

Artículo científico

Estimación del coeficiente de dispersión longitudinal en ríos de la región central de Argentina utilizando ADCP



J.M. Díaz Lozada^{a,*}, C.M. García^{a,b,c}, H. Herrero^{a,b,c}, M. Romagnoli^d, A. Cossavella^e

^aCentro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina

^bConsejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

^cInstituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología, IDIT UNC-CONICET

^dCentro Internacional Franco Argentino de Ciencias de la Información y de Sistemas, CONICET, Rosario, Argentina

^eSecretaría de Recursos Hídricos del Gobierno de la Provincia de Córdoba, Córdoba, Argentina

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del artículo:

Recibido el 24 de febrero de 2015

Aceptado el 08 de septiembre de 2015

Palabras clave:

Métodos experimentales

Trabajos de campo

ADCP

Procesos de mezcla en ríos

RESUMEN

El coeficiente de dispersión longitudinal (D) es un parámetro fundamental requerido para predecir el transporte de contaminantes en un curso fluvial. La determinación experimental de D mediante técnicas convencionales como, por ejemplo, ensayo de trazadores, requieren una gran inversión en planificación, personal técnico y análisis posterior, y los resultados son únicamente válidos para las condiciones de flujo presentes en el momento de realizar la medición. En los ríos de la zona central de Argentina, los cuales presentan una gran variabilidad estacional de caudales, se hace muy costosa la determinación de este coeficiente D con ensayo de trazadores, ya que se deberían evaluar un amplio rango de condiciones de flujo existentes. Debido a esto, se utilizan fórmulas empíricas, desarrolladas por diversos autores, que permiten estimar el coeficiente de dispersión longitudinal de acuerdo con parámetros hidráulicos globales (profundidad, velocidad media del flujo, ancho del río, etc.). Sin embargo, estas expresiones presentan una gran variación en sus resultados y solo funcionan adecuadamente en ríos con características similares a los que fueron ajustadas. Es por ello que, en este trabajo, se estima, de manera alternativa, el coeficiente D mediante una caracterización hidrodinámica detallada, realizada en sistema fluvial con un perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP). Se adoptó, como sistema fluvial de estudio, el río Carcarañá que escurre por la región central de Argentina (provincias de Córdoba y Santa Fe). A partir de las estimaciones realizadas, se evalúa D en los principales tributarios del sistema fluvial y se comparan los resultados con los obtenidos de la aplicación de las fórmulas empíricas y con ábacos desarrollados sobre la base de valores reportados para diferentes ríos del mundo.

© 2015 IAHR y WCCE. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Estimation of longitudinal dispersion coefficient in rivers of central region of Argentina using ADCP

ABSTRACT

The Longitudinal dispersion coefficient (D) is a fundamental parameter required to predict the transport of pollutants in rivers. The experimental determinations of D by conventional techniques, such as tracers test, require a large investment in planning, staff and subsequent analysis, and the results are only valid for the flow conditions present during the test. Using tracers test to estimate D is very expensive in rivers of central region of Argentina which have a large seasonal variability of flow discharges (with maximum values one or two orders of magnitude larger than the mean values), as tracers test should be performed for a wide range of flow conditions. Thus, water quality modelers use empirical

Keywords:

Experimental method

Field work

ADCP

Mixing process in rivers

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: jmdiazlozada@gmail.com (JM Díaz Lozada)

formulas developed by various authors estimating the longitudinal dispersion coefficient based on global hydraulic parameters (mean flow depth and velocity, river width, etc.). However, these formulas show large scatter in the results and only perform properly in rivers with similar characteristics that were calibrated. On that basis, an alternative estimation of the coefficient of longitudinal dispersion is performed in this paper through a detailed experimental hydrodynamic characterization performed in a fluvial system with an Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP). The Carcarañá River, flowing through the Córdoba and Santa Fe provinces in Argentina, has been selected as a study system. The results of this paper include the values of longitudinal dispersion coefficients in different streams of the analyzed fluvial system which are compared with values estimated using empirical formulas and plots developed using data from different river systems around the world.

© 2015 IAHR y WCCE. Published by Elsevier España, S.L.U. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

La predicción del transporte de un contaminante en un sistema fluvial (que integra los fenómenos de advección y dispersión) es fundamental para llevar a cabo un adecuado manejo de ese sistema y preservar su calidad. Para realizar esta tarea, se efectúan modelaciones numéricas que requieren la definición de parámetros, de los que uno de los más importantes es el coeficiente de dispersión longitudinal (D) [1]. La dispersión depende de la hidrodinámica y de las características del cauce. La determinación de este coeficiente D mediante técnicas convencionales, como por ejemplo los ensayos de trazadores, requiere una gran inversión en planificación, personal y análisis posterior [2,3] y los resultados son únicamente válidos para las condiciones de flujo presentes en el momento de realizar la medición. En ríos con escasa variabilidad temporal en los caudales escurridos, la realización de un solo ensayo de trazadores puede ser suficiente para estimar, con cierta precisión, el coeficiente D para la mayoría de las condiciones de flujo esperadas. Los ríos de la zona central de Argentina presentan una gran variabilidad estacional de caudales (valores máximos uno o dos órdenes de magnitud mayores que los valores medios), por lo que se hace muy costosa la determinación de este coeficiente mediante ensayo de trazadores, ya que se debería determinar experimentalmente D para un amplio rango de condiciones de flujo. Así, los profesionales que se dedican a modelar calidad de agua en los ríos de esta zona utilizan fórmulas empíricas, ajustadas por diversos autores a valores estimados de mediciones de campo y laboratorio, que permiten determinar el coeficiente de dispersión longitudinal de acuerdo con los parámetros hidráulicos globales disponibles más frecuentemente (profundidad y velocidad media del flujo, ancho del río, etc.). Sin embargo, estas expresiones presentan una gran variabilidad en sus resultados y sólo funcionan adecuadamente en ríos con características similares a los que fueron ajustadas. Debido a esto, en este trabajo se utiliza una metodología alternativa que permite estimar el coeficiente de dispersión longitudinal teniendo en cuenta las características particulares del flujo en distintas secciones del sistema fluvial, como la distribución transversal de las velocidades del flujo, la batimetría del cauce, etc. Se utiliza la ecuación integral presentada por Fischer et al. [3] para estimar el coeficiente de dispersión longitudinal (ecuación 1), la que requiere una caracterización hidrodinámica detallada.

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

donde A es el área de la sección transversal; $u'(y)$ es la diferencia entre la velocidad longitudinal media en la vertical $u(y)$ en la

progresiva transversal $\left[u(y) = \int_0^{h(y)} u(y, z) dz \right]$ y la velocidad media global en la sección U [así $u'(y) = u(y) - U$]; $h(y)$ profundidad en la progresiva y ; y $\epsilon_t(y)$ es el coeficiente de dispersión transversal en la progresiva y .

La ecuación 1 asume un flujo uniforme y unidimensional [3], considerando que el contaminante debe estar completamente mezclado en la dirección vertical y transversal. Debido a esta limitación, esta ecuación únicamente puede utilizarse en tramos de ríos donde no existan fuertes recirculaciones o corrientes secundarias. Además, esta ecuación asume que el mecanismo de dispersión por corte predomina sobre los demás mecanismos de mezcla (el gradiente de velocidad en la transversal debe ser grande para que la dispersión por corte predomine sobre los demás mecanismos) y que la dispersión por corte transversal es quien gobierna el proceso de mezcla y no la dispersión por corte vertical [2]. Por lo tanto, tan sólo puede ser aplicada a ríos donde el ancho (B) sea mucho mayor que la profundidad media (H_{med}). Fischer et al. [3] recomiendan una relación B/H_{med} mayor a 6. Con respecto a los resultados obtenidos por la ecuación 1, Seo y Baek [4] afirman en sus estudios que la ecuación 1 permite estimar el coeficiente de dispersión longitudinal con errores menores al 30% en condiciones de flujo uniforme y dentro de un factor de 4 en flujos no uniformes, mientras que Carr y Rehmann [2] obtuvieron que el 85% de los valores calculados se encuentran dentro de un factor de 3 respecto al medido con ensayo de trazadores. La información hidrodinámica y batimétrica detallada requerida para aplicar la ecuación 1 no puede ser registrada por métodos de velocimetría convencionales aplicadas en sistemas fluviales (por ejemplo, molinetes). En la actualidad, el desarrollo de la tecnología acústica Doppler para efectuar aforos en sistemas fluviales (normalmente con profundidades mayores a 0,30 m) permite obtener la información requerida para aplicar la ecuación 1 en cada sección de un curso fluvial. En este trabajo se estima el coeficiente de dispersión longitudinal mediante una caracterización hidrodinámica detallada realizada en sistema fluvial con un perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP). Se adoptó, como sistema fluvial de estudio, el río Carcarañá, que escurre por la región central de Argentina (provincias de Córdoba y Santa Fe). Este sistema fluvial ha sido monitoreado periódicamente, durante más de tres años en toda su extensión, por el grupo de trabajo a cargo de esta publicación. A partir de la información registrada en ese período, se evalúa el coeficiente de dispersión longitudinal en los principales tributarios del sistema fluvial y se comparan los resultados con los obtenidos de la aplicación de las formulas empíricas y con valores reportados para diferentes ríos del mundo.

