



CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL FLUJO PARA ESTIMAR PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE DISEÑO DE PASARELAS SOBRE EL RÍO URUGUAY EN LOS SALTOS DE MOCONÁ, MISIONES

**Carlos Marcelo García¹, Horacio Herrero¹, Gerardo Hillman¹, Andrés Rodríguez¹ y
Enrique Macchione²**

¹ Centro de Estudios y Tecnología del Agua. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad de Córdoba

² Carlos E. Enriquez S.A. Posadas, Misiones.

E-mail: cgarcia2mjc@gmail.com

RESUMEN

En este trabajo se sintetizan los principales resultados obtenidos durante la caracterización experimental del flujo para estimar parámetros hidráulicos de diseño de pasarelas sobre el río Uruguay en los Saltos del Moconá, Misiones. Para el diseño de las pasarelas se requiere como parámetros hidráulicos de diseño, la velocidad y profundidad de flujo máxima en dicha sección para ciertas condiciones hidráulicas establecidas para el diseño. Para la caracterización experimental del flujo (velocidad y profundidad) en la zona de estudio se utilizó un Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADP) "River Surveyor S5". Se realizaron mediciones de velocidad y batimetría en distintas secciones transversales ubicadas en la zona de estudio. A partir del procesamiento de los datos medidos con ADP se determinaron, para cada sección y para las condiciones experimentales ensayadas los siguientes parámetros hidráulicos: a) magnitud y dirección de la velocidad del flujo, y b) profundidad del flujo. Luego se estimaron velocidades medias en la sección transversal para otras condiciones de flujo diferentes a las observadas (representadas por mayores caudales y mayores profundidades de flujo) utilizando la ecuación de Manning con los parámetros calibrados utilizando los datos experimentales registrados.

ABSTRACT

This paper summarizes the main results obtained from the experimental characterization of flow conditions to estimate hydraulic design parameters for walkways over the Uruguay River at the Moconá Falls, Misiones, Argentina. For the design of the walkways, hydraulic parameters were required (i.e. maximum flow velocity and maximum flow depth in that section) for certain flow conditions defined for the design. For the experimental characterization of the flow (flow velocity and depth) an Acoustic Doppler Current Profiler (ADP) "River Surveyor S5" was used. Flow velocity and bathymetry measurements were performed in different cross sections in the study area. From the recorded data using ADP, the following hydraulic parameters were estimated for each cross section: a) magnitude and direction of flow velocity, and b) depth of flow. Then, average flow velocities in each cross section for other flow conditions different from those observed (represented by higher flow discharge and higher flow depths) were estimated using Manning's equation with the parameters calibrated using recorded experimental data.

INTRODUCCIÓN

El Parque Provincial Moconá está localizado al nordeste de la República Argentina, en el extremo sudeste de la provincia de Misiones, en las márgenes del río Uruguay. El río Uruguay nace en las estribaciones occidentales de la Sierra do Mar (Brasil), cerca de la costa atlántica. Su primer afluente misionero, en el límite oeste con el Brasil, es el río Pepirí Guazú, que nace en Bernardo de Irigoyen (Margalot, 1985). Entre su desembocadura y la del Yabotí; una fractura en el lecho del río Uruguay en sentido NE a SO (en sentido longitudinal al río) forma los conocidos Saltos del Moconá (Figura 1). Dicho cañón mide entre 1/3 y 1/4 del ancho del cauce natural, y es de tres a siete veces más profundo, a lo largo de aproximadamente 3000 m de longitud (Iriando y Kröling, 2008). Por estar ubicados en sentido longitudinal al río, estos saltos se cubren de agua en épocas de crecida del río, siendo tapados por completo hasta que el río vuelva a bajar (Rivero, 1997).



Figura 1.- Vista panorámica de los Saltos del Moconá, río Uruguay.

El ancho del río varía de 200 m en el tramo inferior hasta aproximadamente 450 m en el tramo superior. A lo largo de los Saltos del Moconá existen afloramientos rocosos en el lado brasileño que son inundados en las crecidas, llevando el ancho del río hasta unos 500 m en ese tramo.

Del análisis de los comportamientos hidrológicos del río Uruguay y del arroyo Yabotí, según datos de las estaciones “El Soberbio” y “Pepirí” respectivamente, se pudo deducir que existe una mayor probabilidad de ver los saltos durante el periodo que incluye los meses de diciembre a abril inclusive. Las variaciones en la altura del río Uruguay pueden deberse no sólo a las precipitaciones caídas a lo largo de su cuenca sino también al efecto de regulación de las represas hidroeléctricas instaladas en su cauce aguas arriba. La represa más próxima aguas arriba de los saltos, la cual regula los caudales para este tramo del río, es la represa Foz do Chapecó, ubicada sobre territorio brasileño. Algunas características de la represa son: a) Potencia instalada: 855 MW; b) Unidades generadoras: 4; c) Turbinas: tipo Francis, con 214 MW; d) Presa de enrocado con núcleo asfáltico; e) 48 metros de altura; f) 598 metros de extensión; g) Vertedero: 15 compuertas de 18,70 x 20,60m; h) Caudal Máximo de proyecto: 62.190 m³/s.

