



# Estimación de caudales de estiaje mediante velocimetría por imágenes

Federico Vilaseca <sup>a</sup>, Antoine Patalano <sup>b</sup>, Rodrigo Mosquera <sup>a</sup>, Magdalena Crisci <sup>a</sup>, Santiago Narbondo <sup>a</sup>, Christian Chreties <sup>a</sup>, Francisco Pedocchi <sup>a</sup> y Carlos Marcelo García <sup>b</sup>.

<sup>a</sup> *Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay.*

<sup>b</sup> *Centro de Estudios y Tecnología del Agua, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.*

[fvilaseca@fing.edu.uy](mailto:fvilaseca@fing.edu.uy); [antoine.patalano@gmail.com](mailto:antoine.patalano@gmail.com); [rmosquer@fing.edu.uy](mailto:rmosquer@fing.edu.uy); [mcrisci@fing.edu.uy](mailto:mcrisci@fing.edu.uy); [snarbondo@fing.edu.uy](mailto:snarbondo@fing.edu.uy);  
[chreties@fing.edu.uy](mailto:chreties@fing.edu.uy); [kiko@fing.edu.uy](mailto:kiko@fing.edu.uy); [cgarcia2mjc@gmail.com](mailto:cgarcia2mjc@gmail.com)

**RESUMEN:** En Uruguay se dispone de una extensa red hidrométrica que abarca la mayor parte de ríos y arroyos con cuencas mayores a los 1000 km<sup>2</sup> de superficie. La misma funciona adecuadamente para caudales medios (con errores estimados entre 11% y 30%) pero presenta grandes limitaciones en el registro de caudales mínimos (errores entre 68% y 145%), de acuerdo a Genta et al. (2001). Esto pone de manifiesto la necesidad de mejorar la medición de caudales de estiaje en Uruguay. En el presente trabajo se evaluó la aplicación de velocimetría por imágenes (Raffel et al., 2007) para la medición en campo de caudales de estiaje en una cuenca representativa de las condiciones hidro-geomorfológicas promedio de las secciones de aforo de Uruguay. Complementariamente se realizaron mediciones con equipos acústicos con fines comparativos y se implementó un modelo hidrológico de paso diario para estimar la magnitud y duración de los eventos de crecida y así definir los momentos más adecuados para realizar las mediciones. Los resultados de velocimetría por imágenes muestran una aproximación satisfactoria con los de las mediciones acústicas, lo cual demuestra la utilidad de la nueva metodología para el aforo en casos de estiaje.

**PALABRAS CLAVE:** Hidrología, Caudales de Estiaje, Curvas de Aforo, PIV, PTV.

## 1 INTRODUCCIÓN

En Uruguay, se dispone de una extensa red hidrométrica, que cubre la mayor parte de los arroyos y ríos con cuencas mayores a los 1000 Km<sup>2</sup> de superficie y tiene importancia estratégica para el desarrollo del país. La información recolectada mediante la misma ha permitido el estudio y planificación del uso de los recursos hídricos nacionales, así como el diseño de importantes obras hidráulicas del Uruguay. Sin embargo, esta red hidrométrica presenta algunas limitaciones, especialmente en la observación y registro de caudales mínimos, ya que fue diseñada e implementada para el monitoreo de caudales medios. El trabajo de Genta, et al. (2001) indica que el uso de las curvas de aforo para la estimación del caudal tiene, un error relativo promedio de 11% y un error máximo de 30%, si se considera la totalidad del rango; y un error promedio de 68% y un error máximo de 145% si se considera únicamente el rango de los caudales de estiaje. En conclusión,

si se trabaja en la zona de caudales bajos, el error asociado al uso de las curvas de aforo es del mismo orden de magnitud que el valor que se estima.