2. Materiales y métodos

Los estudios experimentales reportados en este trabajo se desarrollaron en los principales tributarios del sistema fluvial del río Carcarañá (Fig. 1), que es una importante cuenca hidrográfica de más de 50.000 km² de extensión, ubicada en el área central de la República Argentina, y abarca gran parte de las provincias de Córdoba y Santa Fe. Los principales tributarios de este sistema son el río Tercero (Ctalamochita), Saladillo (nombre del curso inferior del río Cuarto o Chocancharava) y Arroyo Las Tortugas (Fig. 1). Dada su ubicación en una de las regiones con mayor actividad agrícola, ganadera e industrial del país, los ríos de la cuenca se ven afectados por: a) descargas industriales (reconociendo una problemática potencial en la localidad de río Tercero (Córdoba), en donde se localiza un importante polo industrial [6]); b) descargas cloacales no tratadas adecuadamente; y c) contaminación por agroquímicos. Debido a esta problemática, se llevan adelante, desde el año 2012, campañas de monitoreo de calidad de agua y aforos de caudal superficial con el objeto de preservar la calidad del recurso, cuantificar y caracterizar el escurrimiento superficial de los cursos que componen dicha cuenca. Estos monitoreos y aforos se realizan a partir de un esfuerzo conjunto entre tres instituciones de las provincias de Córdoba y Santa Fe (CETA, Centro de Estudios y Tecnología del Agua–Universidad Nacional de Córdoba; CIFACIS, Centro Internacional Franco Argentino de Ciencias de la Información y de Sistemas–Universidad Nacional de Rosario; y la Secretaría de Recursos Hídricos del Gobierno de la Provincia de Córdoba).

Se seleccionaron, específicamente para este trabajo, cuatro secciones de medición en los principales tributarios del sistema fluvial (Fig. 2 y tabla 1), las cuales se monitorearon periódicamente. Estas secciones se encuentran en tramos de río suficientemente rectos para evitar la presencia de corrientes secundarias y además cumplen con la condición de aguas poco profundas (relación ancho/profundidad media del río $B/H_{med} > 6$) ambas condiciones requeridas para aplicar la ecuación 1. Además, en esas secciones no existen interferencias significativas en el flujo producidas por obstáculos como pilas y estribos de puente, etc.

En cada una de las secciones transversales de medición seleccionadas se realizaron caracterizaciones hidrodinámicas detalladas con

un ADCP. Las mediciones se efectuaron desde una plataforma móvil utilizando un ADCP YSI/SonTek RiverSurveyor S5 (Firmware 3.0 de 3Mhz) que se encuentra equipado con un geoposicionador satelital diferencial (DGPS). Este equipo se seleccionó en virtud de las características presentes en los ríos a estudiar, los cuales son ríos poco profundos. El ADCP presenta limitaciones debido a que no puede medir la sección completa del río, porque existe una profundidad de



Figura 2. Ubicación de las secciones transversales de medición seleccionadas para este estudio.

Tabla 1

Secciones transversales de medición seleccionadas para este estudio

Sección n.º	Curso fluvial	Localización
1	Río Tercero	Puente Sarmiento – Bell Ville
2	Río Saladillo	Puente Ruta 6 – Saladillo
3	Río Carcarañá	Puente Ruta 12 – Inriville
4	Arroyo Las Tortugas	Puente Ruta 9 – Ingreso a la localidad de Tortugas

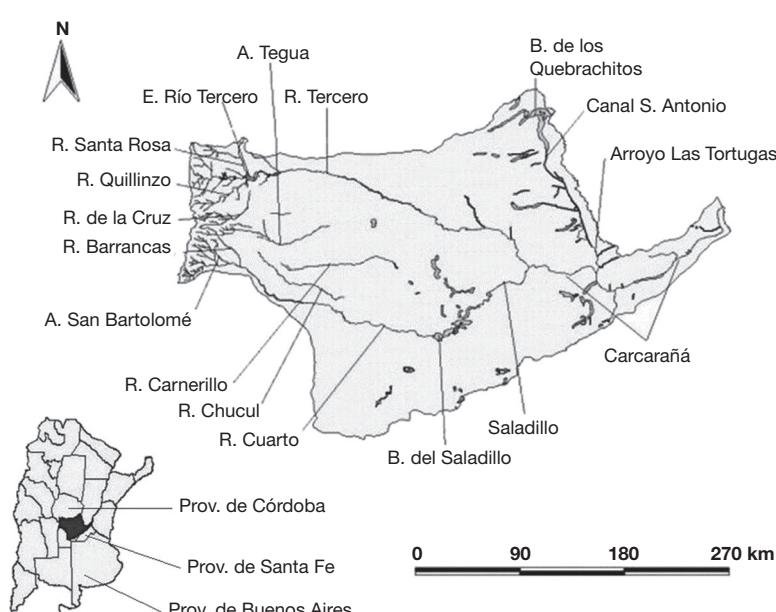


Figura 1. Sistema fluvial del río Carcarañá. Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación [5].

inmersión mínima para que el instrumento funcione, una distancia en la cual el transductor no registra datos debido al rápido retorno de las ondas acústicas (los transductores necesitan un tiempo mínimo entre ciclos de envío y recepción de las ondas), una zona cercana al fondo donde no se pueden realizar mediciones debido a la interferencia que produce el rebote acústico de la onda en el fondo (entre el 6% y 10% de la profundidad [7]) y las zonas cercanas a las márgenes donde las profundidades son menores a las que puede registrar el instrumento. Si bien el instrumento no mide en esos sectores, este efectúa estimaciones de caudal en dichas zonas mediante diferentes aproximaciones que el fabricante provee y el usuario puede elegir. En este trabajo se adoptó un perfil vertical de velocidades logarítmico con el propósito de estimar las velocidades en las zonas no medidas cerca del fondo y de la superficie.

En cada sección de aforo se realizó un número par de cruces o transectas, con un tiempo mínimo de medición de 720 segundos (12 min), que es el tiempo recomendado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) [8], y una velocidad de cruce menor que la velocidad del flujo, lo que garantiza una precisa medición de caudal. El ADCP River Surveyor S5 permite utilizar distintos sistemas de referencia de la embarcación para determinar la velocidad relativa de la embarcación y, de esa forma, calcular la velocidad del flujo y caudal. En este trabajo se alternó entre dos sistemas de referencia. El primer sistema se conoce como “seguimiento de fondo”, el cual determina la velocidad de la embarcación con respecto al fondo del cauce utilizando el principio acústico Doppler. El sistema de seguimiento de fondo puede ser más preciso si el lecho del río es fijo (sin transporte de sedimento en el fondo [2]) y si la profundidad en todo el río es menor que 5 m en el caso del ADCP RiverSurveyor S5 [9]. El segundo sistema de referencia para determinar la velocidad de la embarcación consiste en el uso del sistema DGPS. Para la selección del sistema de referencia en cada una de las mediciones realizadas, se adoptó el sistema óptimo para cada condición del flujo o aquel que presentó el menor desvío estándar de los caudales relevados cuando más de una opción estaba disponible. A partir de la información obtenida de las mediciones con ADCP en las diferentes secciones, se utilizó el programa USGS-VMT (*Velocity Mapping Toolbox*–<http://hydroacoustics.usgs.gov/movingboat>) para promediar los campos de flujos medidos en las distintas transectas, para las mismas condiciones experimentales, con el fin de determinar el campo de flujo medio de la sección. Posteriormente, se aproximó la distribución transversal de velocidades de flujo medio en la vertical en la dirección principal del flujo y profundidades mediante funciones continuas. Esta aproximación se realiza porque: a) las fluctuaciones generadas por la turbulencia del flujo y el ruido presente generan que los perfiles de velocidades no sean suaves [10]; b) los datos obtenidos de ADCP no están equiespaciados, lo cual dificulta la integración numérica, y c) los perfiles de velocidades medias en la vertical obtenidos con ADCP muchas veces presentan sectores en donde no se ha podido registrar datos, por ejemplo, en las zonas cercanas a las márgenes [11]. En un primer momento, se adoptó la función teórica de distribución de velocidades medias en la vertical desarrollada por Seo y Baek [4], que genera un perfil transversal de velocidades medias con una distribución equivalente a la función de densidad de probabilidad de la distribución Beta:

$$\frac{u(y)}{U} = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{y}{B} \right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{y}{B} \right)^{\beta-1} \quad (2)$$

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 función de distribución y Γ es la función 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 $\alpha = \beta = 1$, el valor de la velocidad en la dirección transversal es constante, y a medida que α y β crecen, el perfil de distribución de velocidades concentra los mayores valores de velocidad longitudinal en una zona cada vez más estrecha, cuya ubicación dependerá de los valores α y β . En el caso que $\alpha = \beta$, las mayores velocidades se ubican en el centro del canal, disminuyendo hacia las márgenes (Fig. 3). Para seleccionar el mejor ajuste, se utilizaron criterios basados en el coeficiente de determinación r^2 y el mínimo error cuadrático medio (ECM).

