

Determinación del Coeficiente de Dispersión Longitudinal en ríos usando ADCP.

José M. Díaz Lozada¹, Federico Caminal¹, Gustavo Matías Barchiesi¹, Horacio Herrero^{1,2}, C.M García^{1,2}

¹ 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

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

Mail de contacto: jmdiazlozada@gmail.com

RESUMEN

El Coeficiente de Dispersión Longitudinal es un parámetro fundamental requerido para implementar un modelo de dispersión de contaminantes en un curso fluvial. Sin embargo su determinación mediante técnicas convencionales, como por ejemplo ensayo de trazadores, requieren una gran inversión en planificación, personal y análisis posterior. Debido a esta dificultad diversos autores han desarrollado fórmulas empíricas que permiten estimar el coeficiente de dispersión longitudinal en base a parámetros hidráulicos globales (profundidad media, velocidad media, ancho, etc). Sin embargo estas expresiones presentan gran dispersión en sus resultados y solo se ajustan adecuadamente en ríos con características similares a las que fueron calibradas. Es por ello que en este trabajo se busca estimar de manera alternativa el coeficiente de dispersión longitudinal mediante una caracterización hidrodinámica detallada realizada en un curso fluvial determinado con un Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP). Se adoptó como sistema fluvial de estudio al río Carcarañá, el cual es monitoreado periódicamente en todo su desarrollo por el grupo de trabajo, de forma de analizar como varía temporal y espacialmente el coeficiente de dispersión longitudinal.

1. INTRODUCCION

La cuenca del Río Carcarañá, en una importante cuenca superficial ubicada en el área central de la República Argentina, la cual abarca gran parte de las provincias de Córdoba y Santa fe. Dentro de la misma se encuentran los ríos Tercero (Ctalamochita), Saladillo y Arroyo Tortugas, los cuales son los principales tributarios del Río Carcarañá (Figura 1). Dada su ubicación en una de las regiones más prosperas del país, los ríos de la cuenca se ven afectados por: (a) Descargas industriales - reconociendo un peligro importante en la localidad de Río Tercero, en donde se localiza un foco industrial-. (b) Descargas cloacales no tratadas adecuadamente (c) Contaminación por agroquímicos, ya que la cuenca abarca una de las zonas agrícolas más ricas del planeta. Debido a esto, se lleva adelante en un esfuerzo conjunto entre tres instituciones de las Provincias de Córdoba y Santa Fe (CETA Universidad Nacional de Córdoba, CIFASIS CCT Rosario y la Secretaría de Recursos Hídricos del Gobierno de la Provincia de Córdoba) monitoreos de calidad de agua y aforos con el objeto de preservar la calidad del recurso y cuantificar y caracterizar el escurrimiento superficial de los cursos que componen dicha cuenca.

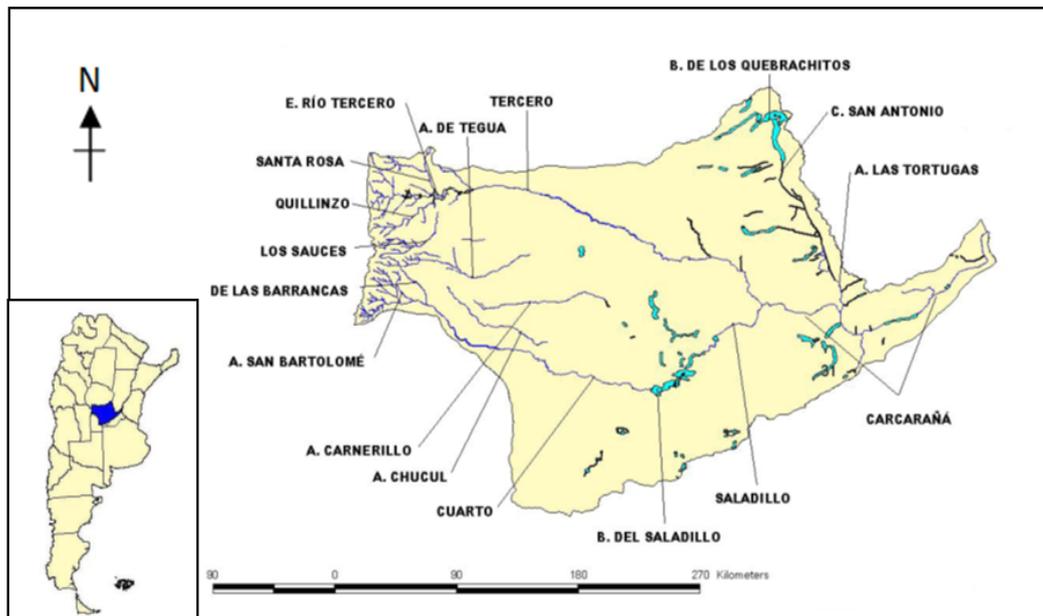


Figura 1.- Cuenca del Río Carcaraña

En la actualidad, el uso de Perfiladores de Corriente Acústicos Doppler (ADCP), permiten mejorar los muestreos obtenidos con técnicas convencionales (por ej. Molinetes), 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. En este trabajo se evalúa el desempeño de las ecuaciones empíricas y se muestra una manera alternativa de determinar el coeficiente de dispersión longitudinal mediante una caracterización hidrodinámica detallada, utilizando los datos de ADCP.

