

Universidad Nacional de Córdoba

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Tesis doctoral



Incertidumbres en Mediciones de Caudal con
Perfiladores de Corriente Acústicos Doppler
desde Plataformas Móviles

Autora: Mg. Sc. Leticia Tarrab

Director: PhD. Ing. Carlos Marcelo García

Abril de 2013

Incertidumbres en Mediciones de Caudal con Perfiladores de Corriente Acústicos Doppler desde Plataformas Móviles

por

MSc. Ing. Leticia Tarrab

PhD. Ing. Carlos Marcelo García

Director

Comisión Asesora

PhD. Ing. Carlos Marcelo García
(Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales - UNC)

Dr. Ing. Andrés Rodríguez
(Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales - UNC)

Dr. Ing. Ricardo Szupiany
(Facultad de Ciencias Hídricas- UNL)

Esta Tesis fue enviada a la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba para cumplimentar los requerimientos de obtención del grado académico de Doctor en Ciencias de la Ingeniería.

Córdoba, Argentina
Abril de 2013



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA
Facultad de Cs. Exactas, Físicas y Naturales

ACTA DE EXAMENES

Libro: 00001 Acta: 01940 Hoja 01/01
LLAMADO: 1 02/07/2013
CATEDRA - MESA:

DI002 TESIS DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA

NUMERO	APELLIDO Y NOMBRE	DOCUMENTO	INGRESO	COND.	NOTA	FIRMA
27078838	TARRAB, LETICIA	DNI: 27078838	2009	T	<i>Aprobado</i>	

[Handwritten signatures]
ROMAGNOLI, Martin - VIGNONNET, Carlos Alberto - REYNA, SANTIAGO - BERTONI, Juan Carlos - Francisca, Franco

Observaciones:

ES COPIA FIEL DEL ORIGINAL

[Handwritten signature]

ING. ALEJANDRA TITA
A cargo de la Secretaría
del Doctorado en Ciencias
de la Ingeniería - F.C.E.F. y N

Córdoba, ___/___/___

Certifico que la/s firma/s que ha/n sido puesta/s en la presente Acta pertenece/n a: _____

1
Inscriptos Ausentes Examinados Reprobados Aprobados
18/06/2013 11:15:32 (0-3) (4-10)

Libro/Acta: 0000101940 Hoja: 01/ 01

*"Si había un río en el lugar donde crecimos,
probablemente lo oiremos siempre"*

Ann Zwinger

A mi familia...

Agradecimientos

Con estas líneas deseo expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que han contribuido, de alguna forma, a la realización de este trabajo.

A mi director de doctorado, Dr. Carlos Marcelo García, por su conocimiento, motivación y supervisión continua. Gracias por su estímulo y por contagiarme el entusiasmo por la investigación científica; pero sobre todo, por su esfuerzo y paciencia a los largo de estos años.

Al Dr. Andrés Rodríguez, mi director de Beca Doctoral de CONICET, por su calidad científica y humana y por abrirme las puertas al mundo de los recursos hídricos. Por su asesoramiento académico y enseñanzas que contribuyeron a mi formación como persona e investigadora. Gracias por la confianza en mí depositada.

A mis compañeros del Laboratorio de Hidráulica (LH) y del Centro de Estudios de Tecnología del Agua (CETA), de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, que siempre han estado dispuestos a ayudarme. Por su gran apoyo humano y profesional. Al grupo de Investigación en Medios Porosos y Aguas Subterráneas (IMPAS), por su amistad y colaboración. Un sincero y especial agradecimiento a mis amigos Horacio Herrero y Magalí Carro Pérez por su compañía, consejos y apoyo durante esta etapa.

Al Mg. Sc. Ing Gerardo Hillman, ex -director del Laboratorio de Hidráulica, por su confianza y por haber puesto a mi disposición todos los recursos necesarios para que esta tesis pudiera realizarse.

Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por las becas otorgadas las cuales me permitieron realizar las investigaciones que dieron lugar a esta tesis.

A la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEFYN) de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC) por el apoyo institucional.

A la SECyT por el financiamiento recibido a través de subsidios de los Proyectos de I+D.

A los miembros de la comisión asesora Dr. Carlos Marcelo García, Dr. Andrés Rodríguez y Dr. Ricardo Szupiany por sus sugerencias, por la lectura crítica del manuscrito y sus valiosas recomendaciones.

A mis profesores de la Maestría en Recursos Hídricos y del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, sus enseñanzas me permitieron llegar a esta etapa de mi formación. Ellos me enseñaron a vislumbrar nuevas perspectivas en la carrera que he elegido.

Al Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) por brindarme datos imprescindibles para la realización de este trabajo. A Kevin Oberg por su ayuda desinteresada y por el aporte invaluable en la discusión de resultados.

Al Dr. Mariano Cantero por su valiosa contribución con el suministro de los datos de la simulación numérica que fueron utilizados en esta Tesis y por su gran ayuda en la interpretación de los resultados de la misma.

Por último, un sincero agradecimiento a mi familia por su apoyo constante. A mi mamá por iniciarme con su ejemplo en la investigación científica, a mi papá por su ayuda y apoyo incondicional y especialmente a Die por su cariño y comprensión durante esta etapa. A mis hijos, Sol y Dante porque su amor fue el mejor estímulo en este largo camino. Gracias a todos por estar siempre.

Resumen

En la actualidad, los perfiladores de corriente acústicos Doppler (ADCP por sus siglas en inglés) son usados mundialmente para determinar los caudales escurridos en ríos y canales. Varios factores afectan la incertidumbre en las mediciones de caudal con ADCP desde plataformas móviles ya que las mismas incluyen las contribuciones de error de todos los procesos presentes durante el muestreo de flujo, como son la turbulencia del flujo, el ruido del instrumento y el ruido ambiental.

Se presenta en primer lugar, un análisis sistemático en el cual se cuantifica el rol de las fluctuaciones turbulentas en las incertidumbres de mediciones de caudal con ADCP desde plataformas móviles. A partir del análisis dimensional y del análisis de campos de flujos turbulentos tridimensionales sintéticos generados con Simulación Numérica Directa (DNS) se desarrollaron ecuaciones que permiten estimar la incertidumbre en las mediciones de caudal con ADCP debido a la presencia de fluctuaciones turbulentas del flujo.

Luego, se presenta un modelo para la cuantificación de los errores aleatorios de las mediciones de caudal desde plataformas móviles con ADCP, incluyendo las contribuciones de todos los procesos aleatorios que permanecen estacionarios durante las mediciones del campo de flujo (por ejemplo, ruido del instrumento, el ruido ambiental, y la turbulencia del flujo). El modelo presentado se basa en el cálculo de la varianza de los caudales medidos, $RVar[Q]$, utilizando los métodos estadísticos disponibles en la actualidad para el análisis de la incertidumbre de series temporales de velocidades estacionarias. Para la implementación de este análisis se llevó a cabo un estudio detallado sobre las correlaciones espaciales y temporales de los campos de flujo muestreados con ADCP.

Finalmente se cuantifica la incertidumbre en las mediciones de caudal de flujo realizadas desde plataformas móviles utilizando ADCP, debido a la presencia de fluctuaciones de baja frecuencia en el flujo. En esta tesis el estudio se focaliza en las fluctuaciones generadas por efectos geométricos (por ejemplo debido a curvatura del tramo analizado). Mediante el análisis dimensional se identificaron los grupos adimensionales más relevantes que luego fueron evaluados en forma simplificada usando datos sintéticos de velocidad del agua. Además, se analizaron datos medidos de campo con ADCP en ríos naturales y canales que presentan diferentes condiciones de flujo con el fin de validar los resultados encontrados. Los hallazgos presentados en este documento permiten definir las estrategias de muestreo óptimas mediante la elección del tiempo de exposición requerido por el ADCP para medir con precisión el caudal. Los principales resultados han sido utilizados por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) en la optimización de las estrategias de medición de caudales.

Abstract

Nowadays, the acoustic Doppler current profilers (ADCP) are used worldwide to determine the flow discharge in rivers and channels. Several factors affect the uncertainty of ADCP discharge measurements from moving platforms since they include error contributions of all random physical processes present during the flow sampling, such as flow turbulence, instrument noise and environmental noise.

First, a systematic analysis is presented which quantifies the role of turbulent fluctuations in the flow discharge measurement uncertainties using ADCP from moving platforms. From dimensional analysis and the analysis of synthetic three-dimensional turbulent flow fields generated using Direct Numerical Simulation (DNS), equations were developed to estimate the uncertainty in flow discharge measurements with ADCP due to the presence of turbulent fluctuations of the flow field.

Then, a model is presented quantifying the random errors of the flow measurements with ADCP from moving platforms, including the contributions of all stationary random processes present during flow field measurements (e.g. instrument noise, ambient noise, and flow turbulence). The model is based on the calculation of the variance of the measured flow discharge, $RVar [Q]$ using the statistical methods available today for the uncertainty analysis of stationary time series of flow velocity. To implement this analysis, a detailed study was performed of the spatial and temporal correlations of flow fields sampled using ADCP sampled.

Finally, uncertainty of flow discharge measurements using ADCP from moving platform due to the presence of low frequency fluctuations in the flow is estimated. This thesis focuses on the fluctuations generated by topographic effects (eg due to curvature of the analyzed reach). Using dimensional analysis, the most relevant dimensionless variables were identified and then, their roles were assessed using simplified synthetic water velocity data. Further, field data is analyzed which were recorded using ADCP in natural rivers having different flow conditions in order to test and validate the results. The findings presented in this work help to define optimal sampling strategies by choosing the exposure time required by the ADCP to accurately measure the flow discharge. The main results have been used by the United State Geological Survey (USGS) in the optimization of flow discharge measurement strategies.

Kurzfassung

Heutzutage werden die akustischen Doppler-Strömungsprofil (ADCP) weltweit verwendet, um die Wasserentladung in Flüsse und Kanäle zu bestimmen. Verschiedene Faktoren beeinflussen die Unsicherheit der ADCP Entladungsmessungen von beweglichen Plattformen, da sie die Fehler aller Prozesse während der Probenahme, wie Strömungsturbulenzen, Geräusche der Instrumente sowie Lärm- und Umweltgeräusche beinhalten.

Zunächst wird eine systematische Analyse vorgestellt, die die Rolle der turbulenten Schwankungen in den Unsicherheiten bei der Durchflussmessungen der Entladungen mit ADCP von beweglichen Plattformen, quantifiziert. Ab der Dimensionsanalyse und der Analyse von synthetischen dreidimensionalen turbulenten Strömungsfeldern, die unter Verwendung direkter numerischer Simulation (DNS), wurden Gleichungen entwickelt, um die Unsicherheit in Strömungsentladungsmessungen mit ADCP aufgrund der Anwesenheit der turbulenten Schwankungen des Strömungsfeldes zu schätzen.

Dann wird ein Modell der Quantifizierung der zufälligen Fehler der Durchflussmessungen mit ADCP von beweglichen Plattformen, einschließlich der Beiträge von allen stationären Zufällen während Strömungsfeld-Messungen (z.B. Gerätegeräuschen, Umgebungsgeräusche und Fluss Turbulenz) vorliegenden Verfahren vorgestellt. Das Modell basiert auf der Berechnung der Varianz der gemessenen Durchflussentladung, $RVAR [Q]$ mit den heutigen statistischen Methoden für die Unsicherheitsanalyse von stationären Zeitreihen der Fließgeschwindigkeit. Um diese Analyse zu implementieren, wurde eine detaillierte Studie über die räumliche und zeitliche Korrelation der abgetasteten Strömungsfelder mit ADCP Stichproben durchgeführt.

Schließlich wurde die Unsicherheit der Durchflussentladungsmessungen beweglicher Plattformen unter Verwendung von ADCP, aufgrund der Anwesenheit von niedrigen Frequenzschwankungen in der Strömung, geschätzt. Diese Arbeit konzentriert sich auf die durch topographische Effekte erzeugte Schwankungen (z.B. durch Krümmung der analysierten Reichweite). Mit Hilfe der Dimensionsanalyse wurden die wichtigsten dimensionslose Variablen identifiziert und dann wurden ihre Rollen mit vereinfachten synthetischen Wassergeschwindigkeitsdaten bewertet. Weiterhin werden Messdaten mit ADCP in natürlichen Flüssen mit unterschiedlichen Strömungsbedingungen analysiert, die aufgenommenen Ergebnisse zu testen und zu validieren. Die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse erlauben es, die optimalen Strömungsentladungsmessungsstrategien durch die Wahl der Belichtungszeit mit ADCP für die Durchflussentladung genau zu messen und zu definieren. Die wichtigsten Ergebnisse wurden von der United State Geological Survey (USGS) in der Optimierung der Strömungsentladungsmessungsstrategien verwendet.

Indice

1. Introducción.....	1
1.1. <i>Medición de caudales mediante Perfiladores de Corriente Acústicos Doppler (ADCP) ..</i>	3
1.1.1. Mediciones de caudal con ADCP desde plataformas estacionarias	4
1.1.2. Mediciones de caudal con ADCP desde plataformas móviles	5
1.1.3. Incertidumbres en la determinación del caudal con ADCP desde plataformas móviles	8
1.2. <i>Motivación tecnológica.....</i>	10
1.3. <i>Motivación científica</i>	12
1.4. <i>Objetivos.....</i>	14
1.5. <i>Organización de la Tesis</i>	14
2. Incertidumbres en la medición de caudal con ADCP desde plataformas móviles debido a las fluctuaciones turbulentas	17
2.1. <i>Introducción.....</i>	17
2.2. <i>Análisis dimensional.....</i>	19
2.3. <i>Modelo Matemático y Numérico</i>	22
2.4. <i>Forma funcional obtenida a partir de los datos de DNS.....</i>	28
2.5. <i>Validación de las formas funcionales utilizando mediciones de campo.....</i>	35
2.6. <i>Conclusiones de este capítulo</i>	40
3. Incertidumbres en la medición de caudal con ADCP desde plataformas móviles debido a procesos aleatorios estacionarios.....	41
3.1. <i>Introducción.....</i>	41
3.2. <i>Modelo conceptual.....</i>	43
3.2.1. Modelo para la estimación de la varianza de la velocidad media del flujo muestreada en una ubicación fija.....	43
Caso 1: $T_x \ll \Delta t \ll T$ (muestras no correlacionadas)	46
Caso 2: $\Delta t \ll T_x \ll T$ (muestras correlacionadas).....	46
3.2.2. Modelo para la estimación de la varianza de los caudales medidos con ADCP desde plataformas móviles.....	47

3.3.	<i>Validación del modelo conceptual utilizando datos de campo</i>	52
3.3.1.	Datos de campo	52
3.3.2.	Características del campo de flujo turbulento y su muestreo	54
3.3.3.	Estructura de correlación del campo de flujo muestreado con ADCP.....	56
3.3.4.	Varianza relativa observada en las determinaciones de caudales totales.....	60
3.3.5.	Comparación de las varianzas estimadas para el caudal total y el caudal medido.....	62
3.3.6.	Validación de las estimaciones de varianza en las mediciones de caudal.	64
3.4.	<i>Tiempo de exposición requerido para las mediciones de caudal</i>	65
3.5.	<i>Conclusiones de este capítulo</i>	67
4.	Incertidumbres en la medición de caudal con ADCP desde plataformas móviles debido a fluctuaciones de baja frecuencia del flujo	69
4.1.	<i>Introducción</i>	69
4.2.	<i>Análisis Dimensional</i>	70
4.3.	<i>Análisis de velocidades de flujo sintéticas</i>	71
4.4.	<i>Análisis de mediciones de caudal en un canal de grandes dimensiones</i>	74
5.	Análisis de mediciones de caudal en grandes ríos con fluctuaciones de baja frecuencia: Caso Río Mississippi	79
5.1.1.	Metodología	82
5.1.2.	Resultados	83
5.2.	<i>Conclusiones de este capítulo</i>	91
6.	Conclusiones y perspectivas de investigación futuras	93
6.1.	<i>Conclusiones</i>	93
6.2.	<i>Perspectivas de investigación futuras</i>	96
7.	Referencias	97

1. Introducción

La medición de caudales en ríos y canales es una herramienta fundamental para la evaluación y manejo del recurso hídrico superficial. En los últimos años se ha incrementado el instrumental disponible para la medición de caudales de flujos turbulentos en campo y en laboratorio. Específicamente, el empleo de anemometría acústica basada en el efecto Doppler, que utiliza el principio físico del cambio de frecuencia ante el rebote acústico que produce una partícula transportada por el flujo, se ha tornado una práctica universal en hidráulica fluvial. El instrumento acústico utilizado comúnmente para las mediciones de caudal en campo, es el perfilador de corrientes acústico Doppler (ADCP por sus siglas en Inglés). Este instrumento se emplea en todo el mundo para medir el flujo en cuerpos de agua tales como ríos, canales y estuarios (Oberg et al., 2005; Oberg y Mueller, 2007) contribuyendo a una mejor caracterización de la dinámica fluvial y de los procesos hidrodinámicos asociados. Además, esta tecnología se ha utilizado para caracterizar el campo de flujo tridimensional en canales artificiales y plantas de tratamiento de aguas (García et al., 2010).

Este tipo de tecnologías permiten en la mayoría de los casos realizar mediciones precisas de caudales y caracterizar el flujo medio (Simpson, 2001; Mueller, 2002a; Dinehart y Burau, 2005; Oberg et al., 2005; García et al., 2007, Jackson et al., 2007). Oberg y Muller (2007) validaron alrededor de 100 mediciones de caudal de flujo realizadas con ADCP al compararlas con mediciones realizadas con técnicas convencionales. A la simplicidad y bajo costo relativo de los ADCP se le suma el hecho de proveer una alta resolución temporal y espacial del campo 3D del flujo adquiriendo información que no es posible obtener por medio de métodos convencionales (por ejemplo molinetes). Así, este sistema permite caracterizar e identificar las estructuras turbulentas tridimensionales en flujos naturales desde una embarcación estacionaria o en movimiento (Lipscomb, 1995).

Existen varios trabajos en los cuales el objetivo específico, además de cuantificar los caudales de flujo, fue caracterizar las componentes tridimensionales del flujo y la turbulencia mediante un ADCP (Droz et al., 1998; Stacey et al., 1999; Lu y Lueck, 1999a; 1999b, Schemper y Admiraal, 2002; Nystrom et al., 2002; Howarth, 2002; Kawanisi, 2004). Recientes aplicaciones del ADCP muestran su empleo para inferir

esfuerzos de corte (Kostaschuk et al., 2004), caracterizar el campo de velocidades (González -Castro et al., 1996; Muste et al., 2004; Dinehart y Burau, 2005; Parsons et al., 2007; Szupiany et al., 2007; 2009; 2012), realizar relevamientos morfológicos (Guerrero y Lamberti, 2011, Jamieson et al., 2011), estimar el transporte de sedimentos total (Deines 1999; Rennie et al., 2002), estimar el transporte sedimentos en suspensión (Szupiany et al., 2009; Guerrero et al., 2011a; 2011b) y de fondo (Ramooz y Rennie, 2010; Jamieson et al, 2008, 2011), y la estimación del coeficiente de dispersión longitudinal en ríos (Carr y Rehmann, 2005, Carr et al., 2005) entre otras .

El Servicio Geológico de los EEUU (USGS) utiliza estos instrumentos ampliamente desde la década del 90. En el año 2010, aproximadamente el 69% de todas las mediciones de caudal del USGS se realizaron mediante el uso de instrumentos acústicos. De éstas, aproximadamente el 82% las mediciones que fueron realizadas desde un bote, mediante un cable con roldana, o un puente se realizaron con un ADCP. El USGS ha investigado y desarrollado técnicas, políticas y guías para la aplicación de los instrumentos acústicos Doppler en la medición del caudal (Muste et al., 2007). Los resultados de mediciones en campo y pruebas de laboratorio del ADCP, junto con las técnicas y guías han sido reportados por el USGS en protocolos técnicos y artículos de revistas especializadas (véase, por ejemplo: USGS, 2006; Oberg y Mueller, 2007; Mueller y Wagner, 2009).

Los ADCPs están reemplazando rápidamente a los instrumentos convencionales (mecánicos) tanto en las mediciones de cauces naturales como artificiales. Este cambio está motivado en que, a costos comparables, se obtiene una mayor eficiencia (menor tiempo de medición), mejor rendimiento y mejores condiciones de seguridad del personal que realiza las mediciones (Muste, 2007). Si bien estos instrumentos se convirtieron en una herramienta común, su uso requiere de una correcta configuración del mismo, una calibración, de una adecuada metodología en la recolección de los datos y de un pos-procesamiento de la información y de personal técnico capacitado, a fin de obtener datos precisos y confiables (Szupiany, 2013). Las aplicaciones actuales del ADCP han llevado a la necesidad de identificar las fuentes de error en las mediciones y evaluar el impacto de éstas en la calidad y fiabilidad de los datos a fin de desarrollar protocolos que contemplen buenas prácticas de medición (Oberg y Mueller, 1994, Morlock, 1996, Shih et al., 2000, Mueller 2002a; 2002b; Gartner y Ganju, 2002, González-Castro et al., 2002; Marsden y Ingram, 2004; Abad et al., 2004; Mueller,

2004, Schmidt y Espey, 2004; Gaeuman y Jacobson, 2005; y Rennie y Rainville, 2006).

Las estimación de las incertidumbres en las mediciones de caudal con ADCP son necesarias en lo que respecta a la gestión del recurso (operación de compuertas, manejo de estructuras de control hidráulicas, etc. (Tarrab et al., 2011), en la validación de simulaciones numéricas (Cheng, et al., 2005), y en el control de la calidad de datos a fin de que sean válidos según los objetivos planteados y de utilidad para la comunidad científica en general (González-Castro, 2002).

1.1. Medición de caudales mediante Perfiladores de Corriente Acústicos Doppler (ADCP)

El ADCP mide la velocidad del agua en tres dimensiones a lo largo de un perfil en una columna de agua, usando el principio físico llamado *cambio de frecuencia Doppler*. A su vez, recolecta información de posición del instrumento, distancia recorrida y profundidad del agua en cada vertical. El ADCP presenta entre 3 y 9 transductores acústicos montados en la cabeza del sistema, ubicados en un ángulo con respecto a la vertical, entre 20° a 30° dependiendo del fabricante (Figura 1). Cada uno de estos transductores registra información de retorno de un haz o *beam* de ondas sonoras que es proyectado en el agua. Las reflexiones del sonido en las partículas (materia suspendida como sedimentos, burbujas o materia orgánica) transportadas en la columna de agua son usadas para determinar la velocidad del agua. La onda sonora emitida por el ADCP es reflejada por las partículas con un cambio de frecuencia Doppler (la cual será proporcional a la velocidad relativa entre el ADCP y las partículas).



Figura 1. Perfiladores de corriente acústico Doppler fabricados por las compañías a) Teledyne RD (Workhorse Rio Grande) y b) SonTek/YSI (RiverSurveyor S5/M9).

1.1.1. Mediciones de caudal con ADCP desde plataformas estacionarias

Una alternativa recomendada (Mueller y Wagner, 2009) para medir caudales con ADCP cuando no se cuenta con GPS se conoce como el método de sección media y utiliza el ADCP en forma estacionaria para medir la descarga de una manera similar a la metodología empleada con un correntímetro estándar de medición (por ejemplo molinete). Para ello se registran entre 20-25 perfiles de velocidad con el ADCP en lugares seleccionados a través de la corriente. Un perfil estacionario de velocidad de flujo se obtiene manteniendo el ADCP en una ubicación específica durante un tiempo determinado y luego promediando los datos para obtener un perfil de velocidad media o una velocidad media integrada en la profundidad para esa ubicación. El método de la sección media no está sesgado por las condiciones de lecho móvil porque el ADCP se mantiene estacionario para cada medición y el seguimiento de fondo (*bottom tracking*) no es utilizado como referencia, por lo tanto, la velocidad medida por el ADCP es sólo la velocidad del agua. No es necesaria la referencia del movimiento de la embarcación al realizar una medición de la sección media en condiciones de lecho móvil o la velocidad medida todavía estará sesgada por la presencia de lecho móvil (Mueller y Wagner, 2009).

Las compañías SonTek/YSI y Teledyne RD han desarrollado un software que incluye el método de la sección media para la medición de caudal. Los datos de la velocidad y la profundidad se recogen del ADCP, y la descarga se calcula utilizando el método de la sección media. El ancho de cada sección de medición se calcula como la mitad de la distancia desde la vertical muestreada a la vertical anterior, más la mitad de la distancia desde la vertical muestreada a la siguiente vertical. Este ancho se multiplica entonces por la profundidad medida durante la medición de la velocidad para calcular un área para cada sección. El caudal para cada una de las secciones se calcula multiplicando la velocidad media del agua por el área de sección transversal, y luego las descargas incrementales se suman para determinar el caudal total.

Las ventajas de utilizar el método de la sección media son (1) no es necesario un GPS, (2) son medidas las velocidades reales, (3) los procedimientos de medición del caudal son familiares para los técnicos, y (4) se dispone de software para automatizar el procedimiento. Las desventajas son (1) las posiciones debe ser medida manualmente, (2) flujo inclinado o transversal puede introducir errores en la medición de la velocidad y debe ser manejada con cuidado, (3) son necesarios tiempos de medición apropiados

para cada vertical, (4) el ADCP debe mantenerse estacionario porque el movimiento ADCP no se corrige, y (5) no se muestrea la sección transversal completa (Mueller y Wagner, 2009).

1.1.2. Mediciones de caudal con ADCP desde plataformas móviles

A diferencia de métodos estacionarios, las mediciones con ADCP se realizan atravesando el río o canal (habitualmente) en múltiples cruces utilizando plataformas móviles (Figura 2). Las plataformas móviles comúnmente utilizadas son embarcaciones comandadas con personal a bordo (Figura 3) o plataformas comandadas (Figura 4) con cables desde puentes o desde las márgenes (a través de roldana). En las mediciones de caudal realizadas mediante ADCP desde plataformas móviles bajo condiciones de flujo estacionario, es una práctica común realizar cuatro o más transectas realizadas en direcciones reciprocas (opuestas) y reportar el promedio de cuatro (o más) caudales como el caudal medido. Una transecta es una serie de sucesivos perfiles verticales adquiridos a lo largo de la sección transversal. Mientras el ADCP se mueve de una orilla del río hacia la otra, registra datos de profundidad, velocidad de la embarcación, posición, etc. permitiendo estimar el caudal del mismo.

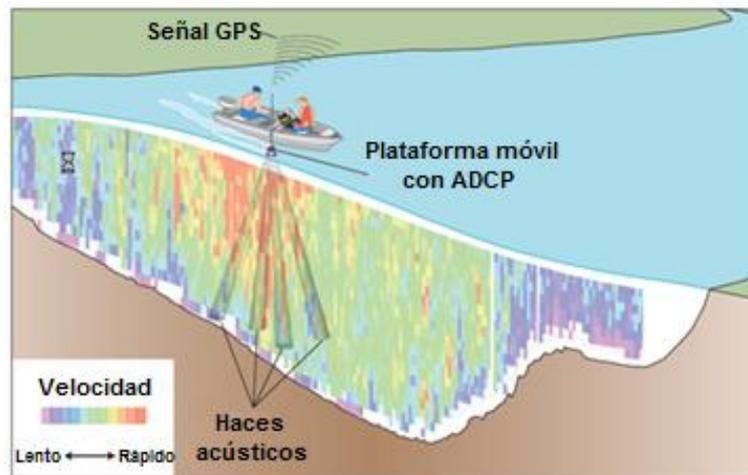


Figura 2. Medición de caudales con ADCP desde plataformas móviles.



Figura 3. Medición de caudales con ADCP desde embarcaciones comandadas.



Figura 4. Medición de caudales con ADCP desde plataformas móviles comandadas con cables.

Los movimientos que realiza el ADCP en una embarcación durante la medición requieren aplicar factores de corrección. La rotación alrededor de los tres ejes cartesianos (pitch o rotación alrededor del eje transversal Y, *roll* o rotación alrededor del eje longitudinal X y *heading* o rotación alrededor del eje Z o eje vertical) y la traslación (velocidad del bote). Para ello, se utilizan datos de la brújula interna a los fines de convertir los valores de velocidades medidos en un sistema de coordenadas XYZ a un sistema de coordenadas terrestres ENU (Este, Norte y Vertical).

Para la medición absoluta de la velocidad del agua, los ADCPs utilizan dos sistemas de referencia, seguimiento del fondo (*bottom-tracking- BT*) y GPS. Los dos sistemas

permiten al ADCP medir la velocidad de la embarcación (en dirección y magnitud) en forma relativa al lecho. Esta velocidad es sustraída a la velocidad medida para obtener la velocidad absoluta de la columna de agua independientemente del movimiento de la lancha. Se aconseja calcular la velocidad con los valores medidos por el GPS en los casos en que el fondo es móvil o que las profundidades del flujo son excesivas, ya que en esos casos el empleo de la técnica BT (*bottom-track* o rastreo de fondo) se encuentra limitada.

La sección transversal de la corriente puede ser modelada como una composición de varias filas o segmentos horizontales desde la superficie hasta el fondo. Estas “filas” contienen celdas individuales y las columnas representan perfiles verticales. Cada segmento, contendrá agua fluyendo a una velocidad determinada. EL ADCP mide la velocidad del agua en cada celda y genera un perfil de velocidades en una columna de agua, sin embargo el ADCP no puede medir en la sección transversal completa del río o cauce. En la zona cercana a la superficie, existe una zona no medible que está compuesta por dos segmentos (Figura 5): uno que corresponde a la inmersión mínima del emisor-receptor para que emita y reciba señal sin interrupción y otra zona denominada “distancia sin registro” o “*blanking distance*” en inglés, en la cual el transductor no registra el cambio de frecuencia debido al rápido retorno de la ondas (los transductores y circuitos necesitan un determinado tiempo para recuperarse entre los ciclos de envío y recepción de las ondas). Esta distancia depende del instrumento y de la configuración del mismo. Los efectos de estela del instrumento son también muy importantes en esa zona y aun cuando electrónicamente se puede reducir la longitud de esa zona, no es conveniente hacerlo ya que los mismos modifican el perfil de velocidades (Mueller et al., 2007). En la zona cercana al fondo (entre el 6 al 10 % de la profundidad) no se pueden realizar mediciones debido a la interferencia que se produce por el rebote acústico de la onda en el fondo y por las diversas formas de fondo del lecho. Este último eco enmascara e imposibilita al equipo diferenciar este rebote del que se produce en las partículas que viajan suspendidas en el flujo. Finalmente, en las zonas cercanas a las márgenes o bordes, el ADCP no puede medir debido a que en estas zonas generalmente no hay una profundidad suficiente para acceder con la embarcación o para que el ADCP pueda sumergirse. Si bien el equipo no mide en estas zonas, sí efectúa estimaciones de caudal mediante diversas fórmulas de extrapolación que el fabricante provee y el usuario puede elegir.

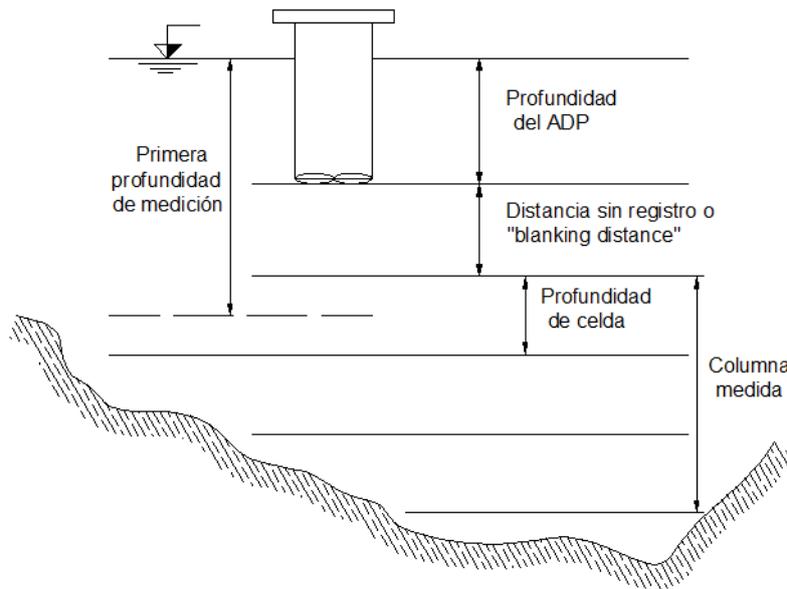


Figura 5. Regiones medidas y no medidas por ADCP.

Por lo expuesto anteriormente, el cálculo del caudal total es la suma del caudal en la zona medida y aquellos extrapolados en las zonas no medidas (superficie, fondo y márgenes):

$$Q = Q_{\text{marg. izquierda}} + Q_{\text{superficie}} + Q_{\text{medido}} + Q_{\text{fondo}} + Q_{\text{marg. derecha}} \quad (1)$$

donde:

Q es el caudal total,

$Q_{\text{marg. izquierda}}$ es el caudal estimado en zona no medida sobre margen izquierda,

$Q_{\text{superficie}}$ es el caudal estimado en zona no medida cerca de la superficie,

Q_{medido} es el caudal en la región medida por el ADCP,

Q_{fondo} es el caudal estimado en zona no medida cerca del fondo,

$Q_{\text{marg. derecha}}$ es el caudal estimado en zona no medida sobre margen derecha.

1.1.3. Incertidumbres en la determinación del caudal con ADCP desde plataformas móviles

Las mediciones de caudal, como otras determinaciones experimentales, presentan errores. Los errores típicos en las mediciones de caudal con ADCP desde plataformas móviles se generan por diversos factores como son: a) la ubicación y las condiciones de

la medición; b) la turbulencia del flujo (2D y 3D); c) las estrategias de muestreo espacial y temporal; d) la configuración del ADCP; e) los niveles de ruido; f) las técnicas de procesamiento de señales utilizadas; g) los defectos en la calibración del instrumento; h) los errores en el sistema de adquisición de datos; i) el movimiento del fondo, j) los movimientos inadecuados de la embarcación o plataforma móvil, k) las bajas profundidades de flujo, l) la inestacionariedad del flujo, m) la influencia del esfuerzo de corte del viento, n) alta concentración de sedimentos; o) las elevadas intensidades de la turbulencia, y p) a la variabilidad del medio natural en el cual se realiza la medición. Algunos de estos errores pueden ser minimizados durante el procedimiento siguiendo buenas prácticas de medición.

