



INCERTIDUMBRE EN LA MEDICIÓN DE CAUDALES Y SUS EFECTOS EN LA DEFINICIÓN DE MEDIDAS DE CONTROL DE INUNDACIONES. CASO DE ESTUDIO: CRECIDA DEL RÍO MISSISSIPPI EN ABRIL Y MAYO DEL 2011

Leticia Tarrab^{1,2}, Carlos Marcelo García^{1,2} y Kevin Oberg³

¹ CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas), Argentina.

² Centro de Estudios y Tecnología del Agua, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

³ U.S. Geological Survey, Office of Surface Water, Estados Unidos.
E-mail: ltarrab@efn.uncor.edu

RESUMEN

Durante la crecida del río Mississippi en abril y mayo de 2011, el Servicio Geológico de los EEUU (USGS) y el Cuerpo de Ingenieros de los EEUU realizaron mediciones diarias de caudal en el sitio Tarbert Landing (Estado de Mississippi) utilizando perfiladores de corriente acústicos Doppler (ADCPs) con el fin de proveer información para la operación de la estructuras de control de inundaciones a lo largo del Rio Mississippi. Se observaron diferencias significativas en los caudales medidos durante la crecida, generando incertidumbres en la toma de decisiones para la operación de las estructuras de control. En la actualidad, no se ha determinado el origen de estas fluctuaciones. Identificar, cuantificar y reducir la incertidumbre en los caudales medidos es importante para el futuro funcionamiento del sistema de protección contra inundaciones y es el objetivo principal de la presente investigación. Este trabajo presenta un análisis preliminar de las mediciones de caudal realizadas el 15 de mayo por el USGS en el río Mississippi en el sitio de Tarbert Landing. Los datos de velocidad medidos con ADCP indican que el perfil transversal de velocidades medias presente en la sección transversal no es atípico. Se estimaron las incertidumbres esperadas en base al cálculo de la varianza relativa mediante un modelo conceptual, y las mismas fueron menores a las observadas en los datos medidos. Las grandes incertidumbres en los caudales medidos podrían ser producidas por la presencia de fluctuaciones de baja frecuencia inducidas por la geometría del cauce (curva aguas arriba y confluencia aguas debajo de la sección analizada)

ABSTRACT

During the Mississippi River floods in April and May 2011, daily discharge measurements were made at Tarbert Landing (Mississippi State) by the U.S. Geological Survey (USGS) and the U.S. Army Corps of Engineers (the Corps) using Acoustic Doppler Current Profiles (ADCPs) in order to facilitate the Corps' operation of the flood control structures along the Lower Mississippi River. Differences in measured discharges were observed during the flood, leading to uncertainty in decision making for control-structure operation. The source of these fluctuations is not well understood at present. Identifying, quantifying, and reducing the uncertainty of measured discharge is important to future operation of the Corps' flood protection system and is the subject of ongoing research. This paper presents a preliminary analysis of flow discharge measurements performed by the USGS on May, 15th on the Mississippi River at Tarbert Landing. Analysis of ADCP velocity data indicates that the transverse mean velocity distribution is not atypical. Furthermore, the estimated variance error using a conceptual model for measured discharges is much less than the observed variation in measured discharge. Explanations suggested for these large uncertainties include unsteadiness of the flow velocity field due to the presence of low frequency fluctuations resulting from channel geometry (upstream bend and downstream confluence).

INTRODUCCIÓN

Las inundaciones del río Mississippi (Estados Unidos – EEUU), ocurridas en Abril y Mayo del 2011, han sido unas de las más grandes y perjudiciales registradas en el último siglo, comparables en magnitud a las grandes inundaciones de los años 1927 y 1993.

Durante esos meses, equipos de técnicos y científicos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) realizaron intensivas mediciones de caudal en diferentes sitios del sistema del río Mississippi con el fin de proveer al Cuerpo de Ingenieros de EEUU (USACE) información hidrológica básica para definir medidas de control de inundaciones. El USACE utiliza cuatro elementos principales para controlar las crecidas en el sistema del Río Mississippi: a) diques y albardones para contener el flujo en el cauce principal, b) mejoras en el canal principal c) vías de escape (por ejemplo, compuertas) ubicadas en distintos tramos del sistema para el desvío de caudales excedentes hacia la planicie de inundación y/o otros sistemas y d) mejoras en las cuencas de los tributarios y construcción de estructuras de control de inundaciones en esa cuencas (reservorios, canales auxiliares, etc.).

La precisa determinación experimental de los caudales presentes en distintos tramos del sistema (la precisión se define a partir de un análisis de las incertidumbres de los valores mencionados) durante una crecida, es muy importante para optimizar la operación de las vías de escape de los caudales excedentes. Por ejemplo, las vías de escape en la cuenca inferior del río Mississippi se prevén operar para mantener los caudales por debajo de los 42000 m³/s (1500000 ft³/s) de modo de asegurar la integridad del sistema de diques y albardones.

