



Sexto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos

Santa Fe, Argentina. 6 al 8 de noviembre 2013

EVALUACIÓN DEL COEFICIENTE DE DISPERSIÓN LONGITUDINAL EN RÍOS UTILIZANDO ADCP

Federico Caminal¹, Gustavo Matías Barchiesi¹, José Manuel Díaz Lozada¹, Horacio Herrero¹, Marcos Lenarduzzi¹, C. Marcelo García¹, Florencia Nadal³, Ana Cossavella^{2,4}

1 - Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba.

AvFilloy s/n, Ciudad Universitaria, CP 5000, Córdoba, Argentina

2 - Área Preservación y Control del Recurso de la Secretaría de Recursos Hídricos del Gobierno de la Provincia de Córdoba, CP 5000, Córdoba, Argentina

3 - Área de Limnología y Calidad de Agua, CIRSA, Instituto Nacional del Agua, Avenida Ambrosio Olmos 1142, CP 5000, Córdoba, Argentina

4 - Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. AvFilloy s/n, Ciudad Universitaria, CP 5000, Córdoba, Argentina

E-mail: fedecaminal@gmail.com

RESUMEN

El Río Tercero es uno de los ríos más importantes de la provincia de Córdoba debido a su elevado caudal relativo (comparado con otros ríos de la región) que lo convierte en una potencial fuente de agua para consumo. Para asegurar la calidad de este recurso se realiza la caracterización de la hidrodinámica de este río con fines ambientales y uno de los aspectos más importantes a analizar es la evaluación de la capacidad de mezcla del mismo, a través de la determinación de los coeficientes de dispersión (vertical, transversal y longitudinal). Este trabajo se determina experimentalmente el coeficiente de dispersión longitudinal de un tramo del Río Tercero en base a mediciones de velocidad con perfiladores de corriente acústicos Doppler - ADCP, utilizando dos tipos de información hidráulica del tramo estudiado: en primer lugar sólo se utilizan las variables hidráulicas globales del río obtenidas del muestreo realizado con ADCP (por ejemplo velocidades y profundidades medias) y en segundo lugar se tuvo en cuenta además la distribución transversal de las velocidades y de la geometría de la sección. Las mediciones se realizaron en el Río Tercero, más precisamente en el balneario de la localidad homónima, debido a que se localiza aguas abajo de un polo industrial. Finalmente se contrastan los resultados obtenidos con ambas metodologías y se las compara con resultados estimados utilizando ábacos empíricos disponibles construidos con información de ríos con características similares al analizado en este trabajo.

ABSTRACT

The Tercero River is one of the most important rivers in the of Cordoba province due to its high relative flow discharge (compared to other rivers in the region) that makes it a potential source of drinking water. Ensuring the quality of this water resource, a hydrodynamics characterization of this river is performed for environmental purposes and one of the most important studied aspects is the quantification of the river mixing processes through the determination of dispersion coefficients (vertical, transverse and longitudinal). This work presents experimental determinations of the longitudinal dispersion coefficient of a Tercero river reach based on velocity measurements performed using acoustic Doppler current profilers - ADCP, using two different methods. These methods used two different types of hydraulic information: first, only bulk hydraulic variables were used obtained from ADCP measurements (i.e. average flow depth and velocity) and then the transverse distribution of both flow velocities and bathymetry were used. The ADCP measurements were performed at the Tercero river, more precisely in the swimming areas downstream of an industrial park. Finally, the results obtained with both methods are compared and contrasted with results estimated using empirical plots available in the literature built using information recorded from similar rivers as analyzed in this work.

INTRODUCCIÓN

El río Tercero (Ctalamochita) se localiza en la Provincia de Córdoba, Argentina. Este río, por su caudal, es uno de los ríos más importantes de la región, por lo que es necesario asegurar la calidad de este recurso como fuente de agua para consumo de las poblaciones que actualmente abastece, considerando además al mismo como fuente potencial de agua para otras poblaciones en el futuro. En su primer tramo aguas abajo del embalse Piedras Moras, en la ciudad de Río Tercero, se ubica un polo industrial, constituyendo éste un punto de riesgo para el río, por lo que es importante realizar un seguimiento detallado del recurso con un enfoque integral, con el objetivo de detectar cambios tanto hidrodinámicos como ambientales para elaborar un plan de acción a implementar en la cuenca de aporte. En este aspecto la Secretaría de Recursos Hídricos del Gobierno de la Provincia de Córdoba, y la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba (FCEFN – UNC) vienen realizando desde hace un tiempo y en forma periódica monitoreos de calidad de agua y aforos mediante métodos convencionales, como por ejemplo aforo por vadeo con molinetes.