Cuando se realizan mediciones con los ADCPs, el operador debe monitorear continuamente los datos que se están recolectando. Si aparece un error crítico en la calidad de los mismos, el encargado de coleccionar los datos debe terminar la medición en dicha sección y volver a comenzar (Oberg et al., 2005). Los problemas críticos más comunes observados durante las mediciones de caudal con ADCP son: a) una selección inapropiada o mala configuración de los modos de operación, b) errores de configuración (tales como número insuficiente de celdas en la vertical), c) errores en la comunicación del instrumento con el GPS (debido por ejemplo, a efectos de interferencia en márgenes o cambio de satélites, e) pérdida apreciable del sistema de monitoreo de fondo o “*bottom – tracking*” (cuando se está muy cerca de la máxima profundidad admisible por el instrumento), f) errores debido a una alta velocidad de la embarcación y g) excesivo cabeceo o balanceo de la embarcación (por ej. en condiciones de mucho oleaje), etc.

La incertidumbre en la determinación de la velocidad se encuentra afectada por dos tipos de errores, errores aleatorios y errores de sesgo. Los errores de sesgo son llamados también errores sistemáticos. El error aleatorio puede ser reducido realizando un promedio de los datos, no así con el error de sesgo. Una comprensión profunda de estos dos tipos de errores es un requisito previo esencial para la evaluación de la velocidad y precisión de las mediciones de caudal con ADCP. Simpson (2001) analizó las fuentes de error elementales en mediciones de velocidad y de caudal con ADCP. La mayoría de estos errores elementales contribuyen a la incertidumbre total de las mediciones ADCP incluso cuando se aseguran buenas prácticas de medición. Más detalles sobre estos errores y un resumen de la información disponible para evaluar su incertidumbre se

puede encontrar en Gonzalez-Castro y Muste (2007).

Los errores sistemáticos o sesgos en la medición son en general debido a sesgos en la medición de la velocidad, de la profundidad, a factores ambientales (como movimiento del fondo), limitaciones del instrumento (zonas no medibles), problemas con el GSP y a errores del operador.

Los errores aleatorios (incertidumbre) de las mediciones de caudal con ADCP desde plataformas móviles incluyen las contribuciones de error de todos los procesos presentes durante el muestreo de flujo en campo (por ejemplo, ruido del instrumento, el ruido ambiental, y la turbulencia del flujo). El término "**ruido del instrumento**" se utiliza para referirse al ruido electrónico, el término "**ruido ambiental**" se utiliza para referirse al efecto de las condiciones propias del muestreo en el desempeño del instrumento que son dependientes del sitio, por ejemplo: a) fluctuaciones del flujo, b) estelas, c) ondas de superficie, d) ruido de Doppler, y el término "**turbulencia del flujo**" se utiliza para referirse a la turbulencia generada por la interacción de flujo con el fondo. Incluso las mediciones obtenidas con un instrumento ideal (que no tiene el ruido electrónico y que no se ve afectado por las condiciones de medición) tendrán errores aleatorios debido a las fluctuaciones propias del flujo turbulento (Tarrab et al., 2012).

1.2. Motivación tecnológica

La tecnología acústica Doppler permite realizar mediciones con alta resolución espacial y temporal y de esta manera caracterizar e identificar las estructuras turbulentas tridimensionales en flujos naturales, como así también determinar en forma precisa los caudales que escurren por un río o canal artificial. Se considera que una mejor comprensión de los flujos turbulentos es necesaria y de gran utilidad para la determinación precisa de caudales de flujo y así realizar un manejo apropiado de cauces y canales, optimizar el diseño de las obras hidráulicas y aplicar medidas correctivas en los sistemas naturales.

La implementación en la República Argentina de instrumentos basados en el principio acústico Doppler para la medición de caudales (García et al., 2005) disponibles en el ámbito internacional representa un desafío tecnológico importante.

Estas técnicas, aunque son muy eficientes, han sido incorporadas para unos pocos proyectos que contemplan mediciones de caudal en grandes ríos (como es el caso del río Paraná).

La determinación precisa de los caudales es relevante para el diseño sustentable de infraestructura hídrica debido en parte a que el sobredimensionamiento de las obras genera un impacto innecesario sobre el medio ambiente, además de que es antieconómico. Además, la subestimación de las obras a diseñar provoca fallos con resultados catastróficos con alto impacto sobre la sociedad y el medio ambiente, ya sea por la pérdida de vidas humanas como de bienes públicos y privados. Esta precisión en las mediciones se determina a partir de un exhaustivo análisis de las incertidumbres definiendo los intervalos de confianza de cada medición. Estos intervalos deben incluir las contribuciones de todas las incertidumbres relacionadas con la evaluación experimental de cada variable.

Por otra parte, la optimización de las técnicas de medición con ADCP permite contribuir al conocimiento de otras variables típicas (además del caudal) en hidráulica fluvial que permiten la caracterización del flujo con altas resoluciones espaciales y altas frecuencias y obtener los parámetros característicos del mismo (velocidades medias, fluctuaciones, escalas de turbulencia, etc.). La necesidad de conocer las características de dichos flujos resulta de gran utilidad práctica, por ejemplo para: a) cuantificar los patrones de transporte de sedimentos (i.e. erosión y deposición), b) la determinación de patrones de dilución y mezcla de contaminantes, c) la construcción de estructuras de protección contra la erosión, d) estudios de ocupación del suelo, e) prevención de inundaciones, etc. Por otra parte, la cuantificación del transporte y difusión de contaminantes, permitirá minimizar y predecir el impacto ambiental de los mismos como así también desarrollar metodologías fundamentales para la planificación y protección de los recursos hídricos superficiales lo cual, en definitiva, conduce al uso sustentable de los mismos.

En las situaciones mencionadas, se hace necesario optimizar las técnicas experimentales existentes así como las metodologías de medición con ADCP a los fines de elaborar recomendaciones que incluyan la minimización de los errores (sesgo e incertidumbre aleatoria) en la medición de caudales desde plataformas móviles con ADCP.

1.3. Motivación científica

Considerando el desafío tecnológico que implica la implementación de los ADCP en nuestro país y su importancia en la obtención precisa de registros de caudales, surge una motivación científica relacionada con el hecho de que si bien esta técnica ha sido satisfactoriamente evaluada en forma preliminar por los fabricantes y en otros países, existen áreas de vacancia a nivel internacional, como por ejemplo las configuraciones óptimas del muestreo espacial y temporal que permitan lograr una determinación precisa del caudal de flujo para distintas condiciones experimentales (por ejemplo, ríos de llanura y ríos de montaña). Esta precisión se determina a partir de un análisis de incertidumbre definiendo los intervalos de confianza de cada estimación.

A pesar del amplio uso de perfiladores acústicos Doppler (ADCP) para la medición de la velocidad y caudal en canales abiertos y ríos, no existe en la actualidad una metodología rigurosa para la estimación de la incertidumbre de medición de caudales con ADCP (Simpson y Oltman, 1993; Simpson, 2001). Así, es común que se presenten resultados de mediciones realizadas sin definir la precisión en esas estimaciones. Simpson (2001) presenta un modelo simplificado para la predicción de la precisión de las mediciones con ADCP desde plataformas móviles, en términos de la incertidumbre estándar de una sola medición. Sin embargo, el modelo de Simpson considera sólo la zona medida por el ADCP (capa media) y no tiene en cuenta las zonas en las cuales el ADCP no puede registrar datos.

La evaluación de los errores aleatorios y el sesgo en la medición de flujos turbulentos con ADCP ha sido objeto de investigaciones recientes (González-Castro y Muste, 2007; Mueller et al., 2007; Muste et al., 2010; Mueller y Oberg, 2011). González-Castro y Muste (2007) presentan un marco de análisis de las incertidumbres en las mediciones de caudal con ADCP desde plataformas móviles. Sin embargo, este procedimiento no se ha implementado en la práctica.

El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) utiliza en forma exhaustiva la tecnología ADCP desde los años '90 y ha desarrollado a través de la Oficina de Aguas Superficiales (OSW) memorándums (USGS-OSW 2002a; USGS-OSW 2002b) y reportes técnicos a los fines de estandarizar y optimizar el uso de los ADCP en la medición de los caudales (Oberg et al., 2005; Mueller y Wagner, 2006). Las guías desarrolladas por la OSW - USGS incluyen recomendaciones que aseguran una buena

calidad en los datos obtenidos y permiten minimizar los errores en las mediciones del caudal. Ejemplos de estos protocolos y prácticas que aseguran la calidad incluyen, pero no están limitadas a: a) la medición de varios conjuntos de pares recíprocos de transectas, b) configuración adecuada del ADCP para las condiciones actuales de medición, c) la revisión de los datos medidos de caudal con ADCP, y d) la evaluación de técnicas de extrapolación (Mueller y Wagner, 2009). Oberg y Mueller (2007) encontraron que para las mediciones de caudal mediante ADCP analizadas, el rango de incertidumbre (errores aleatorios) en el nivel de confianza del 95% (2 desviaciones estándar) fue de 5,4% para caudales medios realizando 4 transectas y de 4,2% para caudales medios realizando 8 transectas. En base a el resultado mencionado, hasta hace escaso tiempo (2011), la estrategia espacial y temporal de muestreo recomendada para las mediciones de caudal desde plataformas móviles y flujo estacionario fue realizar un mínimo de cuatro (4) transectas en pares recíprocos (Mueller y Wagner, 2009), calculándose el caudal medido como el promedio de los caudales medidos en las 4 transectas. Si el caudal determinado en cualquiera de las 4 transectas difería en más del 5 por ciento del caudal medido, se realizaban un mínimo de 4 transectas adicionales y la media de las 8 transectas se consideraba como el caudal medido. A pesar de que el uso de esta estrategia fue una práctica común en varios países, no existían evidencias científicas que muestren que cuatro transectas representaban una aproximación óptima para las mediciones con ADCP del caudal en ríos con diferentes condiciones de flujo (Oberg y Mueller, 2007).

Un reciente memorándum técnico de la OSW (USGS, 2011) señala que, en condiciones estacionarias o cuasi-estacionarias de flujo, el tiempo de muestreo del flujo es el principal criterio para la determinación del caudal con el fin de reducir la incertidumbre en las estimaciones del mismo. Mediciones recientes de campo (Oberg y Mueller, 2007) sugieren que la duración total de la medición (denominada tiempo de exposición y relacionada a la velocidad del bote) es más significativa en la reducción de la incertidumbre de la medición del flujo realizada con ADCP, que el número de transectas realizadas. Siguiendo la misma línea de razonamiento y basados en estudios de campo, Czuba y Oberg (2008) propusieron que el tiempo es un factor crítico en la reducción de la incertidumbre en la medición.

En este contexto, la determinación de la incertidumbre en las mediciones de caudales para flujo turbulentos mediante ADCP es de fundamental importancia. A partir de la

determinación de la incertidumbre, se pueden optimizar las técnicas y/o metodologías de medición y elaborar recomendaciones para minimizar los errores (sesgo e incertidumbre aleatoria) en el uso de ADCP en la medición de caudales desde plataformas móviles.

1.4. Objetivos

Sobre la base de la problemática expuesta, el objetivo general de la presente tesis es determinar la incertidumbre en las mediciones de caudal con Perfiladores de Corriente Acústicos Doppler (ADCP) desde plataformas móviles a los fines de optimizar las técnicas de medición y elaborar recomendaciones para minimizar los errores (sesgo e incertidumbre aleatoria) en el uso de las técnicas de medición de caudales. Para alcanzar el objetivo general, la presente tesis contempla los siguientes objetivos específicos:

- a) Determinar las incertidumbres en la medición de caudal con ADCP desde plataformas móviles debido a las fluctuaciones turbulentas presentes en el flujo durante la medición.
- b) Determinar las incertidumbres en la medición de caudal con ADCP desde plataformas móviles debido a procesos aleatorios estacionarios presentes en el flujo durante la medición.
- c) Determinar las incertidumbres en la medición de caudal con ADCP desde plataformas móviles debido a fluctuaciones de baja frecuencia presentes en el flujo.

1.5. Organización de la Tesis

En relación al primer objetivo específico, en el **Capítulo 2**, se realizó un análisis sistemático de las incertidumbres en la medición de caudal con ADCP desde plataformas móviles debido a las fluctuaciones turbulentas. A partir de un análisis dimensional y del análisis de campos de flujo turbulento tridimensionales generados con Simulación Numérica Directa (DNS) se desarrollaron ecuaciones que cuantifican la incertidumbre en las mediciones de caudal con ADCP debido a la turbulencia. El análisis dimensional fue utilizado para identificar grupos adimensionales relevantes y establecer entre ellos una relación funcional. Dos parámetros adimensionales para la

cuantificación de la incertidumbre en las mediciones de caudal fueron considerados. Las formas funcionales de las ecuaciones que definen la evolución de estos parámetros se obtienen mediante el muestreo de datos de flujo generados con DNS. Las ecuaciones desarrolladas mediante el análisis dimensional y los datos generados por DNS se verificaron con datos de campo de dos ríos que presentan diferentes características del flujo.

En relación al segundo objetivo específico, en el **Capítulo 3** se analizaron mediciones de caudales realizadas en campo mediante ADCP a los fines de determinar las incertidumbres en la medición de caudal con ADCP debidas a procesos aleatorios estacionarios. Se presenta un modelo para la cuantificación de los errores aleatorios de las mediciones de caudal desde plataformas móviles con ADCP, incluyendo las contribuciones de error de todos los procesos estacionarios presentes durante las mediciones del flujo en campo (por ejemplo, ruido del instrumento, el ruido ambiental, y la turbulencia del flujo). El modelo presentado en este capítulo se basa en el cálculo de la varianza de los caudales medidos utilizando los métodos estadísticos disponibles para el análisis de la incertidumbre de series temporales de velocidades estacionarias. Se analizaron datos medidos a campo con ADCP de tres ríos naturales que presentan diferentes condiciones de flujo con el fin de probar y validar el modelo presentado. El modelo seleccionado a partir de este análisis se utiliza entonces para definir las estrategias de muestreo óptimas mediante la elección del tiempo de exposición requerido por el ADCP a fin de medir con precisión el caudal bajo condiciones de flujo estacionario.

En el **Capítulo 4**, se analizan mediciones de caudales realizadas mediante ADCP en presencia de fluctuaciones de baja frecuencia causadas por efectos topográficos a los fines de determinar la influencia de las mismas en las incertidumbres en medición de caudales. Se utilizó el análisis dimensional para identificar los grupos adimensionales más relevantes que puedan afectar la incertidumbre en la medición de caudal en flujos que presentan fluctuaciones de baja frecuencia. Se evaluó el rol de cada parámetro adimensional en forma simplificada usando datos sintéticos de velocidad del agua obtenidos de una señal sintética. Luego, en base a caudales y datos de velocidades registrados en un canal artificial de grandes dimensiones, se encontraron analogías y diferencias con los resultados obtenidos utilizando las señales de velocidad del agua sintéticas. Finalmente se analizó un caso real, la crecida del Río Mississippi (Estados

Unidos) en Mayo del 2011, en el cual se observaron grandes fluctuaciones de la velocidad del flujo en una zona de la sección transversal. Estas fluctuaciones periódicas de baja frecuencia, generaron diferencias significativas en los caudales medidos durante la crecida, y por lo tanto incertidumbres en la toma de decisiones para la operación de las estructuras de control.

En el **Capítulo 5** se presentan las conclusiones generales de la tesis, recomendaciones y las perspectivas de investigación futuras. Finalmente, en el **Capítulo 6** se presentan las principales referencias bibliográficas consultadas en este estudio.

Los contenidos del Capítulo 2 se encuentran publicados en la revista *Water Resources Research* (Tarrab et al., 2012). El análisis de las incertidumbres en la medición de caudal con ADCP desde plataformas móviles debido procesos aleatorios (Capítulo 3) se encuentra publicado en el *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* (García et al., 2012). El análisis de las incertidumbres en la medición de caudal con ADCP debido a fluctuaciones periódicas del flujo (Capítulo 4) fue presentado en el *Quinto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos (2011)* desarrollado en Santiago del Estero (Tarrab et al., 2011) mientras que el análisis de las mediciones de caudal en el Río Mississippi (Estados Unidos) que se desarrolla en el Capítulo 4 fue presentado en la conferencia *Hydraulic Measurements and Experimental Methods 2012* (García et al., 2012) que se llevó a cabo en Snowbird, Utah, Estados Unidos. Estos dos últimos trabajos se están preparando para ser presentados en una revista científica de alto impacto.

2. Incertidumbres en la medición de caudal con ADCP desde plataformas móviles debido a las fluctuaciones turbulentas

2.1. Introducción

Las mediciones con ADCP se hacen típicamente moviendo un bote con el instrumento a través de una sección transversal a una velocidad menor o igual a la velocidad media del agua. Un ADCP no puede muestrear simultáneamente el campo de flujo instantáneo a través de una sección transversal completa, a medida que el instrumento se mueve en el bote a través de la sección transversal, diferentes estructuras turbulentas que se desplazan con el flujo son muestreadas por el ADCP, generando fluctuaciones en el campo de flujo de la velocidad media. Estas fluctuaciones son dependientes de las características turbulentas propias del flujo y de la metodología empleada para realizar la medición (velocidad del bote, frecuencia del instrumento, etc.).

En el presente capítulo se presenta un análisis sistemático en el cual se cuantifica el rol de las fluctuaciones turbulentas en las incertidumbres (errores aleatorios) de mediciones de caudal con ADCP desde plataformas móviles. Específicamente, este análisis se refiere a la importancia relativa de las estrategias espaciales-temporales de muestreo (por ejemplo, el tiempo de exposición, el número de transectas muestreadas, la frecuencia de muestreo del instrumento) y las condiciones de flujo existentes (por ejemplo, la velocidad media del flujo, la profundidad del agua y el ancho del río) tienen en la contribución de la "turbulencia del flujo" a la incertidumbre de medición de caudales con ADCP. Los resultados presentados en este capítulo corresponden a mediciones de caudal desde embarcaciones en movimiento, no se han considerado mediciones realizadas con el método de la sección media.

En base a un análisis dimensional realizado y a datos de campos de flujos turbulentos tridimensionales generados con Simulación Numérica Directa (DNS) se desarrollaron ecuaciones que cuantifican la incertidumbre en las mediciones de caudal con ADCP debido a la turbulencia.

El análisis dimensional fue utilizado para identificar grupos adimensionales relevantes y establecer entre ellos una relación funcional. Dos parámetros adimensionales para la cuantificación de la incertidumbre en las mediciones de caudal fueron considerados: la variación relativa, $RVar[Q]$ y el error máximo relativo esperado $RME[Q]$. Las formas funcionales de las ecuaciones que definen $RVar[Q]$ y $RME[Q]$ se obtienen mediante el muestreo de datos de flujo generados con DNS.

La simulación directa numérica (DNS) es una herramienta computacional ideal para realizar un análisis sistemático que permita cuantificar el rol de la turbulencia en las incertidumbres de las mediciones de caudal con ADCP, ya que permite crear un conjunto detallado de datos en el cual se pueden aislar las contribuciones debidas a la presencia de la turbulencia del flujo (cualquier conjunto de datos experimentales incluye el ruido intrínseco a la técnica seleccionada). Por otra parte, DNS resuelve un amplio rango de la escalas turbulentas presentes en el flujo sin necesidad de adoptar esquemas de cierre de la turbulencia, proporcionando datos de alta resolución del campo de flujo (tanto espacial como temporal) necesarios para el análisis de la incertidumbre que se realiza en este capítulo (García et al., 2005).

A pesar de que DNS difícilmente se puede aplicar para simular condiciones de flujo observados en campo (debido a limitaciones asociadas al costo computacional de esta técnica de simulación), los niveles de turbulencia alcanzados para números de Reynolds moderados en donde es factible aplicar DNS, son representativos de flujos turbulentos desarrollados. En base a la invarianza del número de Reynolds los resultados pueden ser extrapolados (con cierto criterio) a números de Reynolds mayores. La invarianza con respecto al número de Reynolds implica que las características adimensionales del flujo turbulento desarrollado, es decir, la intensidad de turbulencia, la velocidad media, etc., son independientes del número de Reynolds (Abe et al., 2001). La simulación de DNS se realizó para un valor moderado del número de Reynolds del flujo global y fue validado con resultados experimentales disponibles en la literatura. El campo de flujo tridimensional instantáneo modelado se muestreó simulando las estrategias de muestreo de un ADCP para evaluar la incertidumbre en la medición de un campo de flujo turbulento cuando se utilizan estos instrumentos. Las ecuaciones desarrolladas mediante el análisis dimensional y los datos generados por DNS se verificaron con datos de campo de dos ríos que presentan diferentes características del flujo. Se realizó un análisis detallado de los datos experimentales disponibles a los fines de seleccionar el

mejor conjunto de datos disponibles para ser utilizados en la validación, es decir, se seleccionaron aquellos conjuntos de datos en el que las contribuciones de otros procesos presentes durante la medición (el ruido del instrumento y el ruido ambiental) se reducen al mínimo. Los resultados de este capítulo son útiles para definir la contribución relativa de uno de los procesos aleatorios presentes durante la medición de caudal con un ADCP (sección 1.1.2).

2.2. Análisis dimensional

Los parámetros adimensionales seleccionados para cuantificar la incertidumbre en las mediciones de caudal ($RVar[Q]$ o $RME[Q]$) se pueden estimar usando información relacionada con las condiciones de flujo existentes durante la medición y con la configuración de muestreo seleccionada. Las condiciones de flujo turbulento existentes durante las mediciones se pueden caracterizar por la profundidad del río (H), el ancho de la sección (B), la velocidad media del flujo (V_w), la viscosidad cinemática del agua (ν) y la velocidad de corte (u^*). La configuración de muestreo para una medición de caudal mediante ADCP pueden ser representada por el número total de transectas muestreadas (N_T), la velocidad del bote (V_b), la frecuencia de muestreo del instrumento (f) y el modo de medición del ADCP seleccionado, el cual define el nivel de ruido, representado por la desviación estándar de la velocidad horizontal (σ_u).

El siguiente análisis se realizó para el parámetro adimensional $RVar[Q]$:

$$RVar[Q] = (H, B, V_w, \nu, u^*, N_T, V_b, f, \sigma_u) \quad (2)$$

y luego se extendió al parámetro $RME[Q]$. A partir de estas variables y el teorema Pi de Buckingham (Streeter y Wylie, 1988), los siguientes siete números π adimensionales se definen utilizando u^* (velocidad de corte) y H (profundidad del agua) como variables representativas (magnitudes físicas fundamentales):

$$\pi_1 = N_T; \quad \pi_2 = \frac{\sigma_u}{u^*}; \quad \pi_3 = \frac{B}{H}; \quad \pi_4 = \frac{V_w}{u^*}; \quad \pi_5 = \frac{V_b}{u^*}; \quad \pi_6 = \frac{Hf}{u^*}; \quad (3)$$

$$\pi_7 = \frac{\nu}{u^* H} = \frac{1}{Re_\tau}$$

donde Re_τ es el número de Reynolds que utiliza la velocidad de corte como escala de velocidad característica del flujo. Basándose en el teorema Pi de Buckingham, la varianza relativa de las mediciones de caudal con ADCP puede ser expresada como:

$$RVar[Q] = F\left(N_T, \frac{\sigma_u}{u^*}, \frac{B}{H}, \frac{V_w}{u^*}, \frac{V_b}{u^*}, \frac{Hf}{u^*}, \frac{u^* H}{\nu}\right) \quad (4)$$

Los números adimensionales π_5 y π_6 pueden ser reescritos como:

$$\pi_5 = \frac{V_b}{u^*} = \frac{H/u^*}{H/V_b} \approx \frac{T_t}{T_c} \quad (5)$$

$$\pi_6 = \frac{Hf}{u^*} = \frac{H/u^*}{1/f} = \frac{T_t}{\Delta t} \quad (6)$$

donde $T_t = H/u^*$ es la escala de tiempo de la estructura turbulenta del flujo de tamaño H , $T_c = H/V_b$ es el tiempo en el que el bote recorre una estructura turbulenta del flujo de tamaño H y $\Delta t = 1/f$ es el intervalo tiempo en el muestreo de los perfiles de velocidad. Por lo cual, $RVar[Q]$ puede ser expresada como:

$$RVar[Q] = F\left(N_T, \frac{\sigma_u}{u^*}, \frac{B}{H}, \frac{V_w}{u^*}, \frac{T_t}{T_c}, \frac{T_t}{\Delta t}, Re_\tau\right) \quad (7)$$

Las siguientes hipótesis fueron realizadas y luego validadas durante el desarrollo de este capítulo: a) la relación B/H no es relevante para el análisis, b) $Re_\tau \gg 1$ (la

turbulencia está totalmente desarrollada), c) la relación V_w/u^* presenta valores aproximadamente constantes. Al utilizar datos obtenidos del DNS para evaluar el desempeño de la tecnología acústica Doppler para la caracterización de los flujos turbulentos, el ruido (σ_u/u^*) no es relevante para el análisis. De esta forma, la relación $RVar [Q]$ puede ser expresada como:

$$RVar[Q] = F\left(N_T, \frac{T_t}{T_c}, \frac{T_t}{\Delta t}\right) \quad (8)$$

El análisis preliminar del comportamiento de las variables adimensionales calculadas a partir de los datos experimentales (Oberger y Muller, 2007; Tarrab et al., 2010) muestra una tendencia monótona, por lo cual una ley de potencia es la forma funcional más simple que podría ser utilizada y fue seleccionada *a priori* para el análisis dimensional. Se obtuvo una forma funcional mediante la combinación de los números adimensionales incluidos en la ecuación (8) como (Streeter y Wylie, 1988):

$$RVar[Q] = a_1 \left(N_T^{b_1} \left(\frac{T_c}{T_t} \right)^{c_1} \left(\frac{T_t}{\Delta t} \right)^{d_1} \right) \quad (9)$$

Extendiendo el análisis al parámetro $RME[Q]$, se obtiene:

$$RME[Q] = a_2 \left(N_T^{b_2} \left(\frac{T_c}{T_t} \right)^{c_2} \left(\frac{T_t}{\Delta t} \right)^{d_2} \right) \quad (10)$$

Los parámetros (a_i , b_i , c_i , d_i) que se encuentran en las ecuaciones (9) y (10) se estimaron a partir de un ajuste no lineal de los datos generados del análisis del campo de flujo turbulento tridimensional obtenido a partir de la simulación numérica directa (DNS) para un flujo turbulento en un canal abierto. Los detalles del modelo matemático y numérico y de su validación se encuentran en el siguiente apartado.

2.3. Modelo Matemático y Numérico

Debido a que el principal objetivo en este capítulo es cuantificar el rol de la turbulencia del flujo generada por la interacción del flujo y el fondo en la incertidumbre de medición de caudal con ADCP, se simuló y analizó un caso de un flujo relativamente simple: flujo en un canal horizontal impulsado por un gradiente de presión media uniforme en la dirección del flujo (x). Los efectos de las formas de fondo (por ejemplo dunas), corrientes secundarias, erosión local y las paredes laterales no fueron simuladas ni analizadas en esta tesis debido a que estas particularidades son altamente influenciadas por las características del sitio, tales como la topografía y no se puede predecir un comportamiento general.

Las ecuaciones adimensionales que gobiernan el flujo son:

a) Ecuación de conservación de cantidad de movimiento

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} = \mathbf{G} - \nabla p + \frac{1}{Re_\tau} \nabla^2 \mathbf{V} \quad (11)$$

b) Ecuación de continuidad

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (12)$$

donde $\mathbf{V}=(u,v,w)=(u_x,u_y,u_z)$ es el vector adimensional de la velocidad del flujo, p es la presión dinámica adimensional y, $\mathbf{G}=(1,0,0)$ es la fuerza impulsora (componente tangencial de la fuerza de gravedad). Las variables adimensionales se definen a partir de las siguientes escalas (a) la velocidad de corte, $u^*=(\tau_w/\rho)^{1/2}$, como escala de velocidad donde τ_w es el esfuerzo de corte en el fondo y ρ es la densidad del fluido; (b) profundidad del agua, H , como escala de longitud; y las escalas que se derivan de ellas son (c) $T_l=H/u^*$ y (d) $P=\rho u^{*2}$ para el tiempo y la presión respectivamente. El número adimensional en la ecuación (11) es el número de Reynolds basado en la velocidad de corte y definido como $Re_\tau=u^*H/\nu$ donde ν es la viscosidad dinámica. Para la modelación analizada $Re_\tau=509$, lo que resulta en un número de Reynolds global (basado en la velocidad del flujo) de $Re=V_w H/\nu=9164$, asumiendo una relación V_w/u^*

= 18 calculado con los datos obtenidos de la simulación de DNS.

Las ecuaciones que gobiernan el flujo se resuelven empleando un código pseudoespectral (Canuto et al., 1988). Este código utiliza expansiones de Fourier para las variables del flujo en las direcciones horizontales (x e y , las cuales se refieren a la dirección del flujo y a la dirección transversal al flujo, respectivamente). En la dirección no homogénea vertical, el código utiliza expansiones de Chebyshev con puntos de cuadratura de Gauss-Lobatto. La ecuación de momento y la condición de incompresibilidad se resuelven con una estrategia de pasos fraccionados (Brown et al., 2001). En primera instancia, se resuelve una ecuación de advección-difusión sin tener en cuenta la presión para calcular un campo de velocidades intermedio. Luego se resuelve una ecuación de Poisson para calcular el campo de presiones, y finalmente se realiza una de corrección de presión a los fines de obtener el campo flujo incompresible final. La integración temporal de las ecuaciones se realiza a través de un esquema compuesto Runge-Kutta de tercer orden y Crank-Nicolson. Los detalles de la implementación de este esquema numérico se pueden ver en Cortese y Balachandar (1995). La validación del código se encuentra en Cantero et al. (2007a, 2007b).

El tamaño del dominio computacional utilizado en este trabajo queda definido por: el largo del canal $L_x=4\pi H$; el ancho $L_y=4/3\pi H$, y la altura $L_z=H$. La resolución de la grilla usada es $N_x=256 \times N_y=256 \times N_z=129$ (donde N_i es el número de nodos de la grilla en la dirección i) y los términos no lineales son calculados en una grilla $3N_x/2 \times 3N_y/2 \times N_z$ a los fines de prevenir errores por “aliasing”. La pared del fondo representa un contorno no deslizante para el flujo y la pared superior es un contorno fijo de deslizamiento libre. Las condiciones de borde adimensionales utilizadas en la dirección vertical son:

$$\mathbf{V} = 0 \quad \text{en} \quad z = 0, \quad (13)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0, \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \text{ y } w = 0 \quad \text{en} \quad z = 1 \quad (14)$$

El tiempo integral adimensional utilizado es $T_i u_* / H = 50$ (100,000 pasos de tiempo) luego de que el flujo haya alcanzado estadísticamente el estado estacionario.

El modelo de DNS presentado fue validado mediante la comparación de los perfiles verticales de los parámetros de la turbulencia para un flujo en un canal abierto con resultados experimentales (Nezu, 1977; Nezu y Nakagawa, 1993) y curvas semi-teóricas (Nezu y Rodi, 1986; Nezu y Nakagawa, 1993).

Las variables medias del flujo fueron obtenidas promediando en el tiempo los valores instantáneos en cada ubicación. La Figura 6 muestra los perfiles verticales de la velocidad adimensional media en la dirección del flujo ($u^+ = u/u_*$). Esta figura también incluye la ley de la pared para flujos en canales abiertos (Nezu y Nakagawa, 1993):

$$u^+ = \frac{u}{u_*} \quad z^+ = \frac{z u_*}{\nu} \quad (15)$$

el cual es validado para la subcapa viscosa ($z^+ < 5$), y la ley

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(z^+) + A \quad (16)$$

la cual es conocida como la ley logarítmica que es inherentemente válida en la región de la pared ($0.1 < z/H < 0.3$). En base a lo propuesto por Pope (2000) esto último es equivalente al rango $50 < z^+ < 153$, para $Re_\tau = 509.1$.

Nezu y Rodi (1986) proponen que para un flujo en un canal abierto con fondo liso, la constante de von Karman κ , y la constante integral A presentan los valores universales de 0.41 y 5.29, respectivamente. Las desviaciones de la ley logarítmica que se observan para $z/H > 0.2$ fueron consideradas por Nezu y Nakagawa (1993) agregando una función de estela. Se observa un buen ajuste entre los datos simulados con DNS y las distribuciones de velocidad para cada región.