2. MARCO TEORICO

Cuando un contaminante es descargado en un río (Figura 2) lo que sucede puede ser dividido en tres etapas. En una etapa inicial (A) la cantidad de movimiento y la flotabilidad de la descarga determinan la tasa de dilución del contaminante. Cuando los efectos de la cantidad de movimiento y la flotabilidad en los procesos de mezcla se vuelven despreciables, se entra en la segunda etapa (B), en la cual el contaminante es mezclado a lo ancho y hondo del río por la turbulencia propia del flujo. En ríos de baja profundidad este proceso se realiza en muy poco tiempo. Finalmente cuando el contaminante está completamente mezclado en la transversal y la vertical, entra en juego el proceso de dispersión por corte, el cual tendera a eliminar cualquier variación de concentración longitudinal. Cabe destacar que esta última etapa pertenece a lo que se denomina campo lejano mientras que las dos primeras pertenecen al campo cercano.

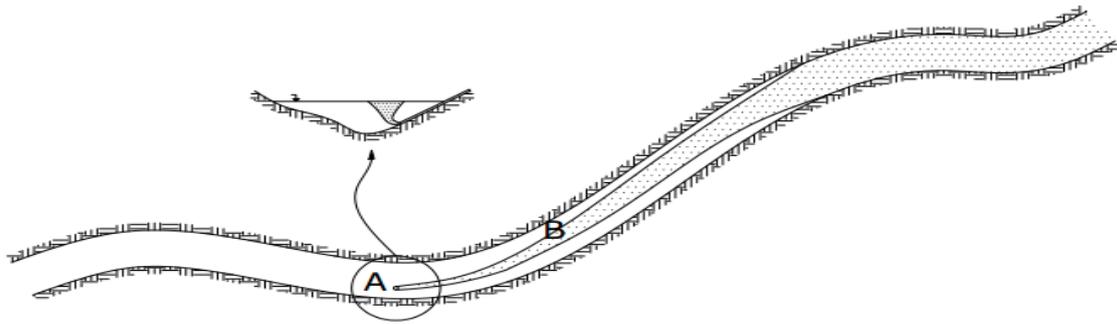


Figura 2: Las tres etapas de mezcla de un contaminante en un río (Fischer, 1979)

Dado que la dispersión por corte es la que perdura por grandes longitudes, muchos autores se han interesado en modelar este proceso, para lo cual es necesario determinar el coeficiente de dispersión longitudinal. Para ello se han calibrado formulas empíricas en base a observaciones de campo, que permiten obtener el coeficiente de dispersión longitudinal en base a parámetros globales del flujo (ancho, velocidad media, etc), los cuales son sencillos de determinar. La ecuación
$$1 \frac{D}{H_{med}U^*} = a \left(\frac{U}{U^*}\right)^b \left(\frac{B}{H_{med}}\right)^c$$
 (muestra la forma general que poseen las ecuaciones empíricas para determinar dicho coeficiente, mientras que en la se muestran Tabla 1 los valores de los parámetros a, b y c calibrados por los diferentes autores.

$$\frac{D}{H_{med}U^*} = a \left(\frac{U}{U^*}\right)^b \left(\frac{B}{H_{med}}\right)^c \quad (1)$$

Tabla 1.- Valores de los coeficientes de la ecuación 1 (Seo y Baek, 2004)

Formula	a	b	c
Elder (1959)	5,920	0,00	0,00
Fischer (1979)	0,011	2,00	2,00
Liu (1977)	0,180	0,50	2,00
Iwasa and Aya (1991)	2,000	0,00	1,50
Seo y Cheong (1998)	5,920	1,43	0,62
Koussis y Rodríguez-Mirasol (1998)	0,600	0,00	2,00

Donde D el coeficiente de dispersión longitudinal, H_{med} la profundidad media, U la velocidad media, B el ancho de la sección y U^* la velocidad de corte calculada a través de la ecuación 2

$$u^* = (g \cdot R_h \cdot S_0)^{0,5} \quad (1)$$

$$u^* = (g \cdot R_h \cdot S_0)^{0,5} \quad (1)$$

Donde g es la aceleración de la gravedad, R_h el radio hidráulico y S_0 la pendiente de energía.

Los valores del coeficiente de dispersión obtenidos mediante la utilización de las formulas empíricas dan resultados muy dispersos y en algunos casos varias veces con grandes diferencias respecto a los valores reales obtenidos mediante ensayo de trazadores. Es por ello que para obtener una mejor estimación del coeficiente de dispersión longitudinal se debe utilizar la ecuación desarrollada por Fischer 1979 basada en una caracterización hidrodinámica detallada (ecuación 3)

$$D = -\frac{1}{A} \int_0^B u'(y)h(y) \int_0^y \frac{1}{u'(h(y))} \int_0^y u'(y)h(y) dy dy dy \quad (2)$$

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) (ecuación 4)

$$\epsilon_t = 0,6 \cdot H \cdot u^2 \quad (4)$$

La ecuación (3) 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, cabe aclarar 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 (2004) (ecuación 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 $\alpha = \beta = 1$, 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 ubicaran en el centro del canal, disminuyendo hacia las márgenes (Figura 3).

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

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

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 (Figura 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.