En los casos en que la distribución de velocidades no pudo ser aproximada eficientemente mediante la distribución mencionada (ecuación 2), se realizó una aproximación a través de una función polinómica, la cual permite un mejor ajuste de los datos, pero, en contrapartida, el método y los parámetros de ajuste pierden su generalidad.

La función utilizada en este trabajo para representar la distribución transversal de profundidades (batimetría de la sección transversal) fue la definida por Deng et al. [12]:

$$\frac{h(y)}{H_{\max}} = 1 - \left[\frac{2y}{B} - 1 \right]^\gamma \quad (3)$$

dónde $h(y)$ 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 parámetro gamma (γ) se obtienen diferentes distribuciones de la profundidad para una sección transversal (Fig. 4). 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. Para seleccionar el mejor ajuste, al igual que en el caso de las velocidades, se utilizaron criterios basados en el coeficiente de determinación r^2 y el ECM.

Al igual que en el caso de la aproximación de velocidades, en aquellas secciones donde el ajuste del perfil del fondo mediante la distribución propuesta no era correcto, se utilizó una función polinómica la cual, como ya se mencionó, le quita generalidad al método.

Una vez aproximados los perfiles de velocidad y fondo, se procedió a estimar el coeficiente de dispersión transversal ($\epsilon_t(y)$) en cada progresiva mediante la ecuación empírica desarrollada por Smeithlov [13] y utilizada por Deng et al. [12], Carr y Rehmann [2], Perucca [14] y Shen [10] (ecuación 4).

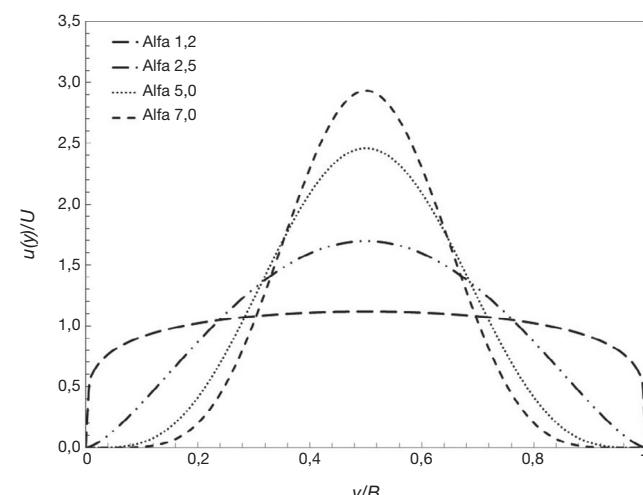


Figura 3. Perfiles transversales de velocidades medias en la vertical obtenidos variando los valores de los coeficientes $\alpha = \beta$ en la ecuación (2).

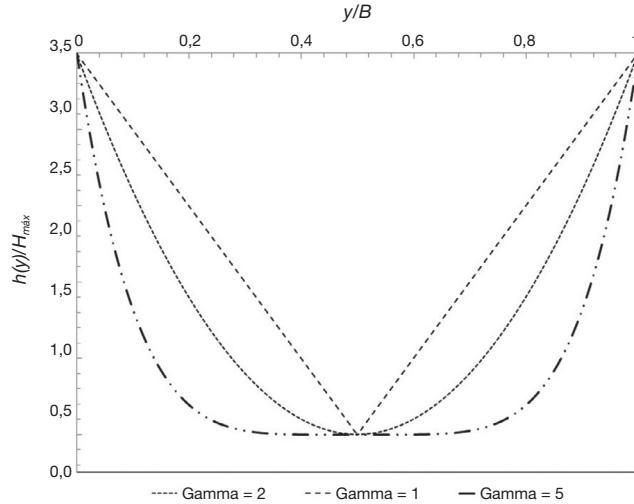


Figura 4. Distribuciones transversales de profundidades obtenidas utilizando distintos valores del parámetro γ en la ecuación 3.

$$\epsilon_t(y) = \theta u^* h(y) \quad (4)$$

$$\theta = \left[0,145 + \frac{1}{3520} \left(\frac{U}{u^*} \right) \left(\frac{B}{H_{med}} \right)^{1,38} \right] \quad (5)$$

$$u^* = \frac{1}{B} \int_0^B u^*(y) dy \quad (6)$$

$$H_{med} = \frac{1}{B} \int_0^B h(y) dy \quad (7)$$

Además, $h(y)$ es la profundidad en la progresiva y , $u^*(y)$ es la velocidad de corte en la progresiva y y u^* es la velocidad de corte promedio de la sección, que puede ser estimada mediante la ecuación 6 u 8. El valor θ se encuentra entre, generalmente, 0,15 y 0,30 para tramos de ríos rectos, entre 0,30 y 0,90 para tramos con ligeras curvaturas, y entre 1 y 3 para tramos en curvas [15]. Si se poseen mediciones estacionarias de velocidad en diferentes puntos de la sección transversal, podría obtenerse $u^*(y)$ en dichos puntos mediante el ajuste de un perfil logarítmico (ec. 7.43 en Pope [16]). Conociendo $u^*(y)$ en diferentes puntos y aplicando la ecuación 6, puede obtenerse la velocidad de corte promedio en la sección. También, es importante aclarar que, a través del conocimiento de la velocidad de corte en diferentes

puntos $u^*(y)$, se puede tener noción de la variación del coeficiente de dispersión transversal ($\epsilon_t(y)$) a lo largo de la sección, ya que el mismo es proporcional a la velocidad de corte. En este trabajo, al no poseerse mediciones estacionarias de velocidad, se calculó la velocidad corte media de la sección mediante la siguiente ecuación:

$$u^* = \sqrt{gRS} \quad (8)$$

dónde g es la aceleración de la gravedad, R es el radio hidráulico y S es la pendiente de la línea de energía. Finalmente, se resuelve la ecuación 1 mediante algún método de integración numérica; en este trabajo se utilizó el método de los trapecios. Los valores de coeficientes de dispersión longitudinal, estimados con la ecuación integral de Fischer et al. [3] (ecuación 1) utilizando información experimental proveniente de una caracterización hidrodinámica detallada realizada con ADCP, se comparan, en primera instancia, con los valores de D obtenidos a través de las formulas empíricas ajustadas por diversos autores a valores estimados de mediciones de campo y laboratorio. La ecuación 9 muestra la forma general que poseen las ecuaciones empíricas disponibles en la actualidad para estimar el coeficiente de dispersión longitudinal, mientras que en la tabla 2 se muestran los valores de los parámetros a , b y c ajustados por los diferentes autores y los rangos de los parámetros utilizados para el ajuste.

$$\frac{D}{H_{med} U^*} = a \left(\frac{U}{u^*} \right)^b \left(\frac{B}{H_{med}} \right)^c \quad (9)$$

