

# CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS PATRONES HIDRODINÁMICOS Y DE MEZCLA EN LA CONFLUENCIA DE DOS RÍOS DE DISTINTA DENSIDAD

Horacio Herrero<sup>1</sup>, Carlos M. García<sup>1</sup>, Antoine Patalano<sup>1</sup>, Ricardo Szupiany<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. Av Filloy s/n, Ciudad Universitaria, CP 5000, Córdoba, Argentina, email: [hsherrero@yahoo.com.ar](mailto:hsherrero@yahoo.com.ar)

<sup>2</sup> Facultad 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.

## Introducción

La caracterización del flujo en confluencias es uno de los aspectos de la hidrodinámica fluvial que ha generado gran interés por parte de la comunidad científica y un aspecto de importancia es la caracterización experimental de los patrones hidrodinámicos y de mezcla de los dos flujos convergentes. Existen en la bibliografía antecedentes de estudios en confluencias en los cuales se determina la longitud de mezcla completa en la dirección transversal a partir de valores globales de parámetros hidráulicos, asumiendo hipótesis como flujo uniforme, igual densidad de los flujos convergentes, entre otras (Fischer, 1979). En el caso que los flujos convergentes presentan distintas densidades, estas hipótesis dejan de ser válidas y los patrones de mezcla estimados a partir de las formulaciones clásicas serán diferentes a los reales.

En la actualidad, existen modernos instrumentos y técnicas de medición y visualización con los cuales es posible realizar una correcta caracterización experimental in-situ de la hidrodinámica y los patrones de mezcla en flujos complejos como es el caso de confluencias fluviales a escala natural y con diferencia de densidad de los flujos convergentes.

## Objetivos

En este trabajo se presenta la aplicación de modernas técnicas experimentales para caracterizar in-situ la hidrodinámica y los patrones de mezcla en una confluencia fluvial con tributarios de distinta densidad.

## Materiales y Métodos

Se ha seleccionado la confluencia de los ríos Tercero (Ctalamochita) y Saladillo 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.

Para medir los parámetros hidráulicos globales de los tributarios (caudal, área, velocidad y profundidad media de flujo y batimetría) se utilizó 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.

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 un vehículo aéreo no tripulado (comúnmente conocido como *drone*) que cuenta con una cámara de alta resolución y desde el cual se registraron fotografías y videos, utilizando como trazador el propio río, debido a que las diferentes concentraciones de sedimentos en suspensión le dan a los tributarios distintos colores.

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.

## Resultados

En la Figura 1 se muestran las batimetrías y los campos de velocidades de flujo registrados en cada uno de los tributarios, 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.

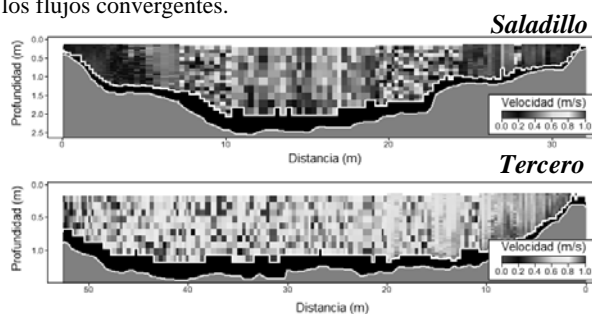


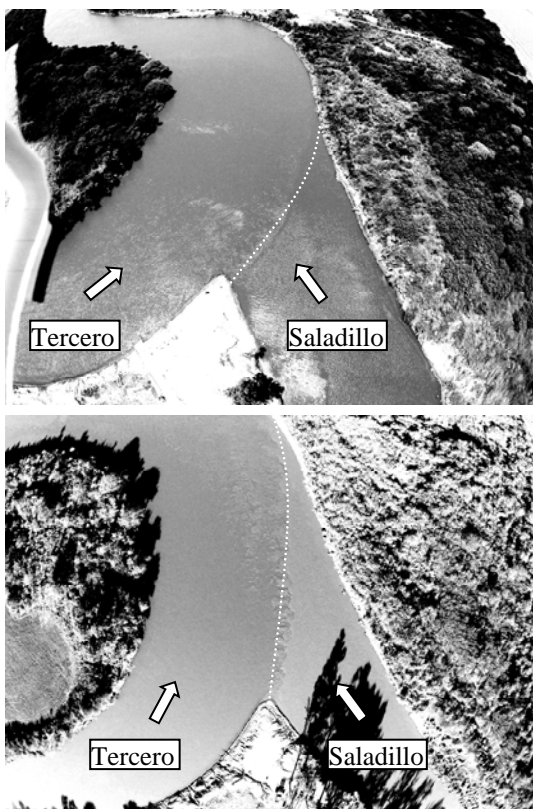
Figura 1: Magnitud de velocidades de flujo en cada tributario. Distancias desde margen derecha e izquierda.