En este trabajo se sintetizan los principales resultados obtenidos durante la caracterización experimental del flujo para estimar parámetros hidráulicos de diseño de pasarelas sobre el río Uruguay en los Saltos del Moconá, Misiones. Estas pasarelas serán diseñadas con fines turísticos con una altura suficiente para acceder a los saltos en épocas en que los mismos puedan observarse. Para el diseño de las pasarelas se requiere como parámetros hidráulicos de diseño la velocidad y profundidad de flujo máxima en dicha sección para ciertas condiciones hidráulicas establecidas para el diseño.

DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La Figura 2 muestra la zona de estudio en el Parque Provincial Moconá en la cual se realizó la caracterización del flujo cuya síntesis es el objeto del presente trabajo. Esta zona está ubicada en la parte alta de los saltos (cercana a la margen derecha, territorio argentino), incluyendo la región que incluye la traza preliminar de las pasarelas. Los límites de la zona de estudio son: a) al norte la línea de la pasarela auxiliar construida por la empresa constructora para mejorar la accesibilidad; b) aproximadamente 50 metros hacia aguas abajo se encuentra el límite sur de la zona de estudio; c) el límite oeste es la costa argentina del río Uruguay y d) el límite este son los saltos. En la Figura 3 se muestra un relevamiento topográfico realizado en forma previa a este estudio.



Figura 2.- Zona de estudio

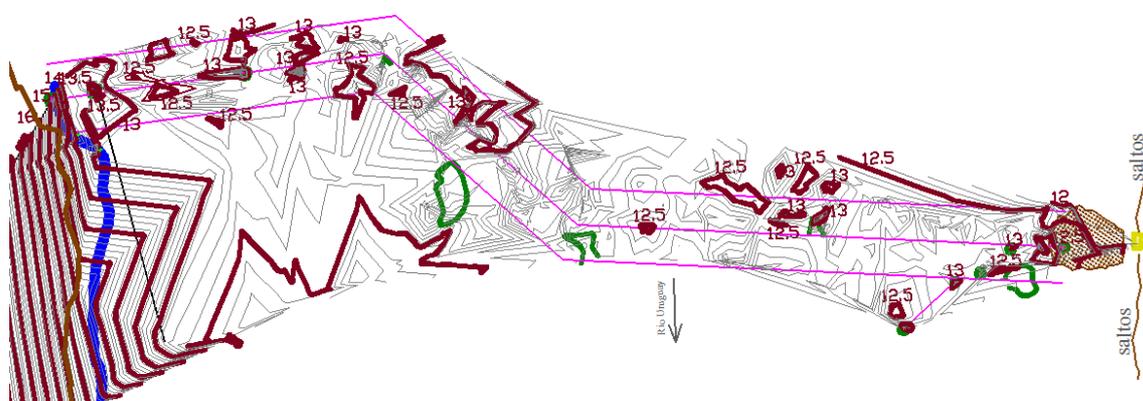


Figura 3.- Zona de estudio. Relevamiento topográfico realizado en forma previa a este estudio. Las cotas están referenciadas a la escala Garabí localizada aguas abajo de la zona de estudio.

EQUIPAMIENTO

Para la caracterización experimental del flujo (velocidad y profundidad) en la zona de estudio se utilizó el Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADP) “River Surveyor S5” (Figura 4) recientemente adquirido por el Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina. Este instrumental ha sido previamente evaluado y validado por el grupo de investigadores del Laboratorio de Hidráulica. Las características técnicas de este instrumento se presentan en la Tabla 1. Los perfiladores de corriente acústicos Doppler están siendo utilizados mundialmente para caracterizar flujos (mediciones de caudal y velocidad de flujo) en sistemas fluviales y canales artificiales (Oberg y Mueller 2007, Mueller y Wagner 2009).



Figura 4.- Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADP) “River Surveyor S5”

Tabla 1.- Características técnicas del Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADP) “River Surveyor S5”

Medición de velocidad	
Rango de profundidad	0.06m a 5m
Rango de velocidad	+/- 20m/s
Precisión	Hasta +/- 0.25% de la medida
Tamaño de la celda	0.02m a 0.5m
Configuración del Transductor	5 transductores. 4 haces de 3 MHz. Configuración Janus inclinada a 25°. 1 haz vertical de 1MHz
Medición de profundidad	
Rango de profundidad [m]	0.20m a 15m
Precisión	1%

Para su utilización, el instrumento se instaló en una plataforma móvil que se muestra en la Figura 5.



Figura 5.- Plataforma móvil e instrumento utilizado.

En la campaña de medición sintetizada en este reporte se utilizó las nuevas versiones de software (River Surveyor Live v.2.00) y firmware (River Surveyor firmware v1.0) del instrumental de acuerdo a las recomendaciones sugeridas por YSI/Sontek (empresa fabricante) el día 24 de septiembre de 2010. Una de las principales mejoras incluidas en la mencionada actualización es la incorporación del algoritmo “Smart Pulse” el cual, en base a la profundidad, velocidad y niveles de turbulencia del flujo, adapta el esquema de pulso acústico óptimo para esas condiciones con el fin de proveer la máxima resolución de datos de velocidad, con tamaños de celda tan pequeños como 2 cm. La selección del esquema óptimo se realiza automáticamente.

Se utilizó, durante las campanas de medición reportas en este trabajo, elementos complementarios: un bote de aluminio desde donde se operó la computadora que comanda el instrumental utilizado para caracterizar el flujo y el generador de energía eléctrica requerido para operar el instrumental y la computadora (ver Figura 6).