En el contexto nacional actual, varias de las problemáticas vinculadas al uso de recursos hídricos están directamente asociadas a los caudales en época de estiaje, por lo que la correcta determinación de los mismos resulta de importancia. En particular, los problemas de disponibilidad de agua surgen únicamente en períodos de sequías, cuando por competencia entre usuarios el escurrimiento superficial resulta insuficiente para cumplir con el 100% de las demandas. Por otro lado, en la recientemente aprobada ley N° 19.553, conocida como Ley de Riego con Destino Agrario, se establece la necesidad de asegurar el flujo de caudales ambientales en los cursos donde se instalen obras hidráulicas. Para el cálculo de los mismos, resulta fundamental disponer de una serie de caudales mínimos confiable. En efecto, la mayor parte de los métodos de cálculo propuestos en la bibliografía internacional (Magdaleno, 2009; Poff, et al., 1997) utilizan los estadísticos hidrológicos basados en el tramo de caudales bajos de las curvas de permanencia. Sabaj et al. (2014) establecen que es fundamental la mejora en el monitoreo de caudales bajos en Uruguay, ya que de otra manera, los caudales ambientales calculados con los métodos tradicionales, tendrán incertidumbres tan grandes como su magnitud.

Frente a esta necesidad de mejorar la medición de caudales de estiaje en Uruguay es que se formuló este proyecto. El mismo tiene por objetivo evaluar la aplicación de técnicas basadas en velocimetría por imágenes (por ejemplo LSPTV o PIV) para la medición de caudales bajos en las condiciones hidro-geomorfológicas presentes en las secciones de aforo de Uruguay. Se busca, además, elaborar una metodología simple y de bajo costo para la medición y eventual monitoreo de caudales mínimos, de modo que pueda ser implementada en toda la red hidrométrica nacional.

## 2 SELECCIÓN DE CUENCA

Se seleccionó la cuenca del arroyo Maldonado, con cierre en el puente de la ruta nacional N°9 (latitud 34°44' S ; longitud 54°57' W), como cuenca piloto característica. En dicho cierre se ubica una de las secciones con curva de aforo de la red hidrométrica nacional, resultando adecuada tanto para el análisis planteado como para las tareas de campo por su reducida área de aporte (cuenca de 350 Km<sup>2</sup>); poca profundidad en la zona de medición; buena accesibilidad con vehículos y relativa cercanía a Montevideo. Además la presencia del puente permite la instalación de una cámara que registre el flujo desde arriba del mismo, facilitando la aplicación de la técnica de velocimetría por imágenes.

## 3 MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Como se menciona anteriormente, la modelación hidrológica se llevó a cabo inicialmente como herramienta de planificación de las actividades de campo, y fue luego utilizada como punto de comparación adicional de las medidas de caudal. Se implementaron diferentes modelos hidrológicos de paso diario en la cuenca, luego de lo cual se seleccionó el modelo propuesto por Perrin et al. (2003) denominado "GR4J", por ser el de mejor desempeño para caudales de estiaje. El mismo es un modelo concentrado diario de 4 parámetros, basado en la cuantificación de la humedad del suelo.

El proceso de calibración consistió en el ajuste de los parámetros del modelo, de modo de adaptar lo mejor posible los resultados del mismo a los valores de la serie de caudal observado en la sección de estudio. Para evaluar la calibración, los indicadores utilizados fueron el coeficiente de

correlación ( $R^2$ ), la diferencia de volumen en porcentaje, entre medido y simulado ( $\Delta V$ ) y el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS). El ajuste tuvo como objetivo maximizar el coeficiente de correlación y el de Nash-Sutcliffe, y minimizar la diferencia de volumen. Para realizar la calibración se seleccionó un período de tiempo en el cual hubiera condición de estiaje en el cauce, ya que es la que resulta de interés para el estudio.

En las Tablas 1 y 2 se presentan los valores obtenidos de los diferentes parámetros del modelo así como también los valores de las funciones objetivo empleadas en su calibración. En la Figura 1 se muestra un gráfico con los resultados de la calibración para los eventos de julio de 2005 (temporada de estiaje).