En la actualidad se ha agregado al instrumental utilizado para los aforos un Perfilador de Corriente Acústica Doppler (ADCP), que permiten mejorar los muestreos obtenidos con técnicas convencionales, logrando mayor resolución espacial y temporal de las velocidades del flujo, como así también mayor precisión en el relevamiento de la morfología del cauce. Esta información disponible puede ser utilizada en forma complementaria para lograr una comprensión más acabada de mecanismos físicos presentes en el tramo del río analizado. Uno de los procesos que pueden ser estudiados con mayor detalle es la dispersión de contaminantes en ese tramo. Para simular este proceso, la mayoría de los modelos de mezcla requiere un coeficiente de dispersión longitudinal que depende de características geométricas y de flujo. Este coeficiente de dispersión ha sido generalmente estimado con fórmulas empíricas (utilizando variables globales de flujo) o con estudios de trazadores. Los estudios de trazadores, considerados más precisos, requiere una gran inversión en planificación, personal y análisis posterior (Carr y Rehmann, 2007). En este trabajo se evalúan las bondades de las ecuaciones empíricas estimando coeficientes de dispersión longitudinal en cursos fluviales con las características del Río Tercero (Ctalamochita) y se sugieren mejoras a estos estimadores con información espacio-temporal adicional obtenida con ADCP.

OBJETIVOS

El objetivo perseguido en este trabajo es la estimación experimental indirecta del coeficiente de dispersión longitudinal en un tramo del Río Tercero (Ctalamochita) en base a mediciones de velocidad con perfiladores de corriente acústicos Doppler - ADCP, utilizando dos tipos de información hidráulica del tramo estudiado: en primer lugar sólo se utilizan las variables hidráulicas globales del río obtenidas del muestreo realizado con ADCP (por ejemplo velocidades y profundidades medias) y en segundo lugar se tiene en cuenta además la distribución transversal de las velocidades y de la geometría de la sección.

MARCO TEÓRICO

Al ser descargado un contaminante en el río, al principio el mismo viaja de acuerdo a la velocidad que lleva el curso de agua, manteniéndose dentro de ciertas fronteras imaginarias; a este fenómeno se lo denomina advección. A medida que va avanzando a lo largo de la trayectoria, el movimiento no es en conjunto, sino que las partículas del contaminante comienzan a dispersarse debido a los mecanismos de mezcla presentes en el río; este último fenómeno es lo que se conoce como dispersión (ver Figura 1).

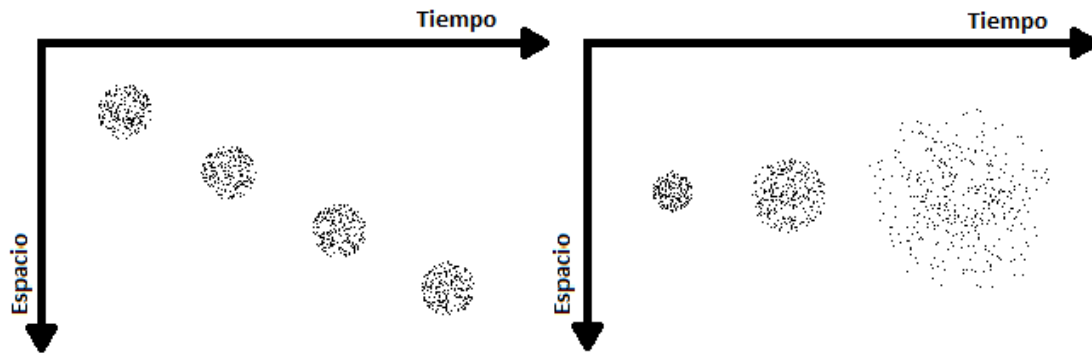


Figura 1.- Fenómenos de mezcla en ríos. A la izquierda, advección; a la derecha, dispersión.