Figura 6.- Equipamiento complementario utilizado.

Se utilizó un Geoposicionador satelital (GPS) para determinar la posición inicial de cada recorrido y se determinó en forma complementaria, en todos los casos, la temperatura del agua con un termómetro analógico para evaluar el comportamiento del termómetro digital que incluye el instrumento acústico.

METODOLOGÍA

La metodología experimental implementada en este trabajo consistió en realizar en primera instancia mediciones de velocidad y batimetría en 10 secciones transversales ubicadas sobre la margen derecha de la zona de estudio (Figura 7). En cada sección se realizaron dos recorridos o transectas (uno de ida y uno de vuelta con el fin de evaluar posibles efectos direccionales). Además se realizó un cruce completo (ida y vuelta) desde la margen derecha del río (límite oeste de la zona de estudio) hasta los saltos. Los recorridos realizados durante este cruce completo se incluyen en la Figura 8. Las mediciones se realizaron los días 26 y 27 de abril de 2011.

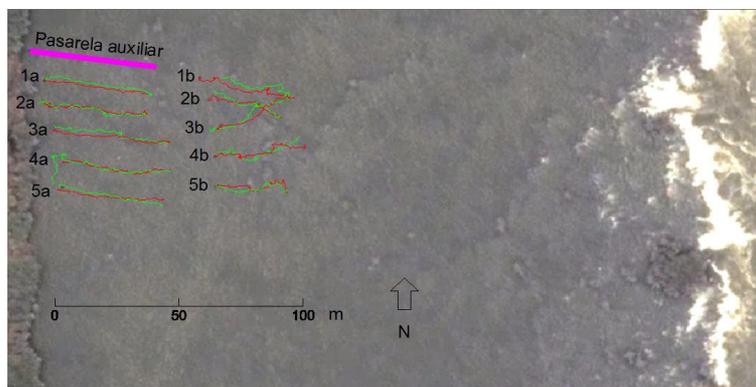


Figura 7.- Recorridos realizados sobre la margen derecha

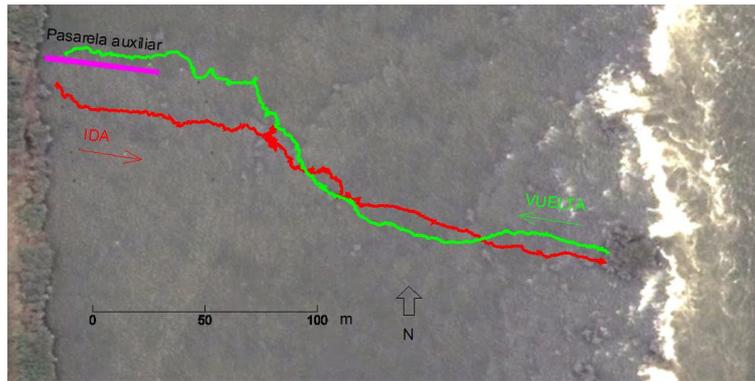


Figura 8.- Recorridos completos

CONDICIONES EXPERIMENTALES

La Figura 9 muestra los caudales erogados por este aprovechamiento durante el periodo que comprende las fechas en las cuales se hicieron las mediciones (Figura 9):

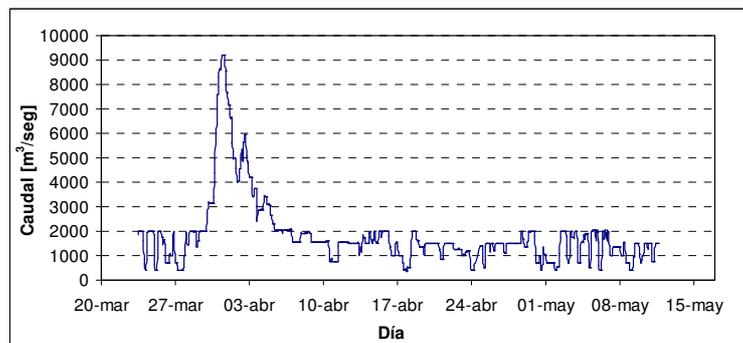


Figura 9.- Hidrograma de caudales erogados por la presa Foz do Chapecó durante los días de medición

A continuación se describen las condiciones experimentales monitoreadas durante los dos días de medición (26 y 27 de abril de 2011).

Tabla 2.- Condiciones experimentales monitoreadas durante los dos días de medición (26 y 27 de abril de 2011)

Característica	26/04/2011	27/04/2011	
	tarde	mañana	tarde
Caudal erogado por Chapeco (media en las 24hs previas)	1247 m ³ /s	1443 m ³ /s	1443 m ³ /s
Lectura escala Aguas arriba de Saltos del Moconá (escala en pasarela auxiliar)	Inicio: 0.45m Fin: 0.45m	Inicio: 0.43m Fin: 0.43m	Inicio: 0.40m Fin: 0.40m
Lectura escala Aguas abajo Saltos del Moconá (escala Garabi)	Inicio: 6.78m (15:00hs) Fin: 6.55m (17:50hs)	Inicio: 6.50m (09:45hs) Fin: 6.45m (13:05hs)	Inicio: 6.35m (15:00hs) Fin:
Temperatura del agua	22°C	22°C	22°C
Otro	No se observaron efectos apreciables del viento		

La Figura 10 incluye una fotografía aérea tomada durante el trabajo experimental realizado en

la mañana del día 27 de abril.



