/>

²Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Centro Internacional de Estudios de Grandes Ríos (CIEGRI). Universidad Nacional del Litoral, Ciudad Universitaria, C.C. 217, RN N° 168
– Km. 472 (3000) Santa Fe, Argentina.

RESUMEN

En este trabajo se presenta la caracterización experimental in situ de la hidrodinámica y patrones de mezcla de una confluencia natural de flujos de diferente densidad de dos ríos de mediana escala. Para ello se implementaron y optimizaron modernas técnicas experimentales de medición de velocidad de flujo (Perfiladores de corriente acústicos Doppler – ADCP), visualización del flujo, y medición de conductividad del agua. Con ADCP se determinaron la batimetría, y los parámetros hidráulicos globales mientras que con el uso de técnicas de visualización del flujo se pudo identificar el tamaño de la zona de estancamiento y las características de la capa de mezcla. Además, con GPS diferencial de alta precisión se relevó la pendiente de la superficie del agua. Finalmente, mediante la medición de la conductividad eléctrica y temperatura del agua de los flujos de aproximación y en la interfase de mezcla aguas abajo de la confluencia, se determinó la longitud requerida para la mezcla transversal completa de ambas masas de agua. Los resultados obtenidos en este trabajo permitieron evaluar el patrón hidrodinámico y de mezcla más conveniente para modelar los principales procesos presentes en confluencias fluviales como la estudiada que presenta naturaleza compleja. La presencia de flujos de diferente densidad genera una mayor complejidad en los patrones hidrodinámicos y de mezcla observados.

ABSTRACT

This work presents an experimental work characterizing in-situ hydrodynamics and mixing patterns in a medium-scale natural confluence of two rivers with different flow density. Different experimental techniques and methods have been used and optimized in this work, i.e. flow velocity measurement using Acoustic Doppler Current Profiles - ADCP, flow visualization, and measurement of water conductivity. Bathymetry, water-surface slope and bulk hydraulic parameters were determined using ADCP while flow visualization has been used describing the stagnation zone and the flow patterns in the mixing layer. In addition, high resolution differential GPS has been used for water surface slope determination. Finally, by measuring water temperature and conductivity upstream and downstream of the flow confluence, the length of the river downstream of the confluence required to reach the complete transverse mixing was determined. The experimental results obtained in this work allow the evaluation of the most convenient hydrodynamics and mixing patterns used to model complex flow in natural confluence of two rivers as it is studied in this work. Complex hydrodynamic and mixing patterns have been observed in the studied confluence due to the presence of different fluid densities in the incoming flows.

INTRODUCCIÓN

La caracterización de la hidrodinámica y los patrones de mezcla en confluencias es uno de los aspectos de la hidráulica fluvial que ha generado gran interés en la comunidad científica. La complejidad del flujo turbulento en confluencias requiere que para su estudio simplificado se utilicen modelos conceptuales basados en patrones hidrodinámicos de flujos típicos analizados en detalle en la Mecánica de los Fluidos. Los patrones hidrodinámicos más utilizados para caracterizar la hidrodinámica y los procesos de mezcla en confluencias fluviales con flujos sin diferencia significativa de densidad son: a) capas de mezcla poco profundas y, b) estela turbulenta generada aguas abajo de un obstáculo sumergido. Rhoads y Sukhodolov (2008) argumentan que generalmente las confluencias fluviales han sido modeladas como capas de mezcla poco profundas (caso a) en la que los flujos laterales de cantidad de movimiento generalmente son despreciables. Sin embargo, Constantinescu et al (2011) proponen que para aquellas confluencias que presenten ciertas características geométricas (fondo concordante y elevados ángulos entre los tributarios), y del flujo (relación de momento de los tributarios cercanos a uno, el modelo más conveniente es el que representa un patrón de flujo de estela turbulenta generada aguas abajo de un obstáculo sumergido (caso b). Aquí ocurren los principales procesos hidrodinámicos tales como la mayor transferencia lateral de cantidad de movimiento y el déficit de la velocidad media del flujo aguas abajo de la punta de la confluencia debido a la presencia de una zona de estancamiento. Trabajos previos que evalúan la conveniencia del uso de este modelo conceptual en confluencias de flujos de igual densidad incluyen estudios a escala de laboratorio (Herrero et al., 2013), simulaciones numéricas (Constantinescu et al, 2011 y 2012) y mediciones en campo (Rhoads y Sukhodolov, 2004 y 2008). Estos últimos incluyen la evaluación experimental de la hidrodinámica en una confluencia fluvial natural de escala pequeña (caudales del orden $1\text{m}^3/\text{seg}$, profundidades menores a 0.5m y anchos de tributarios menores a 10 m) lo que permitió la medición de variables por métodos de vadeo. Sin embargo no existe evidencia de trabajos de campo que evalúen el uso de esta analogía en confluencias fluviales de escalas mayores. En los estudios experimentales previos a menor escala (en laboratorio y campo) se observaron, aguas abajo de la confluencia, la presencia de una zona de estancamiento en la cual se produce la recirculación del fluido y que está limitada en cada lado por capas de corte similar a lo que sucede en flujos alrededor de un obstáculo. En el extremo aguas abajo de la zona de estancamiento los estudios mostraron que las dos capas de corte se fusionan para formar una capa única de corte cuya posición depende de la relación de momento (Constantinescu et al., 2012).

OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo es evaluar en campo la hidrodinámica y los procesos de mezcla de una confluencia fluvial de mediana escala, con diferencias de densidad de los flujos convergentes. A partir de esta evaluación experimental se determina la conveniencia del uso de un modelo conceptual específico para confluencias fluviales basado en el patrón hidrodinámico de una estela turbulenta generada aguas abajo de un obstáculo sumergido, modelo conceptual ya utilizado para estudios experimentales y numéricos en menor escala. Se evaluarán los efectos de la diferencia de densidad en los patrones hidrodinámicos de mezcla, que es un aspecto no discutido en los antecedentes citados. Al trabajar en este estudio experimental con escalas espaciales mayores a los estudios previos disponibles y para obtener características comparables a los estudios existentes en laboratorio y cursos de fluviales de menor escala, un objetivo particular de este trabajo es desarrollar y adaptar técnicas y metodologías de medición de distintas variables y visualización específicas.

LOCALIZACIÓN, MATERIALES Y MÉTODOS

Luego de un análisis detallado de distintas confluencias fluviales en la provincia de Córdoba y provincias vecinas se ha seleccionado la confluencia de los ríos Tercero (Ctalamochita) y Saladillo (ver figura 1) como óptima para este estudio debido a sus dimensiones (escala intermedia entre grandes ríos de llanura y arroyos serranos) y que no presenta rugosidades de gran escala que podrían afectar la hidrodinámica del flujo. La confluencia se localiza a 10 km al este de la localidad de Monte Buey, al sur-este de la provincia de Córdoba, Argentina y a partir de la confluencia de estos dos ríos se forma el Río Carcarañá. En esta zona ambos ríos son de baja pendiente, presentando características de ríos de llanura. Otra característica importante para la selección de este sitio que permite evaluar la hidrodinámica para diferentes condiciones de flujo es que los tributarios presentan una relación de caudales muy variables a lo largo del año ya que uno de los tributarios (Río Tercero) se encuentra regulado con una serie de embalses en su cuenca alta, mientras que el otro tributario no se encuentra regulado. Así en épocas de lluvias el Río Saladillo es dominante mientras que en el estiaje el tributario dominante es el río Tercero. En este trabajo se presentan la caracterización realizada para dos condiciones hidrológicas en la cual el flujo dominante proviene de la cuenca del Río Tercero.

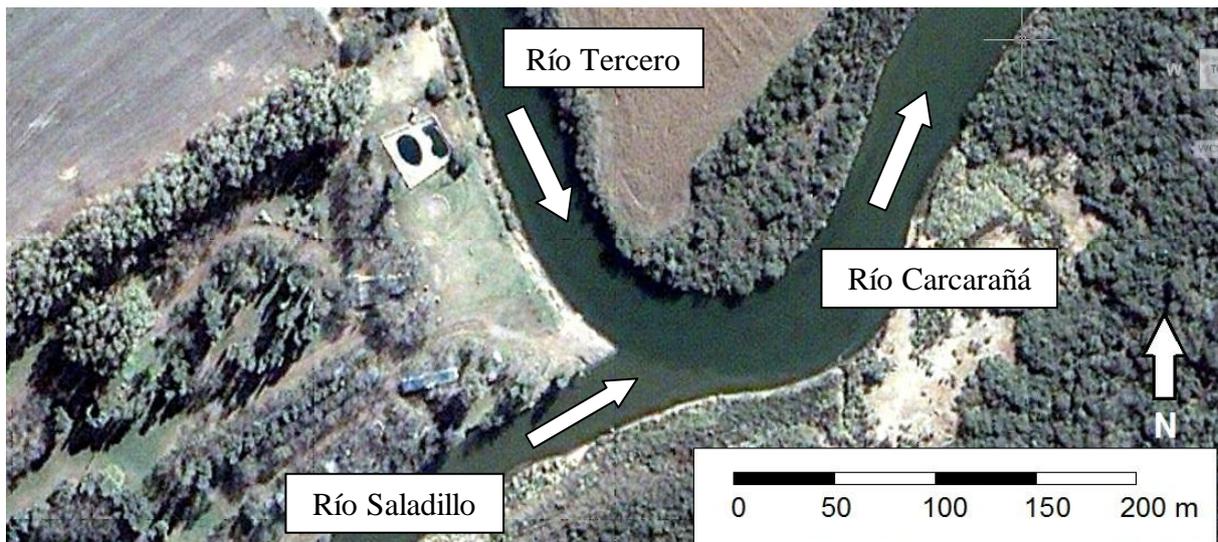


Figura1.- Confluencia de los ríos Tercero y Saladillo

Se utilizaron técnicas de velocimetría y visualización del flujo, y determinación de la conductividad eléctrica y temperatura del fluido. Para medir los parámetros hidráulicos globales de los tributarios (caudal, área, velocidad y profundidad media de flujo), se realizaron cuatro cruces (o transectas) en las dos secciones ubicadas aguas arriba de la confluencia sobre los tributarios (Secciones “T” y “S” en la Figura 2) utilizando un perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP) modelo River Surveyor S5 fabricado por Sontek/YSI. Este instrumento presenta características óptimas para este estudio ya que fue desarrollado para aguas poco profundas (profundidades de flujo menores o iguales a 5m). Los parámetros hidráulicos globales de cada sección se calcularon como el promedio de los valores obtenidos en las cuatro transectas o cruces. Este mismo perfilador se utilizó para determinar experimentalmente la batimetría a través de una medición continua de profundidades a lo largo

de una trayectoria zigzagueante que abarcó gran parte del área de interés, incluyendo las zonas aguas arriba y aguas abajo de la confluencia. Luego, los valores medidos de profundidad fueron interpolados en una grilla que abarcó la zona de estudio.