Las posibles direcciones de mezcla en un río son tres: vertical, transversal, y longitudinal. Es para cada una de ellas que puede evaluarse un coeficiente de dispersión, pero sucede que los contaminantes llegan a mezclarse en toda la sección rápidamente (vertical y transversalmente) pero perduran por grandes longitudes, entonces el parámetro que se utilizará para la evaluación de la calidad del agua será este último parámetro, el del Coeficiente de Dispersión Longitudinal, denominado D . Para el cálculo del coeficiente de dispersión longitudinal D se utilizó la ecuación simplificada de Fischer (1979) [ec. (1)], cuyo coeficiente 0,011 es resultado de un ajuste a partir de la ecuación general, de tal forma de poder tener en cuenta los fenómenos de corrientes secundarias y turbulentas que se dan en los ríos.

$$D = 0,011 \cdot \frac{U^2 \cdot B^2}{H \cdot u^*} \quad (1)$$

Donde U es la velocidad media del flujo en la sección, B es el ancho del río, H es la profundidad media del flujo, y u^* es la velocidad de corte calculada mediante la ec. (2)

$$u^* = (g \cdot R_h \cdot S_o)^{0,5} \quad (2)$$

Donde g es la aceleración de la gravedad, R_h es el radio hidráulico de la sección (área/perímetro mojado), y S_o la pendiente de la línea de energía del tramo de río.

Las ecuaciones mostradas anteriormente involucran variables hidráulicas globales que son las que están frecuentemente disponibles aunque estas variables globales no representan completamente los procesos de mezcla responsables de la dispersión longitudinal (distribución lateral de velocidades longitudinales). Es por ello que se puede obtener una mejor estimación del coeficiente de mezcla longitudinal mediante la ecuación integral propuesta por Fisher (1979) [ec. (3)]:

$$D = -\frac{1}{A} \int_0^B u'(y)h(y) \int_0^y \frac{1}{\varepsilon_t h(y)} \int_0^y u'(y)h(y) dy dy dy \quad (3)$$

Donde A es el área de la sección transversal, $u'(y)$ es la diferencia entre la velocidad longitudinal en la progresiva transversal y , con respecto a la velocidad media global en la sección U y ε_t es el coeficiente de mezcla transversal, calculado mediante la ecuación propuesta por Fischer et. al. (1979) ec. (4)

$$\varepsilon_t = 0,6 \cdot H \cdot u^* \quad (4)$$

La ecuación (4) asume un flujo unidimensional, es decir que el contaminante debe estar completamente mezclado tanto en la vertical como en la transversal. Debido a esta limitación esta ecuación solo puede ser utilizada en zonas donde no hay recirculación o donde no hay fuertes corrientes secundarias. Además, esta ecuación asume que la tensión de corte transversal es quien gobierna el proceso de mezcla y no la tensión vertical, por lo tanto solo puede ser aplicada a ríos donde el ancho (B) sea mucho mayor que la profundidad media (H). Por último, se puede decir que esta ecuación supone que el mecanismo de dispersión por corte predomina sobre los demás mecanismos de mezcla. El coeficiente 0,6 de la ec. (4) tiene en cuenta la influencia en la mezcla de curvas (poco pronunciadas), rugosidad de las márgenes, y otras irregularidades presentes en cauces naturales.

En este trabajo se propone utilizar la ecuación (3) sobre una aproximación de la distribución de velocidades transversales y profundidades realizadas con funciones de distribución. La función teórica de distribución de velocidades utilizada en este trabajo fue desarrollada por Seo y Baek (2000) [ec. (5)], la cual genera un perfil transversal de velocidades a partir de distribuciones “gamma” (Γ).

$$\frac{u(y)}{U} = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{y}{B}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{y}{B}\right)^{\beta-1} \quad (5)$$

Donde $u(y)$ es la velocidad longitudinal media en la vertical correspondiente a una progresiva transversal y , U es la velocidad media global de la sección transversal, B es el ancho total de la sección, α y β son parámetros de la distribución gamma. Cuando $\alpha = \beta$ la distribución es simétrica, pero cuando $\alpha > \beta$ la curva se sesga hacia la derecha, y cuando $\alpha < \beta$ la curva se sesga hacia la izquierda. Adoptando un valor de $\alpha = 1$, el valor de la velocidad en la dirección transversal es constante, y a medida que α crece, el perfil de distribución de velocidades concentra los mayores valores de velocidad longitudinal en una zona cada vez más estrecha ubicada al centro del canal, disminuyendo hacia las márgenes (ver Figura 2).