Figura 10.- Fotografía aérea tomada durante el trabajo experimental realizado en la mañana del día 27 de abril

RESULTADOS

A partir del procesamiento de los datos registrados con el perfilador acústico se determinaron, para cada sección y para cada condición experimental descrita en el punto anterior, los siguientes parámetros hidráulicos: a) magnitud y dirección de la velocidad del flujo, y b) profundidad del flujo. Las denominaciones de las secciones se detallan en las figuras 7 y 8. En todos los casos, la profundidad se mide desde la superficie libre.

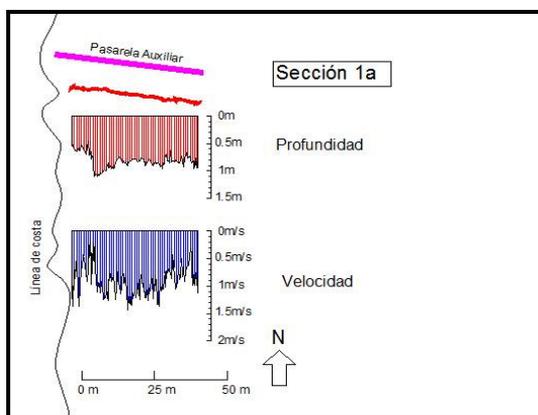


Figura 11a.- Magnitud de la velocidad media en la vertical del flujo y profundidad para la sección 1a

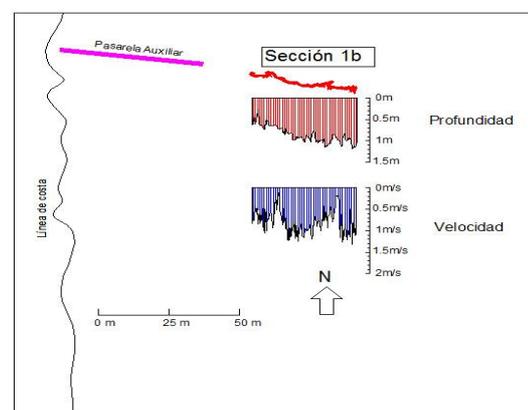


Figura 11b.- Magnitud de la velocidad media en la vertical del flujo y profundidad para la sección 1b

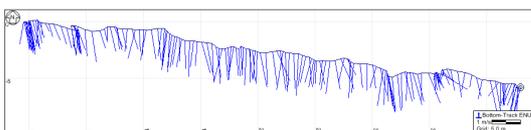


Figura 12a.- Dirección del flujo medio en la vertical para la sección 1a

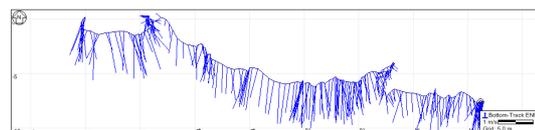


Figura 12b.- Dirección del flujo medio en la vertical para la sección 1b

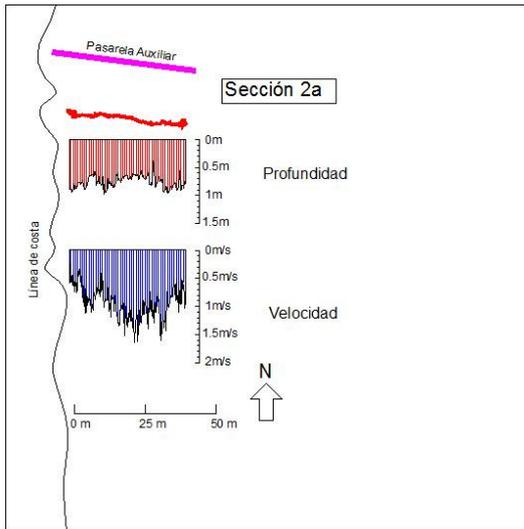


Figura 13a.- Magnitud de la velocidad media en la vertical del flujo y profundidad para la sección 2a

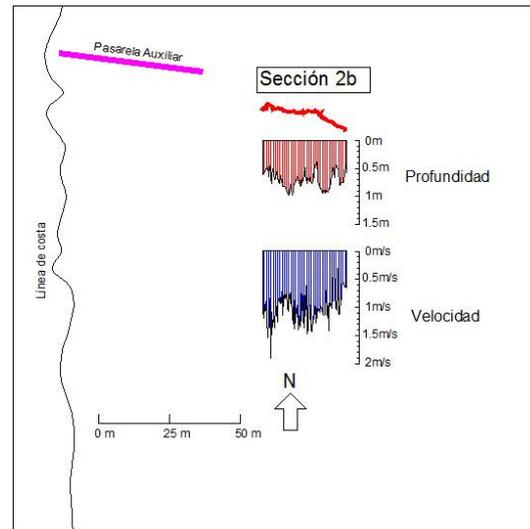


Figura 13b.- Magnitud de la velocidad media en la vertical del flujo y profundidad para la sección 2b