Para determinar la pendiente de la superficie libre en tramos de los flujos convergentes (Ríos Tercero y Saladillo) y en un tramo aguas abajo de la confluencia (Río Carcarañá) se realizaron perfiles longitudinales en la línea central de los cursos de agua (ver líneas continuas roja y verde en Figura 2) con una embarcación en la cual se encuentra instalado un sistema de posicionamiento global en forma diferencial (DGPS) con precisiones en la ubicación horizontal de ± 2 cm y en la vertical del orden de 1mm a una frecuencia de registro de aproximadamente 1 Hz. El sistema DGPS se referenció a una estación base (sistema RTK) ubicada en la costa.

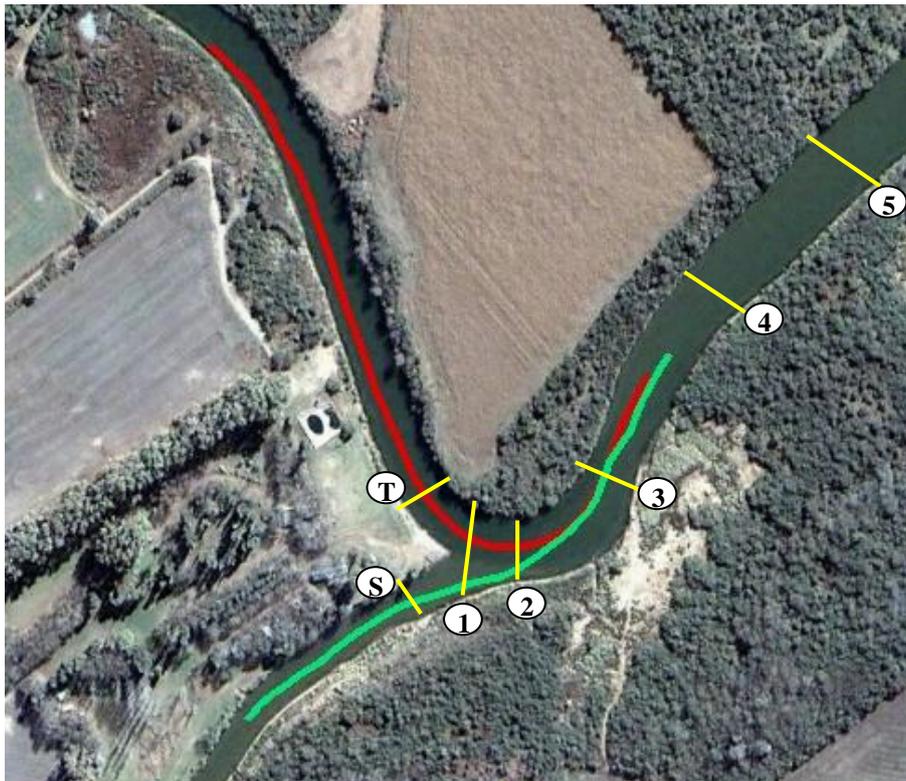


Figura 2 Trayectorias longitudinales en la línea central de los ríos donde se midió la elevación del pelo libre; secciones donde se midieron caudales, y secciones donde se registraron perfiles de temperatura y conductividad.

Además, se implementó un método de visualización para caracterizar las dimensiones de la zona de estancamiento y la evolución temporal de las capas de corte asociadas. Para ello se utilizó como trazadores fluoresceína y caolinita, los cuales fueron inyectados de manera simultánea en cada tributario inmediatamente aguas arriba de la confluencia, registrando videos con una cámara digital convencional. La colocación previa de una grilla flotante, con dimensiones conocidas, permite luego en la etapa de procesamiento rectificar las imágenes para lograr una vista ortonormal de los trazadores.

Finalmente, perfiles verticales de temperatura y conductividad eléctrica (corregida por temperatura) del agua, se midieron en distintas localizaciones emplazadas en las dos secciones aguas arriba de la confluencia en cada tributario y en 5 secciones aguas localizadas abajo de la confluencia con una sonda YSI/Castaway CTD y con una sonda multiparamétrica Horiba U-10.

RESULTADOS

En la Tabla 1 se muestran los parámetros hidráulicos globales de los tributarios para dos condiciones de flujo analizadas en este estudio. Se incluye en esta tabla un parámetro adimensional complementario que relaciona los momentos de los flujos convergentes, que se obtiene según la siguiente expresión:

$$M_R = \frac{(\rho \times Q \times U)_{MAYOR}}{(\rho \times Q \times U)_{MENOR}} \quad [1]$$

Para las dos condiciones analizadas, el flujo de aproximación con mayor momento proviene del Río Tercero.

Tabla 1.- Parámetros hidráulicos de los tributarios durante las mediciones. Los subíndices T y S indican valores correspondientes a los Ríos Tercero y Saladillo, respectivamente.

Parámetro	Unidad	Condición 1	Condición 2
Caudal: Q_T	[m ³ /seg]	26.9	19.9
Q_S	[m ³ /seg]	17.7	10.5
Profundidad media: H_T	[m]	1.17	0.90
H_S	[m]	1.55	1.30
Ancho: B_T	[m]	40.5	40.0
B_S	[m]	33.5	33.0
Relación de momentos	Adim	2.5	4.0

La Figura 3 muestra la batimetría de la zona de estudio relevada durante la condición 2, obtenida a partir de la interpolación de datos de profundidad del flujo medidos con ADCP. No se observan hoyas de erosión en el tramo de aproximación del río Tercero y en la zona de mezcla. Sin embargo, en la margen interna del río Saladillo, se observaron hoyas con profundidades significativas comparadas con la profundidad media del flujo.