Una de las vías de escape en el sistema, el vertedero Morganza (MS, ver localización en Figura 1) construido entre el río Mississippi y la cuenca del río Atchafalaya, normalmente se encuentra cerrado, pero se puede abrir en para desviar el caudal adicional del río Mississippi en el río Atchafalaya y de esta manera aliviar los niveles de agua y la presión sobre los diques y otras estructuras de control del flujo, incluyendo la estructura de control de Old River (ORCS, ver localización en Figura 1). Esta estructura (ORCS) es un sistema de compuertas ubicado en una rama del río Mississippi en el centro de Luisiana, y opera normalmente (incluso en periodos de aguas normales) para desviar caudales hacia el río Atchafalaya.

El 14 de mayo de 2011, en función de los caudales presentes en el sistema, se decidió abrir una compuerta del sistema de vertedero en Morganza. Esta fue la primera apertura del vertedero desde la inundación del año 1973. La apertura del vertedero (que fue necesaria para evitar inundaciones en Baton Rouge y Nueva Orleans), afectó la cuenca del río Atchafalaya y redujo la presión en la estructura de control Old River (ORCS) ubicada aguas arriba. El 15 de mayo de 2011, el Cuerpo de Ingenieros había abierto un total de nueve compuertas.

Ese mismo día (15 de mayo de 2011), el USGS realizó un conjunto de mediciones de caudal en el río Mississippi, en el sitio Tarbert (Figura 1), situado aguas arriba del vertedero de Morganza (MS) y aguas debajo de la estructura ORCS. Los caudales observados ese día en cada transecta (cruce del río) se muestran en la Figura 2, los mismos oscilan alrededor del valor mencionado de 42000 m³/s (el cual es crítico para la definición de medidas de control de inundaciones) resultando los parámetros que cuantifican a la incertidumbre en las mediciones de caudal mayores a los esperados para las técnicas acústicas utilizadas, generando dudas en la definición de las medidas de control en ese momento



Figura 1.-Ubicación del sitio de estudio

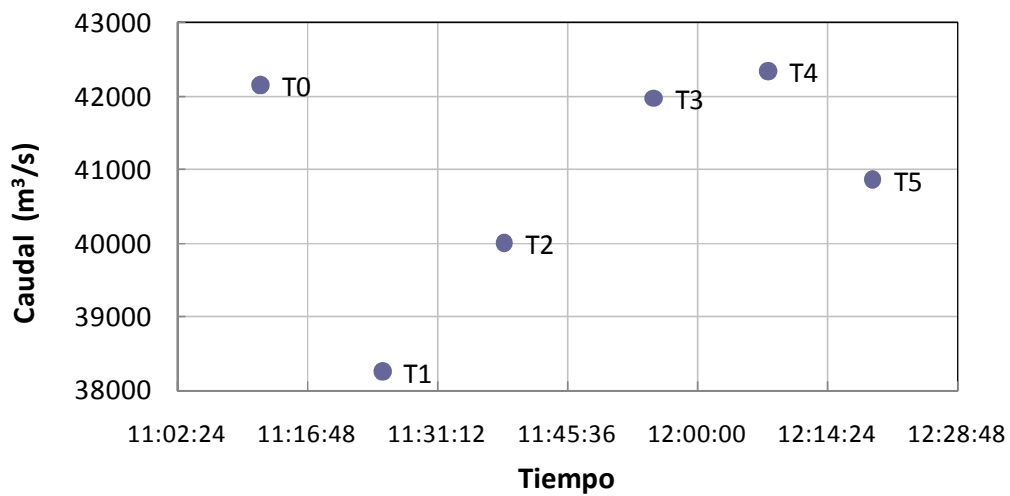


Figura 2.-Caudales medidos el 15 de Mayo de 2011

OBJETIVOS

El objetivo del presente trabajo es analizar las mediciones de caudal (incluyendo un análisis de incertidumbre) realizadas por el USGS el 15 de mayo de 2011 en el río Mississippi, EEUU, caracterizando las condiciones del flujo presentes con el fin de explicar la incertidumbre asociada a esas mediciones.

METODOLOGÍA

Seis mediciones individuales de caudal (seis cruces o transectas) fueron realizadas por el USGS el 15 de Mayo en el Río Mississippi en el sitio Tarbert Landing (Figura 3, USGS Station ID 07295100; Latitud 31°00'30"; Longitud 91°37'25") ubicado aguas arriba del vertedero de Morganza (MS) y aguas debajo de la estructura ORCS. Las mediciones fueron realizadas con un perfilador de corrientes acústico Doppler (ADCP) RDI® RioGrande de 600KHz desde una plataforma móvil. Los caudales fueron determinados utilizando GPS (GGA) como referencia para la velocidad del bote.



Figura 3.-Sitio de medición

Se analizaron, en primera instancia, las condiciones medias de flujo presentes durante las mediciones en la sección de estudio. Para ello, se graficaron los perfiles transversales de la magnitud de la velocidad promediados en la vertical ($u(y)$) para las diferentes transectas y se ajustaron (utilizando mínimos cuadrados) a la ecuación (1) propuesta por Rehmann et al. (2009):

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

donde U es la velocidad media en la vertical, B es el ancho, y es la coordenadas en la dirección transversal, $\Gamma(\gamma)$ es la función gamma, y α y β son parámetros que determinan la asimetría y la kurtosis del perfil de velocidades. Con el fin de evaluar si existen características particulares de las condiciones de flujo observadas que expliquen la incertidumbre obtenida en las mediciones de caudal, los valores de α y β ajustados para las distintas transectas se compararon con los obtenidos por otros autores mediante el análisis de condiciones de flujo observadas en otros ríos.