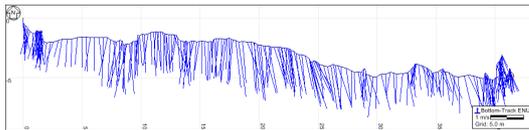


Figura 14a.- Dirección del flujo medio en la vertical para la sección 2a

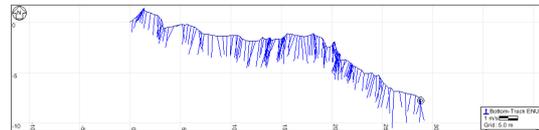


Figura 14b.- Dirección del flujo medio en la vertical para la sección 2b

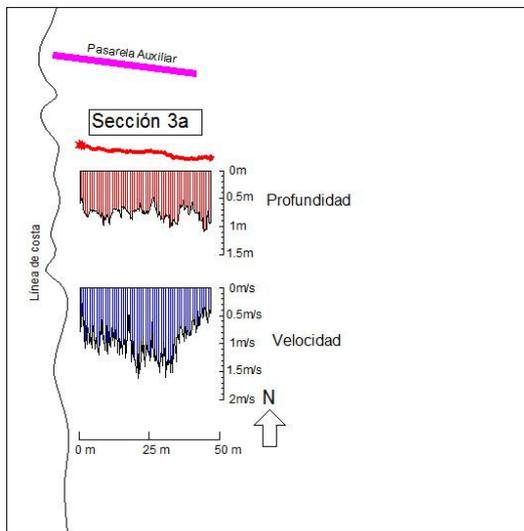


Figura 15a.- Magnitud de la velocidad media en la vertical del flujo y profundidad para la sección 3a

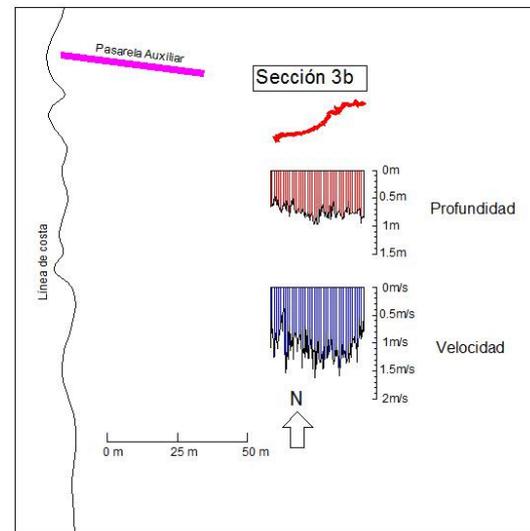


Figura 15b.- Magnitud de la velocidad media en la vertical del flujo y profundidad para la sección 3b

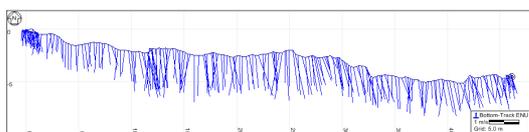


Figura 16a.- Dirección del flujo medio en la vertical para la sección 3a

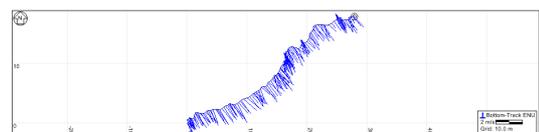


Figura 16b.- Dirección del flujo medio en la vertical para la sección 3b

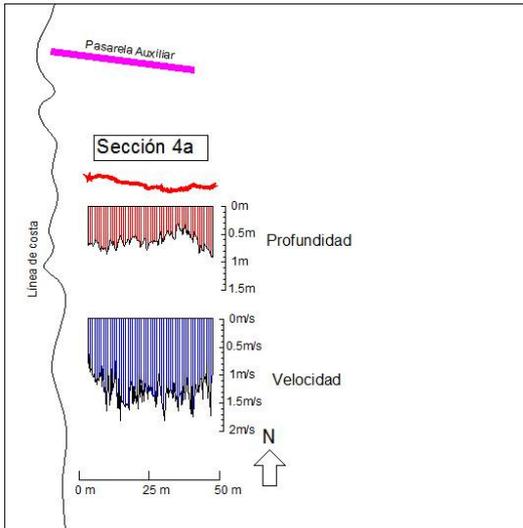


Figura 17a.- Magnitud de la velocidad media en la vertical del flujo y profundidad para la sección 4a

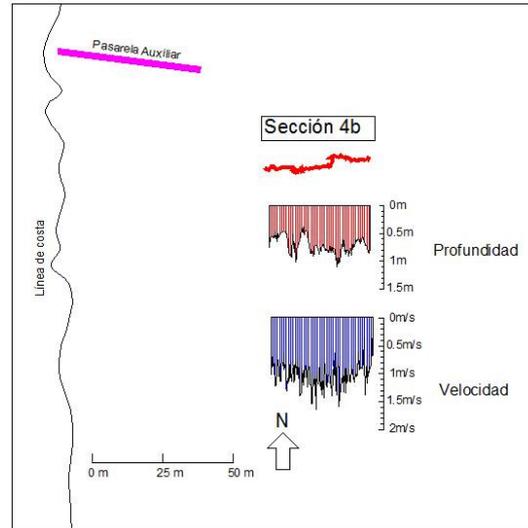


Figura 17b.- Magnitud de la velocidad media en la vertical del flujo y profundidad para la sección 4b