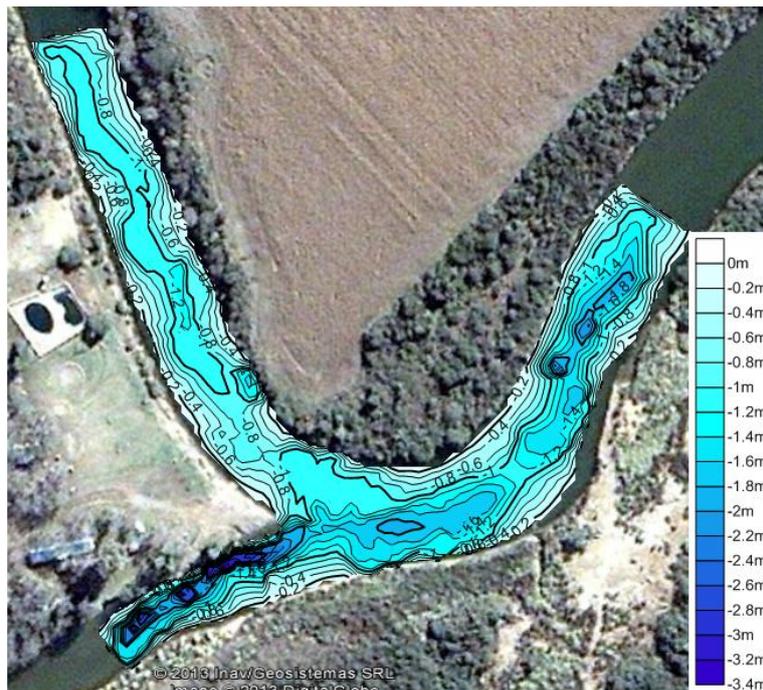


Figura3.- Batimetría de la zona de estudio para la condición 2, medida con ADCP

En las Figuras 4 y 5 se muestran, para las dos condiciones experimentales, las batimetrías y los campos de velocidades de flujo observadas en dos secciones transversales localizadas en cada uno de los tributarios inmediatamente aguas arriba de la confluencia, identificando así la localización de las zonas de máxima velocidad que afectan la posición de la capa de corte aguas abajo de la confluencia. Las velocidades de flujo más pequeñas están presentes en cercanías a la margen interna de los flujos convergentes.

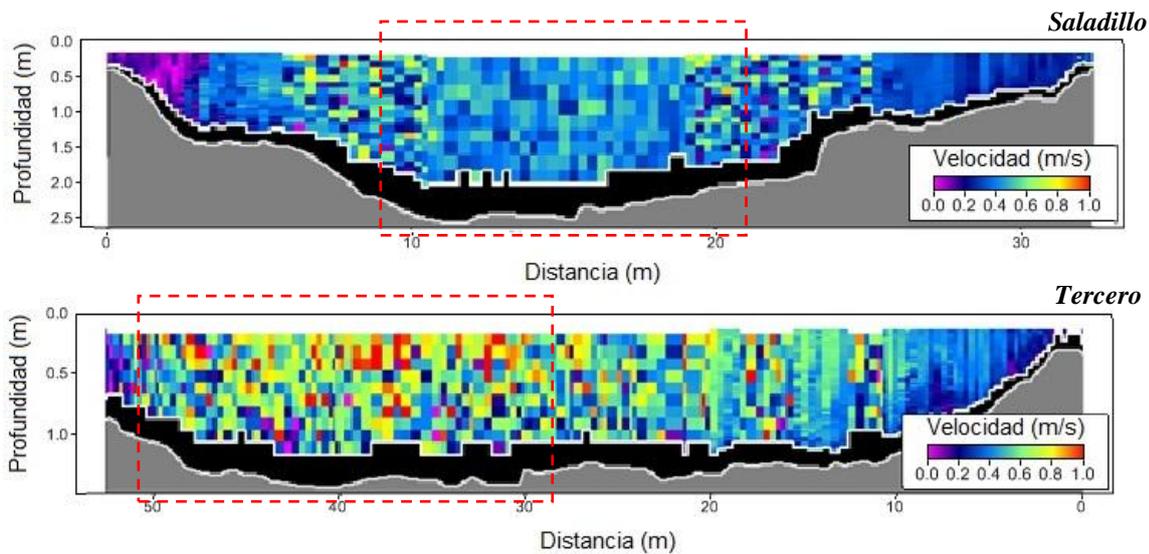


Figura 4.- Magnitud de velocidades de flujo en cada tributario. Distancias desde margen derecha e izquierda, respectivamente para la condición experimental 1.