Las ecuaciones empíricas permiten una estimación rápida del coeficiente de dispersión longitudinal dentro de un determinado orden de magnitud [15], pero deben usarse en ríos de similares características a las que fueron calibradas. Las ecuaciones de Iwasa y Aya [17] y Seo y Cheong [18] contemplan en su ajuste relaciones B/H_{med} altas, lo cual las hace aptas para estimar el coeficiente de dispersión en cauces fluviales anchos. Las ecuaciones de Liu [19] y Koussis y Rodríguez-Mirasol [20] abarcan números de Froude bajos, lo cual indica que pueden ser aplicados en flujos profundos. Por último, la ecuación de Liu [19] contempla en su calibración bajos valores de pendiente, lo cual indica que puede ser aplicada en flujos de baja pendiente como, por ejemplo, algunos ríos de llanura. Las secciones relevadas en este estudio presentan relaciones de ancho-profundidad entre 8 y 39 (de acuerdo con lo recomendado por Fischer et al. [3]). De un total de 21 secciones de medición, sólo 3 presentan valores menores a 10, que corresponden a las secciones de Bell Ville y arroyo Las Tortugas, cuando estos se encuentran escurriendo altos caudales en épocas de crecida, debido a que la sección transversal de

Tabla 2
Valores de los parámetros a , b y c de la ecuación 9 calibrados por diferentes autores

Fórmula	a	b	c	Fuente de información*	Rango de B/H_{med} *	Rango de pendiente*	Rango de Fr^*	Adecuado para
Fischer [3]	0,011	2	2	Instalaciones de laboratorio y corrientes naturales (tabla 5.3 Fischer, [3])	-	-	-	-
Liu [19]	0,18	0,5	2	14 ríos	10-85	5,9 E-06 – 1,3 E-03	0,03-0,31	Ríos de baja pendiente, y profundos
Iwasa y Aya [17]	2	0	1,5	62 instalaciones de laboratorio y 79 ríos	1-200	-	-	Puede ser aplicada en ríos anchos ($B/H_{med} < 200$)
Seo y Cheong [18]	5,92	1,43	0,62	26 ríos	16-157	1,0 E-05 – 3,5 E-03	0,04-0,42	Puede ser aplicada en ríos anchos ($B/H_{med} < 157$)
Koussis y Rodríguez-Mirasol [20]	0,6	0	2	16 ríos	15-62	-	0,08-0,27	Ríos profundos

*Los datos de fuente de información, rango de B/H_{med} , rango de pendiente y rango de Fr fueron tomados de la tesis doctoral de Carr [21].

dichos sitios es estrecha. Con respecto a las pendientes, el rango medido se encuentra entre 3,50 E-04 y 1,62 E-04, que está dentro del rango contemplado por Liu [19] y Seo y Cheong [18]. Finalmente, con respecto a los números de Froude, el rango de las mediciones varía entre 0,09 y 0,30, lo cual también se encuentra dentro del rango contemplado por Liu [19] y Seo y Cheong [18], mientras que se excede el límite superior de este parámetro en el caso de la fórmula de Koussis y Rodriguez Mirasol [20]. Además, en este trabajo se comparan los resultados estimados con la ecuación 1 del coeficiente de dispersión con los valores reportados por Rutherford [15], Deng [12], Carr y Rehmann [2] y Shen [10] para diferentes ríos del mundo.

En la figura 5, se detalla, en un diagrama de flujo, la metodología de análisis de información empleada.

3. Resultados

La tabla 3 muestra los parámetros hidráulicos globales obtenidos de cada una de las mediciones realizadas en los distintos sitios de estudio. Se incluye, además, los parámetros representativos de la pen-

diente de cada tramo y de la granulometría del sedimento del lecho (D50). Es importante destacar que los cauces de las secciones analizadas presentan bajas pendientes (del orden del 0,01%) con lecho de arena limosa (clasificación SM del Servicio de Conservación del Suelo de los Estados Unidos-USCS; [22]). Además, se destaca que los cauces del río Saladillo y del arroyo Las Tortugas presentan fuertes alteraciones antrópicas debido a los encauzamientos que se han desarrollado para evacuar los excedentes pluviales. En la tabla 4 se muestran los valores estimados con la ecuación 1 del coeficiente de dispersión longitudinal, utilizando una caracterización hidrodinámica detallada, obtenida de las mediciones realizadas con ADCP en las cuatro secciones del sistema fluvial mencionadas en el apartado anterior para diferentes condiciones hidrológicas. El sistema fluvial presenta un régimen hidrológico con mayores escurrimientos en el periodo de noviembre–abril. La tabla 4, además, incluye los parámetros de las ecuaciones 2 y 3 obtenidos del ajuste estadístico realizado a la distribución de velocidades y batimetría de cada sección transversal. Se incluyen, además, en esa tabla, el parámetro r^2 , que representa el coeficiente de determinación del ajuste realizado, y ECM, que representa el error cuadrático medio de la estimación

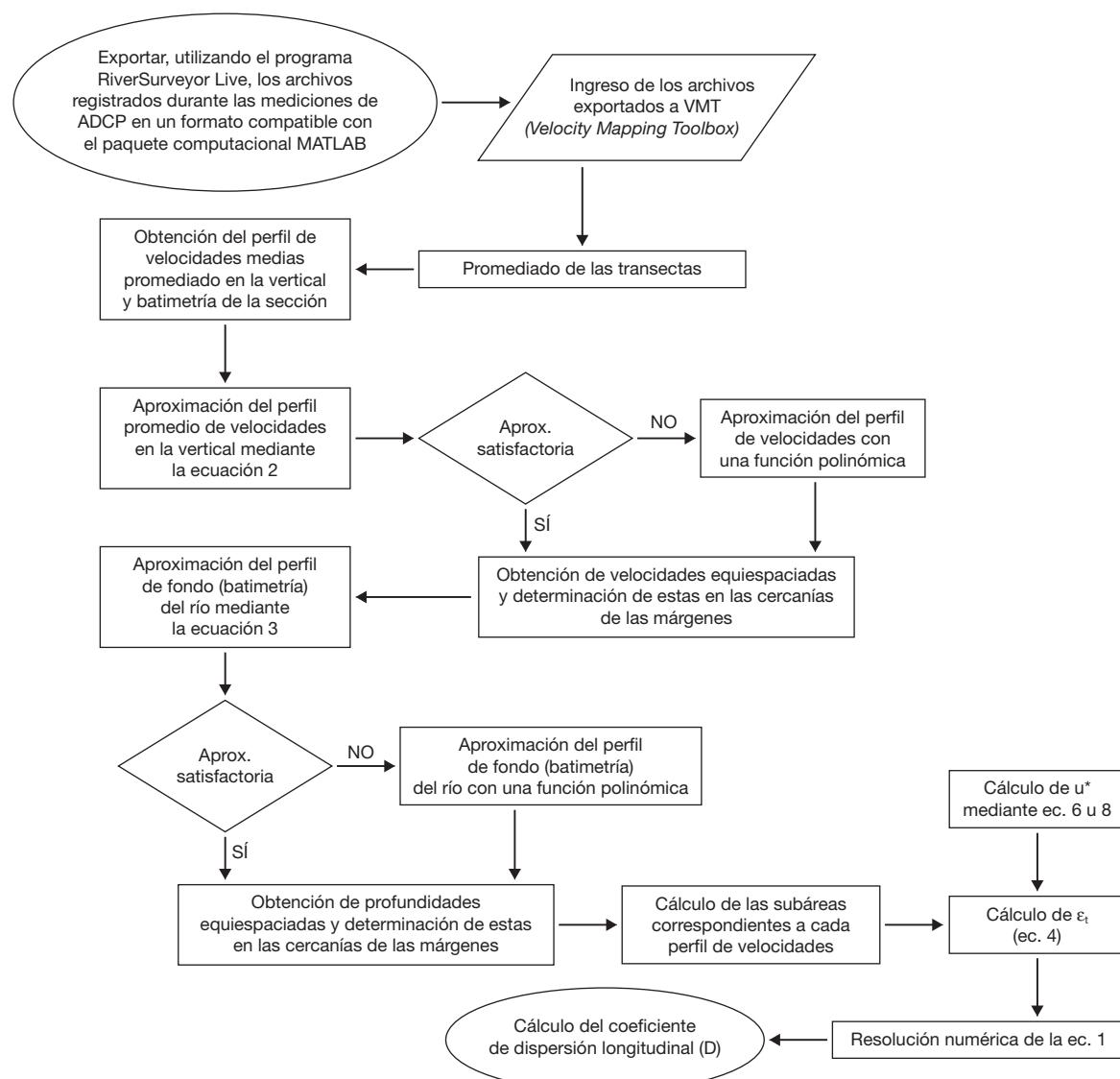


Figura 5. Diagrama de flujo donde se explica la metodología de análisis utilizada en este trabajo.