La función de distribución transversal de profundidades (batimetría de la sección transversal) utilizada en este trabajo fue la definida por (Deng et al. 2001) [ec. (6)].

$$\frac{h(y)}{H_{\max}} = 1 - \left[\frac{2y}{B} - 1 \right]^\gamma \quad (6)$$

Donde $h(y)$ es la profundidad de la sección correspondiente a una progresiva transversal y , H_{\max} es la profundidad máxima de la sección transversal, y B es el ancho total de la sección. Al variar el coeficiente gamma (γ) se obtienen diferentes distribuciones de la profundidad para una sección transversal (ver figura 3). Para $\gamma=1$, el perfil de la sección transversal resulta triangular, para $\gamma=2$ resulta parabólico y para valores mayores de γ el perfil va adquiriendo una forma cada vez más aproximada a la rectangular.

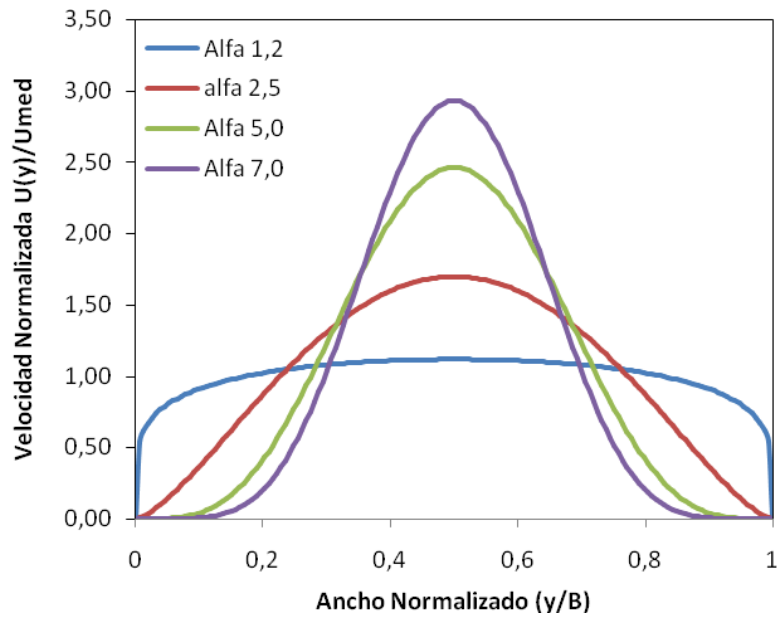


Figura 2.- Perfil transversal de velocidades obtenidos utilizando la ecuación (5).

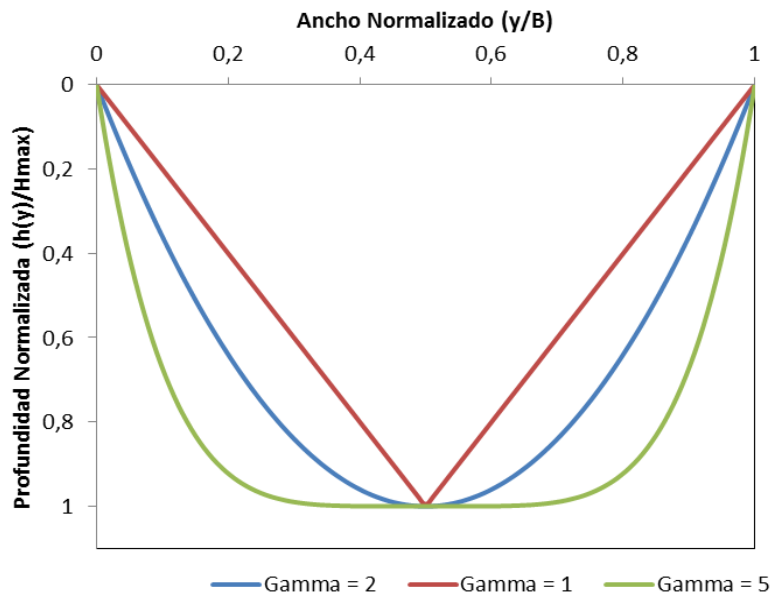


Figura 3.-Distribución transversal de profundidades obtenidas utilizando la ecuación (6).

METODOLOGÍA

Los estudios experimentales reportados en este trabajo se desarrollaron en un tramo del río Tercero localizado en el Balneario de la ciudad homónima (Figura 4) (Lenarduzzi, 2013).