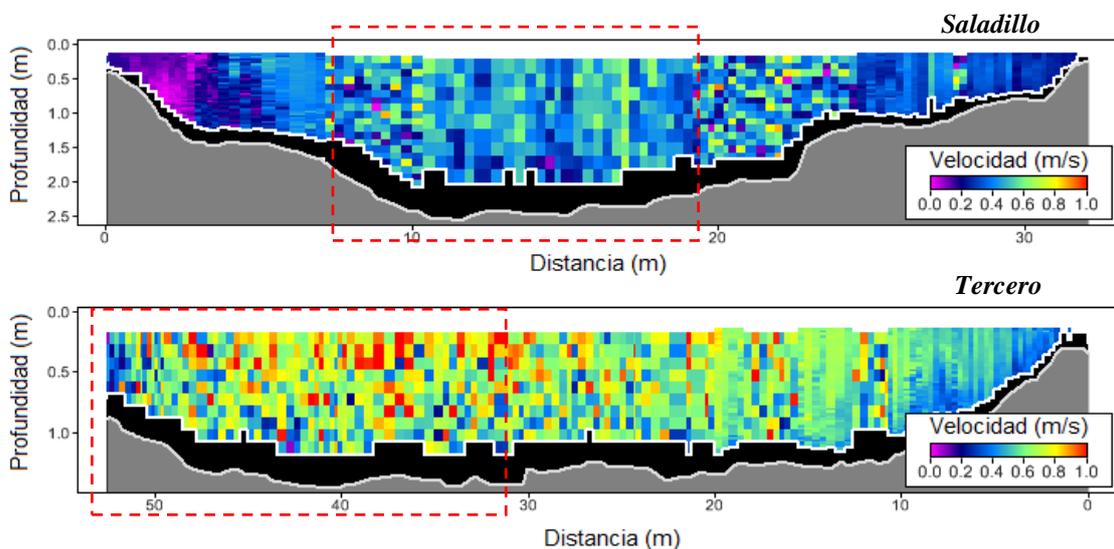


Figura 5.- Magnitud de velocidades de flujo en cada tributario. Distancias desde margen derecha e izquierda, respectivamente para la condición experimental 2.

La Figura 6 muestra la evolución de los valores de elevación de la superficie libre (y su pendiente asociada) en la línea central de los flujos convergentes (Ríos Tercero y Saladillo) y en un tramo aguas abajo de la confluencia (Río Carcarañá) para la condición experimental 2

(Figura 2). Como consecuencia de la relación de momentos de los tributarios (ver Tabla 1) se genera un efecto de remanso significativo hacia aguas arriba para el tributario de menor momento (río Saladillo). Se observa una pendiente uniforme en el curso de mayor momento. Se puede observar en la Figura 6 que la pendiente del río Tercero es del 0.18 ‰ ($r^2=0.96$) y se mantiene constante aguas abajo de la confluencia.

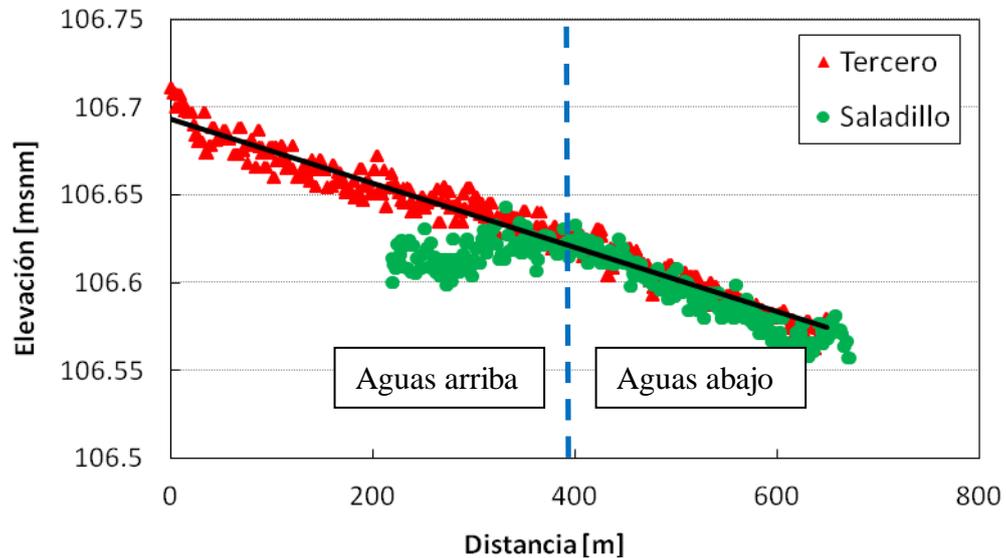


Figura 6: Evolución de los valores de elevación de la superficie libre (y su pendiente asociada) en la línea central de los flujos convergentes (Ríos Tercero - rojo y Saladillo - verde) y en un tramo aguas abajo de la confluencia (Río Carcarañá) para la condición experimental 2.

Mediante la visualización del flujo con trazador (Figura 7 y 8) para la condiciones 1 y 2 respectivamente, se observó una zona de estancamiento y a cada lado la presencia de dos capas de corte donde se observaron estructuras coherentes bidimensionales con sentidos de rotación opuestos. Aguas abajo estas capas interactúan formando una única capa de corte.

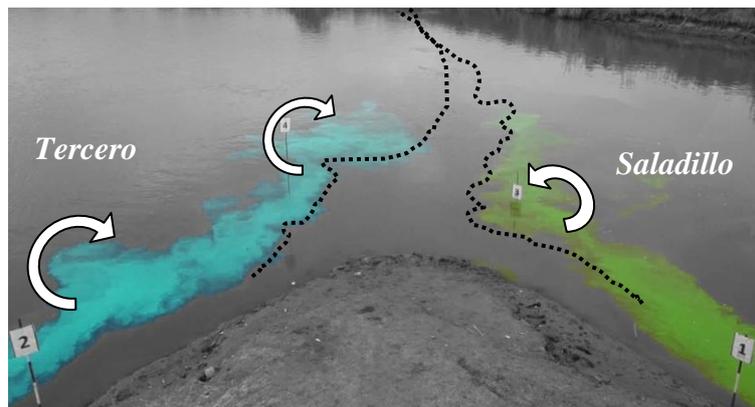


Figura 7: Visualización de la zona de estancamiento para la condición experimental 1.



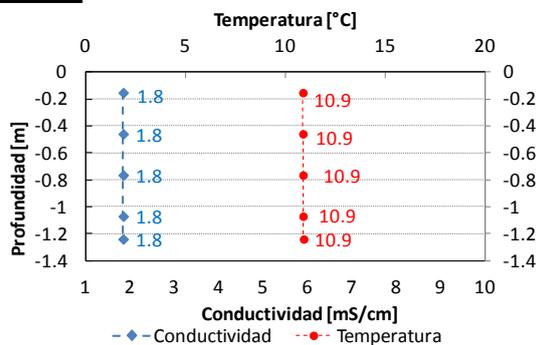
Figura 8: Visualización de la zona de estancamiento para la condición experimental 2.