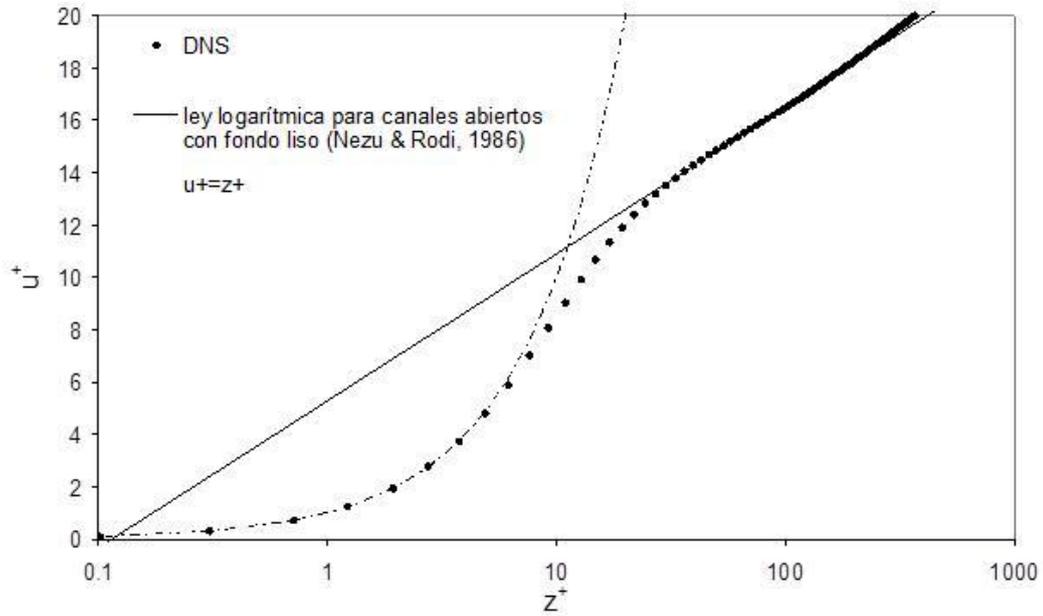


Figura 6. Perfil vertical de la velocidad adimensional media en la dirección del flujo ($u^+ = u/u^*$ y $z^+ = zu^*/\nu$)

Las siguientes figuras (Figura 7, Figura 8 y Figura 9) muestran los perfiles verticales adimensionales de la raíz media cuadrática de las fluctuaciones de la velocidad para la componente en la dirección del flujo (u'), en la dirección transversal (v') y la dirección vertical (w') respectivamente, calculadas con los datos obtenidos de la simulación con DNS. Además, estas figuras incluyen datos experimentales medidos en trabajos de investigación previos para canales abiertos con fondo liso (Nezu, 1977) y relaciones semi-teóricas. Las relaciones semi-teóricas para las intensidades turbulentas adimensionales fueron presentadas por Nezu y Nakagawa (1993):

$$\frac{u'}{u_*} = D_u \exp\left(-\frac{z}{H}\right) \quad (17)$$

$$\frac{v'}{u_*} = D_v \exp\left(-\frac{z}{H}\right) \quad (18)$$

$$\frac{w'}{u_*} = D_w \exp\left(-\frac{z}{H}\right) \quad (19)$$

donde D_u , D_v , y D_w son constantes empíricas válidas para la región logarítmica ($0.1 < z/H < 0.3$ para $Re_\tau = 509.1$; Pope, 2000) en donde la energía turbulenta se encuentra en equilibrio (la tasa de producción de energía turbulenta es igual a la tasa de disipación turbulenta). Las mediciones con hilo caliente presentadas en Nezu (1977) permitieron evaluar las constantes empíricas como: $D_u = 2.30$, $D_v = 1.63$, y $D_w = 1.27$, las cuales demostraron ser independientes del número de Reynolds y del número de Froude.

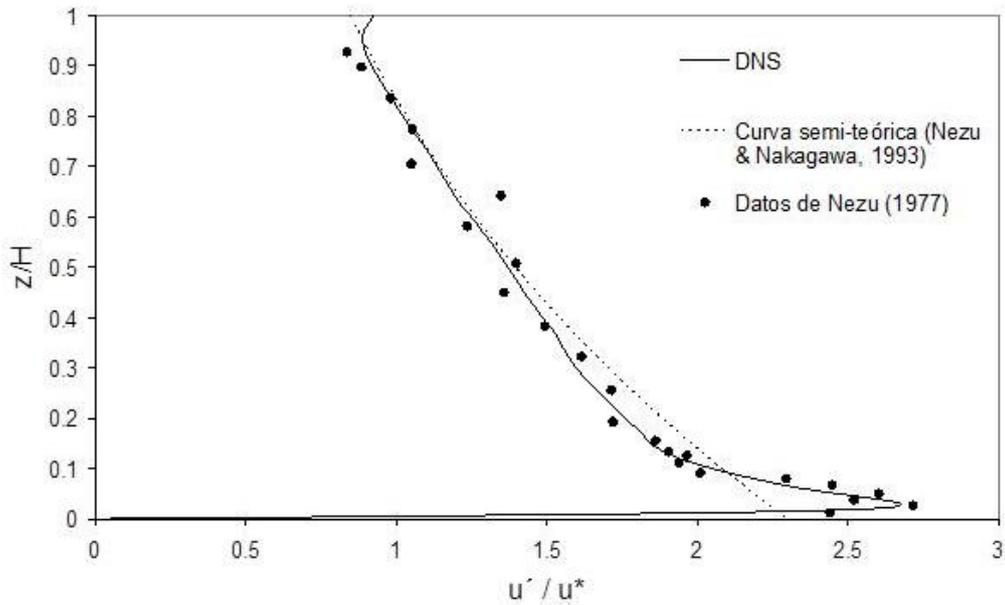


Figura 7. Raíz media cuadrática adimensional de las fluctuaciones de la velocidad en la dirección del flujo (u').

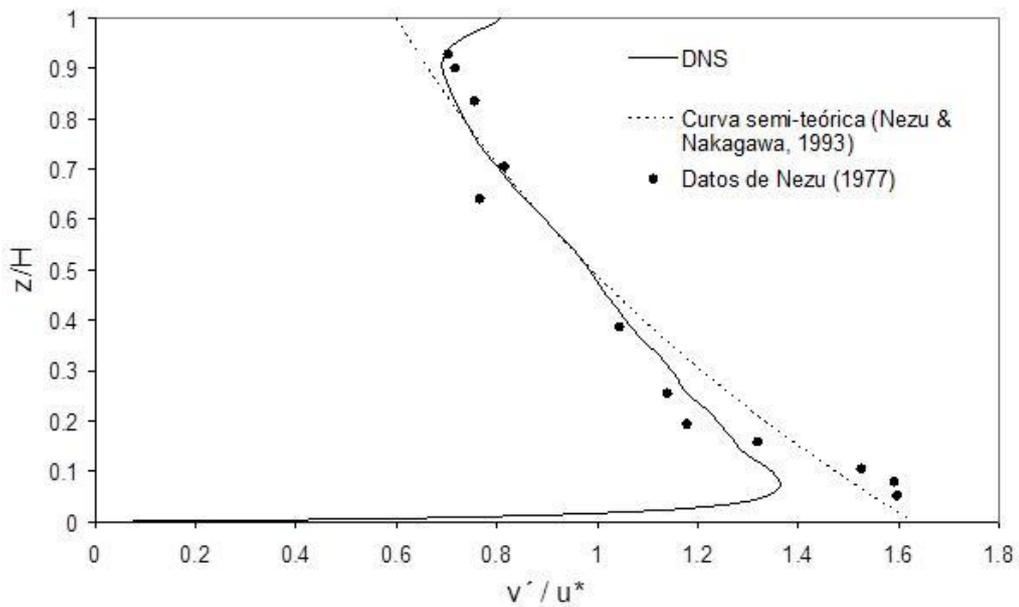


Figura 8. Raíz media cuadrática adimensional de las fluctuaciones de la velocidad en la dirección transversal al flujo (v').

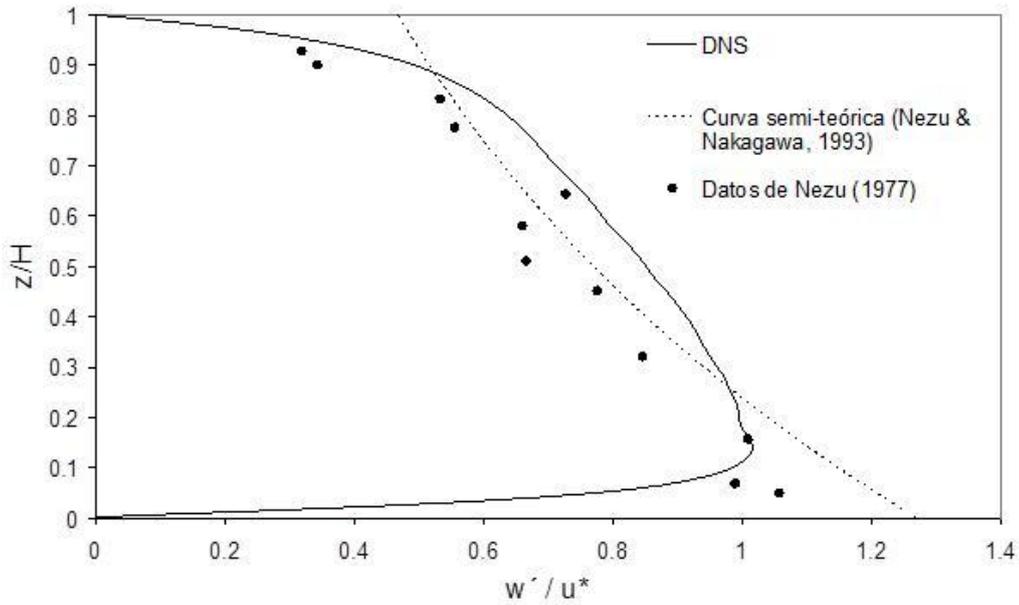


Figura 9. Raíz media cuadrática adimensional de las fluctuaciones de la velocidad en la dirección vertical (w')

Cerca de la pared $z^+ < 50$ ($z/H < 0.1$ para el Re_τ analizado), la generación de energía turbulenta y la disipación no se encuentran en equilibrio. Nezu y Nakagawa (1993) sugirieron para esta región formulas empíricas para la raíz media cuadrática de las fluctuaciones de la velocidad adimensionales en la dirección del flujo para correlacionar los datos cerca de la pared, presentando la siguiente relación empírica:

$$\frac{u'}{u_*} = 0.3 \cdot z^+ \quad (20)$$

Nezu y Nakagawa (1993) también propusieron que la distribución de las fluctuaciones adimensionales de la velocidad en la dirección del flujo (u') presentan un máximo para $z^+ = 10 - 20$ ($z/H = 0.02 - 0.04$ para el Re_τ analizado).

La Figura 10 muestra una comparación entre los perfiles verticales de la energía cinética turbulenta (TKE) adimensional calculada con los datos de la simulación con DNS y la relación semi-teórica propuesta por Nezu y Nakagawa (1993) para la región en donde la energía turbulenta se encuentra en equilibrio:

$$\frac{TKE}{u_*^2} = D \exp\left(-2 \frac{z}{H}\right) \quad (21)$$

Los datos obtenidos con hilo caliente publicados en Nezu (1977) permitieron evaluar la constante empírica como $D = 4.78$.

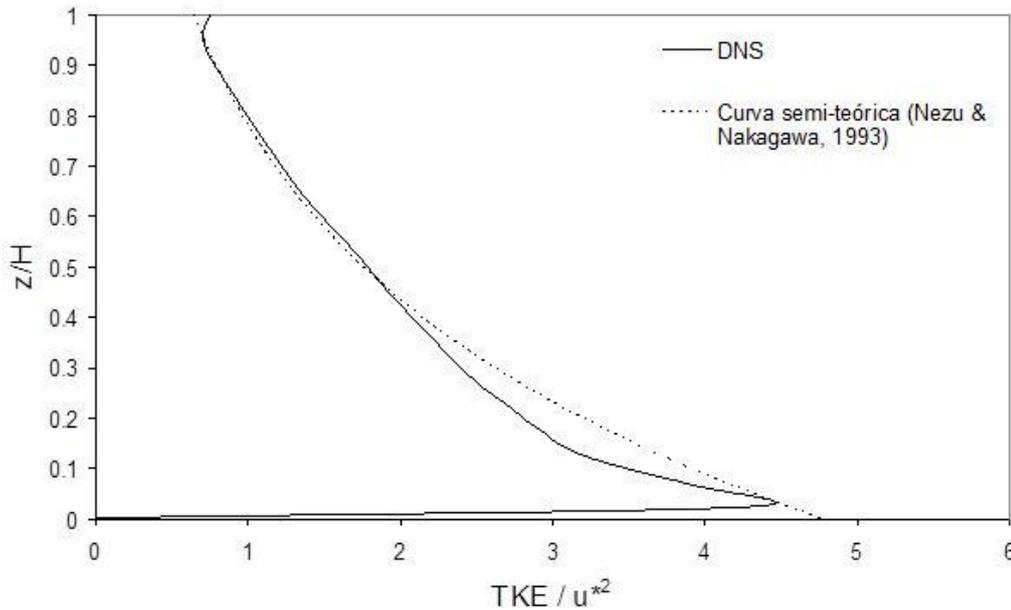


Figura 10. Energía cinética turbulenta adimensional

2.4. Forma funcional obtenida a partir de los datos de DNS

Los parámetros (a_i , b_i , c_i , d_i) que se encuentran en las ecuaciones (9) y (10) fueron obtenidos por un ajuste no lineal de los parámetros adimensionales calculados a partir de los datos generados con DNS. Los caudales fueron calculados integrando en la sección transversal del flujo los datos de velocidad generados en las simulaciones numéricas simulando el uso de un ADCP en movimiento desde una plataforma móvil. Los datos sintéticos son obtenidos en diferentes perfiles verticales con una frecuencia fija de 1 Hz para todos los casos. Cada perfil vertical consta de 129 valores de velocidad (129 celdas). El caudal se calculó para cada transecta mediante la integración de los perfiles de velocidad a través de la sección transversal. Las mediciones simuladas con el ADCP utilizando DNS difieren de las mediciones realizadas con un ADCP en campo en

que los datos generados por DNS fueron muestreados utilizando un ADCP idealizado con un solo haz vertical, mientras que los ADCP miden la velocidad a lo largo de 3 o 4 haces que presentan un ángulo fijo en la vertical y divergen desde el ADCP con la profundidad. Por lo tanto, en el muestreo de los datos del DNS, los datos de velocidad no fueron promediados espacialmente y se asumió homogeneidad horizontal en las velocidades. Debido a que el promedio espacial podría reducir los efectos de las fluctuaciones de la turbulencia, los resultados presentados en este documento representan el límite superior del rol de las fluctuaciones turbulentas del flujo.

Se analizaron tres diferentes tiempos de muestreo adimensionales $T_d = \Delta t/T_t$, con el mismo número global de Reynolds $Re = 9164$ y relación de aspecto $(B/H) = 4.2$, para estimar $RVar[Q]$ y $RME[Q]$. Para cada intervalo de tiempo adimensional ($T_d = 0.123, 0.031$ y 0.016), se utilizaron cuatro valores diferentes de número de transectas realizadas ($N_T = 1, 2, 4$ y 8) y ocho valores diferentes de velocidades del bote (V_b) para obtener el caudal medido en cada caso. Esto resultó en 32 estrategias de muestreo diferentes (cuatro grupos de transectas y ocho velocidades del bote) para cada intervalo de tiempo adimensional (96 en total). Considerando que $RVar[Q]$ y $RME[Q]$ son variables aleatorias, para cada estrategia de muestreo, se utilizaron 20 conjuntos de datos (muestreados comenzando en diferentes tiempos iniciales del período de simulación) para estimar un valor medio y los intervalos de confianza de los dos parámetros. Cada uno de los 20 conjuntos de datos consiste en 12 transectas de los cuales es posible obtener para cada configuración de muestreo un valor de $RVar[Q]$ y $RME[Q]$. Por lo tanto, hay 96 valores medios de $RVar[Q]$ y $RME[Q]$ (los valores medios son el promedio de 20 conjuntos de datos).

A pesar de que el caudal real puede ser calculado en forma precisa a partir de los datos del DNS, se asumió como caudal real al caudal promedio de 12 transectas muestreadas en cada conjunto de datos de DNS, de la misma manera en que se asumió para el caso de las mediciones de campo en las cuales se desconoce el caudal real (Oberg y Mueller, 2007). La comparación entre el caudal real y el caudal promedio de las 12 transectas muestreadas a partir de los datos generados con DNS se encuentra dentro del 1% de diferencia cuando se realizan más de 4 transectas en la sección transversal.

Los conjuntos de datos seleccionados consisten en 12 transectas para cada condición de muestreo en donde cada transecta es realizada a la misma velocidad del bote. Las

diferencias porcentuales se calculan restando al caudal medio para 12 transectas el caudal medio para 1, 2, 4, 6 y 8 transectas y dividiendo por el caudal promedio de las 12 transectas. El error relativo máximo absoluto, $RME[Q]$, y la varianza relativa, $RVar[Q]$, se calcularon para cada conjunto de datos de la siguiente manera:

$$RME[Q] = \frac{|Q - Q_{av}|_{\max}}{Q_{av}}; \text{ y } RVar[Q] = \frac{\overline{(Q - Q_{av})^2}}{Q_{av}^2}, \text{ respectivamente, donde } Q \text{ es}$$

el caudal medido en cada transecta; $|Q - Q_{av}|_{\max}$ es la máxima diferencia absoluta en el caudal dentro del conjunto de datos, Q_{av} es el caudal promedio de las 12 transectas muestreadas en el conjunto de datos (que se considera como el verdadero caudal). $RME[Q]$ es una medida de la desviación máxima en el conjunto de datos y $RVar[Q]$ representa el comportamiento global del conjunto de datos.

La Figura 11 y Figura 12 muestran los histogramas y la correlación, respectivamente, de los valores de $(RVar[Q])^{0.5}$ y $RME[Q]$ estimados en el presente análisis, donde $(RVar[Q])^{0.5}$ es la desviación estándar del caudal medio. Los valores graficados corresponden al promedio de los 20 valores muestreados en una misma configuración. El ajuste realizado en los valores incluidos en la Figura 12 muestra que: $(RVar[Q])^{0.5} = 0.456 \cdot (RME[Q])^{0.951}$ con un coeficiente de determinación $r^2 = 0.99$.

Utilizando los valores representados en las Figura 11 y Figura 12, las variables que definen los 3 tiempos adimensionales de muestreo y las configuraciones de las 32 diferentes muestras analizadas, se calcularon los parámetros (a_i, b_i, c_i, d_i) de las formas finales de las ecuaciones (9) y (10) utilizando una regresión no lineal. La Tabla 1 muestra los valores medios de los parámetros de la ecuación así como los límites inferior y superior del intervalo de confianza del 95%.

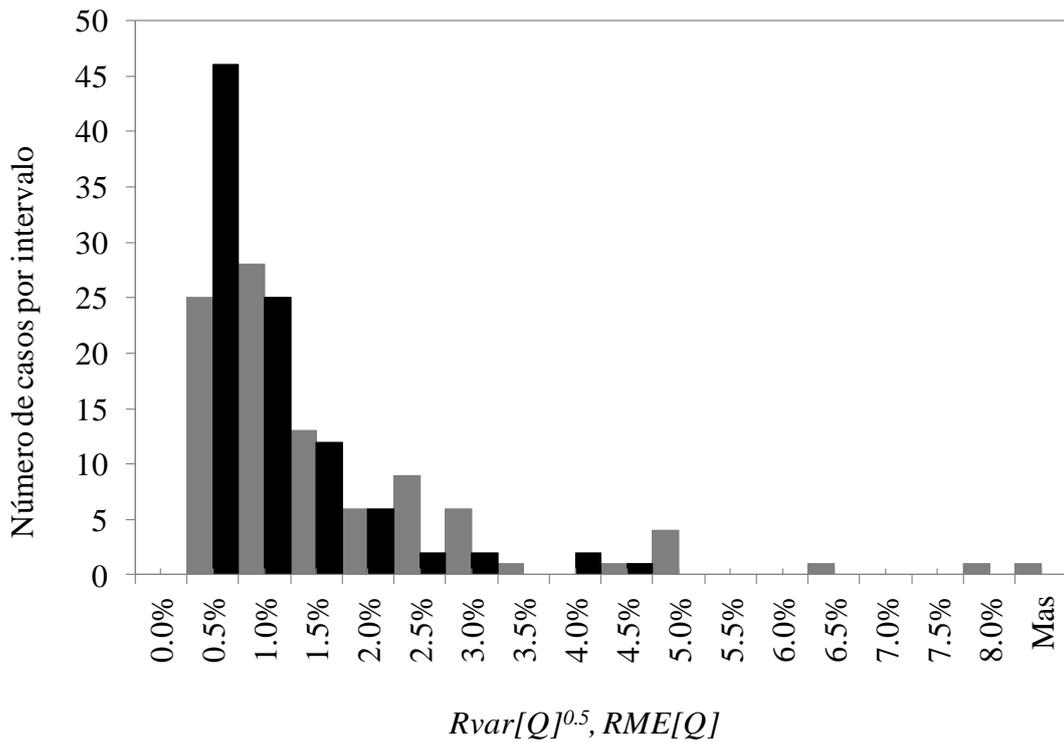


Figura 11. Histograma de $(RVar[Q])^{0.5}$ (negro) y $RME[Q]$ (gris) valores calculados para 96 diferentes configuraciones de muestreo diferentes analizadas en donde $(RVar[Q])^{0.5}$ es la desviación estándar del caudal del flujo medio

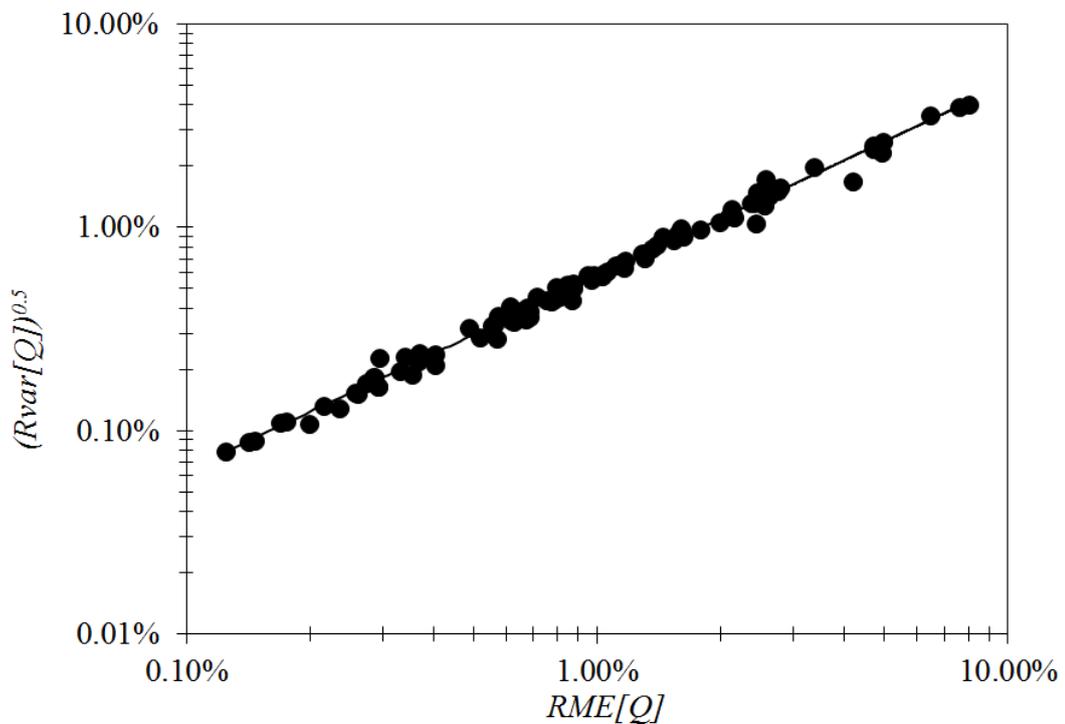


Figura 12. Correlación entre los valores de $(RVar[Q])^{0.5}$ y $RME[Q]$ calculados para 96 diferentes configuraciones de muestreo diferentes analizadas en donde $(RVar[Q])^{0.5}$ es la desviación estándar del caudal del flujo medio.

Tabla 1. Parámetros de las ecuaciones (9) y (10) obtenidos de la regresión no lineal de los datos de DNS

<i>RVar[Q]. Ecuación (9)</i>				<i>RME[Q]. Ecuación (10)</i>			
Para-	intervalo de confianza del 95%			Para-	intervalo de confianza del 95%		
metro	media	límite inferior	límite superior	metro	media	límite inferior	límite superior
a ₁	0.00023	0.0002	0.00026	a ₂	0.03	0.025	0.034
b ₁	-1.39	-1.48	-1.31	b ₂	-0.79	-0.86	-0.73
c ₁	-0.94	-0.99	-0.88	c ₂	-0.43	-0.46	-0.4
d ₁	-0.78	-0.85	-0.72	d ₂	-0.35	-0.4	-0.3

Los resultados muestran que los coeficientes c_2 y d_2 presentan valores similares y sus intervalos de confianza también indican que no son estadísticamente diferentes. Por lo tanto, la ecuación (10) se puede expresar como:

$$RME[Q] = a_4 \left(N_T^{b_4} \left(\frac{T_c}{\Delta t} \right)^{c_4} \right) \quad (22)$$

Sobre la base de los parámetros que se muestran en la Tabla 1 y utilizando el intervalo de confianza del 99%, podemos considerar también que c_1 y d_1 son estadísticamente similares. Por lo tanto,

$$RVar[Q] = a_3 \left(N_T^{b_3} \left(\frac{T_c}{\Delta t} \right)^{c_3} \right) \quad (23)$$

Con las nuevas formas de las ecuaciones, se realizó una regresión lineal para estimar los coeficientes para los nuevos parámetros (a_i , b_i , c_i) de las ecuaciones (22) y (23). Los resultados de la regresión no lineal se muestran en la Tabla 2 junto con el límite inferior y superior para un intervalo de confianza del 95% para cada parámetro. El cálculo de la relación entre las ecuaciones (22) y (23), utilizando los valores de los parámetros a_3 , b_3 , c_3 y a_4 , b_4 , y c_4 (Tabla 2) que se encuentra dentro del intervalo de confianza del 95%, proporciona una ecuación que es estadísticamente similar a la relación, $RVar[Q] =$

$0.21RME[Q]^{1.9}$ derivada partir de la ecuación $(RVar[Q])^{0.5} = 0.456 \cdot (RME[Q])^{0.951}$ presentada antes. La relación de las ecuaciones (22) y (23) (usando los valores medios de los parámetros presentados en la Tabla 2) muestra diferencias que surgen debido a las diferentes variables que intervienen en el proceso de adaptación no lineal.

Tabla 2. Parámetros de las ecuaciones (22) y (23) obtenidos de la regresión no lineal de los datos de DNS

<i>RVar[Q]. Ecuación (23)</i>				<i>RME[Q]. Ecuación (22)</i>			
Para-	intervalo de confianza del 95%			Para-	intervalo de confianza del 95%		
metro	media	límite inferior	límite superior	metro	media	límite inferior	límite superior
a_3	0.00038	0.00034	0.00042	a_4	0.039	0.037	0.041
b_3	-1.41	-1.54	-1.29	b_4	-0.79	-0.86	-0.72
c_3	-0.93	-1.01	-0.86	c_4	-0.43	-0.46	-0.4

Por lo tanto, las ecuaciones (23) y (22) se pueden expresar, respectivamente, como:

$$RVar[Q] = 0.00038 \left(N_T \left(\frac{T_c}{\Delta t} \right)^{0.66} \right)^{-1.41} \quad (24)$$

$$RME[Q] = 0.039 \left(N_T \left(\frac{T_c}{\Delta t} \right)^{0.55} \right)^{-0.79} \quad (25)$$

En las Figura 13 y Figura 14 se muestran la evolución de los parámetros $RVar[Q]$ y $RME[Q]$ variando el número total de transectas realizadas (N_T) y la velocidad del bote (V_b) para cada tiempo de muestreo adimensional. Los números adimensionales mostrados en las abscisas para cada valor graficado son valores de $N_T \left(\frac{T_c}{\Delta t} \right)^x$, siendo x la relación de los coeficientes c_3/b_3 y c_4/b_4 para las ecuaciones (24) y (25) de la Tabla 2 respectivamente. Las variables N_T y T_c se encuentran directamente relacionadas al tiempo de exposición para las mediciones de caudal mediante ADCP desde plataformas móviles. El tiempo óptimo de exposición se puede obtener ya sea aumentando el número de transectas muestreadas (N_T) o disminuyendo la velocidad del bote (aumentando T_c). Por otro lado, Δt indica el efecto de la frecuencia de muestreo ya que afecta el número total de perfiles muestreados. García et al. (2012) muestran que el tiempo de exposición de la medición (a veces llamado duración), y la frecuencia de

muestreo son factores críticos en la reducción de la incertidumbre de la medición de caudal. En las ecuaciones (24) y (25), el exponente para N_T y el exponente de la relación $(T_c/\Delta t)$ son diferentes, siendo el exponente de la relación $(T_c/\Delta t)$ más pequeño. Esto indica que el aumento del número de transectas tiene un mayor efecto en la reducción de la incertidumbre de medición de caudal con ADCP causada por las fluctuaciones turbulentas que el aumento de la frecuencia de muestreo o la disminución de las velocidades del barco, debido a la correlación de la estructura del campo de flujo. El aumento de N_T aumenta el número de muestras independientes.

Los valores incluidos en las Figura 13 y Figura 14 son los valores medios de los 20 conjuntos de datos para cada configuración de muestreo. Además, se muestran los intervalos de confianza del 95% para $RVar[Q]$ y $RME[Q]$ para las condiciones de flujo representadas por $T_d = 0.123$. La curva de mejor ajuste de todos los datos simulados para las ecuaciones (24) y (25), se muestran en la Figura 13 y Figura 14 respectivamente. Ambas estimaciones de la incertidumbre en los caudales medios del flujo, $RVar[Q]$ y $RME[Q]$, disminuyen cuando N_T y T_c se incrementan. Para una misma condición de flujo un incremento en el valor T_c implica un menor valor de V_b .

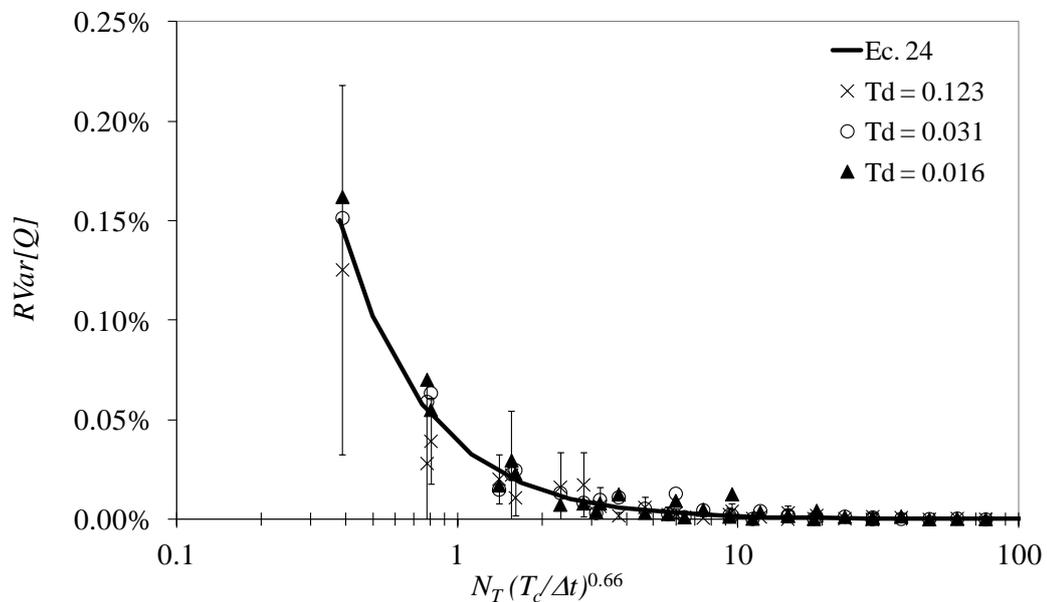


Figura 13. Evolución de $RVar[Q]$ para diferentes configuraciones de muestreo. La curva de mejor ajuste de todos los datos simulados es representada por la ecuación (24)

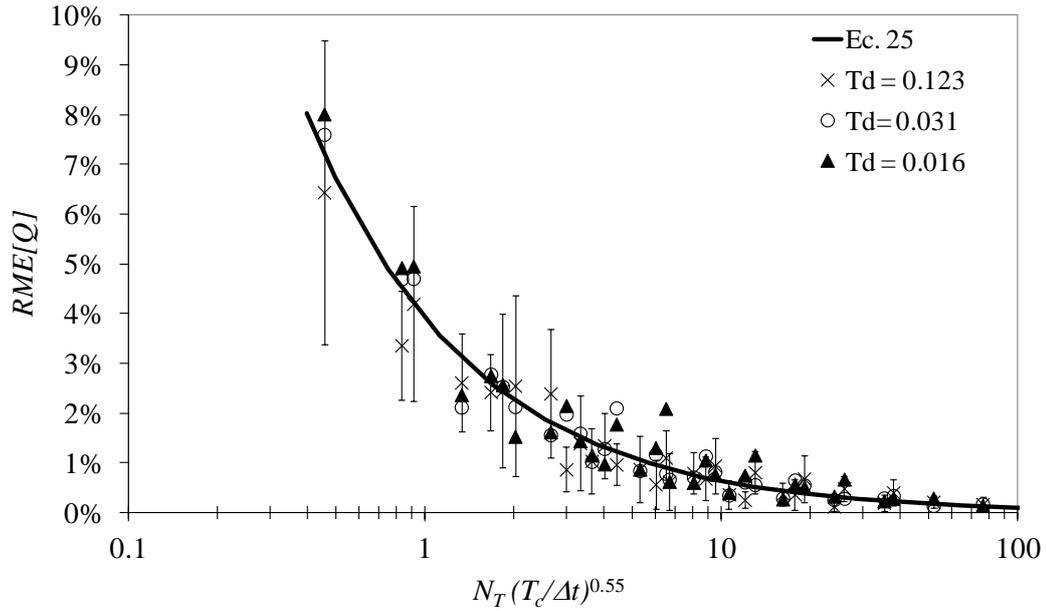


Figura 14. Evolución de $RME[Q]$ para diferentes configuraciones de muestreo. La curva de mejor ajuste de todos los datos simulados es representada por la ecuación (25)

2.5. Validación de las formas funcionales utilizando mediciones de campo

Las formas funcionales de los parámetros $RVar[Q]$ y $RME[Q]$ obtenidas utilizando los datos generados por DNS fueron validadas con datos de campo, junto con las hipótesis incluidas en el análisis dimensional. Se seleccionaron datos de campo en ríos naturales que presentan una amplia variación en las condiciones del flujo y en las condiciones del muestreo. Debido a que sólo los errores aleatorios (incertidumbre) de las mediciones de caudal debido a la turbulencia del flujo puede ser analizada mediante los datos de DNS, se realizó un análisis detallado de los datos de campo disponibles con el fin de seleccionar el conjunto óptimo para el proceso de validación. Los conjuntos de datos de las mediciones de campo se eligieron de modo que el ruido ambiental y del instrumento fuesen minimizados. Los sitios de medición de caudal elegidos para este estudio se muestran en la Tabla 3, y los principales parámetros que describen las condiciones de las mediciones para cada conjunto de datos se resumen en la 0.