Luego, se utilizó un modelo conceptual propuesto por García et al. (2011) para predecir las incertidumbres en las mediciones del caudal, focalizándose específicamente en los errores aleatorios en las mediciones de caudal con ADCP desde plataformas móviles y su relación con el tiempo de muestreo. En base a este modelo, la varianza relativa en las mediciones del caudal puede ser cuantificada con la siguiente formulación:

$$RVar[Q_T] = \frac{I_u^2 \cdot \Delta t}{nT} \quad (2)$$

donde $I_u = \sigma_u/U$ es una medida de la dispersión de la velocidad del flujo, n = número de celdas en la vertical, T = tiempo de medición, f = frecuencia de muestreo y $\Delta t = 1/f$ = intervalo de muestreo.

RESULTADOS

En la Tabla 1 se muestran para cada transecta los parámetros principales relacionados a las condiciones de flujo durante las mediciones realizadas y en la Tabla 2 se muestran las características relacionadas a la configuración del instrumento y a la metodología experimental adoptada.

Tabla 1.- Condiciones de flujo en cada sitio

Medición	Caudal Total	Caudal Medido	Error relativo	Ancho	Area	Velocidad media del agua	Profundidad media	Numero de Froude	
	Q [m ³ /s]	Q_m [m ³ /s]	RE [%]	B [m]	A [m ²]	V_w [m/s]	H [m]		
Tarbert Transecta 0	42154.7	37166.4	2.99	1175	22705	1.83	19.33	61	0.13
Tarbert Transecta 1	38249.9	33709.2	-6.55	1173	22278	1.65	18.99	62	0.12
Tarbert Transecta 2	39998.1	35228.0	-2.28	1172	22437	1.77	19.14	61	0.13
Tarbert Transecta 3	41980.2	36928.1	2.56	1177	22265	1.91	18.92	62	0.14
Tarbert Transecta 4	42346.9	37227.2	3.46	1167	22226	1.89	19.05	61	0.14
Tarbert Transecta 5	40864.0	35961.4	-0.17	1174	22287	1.82	18.98	62	0.13
Promedio	40932.3	36036.7	0	1173	22366	1.81	19.07	62	0.13

Tabla 2.- Condiciones de registro en cada sitio

Medición	Numero de Perfiles	Duración	Velocidad del bote
	N_e	T [s]	V_b [m/s]
Tarbert Transecta 0	1339	796	1.46
Tarbert Transecta 1	1338	791	1.491
Tarbert Transecta 2	990	585	2.011
Tarbert Transecta 3	1203	710	1.672
Tarbert Transecta 4	1156	685	1.706
Tarbert Transecta 5	1049	620	1.89
Promedio	1179	698	1.71

Configuración de muestreo:
 Blanking distance = 25cm, Water ping = 1, Bottom Mode = 5, Bottom pings = 1
 Frecuencia = 600-kHz, Modo 12, $f = 1.69$ Hz, Tamaño de celda = 50cm

El error máximo relativo de los caudales medidos ocurrió en la transecta 1 (T1) y fue de

6.55%, en donde el error relativo para cada transecta es calculado como:

$$RE[Q_i] = \frac{Q_i - Q_{av}}{Q_{av}} \quad (3)$$

La varianza relativa en la medición de las seis transectas calculada con la ecuación (4) fue de 0.151%.

$$RVar[Q_T] = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \frac{(Q_i - Q)^2}{Q^2} \quad (4)$$

Análisis de las condiciones de flujo

En la Figura 4 se muestran los perfiles transversales de las magnitudes de velocidad promediados en la vertical para las seis transectas analizadas. En la misma se observan las mayores diferencias en las velocidades medidas durante los distintos cruces en la zona cercana a la margen derecha ($y = 0$).

