

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 Laboratorio de Hidráulica, 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@efh.uncor.edu

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 operan 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. Seis mediciones individuales de caudal (seis cruces o transectas) se realizaron 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. Los caudales observados en cada transecta 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.



Figura 1.-Ubicación del sitio de estudio

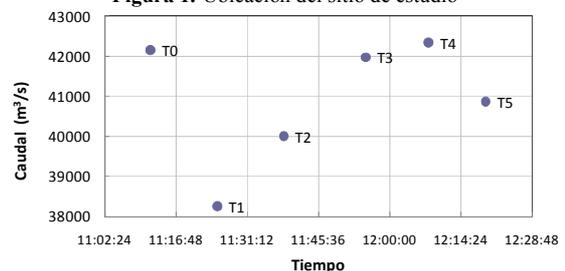


Figura 2.-Caudales medidos el 15 de Mayo de 2011

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:

$$RE[Q_i] = \frac{Q_i - Q_{av}}{Q_{av}} \quad [1]$$

La varianza relativa en la medición de las seis transectas calculada con la siguiente ecuación [2] fue de 0.151%.

$$RVar[Q_T] = \frac{(Q_i - Q)^2}{Q^2} \quad [2]$$

Estos parámetros, que permiten cuantificar la incertidumbre en los valores de caudal observados, son mayores a los esperados para las técnicas acústicas utilizadas, generando dudas en la definición de las medidas de control en ese momento.

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

Se analizaron, en primera instancia, las condiciones 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 [3] propuesta por Rehmann et al. (2009):

$$\frac{u(y)}{U} = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{y}{B}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{y}{B}\right)^{\beta-1} \quad [3]$$

donde U es la velocidad media en la vertical, B es el ancho, y es la coordenadas en la dirección transversal, $\Gamma()$ 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 se compararon con los obtenidos por otros autores mediante el análisis de condiciones de flujo observadas en otros ríos. Una vez evaluadas las condiciones de flujo, 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. La varianza relativa (ecuación [2]) en las mediciones del caudal puede ser cuantificada con la siguiente formulación:

$$RVar[Q_T] = \frac{I_u^2 \cdot \Delta t}{nT} \quad [4]$$

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

Resultados

En la Figura 3 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 ($y=0$), lo cual también se manifiesta en los gráficos de caudales acumulados no presentados en este resumen. Estas diferencias podrían ser generadas por la presencia de fluctuaciones de baja frecuencia de los patrones de flujo en esa región.

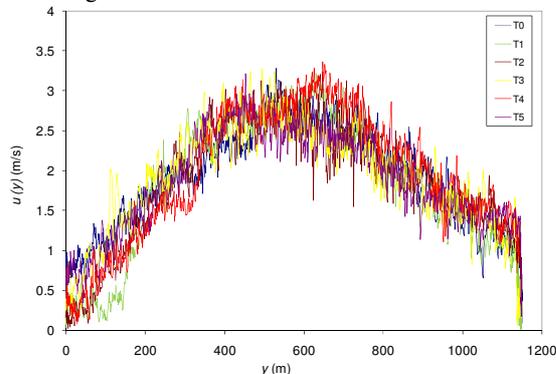


Figura 3.- Perfiles transversales de magnitudes de velocidad promediados en la vertical. $y=0$ corresponde a la margen derecha

En lo que se refiere al aspecto general de estos perfiles, los valores de α y β ajustados a la ecuación [1] en la transecta 1 (que fue la que presentó un mayor error máximo) 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. Una vez evaluadas las condiciones de flujo, se utilizó el modelo incluido en ecuación [4] 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 (celdas) en la transecta 1 (Tabla 1). 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. 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 1. 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_u^2 (cm ² /s ²)	σ_v^2 (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 [4] 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 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 generales de flujo (perfil transversal y fluctuaciones de velocidad de alta frecuencia) no presentan particularidades. Sin embargo, la presencia de fluctuaciones de baja frecuencia en la margen derecha de la sección de estudio puede generar desviaciones de importancia entre las mediciones individuales de caudal, afectando la definición de medidas de control de inundaciones. Estas diferencias podrían ser atribuidas a la morfología del río en esa zona (presencia de una curva aguas arriba del sitio de medición).

Referencias

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.*

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.