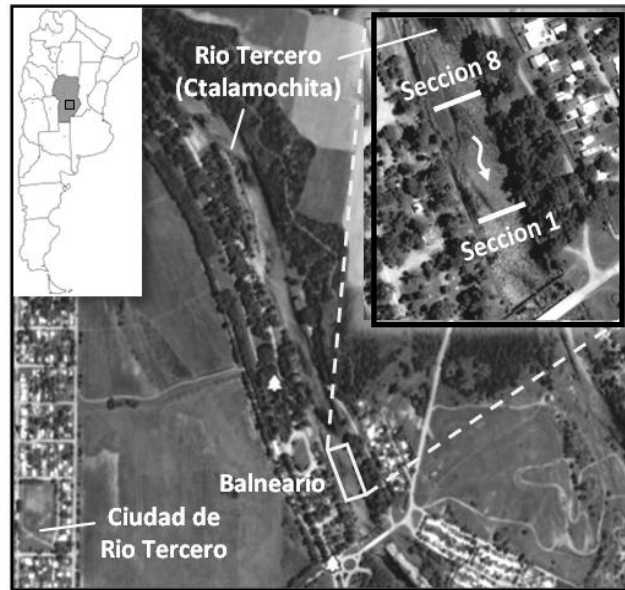


Figura 4.-Ubicación de la zona de estudio.

Dadas las características del Río Tercero (es un cauce natural poco profundo y con velocidades de flujo superiores a 1m/s que dificulta las tareas dentro del río), se utilizó un Perfilador de Corriente Acústico Doppler (Figura 5) específico para cauces de aguas poco profundas (RiverSurveyor S5 YSI/Sontek ADCP) para la medición de velocidades, caudales y profundidades del flujo.



Figura 5.-ADCP RiverSurveyor S5 YSI/Sontek en campaña de aforo del río Tercero, en la localidad homónima.

El RiverSurveyor S5 YSI/Sontek ADCP es un equipo de alta precisión que cuenta con un algoritmo inteligente denominado “SmartPulseHD” que en base a la profundidad, velocidad y niveles de turbulencia del flujo, ajusta de manera automática el esquema de pulso acústico con el fin de proveer la máxima resolución de registro de datos. Con este equipo se realizaron diversas mediciones en cada una de las campañas, acompañando a las mismas con mediciones a partir de un GPS diferencial para determinar en cada instante y de forma complementaria la posición del perfilador.

Para las mediciones con ADCP que se reportan en este trabajo se realizaron diferentes transectas o cruces en una sección transversal (ver Figura 6) con la embarcación que traslada el equipo, a una velocidad menor que la velocidad del flujo. Durante el cruce, el instrumental registró datos de velocidad de flujo y batimetría de la sección.



Figura 6.- Trayectorias realizadas con la embarcación móvil durante los 4 cruces en la sección del tramo de estudio.

A partir de la información obtenida de las mediciones con el ADCP, las dos metodologías citadas anteriormente fueron utilizadas para realizar una estimación experimental indirecta del coeficiente de dispersión longitudinal en un tramo del Río Tercero. La primera de ellas fue utilizando parámetros hidráulicos globales de la sección transversal estudiada, tales como velocidad media global en la sección (U), profundidad media del flujo (H), ancho total (B) y velocidad de corte (u^*). Luego, los coeficientes de dispersión longitudinal (D) y transversal (ϵ) se calcularon para la sección estudiada mediante las ecuaciones simplificadas de Fischer definidas anteriormente (ec. 1 y 4, respectivamente).

La segunda metodología fue utilizando, además de los parámetros globales, información de la distribución transversal de las velocidades longitudinales medias en la vertical, y la geometría de la sección. Estos datos de velocidad se ajustan luego a una distribución teórica, y la estimación del coeficiente de dispersión longitudinal D se realiza según las ecuaciones 3, 4, 5 y 6. En este trabajo se adoptó una distribución simétrica ($\alpha = \beta$), por lo tanto la forma del perfil de velocidades depende de α .

RESULTADOS

En la Tabla 1 se resumen los parámetros hidráulicos globales medidos en la sección de estudio, y los valores de los coeficientes de dispersión transversal y longitudinal calculado mediante las ecuaciones 4 y 1, respectivamente. El caudal aforado fue de 17,3 m³/s, y la pendiente del pelo libre de agua en el tramo analizado se midió mediante el empleo de un nivel óptico, y el resultado obtenido fue $S_o = 0,001125$ m/m.