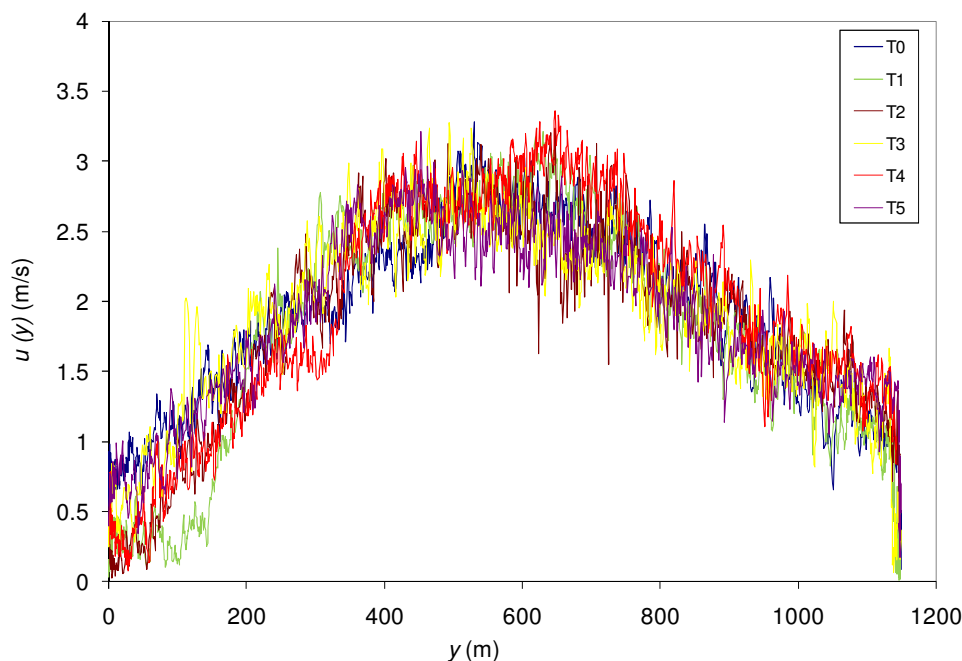


Figura 4.- Perfiles transversales de magnitudes de velocidad promediados en la vertical. El valor de $y=0$ corresponde a la margen derecha

En lo que se refiere al aspecto general de estos perfiles, la Figura 5 muestra el perfil de velocidades sintético determinado con la ecuación (1) y su comparación con las velocidades medidas para la transecta 1 (T1) que fue la que presentó un mayor error máximo. Los valores de α y β ajustados a la ecuación (1) para transecta 1 fueron de $\alpha = \beta = 2.02$. Similares valores de los parámetros se obtuvieron para las otras transectas. Estos valores se encuentran en el rango de la mayoría de los valores estimados para diferentes ríos (Seo y Baek, 2004), lo cual muestra que no hay características especiales en la distribución transversal de velocidades medias en la vertical en el caso analizado.

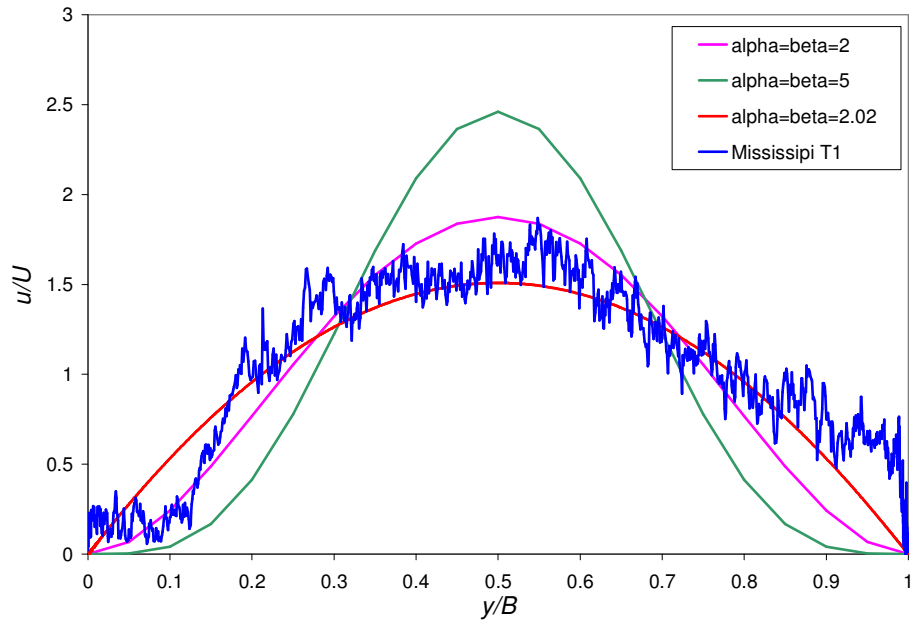


Figura 5.- Perfiles transversales de magnitudes de velocidad estimados con la ecuación (1) en la transecta T1. El valor de $y=0$ corresponde a la margen derecha.

A los fines de evaluar el comportamiento del campo de velocidades en diferentes profundidades, en la Figura 6 se comparan las distribuciones de velocidades en diferentes celdas de la vertical (bins) para la transecta 1, la cual fue la que mayor error en el caudal medido presentó. Los perfiles de velocidad muestran un comportamiento muy similar al perfil medio, presentando el perfil de velocidades medio menor varianza.