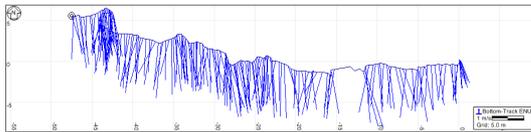


Figura 18a.- Dirección del flujo medio en la vertical para la sección 4a

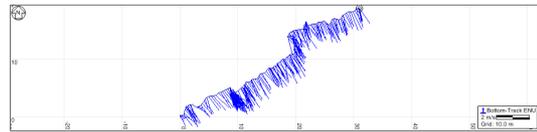


Figura 18b.- Dirección del flujo medio en la vertical para la sección 4b

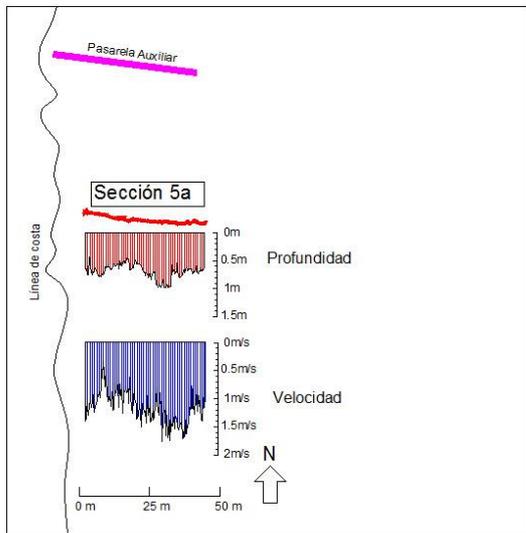


Figura 19a.- Magnitud de la velocidad media en la vertical del flujo y profundidad para la sección 5a

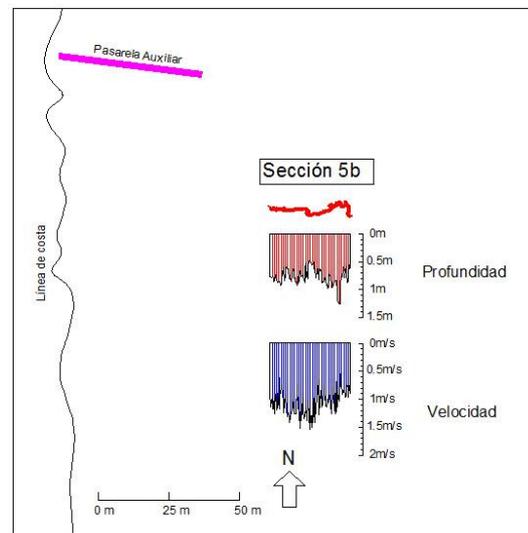


Figura 19b.- Magnitud de la velocidad media en la vertical del flujo y profundidad para la sección 5b

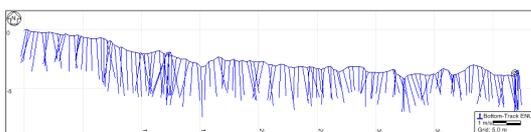


Figura 20a.- Dirección del flujo medio en la vertical para la sección 5a

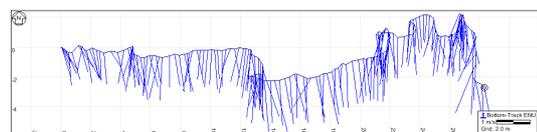


Figura 20b.- Dirección del flujo medio en la vertical para la sección 5b

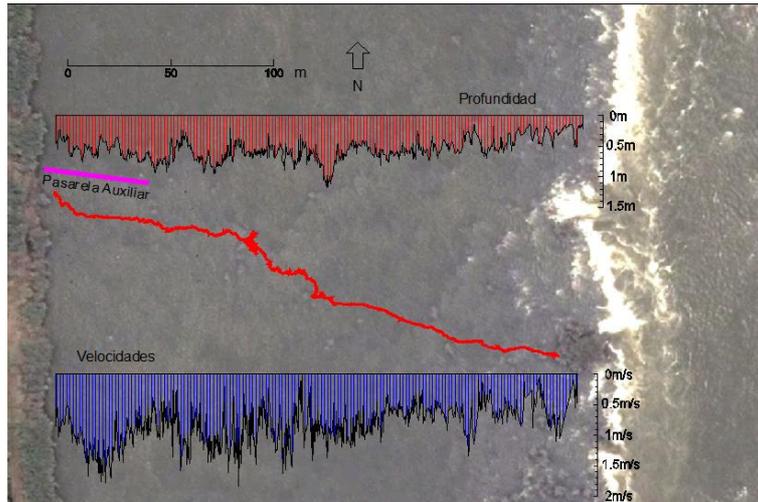


Figura 21.- Magnitud de la velocidad media en la vertical del flujo y profundidad para el recorrido completo (ida)