Tabla 1.- Parámetros hidráulicos globales y coeficientes de dispersión transversal ϵ , y longitudinal D .

B [m]	H [m]	A [m ²]	$U=Q/A$ [m/s]	u^* [m/s]	ϵ_t [m ² /s]	D [m ² /s]
34,26	0,53	18,08	0,95	0,076	0,024	291,17

A continuación se detalla el cálculo del coeficiente de dispersión longitudinal D mediante el uso de la ecuación (4) en la sección del río estudiada cuya distribución transversal de velocidades y profundidades de flujo se muestra en la Figura 7. Se puede observar que la distribución de velocidades en la transversal no es uniforme y presenta características particulares.

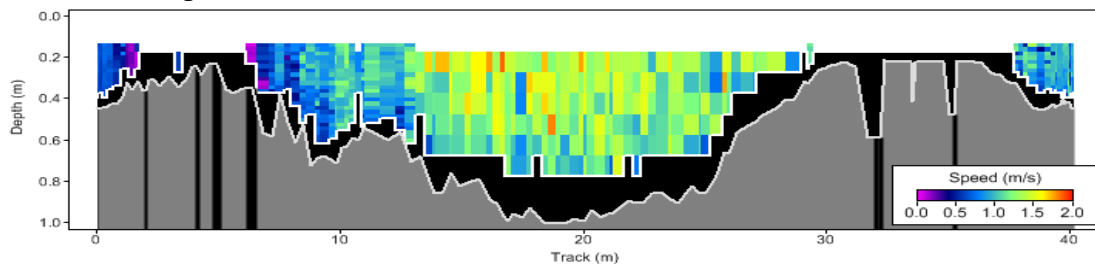


Figura 7.- Geometría y campo de velocidades de la sección transversal medida con ADCP.

Para la sección de la figura 7 el mejor ajuste de la geometría de la sección medida con ADCP lo representa una distribución de profundidades (ecuación 6) con un valor del coeficiente $\gamma = 4$, la cual posee el menor error cuadrático.

En la figura 8 se muestran la distribución transversal de velocidad longitudinal $u(y)$ medidos con ADCP, junto con la función de distribución de velocidades seleccionada (ecuación 5). Las progresivas en la dirección transversal (y) se expresan como porcentajes del ancho B , y las velocidades $u(y)$ se adimensionalizaron con el valor de la velocidad media global U . El valor del coeficiente α que da como resultado el ajuste de la ecuación (5) a los valores medidos fue de $\alpha = 1,35$, el cual da el mínimo error cuadrático. Utilizando los coeficientes α y γ obtenidos del ajuste a funciones de distribución transversal de los perfiles de velocidad y profundidad, respectivamente, se obtuvo como resultado un valor para el coeficiente de dispersión longitudinal $D = 21,04\text{m}^2/\text{s}$.

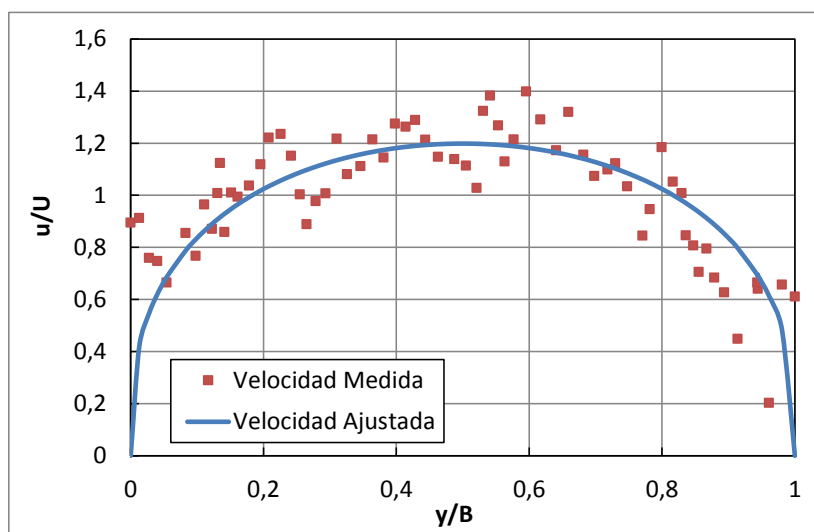


Figura 8.- Ajuste de la función de distribución transversal de velocidades longitudinales (ecuación 5) a los valores de

velocidad $u(y)$ medidos con ADCP.