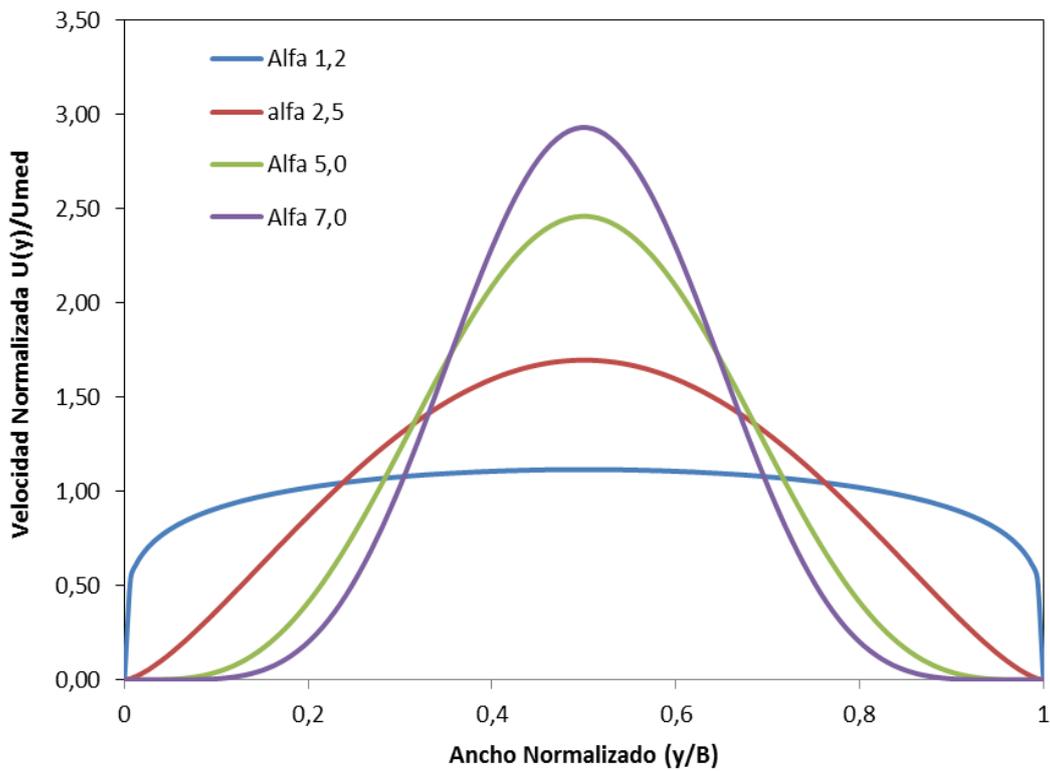


Figura 3: Perfil transversal de velocidades obtenidos utilizando la ecuación (5)

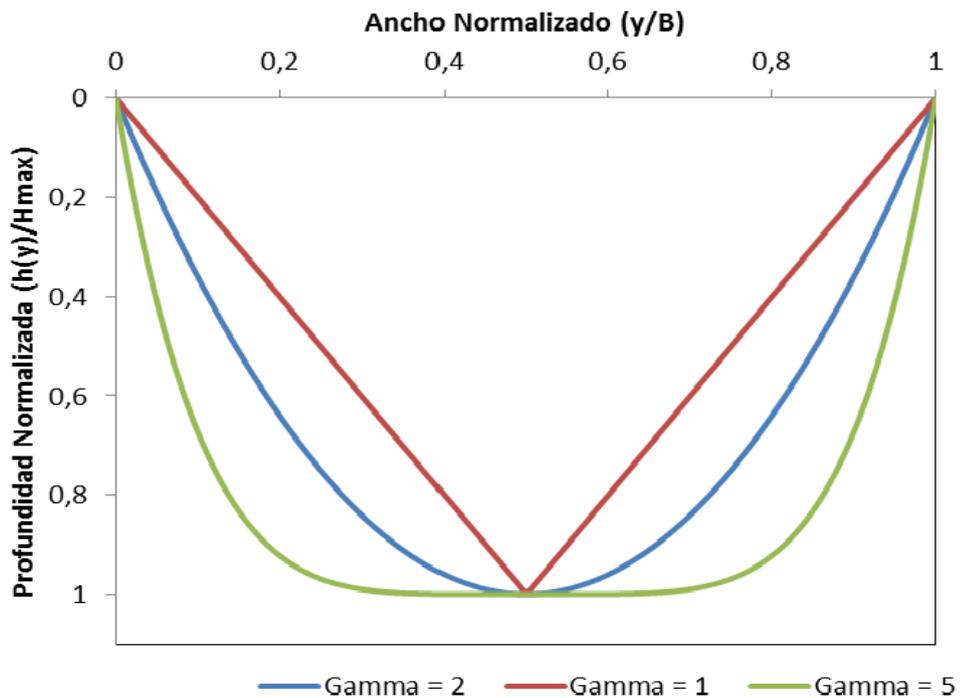


Figura 4.- Distribución transversal de profundidades obtenidas utilizando la ecuación (6).

3. MATERIALES Y METODOS

Los estudios experimentales reportados en este trabajo se desarrollaron en diferentes sitios de la cuenca del río Carcarañá (Figura 5). Se seleccionó estas secciones debido a que en dichos sitios el río es lo suficientemente recto, lo cual evita la presencia de corrientes secundarias y además en ellas no existe interferencia en el flujo producidas por obstáculos como pilas de puente, etc que alteran el campo de flujo medio.