Para esta condición hidrológica, los parámetros hidráulicos se resumen en la Tabla 1.

**Tabla 1:** Condición hidrológica y parámetros hidráulicos.

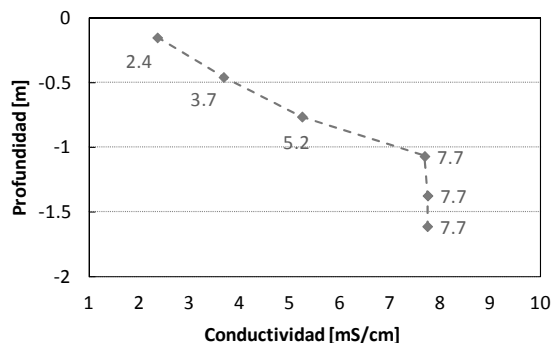
	Tercero	Saladillo
Caudal [m <sup>3</sup> /s]	20	10.5
Ancho [m]	40	33
Prof. Media [m]	0.9	1.3
Conductividad [mS/cm]	1.8	7.7
Relación de momentos $M_R = \frac{\rho QV(\text{Tercero})}{\rho QV(\text{Saladillo})}$	4	

En la Figura 2 se observa una imagen registrada desde un drone de la zona de mezcla para una condición hidrológica similar a la de la Tabla 1; y en la Figura 3 se muestra la misma capa de corte para una condición correspondiente a un caudal de 25 m<sup>3</sup>/s en el río Tercero y 18.7 m<sup>3</sup>/s en el río Saladillo, con una relación de momentos de 1.8.

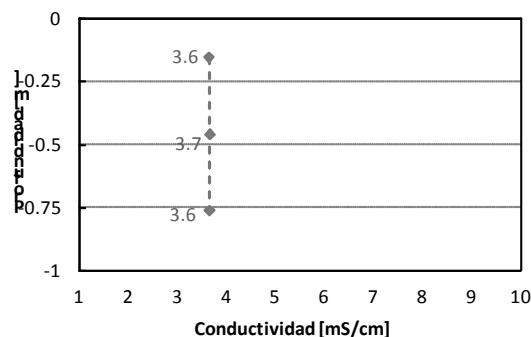


**Figura 2:** Vista aérea de la zona de la capa de corte. 09/09

Se observa que en ambos casos una capa de corte que nace en el ápice de la confluencia y finaliza en la margen derecha del río Carcarañá, permitiendo el paso del flujo proveniente del río Tercero, y actuando como una barrera al flujo proveniente del río Saladillo. Esto ocurre debido a que, por la diferencia de densidades entre los dos flujos tributarios, el flujo de mayor densidad (río Saladillo) avanza por debajo del flujo de menor densidad (río Tercero). La evolución de la mezcla de estos dos flujos de distinta densidad se resume en la Figuras 3 y 4, para la condición hidrológica presentada en la Tabla 1 y Figura 2, a partir de la medición de perfiles de conductividad en distintas progresivas dentro de la zona de mezcla.



**Figura 3:** Perfil de conductividad medido a 200 m aguas abajo de la confluencia.



**Figura 4:** Perfil de conductividad medido a 450 m aguas abajo de la confluencia.

La Figura 3 corresponde a un perfil de conductividad medido a una distancia de 200 metros aguas abajo de la confluencia. Se observa la formación de una “cuña” debido a que el flujo de mayor densidad avanza por debajo del flujo de menor densidad. De aquí se puede afirmar que primer lugar se desarrolla una mezcla en la dirección vertical, que se alcanza de manera completa tanto en la dirección vertical como transversal) a una distancia de 450 m aguas abajo de la confluencia (Figura 4), distancia que es un orden de magnitud menor a la obtenida mediante fórmulas convencionales (Fischer, 1979).

### Conclusiones

En este trabajo caracterizaron experimentalmente patrones hidrodinámicos y de mezcla en una confluencia de dos ríos de distinta densidad. Los resultados muestran la formación de una capa de corte que varía su posición para diferentes condiciones hidrológicas, pero en todos los casos actúa como un obstáculo para el tributario de menor densidad. En la zona de mezcla se produce en primera instancia una mezcla en la dirección vertical, logrando disminuir la longitud de mezcla completa si se compara con formulaciones clásicas que no tienen en cuenta la diferencia de densidad.

### Referencias

**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