Tabla 1. Parámetros del modelo resultantes de la calibración.

Parámetro	Significado físico	Valor calibrado
$X_1$ (mm)	Capacidad máxima del reservorio de producción	Agua disponible
$X_2$	Coefficiente de intercambio con el agua subterránea	0
$X_3$ (mm)	Capacidad máxima del reservorio de tránsito	50
$X_4$ (días)	Tiempo base de hidrograma unitario	1.7

Tabla 2. Indicadores de calibración resultantes.

Parámetro	Valor calibrado
$R^2$	0.88
NS	0.75
$\Delta V$ (%)	-25.32

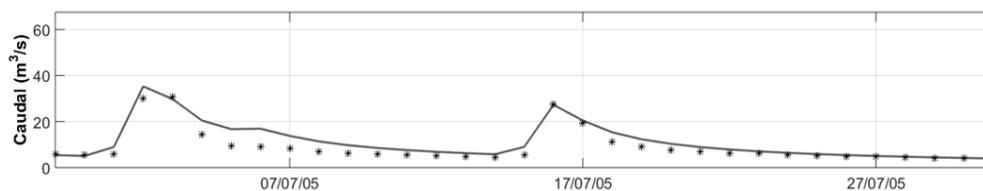


Figura 1. Calibración del modelo GR4J. Resultados para el mes de julio de 2005. La línea continua representa datos de la curva de aforo y la punteada los modelados.

## 4 MEDICIONES EN CAMPO

Se realizaron mediciones de caudal con la técnica de velocimetría por imágenes y con instrumentos acústicos. A continuación se describe brevemente cada metodología así como el procedimiento utilizado en campo para registrar los datos.

### 4.1 *Velocimetría por imágenes*

La velocimetría por imágenes es una técnica no intrusiva para la caracterización cualitativa y cuantitativa del flujo (Raffel, et al., 2007). La misma se basa en el seguimiento de partículas que se mueven suspendidas o flotando sobre el fluido. Se utiliza una cámara de video para registrar el movimiento de dichas partículas a lo largo del tiempo y posteriormente se realiza un procesamiento de las imágenes para determinar sus trayectorias, velocidad instantánea, velocidad media y los campos de dichas velocidades a lo largo y ancho de la sección estudiada.

El procedimiento en campo consiste en montar una cámara de video sobre el puente de manera que el encuadre quede fijo abarcando una región de interés del cauce. Dentro de dicha región de interés se colocan 4 estacas a distancia conocida entre sí que luego se usarán de referencia para rectificar los resultados del procesamiento digital de las imágenes. Por último se siembran trazadores en el flujo y se registra en video su paso a través de la región de interés. Para esto se utilizaron en primera instancia naranjas, optando por cambiarlas por chips de madera a partir de la segunda campaña de medición.

Se utilizaron dos algoritmos diferentes para el procesamiento de las imágenes, en función del elemento utilizado como trazador. En el caso en que se sembraron naranjas, se decidió procesar mediante PTV ("Particle Tracking Velocimetry"), pues el método da mejores resultados con trazadores de mayor tamaño y que se encuentren más dispersos sobre la superficie del agua. En cambio, cuando se sembraron chips de madera, las imágenes se procesaron mediante PIV ("Particle Image Velocimetry") pues funciona mejor con trazadores de menor tamaño y en alta concentración. En cualquiera de los casos se requirió posteriormente rectificar los resultados, para pasar las velocidades en píxeles a sistema métrico y para poder tener en cuenta el ángulo oblicuo de filmación de la cámara. En cada paso se utilizó software adecuado para procesamiento de imágenes tomadas en campo: para PTV se usó PTVlab (Patalano, et al., 2013, a); para PIV se usó PIVlab (Thielicke & Stamhuis, 2014) y para la rectificación RIVeR (Patalano, et al., 2013, b). En la Figura 2 se muestra, a modo de ejemplo, un campo de velocidades medido con PIV.