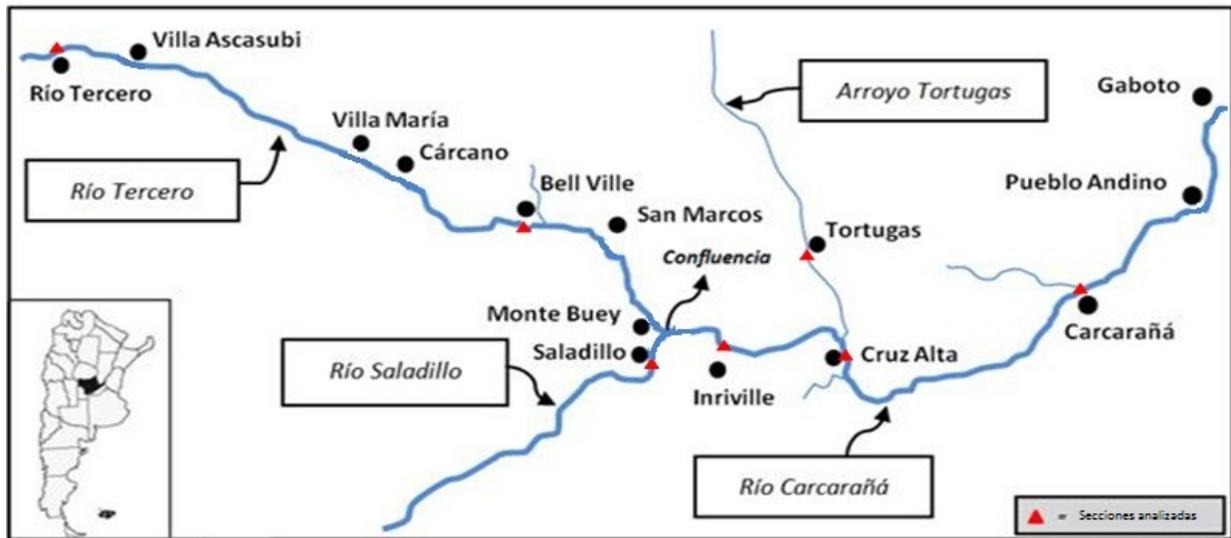


Figura 5.- Ubicación de las secciones de medición utilizadas para este estudio.

Dadas las características de los ríos existentes en la cuenca (cauces naturales poco profundos 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 6) específico para cauces de aguas poco profundas (RiverSurveyor S5 YSI/Sontek ADCP) para la medición de velocidades, caudales y profundidades del flujo con una gran resolución espacial y temporal.

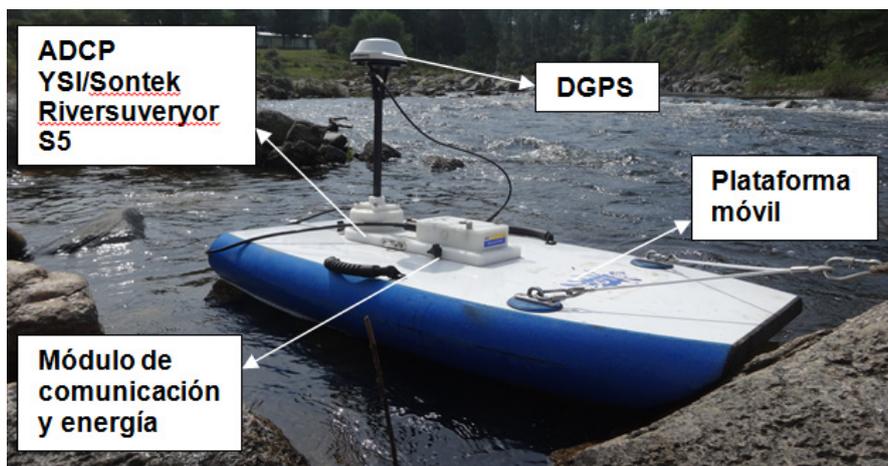


Figura 6.- ADCP RiverSuveyor Live S5 y demás dispositivos montados en la plataforma móvil de medición utilizado para el relevamiento de los datos del flujo necesarios para efectuar este trabajo.

Los Perfiladores de Corriente Acústico Doppler utilizan el efecto Doppler para determinar las velocidades relativas entre partículas en suspensión en el flujo y el instrumento. En la Figura 7; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra el esquema de funcionamiento del ADCP. El instrumento emite una onda acústica a una determinada frecuencia (f_1), la cual es luego reflejada por partículas en suspensión en el flujo (sedimentos, plancton, algas, etc.). La onda acústica reflejada es detectada por el instrumento y la misma posee una frecuencia (f_2) diferente con la que fue emitida. Mediante la determinación de la diferencia de frecuencias entre la onda emitida y reflejada el dispositivo calcula, utilizando el efecto Doppler, la velocidad relativa al instrumento de las partículas en suspensión la cual bajo ciertas hipótesis puede ser asumida igual a la velocidad del flujo (baja inercia de las partículas).