La presencia de una zona de estancamiento delimitada por dos capas de corte donde se observan estructuras coherentes bidimensionales con sentidos de rotación opuestos es análogo a lo que ocurre en el caso de un flujo detrás de un obstáculo, analogía que ya ha sido estudiada y observada en instalaciones de laboratorio, simulaciones numéricas y estudios de campo de pequeña escala.

Finalmente se cuantifican los procesos de mezcla presentes en la confluencia. Para ello se evaluó la evolución espacial de un escalar que en este estudio es la conductividad eléctrica del fluido. El río Saladillo, presenta mayor densidad que el río Tercero debido al contenido de sal presente en los flujos de este tributario (Barchiesi et. al, 2013). La presencia de flujos de diferente densidad genera una mayor complejidad en los patrones hidrodinámicos y de mezcla no reportados en estudios previos donde se evaluó la conveniencia del uso de un modelo conceptual específico para confluencias fluviales basado en la analogía con la interfase de mezcla generada aguas abajo del flujo alrededor de un obstáculo.

Los valores de temperatura del agua y conductividad, corregida por la temperatura del agua, registrados con las sondas CTD y Horiba en los flujos de aproximación de los río Tercero y Saladillo (ver localización en Figura 2) fueron de 1.8 mS/cm 7.7 mS/cm, respectivamente (ver Figura 9). La conductividad del río Saladillo es más de cuatro veces mayor que la conductividad del río Tercero.

Tercero



Saladillo

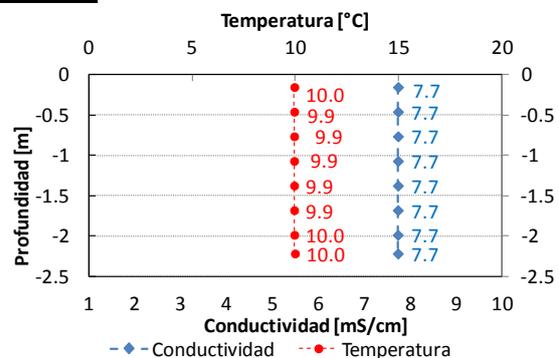


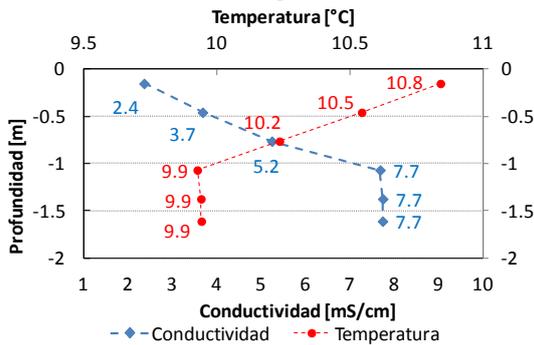
Figura 9: Perfiles verticales de conductividad y temperatura del fluido en las localizaciones (T) y (S) de los tributarios (Tercero y Saladillo) indicados en la Figura 2.

Para determinar la longitud en que se alcanza la mezcla completa de los flujos de los tributarios

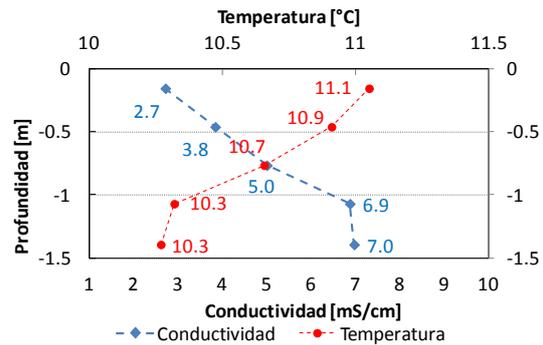
en la dirección transversal aguas abajo de la confluencia se realizaron mediciones de perfiles de conductividad del fluido corregida por temperatura en las localizaciones mostradas en la Figura 2, cuyos resultados se muestran en la Figura 10.

En la Figura 10 se observa claramente la intrusión del flujo proveniente del Rio Saladillo por debajo del flujo proveniente del Rio Tercero. En las figuras se observa la evolución del proceso de mezcla desde los valores de conductividad registrados aguas arriba en cada tributario hasta los puntos 7 y 8 en los cuales los valores de conductividad se uniformizan nuevamente, con un valor entre 3.3 y 3.7 mS/cm, a una distancia de aproximadamente 450 m aguas abajo de la confluencia, que por lo tanto es la longitud en la que se produce la mezcla completa por efecto de los procesos mencionados anteriormente.

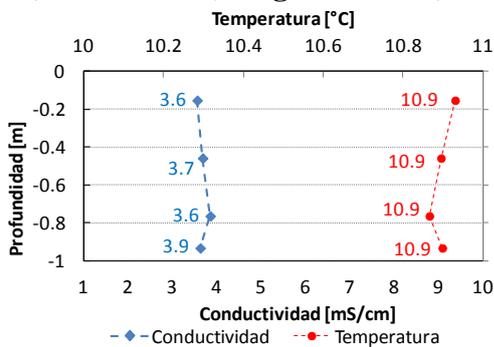
a) Sección 1 (margen derecha)