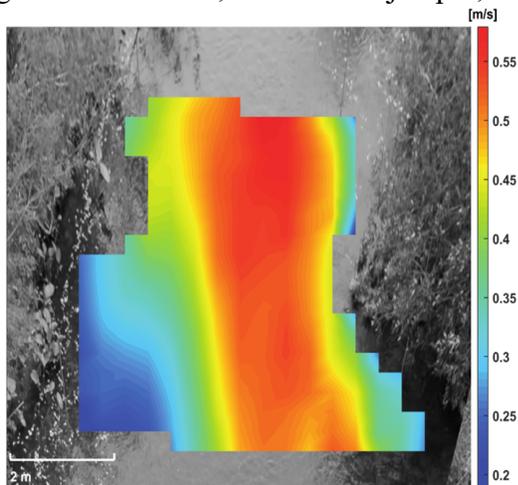


Figura 2. Ejemplo de campo de velocidad superficial medido con PIV.

El último paso del procesamiento consiste en estimar el caudal de circulación en base al campo superficial de velocidad obtenido. Para esto se usa un coeficiente  $\alpha$ , definido como el cociente entre la velocidad media vertical y la velocidad superficial. Luego el caudal se calcula como el producto entre velocidad media y área de la sección. Si bien en la bibliografía se utiliza un valor de referencia de 0.85 para  $\alpha$  (Plant, et al., 2005), su valor varía dependiendo de las características de cada cauce.

#### 4.2 Métodos acústicos

Como complemento a las medidas con velocimetría por imágenes se utilizaron alternativamente dos instrumentos acústicos para la medición del caudal: un ADCP ("Acoustic Doppler Current Profiler") RiverRay (marca Teledyne) y un ADV ("Acoustic Doppler Velocimeter") Vector (mar-

ca Nortek). Ambos tienen características y funcionalidades diferentes. El ADCP es un perfilador de corriente, capaz de relevar la batimetría de la sección, de determinar el campo de velocidades vertical en ella y de estimar el caudal promedio que la atraviesa. En cambio el ADV es capaz de medir con precisión la velocidad en un único punto del cauce, por lo que, para estimar el caudal se requiere tomar medidas en varios puntos a lo alto y ancho del mismo y realizar a parte un relevamiento topo-batimétrico de la sección. Se priorizó en todos los casos el uso del ADCP por la mayor practicidad en su uso y simpleza en el procesamiento de los resultados, utilizándose el ADV sólo en los casos en que el bajo nivel de agua no permitiera el uso del ADCP, limitado a tirantes mayores a los 40 cm.

## 5 RESULTADOS

En la Tabla 4 se presentan los resultados de caudal medido con velocimetría y métodos acústicos junto con el caudal estimado mediante la curva de aforo correspondiente a la sección de medición. Se agregan también los resultados del modelo hidrológico para los días de medición. Los resultados presentados en la Tabla 5 se muestran también gráficamente en la Figura 4. Se observa que las medidas de la regla en la mayoría de las campañas de medición se encuentra fuera del rango de niveles que cubre la curva de aforo, lo que enfatiza la necesidad planteada de mejorar la medición de caudales de estiaje.

Tabla 4. Comparación de caudales medidos, simulados y estimados con curva de aforo.