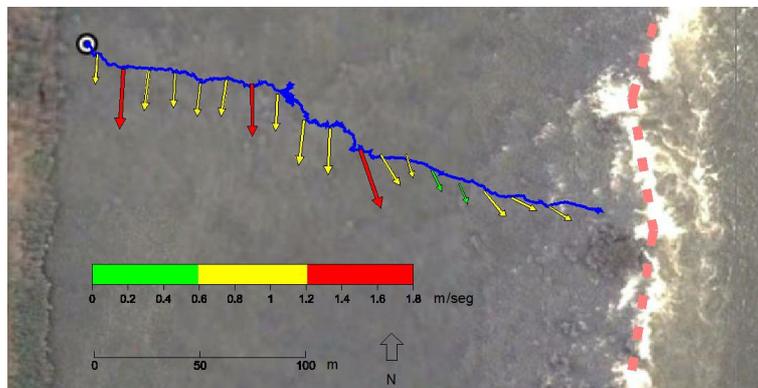


Figura 22.- Magnitud y dirección de la velocidad media del flujo en la vertical para el recorrido completo (ida)

En la Tabla 3 se resumen para cada sección los valores mínimos, medios y máximos de los parámetros hidráulicos, correspondientes a las condiciones experimentales evaluadas:

Tabla 3.- Valores mínimos, medios y máximos de los parámetros hidráulicos medidos

Sección	Profundidad			Magnitud de Velocidad		
	Mínima	Media	Máxima	Mínima	Media	Máxima
	[m]	[m]	[m]	[m/seg]	[m/seg]	[m/seg]
1a	0.46	0.79	1.10	0.21	0.90	1.45
2a	0.38	0.77	0.97	0.25	0.93	1.65
3a	0.47	0.75	1.08	0.28	0.91	1.62
4a	0.28	0.62	0.91	0.63	1.25	1.81
5a	0.43	0.68	0.98	0.35	1.16	1.77
1b	0.27	0.87	1.18	0.02	0.66	1.33
2b	0.39	0.71	0.97	0.16	1.01	1.91
3b	0.46	0.74	0.97	0.13	1.04	1.62
4b	0.29	0.75	1.12	0.33	1.02	1.65
5b	0.44	0.76	1.26	0.55	1.06	1.54
Completa	0.21	0.65	1.25	0.02	0.79	1.83

En la Figura 23 se muestra una batimetría elaborada en una porción de la zona de estudio obtenida a partir de las mediciones de profundidad del flujo realizadas en las secciones 1a, 2a, 3a, 4a, 5a, 1b, 2b, 3b, 4b, 5b. Los resultados obtenidos muestran una buena relación con la batimetría realizada previamente (Figura 3).

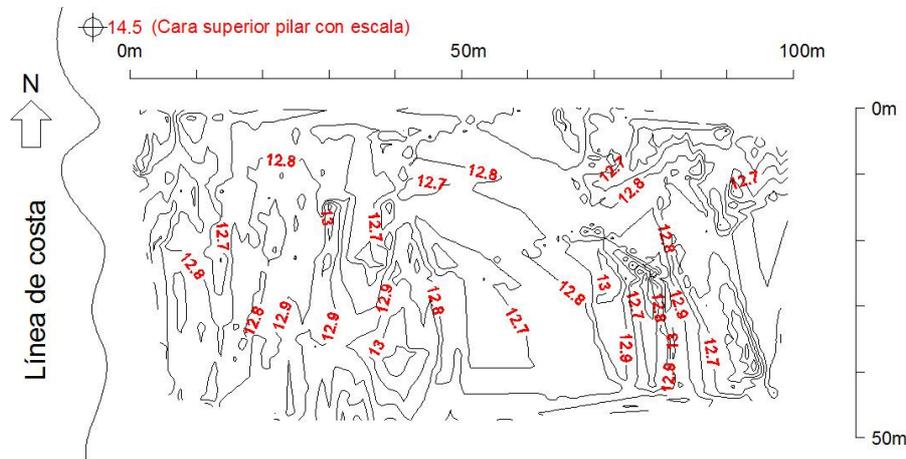


Figura 23.- Batimetría de la zona de estudio obtenida a partir de las mediciones de profundidad del flujo realizadas en las secciones 1a, 2a, 3a, 4a, 5a, 1b, 2b, 3b, 4b, 5b. Las cotas están referenciadas a la escala Garabi.

ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE DISEÑO

Los resultados incluidos en la sección anterior corresponden a los parámetros hidráulicos (magnitud y dirección de la velocidad media del flujo en la vertical, y profundidad del flujo) observados para las condiciones experimentales presentes durante los trabajos experimentales. En esta sección se estiman los valores de los principales parámetros hidráulicos de diseño para otras condiciones de flujo diferentes a las observadas (representadas por mayores caudales). Para realizar esta estimación se utilizó la ecuación de Manning (Chow 1982) la cual permite determinar los valores de velocidades medias en la sección transversal:

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2} \quad [1]$$

Donde V es la velocidad media en la sección transversal; n es el coeficiente de rugosidad; R_h es el radio hidráulico de la sección estimada igual a la profundidad media (h) para una sección de un curso de aguas poco profunda como la ensayada en este trabajo; y S es la pendiente de la superficie libre en el tramo analizado. Tomando como referencia los valores observados de los parámetros hidráulicos y asumiendo valores aproximadamente constantes de los parámetros n y S , se determinó la siguiente relación entre los valores de diseño (subíndice *dis*) y observados (subíndice *ob*) para la velocidad media del flujo en la sección transversal:

$$\frac{V_{dis}}{V_{obs}} = \left(\frac{h_{dis}}{h_{ob}} \right)^{2/3} \quad [2]$$

A partir de los valores de diseño de velocidad media en la sección transversal estimados para distintas profundidades medias de diseño, los valores máximos para la velocidad de flujo esperables en cada sección transversal se estiman a partir de las relaciones entre los valores medios y máximos observados que se incluyen en la Tabla 3.