Tabla 3. Nombres y ubicaciones de los sitios utilizados en este estudio

Descripción del sitio	ID Sitio	Latitud	Longitud	Área de la cuenca [km ²]
Río Fox en Montgomery, Illinois, EEUU	FoxMon	41.73	-88.33	4,490
Río Mississippi en Chester, Illinois, EEUU	Chester	37.9	-89.84	1,840,000

Tabla 4. Resumen de las condiciones de flujo en cada sitio

ID Sitio	Caudal Total Q_T [m ³ /s]	Caudal medido Q_m [m ³ /s]	Ancho B [m]	Área A [m ²]	Velocidad media del agua U_m [m/s]	Profundidad media H [m]	B/H	Número de Reynolds Re	Número de Froude Fr
FoxMon	17.1	10.6	44.6	85	0.2	1.91	23.4	3.80E+05	0.05
Chester	3270	2347.4	487.6	3016	1.08	6.19	78.8	6.70E+06	0.14

Dos ADCPs de 600 kHz, fabricados por Teledyne RD Instruments (con una configuración del instrumentos enfocando hacia abajo desde una plataforma móvil) se utilizaron para las mediciones de caudal. Las condiciones de muestreo y la configuración del instrumento fueron diferentes en cada conjunto de datos (Tabla 5).

En el río Fox en Montgomery, las mediciones se hicieron con una alta resolución, modo de pulso coherente (modo de agua 11) y un bote manipulado desde la orilla por un sistema de cuerda y polea para controlar la velocidad de la embarcación. En el río Mississippi en Chester, las mediciones se realizaron utilizando el modo de agua de 1 y un bote tripulado más grande (6 m). Los sitios seleccionados en este estudio presentan diferentes valores de la relación de aspecto (B/H), diferentes número de Re y diferentes niveles de ruido σ_u (0 y Tabla 5) de las condiciones simuladas en DNS con el fin de validar las hipótesis que se asumieron en el análisis dimensional: a) la relación B/H no es relevante para el análisis, b) $Re_\tau \gg 1$ (turbulencia completamente desarrollada), c) la relación V_w/u^* presenta valores aproximadamente constantes e igual a 18.

Tabla 5. Descripción de los conjuntos de datos colectados en cada sitio

Sitio y Fecha	Conjunto de datos	Número de perfiles medio por transecta N	Tiempo de exposición medio por transecta, T [s]	Velocidad del bote media V_b [m/s]	Nivel de ruido σ_u [m/s]
FoxMon	1	479	191.1	0.24	0.01 [*]
Fecha: 03/07/2007	2	379	151.1	0.3	0.01 [*]
	3	247	98.5	0.47	0.01 [*]
Chester	1	807	496.8	1.01	0.14
Fecha: 18/09/2001	2	773	475.5	1.08	0.14

Información de la configuración del instrumento para todas las transectas/sitios
0.25m Distancia sin registro, 1 pulsos en el agua, 1 pulsos en el fondo, Modo en el fondo 5

Información específica de la configuración de muestreo en cada sitio

600 kHz ADCP, modo en el agua 11, 0.10 m Tamaño de celda, 0.09 m Profundidad del ADCP, $f = 2.5$ Hz.

FoxMon *Comunicación escrita (D. Mueller, USGS) para $H < 2$ m.
600 kHz ADCP, Modo en el agua 1 (WV = 1.88 m/s),

Chester 0.50 m Tamaño de celda, 0.35 m Profundidad del ADCP, $f = 1.62$ Hz.

Cada conjunto de datos resumido en la Tabla 5 se compone de datos de 12 transectas en el mismo lugar. Cada conjunto de datos de campo seleccionado (12 transectas de cada uno) se analizó utilizando la misma metodología descrita para los datos de DNS. Así, el caudal medio de 12 transectas se supone que es el verdadero caudal y la $RVar[Q]$ y el $RME[Q]$ asociados con 1, 2, 4 y 8 transectas consecutivas fueron calculados como la varianza relativa y el error absoluto máximo relativo de las muestras de caudal disponibles en cada conjunto de datos.

Existe un buen ajuste entre los valores de $RVar[Q]$ y $RME[Q]$ calculados a partir de DNS y los calculados en base a los datos de campo (Figura 15 y Figura 16). Las diferencias entre $RVar[Q]$ estimada a partir de los datos de DNS y $RVar[Q]$ calculada basada en datos de campo son probablemente debido a la presencia de otros procesos aleatorios que afectan a la medición (por ejemplo, el ruido Doppler, el ruido ambiental, etc.). Los valores de la relación de aspecto B/H analizados en se encuentran en un rango que va desde 4 para los datos de DNS a 23.4 y 78.8 para FoxMon y Chester respectivamente. No existen diferencias significativas entre los datos de FoxMon, Chester y los de DNS, con lo cual se validan las hipótesis realizadas a priori. La forma

funcional estimada con los datos DNS representa un límite inferior de las incertidumbres previstas en las mediciones de campo de caudal realizadas con ADCP.

Las (24) y (25) pueden utilizarse para cuantificar el rol de las fluctuaciones turbulentas del flujo en las incertidumbres de las mediciones de caudal con ADCP. Sin embargo, las ecuaciones (24) y (25) no han sido formuladas como una herramienta para la estimación de incertidumbres en medición de caudal con ADCP de todas las fuentes de error. Los efectos del ruido del instrumento y el ruido ambiental no se reflejan en los coeficientes de las ecuaciones (24) y (25). Los resultados indican que los errores aleatorios debido a la turbulencia del flujo son grandes cuando se realizan mediciones en flujos poco profundos ($H < \sim 0.5$ m) y cuando las velocidades del bote durante la medición del caudal son relativamente grandes. A los fines de ilustrar esto, se calcularon velocidades críticas del bote (velocidades medias máximas) utilizando las ecuaciones (24) y (25) y $V_b = H/T_c$ (ver ecuación (5) para 3 diferentes niveles de incertidumbre debido a la turbulencia del flujo. La Tabla 6 muestra las velocidades críticas para valores de $[RVar[Q]]^{0.5}$ y $RME[Q]$ menores o igual al 1%, 2% y 3%, y suponiendo que por lo menos se realizan dos transectas ($N_T = 2$) con un intervalo de muestreo (Δt) = 1 seg. Por ejemplo, valores de $[RVar[Q]]^{0.5}$ mayores que el 1% fueron observados en la medición de un flujo de 1 m de profundidad realizando dos transectas y con velocidades del bote mayores que 0.68 m/s. Por otro lado, los valores para el error máximo relativo (definido por $RME[Q]$) mayores que el 1% fueron observados en la medición de un flujo profundo de 2 m, realizando dos transectas y con velocidades del bote mayores que 0.30 m/s (Tabla 6). Aunque la frecuencia de muestreo no se puede modificar en la configuración del ADCP cuando se define el modo óptimo, los resultados muestran que el aumento de la frecuencia de muestreo por 2 tendrá el mismo efecto que la disminución de la velocidad del bote a la mitad. Así, los valores de $([RVar[Q]]^{0.5})$ debido a la turbulencia del flujo son menores al 3% en el caso de más habitual de condiciones de flujo y de muestreo realizadas en campo y cuando se realizan al menos dos transectas. Por otro lado, es posible que la $RME[Q]$ debido a turbulencias del flujo supere el 3% en el caso de flujos de aguas poco profundas.

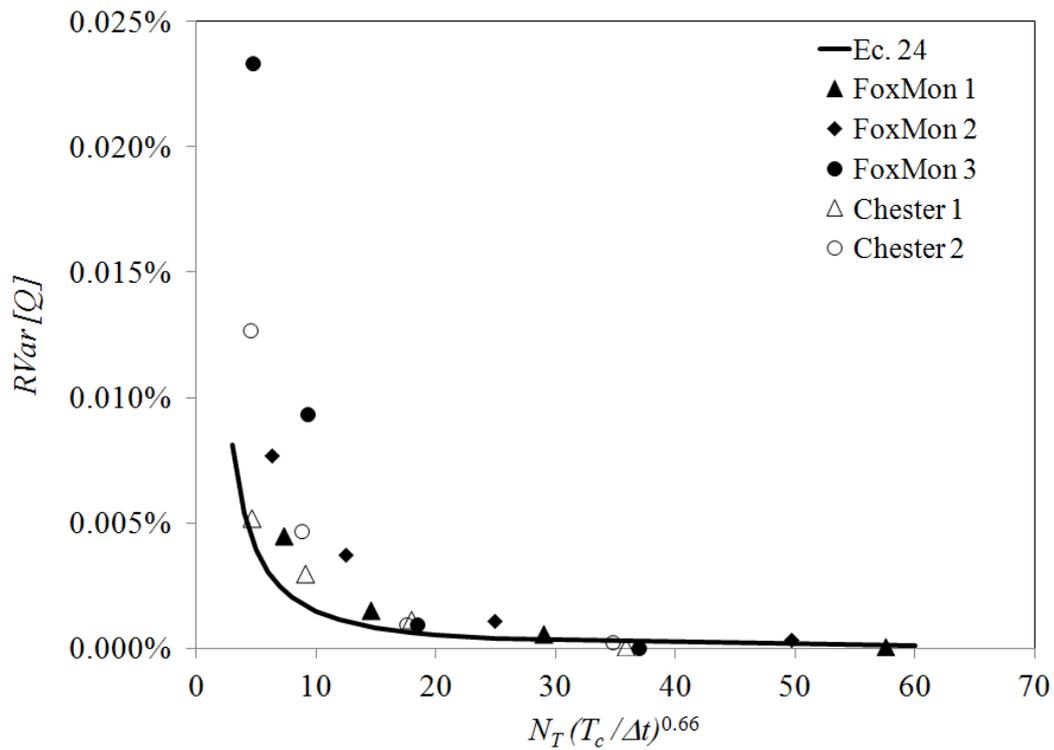


Figura 15. Valores de $RVar[Q]$ estimados con la simulación numérica (DNS, ec.(24)) y datos de campo (Río Fox en Montgomery, IL y Río Mississippi en Chester, IL)

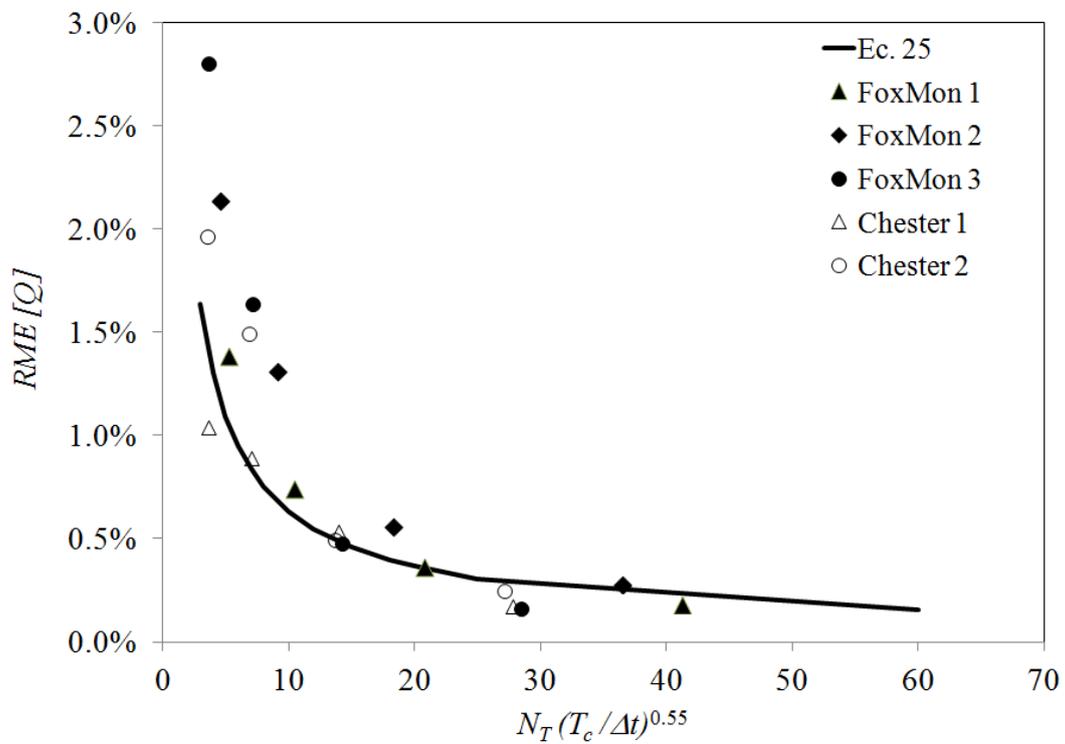


Figura 16. Valores de $RME[Q]$ estimados con la simulación numérica (DNS, ec.(25)) y datos de campo (Río Fox en Montgomery, IL y Río Mississippi en Chester, IL)

Tabla 6. Velocidades de bote críticas (velocidades máximas en m/s) aceptables para niveles de incertidumbre debido a la turbulencia del flujo (definidas por $([RVar[Q]]^{0.5})$ y $RME [Q]$) menores o iguales que el 1%, 2% y 3%, asumiendo $N_T = 2$ y $\Delta t = 1$ seg.

H [m]	$[RVar[Q]]^{0.5}$			H [m]	$RME[Q]$		
	1%	2%	3%		1%	2%	3%
0.5	0.34	1.51	3.61	0.5	0.08	0.38	0.97
1	0.68	3.02	7.23	1	0.15	0.76	1.94
2	1.36	6.04	14.46	2	0.3	1.51	3.88

2.6. Conclusiones de este capítulo

En el presente capítulo se presentó un análisis sistemático que permite cuantificar el rol de las fluctuaciones turbulentas del flujo en las incertidumbres las mediciones de caudal realizadas con perfiladores de corriente Doppler acústicos desde plataformas móviles. Se utilizaron conjuntos de datos de velocidades tridimensionales con alta resolución espacial y temporal generados a partir de una Simulación Numérica Directa (DNS) de un flujo turbulento en un canal abierto. DNS presenta una herramienta ideal para generar este tipo de datos debido a que: a) permite incluir en el análisis solo la contribución de las fluctuaciones turbulentas del flujo y b) la simulación resuelve todas las escalas temporales y espaciales presentes en el flujo sin la necesidad de esquemas de cierre de la turbulencia. Aunque DNS difícilmente se puede aplicar a flujos de escala de campo, los niveles de turbulencia alcanzados para números de Reynolds moderados en donde DNS es factible de aplicar son representativos de la naturaleza de flujos turbulentos. Se desarrollaron funciones adimensionales que permiten cuantificar la incertidumbre debido a la turbulencia del flujo en función de parámetros adimensionales relacionados la configuración del muestreo y a las condiciones del flujo. Las funciones fueron validadas con mediciones de campo. Los resultados muestran que aumentar el número de transectas tiene un mayor impacto en la reducción del rol de las fluctuaciones de la turbulencia sobre las incertidumbres de las mediciones de caudal con ADCP que el aumento de la frecuencia de muestreo y la disminución de las velocidades del bote. Esto se debe a la estructura de correlación del campo de flujo turbulento, y podría atribuido a que el aumento de N_T aumenta el número de muestras independientes. Además, los resultados indican que los errores aleatorios, debido a la turbulencia del flujo se incrementan en flujos pocos profundos ($H < 0.5$ m) con velocidades de bote relativamente grandes.

3. Incertidumbres en la medición de caudal con ADCP desde plataformas móviles debido a procesos aleatorios estacionarios

3.1. Introducción

La evaluación de los errores aleatorios y el sesgo en la medición de flujos turbulentos con ADCP ha sido objeto investigaciones recientes de mediciones con ADCP (González-Castro y Muste, 2007; Mueller et al., 2007; Muste et al., 2010; Mueller y Oberg, 2011). La Oficina del Servicio de Aguas Superficiales (OSW) ha publicado directrices técnicas y políticas especificando prácticas que garantizan calidad a los fines de minimizar los errores aleatorios y el sesgo en las mediciones de caudal (Oberg et al., 2005; Mueller y Wagner, 2006). Ejemplos de estas políticas y prácticas que aseguran la calidad incluyen, pero no están limitadas a: (1) la medición de varios conjuntos de pares recíprocos de transectas, (2) configuración adecuada del ADCP para las condiciones actuales de medición, (3) la revisión de los datos medidos de caudal con ADCP, y (4) la evaluación de técnicas de extrapolación (Mueller y Wagner, 2009). Oberg y Mueller (2007) encontraron que para las mediciones de caudal mediante ADCP analizados, el rango de incertidumbre (errores aleatorios) en el nivel de confianza del 95% (2 desviaciones estándar) fue de 5,4% para caudales medios realizando 4 transectas y de 4,2% para caudales medios realizando 8 transectas.

Los errores aleatorios y el sesgo en las mediciones ADCP se ven afectados por factores tales como, la ubicación y las condiciones de la medición, la turbulencia del flujo, estructuras turbulentas coherentes (por ejemplo estelas detrás de obstrucciones), las estrategias de muestreo espacial y temporal, la configuración del ADCP, y las técnicas de procesamiento de señales utilizadas.

En este capítulo se presenta un modelo desarrollado para la cuantificación de los errores aleatorios de las mediciones de caudal desde plataformas móviles con ADCP, incluyendo las contribuciones de error de todos los procesos estacionarios presentes durante las mediciones del flujo en campo (por ejemplo, ruido del instrumento, el ruido ambiental, y la turbulencia del flujo). Como se mencionó en el capítulo 1, el término

"ruido del instrumento" se utiliza para referirse al ruido electrónico, el término "ruido ambiental" se utiliza para referirse al efecto que las condiciones de la medición tienen en el rendimiento del instrumento, por ejemplo, las estelas turbulentas, las ondas de superficie, y el ruido Doppler, y el término "turbulencia del flujo" se utiliza para referirse a la turbulencia generada por la interacción del flujo con el fondo. Incluso las mediciones obtenidas con un instrumento ideal (que no presenta ruido electrónico y que no se encuentran afectadas por las condiciones de medición) tendrán errores aleatorios debido a las fluctuaciones propias del flujo turbulento.

El intervalo de confianza es aquel intervalo sobre el valor medido (de caudal) en el cual se espera que se encuentre el verdadero valor del caudal. El intervalo de confianza define la incertidumbre en el valor medido que es causada por los errores aleatorios. Una aproximación para el intervalo de confianza de un parámetro definido θ (caudal de flujo) se puede calcular utilizando la técnica estándar, con una probabilidad de cobertura igual a $(1-2\alpha)$ o nivel de confianza $100(1-2\alpha)\%$, como: $\theta \pm z^{(1-\alpha)} (RVar[Q])^{1/2}$, donde $RVar[Q]$ es una estimación de la varianza del error de Q , α es el nivel de significancia, y, $z^{(1-\alpha)}$ indica el percentil de una distribución normal con media cero y varianza igual a la unidad, en una tabla normal estándar, $z = 2$ para un intervalo de confianza del 95%, Taylor, 1997, p . 159)

El modelo presentado en este capítulo se basa en el cálculo de la varianza de los caudales medidos, $RVar[Q]$, utilizando los métodos estadísticos disponibles en la actualidad para el análisis de la incertidumbre de series temporales de velocidades estacionarias. Dos casos que representan diferentes características del campo de flujo muestreado se analizaron mediante esta aproximación. El Caso 1 representa un campo de flujo muestreado que no está correlacionado en el tiempo y en el espacio, mientras que el Caso 2 representa un campo de flujo muestreado que está correlacionado en el tiempo y en el espacio. A los fines de seleccionar la ecuación apropiada para la estimación de la varianza de las mediciones de caudal, se analizaron las diferencias en las características estadísticas del campo de flujo real y el campo de flujo turbulento muestreado mediante un ADCP. Aun cuando se consideran todas las precauciones posibles sugeridas por los fabricantes de ADCP, las correlaciones espaciales y temporales del campo de flujo tri-dimensional muestreadas son diferentes a las del campo de flujo real, debido a la resolución espacial y temporal del instrumento, a la presencia de ruido del instrumento y al ruido ambiental.

Se analizaron datos de campo medidos con un ADCP en tres ríos naturales que presentan diferentes condiciones de flujo con el fin de validar el modelo presentado. El modelo seleccionado a partir de este análisis se utiliza luego, para definir las estrategias de muestreo óptimas mediante la elección del tiempo de exposición requerido por el ADCP para medir con precisión el caudal bajo condiciones de flujo estacionario. Los hallazgos presentados en este trabajo proveen una herramienta fundamental para la optimización de las estrategias de muestreo en la medición de caudal con ADCP.

3.2. Modelo conceptual

3.2.1. Modelo para la estimación de la varianza de la velocidad media del flujo muestreada en una ubicación fija.

Supongamos que una señal de velocidad de agua $u(t)$ de un flujo turbulento aleatorio estacionario ha sido registrada en una determinada ubicación en un intervalo de tiempo finito T ($T = N \Delta t$, donde N es el número total de muestras en la señal de tiempo, Δt es el intervalo de muestreo $= 1/f$, y f es la frecuencia de muestreo). El verdadero valor medio de $u(t)$ es U , que es independiente de t porque $u(t)$ es un proceso aleatorio estacionario. Una estimación del valor medio de la señal muestreada (U_T) se puede calcular como:

$$U_T = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N u_j. \quad (26)$$

donde, u_j con $j = 1, 2, 3, \dots, N$ son los valores registrados de $u(t)$. Conceptualmente, U_T se puede estimar muchas veces mediante la repetición de un experimento o un programa de medición en condiciones estadísticamente similares. Diferentes estimaciones de U_T se pueden calcular utilizando la ecuación (26) sobre un conjunto o colección de señales de tiempo (con una base de tiempo común). Así, la precisión de la estimación de U (es decir, U_T) puede ser representada por el error cuadrático medio de U_T (MSE_{U_T}) como:

$$MSE_{U_T} = E[(U_T - U)^2] \quad (27)$$

donde $E[()]$ indica el valor esperado de una cantidad si el experimento o medición se

repite muchas veces. Debido a que U_T estimada a partir de la ecuación (26) es una estimación no sesgada de U (el valor esperado de U_T es U), MSE_{UT} es igual a la varianza de la estimación de la media ($Var[U_T]$). El valor de $Var[U_T]$ describe el error aleatorio de la estimación de U_T (la parte del error que no es sistemática y que puede ocurrir en cualquier dirección con diferentes magnitudes entre señal de tiempo registrada y otra). La varianza relativa de la velocidad media medida $RVar[U_T]$ se define aquí como:

$$RVar[U_T] = \frac{Var[U_T]}{U^2} \quad (28)$$

En la práctica, generalmente es imposible repetir un experimento o alguna campaña de medición en condiciones estadísticamente similares y, por lo tanto, se dispone de una única señal de tiempo para cada ubicación y condición de flujo del río. En tales casos, el MSE_{UT} y la varianza $Var[U_T]$ deben estimarse a partir de una señal de tiempo única. Bendat y Piersol (2000, p. 467) presentan una ecuación general para estimar la varianza de la media de la muestra, $Var[U_T]$, de una única señal de tiempo correlacionada como:

$$Var[U_T] = \frac{\sigma_u^2}{N} + \frac{2}{N^2} \sum_{k=1}^{N-1} (N-k) \cdot C_{uu}(k\Delta t), \quad (29)$$

donde σ_u^2 es la varianza asociada con la señal de tiempo de la variable aleatoria $u(t)$, $k\Delta t$ es el tiempo de desfasaje o lag, $C_{uu}(k\Delta t)$ es la función de autocovarianza de la señal de tiempo de la variable $u(t)$:

$$C_{uu}(k\Delta t) = R_{uu}(k\Delta t) - U^2, \quad (30)$$

y $R_{uu}(k\Delta t)$ es la función de autocorrelacion de la variable $u(t)$:

$$R_{uu}(k\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [u_j \cdot u_{j+k}] \quad (31)$$

A los fines de analizar la contribución de cada uno de sus términos, la ecuación (29) fue analizada representando diferentes condiciones de flujo y configuraciones de muestreo utilizando un modelo exponencial para la función de autocorrelación $R_{uu}(k\Delta t)$, la cual ha demostrado describir con precisión una señal temporal de velocidad en un flujo turbulento (García et al., 2006):

$$R_{uu}(k\Delta t) = U_T^2 + \sigma_u^2 \cdot \exp\left[-\left(\frac{k\Delta t}{T_x}\right)\right], \quad (32)$$

donde T_x es la escala de tiempo integral de la señal muestreada. La Figura 17 muestra los valores de la varianza adimensional (calculada como $\frac{Var[U_T]}{\sigma_u^2}$) de la velocidad media de la muestra calcula utilizando: (a) la función de autocorrelación exponencial representada en la ecuación (32), (b) una escala del tiempo integral del campo de flujo muestreado fija T_x ; (c) un tiempo de muestreo fijo T , y (d) diferentes frecuencias de muestreo $f = 1/\Delta t$.

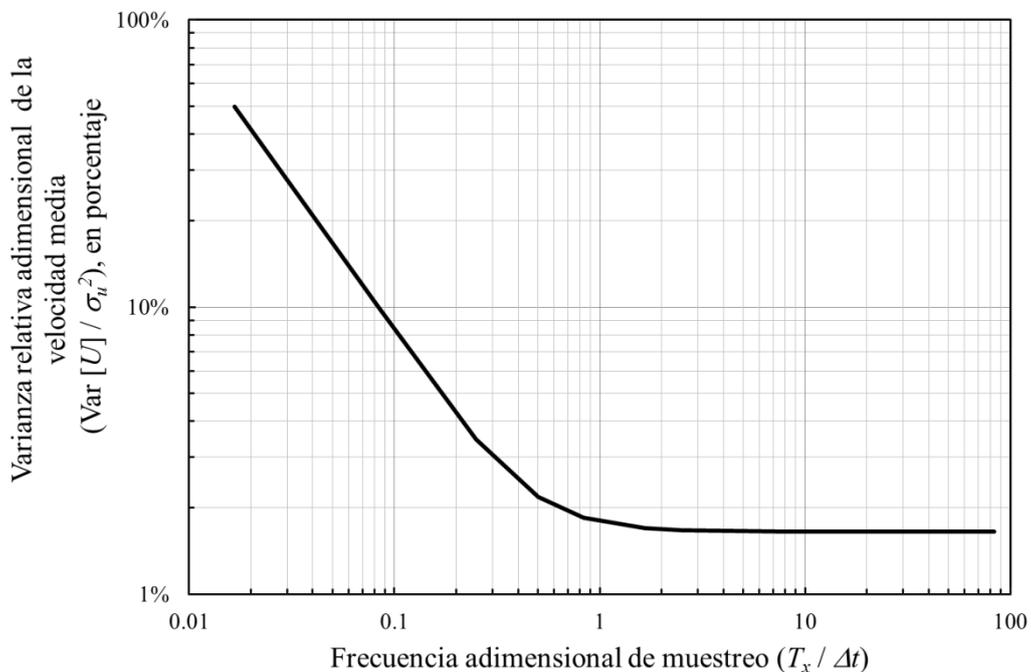


Figura 17. Varianza adimensional de la velocidad media de la muestra ($Var[U]/\sigma_u^2$) estimada usando ecuaciones (29) y (32). Las características del flujo muestreado son: $T_x = 1$ s, Tiempo de muestreo = 2 minutos

En la Figura 17 se pueden identificar dos casos que representan diferentes configuraciones de muestreo de un proceso aleatorio.. En el **caso 1**: $T_x \ll \Delta t \ll T$ (las muestras no están correlacionadas), y en el **caso 2**: $\Delta t \ll T_x \ll T$ (las muestras están correlacionados). Las estimaciones de la varianza de la velocidad media de la muestra para los dos casos se analizan a continuación.

Caso 1: $T_x \ll \Delta t \ll T$ (muestras no correlacionadas)

En el Caso 1, las muestras no están correlacionados y $C_{uu}(k\Delta t) = 0$ para $k \geq 1$ con lo cual la ecuación (29) se reduce a:

$$\text{Var}[U_T] = \frac{\sigma_u^2}{N} = \frac{\sigma_u^2 \cdot \Delta t}{T} \quad (33)$$

de la ecuación (28)

$$I_u = \frac{\sigma_u}{U_T}$$

$$\text{RVar}[U_T] = \frac{I_u^2}{N} = \frac{I_u^2 \cdot \Delta t}{T}, \quad (34)$$

$$I_u = \frac{I_u^2 \cdot \Delta t}{T},$$

donde $I_u = \sigma_u / U_T$ es una medida normalizada de la dispersión de la distribución de probabilidad de $u(t)$. Para las condiciones de flujo y muestreo representadas en la Figura 17, el Caso 1 (muestras no correlacionadas) es aplicable para $T_x/\Delta t$ en el rango de ≈ 0.016 a 0.2 .

Caso 2: $\Delta t \ll T_x \ll T$ (muestras correlacionadas)

Si la frecuencia de muestreo es suficientemente alta ($T_x/\Delta t > 1$) para garantizar la coherencia de las muestras (condiciones que generalmente se satisfacen en señales de velocidad registradas para caracterizar la turbulencia en instalaciones de laboratorio) la ecuación (29) se reduce a (Tennekes y Lumley, 1972, pág. 212)

$$\text{Var}[U_T] = \frac{\sigma_u^2}{T/2T_x} \quad (35)$$

y

$$\text{RVar}[U_T] = \frac{I_u^2}{T/2T_x} \quad (36)$$

La comparación de las ecuaciones (33) y (35) muestra que en el caso que las muestras estén correlacionadas (Caso 2), N en la ecuación (33) no debe ser el número real de muestras, pero debe ser ajustada para reflejar el número efectivo de muestras (número de escalas de tiempo integrales en el tiempo de muestreo). De lo contrario, la varianza calculada, basada en N , será menor que el valor real. Así, el número efectivo de muestras para el cálculo de la media de la muestra en el Caso 2, N_{me} , es igual a $T/2T_x$.

3.2.2. Modelo para la estimación de la varianza de los caudales medidos con ADCP desde plataformas móviles

Un ADCP instalado en una embarcación en movimiento permite cuantificar el caudal en tiempo real al atravesar el río o canal de un margen a la otra. Como se mencionó en el Capítulo 1, los ADCPs son perfiladores que proporcionan mediciones continuas de la velocidad a lo largo de la columna de agua. La columna de agua se divide en profundidad en celdas y el ADCP reporta una velocidad para cada celda en la profundidad. En la Figura 18 se muestra un esquema que ilustra la sección transversal del río durante una medición de caudal mediante una embarcación en movimiento con ADCP. Como se mencionó en el Capítulo 1, el ADCP no puede medir velocidades cercanas a la superficie del agua debido a la profundidad de inmersión del instrumento y a la distancia sin registro (“*blanking distance*”). Tampoco los ADCP pueden medir cerca del fondo debido a la interferencia del lóbulo lateral del haz del sonido (Mueller y Wagner, 2009, fig. 3). La extensión de la zona no medida en la superficie del agua para las mediciones de caudal con ADCP se rige por la profundidad de inmersión ADCP, la configuración del ADCP, y la distancia no medida (“*blanking distance*”), y típicamente

puede variar desde 0.2 m a 0.8 m. La extensión de la zona no medida cerca del fondo normalmente oscila entre el 6 al 9% de la profundidad. Además, cuando el ADCP se aproxima a una margen, las profundidades eventualmente serán demasiado pequeñas para registrar datos válidos. Por lo tanto, el caudal calculado por un ADCP es una suma de la porción medida en la sección transversal y las estimaciones de caudal realizadas por extrapolaciones en las zonas no medidas de la sección transversal en la parte superior, inferior, y ambas márgenes. El análisis que se presenta a continuación se basa en el error aleatorio del caudal medido en la zona de la sección transversal que es medida por el ADCP y no en las zonas que el caudal es estimado por extrapolación. Basándose en el análisis anterior para estimar la varianza de la velocidad media de una muestra, se puede estimar la varianza relativa en el caudal medido. En un análisis posterior presentado en la sección 3.3.5, se muestra que la varianza del caudal medido es aproximadamente igual a la varianza del caudal total en las mediciones de caudal con ADCP que consisten en más de un transecta.