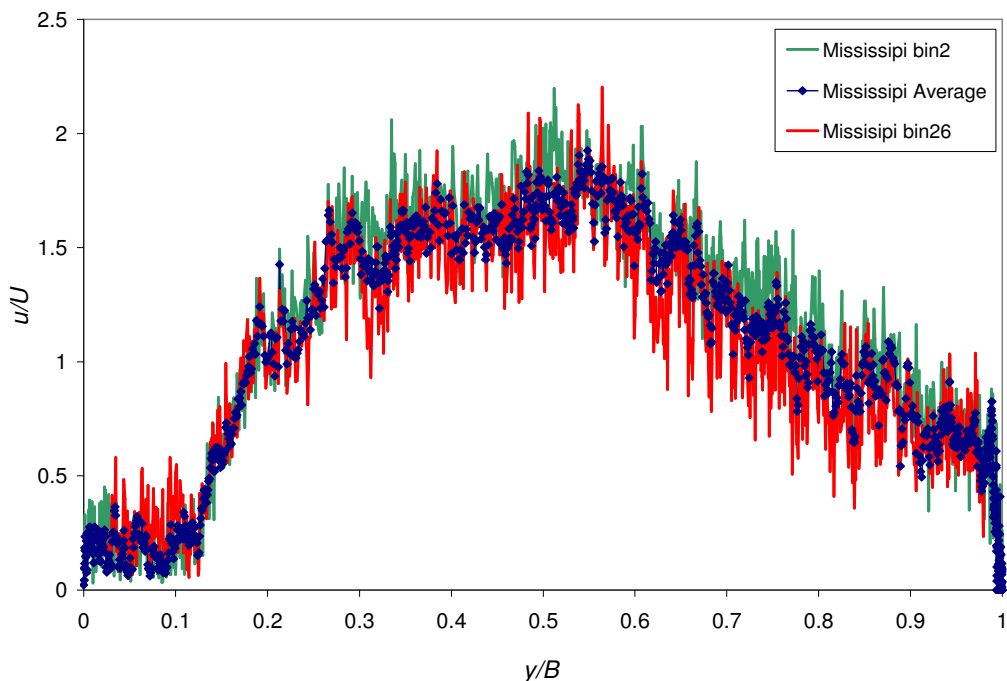


Figura 6. Distribución transversal de velocidades presente a diferentes profundidades y su comparación con el perfil de velocidades medio en la vertical para la transecta 1 (T1). El valor de $y=0$ corresponde a la margen derecha

En la Figura 7 se muestran los vectores de velocidades de flujo medidos en las trayectorias realizadas por la embarcación en cada transecta a los fines de analizar la evolución temporal de la distribución transversal de velocidades en las seis transectas medidas. En la zona cercana a la margen derecha se observa un cambio en el patrón del flujo en las mediciones realizadas, variando la magnitud de la velocidad e invirtiéndose la dirección de la misma en algunos casos (Figura 7 b)), lo cual indicaría la presencia de fluctuaciones de baja frecuencia la región cercana a al margen derecha.

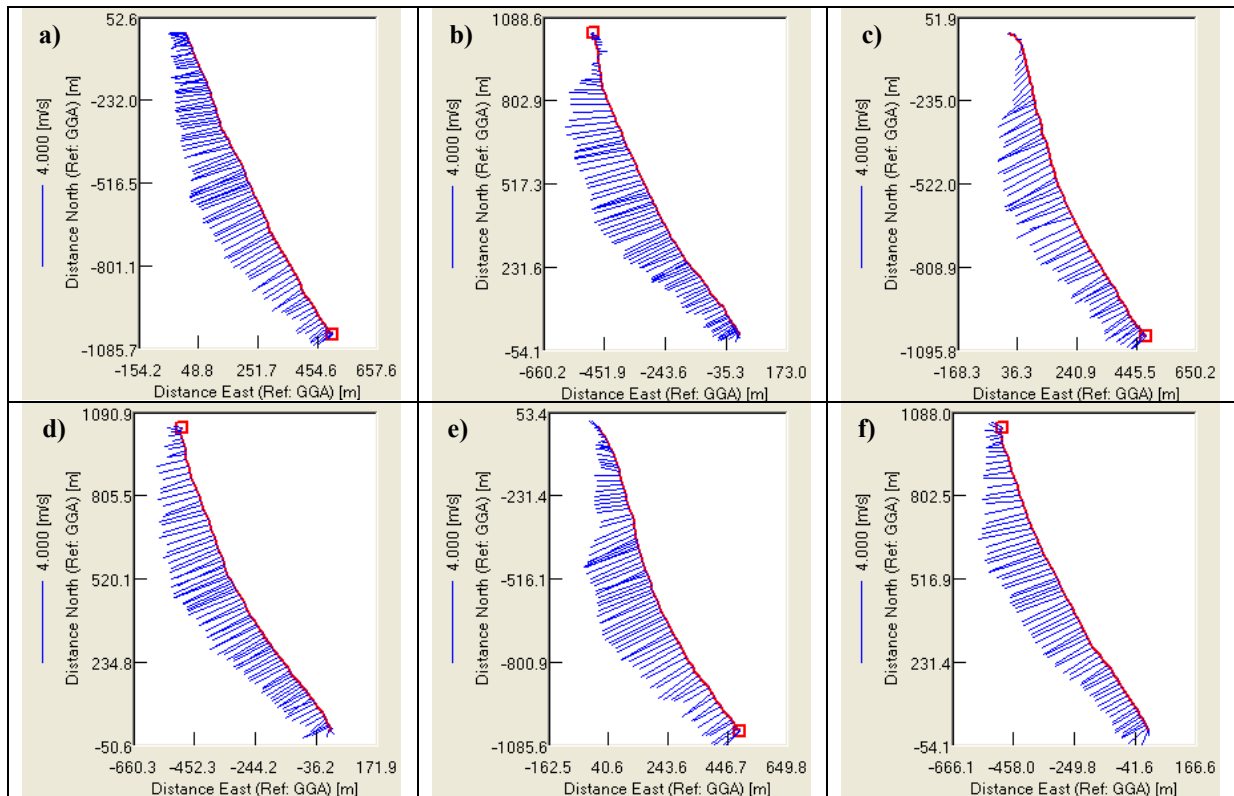


Figura 7. Distribuciones transversales de las velocidades medias en la vertical para cada transecta. a) T0 b) T1 c) T3 d) T4 e) T5 y f) T6

En la Figura 8 se muestra la distribución del caudal acumulado para las seis transectas medidas comenzando en la margen izquierda. En la misma se observan diferencias en el caudal acumulado en la zona cercana a la margen derecha, lo cual era de esperarse si se considera que el patrón del flujo en esa zona no fue constante durante las mediciones.