En la Figura 9 se muestra un análisis de sensibilidad en la determinación del coeficiente D a la selección de los coeficientes α y γ . Allí se observa que para $\alpha = 1,35$ (y en general para perfiles de velocidades con $\alpha \leq 1,5$), el coeficiente de dispersión D es poco sensible al parámetro γ que depende de la forma de la sección (cuando este parámetro está en el rango de: $2 \leq \gamma \leq 4$). Cada una de las relaciones de alfa (α) vs D para cada valor de gamma (γ) son ecuaciones cuadráticas donde el coeficiente que afecta el término cuadrático disminuye a medida que gamma (γ) aumenta (la relación tiende a una relación lineal).

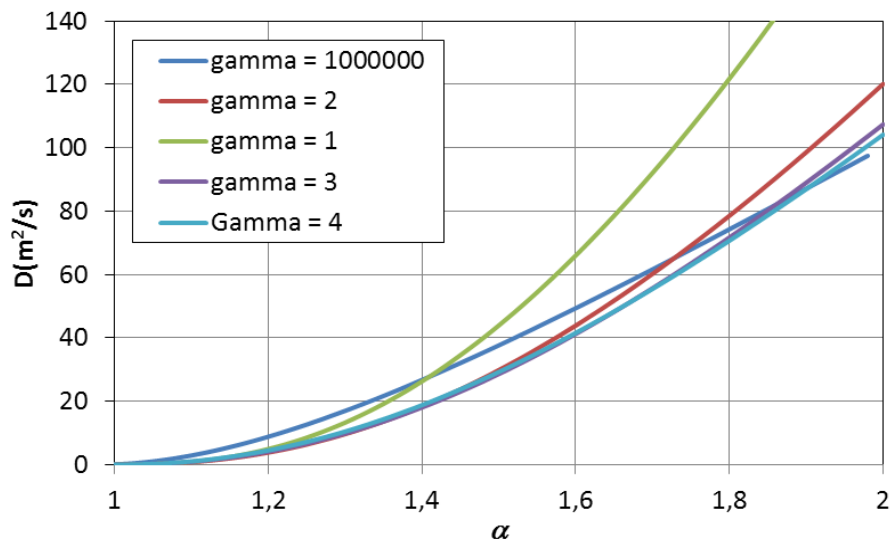


Figura 9.-Análisis de sensibilidad en la determinación del coeficiente D a la selección de los coeficientes α y γ .

El coeficiente de dispersión longitudinal obtenido a partir de mediciones de velocidad con ADCP utilizando parámetros globales (según ecuación 1), y el coeficiente obtenido en función de la distribución de velocidades y de la geometría de la sección (según ecuación 3), se los incluyó en la Figura 10 junto con valores antecedentes de D para diferentes ríos recopilados por Rutherford (1994).

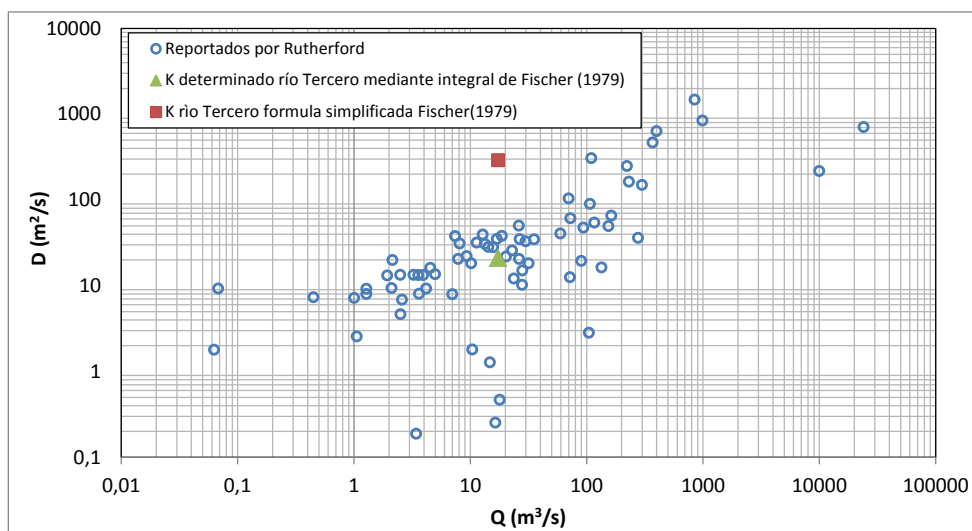


Figura 10.- Valores del coeficiente de mezcla longitudinal reportados por Rutherford (1994, símbolos abiertos) y el

valor estimado de D del río Tercero estimados con la ec (3), (símbolos llenos).