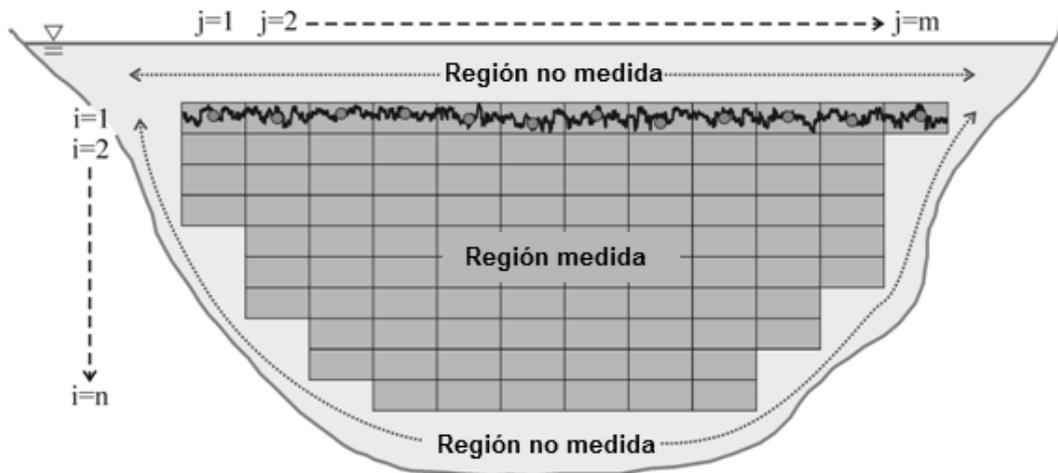


Figura 18. Representación de la porción medida de la sección transversal del río durante la medición de caudal desde el bote en movimiento (m_i es el número total de perfiles en la sección transversal en la ubicación vertical i y n es el número de celdas en la dirección vertical)

El caudal en la región de medida de la sección transversal del río se calcula utilizando el campo de flujo muestreado como:

$$Q_T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} A_{ij} U_{ij}, \quad (37)$$

donde m_i es el número total de celdas en la sección transversal en una posición vertical i o número de perfiles verticales, n es el número máximo de celdas en la región medida en la dirección vertical, y U_{ij} y A_{ij} son la velocidad longitudinal media del flujo y el área en sección transversal en la celda (i, j) , respectivamente. Las estimaciones del caudal, incluyendo todas las celdas en la región medida en la posición vertical, puede ser calculada utilizando los datos de velocidad registrados por un ADCP en movimiento como:

$$Q_i = \sum_{j=1}^{m_i} U_i A_{ij}, \quad (38)$$

donde U_i es la velocidad media en la sección transversal en la posición vertical i ,

calculada como $U_i = \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{m_i} u_{ij}$, y u_{ij} , son los valores cuasi-instantáneos registrados en

las celdas i, j . Aunque se pueden obtener múltiples muestras para una celda determinada, el ADCP promedia todos los valores y solo informa un valor. Por lo tanto, los valores de u_{ij} deben ser considerados cuasi-instantáneos, ya que sólo un valor se

encuentra disponible por celda, así, $Q_i = \sum_{j=1}^{m_i} U_i A_{i,j}$ y $Q_T = \sum_{i=1}^n Q_i$. Si el bote se mueve a

una velocidad constante y la configuración de muestreo del instrumento no cambia, A_{ij} es una constante y es igual a A_c , el área media de celdas, por lo que $Q_i = m_i U_i A_c$.

Utilizando técnicas de análisis de incertidumbre en las mediciones físicas (Taylor, 1997, p. 60) y suponiendo que las mediciones de velocidad no se encuentran correlacionadas, la varianza del caudal en la región de la sección transversal del río medida puede ser estimada como:

$$Var[Q_T] = \sum_{i=1}^n Var[Q_i], \quad (39)$$

y

$$Var[Q_T] = \sum_{i=1}^n A_c^2 m_i^2 Var[U_i] \quad (40)$$

Si se asume una varianza de la velocidad media de flujo homogénea en toda la sección transversal (esta suposición se analiza y es validada más adelante), entonces la varianza se encuentra dominada por el error de muestreo (ruido del instrumento y ruido ambiental) ya que la varianza dominada por la turbulencia del flujo generada por la interacción del flujo con el fondo muestra valores más grande cerca del fondo. Entonces, $Var[U_i] = \text{constante} = Var[U_T]$.

Luego,

$$Var[Q_T] = A_c^2 Var[U_T] \sum_{i=1}^n m_i^2 \quad (41)$$

Así, la variación relativa del caudal medido $RVar[Q_T] = \frac{Var[Q_T]}{Q_T^2}$ se estima como:

$$\frac{Var[Q_T]}{Q_T^2} = \frac{A_c^2}{A_T^2} \frac{Var[U_T]}{U_{mc}^2} \sum_{i=1}^n m_i^2 = \frac{Var[U_T]}{U_{mc}^2} \frac{\sum_{i=1}^n m_i^2}{\left(\sum_{i=1}^n m_i\right)^2} \quad (42)$$

donde U_{mc} es la velocidad longitudinal del flujo media en la sección transversal ($Q_T = U_{mc} A_T$); $A_T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} A_{ij} = M \cdot A_c$; y $M = \sum_{i=1}^n m_i$. En el caso de una sección transversal

rectangular, $m_i = m$ para todo i y $\frac{\sum_{i=1}^n m_i^2}{\left(\sum_{i=1}^n m_i\right)^2} = \frac{n m^2}{n^2 m^2} = \frac{1}{n}$.

Con lo cual, el número de celdas efectivas, N_{eq} , se calcula con la relación $\frac{\left(\sum_{i=1}^n m_i\right)^2}{\sum_{i=1}^n m_i^2}$,

y es igual a n para un canal rectangular.

$Var[U_T]$ se estima mediante la ecuación (33). La ecuación (42) sólo puede ser utilizada para estimar $Var[U_T]$ en el Caso 1, porque el análisis utilizado para obtener la ecuación (42) requiere que las muestras no se encuentren correlacionadas. Por lo tanto,

$$RVar[Q_T] = \frac{1}{N_{eq}} \frac{I_{Um}^2 \cdot \Delta t}{T} \quad (43)$$

donde $I_{Um}^2 = \sigma_u^2 / U_{mc}^2$. El modelo presentado en la ecuación (43) muestra que el tiempo de exposición durante la medición (también llamado duración de la medición), el tamaño de la celda vertical (N_{eq} en la ecuación (43) se encuentra directamente correlacionado con el tamaño de la celda vertical), y la frecuencia de muestreo son factores críticos en la reducción de la incertidumbre en las mediciones de caudal. Los resultados de este modelo indican que el tiempo de exposición es más importante que el número de transectas realizadas en la reducción de la incertidumbre de las mediciones de caudal con ADCP. Estos resultados coinciden con los análisis de las mediciones de campo reportados por Oberg y Mueller (2007), Czuba y Oberg (2008) y Tarrab et al. (2012)

Los resultados de este modelo también indican que el uso de grandes celdas reduce la incertidumbre en las mediciones de velocidad (reduciendo I_{Um}) pero también reduce N_{eq} . Por otro lado, la profundidad a la primera celda es dependiente del modo de agua seleccionado y del tamaño de la celda, por lo tanto, un incremento del tamaño en la celda aumenta el área no medida cerca de la superficie del agua. De manera similar, cuando el tamaño de la celda se incrementa, la zona no medida cerca del fondo también aumentará debido a que, si cualquier parte de una celda cae dentro de la zona de interferencia del lóbulo lateral, esa celda será típicamente excluida del cálculo del caudal en la región medida. Mientras que los errores aleatorios en las mediciones de velocidad pueden disminuir al aumentar el tamaño de la celda, la incertidumbre en la medición total no disminuirá debido a que una mayor proporción del flujo debe ser estimada (por extrapolación a la superficie y al fondo). Así, los resultados del modelo sugieren que debe utilizarse un valor óptimo para el tamaño de la celda, considerando ambos efectos.

3.3. Validación del modelo conceptual utilizando datos de campo

3.3.1. Datos de campo

Se analizaron mediciones de caudal realizadas con ADCP en tres ríos naturales a los efectos de evaluar la estructura de correlación del campo de flujo muestreado y validar las estimaciones de la varianza del caudal medido (ecuación (43)). Los tres sitios de medición seleccionados para este análisis se muestran en la Tabla 7. Las condiciones de flujo medidas fueron muy diversas como lo indican los parámetros del flujo mostrados en la Tabla 8. Los valores que se muestran en la Tabla 8 son un promedio de 12 transectas para FoxMon, conjunto de datos 1; Chester, conjunto de datos 1, y Paraná, conjunto de datos 2 (ver Tabla 9). Los valores correspondientes al ancho y al área de la sección transversal incluidos en la Tabla 8 se han calculados en forma paralela al tramo medio de la embarcación.

Tabla 7. Nombres y ubicaciones de los sitios utilizados

Nombre del sitio	ID Sitio	Latitud	Longitud	Area de la cuenca [km ²]
Río Fox en Montgomery, Illinois, USA	FoxMon	41.73	-88.33	4,490
Río Mississippi en Chester, Illinois, USA	Chester	37.9	-89.84	1,840,000
Río Parana en Aguas Corrientes, Santa Fe, AR	Parana	-31.69	-60.45	2,300,000

Tabla 8. Resumen de las condiciones de flujo para cada sitio

ID Sitio	Caudal Total	Caudal medido	Ancho	Area	Velocidad media del agua	Profundidad media	B/H	Número de Reynolds	Número de Froude
	Q_T	Q_m	B	A	U_m	H		Re	Fr
	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m]	[m ²]	[m/s]	[m]			
FoxMon	17.1	10.6	44.6	85.2	0.2	1.91	23.4	3.80E+05	0.05
Chester	3,270	2,347	487.6	3,016	1.08	6.19	78.8	6.70E+06	0.14
Parana	6,322	5,061	598.9	5,275	1.2	8.81	68	1.10E+07	0.13

Las mediciones con ADCP en FoxMon (Tabla 7) se realizaron con un pequeño bote remolcado manualmente con un cable desde la orilla. Mediante la utilización de este sistema experimental, las velocidades del bote fueron bien controladas y la media de las velocidades del bote varió en un rango de 0.06 m/s a 0.47 m/s (Tabla 9). Las mediciones con ADCP en Chester y Paraná (Tabla 7) se llevaron a cabo desde embarcaciones tripuladas con velocidades de bote menores o iguales a la velocidad del agua (Mueller y Wagner, 2009, p.22). En cada sitio se recolectaron múltiples conjuntos de datos (Tabla 9) utilizando diferentes configuraciones del ADCP. Para las mediciones de caudal, se utilizaron ADCPs Teledyne RD Instruments Rio Grande, dos de 600 kHz y uno de 1200 kHz. Las opciones de configuración de muestreo del ADCP seleccionadas comunes para todas las transectas y sitios son las siguientes: distancia desde que se inicia el muestreo o “*blanking distance*”: 0.25 m; perfiles instantáneos (pings) para monitoreo de velocidad en el agua: 1, perfiles instantáneos (pings) para seguimiento del fondo: 1; modo del fondo: 5; referencia de la velocidad del bote: seguimiento del fondo (*bottom track* en inglés). La información de configuración específica para cada sitio de muestreo fue: a) FoxMon: 600 kHz ADCP, modo de velocidad del agua: 11, tamaño vertical de la celda: 0.10 m, profundidad del ADCP: 0.09 m, $f = 2.5$ Hz, b) Chester: 600 kHz ADCP, modo de velocidad del agua: 1, la velocidad ambigua: 1.88 m/s, tamaño vertical de la celda: 0.50 m, profundidad del ADCP: 0.35 m, $f = 1.62$ Hz, c) Paraná: 1200 kHz ADCP, modo de velocidad del agua: 1, velocidad ambigua: 1.75 m/s, tamaño vertical de la celda: 0.25 m, profundidad del ADCP: 0.30 m, $f = 1.69$ Hz. Los valores de nivel de ruido reportados en la Tabla 9 corresponden a las desviaciones estándar de la velocidad horizontal estimadas a partir de WinRiver II (Teledyne RD Instruments, 2009), a excepción de los datos de FoxMon que se estimaron sobre la base de información suministrada por Teledyne RD Instruments, asumiendo una profundidad < 2 m (David Mueller, USGS, comunicación personal, 2011).

La mayoría de los conjuntos de datos incluidos en la Tabla 9 corresponden a registros de velocidad y caudal para 12 transectas consecutivas, a excepción de los conjuntos de datos 4 y 5 en FoxMon. A pesar de que estos últimos datos consisten en menos de 12 transectas consecutivas, estos datos fueron utilizados para un análisis complementario, porque las configuraciones de muestreo y las velocidades del bote (< 0.2 m/s) durante estas mediciones podrán resultar a priori adecuadas para la captura de la coherencia en las estructuras turbulentas del flujo. El análisis de los datos medidos

en campo no mostró evidencia de sesgos direccionales.

Tabla 9. Descripción de los conjuntos de datos medidos en cada sitio

Sitio y Fecha	Conjunto de datos	Número de transectas	Número de	Tiempo de	Velocidad	Nivel de
			perfiles medio por transecta	exposición medio por transecta, T	del bote media, V_b	ruido
			M	[s]	[m/s]	[m/s]
FoxMon 3 de Julio de 2007	1	12	479	191.1	0.24	0.01
	2	12	379	151.1	0.3	0.01
	3	12	247	98.5	0.47	0.01
	4	8	717	286.4	0.16	0.01
	5	2	1853	740.8	0.06	0.01
Chester 18 de Septiembre de 2001	1	12	807	496.8	1.01	0.14
	2	12	773	475.5	1.08	0.14
Parana 27 de Noviembre, 2009	1	12	833	492.5	1.25	0.13
	2	12	796	471.2	1.27	0.13
	3	12	689	407.2	1.45	0.13

3.3.2. Características del campo de flujo turbulento y su muestreo

Los campos de flujo turbulento en ríos y canales naturales no son aleatorios independientemente, sino que se correlacionan en el tiempo y en el espacio (Nezu y Nakagawa, 1993, p. 159). Los parámetros de turbulencia comúnmente utilizados para caracterizar el flujo turbulento se enumeran a continuación:

- L_t = Escala de longitud de los vórtices que contienen la máxima energía (también llamada escala de longitud integral turbulenta). En los ríos y canales naturales, L_t se encuentra en el orden de la profundidad del agua H (por ejemplo, $L_t = 0.77 H$ para la distancia vertical desde el fondo del canal $> 0.6 H$, Nezu y Nakagawa, 1993, p.71).
- I_{ut} = intensidad de turbulencia = σ_{ut} / U , donde σ_{ut} es la raíz media cuadrática (RMS) de las fluctuaciones turbulentas en la señal de velocidad del agua registrada.
- U_c = velocidad convectiva (es del orden de la velocidad media longitudinal del agua U en los ríos naturales (Heskestad, 1965).
- $T_t = L_t / U_c$ = Escala de tiempo integral turbulenta

La mayoría de las técnicas de medición de caudales requieren muestrear el campo de flujo por medio de mediciones de velocidad del agua (por ejemplo, usando un ADCP). Aun cuando el instrumento, la configuración del instrumento, y los protocolos de muestreo sean optimizados, los verdaderos valores de los parámetros turbulentos del flujo descritos anteriormente no serán los mismos que los valores calculados a partir de las mediciones de velocidad (campo de flujo muestreado). Este resultado no significa que el caudal medido (muestreado) no es válido. Los procesos de toma de muestras han sido optimizados para una buena estimación del caudal medio, pero el campo de velocidades muestreado no representa necesariamente con exactitud el comportamiento de los parámetros turbulentos. Por ejemplo, una medición con una frecuencia de muestreo muy baja (por ejemplo, 0.2 Hz) puede proporcionar una medición de caudal buena (estimada), pero no proporciona ninguna información útil sobre la estructura de correlación de la turbulencia del flujo. Las diferencias entre los valores de los parámetros turbulentos reales y los medidos son causadas por errores aleatorios y de sesgo relacionadas con la configuración de muestreo, el ruido del instrumento y el ruido ambiental. Así, el campo de flujo muestreado es una representación experimental del campo de flujo turbulento y puede ser caracterizado por los siguientes parámetros:

- Escala de tiempo integral = T_x o T_y para las direcciones longitudinal y transversal, respectivamente.
- Escala de longitud integral turbulenta = L_x ,
- Velocidad convectiva = U_x ,
- I_u = coeficiente de variación = σ_u/U_T , donde σ_u es la RMS de la señal de velocidad muestreada.

Diferentes procesos físicos aleatorios, tales como el ruido del instrumento, el ruido ambiental y la turbulencia del flujo contribuyen a las fluctuaciones observadas en la señal registrada. Por lo cual, I_u^2 (utilizado en las ecuaciones (34) y (36) para estimar la varianza relativa de la velocidad media) incluyen todas las fluctuaciones generadas por diferentes procesos. Si los procesos físicos aleatorios primarios que contribuyen a las fluctuaciones no se encuentran correlacionados, σ_u^2 y I_u^2 corresponden a la suma de las

contribuciones de las fluctuaciones de todos los procesos físicos aleatorios (Nikora y Goering, 1998), como se indica en las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_u^2 = \sigma_{ut}^2 + \sigma_{uvm}^2 + \sigma_{uen}^2 \quad (44)$$

$$I_u^2 = I_{ut}^2 + I_{uvm}^2 + I_{uen}^2 \quad (45)$$

donde los subíndices “*t*”, “*vn*”, y “*en*” representan las contribuciones respectivas de la turbulencia del flujo, el ruido ambiental y el ruido electrónico a las fluctuaciones medidas. Nezu y Nakagawa (1993, p. 60) mostraron que la intensidad turbulenta máxima, I_{ut} , en la capa exterior de una corriente natural (aquella parte del flujo que está en la región superior al 20% de la profundidad de flujo) es aproximadamente igual al 11%. En los casos en los cuales existe correlación de las diferentes fuentes de error (por ejemplo, la turbulencia del flujo y el ruido Doppler pueden estar correlacionados en mediciones Doppler coherentes pulso-a-pulso), se deben añadir más términos a las ecuaciones (44) y (45). Los términos adicionales incluyen la estructura de correlación de las diferentes fuentes de ruido (Taylor, 1997, p. 212).

Las escalas integrales de tiempo y longitud del campo de flujo se encontrarán muy sesgadas hacia valores bajos en comparación a las mismas cantidades del campo de flujo real para situaciones en las cuales la señal de velocidad de la muestra se caracteriza por la presencia de importantes niveles de ruido no turbulento. De esta manera, el campo de flujo muestreado no estará correlacionado y el cálculo de la varianza de las estimaciones del caudal de flujo corresponde al Caso 1 (ecuación (43)) aunque $T_t/\Delta t \gg 1$ (el campo real de flujo esta correlacionado).

3.3.3. Estructura de correlación del campo de flujo muestreado con ADCP

Los valores de la escala integral de tiempo del campo de flujo muestreado T_x se pueden estimar en cada transecta utilizando series temporales de velocidad en diferentes ubicaciones de la vertical mientras se mide con un ADCP desde una embarcación en movimiento. Por lo cual, el campo de velocidades muestreado en estas condiciones contiene fluctuaciones de baja frecuencia causadas por la presencia de la variación

espacial del campo de flujo. Estas fluctuaciones, cuya escala de tiempo es mayor que la escala de tiempo del flujo turbulento, no contribuyen a la varianza del error, por lo que se separaron de la señal muestreada utilizando un filtro pasa alto con una frecuencia de corte de 1/60 Hz. El valor de la frecuencia de corte fue elegido basándose en las características de las mediciones analizadas y utilizando criterio ingenieril. La escala integral de tiempo T_x , que caracteriza la estructura de correlación de la componente de alta frecuencia de la señal de velocidad del agua muestreada en un punto de la vertical, se calcula mediante la integración de la función de autocovarianza de la señal filtrada (con el filtro paso alto) hasta el primer cruce a cero en el dominio del tiempo (Wernersson y Trägårdh, 2000), es decir,

$$T_x = \int_0^{t_0} C_{xx}(\tau) \cdot d\tau, \quad (46)$$

donde $C_{xx}(\tau)$ es la función de la autocovarianza de la señal de velocidad longitudinal del agua, τ es el tiempo de retardo, y t_0 es el tiempo de retardo en el primer cruce a cero.

Las funciones de autocovarianza de la componente Este y Norte de la velocidad del flujo en el conjunto de datos del Paraná (conjunto de datos 1, transecta 1) no se encuentran correlacionadas para las diferentes celdas (Figura 19). Las principales características de la señal de velocidad de agua muestreada en diferentes celdas utilizando un ADCP desde un bote en movimiento en FoxMon, Chester, y Paraná se detallan en la Tabla 10. Las estimaciones de la escala integral de tiempo del campo real de flujo turbulento T_t se calcula en base a las condiciones de flujo en cada sitio (Tabla 8) como $T_t = H/U_m$, donde U_m = velocidad media del agua en la sección transversal. Así, los valores de T_t son 9.5 s, 5.7 s y 7.3 s, para las condiciones de flujo analizadas en FoxMon, Chester, y Paraná respectivamente. A pesar de que la estimación de la escala integral de tiempo del campo de flujo turbulento real $T_t / \Delta t \gg 1$ (por ejemplo 9.5 s en FoxMon) la escala integral de tiempo del campo de flujo muestreado, T_x , se encuentra sesgada hacia abajo, con un valor del orden de Δt ($\Delta t = 0.4$ s para FoxMon y alrededor de 0.6 s para Chester y Paraná, Tabla 10.). Este sesgo hacia abajo en los resultados de T_x es resultado de la falta de correlación en la señal de velocidad muestreada causada por procesos aleatorios no correlacionados (por ejemplo ruido del instrumento o ruido

ambiental) presente durante las mediciones de velocidad. El ruido produce decorrelación de la señal y por lo tanto la función de autocorrelación reduce su valor a cero más rápido que en las señales sin ruido (García et al., 2005). De este modo, las escalas integrales de tiempo del campo de flujo muestreado se encuentran sesgadas hacia abajo en comparación con la escala integral de tiempo del campo de flujo turbulento real. A pesar de que el Caso 1 se define cuando $T_x \ll \Delta t \ll T$ (lo que implica muestras no correlacionadas), no es posible obtener experimentalmente $T_x \ll \Delta t$, debido a la técnica numérica que se utiliza para aproximar la integral numérica (regla trapezoidal) de la ecuación (46). Esto se deduce de que para las muestras no correlacionadas, el valor de la función de autocovarianza de la serie de tiempo en el primer tiempo de desfase o lag ($C_{xx}(\tau=\Delta t)$) es aproximadamente igual a cero y la aproximación de la región bajo la gráfica de la función $C_{xx}(\tau)$ como un trapecio y calcular su área, ofrece una estimación de la escala de tiempo integral $T_x = \Delta t/2$. Así, el valor más bajo posible de T_x (para la función positiva de autocovarianza) es la mitad del tiempo de muestreo.

Tabla 10. Características del campo de flujo muestreado obtenido desde el bote en movimiento en FoxMon, Chester y Paraná

Sitio	Conjunto de datos	ID Transecta	Celda	Profundidad [m]	Velocidad		I_{U_x}	I_{U_y}	T_x [s]	T_y [s]
					Este U_x [m/s]	Norte U_y [m/s]				
FoxMon	4	0	1	0.4	-0.11	-0.2	0.19	0.12	0.46	0.58
FoxMon	4	0	5	0.9	-0.11	-0.19	0.22	0.14	0.65	1.06
Chester	1	1	1	1.3	0.8	-0.74	0.22	0.26	0.43	0.34
Chester	1	1	5	3.3	0.86	-0.88	0.23	0.24	0.42	0.35
Chester	1	1	8	4.8	0.88	-0.89	0.23	0.26	0.44	0.53
Chester	1	1	10	5.8	0.89	-0.88	0.23	0.24	0.35	0.52
Parana	1	1	1	0.9	-1.03	-0.92	0.16	0.17	0.39	0.43
Parana	1	1	5	1.9	-0.97	-0.91	0.18	0.19	0.31	0.48
Parana	1	1	10	3.2	-0.93	-0.9	0.2	0.22	0.32	0.49
Parana	1	1	15	4.4	-0.88	-0.84	0.22	0.24	0.34	0.6
Parana	1	1	20	5.7	-0.86	-0.86	0.24	0.23	0.37	0.69

Sobre la base de las características observadas del campo de flujo muestreado con ADCP desde plataformas móviles, la ecuación (43) (Caso 1, las muestras no están correlacionados) es apropiada para la estimación de la varianza relativa en las mediciones de caudal $RVar[Q]$ asociados con diferentes tiempos de medición T .

Además, los valores observados de los coeficientes de variación de las dos componentes de la velocidad horizontal (I_{U_x} y I_{U_y}) son homogéneos y mayores que los valores presentados por Nezu y Nakagawa (1993, p. 60) para la intensidad de la turbulencia en los ríos naturales y canales, lo que indica la presencia de importantes contribuciones del ruido electrónico y ambiental (ver ecuación (45)).

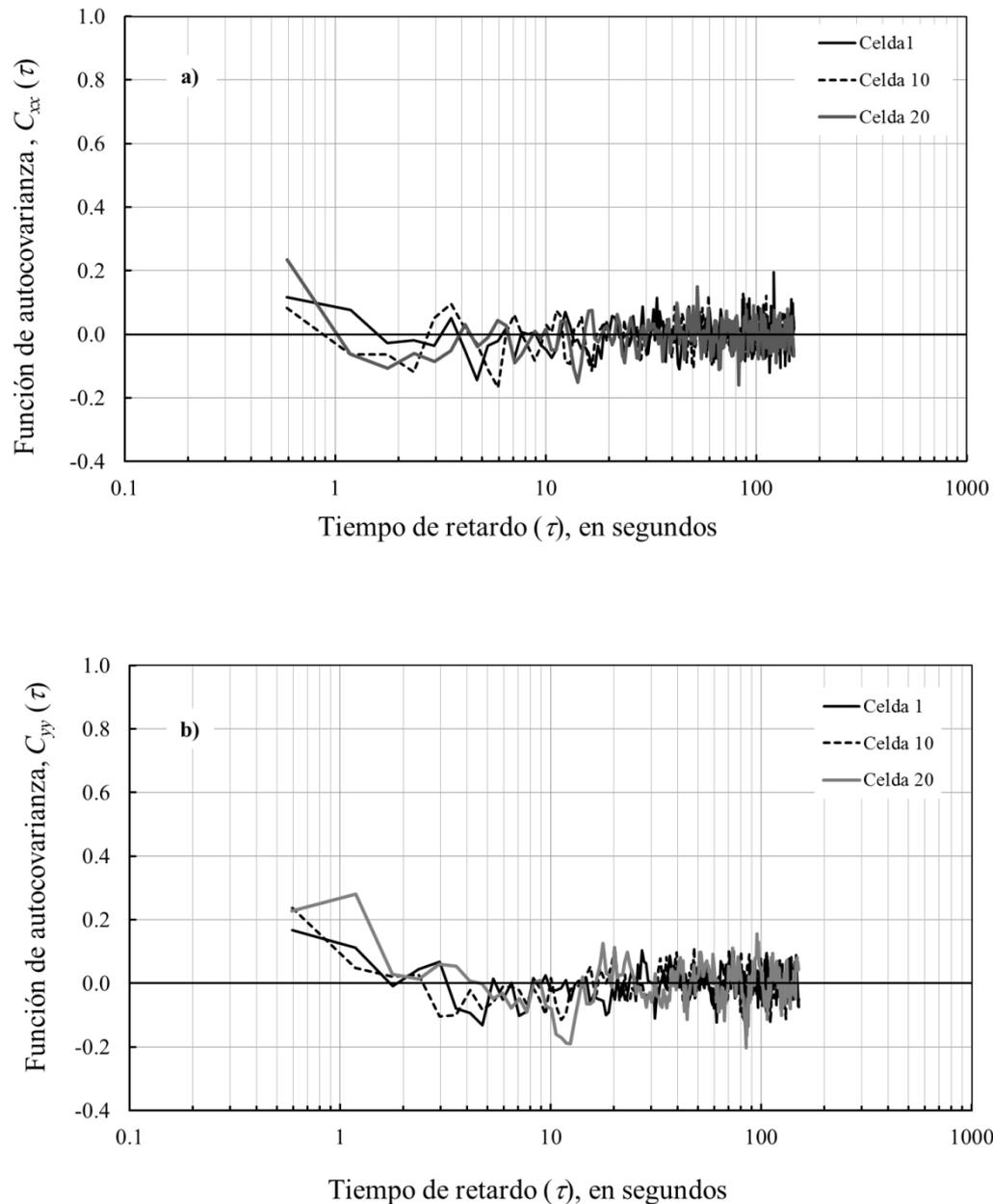


Figura 19. Función de autocovarianza de la velocidad a) Este (C_{xx}) y b) Norte (C_{yy}) muestreada en el Río Paraná (conjunto de datos 1, transecta 1) en diferentes ubicaciones de la vertical. Las ubicaciones de las celdas 1, 10 y 20 son a 0.9 m, 2.0 m y 5.0 m desde la superficie del agua respectivamente.

Se analizaron conjuntos de datos complementarios generados a partir de mediciones ADCP estacionarias (perfiles) en Chester para las mismas condiciones de flujo que las registradas en las mediciones del bote en movimiento con el fin de determinar si la falta de correlación indicada en la Figura 19 puede atribuirse a los movimientos del barco. Las componentes de baja frecuencia de la señal muestreada, causadas por la no estacionariedad en el flujo, se separaron filtrando la señal con un filtro pasa alto de la señal muestreada con una frecuencia de corte de 1/60 Hz. Las características del campo de flujo muestreado a partir de mediciones estacionarias se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Características del campo de flujo muestreado obtenidas desde mediciones estacionarias del perfil de velocidades en el sitio de Chester

Conjunto de datos	Celda	Profundidad [m]	Velocidad		I_{U_x}	I_{U_y}	T_x [s]	T_y [s]
			Este U_x [m/s]	Norte U_y [m/s]				
St00	5	3.3	0.57	-0.63	0.37	0.34	0.42	0.4
St16	5	3.3	1.27	-1.28	0.18	0.2	0.45	0.41
St16	10	5.8	1.24	-1.2	0.21	0.22	0.51	0.44

El análisis de los resultados que se muestran en las Tabla 10 y Tabla 11 indica que la correlación temporal del campo de flujo muestreado es diferente del campo de flujo turbulento ($T_x \ll T_t$) para mediciones desde embarcaciones móviles y estacionarias. La técnica utilizada para realizar las mediciones de velocidad (es decir, barco en movimiento o estacionario) no afecta a la correlación, siendo esta afectada por la resolución espacial y temporal del instrumento y la presencia de errores aleatorios no correlacionados (por ejemplo ruido electrónico y ambiental).

3.3.4. Varianza relativa observada en las determinaciones de caudales totales

La varianza relativa observada en la determinación del caudal total (incluyendo la parte de medida y no medida de la sección transversal), fue analizada para los conjuntos de datos de campo mostrados la Tabla 9 que están conformados por 12 transectas). Se asumió como caudal real (Q) al caudal total promedio de 12 transectas.

La varianza relativa en las mediciones del caudal total asociadas a diferentes tiempos de medición T (la integración de los transectas 1, 2, 4 y 8) se calcularon utilizando

$RVar[Q_{TOT}] = \frac{\overline{(Q_i - Q)^2}}{Q^2}$. La Figura 20 muestra la evolución de la varianza relativa,

$RVar[Q_{TOT}]$ y la desviación estándar relativa, $(RVar[Q_{TOT}])^{1/2}$ estimada a partir de los conjuntos de datos registrados en FoxMon, Chester, y Paraná, cuando varía el tiempo de medición total (incrementando el número de transectas). Debido a que no es evidente ningún sesgo direccional en los datos, es adecuado el uso de los resultados de las transectas individuales. La Figura 20 muestra cómo la varianza disminuye al incrementarse el tiempo de exposición. Los resultados confirman lo reportado por Oberg y Mueller (2007).

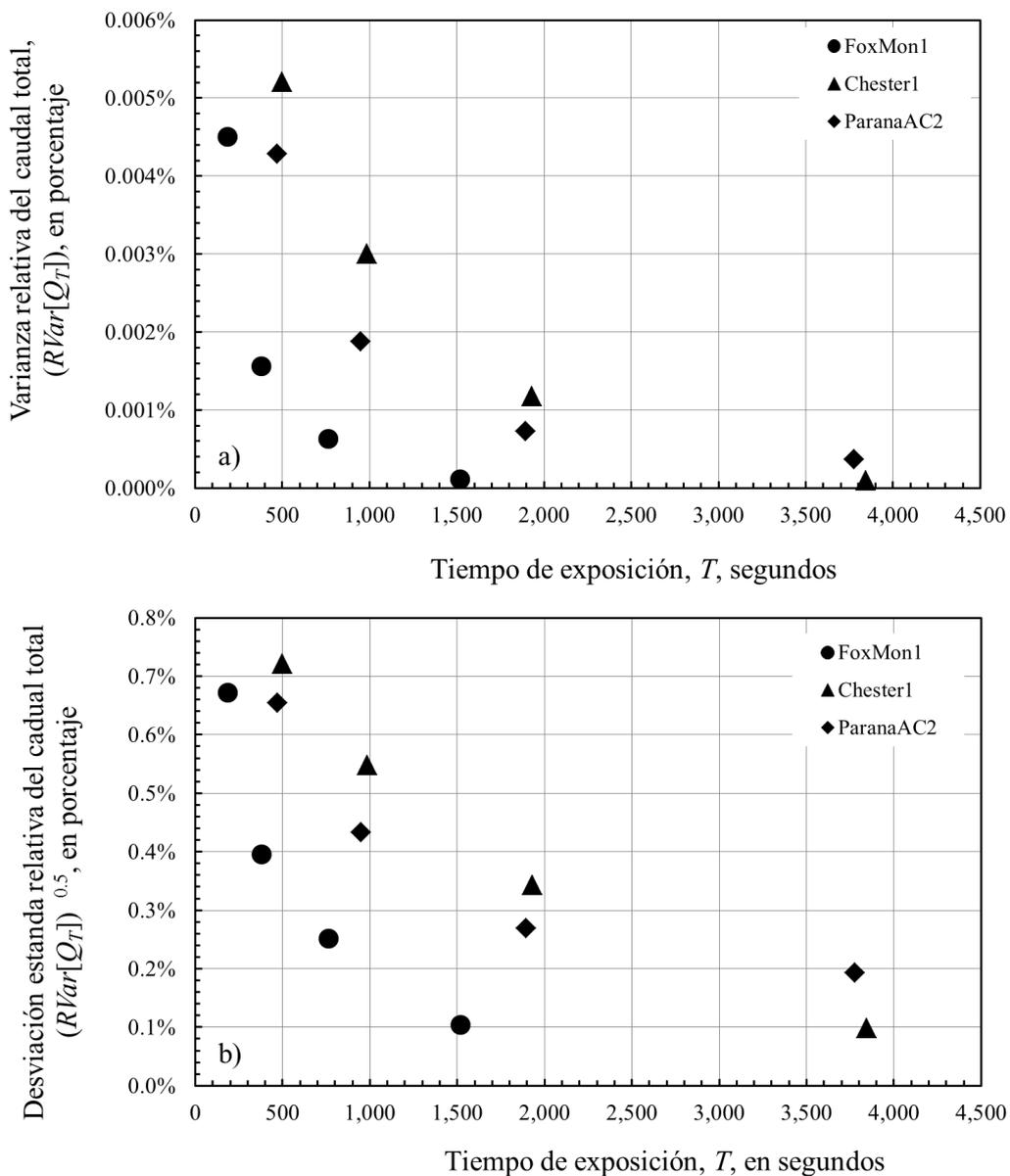


Figura 20. Varianza relativa (a) y desviación estándar (b) del caudal de flujo medido desde mediciones de bote en movimiento en FoxMon, Chester y Paraná para varios tiempos de muestreo T .