Tabla 3

Parámetros hidráulicos globales obtenidos de mediciones con ADCP. Se incluye además los parámetros representativos de la pendiente de cada tramo y de la granulometría del sedimento del lecho (D50)

Sección	B [m]	H [m]	A [m ²]	U [m/s]	u* [m/s]	Pend [m/m]	θ	Q [m ³]	D50 [mm]
Arroyo Las Tortugas – Ruta 9	19,07	2,36	45,09	0,95	0,08	0,0003	0,20	43,01	0,10
Arroyo Las Tortugas – Ruta 9	16,42	2,10	34,40	0,70	0,08	0,0003	0,19	24,22	0,10
Arroyo Las Tortugas – Ruta 9	15,76	0,66	10,32	0,66	0,04	0,0003	0,49	6,77	0,10
Arroyo Las Tortugas – Ruta 9	14,02	0,79	11,02	0,25	0,05	0,0003	0,23	2,80	0,10
Río Tercero – Bell Ville	43,14	5,31	229,20	1,07	0,09	0,0002	0,20	245,62	–
Río Tercero – Bell Ville	33,74	3,07	103,62	1,09	0,08	0,0002	0,24	112,85	–
Río Tercero – Bell Ville	25,10	1,22	30,72	0,95	0,05	0,0002	0,48	29,11	–
Río Tercero – Bell Ville	24,81	1,15	28,65	0,87	0,05	0,0002	0,48	25,06	–
Río Tercero – Bell Ville	24,31	1,13	27,43	0,88	0,05	0,0002	0,48	24,15	–
Río Carcarañá – Inriville	47,53	2,77	131,53	1,57	0,10	0,0004	0,38	206,39	0,15
Río Carcarañá – Inriville	41,69	1,60	66,67	1,12	0,07	0,0004	0,53	74,62	0,15
Río Carcarañá – Inriville	42,04	1,38	58,06	0,94	0,07	0,0004	0,58	54,63	0,15
Río Carcarañá – Inriville	40,38	1,27	51,26	0,89	0,07	0,0004	0,60	45,66	0,15
Río Carcarañá – Inriville	36,42	0,93	33,94	0,83	0,06	0,0004	0,80	28,12	0,15
Río Saladillo – Ruta 6	27,53	2,70	74,32	1,21	0,07	0,0002	0,27	89,81	0,10
Río Saladillo – Ruta 6	25,65	1,63	41,92	0,92	0,05	0,0002	0,36	38,48	0,10
Río Saladillo – Ruta 6	23,67	1,46	34,57	0,74	0,05	0,0002	0,34	25,53	0,10
Río Saladillo – Ruta 6	23,01	0,98	22,61	0,66	0,04	0,0002	0,49	14,84	0,10
Río Saladillo – Ruta 6	22,77	1,04	23,76	0,62	0,04	0,0002	0,43	14,75	0,10
Río Saladillo – Ruta 6	22,70	0,94	21,30	0,65	0,04	0,0002	0,51	13,75	0,10
Río Saladillo – Ruta 6	21,71	0,86	18,67	0,49	0,04	0,0002	0,45	9,16	0,10

Tabla 4

Coeficientes de dispersión longitudinal estimados con la ecuación integral de Fischer [3] (ecuación 1) utilizando información experimental proveniente de una caracterización hidrodinámica detallada realizada con ADCP. Los parámetros de las ecuaciones 2 y 3 representan el ajuste realizado a la distribución de velocidades y batimetría de cada sección transversal. En los casos en que estas ecuaciones no presentaban un buen ajuste, se realizaron ajustes con polinomios. El parámetro r^2 representa el coeficiente de determinación del ajuste realizado y ECM representa el error cuadrático medio de la estimación (en m^2/s^2 y m^2 para las ecuaciones 2 y 3, respectivamente)

Sección	Parámetros Ec. 2				Parámetros Ec. 3				Q [m ³ /s]	D [m ² /s]
	α	β	r^2	ECM	γ	r^2	ECM			
Arroyo Las Tortugas – Ruta 9	1,53	1,59	0,95	0,004	Pol. 4. ^o	0,98	0,011	43,01	33,8	
Arroyo Las Tortugas – Ruta 9	1,44	1,88	0,88	0,009	5,06	0,93	0,021	24,22	21,0	
Arroyo Las Tortugas – Ruta 9	2,84	2,79	0,93	0,011	3,89	0,92	0,003	6,77	76,2	
Arroyo Las Tortugas – Ruta 9	Pol. 5. ^o	Pol. 5. ^o	0,93	0,004	2,80	0,90	0,004	2,80	55,0	
Río Tercero – Bell Ville	2,97	2,05	0,96	0,015	2,15	0,90	0,248	245,62	98,9	
Río Tercero – Bell Ville	Pol. 3. ^o	Pol. 3. ^o	0,94	0,014	3,12	0,91	0,075	112,85	60,3	
Río Tercero – Bell Ville	1,66	1,76	0,85	0,016	Pol. 6. ^o	0,96	0,005	29,11	67,2	
Río Tercero – Bell Ville	Pol. 5. ^o	Pol. 5. ^o	0,91	0,006	Pol. 6. ^o	0,96	0,005	25,06	38,3	
Río Tercero – Bell Ville	Pol. 5. ^o	Pol. 5. ^o	0,82	0,018	Pol. 6. ^o	0,93	0,006	24,15	31,7	
Río Carcarañá – Inriville	Pol. 5. ^o	Pol. 5. ^o	0,96	0,022	Pol. 4. ^o	0,91	0,041	206,39	258,2	
Río Carcarañá – Inriville	1,96	1,64	0,88	0,021	Pol. 4. ^o	0,88	0,010	74,62	214,0	
Río Carcarañá – Inriville	2,28	1,87	0,82	0,044	Pol. 6. ^o	0,85	0,018	54,63	256,6	
Río Carcarañá – Inriville	2,07	1,57	0,81	0,032	Pol. 6. ^o	0,72	0,023	45,66	230,3	
Río Carcarañá – Inriville	Pol. 6. ^o	Pol. 6. ^o	0,93	0,006	Pol. 6. ^o	0,75	0,013	28,12	64,1	
Río Saladillo – Ruta 6	1,45	1,68	0,93	0,013	Pol. 6. ^o	0,97	0,025	89,81	70,4	
Río Saladillo – Ruta 6	Pol. 3. ^o	Pol. 3. ^o	0,94	0,005	Pol. 6. ^o	0,96	0,012	38,48	46,7	
Río Saladillo – Ruta 6	1,31	1,62	0,95	0,003	Pol. 5. ^o	0,95	0,012	25,53	26,3	
Río Saladillo – Ruta 6	1,29	1,45	0,82	0,005	Pol. 6. ^o	0,88	0,018	14,84	40,3	
Río Saladillo – Ruta 6	1,26	1,52	0,83	0,004	Pol. 6. ^o	0,91	0,011	14,75	19,0	
Río Saladillo – Ruta 6	1,32	1,43	0,77	0,004	Pol. 6. ^o	0,89	0,013	13,75	20,2	
Río Saladillo – Ruta 6	1,27	1,33	0,64	0,003	Pol. 6. ^o	0,88	0,013	9,16	10,1	

(en m^2/s^2 y m^2 para las ecuaciones 2 y 3, respectivamente). La tabla 4 muestra que no existe una gran variabilidad de los valores de los parámetros de las ecuaciones 2 y 3. En los casos en que estas ecuaciones no presentaban un buen ajuste, se utilizaron ajustes con polinomios.

En la figura 6 (A) (B) (C) y (D), se muestran algunos de los perfiles de velocidad y fondos aproximados en este trabajo.