Se observa la gran dispersión de los valores reportados por Rutherford (1994) lo que justifica el uso de una metodología que incluya las características particulares (perfiles transversales de velocidad y batimetría) en el cálculo del coeficiente de dispersión longitudinal.

CONCLUSIONES

En este trabajo se llevó a cabo una estimación experimental indirecta del coeficiente de dispersión longitudinal en un tramo del Río Tercero (Ctalamochita), utilizando información detallada de los campos de velocidad obtenidos con ADCP.

A partir de la información obtenida de las mediciones con ADCP, se utilizaron dos metodologías para realizar una estimación del coeficiente de dispersión longitudinal D en un tramo del Río Tercero. La primera de ellas fue utilizando parámetros hidráulicos globales de una sección transversal, tales como velocidad media global en la sección, profundidad media del flujo, y ancho total. La segunda metodología implementada utiliza información de la distribución transversal de las velocidades longitudinales medias en la vertical, y la geometría de la sección.

Los valores de los coeficientes de dispersión longitudinal fueron contrastados con valores disponibles en la literatura para diferentes ríos con características similares. La gran dispersión de los valores reportados en la literatura justifica el uso de una metodología que incluya las características particulares de escurrimiento del tramo de río seleccionado (perfiles transversales de velocidad y batimetría).

Se destaca la ventaja del uso de ADCP para implementar la metodología propuesta debido a que provee mucha información con elevada resolución espacial y temporal. Además, el potencial de los productos elaborados con estas técnicas (ábacos) es de gran magnitud, ya que de ser validadas y calibradas en cada sitio, servirán posteriormente para poder realizar estimaciones del coeficiente de dispersión sin recurrir a costosas técnicas o complejos métodos de medición con trazadores que requieren un significativo empleo de tiempo y personal en campo, dados los altos costos que dichas campañas representan para las instituciones.

El grupo de trabajo a cargo de esta publicación continúa con el análisis en otras secciones representativas de este río a fines de obtener una caracterización más detallada del comportamiento hidrodinámico del mismo.

Agradecimiento. A la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba por su colaboración para la realización de las campañas y a todo el equipo y compañeros del Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA) por el tiempo y dedicación brindados tanto en las campañas como en el posterior análisis de datos e información.

LISTA DE SÍMBOLOS

u^* = velocidad de corte media

g = aceleración de la gravedad

B = Ancho del río en la sección.

H = Profundidad media del flujo en la sección transversal.

H_{\max} = Profundidad máxima en la sección trasversal

R_h = **radio hidráulico medio**

S_0 = **pendiente media de energía**

ε_t = **coeficiente de dispersión transversal**

D = **coeficiente de dispersión longitudinal**

U = **velocidad promedio de la sección**

α = Coeficiente de distribución de velocidades

β = Coeficiente de distribución de velocidades

γ = Coeficiente de perfil de fondo

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Carr, M. L., y Rehmann, C. R. (2007). “*Measuring the dispersion coefficient with acoustic Doppler current profilers*” - Journal of Hydraulic Engineering, 133(8), 977-982.

Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J., y Brooks, N. H., (1979). “*Mixing in inland and coastal waters*”, - Academic, New York.

Lenarduzzi, M. (2013) “*Caracterización Hidrodinámica del río Tercero (Ctalamochita) con fines hidroambientales*”. Práctica Supervisada de Grado, Carrera Ingeniería Civil, FCEyN-UNC.

Deng, Z.-Q., Singh, V. P., and Bengtsson, L.(2001). “*Longitudinal dispersion coefficient in straight rivers.*” J. Hydraul. Eng., 127(11), 919–927.

Rutherford, J. C.(1994). “*River mixing*”, Wiley, Chichester, U.K.

Seo, I. W., and Baek, K. O. (2004). “*Estimation of the longitudinal dispersion coefficient using the velocity profile in natural streams*” J. Hydraul. Eng., 130(3), 227–236.