3.3.5. Comparación de las varianzas estimadas para el caudal total y el caudal medido

Como se discutió previamente, los ADCP son incapaces de medir en la columna de agua entera. Por lo tanto, el caudal de flujo total calculado por un ADCP (Q_{TOT}) es la suma de la porción medida de la sección transversal (Q_m) y las extrapolaciones realizadas para estimar el caudal en las porciones no medidas de la sección transversal como es en la parte superior (Q_{Top}), inferior (Q_{Bottom}), y en ambos márgenes del río (Q_{left} y Q_{right}) y es calculado como:

$$Q_{TOT} = Q_m + Q_{Top} + Q_{Bottom} + Q_{Right} + Q_{Left} \quad (47)$$

Suponiendo que cada componente del caudal en la ecuación (47) no se encuentra correlacionada, la varianza del caudal total puede estimarse en base a la varianza de cada componente como:

$$Var[Q_{TOT}] = Var[Q_m] + Var[Q_{Top}] + Var[Q_{Bottom}] + Var[Q_{Right}] + Var[Q_{Left}] \quad (48)$$

La contribución de la varianza del error para las regiones no medidas se puede asumir generalmente que es un valor pequeño en relación al caudal total cuando el caudal no medido es relativamente pequeño en comparación con el caudal total (por ejemplo 30% o menos). Por ejemplo, el varianza del error de los caudales estimados para la región superior no medida para cada una de 4 transectas podría ser bastante grande (del orden de 50%), y lo mismo podría ser cierto para las regiones no medidas cerca del fondo y en los bordes. Sin embargo, esta varianza es relativamente pequeña comparada con el caudal total. Aún en los casos de que la contribución al varianza del error en las regiones no medidas es pequeña, los errores de sesgo en estas regiones podrían ser considerables, por ejemplo, la selección de un método de extrapolación incorrecta puede resultar en un error de sesgo sustancial. En la Figura 21a y Figura 21b se muestra la evolución de la varianza del caudal total y medido en función del tiempo de exposición utilizando datos de FoxMon (conjuntos de datos 1 y 2) y de Paraná. Los caudales medidos son el 62% y 80% del caudal para los conjuntos de datos correspondientes a FoxMon y Paraná, respectivamente.

La varianza del caudal medido es casi la misma que la varianza del caudal total para las mediciones de caudal que contienen más de una transecta (Figura 21). En el caso de

una sola transecta para los conjuntos de datos de + es pequeña (por ejemplo 30% o menos).

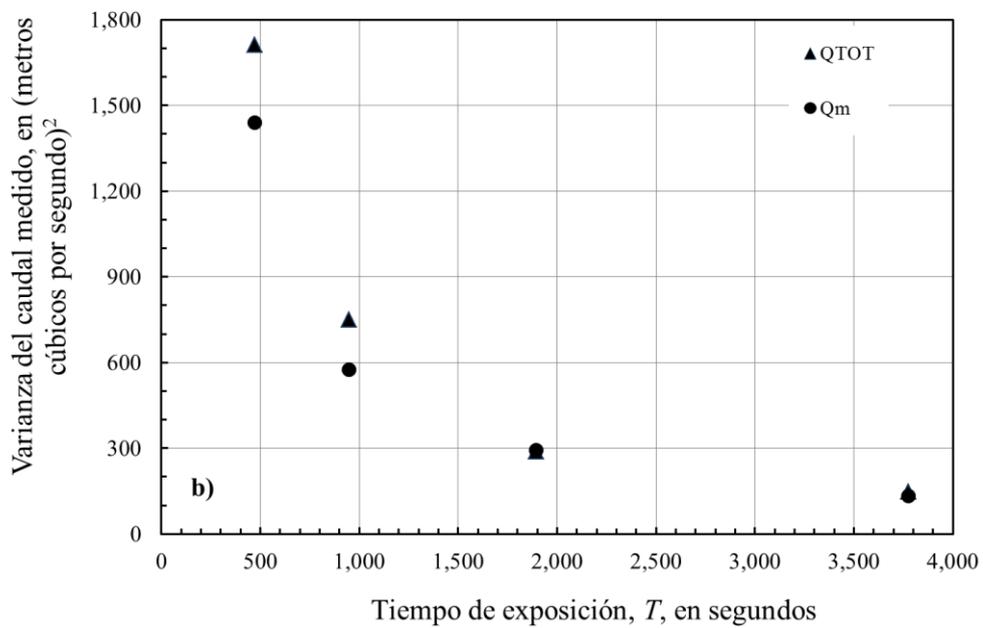
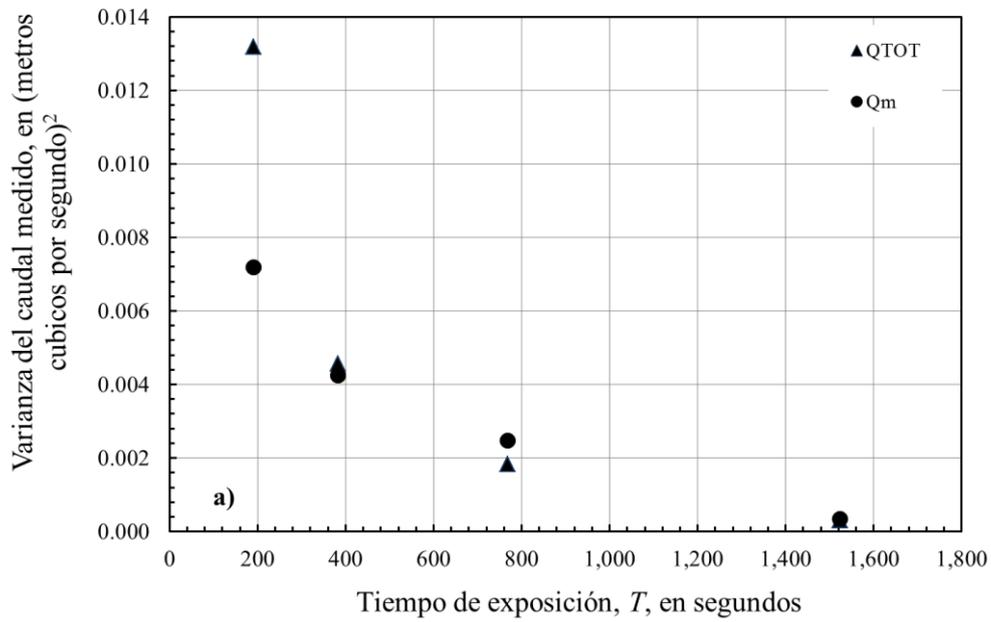


Figura 21. Evolución de la varianza total del caudal total y medido cuando se incrementa el tiempo de exposición calculado utilizando los conjunto de datos 1 y 2 para los sitios FoxMon (a) y Parana (b)

3.3.6. Validación de las estimaciones de varianza en las mediciones de caudal.

Se realizó una regresión no lineal de la función potencial entre $RVar[Q_T]$ y el tiempo de exposición T utilizando los datos disponibles (Figura 20) y considerando la forma funcional dada en la ecuación (43), es decir,

$$RVar[Q_T] = \frac{K}{T} \quad (49)$$

dónde $K = \frac{I_{Um}^2 \cdot \Delta t}{N_{eq}}$. Los valores de K estimados por la regresión se muestran en la

Tabla 12. A partir de los valores ajustados de K , los valores de I_{Um} se estimaron para las condiciones experimentales y de muestreo observadas en cada lugar. Por lo tanto, la aproximación ha sido validada comparando los valores de I_{Um} obtenidos por regresión no lineal con los valores de I_u mostrados en la Tabla 10. Los valores de N_{eq} se

calcularon para cada sitio como $\frac{\left(\sum_{i=1}^n m_i\right)^2}{\sum_{i=1}^n m_i^2}$.

Tabla 12. Parámetros usados y obtenidos del procesamiento de ajuste.

Sitio	K [s]	N_{eq}	I_{Um}
FoxMon	0.0078	14.6	0.53
Chester	0.0261	13.6	0.76
Parana	0.0194	37.9	1.11

Aunque los valores de I_{Um} estimados a partir del análisis de regresión no lineal son mayores que los valores que se muestran en la Tabla 10, el valor de I_{Um} para el caso de FoxMon es el más cercano a los valores de I_U previamente determinados. Existen tres posibles explicaciones para esta diferencia: (a) el modelo conceptual supone una velocidad del bote constante, (b) el ADCP se encuentra en realidad muestreando en un campo de flujo no estacionario y no homogéneo en la sección transversal, y (c) existe

una correlación de las diferentes fuentes de error. Debido a que la velocidad del bote durante las mediciones de caudal con ADCP rara vez es constante, la propagación de errores debería incluir la contribución de la varianza de las fluctuaciones en la velocidad del bote y también considerar la correlación entre la velocidad del bote y las mediciones de velocidad del agua. Cuanto mayor sea la varianza en la velocidad del bote medida por el ADCP, mayor será la varianza en el caudal medido por el ADCP. Además, debido a que el ADCP se encuentra en realidad muestreando un campo de flujo no estacionario y no homogéneo en la sección transversal, toda la medición se encuentra afectada por una correlación temporal de baja frecuencia (las señales de la velocidad del flujo registradas no son estacionarias), causando un aumento en la varianza de la velocidad media (ver ecuación (29)). Por último, el varianza del error de valores calculados utilizando las ecuaciones (44) y (45) se encuentren sesgados hacia abajo cuando existe correlación de las diferentes fuentes de error (es decir, la turbulencia del flujo y el ruido Doppler pueden ser correlacionados en mediciones Doppler coherentes pulso-a-pulso). En futuros trabajos, los términos adicionales que explican la estructura de correlación de diferentes fuentes de ruido (Taylor, 1997, p. 212) deberían ser incluidos en el modelo.

3.4. Tiempo de exposición requerido para las mediciones de caudal

Los tiempos de muestreo mínimos (tiempo de exposición) en la Tabla 13 se calcularon utilizando la ecuación (43) para las condiciones de flujo y las configuraciones de muestreo en cada sitio asumiendo tres diferentes umbrales para la varianza de mediciones de caudal (incluidas las contribuciones del ruido electrónico y ambiental). En base al tiempo de exposición promedio por transecta que se muestra en la Tabla 9 para cada sitio y cada conjunto de datos, se calculó un número requerido de transectas N_T (redondeado a un múltiplo de 2) y se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13. Tiempo de muestreo mínimo T (tiempo de exposición) requerido para obtener los valores umbral de desviación estándar $(RVar[Q_T])^{0.5}$ para las mediciones de caudal.

Sitio	$(RVar[Q_T])^{0.5}$	T [s]	N_T
FoxMon	0.20%	1957	10
	0.30%	870	4
	0.50%	313	2
Chester	0.20%	6531	14
	0.30%	2903	6
	0.50%	1045	2
Parana	0.20%	4841	10
	0.30%	2151	4
	0.50%	774	2

El número de transectas calculadas usando la ecuación (43) y mostrado en la Tabla 13 refleja las excelentes condiciones de medición de los sitios analizados en esta tesis (Tabla 9), y sólo son aplicables para condiciones de flujo y configuraciones de instrumentos similares a los que existían en el momento de las mediciones; sin embargo, estas condiciones de medición se encuentran lejos de ser atípicas. A pesar de que no abarcan el rango completo de todas las condiciones de medición, representan las condiciones más comunes de medición y hay una variación sustancial en las condiciones de medición entre los tres sitios seleccionados. Las condiciones específicas del sitio (es decir, las grandes estructuras de estelas turbulenta, las condiciones no estacionarias del flujo, grandes áreas no medidas) podrían afectar fuertemente los resultados. El efecto de diferentes condiciones de medición se analizó calculando los tiempos de exposición para: (1) un rango de valores I_{Um} , (2) varios números de N_{eq}

(definido como la relación $\frac{\left(\sum_{i=1}^n m_i\right)^2}{\sum_{i=1}^n m_i^2}$, y es igual a n para un canal rectangular), y (3)

una frecuencia de muestreo fija (Tabla 10). Los valores de la I_{Um} fueron escogidos para representar una rango de condiciones de medición de flujo basado en el análisis de conjuntos de datos de diferentes calidades de medición. El efecto de la profundidad media del flujo y el tamaño de la celda en los tiempos de exposición calculados también se muestra mediante la variación de los valores N_{eq} . Para el caso de condiciones de medición buenas y malas el objetivo fue obtener un valor de $(Rvar[Q])^{1/2}$ del 5% el cual es normal en el caso de mediciones de rutina de caudal (Oberg y Mueller, 2007). El

valor de $(Rvar[Q])^{1/2}$ para condiciones de medición excelentes fue elegido del 1% debido a que es posible obtener una mayor precisión en tales condiciones de medición. Los resultados presentados en la Tabla 14 muestran que para condiciones de medición pobres, incluso un objetivo del 5% para $(Rvar[Q])^{1/2}$ es difícil de lograr. Por otro lado, donde es posible un mayor número de celdas (representado por N_{eq}), los tiempos de exposición requeridos se reducen.

Tabla 14. Tiempo de muestreo mínimo T (tiempo de exposición) requerido para obtener los valores umbral de desviación estándar $(RVar[QT])^{0.5}$ para diferentes condiciones de muestreo.

Evaluación cualitativa de las condiciones de medición	I_{Um}	$(Rvar[Q])^{1/2}$	f [Hz]	N_{eq}	T [s]	T [min]
Excelentes	0.5	0.01	1.6	2	781	13
				10	156	2.6
				20	78	1.3
Buenas	2	0.05	1.6	2	500	8.3
				10	100	1.7
				20	50	0.8
Malas	5	0.05	1.6	2	3125	52.1
				10	625	10.4
				20	313	5.2

3.5. Conclusiones de este capítulo

Se presentó un modelo conceptual que permite cuantificar los errores aleatorios en las mediciones de caudal realizadas mediante ADCP desde plataformas móviles. La aproximación, basada en el cálculo de la varianza del caudal medido usando métodos estadísticos disponibles en la actualidad para el análisis de la incertidumbre de series temporales de velocidades del flujo, provee estimaciones de la varianza de las mediciones de caudal $RVar[Q]$ asociadas a diferentes tiempos de medición T .

Dos casos fueron analizados, campos de flujo no correlacionados (Caso 1) y campos de flujo correlacionados (Caso 2), lo cuales representan diferentes configuraciones de muestreo y diferentes características del campo flujo medido. Incluso cuando todas las precauciones posibles sugeridas por los fabricantes de ADCP se toman en consideración, el campo de flujo muestreado es diferente al campo de flujo real, debido a la resolución espacial y temporal del instrumento y a la presencia de ruido del

instrumento, ruido ambiental, y otros factores. El análisis de los datos de campo muestreados incluidos desde plataformas móviles y estacionarias muestra que a pesar de que la estimación de la escala integral de tiempo del campo de flujo turbulento es $T_t \gg \Delta t$ (intervalo de muestreo), la escala integral de tiempo del campo de flujo muestreado T_x es del orden de Δt (siendo $T_x < T_t$). Por lo tanto, la ecuación utilizada para calcular la varianza en la medición de caudal, $RVar[Q]$, asociada a diferentes tiempos de muestreo, T , para los campos de flujo no correlacionados es la adecuada.

El enfoque seleccionado muestra que el tiempo de exposición de la medición (a veces llamado duración), el tamaño de la celda vertical, y la frecuencia de muestreo son factores críticos en la reducción de la incertidumbre en la medición del caudal. El método descrito asume (a) una velocidad del bote constante, (b) un campo de flujo homogéneo y estacionario para las mediciones de ADCP, y c) que no hay correlación de las diferentes fuentes de error. Mediciones de en las cuales (a) la varianza en la velocidad del bote es grande y varía a través de la sección transversal, (b) el campo de flujo no es homogéneo y no es estacionario, y (c) hay correlación de las diferentes fuentes de error, resultarán en una mayor variación en el caudal medido. Se requiere trabajo adicional para agregar términos que representan la estructura de la correlación de distintas fuentes de ruido en el modelo.

4. Incertidumbres en la medición de caudal con ADCP desde plataformas móviles debido a fluctuaciones de baja frecuencia del flujo

4.1. Introducción

La presencia de fluctuaciones de flujo en los sistemas fluviales afecta de manera considerable la incertidumbre en la medición de caudales con ADCP desde plataformas móviles y no son factibles de aplicar las estrategias espaciales y temporales presentadas anteriormente las cuales fueron desarrolladas asumiendo procesos estacionarios.

Las fluctuaciones de flujo que pueden estar presentes durante las mediciones de caudal en cauces se pueden clasificar en 3 grupos (Jirka, 2001): a) fluctuaciones generadas por efectos de la geometría en planta (por ejemplo, separación de flujo en curvas, confluencias, divergencias, espigones, etc.) que producen un corte transversal resultando en una separación del flujo, b) por inestabilidades de las velocidades de corte transversales que son producidas por gradientes transversales de la velocidad generando estructuras coherentes bidimensionales. Estas variaciones laterales pueden ser producidas por flujos con exceso o déficit de *momentum* (por ejemplo, chorros, capa de mezcla, o estelas poco profundas) o debido a cambios graduales en la topografía o en la distribución de rugosidad (por ejemplo, el flujo de en los canales compuestos) y , c) por inestabilidades secundarias del flujo de base que son producidas cuando en un flujo uniforme en un canal con estructuras coherentes tri-dimensionales controladas la las condiciones de borde en el fondo se producen desequilibrios leves en la zona cercana al fondo que producen una redistribución en la cantidad de movimiento que produce en algunos casos separación en la capa cercana al borde que distorsionan las líneas de los vórtices y forman estructuras bidimensionales (este mecanismo es el más débil).

El propósito de este capítulo es cuantificar la incertidumbre en las mediciones de caudal de flujo realizadas desde plataformas móviles utilizando ADCP cuando están presentes fluctuaciones de caudal generadas por efectos de la geometría en planta. Para ello, se realizó un análisis dimensional a los fines de identificar los grupos adimensionales más relevantes que pueden afectar a la incertidumbre en la medición de

caudal en estas condiciones. Luego, en un análisis simplificado, se evaluó el rol de cada parámetro adimensional mediante el uso de datos sintéticos de velocidad del flujo.

En base a caudales y datos de velocidades registrados en un canal artificial de grandes dimensiones, se encontraron analogías y diferencias con los resultados obtenidos de las señales sintéticas de velocidad del flujo.

Finalmente, se analizaron mediciones de caudal realizadas con un ADCP en el río Mississippi en el sitio denominado Tarbert Landing (Estado de Mississippi, EEUU) con el fin de analizar diferencias significativas en los caudales medidos las cuales podrían ser producidas por la presencia de fluctuaciones de baja frecuencia inducidas por la geometría del cauce (curva aguas arriba y confluencia aguas abajo de la sección analizada). Los hallazgos presentados en este trabajo proveen una herramienta que permiten definir las estrategias de registro a los fines de optimizar las mediciones de caudal con ADCP. Es importante aclarar

4.2. Análisis Dimensional

El parámetro adimensional seleccionado para cuantificar la incertidumbre en las mediciones de caudal con ADCP debido a las fluctuaciones del flujo es el error relativo máximo esperado, $RME[Q]$. La evolución de este parámetro adimensional puede estimarse utilizando información relacionada con las fluctuaciones de flujo existentes durante la medición y con la configuración de registro seleccionada. Las fluctuaciones de flujo existentes durante las mediciones se pueden caracterizar por su período (T_p) y la diferencia máxima relativa en la velocidad del flujo (comparada con la velocidad media temporal en la sección transversal) $RMF[V]$. La configuración de registro para una medición de caudal con ADCP puede ser representada por el número total de transectas muestreadas (N_T), el tiempo de medición promedio por transecta (T) y la frecuencia de registro del instrumento (f). El modo (esquema de pulsos acústicos) seleccionado para medir velocidades de flujo en el ADCP, que define el nivel de ruido (σ_u) o la desviación estándar de la velocidad horizontal no juega un rol importante en este análisis.

$$RME[Q] = (N_T, f, T, T_p, RMF[V]) \quad (50)$$

La aplicación de un teorema clave en el análisis dimensional, el teorema Pi de

Buckingham (Streeter y Wylie, 1988), permite obtener los siguientes cuatro números Π adimensionales, utilizando T como cantidad fundamental independiente, ya que $RMF[V]$ y N_T son variables adimensionales:

$$\pi_1 = N_T \quad (51)$$

$$\pi_2 = RMF[V] \quad (52)$$

$$\pi_3 = f T = \frac{T}{\Delta t} \quad (53)$$

$$\pi_4 = \frac{T_p}{T} \quad (54)$$

donde π_3 representa el número total de perfiles de la muestra. En la siguiente sección, se utilizan datos de velocidad de agua sintéticos que simulan la evolución temporal de las fluctuaciones periódicas de flujo en un canal abierto para evaluar el rol de cada parámetro adimensional en la incertidumbre de las mediciones de caudal con ADCP por la presencia de fluctuaciones del flujo para diferentes configuraciones de registro y del flujo.

4.3. Análisis de velocidades de flujo sintéticas

Las fluctuaciones de caudal generadas por efectos geométricos (incluidas las zonas de recirculación) se simularon en forma simplificada asumiendo que la distribución de velocidades en planta en la sección transversal responde a una señal sinusoidal sintética, la cual describe una suave oscilación temporal repetitiva del campo de velocidades del flujo. La evolución lateral y temporal de la velocidad del flujo longitudinal está dada por:

$$V(y, t) = A(t) \sin\left(\frac{2\pi y}{B}\right) \quad (55)$$

donde $V(y, t)$ es la velocidad longitudinal en la posición lateral y en el tiempo t , B es el ancho del canal y $A(t)$ es la amplitud de las fluctuaciones al tiempo t . Los datos de flujo fueron simulados para un ancho de canal fijo de 6.5 m, una profundidad de agua de 0.65 m, y una velocidad media en la sección transversal de 0.3 m/s ($RMF[V] = 3.5$). Se

analizaron cinco períodos de fluctuación diferentes (T_p) con cinco variaciones máximas relativas (amplitud) de las velocidades de flujo con respecto a la velocidad media ($RMF[V]$). En la Figura 22 se esquematiza la evolución lateral y temporal de las fluctuaciones del flujo. Los caudales se calcularon a partir de los datos de la señal sintética simulando la operación de un ADCP desde un bote en movimiento. Por lo cual, los datos sintéticos de velocidad fueron muestreados en diferentes verticales (simulando una plataforma móvil) con una frecuencia fija de 1 Hz para todos los casos y con seis diferentes tiempos de exposición (T). El caudal se calculó para cada transecta mediante la integración de los perfiles verticales muestreados a través de la sección transversal. El error relativo máximo esperado $RME[Q]$ se ha calculado utilizando el caudal real como caudal de referencia.

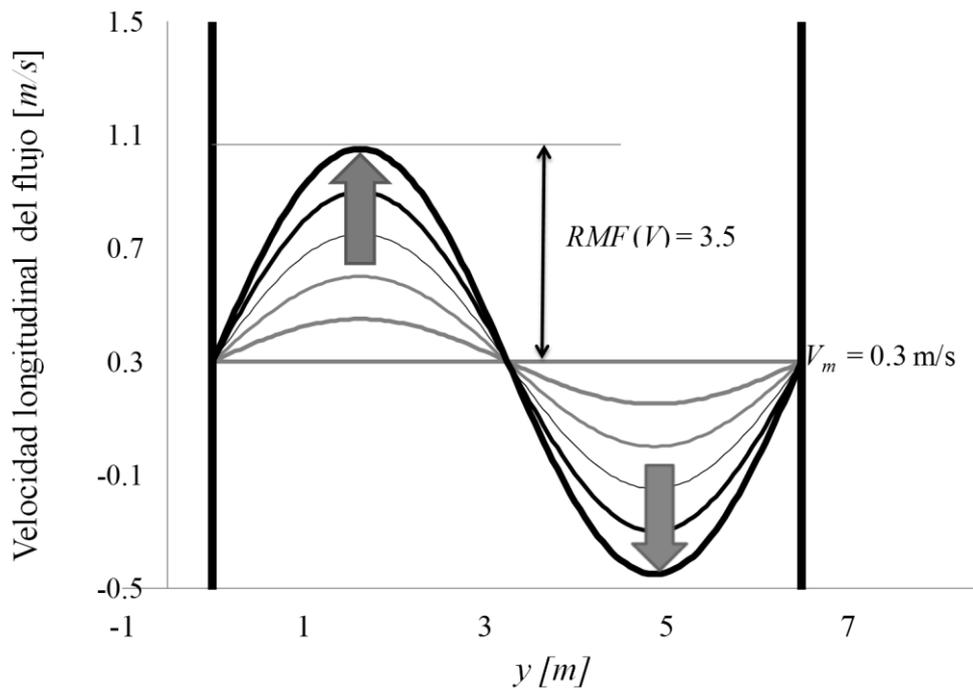


Figura 22. Vista en planta del canal simulado y de la evolución temporal de las fluctuaciones flujo. Ancho de canal fijo de 6.5 m, una profundidad de agua de 0.65 m, y una velocidad media en la sección transversal de 0.3 m/s. $RMF[V] = 3.5$

La Figura 23 muestra la evolución de la $RME[Q]$ para las diferentes configuraciones de registro y las diferentes características de las fluctuaciones de caudal para el caso de $N_T=1$. Para los valores críticos en los cuales $T_p/T \approx 1$ el valor de $RME[Q]$ presenta un valor máximo. Un valor óptimo (valor bajo) de $RME[Q]$ puede obtenerse con un tiempo de exposición muy alto $T \gg T_p$. (reduciendo la velocidad de la

embarcación) o disminuyendo el tiempo de exposición a un valor $T \ll T_p$. Los valores de $RME[Q]$ presentan un aumento con la máxima diferencia relativa en la velocidad de flujo $RMF[V]$ y las curvas colapsan utilizando un único parámetro $RME[Q]/RMF[V]$ como se observa en la Figura 24.

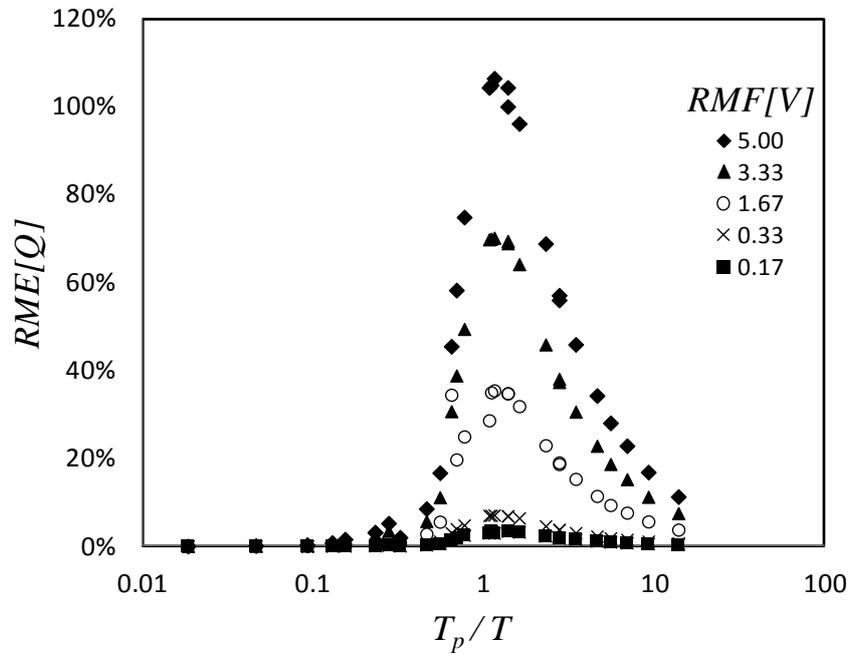


Figura 23. Evolución del número adimensional $RME[Q]$ en función del número adimensional T_p/T

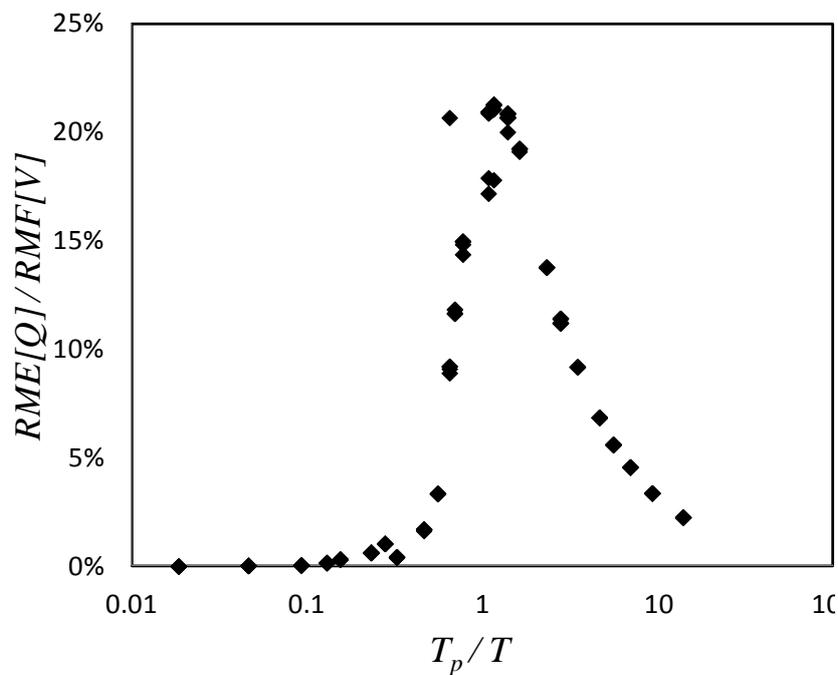


Figura 24. Evolución del número adimensional $RME[Q]/RMF[V]$ en función del número adimensional T_p/T

4.4. Análisis de mediciones de caudal en un canal de grandes dimensiones

La instalación experimental seleccionada es el canal de salida (localizado aguas abajo la cámara de contacto) de la planta de tratamiento de aguas residuales "Bajo Grande", Córdoba, Argentina (Figura 25). El ancho del canal es de 6.5 m, y presenta paredes laterales verticales.

Las mediciones se realizaron con un Perfilador de Corriente Acústico Doppler ADCP River Surveyour S5 YSI/Sontek para aguas poco profundas. Las mediciones con ADCP se realizaron en una sección inmediatamente aguas abajo de una pasarela en el canal de aforo (Figura 26), y se realizaron de acuerdo a la metodología experimental recomendada en Tarrab et al. (2012). Para ello se transitó la pasarela en ida y vuelta trasladando al ADCP (mediante un barrenador) mientras el instrumento registra perfiles de velocidad del flujo a una frecuencia de 1Hz y reconstruye el campo de flujo de la sección transversal. Los principales parámetros que describen las condiciones de medición para cada conjunto de datos se resumen en la Tabla 15. El caudal medido en las sucesivas transectas muestra grandes desviaciones del caudal medio y los parámetros característicos de la incertidumbre (coeficiente de variación (CV) y el $RME[Q]$) fueron mucho mayores de lo esperado. La hipótesis analizada en este capítulo es que la mayor incertidumbre es producida por las fluctuaciones de baja frecuencia presentes en el flujo.

Tabla 15. Resumen de las mediciones de caudal

Conjunto de datos	Fecha	Caudal		Velocidad media del agua		Profundidad media		Tiempo de exposición medio por transecta	Número de transectas	$RME[Q]$	CV
		Total	Area	V_w [m/s]	H [m]	T [s]	N_T	%			
BG 1	15/02/2012	1.24	4.03	0.3	0.63	102	19	28	0.22		
BG 2	26/03/2012	1.93	5.02	0.38	0.77	95	10	28	0.16		
BG 3	23/04/2012	2.22	5.3	0.41	0.80	109	16	36	0.23		



Figura 25. Canal de salida de la planta de tratamiento de aguas residuales “Bajo Grande”

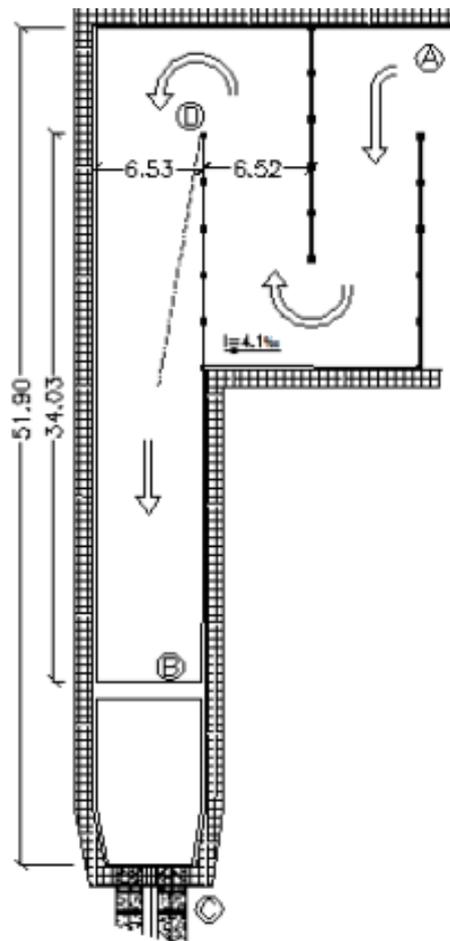


Figura 26. Instalación experimental. La ubicación de la zona de mediciones se encuentra en la pasarela (B). Longitudes en metros

La Figura 27 muestra el campo de las velocidades en la dirección del flujo para dos transectas diferentes realizadas en la sección inmediatamente aguas abajo de la pasarela del canal durante la campaña del día 23 de Abril de 2012 (BG3). Se observa que en ambas transectas existe una recirculación del flujo (presencia de velocidades Norte positivas, ya que el caudal neto escurre de Norte a Sur) en la zona cercana a la margen izquierda, la cual presenta una mayor extensión en la Transecta 12 (Figura 27b). La zona de separación del flujo se produce en la curva a 180° localizada 34 m aguas arriba de la zona de medición (flujo que proviene de la cámara de contacto).