En la figura 7, se analiza la evolución del coeficiente longitudinal en función del caudal de cada una de las secciones del sistema de estudio. En el caso del río Saladillo, en el que la sección de estudio

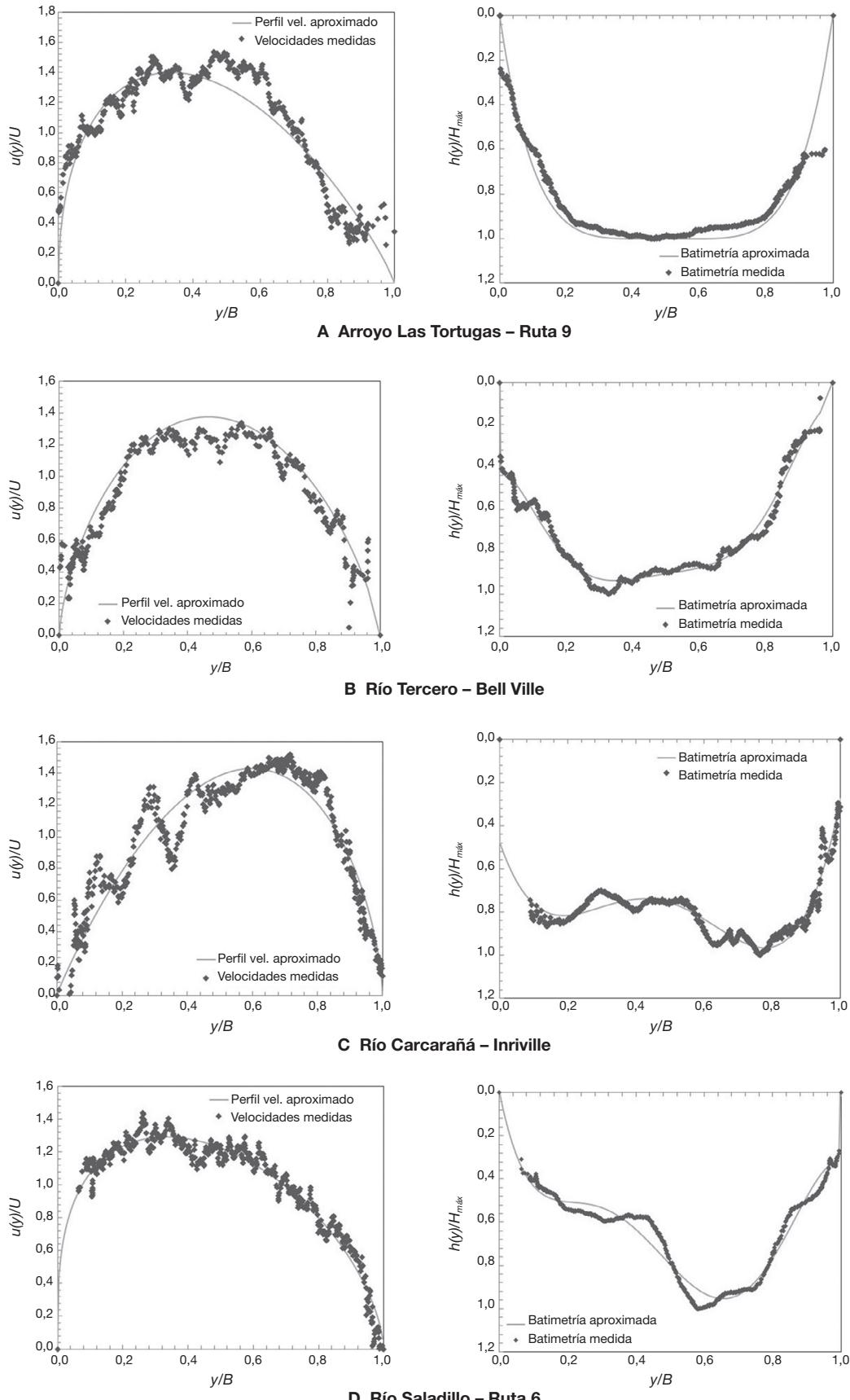


Figura 6. Aproximaciones del perfil de velocidades medidas y batimetrías: (A) Arroyo Las Tortugas, $Q = 24,22 \text{ m}^3/\text{s}$; (B) Río Tercero-Bell Ville, $Q = 29,11 \text{ m}^3/\text{s}$; (C) Río Carcarañá-Inriville, $Q = 74,62 \text{ m}^3/\text{s}$; y (D) Río Saladillo, $Q = 25,53 \text{ m}^3/\text{s}$.

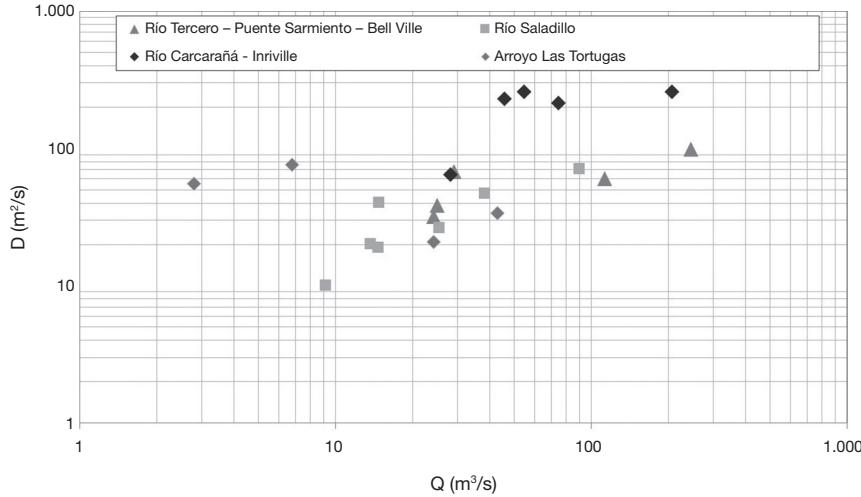


Figura 7. Variación del coeficiente de dispersión longitudinal (D) con el caudal escurrido en las secciones de estudio.

está en las cercanías del puente de la ruta provincial N.^o 6, se observa que el coeficiente de dispersión longitudinal crece a medida que aumenta el caudal. En la sección del río Carcarañá, en la localidad de Inriville, se observa que el coeficiente de dispersión longitudinal (D) crece hasta un determinado caudal y, a partir de allí, se mantiene cuasi uniforme. En el arroyo Las Tortugas, se observa una evolución negativa del coeficiente D a medida que los caudales escurridos aumentan debido a que el flujo presenta mayores gradientes de velocidad (con zonas de estancamiento y recirculación) para aguas medias y bajas. En el río Tercero (Ctalamochita), en la localidad de Bell Ville, el coeficiente de dispersión, al igual que el río Carcarañá en Inriville, crece hasta un determinado caudal y luego se mantiene cuasi constante.

A partir de los parámetros hidráulicos globales (tabla 3), calculados de acuerdo con la información obtenida en campo para este trabajo, se procedió a calcular los coeficientes de dispersión longitudinal, utilizando las seis fórmulas empíricas detalladas en la sección anterior (tabla 2). En la tabla 5 se muestran los resultados obtenidos. Se puede apreciar la gran dispersión de valores de los coeficientes estimados por las diferentes fórmulas para las mismas secciones. Rutherford [15] indica que los resultados obtenidos por las diferentes formulaciones empíricas pueden diferir 10 o más veces para una misma sección, especialmente cuando se los aplica en ríos diferentes a los calibrados. Rigo [1] reporta una gran variación de los resultados obtenidos con las fórmulas empíricas para el río Paraíba do Sul. Es por ello, que se recomienda utilizar con cautela

Tabla 5

Coeficientes de dispersión longitudinal estimados con la ecuación 1 y utilizando ecuaciones empíricas (presentadas en tabla 2), con parámetros hidráulicos globales, determinados de las mediciones con ADCP en las distintas secciones de medición

Sección	D (Fischer [3]) [m ² /s]	D (Liu [19]) [m ² /s]	D (Iwasa y Aya [17]) [m ² /s]	D (Seo y Cheong [18]) [m ² /s]	D (Koussis et al [20]) [m ² /s]	D (Ec. 1) [m ² /s]
Arroyo Las Tortugas – Ruta 9	18,70	7,76	8,91	139,73	7,59	33,8
Arroyo Las Tortugas – Ruta 9	9,06	5,41	7,12	80,85	5,98	21,0
Arroyo Las Tortugas – Ruta 9	41,32	11,49	6,70	58,71	9,85	76,2
Arroyo Las Tortugas – Ruta 9	3,75	4,95	5,62	14,54	7,12	55,0
Río Tercero – Bell Ville	48,19	19,77	22,56	355,25	19,29	98,9
Río Tercero – Bell Ville	57,08	20,26	18,95	262,34	18,84	60,3
Río Tercero – Bell Ville	97,77	20,58	11,83	155,64	16,07	67,2
Río Tercero – Bell Ville	88,78	20,17	11,62	136,48	16,16	38,3
Río Tercero – Bell Ville	89,33	19,76	11,27	135,45	15,69	31,7
Río Carcarañá – Inriville	226,94	57,47	38,40	495,05	47,74	258,2
Río Carcarañá – Inriville	202,12	56,33	31,54	257,14	48,31	214,0
Río Carcarañá – Inriville	181,05	58,63	31,94	196,87	52,87	256,6
Río Carcarañá – Inriville	169,82	56,07	30,07	175,06	50,88	230,3
Río Carcarañá – Inriville	190,04	55,46	25,75	140,71	48,30	64,1
Río Saladillo – Ruta 6	64,94	14,63	12,20	278,39	11,69	70,4
Río Saladillo – Ruta 6	69,12	16,14	10,98	165,55	13,05	46,7
Río Saladillo – Ruta 6	44,98	13,42	9,75	113,16	11,78	26,3
Río Saladillo – Ruta 6	60,97	16,08	9,33	88,08	13,54	40,3
Río Saladillo – Ruta 6	48,81	14,64	9,18	81,61	12,87	19,0
Río Saladillo – Ruta 6	61,51	16,07	9,14	84,64	13,48	20,2
Río Saladillo – Ruta 6	37,04	13,68	8,55	54,82	12,88	10,1

estas expresiones, ya que las diferencias en la estimación del coeficiente de dispersión longitudinal pueden generar resultados que difieren hasta órdenes de magnitud.