Análisis de la configuración de registro de ADCP

En esta sección se analiza el efecto de la configuración de registro de ADCP sobre los valores de caudal.

La Figura 9 muestra una comparación de la distribución transversal de la velocidad del flujo media en la vertical obtenida con el sistema de monitoreo de fondo (bottom track BT) y con GPS (GGA) en la transecta T0. La velocidad del agua obtenida con BT subestima las velocidades del agua indicando que el fondo del cauce es móvil, por lo cual no se utilizó como referencia a BT para determinar los caudales.

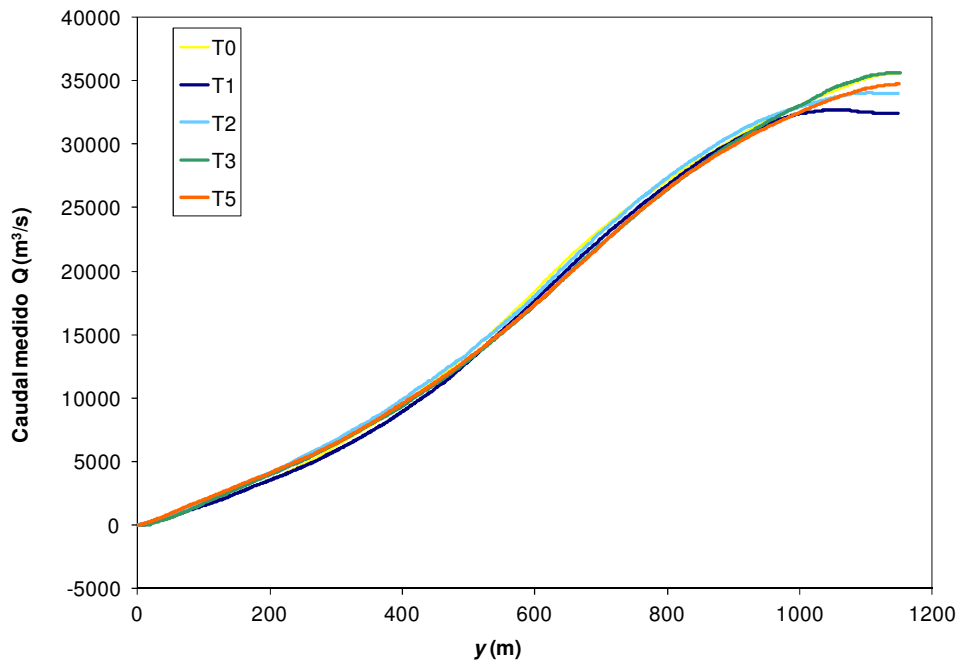


Figura 8.- Distribución de caudales acumulados desde la margen izquierda para cada transecta

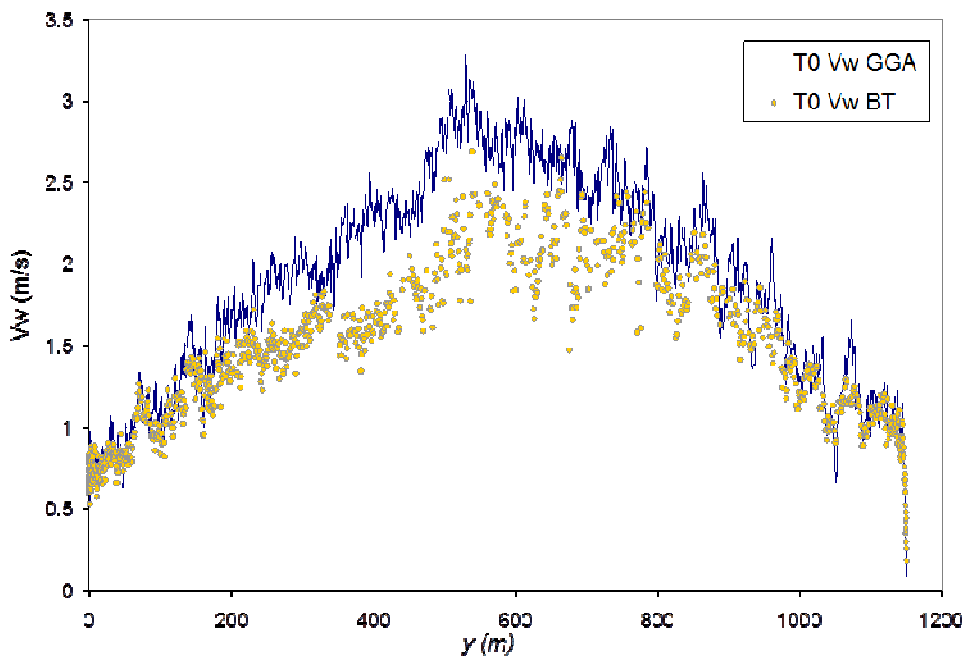


Figure 9. Perfiles transversales de velocidad del flujo utilizando bottom track y GPS (GGA) como referencia en la transecta 0 (T0)

La Figura 10 muestra las series temporales de velocidad del bote (utilizando GGA como referencia) y la magnitud velocidad media en la vertical para la transecta 1 (T1) con el fin de evaluar correlaciones entre ambas series. Se observa que la velocidad del bote, presentó fluctuaciones propias de la manipulación de la embarcación y que las desviaciones de velocidad con respecto a la media fueron similares en la sección transversal. Por otra parte, los valores de velocidad del bote fueron generalmente menores a la velocidad del agua lo cual es lo recomendable para disminuir los errores en la estimación de las velocidades del agua (Mueller y Wagner 2009).