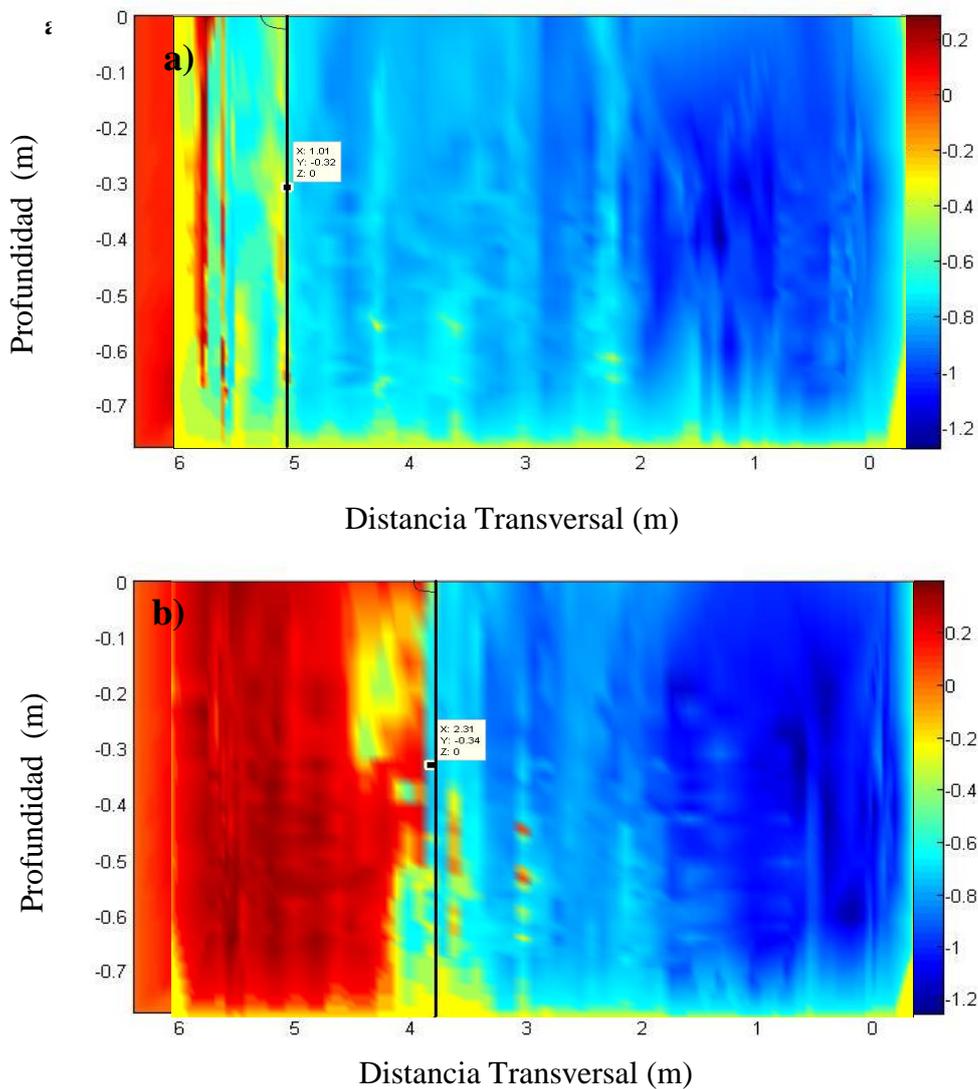


Figura 27. Campo de flujo de las componentes de velocidad en la dirección Norte medido con ADCP (m/s) en el conjunto de datos BG3 en la transecta 9 (A) y en la transecta 12 (B). La progresiva cero corresponde a la margen derecha. Los valores de velocidad están en m/s. Los valores negativos de la velocidad indican la dirección predominante del flujo hacia aguas abajo (el flujo escurre de Norte a Sur)

Un gráfico del caudal acumulado para cuatro transectas del conjunto de datos BG2 muestra una gran variación del campo de flujo muestreado debido a las fluctuaciones de flujo (Figura 28) en coincidencia con la presencia una gran zona de recirculación. En la presente Figura se muestra la distancia desde la margen izquierda en la cual el caudal acumulado es mayor que cero en diferentes transectas (ancho efectivo). La localización del punto en el cual el caudal acumulado es nulo, varía su posición más de un metro entre transectas mostrando de esta forma la fluctuación de la capa de corte entre el flujo efectivo y la zona de recirculación mencionada en el análisis de la figura anterior. Esta fluctuación genera incertidumbres en la determinación de caudal desde plataformas móviles (Tarrab et al., 2012) y es por ello que se realizaron múltiples transectas en lugar de las 4 generalmente recomendadas para estimar caudal. La recirculación del flujo también fue observada en mediciones realizadas con PTV (Alvarez et al., 2013).

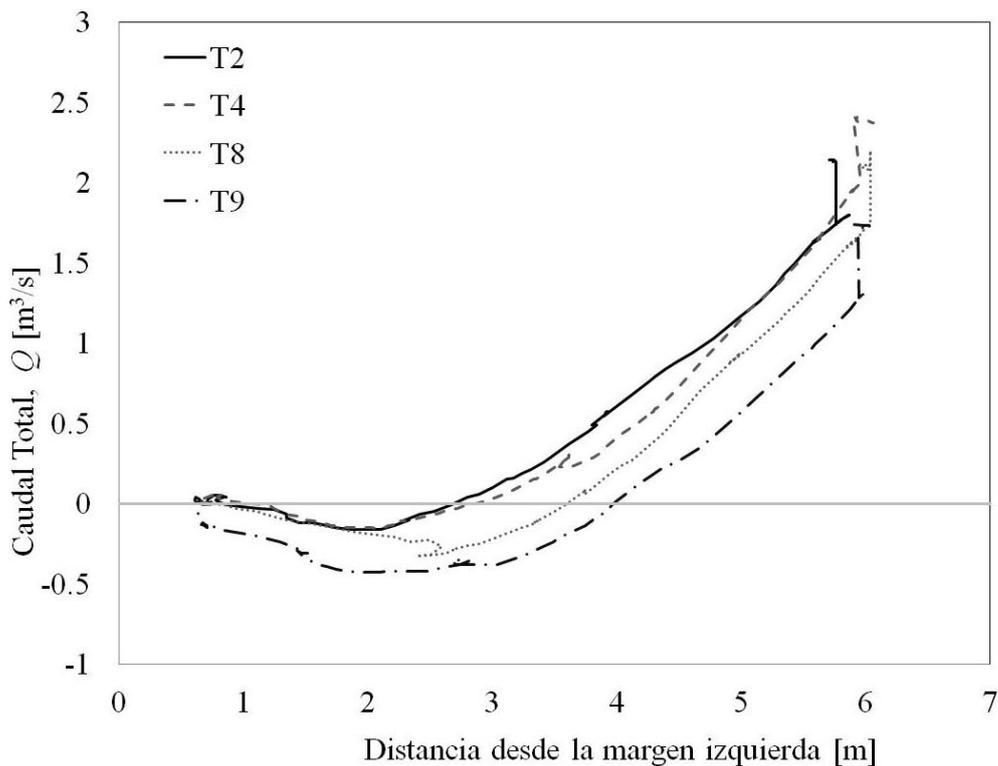


Figura 28. Caudal acumulado para cuatro transectas del conjunto de datos BG 2

En la Figura 29 se muestra una señal de velocidad correspondiente a una medición estacionaria realizada en el centro del canal, en la cual se observa que ocurre una fluctuación cuasi-periódica del flujo debido a las fluctuaciones de la capa de corte que

delimita la zona de recirculación. La medición estacionaria en el eje del canal para el conjunto de datos BG 2 mostró que las fluctuaciones de flujo para esa condición tienen un período de aproximadamente 102.4 segundos y un valor de $RMF[V]= 0.96$. Teniendo en cuenta que el tiempo de exposición promedio por transecta durante las mediciones fue de aproximadamente de 102 s (Tabla 15), el valor de $RME[Q]$ estimado en base al análisis simplificado representado en la Figura 24 es 19.2%, que es del orden de magnitud del valor observado durante las mediciones de campo. La diferencia entre el valor estimado y el valor medido se puede atribuir a la simplificación adoptada de la función sinusoidal para simular las fluctuaciones.

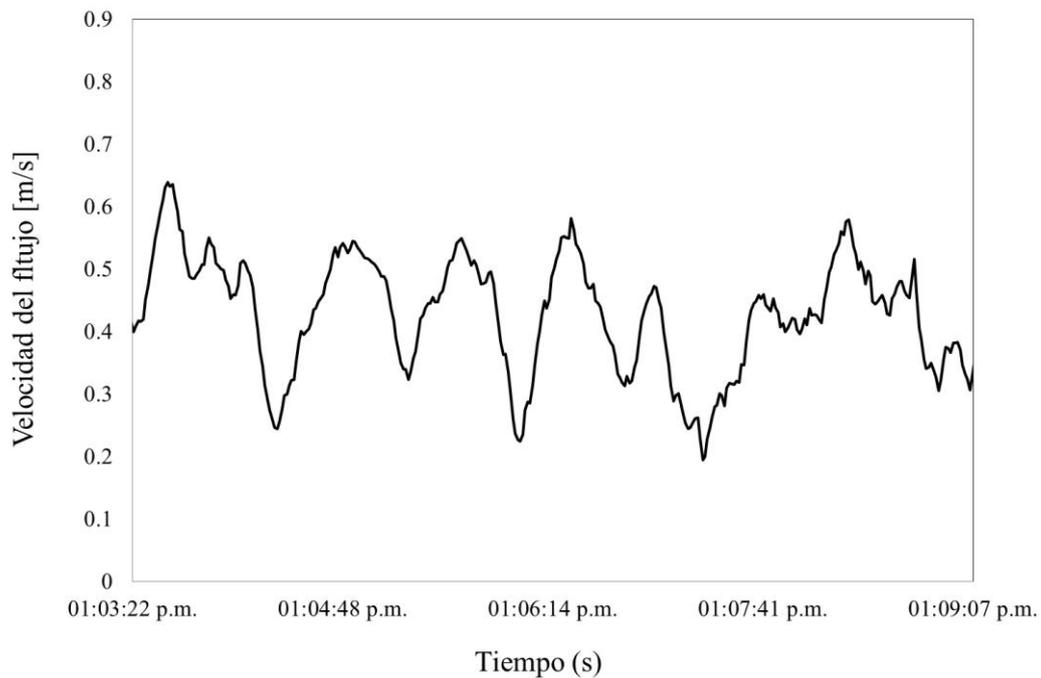


Figura 29. Serie temporal de velocidades longitudinales medias en la vertical registradas en forma estacionaria en el centro del canal.

5. Análisis de mediciones de caudal en grandes ríos con fluctuaciones de baja frecuencia: Caso Río Mississippi

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, 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 $42000 \text{ m}^3/\text{s}$ ($1500000 \text{ ft}^3/\text{s}$) 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 30) construido entre el río Mississippi y la cuenca del río Atchafalaya, normalmente se encuentra cerrado, pero se puede abrir 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 30). 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 evaluados experimentalmente 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.

Con el fin de validar los valores experimentales utilizados en la toma de decisiones, 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 30), situado aguas arriba del vertedero de Morganza (MS) y aguas abajo de la estructura ORCS. Los caudales observados ese día en cada transecta (cruce del río) se muestran en la Figura 31, los mismos oscilan alrededor del valor mencionado de $42000 \text{ m}^3/\text{s}$ (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.

El objetivo del presente caso de aplicación 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.

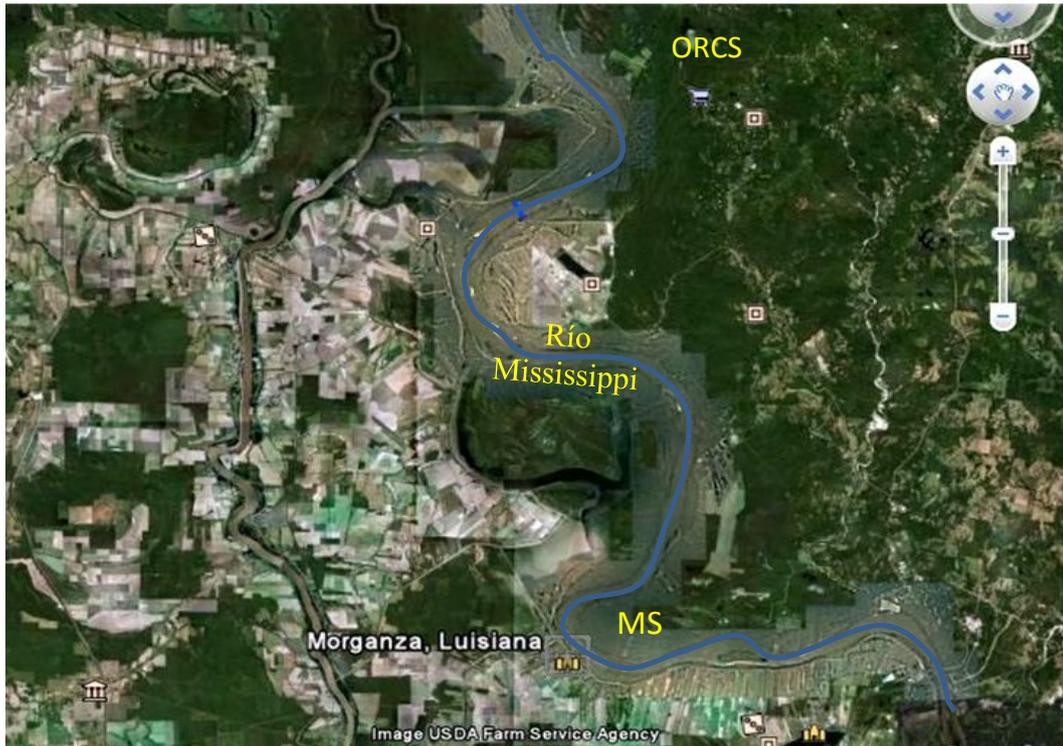


Figura 30. Ubicación del sitio de estudio

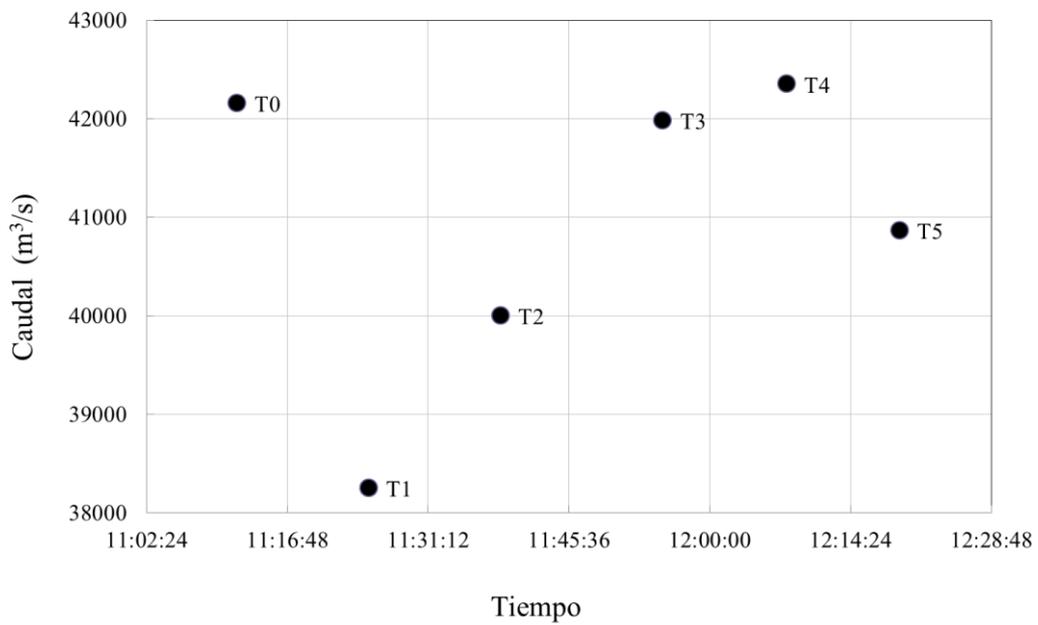


Figura 31. Caudales medidos el 15 de Mayo de 2011

5.1.1. 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 32, 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 32. 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 (56) propuesta por Rehmann et al. (2009):

$$\frac{u(y)}{U} = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{y}{B}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{y}{B}\right)^{\beta-1} \quad (56)$$

donde U es la velocidad media en la vertical, B es el ancho, y es la coordenada 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 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. (2012) 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 (ver ecuación (43)):

$$RVar[Q_T] = \frac{I_u^2 \cdot \Delta t}{nT} \quad (57)$$

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.

5.1.2. Resultados

En la Tabla 16 se muestra para cada transecta los parámetros principales relacionados a las condiciones de flujo durante las mediciones realizadas, y en la Tabla 17 se muestran las características relacionadas a la configuración del instrumento y a la metodología experimental adoptada.

Tabla 16. Condiciones de flujo en cada sitio

Medición	Caudal Total	Error relativo	Ancho	Area	Velocidad media del agua	Profundidad media	B/H	Numero de Froude
	Q [m ³ /s]	RE [%]	B [m]	A [m ²]	V_w [m/s]	H [m]		Fr
Tarbert Transecta 0	42155	2.99	1175	22705	1.83	19.3	61	0.13
Tarbert Transecta 1	38250	-6.55	1173	22278	1.65	19.0	62	0.12
Tarbert Transecta 2	39998	-2.28	1172	22437	1.77	19.1	61	0.13
Tarbert Transecta 3	41980	2.56	1177	22265	1.91	18.9	62	0.14
Tarbert Transecta 4	42347	3.46	1167	22226	1.89	19.0	61	0.14
Tarbert Transecta 5	40864	-0.17	1174	22287	1.82	19.0	62	0.13
Promedio	40932		1173	22366	1.81	19.1	62	0.13

Tabla 17. 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, *Pings* en el agua = 1, Modo del fondo = 5, *Pings* en el fondo = 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:

$$RE[Q_i] = \frac{Q_i - Q_{av}}{Q_{av}} \quad (58)$$

La varianza relativa en la medición de las seis transectas fue de 0.151%.

$$RVar[Q_T] = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \frac{(Q_i - Q)^2}{Q^2} \quad (59)$$

Análisis de las condiciones de flujo

En la Figura 33 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 ($y = 0$).

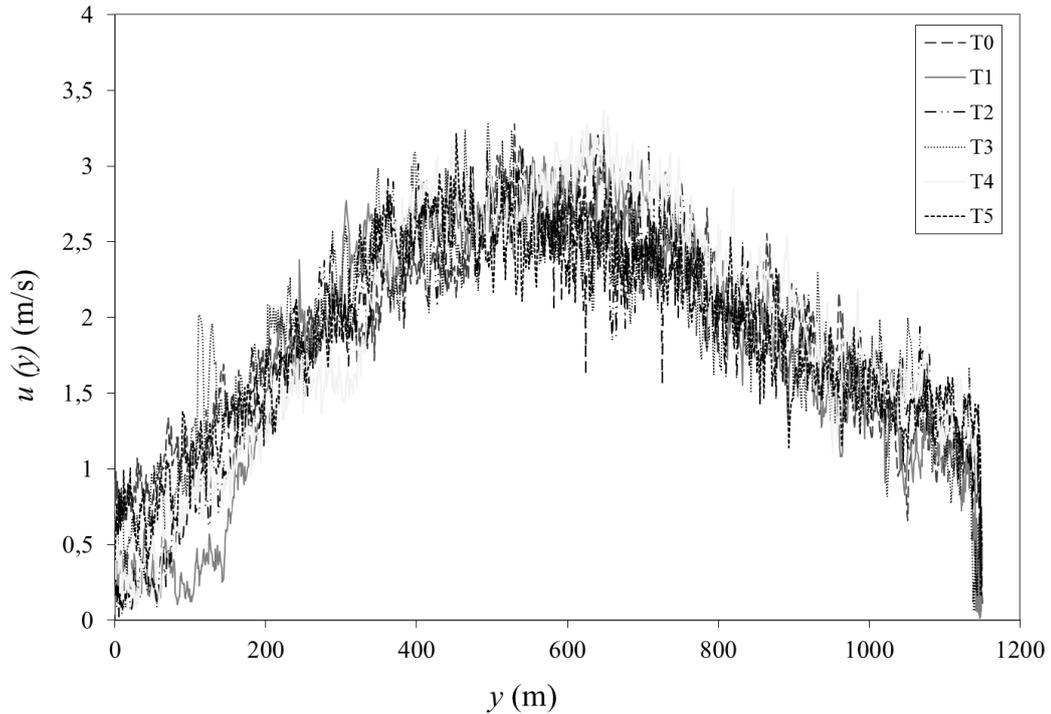


Figura 33. Perfiles transversales de magnitudes de velocidad promediados en la vertical para diferentes transectas. El valor de $y=0$ corresponde a la margen derecha

En lo que se refiere al aspecto general de estos perfiles, la Figura 34 muestra el perfil de velocidades sintético determinado con la ecuación (56) 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 (56) para la 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.

A los fines de evaluar el comportamiento del campo de velocidades en diferentes profundidades, en la Figura 35 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.

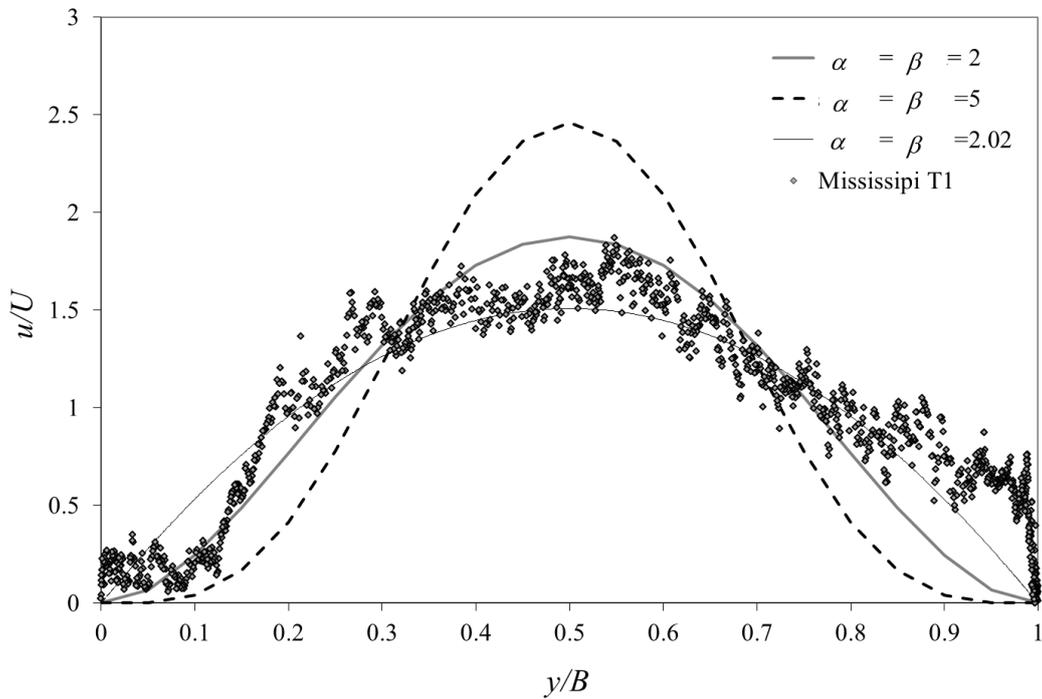


Figura 34. Perfiles transversales de magnitudes de velocidad estimados con la ecuación (1) en la transecta T1. El valor de $y=0$ corresponde a la margen derecha.

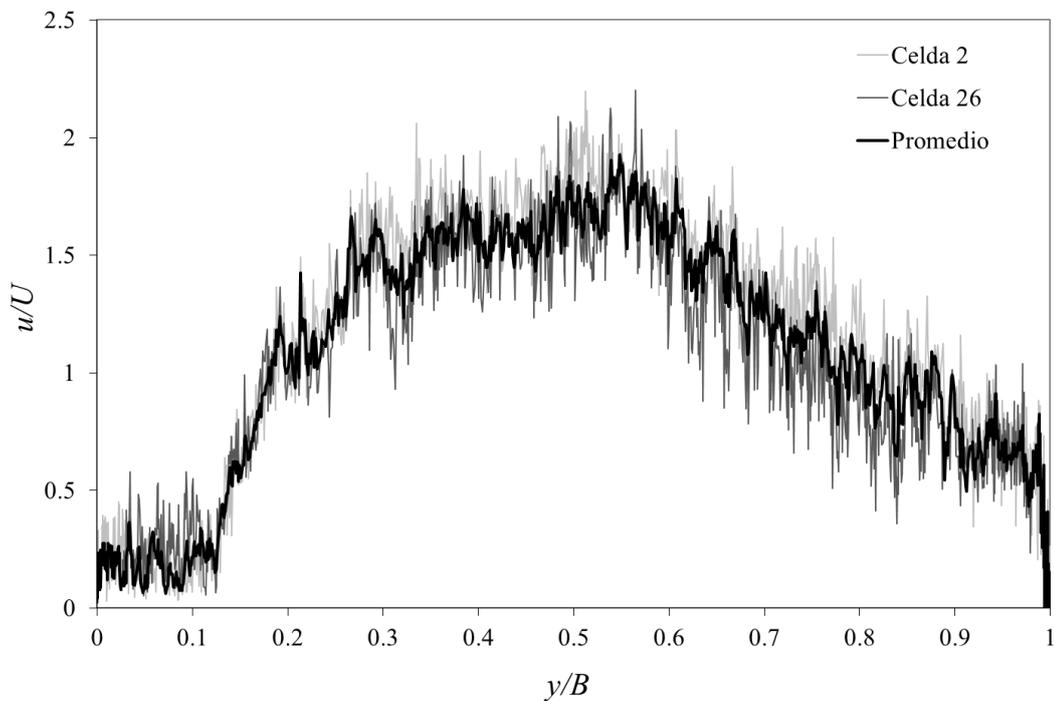


Figura 35. Distribución transversal de velocidades presente a diferentes profundidades y su comparación con el perfil de velocidades medio en la vertical para la transecta 1 (T1). El valor de $y=0$ corresponde a la margen derecha

En la Figura 36 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 36b), lo cual indicaría la presencia de fluctuaciones de baja frecuencia la región cercana a al margen derecha que podrán ser generadas por una zona de separación (y recirculación) del flujo o por un vórtice estable de eje vertical.

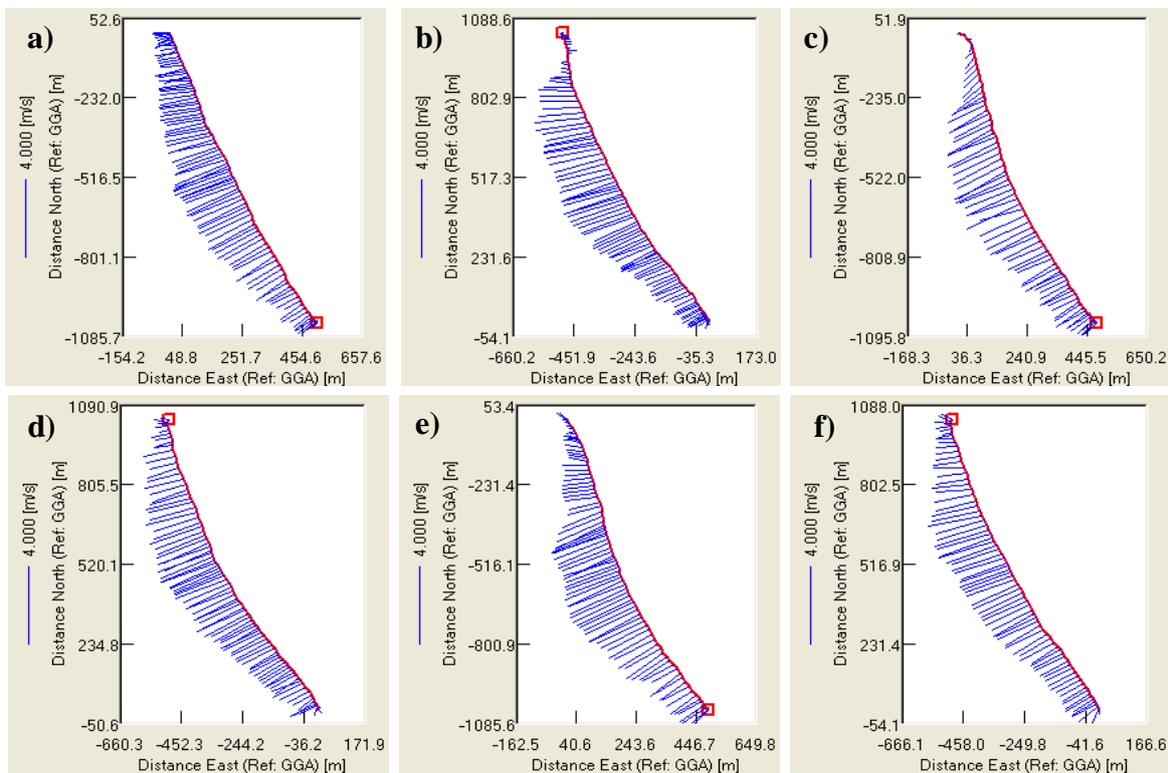


Figura 36. Distribuciones transversales de las velocidades medias en la vertical para cada transecta. a) T0 b) T1 c) T3 d) T4 e) T5 y f) T6

En la Figura 37 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.

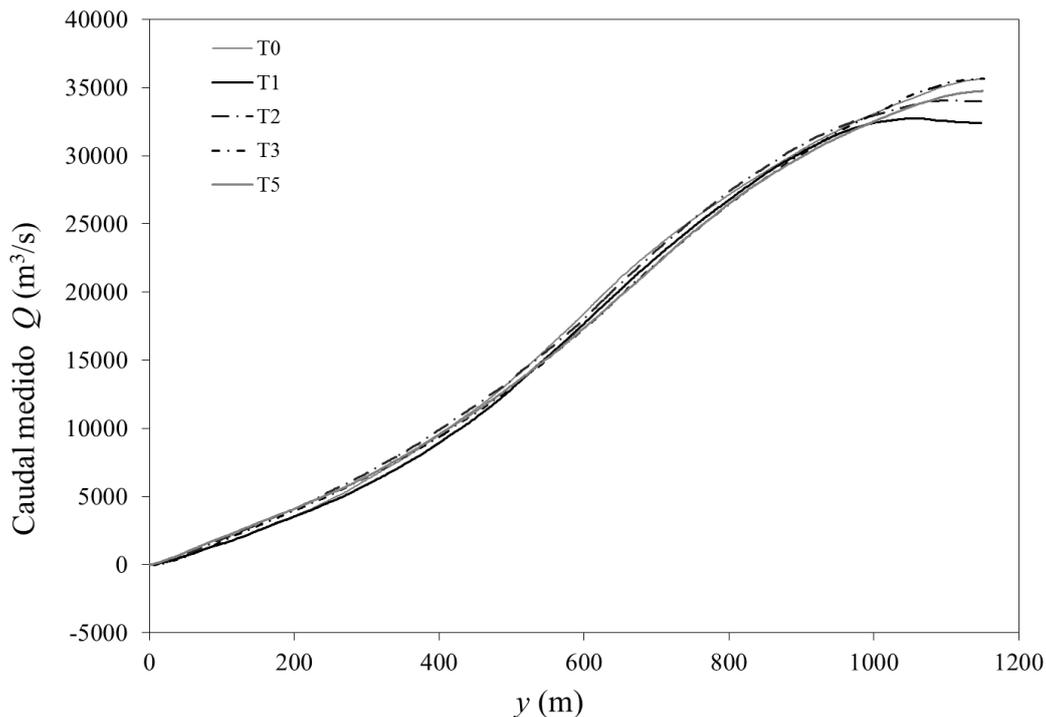


Figura 37. Distribución de caudales acumulados desde la margen izquierda para cada transecta. En este gráfico $y = 0$ corresponde a la margen izquierda.

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 38 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.

La Figura 39 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).