A continuación, se incluye un contraste de los coeficientes de dispersión obtenidos a través de las ecuaciones empíricas y los obtenidos mediante la ecuación 1 (integral de Fischer *et al.* [3]) con una caracterización hidrodinámica detallada. Para cuantificar este contraste, se utilizó la relación de discrepancia definida por White *et al.* [23]

$$RD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log\left(\frac{D_{FE}}{D_{ID}}\right) \quad (10)$$

donde N es el número de datos, D_{FE} es el coeficiente de dispersión longitudinal, obtenido mediante alguna fórmula empírica, y D_{ID} es el coeficiente estimado con la ecuación integral 1, con una caracterización hidrodinámica detallada. Si RD es igual a cero, la correspondencia entre el coeficiente de dispersión longitudinal, estimado mediante una caracterización hidrodinámica detallada, y el coeficiente estimado a través de la ecuación empírica es perfecta. Si RD es menor que cero, la fórmula empírica analizada otorga menores valores del coeficiente de dispersión respecto al obtenido mediante la utilización de la ecuación 1 y una caracterización hidrodinámica detallada, mientras que, si es mayor que cero, ocurre lo inverso. En la figura 8 se puede observar que, mediante las ecuaciones empíricas de Fischer *et al.* [3] y Seo y Cheong [18], se obtienen valores mayores del coeficiente de dispersión longitudinal respecto a la metodología utilizada en este trabajo (ecuación 1). La fórmula de Seo y Cheong [18] genera valores mayores del coeficiente de dispersión respecto a otras fórmulas para relaciones de $B/H_{mea} < 40$ (Seo y Baek [4]). Las ecuaciones de Liu [19], Iwasa y Aya [17] y Koussis y Rodríguez-Mirasol [20], en general, arrojan valores menores del coeficiente de dispersión longitudinal que los obtenidos mediante la ecuación 1 en el sistema de estudio. Se observó que la fórmula empírica que mejor se aproxima a los coeficientes de dispersión obtenidos con la ecuación integral 1 [3], con una caracterización hidrodinámica detallada, es la propuesta por Fischer *et al.* [3], la cual presentó una relación de discrepancia de +0,03 (generados por diferencias porcentuales medias del 7%). Finalmente, se contrastan los valores de los coeficientes de dispersión longitudinal estimados con la ecuación integral de Fischer *et al.* [3], (ecuación 1) utilizando información experimental proveniente de una caracterización hidro-

dinámica detallada realizada con ADCP con los coeficientes de dispersión reportados por Rutherford [15], Deng [12], Carr y Rehmann [2] y Shen *et al.* [10] para diferentes ríos del mundo (Fig. 9). Se observa una buena correspondencia entre los valores estimados y los valores reportados. Pero se puede apreciar también la gran variabilidad que poseen los coeficientes de dispersión longitudinales reportados por Rutherford [15], Deng [12], Carr y Rehmann [2] y Shen *et al.* [10] en un gráfico con doble escala logarítmica. La gran variabilidad de los valores del coeficiente de dispersión longitudinal (D) justifica el uso de una metodología que tenga en cuenta las características particulares del flujo, las cuales son tenidas en cuenta a través de la caracterización hidrodinámica con ADCP o bien utilizar una fórmula empírica que contemple las características del río estudiado, pero teniendo en cuenta que, en la mayoría de los casos, pueden no tener en cuenta características locales de la sección. Además, los valores reportados por Rutherford [15] sugieren una evolución creciente del coeficiente de dispersión con el caudal, situación que fue corroborada en solo una sección de estudio en este trabajo.

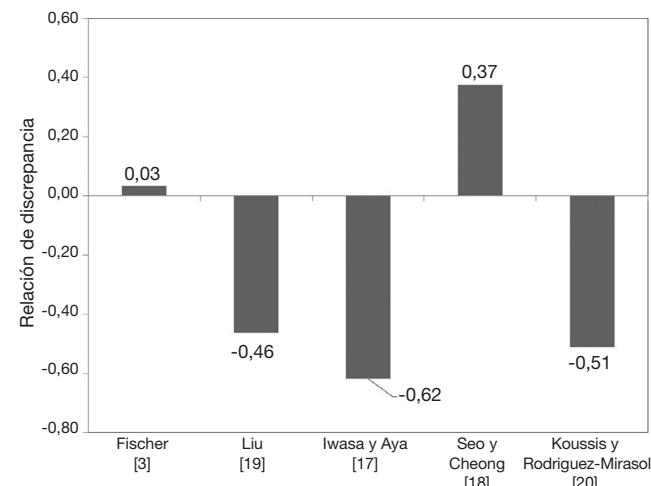


Figura 8. Discrepancia de los valores de coeficiente de dispersión longitudinal estimados con las ecuaciones empíricas y los obtenidos mediante la ecuación integral 1 [3], con una caracterización hidrodinámica detallada.

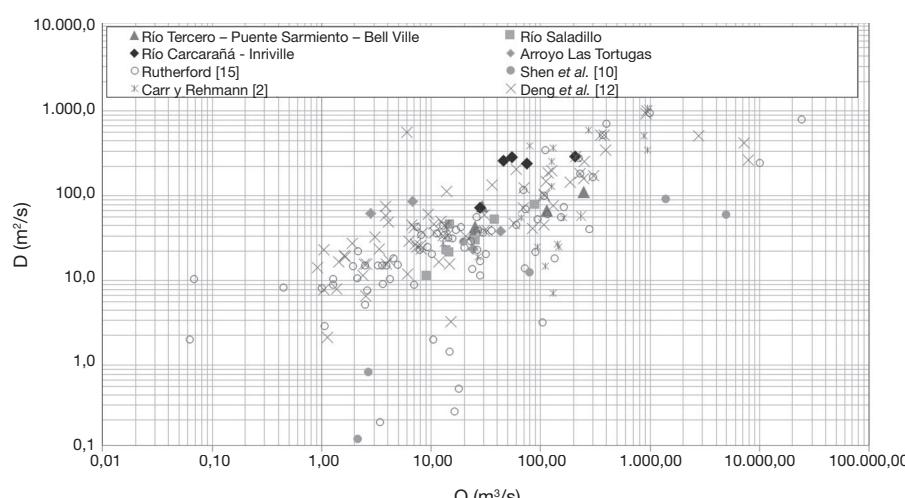


Figura 9. Valores del coeficiente de mezcla longitudinal reportados por Rutherford [15], Deng *et al.* [12], Carr y Rehmann [2], Shen *et al.* [10] y estimados en las diferentes secciones analizadas con la ecuación integral 1 de Fischer *et al.* [3], utilizando información experimental proveniente de una caracterización hidrodinámica detallada realizada con ADCP.

Distintas fuentes de errores e incertidumbre afectan a los valores estimados del coeficiente de dispersión utilizando la ecuación 1: *a*) errores debido a que no se satisfacen, en el tramo del río estudiado, las hipótesis en las que se basa el desarrollo de la ecuación integral 1 (Fischer *et al.* [3]); *b*) errores de medición de las velocidades y profundidades de flujo. En relación con esta fuente de error, Carr y Rehmann [2] reportan errores entre el 45–140% en el coeficiente de dispersión si la región no medida por los perfiladores acústicos Doppler supera el 20% del total; *c*) errores debido a que no es suficiente el número de cruces o transectas utilizados para determinar los perfiles medios de velocidad; *d*) errores debidos al ajuste defectuoso de funciones a los perfiles de velocidades y de batimetría; *e*) errores en la determinación del coeficiente de dispersión transversal y/o a las variables utilizadas para su estimación (por ejemplo, errores en la determinación de la velocidad de corte y la constante θ de la ecuación); *f*) errores debido al método numérico adoptado para la resolución de la ecuación 1. La importancia relativa de cada fuente de error y/o incertidumbre deberán ser analizadas en futuras investigaciones.