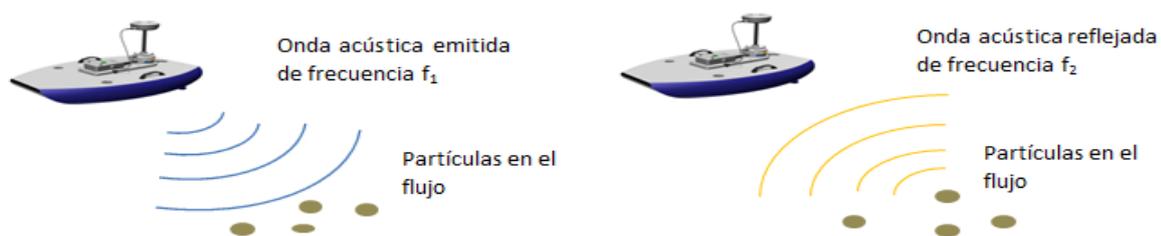


Figura 7.- Esquema de funcionamiento del ADCP

A partir de la información obtenida de las mediciones con el ADCP de las diferentes secciones, se determinó el Coeficiente de Dispersión Longitudinal utilizando las formulas empíricas y ecuación de Fischer (1979) (ecuación 3) utilizando de una caracterización hidrodinámica detallada. Para la utilización de las formulas empíricas se calcularon los parámetros hidráulicos globales de cada una de las secciones transversales estudiadas. Tales parámetros son: (a) Velocidad media global en la sección (U), (b) Profundidad media del flujo (H_{med}), (c) ancho total (B), (d) velocidad de corte (U^*). Mediante dichos parámetros se calculó el coeficiente de dispersión transversal (ϵt) (ecuación 4), y finalmente se calcularon los coeficientes de dispersión longitudinal (D) en todas las secciones mediante la utilización de todas las ecuaciones empíricas mostradas en el apartado 2.

Para el cálculo del Coeficiente de Dispersión Longitudinal (D) en cada sección mediante la ecuación de Fischer (1979) (ecuación 3) fue necesaria, además de calcular los parámetros globales, la información de la distribución transversal de las velocidades longitudinales medias en la vertical, y la geometría de la sección. Los datos de velocidad, al igual que los de la geometría de la sección, se ajustan a una distribución teórica (ecuaciones 5 y 6), y la estimación del Coeficiente de Dispersión Longitudinal D se realiza según la ecuación 3.

4. RESULTADOS

4.1. Resultados obtenidos de la aplicación de las ecuaciones empíricas

Mediante los parámetros hidráulicos globales calculados en base a la información relevada en campo se procedió a calcular los coeficientes de dispersión longitudinales utilizando las formulas empíricas detalladas en el apartado 2 (Tabla 2). Se puede apreciar la importante diferencia de valores entre los coeficientes obtenidos por las diferentes fórmulas para las mismas secciones. Es por ello que en necesario utilizar con

cautela estas expresiones ya que se puede estimar un coeficiente de dispersión longitudinal con un error de varios ordenes de magnitud al coeficiente original.

Tabla 2: Coeficientes de dispersión longitudinales (D) obtenidos a través de las ecuaciones empíricas.

Fecha	Sección	Ecuaciones empíricas						Q [m ³ /s]
		D (Elder) [m ² /S]	D (Fischer) [m ² /s]	D (Liu) [m ² /s]	D (Iwasa y Aya) [m ² /s]	D (Seo y Cheong) [m ² /s]	D (Koussis et al) [m ² /s]	
11/06/2012	Río Tercero - Balneario	0,3041	161,86	81,82	39,28	97,64	85,58	17,22
10/09/2012	Río Tercero - Balneario	0,2680	167,57	85,57	39,46	89,98	89,80	14,79
12/11/2012	Río Tercero - Balneario	0,2967	199,73	96,29	43,59	105,14	99,13	18,51
11/06/2013	Río Saladillo - Ruta 6	0,2543	57,38	15,68	9,33	87,26	13,35	14,84
10/09/2013	Río Saladillo - Ruta 6	0,1998	36,95	13,67	8,55	54,72	12,88	9,21
30/09/2013	Río Carcarañá (Carcarañá)	0,6382	46,70	41,54	32,75	81,65	52,45	32,32
30/09/2013	Río Carcarañá (Cruz Alta)	0,4118	140,55	71,00	38,09	115,25	74,25	33,53
30/09/2013	Río Saladillo - Ruta 6	0,2283	62,20	16,10	9,14	85,51	13,47	13,75
19/11/2013	Río Saladillo - Ruta 6	0,2734	47,55	14,46	9,18	81,68	12,76	14,75
19/11/2013	Río Carcarañá (Carcarañá)	0,9974	87,68	53,07	39,97	166,28	58,95	72,97
19/11/2013	Río Carcarañá (Inriville)	0,3116	191,30	55,59	25,75	141,02	48,35	28,12
19/11/2013	Arroyo Tortugas - Ruta 9	0,9519	9,05	5,42	7,12	80,09	6,00	24,22
10/06/2013	Río Tercero Bell Ville	0,3758	98,081	20,617	11,828	155,399	16,095	29,11
10/06/2014	Río Saladillo - Ruta 6	0,5233	69,140	16,142	10,979	165,563	13,050	38,48
10/06/2014	Río Carcarañá - Inriville	0,7026	202,424	56,353	31,541	257,413	48,312	74,619

4.2. Resultados obtenidos de la aplicación de la integral de Fischer (1979) en base a una caracterización hidrodinámica

Para calcular el coeficiente de dispersión longitudinal (D) mediante esta metodología, fue necesario ajustar mediante las funciones de distribución (ecuaciones 5 y 6) el perfil transversal de velocidades y la geometría de fondo (Figura 8), ya que el perfil obtenido mediante ADCP posee: (a) fluctuaciones debido a la turbulencia propia del flujo (b) datos no equiespaciados (c) en algunas situaciones puede darse que no haya datos medidos en ciertos sectores. El criterio para seleccionar el mejor ajuste fue el mínimo error cuadrático medio. En algunas secciones, las ecuaciones 4 y 5 no producían un ajuste adecuado, ya que los parámetros que poseen estas funciones de distribución pueden ser insuficientes para obtener un ajuste satisfactorio, es por ello que estos casos se utilizaron funciones polinómicas para realizar el ajuste. En contrapartida se puede decir que el ajuste mediante funciones polinómicas le quita generalidad al método de ajuste y no permite comparar los perfiles ajustados.