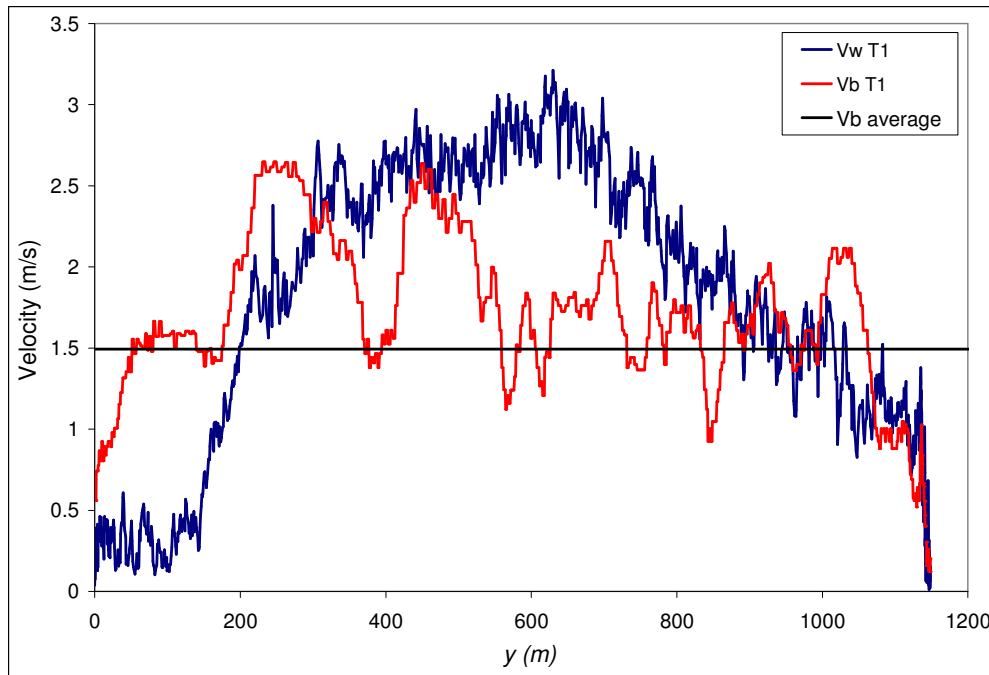


Figure 10.- Perfiles transversales de la velocidad del flujo media en la vertical y de la velocidad del bote para la transecta 1 (T1)

Estimación de la incertidumbre esperada en las mediciones del 15 de Mayo de 2011

Una vez evaluadas las condiciones de flujo y de registro, se utilizó el modelo incluido en ecuación (2) para predecir las incertidumbres en las mediciones del caudal. Para ello se analizaron las señales de las componentes de velocidad de flujo registradas con el bote en movimiento, a diferentes profundidades (en diferentes celdas) en la transecta 1 (Figura 11). La señales fueron filtradas con un filtro pasa alto considerando una frecuencia de corte de 1/60 Hz y removiendo las fluctuaciones de baja frecuencia producidas por la variación del flujo en la sección transversal.