4. Conclusiones

La determinación del coeficiente de dispersión longitudinal por métodos tradicionales es una técnica costosa y laboriosa, por lo que diversos autores han desarrollado ecuaciones empíricas que permitan su estimación de acuerdo con parámetros hidráulicos globales. Sin embargo, los resultados obtenidos a través de estas ecuaciones presentan una gran variación, a pesar de que la ecuación haya sido aplicada en ríos de similares características con la que fue ajustada. Por tanto, se requiere una metodología que tenga en cuenta las características particulares del flujo (que se obtienen de una caracterización hidrodinámica detallada) y que permita una evaluación rápida y sencilla del coeficiente de dispersión longitudinal (D). En este trabajo, se estiman los coeficientes de dispersión longitudinal con la ecuación integral (Fischer *et al.* [3]), utilizando información experimental proveniente de una caracterización hidrodinámica detallada y realizada con perfiladores de corriente acústicos Doppler (ADCP) en ríos de la región central de Argentina. En la actualidad, la caracterización hidrodinámica requerida para la implementación de esta metodología puede ser estimada a partir de la gran cantidad de información registrada con ADCP en el sistema fluvial de estudio, generalmente con fines de cuantificación del escurrimiento superficial. En el cálculo de la ecuación integral, se utilizaron funciones de aproximación de los perfiles de velocidad y fondo (batimetría). Los resultados obtenidos en este estudio muestran una adecuada correspondencia con los valores de coeficiente de dispersión reportados para diferentes ríos del mundo de similares características a los estudiados. Sin embargo, los valores recopilados en publicaciones previas sugieren una evolución creciente del coeficiente de dispersión con el caudal escurrido, situación que fue corroborada en solo una sección de estudio en este trabajo, debido a las condiciones particulares de escurrimiento de las distintas secciones.

La metodología utilizada en este trabajo es muy prometedora, ya que posibilita estimar rápidamente el coeficiente de dispersión, teniendo en cuenta las características particulares del flujo, sin requerir grandes inversiones. La realización de aforos periódicos en el sistema de estudio permite analizar la variación del coeficiente de dispersión longitudinal con el caudal y posibilita evaluar la mezcla de un contaminante para diferentes condiciones hidrológicas y comprender, más detalladamente, el comportamiento de los procesos de mezcla en el sistema fluvial.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen al Sr. Domínguez (de la Secretaría de Recursos Hídricos del Gobierno de la Provincia de Córdoba de la Provincia de Córdoba), a COPERAÑA, (Cooperativa de Obras, Servicios Públicos Asistenciales y Vivienda de Carcarañá) y a los bomberos voluntarios de la ciudad de Carcarañá por su colaboración durante el desarrollo de las campañas de aforo. Este estudio se realizó en el marco del proyecto de investigación “Cuantificación y caracterización del flujo de agua en sistemas pluviales de la provincia de Córdoba con fines ambientales”, y fue financiado por la Secretaría de Ciencia y Tecnología (SECyT) de la Universidad Nacional de Córdoba (Argentina).

Símbolos

A continuación se muestran los símbolos utilizados en este artículo junto a sus respectivas unidades.

- A: área de la sección transversal (m^2);
 B: ancho de la sección (m);
 D: coeficiente de dispersión longitudinal (m^2/s);
 D50: diámetro pasante por 50% de la muestra de sedimento;
 $\varepsilon_t(y)$: coeficiente de mezcla transversal en la progresiva y (m^2/s);
 g: aceleración de la gravedad (m/s^2);
 $h(y)$: profundidad en la progresiva y (m);
 H_{\max} : profundidad máxima (m);
 H_{med} : profundidad media (m);
 Q: caudal (m^3/s);
 R: radio hidráulico (m^3/s);
 RD: relación de discrepancia;
 S: pendiente de la línea de energía (mm);
 U: velocidad media de la sección (m/s);
 $u(y)$: velocidad media en la vertical en la progresiva y (m/s);
 $u'(y)$: diferencia entre la velocidad longitudinal en la progresiva transversal con respecto a la velocidad media global en la sección $u(y)$ (m/s);
 u^* : velocidad de corte promedio de la sección (m/s);
 $u^*(y)$: velocidad de corte en la progresiva y (m/s);
 y: coordenada transversal (m);
 α, β : parámetros del perfil de velocidades [4];
 γ : parámetro del perfil de fondo [12];
 Γ: distribución gamma;
 θ : coeficiente utilizado en el cálculo de $\varepsilon_t(y)$.

Bibliografía

- [1] Rigo D. Despersão longitudinal em rios; desempenho de métodos de previsão e de traçadores fluorescentes". Tesis. Rio de Janeiro: Universidad Federal de Rio de Janeiro, COPPE; 1992.
- [2] Carr ML, Rehmann, CR. Measuring the dispersion coefficient with acoustic Doppler current profilers. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2007;133(8):977-82.
- [3] Fischer HB, Lis Ej, Koh RCY, Imberger J, Brooks NH. "Mixing in inland and coastal waters". New York: Academic; 1979.
- [4] Seo IW, Baeil KO. "Estimation of the Longitudinal Dispersion Coefficient Using the Velocity Profile in Natural Streams". *Journal of Hydraulic Engineering*. 2004; 2.
- [5] Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación. (2014) "Cuenca N.º 31: Cuenca del río Carcarañá". Available from: <http://www.hidricosargentina.gov.ar/>
- [6] Cossavella AM, Carranza P, Monarde F, Larrosa N, Roque M, Nuñó, C, et al. "Gestión de efluentes líquidos en la cuenca del río Tercero (Ctalamochita)" San Juan (Argentina): XXIV Congreso Nacional del Agua; 2013.
- [7] Tarrab, L. "Incertidumbres en Mediciones de Caudal con Perfiladores de Corriente Acústicos Doppler desde Plataformas Móviles" [Tesis para alcanzar el grado de Doctor en Ingeniería Civil]. Universidad Nacional de Córdoba (Argentina); 2013.
- [8] Mueller DS, y Wagner CR. "Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat (p. 72)". US Department of the Interior, US Geological Survey. Techniques and Methods 3-A22.Version 2.0, December 2013.

- [9] SonTek. "RiverSurveyor S5/M9 System Manual Firmware Version 3.00" SonTek, San Diego; 2013.
- [10] Shen C, Niu J, Anderson EJ, Phanikumar MS. Estimating longitudinal dispersion in rivers using Acoustic Doppler Current Profilers. *Advances in Water Resources*. 2010;33(6):615–23.
- [11] Bogle GV. Stream velocity profiles and longitudinal dispersion. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1997;123:816–20.
- [12] Deng Z, Singh VP, Bengtsson L. Longitudinal dispersion coefficient in straight rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2001;127(11):919–27.
- [13] Smeithlov BB. Effect of channel sinuosity on river turbulent diffusion. *Yangtze River*. 1990;21(11):62.
- [14] Perucca E, Camporeale C, Ridolfi L. Estimation of the dispersion coefficient in rivers with riparian vegetation. *Advances in Water Resources*. 2009;32(1):78–87.
- [15] Rutherford JC. "River mixing", Wiley Chichester, London (U.K.); 1994.
- [16] Pope SB. Turbulent flows. Cambridge university press; 2000.
- [17] Iwasa Y, Aya, S. Predicting longitudinal dispersion coefficient in open-channel flows. *Proc. Int. Symp. of Environmental Hydraulics*. 1991;505–10.
- [18] Seo IW, Cheong TS. Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1998;124(1):25–32.
- [19] Liu H. "Predicting dispersion coefficient of streams" *Journal of Environmental Engineering, Div. Am. Soc. Civ. Eng.* 1977;103(1):59– 69.
- [20] Koussis AD, Rodriguez-Mirasol J. Hydraulic estimation of dispersion coefficient for streams. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1998;124(3): 317–20.
- [21] Carr ML. "An efficient method for measuring longitudinal dispersion in rivers". [Tesis para alcanzar el grado de Doctor en Ingeniería Civil.] Universidad de Illinois en Urbana-Champaign (EE. UU); 2007.
- [22] Barchiesi GM. "Cuantificación y caracterización del escurrimiento superficial de la cuenca del río Carcarahá" [Informe de práctica supervisada de ingeniería civil.] Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba (Argentina); 2013.
- [23] White WR, Milli H, Crabbe AD. *Sediment transport: An appraisal methods*, Vol. 2: Performance of theoretical methods when applied to flume and field data. Hydraulic Research Statiton Rep. N.º IT119, Wallingford (U.K.); 1973.