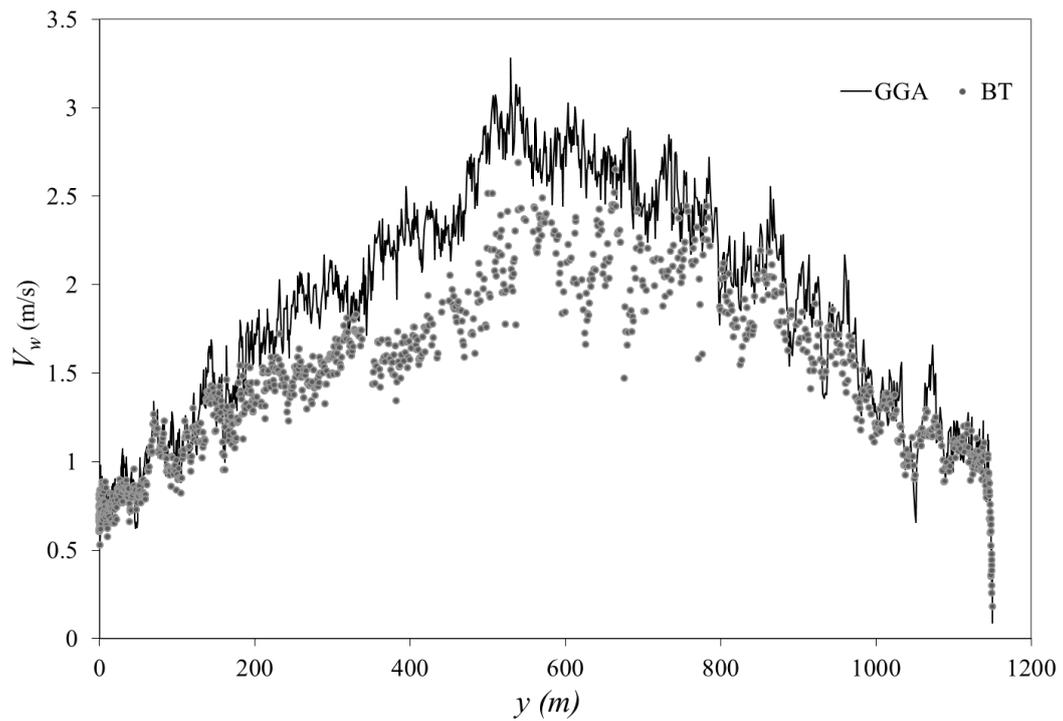


Figura 38. Perfiles transversales de velocidad del flujo utilizando bottom track y GPS (GGA) como referencia en la transecta 0 (T0)

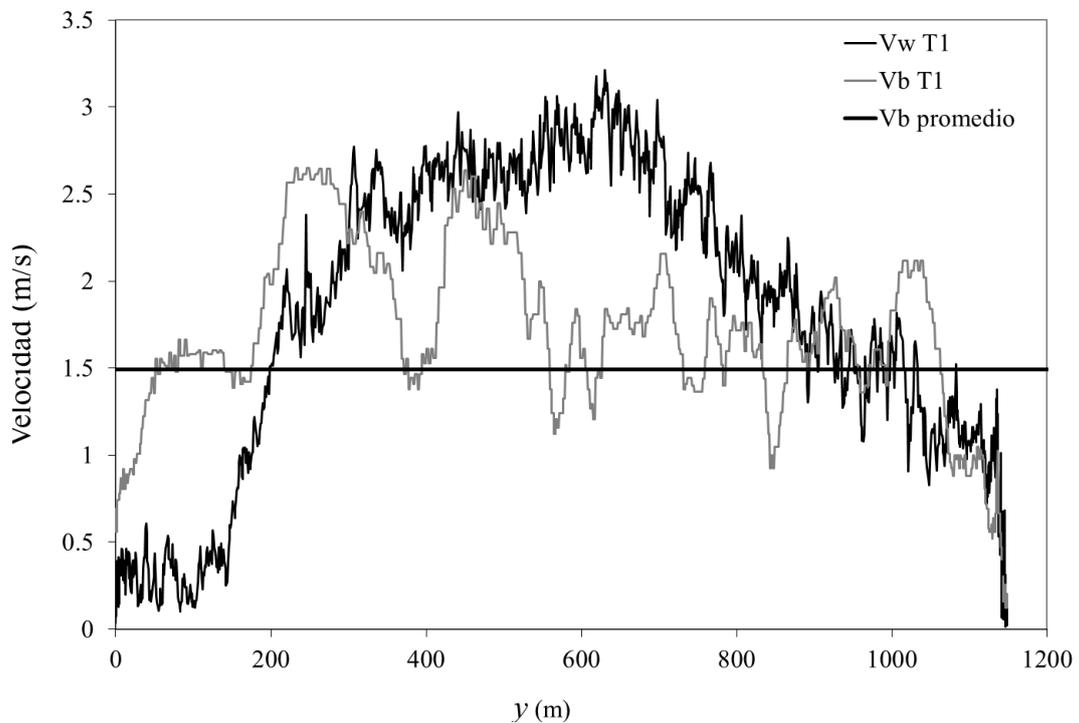


Figura 39. Perfiles transversales de la velocidad del flujo media en la vertical y de la velocidad del bote para la transecta 1 (T1)

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 (57) 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 o bins) en la transecta 1 (Figura 40). 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.

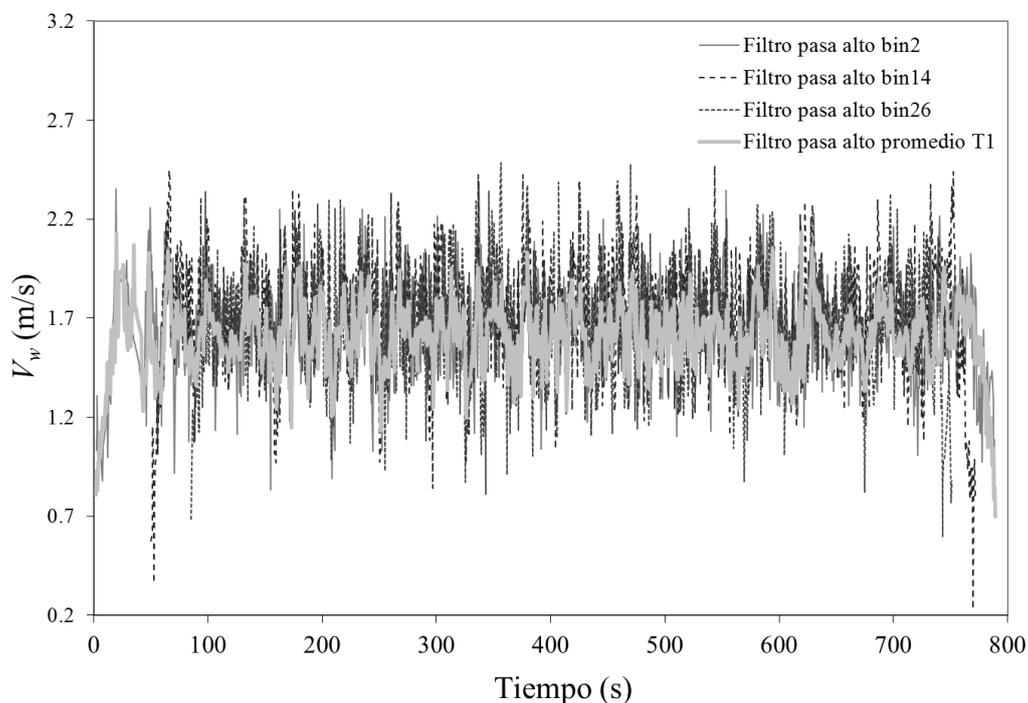


Figura 40. Señales de velocidad del flujo a diferentes profundidades en la transecta 1 filtradas con un filtro pasa alto

En la Tabla 18 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., 2012) 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 18. Características del flujo en las señales de velocidad registradas en diferentes celdas en la transecta 1 (T1)

Celda	Profundidad (m)	U-Este (cm/s)	V-Norte (cm/s)	$\sigma^2 u$ (cm ² /s ²)	$s^2 v$ (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 (57) 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 16. 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 homogéneo. Por otra parte, las diferencias también pueden ser atribuidas al hecho de que en las sucesivas transectas no se repiten las trayectorias (en tiempo y en espacio).

5.2. Conclusiones de este capítulo

Se presentó un análisis de la incertidumbre asociada a las fluctuaciones del flujo generadas por efectos topográficos en las mediciones de caudal con ADCP desde plataformas móviles. El análisis simplificado de una señal sintética mostró que la presencia de las fluctuaciones de flujo aumenta las incertidumbres en las mediciones de caudal hasta un valor crítico (máximo valor de $RME[Q]$) cuando el período de las fluctuaciones de flujo (T_p) se encuentran en el orden del tiempo de exposición promedio por transecta (T). Este valor, se incrementa cuando la diferencia máxima relativa en la velocidad de flujo $RMF[V]$ aumenta. El análisis de mediciones realizadas aguas abajo de una curva, indica que una de las grandes incertidumbres en el caudal del flujo medido se puede atribuir a las fluctuaciones generadas por los efectos topográficos (fluctuación de la capa de corte que separa la zona de recirculación). La presencia de esta separación del flujo genera una reducción cuasi-periódica en la sección efectiva de flujo (aumenta la zona de recirculación). Este comportamiento impermanente genera

incertidumbres en la determinación de caudal desde plataformas móviles por lo que los protocolos recomendados en la actualidad para la medición de caudal con ADCP no resulta en mediciones precisas para estos casos.

En el análisis de datos registrados en una sección específica del Río Mississippi durante las inundaciones de mayo de 2011, de las condiciones de flujo presentes durante esas mediciones 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, el perfil transversal) y las condiciones de registro no presentan particularidades a las cuales se les pueda atribuir el aumento en las incertidumbres observadas en la determinación de caudales en la sección del río analizada. Debido a esta circunstancia, la varianza de los caudales medidos estimada con un modelo conceptual es menor a la observada durante las mediciones. Así, 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.

6. Conclusiones y perspectivas de investigación futuras

6.1. Conclusiones

En la presente tesis, se realizó una contribución en lo que respecta a la estimación de incertidumbres en las mediciones de caudal con Perfiladores de Corriente Acústicos Doppler (ADCP) desde plataformas móviles.

En primer lugar se evaluaron las incertidumbres en la medición de caudal con ADCP desde plataformas móviles debido a las fluctuaciones turbulentas a partir de datos generados con Simulación Numérica Directa (DNS) de un flujo turbulento en un canal abierto que luego fueron validados con resultados de mediciones de campo. Del análisis realizado se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Se desarrollaron funciones adimensionales que permiten cuantificar la incertidumbre (varianza relativa y error máximo relativo) debido a la turbulencia del flujo en función de parámetros adimensionales relacionadas la configuración del registro y a las condiciones del flujo.
- Los resultados muestran que aumentar el número de transectas tiene un mayor impacto en la reducción del rol de las fluctuaciones de la turbulencia sobre las incertidumbres de las mediciones de caudal con ADCP que el aumento de la frecuencia de muestreo y la disminución de las velocidades del bote.
- Los resultados indican que los errores aleatorios, debido a la turbulencia del flujo se incrementan en la medición de flujos pocos profundos ($H < 0.5$ m) con velocidades de bote relativamente grandes.

Luego se presentó un modelo conceptual, validado luego con mediciones de campo, que permite cuantificar los errores aleatorios en las mediciones de caudal realizadas con ADCP desde plataformas móviles debido a procesos aleatorios estacionarios presentes en el flujo durante la medición y se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- El modelo conceptual presentado, basado en el cálculo de la varianza del caudal medido usando métodos estadísticos disponibles para el análisis de la incertidumbre de series temporales de velocidades del flujo, provee estimaciones

de la varianza de las mediciones de caudal asociadas a diferentes tiempos de medición.

- Con el modelo conceptual, dos casos fueron analizados, campos de flujo no correlacionados (Caso 1) y campos de flujo correlacionados (Caso 2), los cuales representan diferentes configuraciones de muestreo y diferentes características del campo flujo medido.
- Incluso cuando todas las precauciones posibles sugeridas por los fabricantes de ADCP se toman en consideración, el campo de flujo muestreado es diferente al campo de flujo real, debido a la resolución espacial y temporal del instrumento y a la presencia de ruido del instrumento, ruido ambiental, y otros factores.
- El análisis de los datos de campo muestreados incluidos desde plataformas móviles y estacionarias muestra que a pesar de que la estimación de la escala integral de tiempo del campo de flujo turbulento es mucho mayor que el intervalo de registro, la escala integral de tiempo del campo de flujo muestreado es del orden del intervalo de registro. Por lo tanto, la ecuación utilizada para calcular la varianza en la medición de caudal asociada a diferentes tiempos de registro para los campos de flujo no correlacionados es la adecuada.
- El enfoque seleccionado muestra que el tiempo de exposición de la medición (a veces llamado duración), el tamaño de la celda vertical, y la frecuencia de muestreo son factores críticos en la reducción de la incertidumbre en la medición del caudal.
- El método descrito asume (a) una velocidad del bote constante, (b) un campo de flujo homogéneo y estacionario para las mediciones de ADCP, y c) que no hay correlación de las diferentes fuentes de error. Mediciones de en las cuales (a) la varianza en la velocidad del bote es grande y varía a través de la sección transversal, (b) el campo de flujo no es homogéneo y no es estacionario (presencia de fluctuaciones de baja frecuencia del flujo), y (c) hay correlación de las diferentes fuentes de error, resultarán en una mayor variación en el caudal medido. Se requiere trabajo adicional para agregar términos que representan la estructura de la correlación de distintas fuentes de ruido en el modelo.

Finalmente se estimaron incertidumbres en la medición de caudal con ADCP desde plataformas móviles *debido a fluctuaciones de baja frecuencia presentes en el flujo.*” Se realizó un análisis dimensional el cual fue complementado con un análisis

simplificado de una señal de velocidad sintética para evaluar el rol de cada una de las variables adimensionales. Así se concluye que la presencia de fluctuaciones de flujo de baja frecuencia aumenta las incertidumbres en las mediciones de caudal hasta un valor crítico cuando el período de las fluctuaciones de flujo se encuentra en el orden del tiempo de exposición promedio por transecta. Este valor, se incrementa cuando la diferencia máxima relativa en la velocidad de flujo (debido a la fluctuación de baja frecuencia) aumenta. Dos casos específicos fueron analizados y de ellos se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Mediciones realizadas aguas abajo de una curva en un canal artificial, indica que una de las grandes incertidumbres en el caudal del flujo medido se puede atribuir a las fluctuaciones de baja frecuencia generadas por efectos de la geometría en planta (fluctuación de la capa de corte que separa la zona de recirculación). La presencia de esta separación del flujo genera una reducción cuasi-periódica en la sección efectiva de flujo (aumenta la zona de recirculación). Este comportamiento impermanente genera incertidumbres en la determinación de caudal desde plataformas móviles por lo que los protocolos recomendados en la actualidad para la medición de caudal con ADCP en flujos estacionarios no resulta en mediciones precisas para estos casos.
- El análisis de datos registrados en una sección específica del Río Mississippi, Estados Unidos, durante las inundaciones de mayo de 2011, de las condiciones de flujo presentes durante esas mediciones 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 en la determinación de caudales en la sección del río analizada..
- Se concluye que la presencia de fluctuaciones de baja frecuencia (y su 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 (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.

6.2. Perspectivas de investigación futuras

Durante el desarrollo de esta tesis surgieron varias líneas de investigación futuras, las cuales se detallan a continuación:

- Se propone realizar nuevas simulaciones numéricas con alta resolución espacial y temporal para diferentes condiciones de flujo: a) simulación de flujo en curvas, c) simulación de un flujo en canales con presencia de fluctuaciones de baja frecuencia y determinar, utilizando estas simulaciones, la incertidumbre asociada a las mediciones de caudal.
- Analizar y establecer un rango de las contribuciones relativas de todas las fuentes de error (aleatorio y sesgo) en la determinación de caudales desde plataformas móviles.
- Realizar una guía práctica de operación del ADCP que incluyan las recientes investigaciones a los fines de minimizar incertidumbres y que actualice los protocolos de medición actuales del USGS.

7. Referencias

- Abad, J. D., Musalem, R. A., García, C. M., Cantero, M. I., García, M. H. (2004). "Exploratory study of the influence of the wake produced by acoustic Doppler velocimeter probes on the water velocities within measurement volume". *Proc., World Water & Environmental Resources Congress 2004* (CD-ROM), ASCE, Reston, Va.
- Abe, H., Kawamura, H., Matsuo, Y (2001). "Direct Numerical Simulation of a Fully Developed Turbulent Channel Flow With Respect to the Reynolds Number Dependence". *Journal of Fluids Engineering*, 123 (2), 382-393.
- Alvarez, J., Ragessi, I.M., Patalano, A., García, C.M., Hillman, G. (2013). "Estudios Hidrodinámicos Experimentales Para El Diagnóstico De Problemáticas En Plantas De Tratamiento De Agua", *Tercer Simposio de Métodos Experimentales en Hidráulica*, Santa Fe, Argentina
- Bendat, J., Piersol, A. (2000). *Random data: analysis and measurement procedures*. Third edition. Wiley. New York.
- Brown, D., Cortez, R, Minion, M. (2001). "Accurate Projection Methods for the Incompressible Navier–Stokes Equations", *Journal of Computational Physics*, 168(2):464-499.
- Cantero, M., Balachandar, S., García, M. (2007a). "High resolution simulations of cylindrical density currents". *Journal of Fluid Mechanics*, 590:437-469.
- Cantero, M., Lee, J., Balachandar, S., García, M. (2007b). "On the front velocity of gravity currents", *Journal of Fluid Mechanics*, 586:1-39.
- Canuto, C., Hussaini, M. Y., Quarteroni, A., Zang, T.A. (1988). "*Spectral Methods in Fluid Dynamics*, Springer", New York, U.S.A.
- Carr, M. L., Rehmann, C. R. (2005). "Estimating the dispersion coefficient with an acoustic Doppler current profiler". *Proceedings World Water and Environmental Resources Congress 2005* (CD-ROM), ASCE, Reston, Va.
- Carr, M. L., Rehmann, C. R., Gonzalez, J. A. (2005). "Comparison between dispersion coefficients estimated from a tracer study and ADCP measurements". *Proc., World*

- Water and Environmental Resources Congress 2005* (CD-ROM), ASCE, Reston, Va
- Cheng, R. T., Gartner, J. W., Wood, T. (2005). “Modeling and model validation of wind-driven circulation in upper Klamath Lake, Oregon”. *Proc., World Water and Environmental Resources Congress 2005* (CD-ROM), ASCE, Reston, Va.
- Cortese, T., Balachandar, S. (1995). “High Performance Spectral Simulation of Turbulent Flows in Massively Parallel Machines With Distributed Memory”, *International Journal of High Performance Computing Applications*, 9(3):187-204.
- Czuba, J. A., Oberg, K. A. (2008). “Validation of Exposure Time for Discharge Measurements made with Two Bottom-Tracking Acoustic Doppler Current Profilers”. *Proc. of the IEEE/OES/CMTC Ninth Working Conference on Current Measurement Technology*, IEEE, Charleston, SC, 245-249.
- Deines, K. L. (1999). “Backscatter estimation using broadband acoustic Doppler current profilers”. *Proc., 6th Working Conf. on Current Measurement*, IEEE, New York, 249–253.
- Dinehart, R. L., Burau, J. R. (2005). “Averaged indicators of secondary flow in repeated acoustic Doppler current profiler crossing of bends”. *Water Resources Research*, 41, 1-18.
- Drazin, P. G. (2002). *Introduction to hydrodynamic stability*, Cambridge University Press, ISBN 0-521-00965-0.
- Droz, C. J., López, F., Prendes, H. (1998). “Mediciones de velocidades y caudales con un ADCP en el Río Paraná”. *Proc., 17th Congreso Nacional del Agua y II Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur*, Santa Fé, Argentina.
- Gaeuman, D., Jacobson, R. B. (2005). “Aquatic habitat mapping with an acoustic current profiler: Considerations for data quality.” *Open- file Rep. No. 2005-1163*, U.S. Geological Survey, Reston, Va
- García, C. M., Cantero, M. I., Niño, Y., García, M. H. (2005). “Turbulence measurements with acoustic Doppler velocimeters”. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 131, No 12, p. 1062–1073.
- García, C. M., Jackson P., García, M. (2006). “Confidence intervals in the determination of turbulence parameters”. *Experiment in Fluids*. Vol. 40, p. 514 –

- García, C. M., Oberg, K., García, M. (2007). “ADCP Measurements of Gravity Currents in the Chicago River, Illinois”. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE. 133(12), 1356-1366. ISSN: 0733-9429
- García, C. M., Tarrab, L., Oberg, K., Szupiany, R., Cantero, M. (2012). ”Variance of Discharge Estimates Sampled Using Acoustic Doppler Current Profilers from Moving Platforms”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(8), 684–69
- García, C.M.; Ragessi, M.; Haisama, M.; Balderrama, C.; Herrero, H.; Tarrab, L.; Cantero M.; Rodriguez, A. (2010). “Caracterización experimental del flujo en componentes de una planta de tratamiento de agua potable”. *XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Punta del Este. Uruguay.
- González-Castro, J. A., Ansar, M., Kellman, O. (2002). “Comparison of discharge estimates from ADCP transect data with estimates from fixed ADCP mean velocity data”. *Proc., Hydraulic Measurements & Experimental Methods 2002 (CD-ROM)*, ASCE, Reston, Va.
- González-Castro, J. A., Muste, M. (2007). “Framework for Estimating Uncertainty of ADCP Measurements from a Moving Boat by Standardized Uncertainty Analysis,” Special Issue on Acoustic Velocimetry for Riverine Environments, *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(12), pp. 1390-1411.
- González-Castro, J. A., Melching, C. S., Oberg, K. A. (1996). “Analysis of open-channel velocity measurements collected with an acoustic Doppler current profiler.” *Proc., RIVERTECH 96*, Ist. Int. Conf. on New/Emerging Concepts for Rivers, IWRA, 2, Chicago, 838–845.
- Guerrero, M., Lamberti, A. (2011). ”Flow Field and Morphology Mapping Using ADCP and Multibeam Techniques: Survey in the Po River”. *Journal of Hydraulic Engineering.*, 137(12), 1576–1587. doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000464.
- Guerrero, M., Rütther, N. Szupiany, R. N. (2011a). “Laboratory validation of ADCP techniques for suspended sediments investigation”. *Flow Measurement and Instrumentation*, Doi:10.1016/j.flowmeasinst.2011.10.003.
- Guerrero, M., Szupiany, R. N. Amsler, M. (2011b). “Comparison of acoustic backscattering techniques for suspended sediments investigation”. *Flow*

Measurement and Instrumentation, Doi:10.1016/j.flowmeasinst.2011.06.003.

- Heskestad, G. (1965). "A generalized Taylor Hypothesis with application for high Reynolds number turbulent shear flows". *Journal of Applied Mechanics*. 32: 735 - 739.
- Howarth, M. J. (2002). "Estimates of Reynolds and bottom stress from fast sample ADCPs deployed in continental shelf seas". *Proc., Hydraulic Measurements & Experimental Methods 2002* (CD-ROM), ASCE, Reston, Va.
- Jackson, P., García, C.M., Oberg, K., Johnson K., García, M. (2007). "Density Currents in the Chicago River: Characterization, Effects on Water Quality, and Potential Sources". *Science of the Total Environment*. Elsevier Science. ISSN: 0048-9697.
- Jamieson, E. C., Rennie, C. D., Jacobson, R. B., Townsend, R. D. (2011). "3-D flow and scour near a submerged wing dike: ADCP measurements on the Missouri River", *Water Resour. Res.*, 47, W07544, doi:10.1029/2010WR010043.
- Jamieson, E. C., Rennie, C. D., Ramooz, R. (2008). Validation of ADCP bedload transport measurements, Proc. 2008 River Flow Conf., KUBABA Congress Dept. and Travel Services, Cesme, Turkey, 2343–2351.
- Jamieson, E.C., Rennie, C. D., Jacobson, R. B. Townsend, R. D. (2011). "Evaluation of ADCP Apparent Bed Load Velocity in a Large Sand-Bed River: Moving versus Stationary Boat Conditions". *American Society of Civil Engineers*, DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000373.
- Jirka, G.H. (2001): "Large Scale Flow Structures and Mixing Processes in Shallow Flows". *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 39, 6, 567-573
- Kawanisi, K. (2004). "Structure of turbulent flow in a shallow tidal estuary", *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(4), 360–370.
- Kostaschuk, R., Villard, P., Best, J. (2004). "Measuring velocity and shear stress over dunes with acoustic Doppler profiler". *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(9), 932–936.
- Lipscomb, S.W. (1995). "Quality assurance plan for discharge measurements using broad-band acoustic Doppler profilers": *U.S. Geological Survey Open-File Report 95–701*, 7 p.

- Lu, Y., Lueck, R. G. (1999a). “Using broadband ADCP in a tidal channel. Part I: Mean flow and shear”. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 16, 1556–1567.
- Lu, Y., Lueck, R. G. (1999b). “Using broadband ADCP in a tidal channel. Part II: Turbulence”. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 16, 1568–1579.
- Marsden, R. F., Ingram, R. G. (2004). “Correcting for beam spread in acoustic Doppler current profiler measurements”. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 21, 1491–1499.
- Morlock, S. E. (1996). “Evaluation of acoustic Doppler current profiler measurements of river discharge”. *Water-Resources Investigations Rep. No. 95-701*, U.S. Geological Survey, Denver.
- Mueller, D. S. (2002a). “Field assessment of acoustic Doppler based discharge measurements”. *Proc., Hydraulic Measurements & Experimental Methods 2002* (CD-ROM), ASCE, Reston, Va.
- Mueller, D. S. (2002b). “Use of acoustic Doppler instruments for measuring discharge in streams with appreciable sediment transport”. *Proc., Hydraulic Measurements & Experimental Methods 2002* (CD-ROM), ASCE, Reston, Va.
- Mueller, D. S. (2004). “Evaluating flow disturbance effects on ADCP measurements.” *Proc., Hydroacoustic Workshop 2004* (CD-ROM), San Diego.
- Mueller, D. S., 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.
- Mueller, D. S., Abad, J. D., García, C. M., Gartner, J. W., García, M. H., Oberg, K. A. (2007). “Errors in acoustic Doppler profiler velocity measurements caused by flow disturbance”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(12), 1411–1420.
- Mueller, D. S., Oberg, K. A. (2011). “Discussion of Near-Transducer Errors in ADCP Measurements: Experimental Findings”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(8), 863-866.
- Mueller, D. S., Wagner, C. R. (2006). “Application of the loop method for correcting acoustic Doppler current profiler discharge measurements biased by sediment transport”, *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006-5079*, 26 p.

- Muste, M. Kim, D., Hotchkiss, R., Gonzalez-Castro, J. (2010). “Near-Transducer Errors in ADCP Measurements: Experimental Findings”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 136(5), 275 – 289.
- Muste, M. Vermeyen, T., Hotchkiss, R., Oberg, K. (2007). “Acoustic Velocimetry for Riverine Environments”. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 133, No. 12, p. 1297 – 1298.
- Muste, M., Yu, K. Spasojevic (2004). “Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics; Part I: moving-vessel measurements”, *Flow Measurement and Instrumentation*, 15, 17-28.
- Nezu, I. (1977). *Turbulence structure in open channel flows*. Ph.D Thesis. Kyoto University. Kyoto, Japan.
- Nezu, I. Nakagawa, H. (1993). *Turbulence in open channel flows*. IAHR. Balkema, Rotherdam.
- Nezu, I., Rodi, W. (1986). “Open-Channel Flow Measurements with a Laser Doppler Anemometer”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 112(5):335-355.
- Nikora, V. Goring, D. (1998). "ADV measurements of turbulence: Can we improve their interpretation?". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 124 No 6, p. 630-634.
- Nystrom, E. A., Oberg, K. A., Rehmann, C. R. (2002). “Measurement of turbulence with acoustic Doppler current profilers—Sources of error and laboratory results”. *Proc., Hydraulic Measurements & Experimental Methods 2002 (CD-ROM)*, ASCE, Reston, Va
- Oberg, K. A., Mueller, D.S. (1994). “Recent applications of Acoustic Doppler Current Profilers”, in *Fundamentals and Advancements in Hydraulic Measurements and Experimentation*, Buffalo, New York, 1994, Proceedings: Hydraulics Division/ American Society of Civil Engineers (ASCE), p. 341-350.
- Oberg, K., Mueller, D. (2007). “Validation of Streamflow Measurements Made with Acoustic Doppler Current Profilers”. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 133, No. 12, 1421 – 1432.
- Oberg, K., S. Morlock, W. Caldwell, (2005). “Quality-Assurance Plan for Discharge Measurements Using Acoustic Doppler Current Profilers”. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5183.

- Parsons, D. R., Best, J. L., Lane, S. N., Orfeo, O., Hardy, R. J, Kostaschuk, R. (2007). "Form roughness and the absence of secondary flow in a large confluence-diffuence, Rio Paraná, Argentina". *Earth Surf. Processes Landforms*, 32, 155–162, doi:10.1002/esp.1457.
- Pope, S.B. Turbulent Flows. Cambridge University Press (2000).
- Ramooz, R., Rennie, C. D. (2010). "Laboratory measurement of bedload with an ADCP", In *Bedload-surrogate monitoring technologies: United States Geological Survey Scientific Investigations Rep. 2010-5091*, Reston, VA, <http://pubs.usgs.gov/sir/2010/5091/papers/Ramooz.pdf>.
- Rehmann, C., Mueller, D., Oberg, K. (2009). "Sampling Requirements for Discharge Measurements with ADCPs". IAHR Congress, Vancouver, Canada.
- Rennie, C. D., Millar, R. G., Church, M. A. (2002). "Measurement of bedload velocity using an acoustic Doppler current profiler". *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(5), 473–483.
- Rennie, C. D., Rainville, F. (2006). "Case study of precision of GPS differential correction strategies: Influence on ADCP velocity and discharge estimates". *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(3), 225–234.
- Schemper, T. J., Admiraal, D. M. (2002). "An examination of the application of acoustic Doppler current profiler measurements in a wide channel of uniform depth for turbulence calculations". *Proc., Hydraulic Measurements & Experimental Methods 2002* (CD-ROM), ASCE, Reston, Va.
- Schmidt, A. R., Espey, W. H. (2004). "Uncertainties in discharges measured by acoustic meters—A case study from accounting for Illinois' diversion of water from Lake Michigan". *Proc., World Water & Environmental Resources Congress 2004* (CD-ROM), ASCE, Reston, Va.
- Seo, I. W., Baek, K. O. (2004). "Estimation of the longitudinal dispersion coefficient using the velocity profile in natural streams". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 130, No. 3, pp. 227-236.
- Shih, H. H., Payton, C., Sprenke, J., Mero, T. (2000). "Towing basin speed calibration of acoustic Doppler current profiling instruments". *Proc. Joint Conf. on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management 2000* (CD-

- ROM), ASCE, Reston, Va.
- Simpson, M. R. (2001). “Discharge measurements using a broad-band acoustic doppler current profiler”. *U.S. Geological Survey*, Denver, CO.
- Simpson, M. R., Oltmann, R. N. (1993). “Discharge measurement using an acoustic Doppler current profiler”. *U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2395*, 34 p.
- Stacey, M. T., Monismith, S. G., Burau, J. R. (1999). “Observations of turbulence in partially stratified estuary”. *Journal of Physical Oceanography*, 29, 1950–1970.
- Streeter, V., Wylie, B. (1988). *Fluid Mechanics*. 8th Edition. McGraw-Hill Inc. USA.
- Szupiany R. N., Amsler M. L., Parsons D. R., Best J. L. (2009). “Morphology, flow structure, and suspended bed sediment transport at two large braid-bar confluences”. *Water Resources Research*, VOL. 45, W05415, doi:10.1029/2008WR007428, 2009.
- Szupiany, R. N. (2013). “Técnicas de velocimetría y sus aplicaciones en Hidráulica”, Monografía IAHR, en preparación.
- Szupiany, R. N., Amsler, M. L., Hernandez, J., Parsons, D. R., Best, J., Fornari, E., Trento, A. E. (2012). “Flow fields, bed shear stresses and suspended bed sediment dynamics in bifurcations of a large river”. *Water Resources Research*, doi:10.1029/2011WR011677, in press.
- Szupiany, R.N., Amsler, M. L., Best, J. L., Parson, D. R. (2007). “A Comparison of Fixed- and Moving-Vessel Measurements with an Acoustic Doppler Profiler (ADP) in a Large River”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133, 12, 1299-1310.
- Tarrab, L, García C. M., Cantero, M., Oberg, K. (2010) “Metodologías experimentales para la medición de caudales con Perfiladores de Corriente Acústicos Doppler”. *XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Punta del Este, Uruguay, Octubre 2010.
- Tarrab, L, García C. M., Oberg, K. (2011). “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”. *Quinto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. Santiago del Estero, Argentina, 2011*
- Tarrab, L., Garcia, C. M., Cantero, M. I., Oberg, K. (2012). “Role of turbulence fluctuations on uncertainties of acoustic Doppler current profiler discharge

- measurements". *Water Resources Research*, 48, W06507.
- Taylor, J. R. (1997). *An introduction to error analysis: The study of uncertainties in physical measurements*. 2nd ed. University Science Books, California, USA.
- Teledyne RD Instruments (2009). *WinRiver II User's Guide*. San Diego, CA, Teledyne RD Instruments, 178 p.
- Tennekes, H., Lumley, J. L. (1972). *A First Course in Turbulence*, MIT Press, Cambridge, MA
- USGS. (2006). Availability of the report "Application of the Loop Method for Correcting Acoustic Doppler Current Profiler Discharge Measurements Biased by Sediment Transport" by David S. Mueller and Chad R. Wagner (Scientific Investigations Report 2006-5079) and guidance on the application of the Loop Method. USGS, Office of Surface Water Technical Memorandum 2006.04, accessed January 23, 2012, at <http://water.usgs.gov/admin/memo/SW/sw11.08.html>
- USGS. (2011). Exposure time for ADCP moving-boat discharge measurements made during steady flow conditions. USGS, Office of Surface Water Technical Memorandum 2011.08, accessed January 23, 2012, at <http://water.usgs.gov/admin/memo/SW/sw11.08.html>
- USGS-OSW (2002a). Configuration of acoustic profilers (RD Instruments) for measurement of streamflow, OSW Tech. Memo. 2002.01, U.S. Geological Survey, Washington, D.C.
- USGS-OSW (2002b). Policy and technical guidance on discharge measurements using acoustic Doppler current profilers, OSW Tech. Memo. 2002.02, U.S. Geological Survey, Washington, D.C.
- Wernersson, E., Trägårdh, C. (2000). "Measurements and analysis of high-intensity turbulent characteristics in a turbine-agitated tank". *Experiments in Fluids*. Vol. 28, p. 532 – 545.