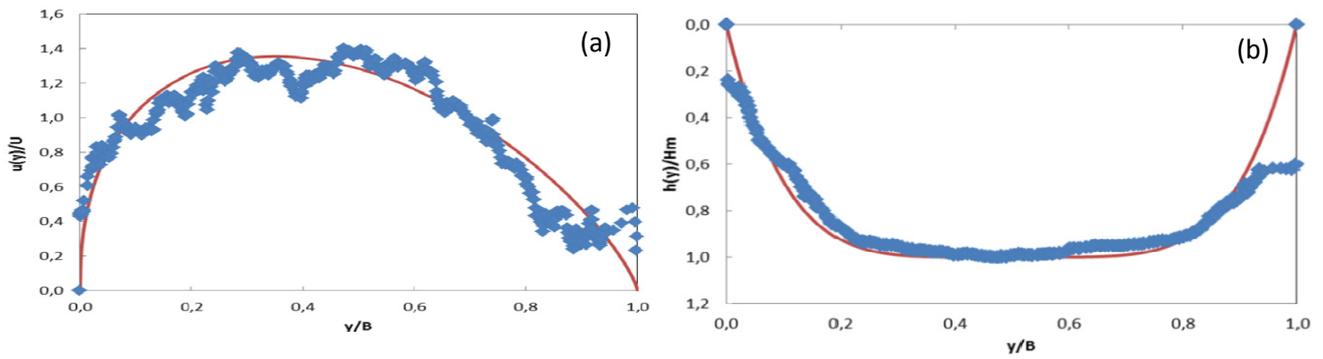


Figura 8.-Ajuste de los perfiles de velocidades y fondo mediante las ecuaciones 5 y 6 (a) Perfil Transversal de Velocidades (b) Geometría de fondo

Ajustados los perfiles de velocidades y de fondo se procedió a resolver la ecuación integral propuesta por Fischer (1979) (ecuación 3) de forma numérica. Los valores del coeficiente de dispersión longitudinal obtenidos [D] se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3.-Coeficientes de dispersión obtenidos mediante la resolución de la ecuación integral propuesta por Fischer (1979)

Fecha	Sección	D	Q
		[m ² /s]	[m ³ /s]
11/06/2012	Río Tercero - Balneario	143,73	17,22
10/09/2012	Río Tercero - Balneario	54,59	14,79
12/11/2012	Río Tercero - Balneario	41,1	18,51
11/06/2013	Río Saladillo – Ruta 6	5,82	14,84
10/09/2013	Río Saladillo – Ruta 6	1	9,21
30/09/2013	Río Carcarañá (Carcarañá)	49,84	32,32
30/09/2013	Río Carcarañá (Cruz Alta)	29	33,53
30/09/2013	Río Saladillo – Ruta 6	6,72	13,75
19/11/2013	Río Saladillo – Ruta 6	10,14	14,75
19/11/2013	Río Carcarañá (Carcarañá)	39,37	72,97
19/11/2013	Río Carcarañá (Inrville)	29,48	28,12
19/11/2013	Arroyo Tortugas – Ruta 9	6,01	24,22
10/06/2013	Río Tercero Bell Ville	33,57	29,11
10/06/2014	Río Saladillo – Ruta 6	27,02	38,48
10/06/2014	Río Carcarañá - Inrville	171,18	74,619

4.3. Comparación entre los coeficientes de dispersión obtenidos a través de las ecuaciones empíricas y los obtenidos mediante la ecuación integral de Fischer (1979) con una caracterización hidrodinámica detallada.

En la Figura 9 (a) se puede observar que la ecuación de Elder (1959) subestima significativamente los valores del coeficiente de dispersión con respecto a los estimados mediante la ecuación integral de Fischer (1979). Las ecuaciones empíricas de Fischer (1979) y Seo and Cheong (1998) sobreestiman el coeficiente de dispersión de longitudinal respecto a la otra metodología y en algunos casos el resultado obtenido es de 2

órdenes de magnitud mayor (Figura 9 (b) y 9(e)). Las ecuaciones de Liu (1977), Iwasa y Aya (1991) y Koussis y Rodríguez-Mirasol (1998) en algunos casos sobreestiman el coeficiente de dispersión y en otros casos los subestiman (Figura 9 (c), 9(d), 9(f)). Para estas tres últimas ecuaciones el error en el coeficiente de dispersión respecto a los obtenidos mediante la ecuación integral de Fischer (1979) es de un orden de magnitud en el peor de los casos.