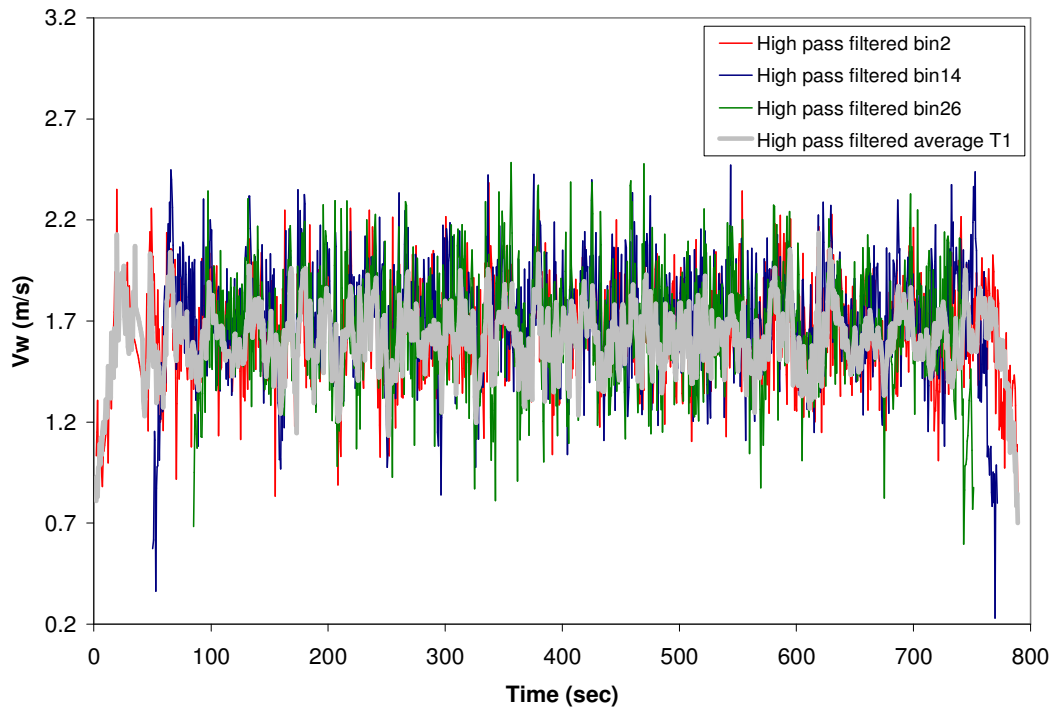


Figura 11. Señales de Velocidad del flujo a diferentes profundidades en la transecta 1 filtradas con un filtro pasa alto

En la Tabla 3 se muestran los parámetros principales de las señales del flujo en diferentes profundidades. Los valores de I_u en la señal filtrada son del mismo orden de magnitud que los valores registrados en otros ríos (García et al., 2011) lo cual implica que las fluctuaciones de alta frecuencia de las señales registradas no son las que causan las desviaciones en los caudales medidos.

Tabla 3. Características del flujo en las señales de velocidad registradas en diferentes celdas en la transecta 1 (T1)

Celda	Profundidad (m)	U-East (cm/s)	V-North (cm/s)	σ^2_u (cm^2/s^2)	σ^2_v (cm^2/s^2)	I_u (cm/s)	I_v (cm/s)
2	1.74	-153.2	-53.6	594.9	402.6	0.16	0.37
14	7.74	-160.7	-54.9	817.2	569.0	0.18	0.43
26	13.74	-157.1	-49.0	806.4	606.8	0.18	0.50

Finalmente se aplicó el modelo presentado en la ecuación (2) a los fines de estimar el valor de I_u en la transecta 1 que explicaría la incertidumbre observada en este caso. Considerando $RVar[QT]=0,151\%$, $n=42$, $T=698$ s y $\Delta t=0.6$ el valor de I_u es de 8.6 cm/s, el cual es casi dos órdenes de magnitud mayor que el valor estimado en la Tabla 1. Las diferencias entre las estimaciones realizadas con el modelo y las medidas en campo podrían ser atribuidas a que no se cumplen las hipótesis básicas adoptadas en el modelo, las cuales consideran que el campo del flujo es estacionario, homogéneo y que el bote se mueve a una velocidad constante.

CONCLUSIONES

El análisis de las condiciones de flujo y de los modelos existentes para estimar incertidumbre en mediciones de caudal utilizando ADCP desde plataformas móviles muestra que las características medias del flujo (por ejemplo, perfil transversal) y las condiciones de registro

no presentan particularidades a las cuales se les pueda atribuir el aumento en las incertidumbres observadas. Debido a esta circunstancia, la varianza estimada con un modelo conceptual para los caudales medidos es menor a la observada durante las mediciones. En este trabajo se concluye que la presencia de fluctuaciones de baja frecuencia (evolución temporal) en la margen derecha de la sección de estudio sería la causa de las desviaciones significativas entre las mediciones individuales de caudal, afectando la definición de medidas de control de inundaciones. Las fluctuaciones de baja frecuencia podrían ser atribuidas a la morfología del río en esa zona (por ejemplo, presencia de una curva aguas arriba del sitio de medición). Nuevas mediciones estacionarias permitirán analizar y comprender la dinámica del flujo durante la crecida en la zona baja del sistema del Río Mississippi.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

García, C., Tarrab, L., Oberg, K. Szupiany, R. and Cantero, M. (2011). "Variance Of Discharge Estimates Sampled Using Acoustic Doppler Current Profilers From Moving Platforms. In *review process*. *J. Hydraul. Eng.*

Mueller, D.S. and Wagner, C.R. (2009). "*Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat*". U.S. Geological Survey Techniques and Methods 3A-22, 72 p.

Rehmann, C., Mueller, D., and Oberg, K. (2009). "Sampling Requirements for Discharge Measurements with ADCPs". *IAHR Congress, Vancouver, Canada*.

Seo, I. W., and Baek, K. O. (2004). "Estimation of the longitudinal dispersion coefficient using the velocity profile in natural streams." *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 130, No. 3, pp. 227-236.



Instituto de Recursos Hídricos



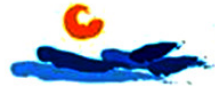
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías



Universidad Nacional de Santiago del Estero



Instituto Nacional del Agua



Subsecretaría de Recursos Hídricos



Agencia Nacional de Promoción Cient. y Tec.



Gobierno Prov. de Santiago del Estero



Ministerio de la Producción



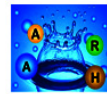
Secretaría del Agua



Secretaría de Desarrollo, Ciencia y Tecnología



Consejo Prof. de la Ingeniería y Arq.



Asociación Argentina de Recursos Hídricos



Asoc. Internacional de Investig. Hidroamb.



Comisión Regional del Río Bermejo



CORPORACION ARGENTINA TECNOLÓGICA S.A. INGENIERIA CIVIL E HIDRÁULICA