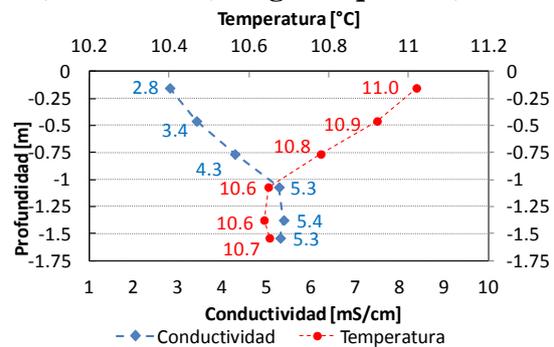
b) Sección 2 (margen derecha)



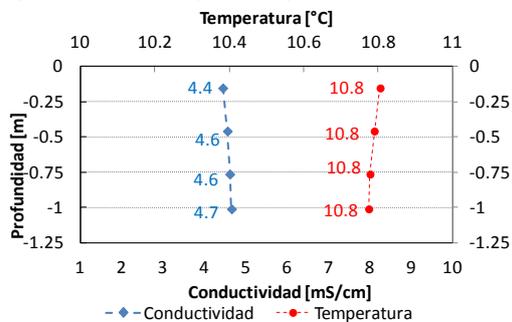
c) Sección 3 (margen derecha)



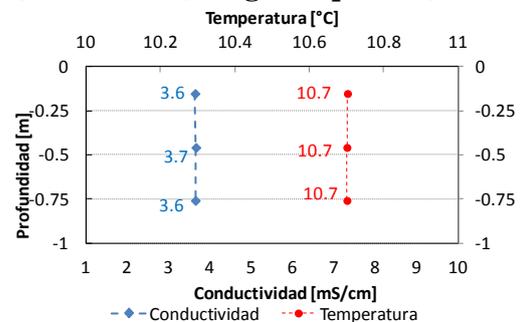
d) Sección 3 (margen izquierda)



e) Sección 4 (centro)



f) Sección 4 (margen izquierda)



g) Sección 5 (margen derecha)

h) Sección 5 (centro)

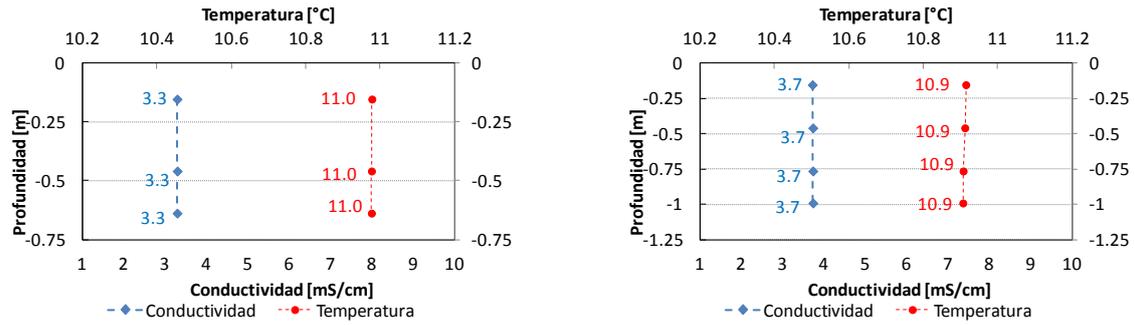


Figura 10: Perfiles verticales de conductividad y temperatura en distintas localizaciones aguas abajo de la confluencia (ver localizaciones en Figura 2).

Se observa en los dos perfiles de la sección 5 que los valores de conductividad y temperatura son uniformes en la vertical y además aproximadamente iguales en las dos posiciones en la dirección transversal, por lo tanto se asume que en esta progresiva (ubicada aproximadamente a 450 metros aguas abajo del vértice de la confluencia) se ha alcanzado la mezcla completa.

La longitud de mezcla necesaria para alcanzar una desviación máxima del 5% en el valor de la concentración de un escalar (temperatura, conductividad) se determina según Fischer et. al (1979) como:

$$L = 0.3 \frac{\bar{u} \cdot W^2}{\varepsilon_t} \quad [2]$$

Donde \bar{u} y W es la velocidad media y ancho del río aguas abajo de la confluencia, respectivamente. El coeficiente de mezcla transversal ε_t se calcula según Fischer et. al (1979) como:

$$\varepsilon_t = 25 \frac{\bar{u}^2 \cdot d^3}{R^2 \cdot u^*} \quad [3]$$

Donde d es la profundidad media aguas abajo de la confluencia, R es el radio de curvatura de la confluencia (ver Figura 11) y u^* es la velocidad de corte ($u^* = \sqrt{g \cdot d \cdot S}$).