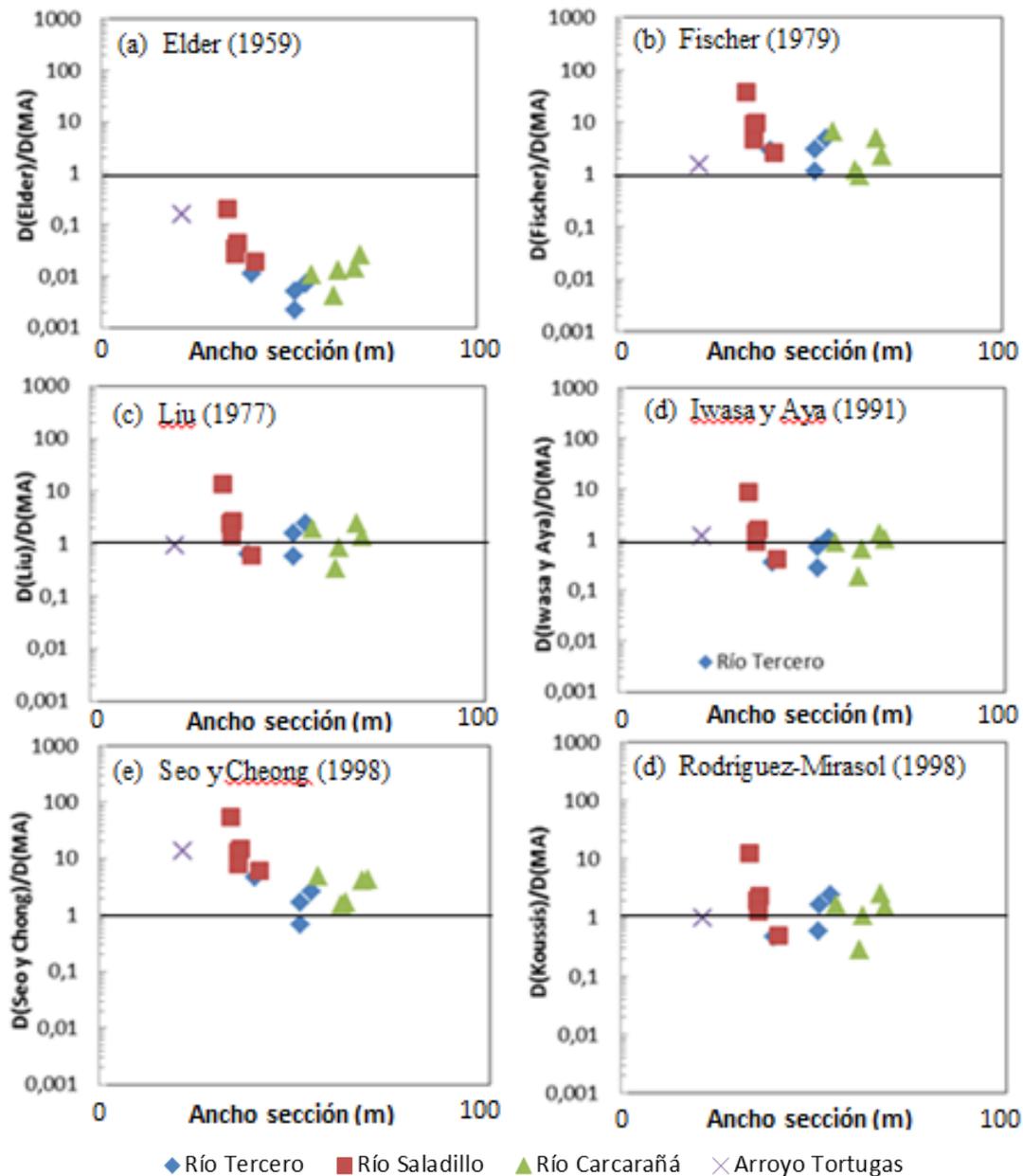


Figura 9: Comparación entre los coeficientes de dispersión obtenidos mediante las ecuaciones empíricas y los obtenidos mediante la ecuación integral de Fischer (1979) en base a una caracterización hidrodinámica detallada.

4.4. Comparación entre los coeficientes de dispersión obtenidos mediante la ecuación integral de Fischer (1979) con una caracterización hidrodinámica detallada y los reportados en diferentes ríos del mundo.

En la Figura 10 se reportan los coeficientes de dispersión obtenidos mediante la ecuación integral de Fischer (1979) en función del caudal junto a los diferentes coeficientes de dispersión reportados por Rutherford (1994) para diferentes ríos del mundo.