En la Tabla 4 se resumen los valores de los parámetros hidráulicos estimados para distintas profundidades media de diseño. No se asignan probabilidades de ocurrencia a las profundidades y velocidades de diseño reportadas ya que la operación reciente de la represa Foz do Chapecó, ubicada sobre territorio brasileño, ha modificado sustancialmente el régimen hidrológico en el tramo del río Uruguay estudiado.

Tabla 4.- Parámetros hidráulicos de diseño

Profundidad media diseño [m]	Cota de superficie libre [m]	Velocidad media de flujo [m/s]	Velocidad máxima de flujo [m/s]
0.64	13.5	0.77	1.85
1	13.86	1.04	2.49
1.5	14.36	1.36	3.26
2	14.86	1.65	3.95
2.5	15.36	1.92	4.59
3	15.86	2.17	5.18
3.5	16.36	2.40	5.74
4	16.86	2.62	6.28
5	17.86	3.04	7.28
6	18.86	3.44	8.22

CONCLUSIONES

En este trabajo se sintetizan los principales resultados obtenidos durante la caracterización experimental del flujo para estimar parámetros hidráulicos de diseño de pasarelas sobre el río Uruguay en los Saltos del Moconá, Misiones. Para el diseño de las pasarelas se requiere como parámetros hidráulicos de diseño, la velocidad y profundidad de flujo máxima en dicha sección para ciertas condiciones hidráulicas establecidas para el diseño. Para la caracterización experimental del flujo (velocidad y profundidad) en la zona de estudio se utilizó un Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADP) “River Surveyor S5”.

Se realizaron mediciones de velocidad y batimetría en distintas secciones transversales ubicadas en la zona de estudio. En cada sección se realizaron dos recorridos o transectas (uno de ida y uno de vuelta con el fin de evaluar posibles efectos direccionales). Además se realizó un cruce completo (ida y vuelta) desde la margen derecha del río (limite oeste de la zona de estudio) hasta los saltos (distancia del cruce de aproximadamente 300m).

A partir del procesamiento de los datos medidos con ADP se determinaron, para cada sección y para las condiciones experimentales ensayadas los siguientes parámetros hidráulicos: a) magnitud y dirección de la velocidad del flujo, y b) profundidad del flujo. Luego se estimaron velocidades medias en la sección transversal para otras condiciones de flujo diferentes a las observadas (representadas por mayores caudales y mayores profundidades de flujo) utilizando la ecuación de Manning con los parámetros calibrados utilizando los datos experimentales

registrados.

No se asignan probabilidades de ocurrencia a las profundidades y velocidades medias de diseño reportadas ya que la operación reciente de la represa Foz do Chapecó, ubicada sobre territorio brasileño, ha modificado sustancialmente el régimen hidrológico en el tramo del río Uruguay estudiado.

Agradecimiento. A los profesionales y personal técnico de la empresa Carlos E. Enriquez S.A. Posadas, Misiones: su colaboración fue muy importante durante el desarrollo de las mediciones.

LISTA DE SÍMBOLOS

V :	velocidad media del flujo en la sección transversal.
n :	coeficiente de rugosidad de Manning.
R_H :	radio hidráulico de la sección.
h :	profundidad media del flujo en la sección.
S :	pendiente de la superficie libre.
V_{dis} :	velocidad de diseño.
h_{dis} :	profundidad de diseño.
V_{obs} :	velocidad observada
h_{obs} :	profundidad observada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chow, V. T. (1982). "Hidráulica de los canales abiertos". McGraw Hill. Santa Fe de Bogota. Colombia. ISBN 968-13-1327-5.

Iriondo, M. y Kröling, M. (2008). "*Cambios ambientales en la Cuenca del Río Uruguay*", Ediciones UNL, Universidad Nacional de Litoral, Santa Fe, Argentina.

Margalot, J. A. (1985). "*Geografía de Misiones*". Buenos Aires, 236 pp.

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

Oberg, K.A., Morlock, S.E., and Caldwell, W.S. (2005). "*Quality-assurance plan for discharge measurements using acoustic Doppler current profilers*": U.S. Geological Survey Scientific Investigations Rep. 2005-5183, 44 p.

Rivero, A. B. (1997). "*Turismo en la Reserva de Biósfera Yaboty*". Informe final, Programa de Desarrollo Institucional Ambiental, Secretaría de Recursos Naturales y Desarrollo Sustentable de la Nación.



Instituto de Recursos Hídricos



Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías



Universidad Nacional de Santiago del Estero



Instituto Nacional del Agua



Subsecretaría de Recursos Hídricos



Agencia Nacional de Promoción Cient. y Tec.



Gobierno Prov. de Santiago del Estero



Ministerio de la Producción



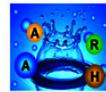
Secretaría del Agua



Secretaría de Desarrollo, Ciencia y Tecnología



Consejo Prof. de la Ingeniería y Arq.



Asociación Argentina de Recursos Hídricos



Asoc. Internacional de Investig. Hidroamb.



Comisión Regional del Río Bermejo



CORPORACION ARGENTINA TECNOLÓGICA S.A. INGENIERIA CIVIL E HIDRÁULICA