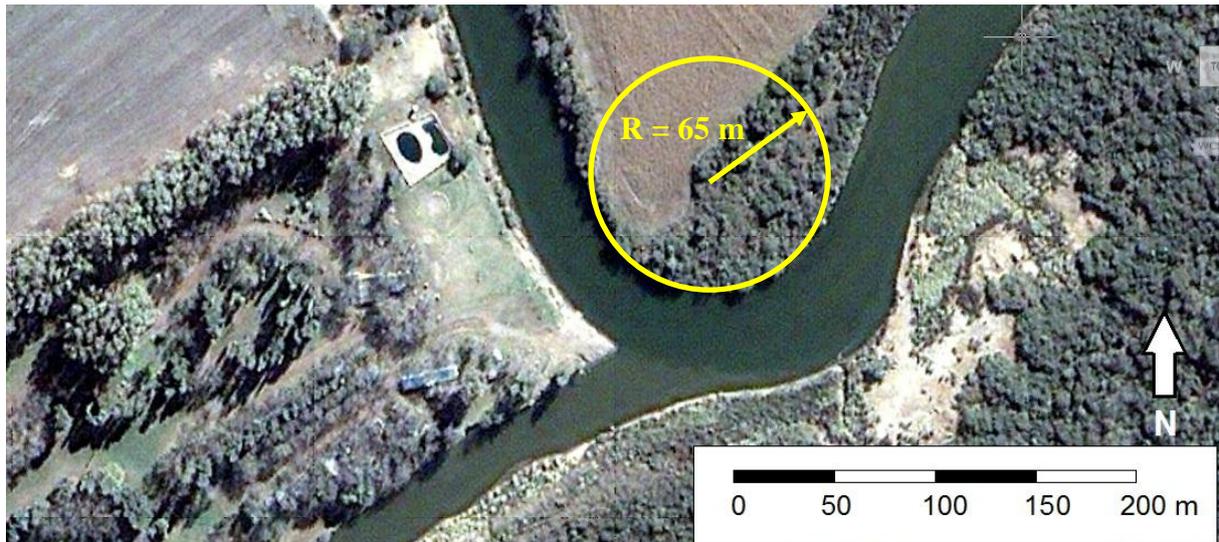


Figura 11: Esquema que representa el radio de curvatura seleccionado para la estimación de coeficiente de mezcla transversal ε_t

En la Tabla 2 se resumen los valores de todos los parámetros utilizados para determinar la longitud de mezcla basados en las observaciones realizadas en la sección transversal donde se encuentran los puntos 7 y 8 (ver Figura 11).

Tabla 2.- Parámetros hidráulicos medidos aguas abajo de la confluencia para la determinación de la longitud de mezcla teórica.

R	Radio de curvatura	[m]	65
\bar{u}	Velocidad media aguas abajo	[m/s]	0.55
d	Profundidad media aguas abajo	[m]	1.1
W	Ancho	[m]	49
S	Pendiente		0.00018
g	Gravedad	[m/s ²]	9.81
u^*	velocidad de corte	[m/s]	0.044
ε_t	Coeficiente de mezcla transversal	[m ² /s]	0.055
L	Long de mezcla	[m]	7278

La longitud necesaria para alcanzar la mezcla completa estimada utilizando las ecuaciones 2 y 3 es un orden de magnitud mayor a la observada. Esto se debe a que las ecuaciones propuestas por Fischer et. al (1979) se asume flujo uniforme con velocidades constantes en todo el dominio y mezcla completa en la vertical. Esta última hipótesis no se cumple aguas debajo de la confluencia debido que el río Saladillo por su mayor densidad escurre por debajo del río Tercero y se produce en primer lugar una mezcla vertical (con tiempos característicos mucho menores a la mezcla transversal), y por lo tanto la mezcla a lo largo de la dirección transversal se alcanza en una longitud menor a la teórica.

CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó una evaluación experimental en campo de la hidrodinámica y los procesos de mezcla de una confluencia fluvial de mediana escala, para dos condiciones

hidrológicas diferentes (relación de momento 2.5 y 4). Para las condiciones de flujo analizadas se observó la presencia de una zona de estancamiento en la cual se produce la recirculación del fluido y que está limitada en cada lado por capas de corte con estructuras coherentes bidimensionales con sentidos de rotación opuestos y características similares al caso de estela turbulenta generada aguas abajo de un obstáculo sumergido observadas en instalaciones experimentales de laboratorio o modelación numérica. Aguas debajo de esta zona de estancamiento, estas capas interactúan formando una única capa de corte. Se relevó la posición de esta capa de corte y se la asoció a las zonas de máxima velocidad medidas con ADCP en los tributarios. Se verificó que el tributario dominante es el río Tercero mediante la medición de la elevación del pelo libre del flujo, observándose que aguas abajo se mantiene la pendiente de este tributario del 0.18 ‰, mientras que en el río Saladillo se observa una curva de remanso aguas arriba de la capa de corte. Los procesos observados, sumados a la intrusión del flujo del Río Saladillo por debajo del flujo proveniente del Río Tercero afectan los patrones de mezcla aguas abajo de la confluencia hasta una distancia de 450 metros en la cual se determinó experimentalmente que se alcanza la mezcla completa en la dirección transversal.

Agradecimiento. A la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba por facilitar el traslado al lugar de medición. Al concesionario del camping La Boca de Monte Buey por brindar sus instalaciones. Al personal no docente de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral por el apoyo logístico durante las mediciones y a ELIOVAC por facilitar a los autores la sonda multiparamétrica CTD para poder realizar las mediciones de temperatura y conductividad.

REFERENCIAS

Barchiesi, G.; Díaz Lozada, J.M.; Caminal, F.; García, C.M.; Cossavella, A.; Castelló, E.; Rpmagnoli, M. y Portapila, M. (2013) **Miyawaki, S.; Rhoads, B.; Sukhodolov, A. y Kirkil, G.** (2011). “Cuantificación y caracterización del escurrimiento en la cuenca del Río Carcarañá. *VI Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Santa Fe, Argentina.*

Constantinescu, G.; Miyawaki, S.; Rhoads, B. y Sukhodolov, A. (2012). “Numerical analysis of the effect of momentum ratio on the dynamics and sediment-entrainment capacity of coherent flow structures at a stream confluence”. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* (2003–2012), 117, F04028.

Fischer, H.; List, E.J.; Koh, R.; Imberger, J. y Brooks, N. (1979). “Mixing in inland and coastal waters”. *Academic Press, San Diego, California.* ISBN 0-12-258150-4

Herrero, H.; García, C.; López, G. y 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.*

Rhoads, B.L. y Sukhodolov, A.N. (2004). “Spatial and temporal structure of shear-layer turbulence at a stream confluence”. *Water Resources Research*, 40, W06304, doi: 10.1029/2003WR002811.

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.