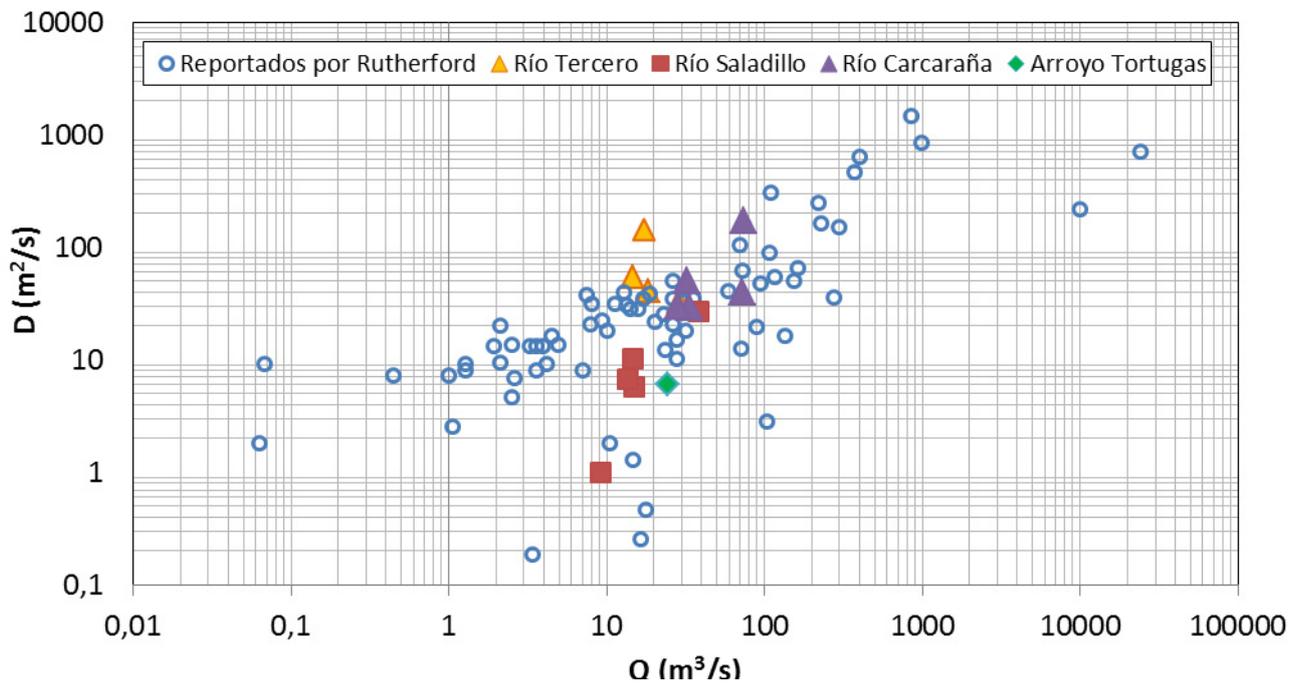


Figura 10.- Valores del coeficiente de mezcla longitudinal reportados por Rutherford (1994) y valores estimados de D de las diferentes secciones analizadas.

Se observa una buena correspondencia entre los valores estimados y los valores reportados, pero se puede apreciar también, la gran dispersión que poseen los coeficientes de dispersión longitudinales. Esto justifica el uso de una metodología que incluya las características particulares (perfiles transversales de velocidad y batimetría) en el cálculo de dicho coeficiente.

5. CONCLUSIONES

Al finalizar la realización de este trabajo se arribaron a las siguientes conclusiones:

- El alto costo y complejidad en la ejecución de un ensayo de trazadores para la obtención del coeficiente de mezcla longitudinal justifica el desarrollo de técnicas alternativas para la obtención del mismo.
- Las ecuaciones empíricas disponibles en el estado del arte que utilizan variables hidrodinámicas globales presentan una gran dispersión en los resultados, con diferencias de varios órdenes de magnitud, lo cual requiere su utilización con suma cautela.
- Los aforos mediante el uso de ADCP se realizan de forma periódica y cada vez son más comunes. Sobre los datos disponibles luego de realizar estos aforos, y mediante la metodología propuesta en este trabajo, es posible obtener una estimación del coeficiente de dispersión longitudinal en las diferentes secciones aforadas de forma rápida y con un muy bajo costo.

- El ajuste de perfiles de velocidad y fondo mediante funciones de aproximación permite resolver la integral de Fischer (1979) utilizando datos equiespaciados, ya que los datos provistos por el ADCP no son reportados de esta forma. Además la utilización de perfiles permite la estimación de datos en sitios donde no ha habido registro por diferentes motivos y utilizar un perfil sin fluctuaciones debida a la turbulencia.
- La utilización de perfiles de aproximación utilizando funciones polinómicas permite un mejor ajuste de los perfiles obtenidos con ADCP, ya que los mismos poseen una mayor cantidad de parámetros, pero como contrapartida se puede decir que el método pierde generalidad.
- Mediante la metodología propuesta en este trabajo se puede conocer la variación espacial y temporal del coeficiente de dispersión longitudinal para diferentes tramos del río Carcarañá y sus Tributarios.
- Los coeficientes de dispersión obtenidos mediante la resolución de la ecuación integral de Fisher (1979) presenta una buena correspondencia con los valores reportados en diferentes sitios del mundo. Pero dada la gran dispersión de los valores se 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.

6. REFERENCIAS

- Deng, Z., Singh, V. P., and Bengtsson, L.(2001). “*Longitudinal dispersion coefficient in straight rivers*” J. Hydraul. Eng., 127 (11), 919–927
- Elder J.W (1959) “*The dispersion of a marked fluid in turbulent shear flow*” J. Fluid Mech, Cambridge, U.K.
- 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.
- Iwasa, Y., and Aya, S (1991). “*Predicting longitudinal dispersion coefficient in open-channel flows.*” Proc., Int. Symp. on Environmental Hydraulics, 505–510.
- Koussis, A. D., and Rodriguez-Mirasol, J.(1998). “*Hydraulic estimation of dispersion coefficient for streams*” J. Hydraul. Eng.,124(3), 317–320.
- Liu, H. (1977). “*Predicting dispersion coefficient of streams*” J. Environ.Eng. Div. (Am. Soc. Civ. Eng.), 103 (1), 59–69.
- Rutherford, J. C.(1994). “*River mixing*”, Wiley, London.
- Seo I.W, and Baek, K.O “*Estimation of the Longitudinal Dispersion Coefficient Using the Velocity Profile in Natural Streams*” J. of Hydraulic Engineering
- Seo, I. W., and Cheong, T. S.(1998). “*Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams.*’ J. Hydraul. Eng.,124(1), 25–32.