Fecha	Regla (m)	Velocimetría (m <sup>3</sup> /s)		ADV (m <sup>3</sup> /s)	ADCP (m <sup>3</sup> /s)	GR4J (m <sup>3</sup> /s)	Curva Aforo (m <sup>3</sup> /s)
		$\alpha=1$	$\alpha=0.85$				
11/11/2014	0.55	6.17	5.24	-	4.17	2.17	1.53
16/11/2015	0.08	1.41	1.20	0.85	-	0.3	-
	0.08	1.44	1.22	0.76	-	0.3	-
18/11/2015	0.07	1.16	0.99	0.67	-	0.34	-
	0.07	1.13	0.96	0.82	-	0.34	-
7/12/2015	0.03	0.73	0.62	0.37	-	0.24	-
4/8/2016	0.48	6.17	5.24	4.84	5.54	4.04	0.94
	0.48	6.38	5.42	4.84	5.54	4.04	0.94
4/11/2016	0.55	6.47	5.50	-	5.95	2.37	1.53
	0.55	6.86	5.83	-	5.95	2.37	1.53
9/11/2016	0.28	3.62	3.08	-	2.87	1.54	-
16/3/2017	0.09	1.27	1.08	0.58	-	1.04	-
1/11/2017	0.48	6.42	5.46	-	4.87	1.51	0.94
25/4/2018	0.09	1.12	0.95	-	-	2.1	-

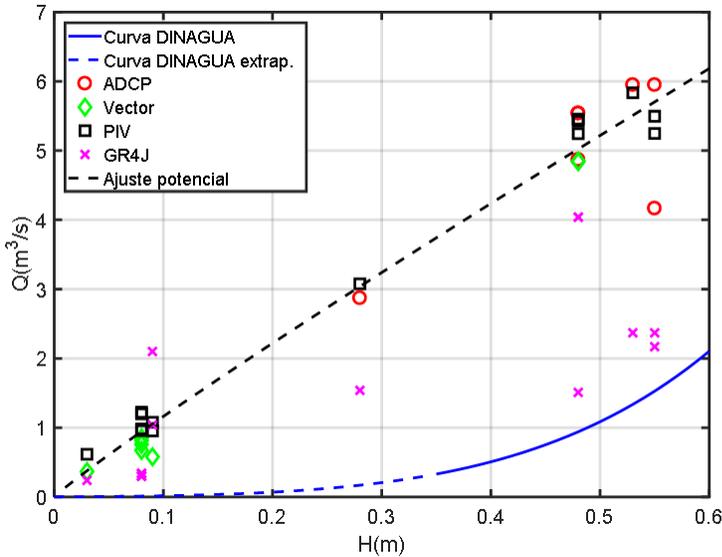


Figura 4. Comparación de caudales medidos, simulados y estimados con curva de aforo.

## 6 CONCLUSIONES

Los resultados de las medidas con velocimetría por imágenes se aproximan satisfactoriamente a los medidos con instrumentos acústicos, demostrando que esta metodología resulta muy satisfactoria para el aforo en condiciones de estiaje. Además se probó que es un método económico para aforar cauces, pues no requiere una inversión importante en equipamiento, materiales ni mano de obra. Para todos los puntos monitoreados, la medición acústica o velocimetría por imágenes resulta muy superior a la curva de aforo, reafirmando la necesidad de mejorar la medición de aforo para estiaje. El modelo hidrológico implementado mostró mayor similitud con los caudales de la curva de aforo que con las mediciones (acústica o velocimetría). Esto ocurre pues el mismo fue calibrado con los datos de dicha curva; no obstante el modelo fue de utilidad para la planificación de las salidas de campo.

## 7 BIBLIOGRAFÍA

Genta, J. L., Charbonnier, F., Failache, N. y Alonso, J., (2001): *Balances hídricos superficiales en cuencas del Uruguay*. CSIC-UdelaR, MTOP-DNH, UNESCO.

Magdaleno, F., (2009). *Manual técnico de cálculo de caudales ambientales*. s.l.: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. ISBN: 978843800411.

Patalano, A., Brevis, W., García, C. M., Bleninger, T. y Rodriguez, A., (2013,a): PTVlab, una herramienta gráfica para el procesamiento digital en Velocimetría por Seguimiento de Partículas. *III Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica*, Santa Fe, Argentina.

Patalano, A., Brevis, W., Guillén, N., Alvarez, J., García, C. M., Bleninger, T. y Rodriguez, A. (2013,b): Rectificación digital para mediciones de velocidad de flujo a gran escala utilizando Velocimetría por Imágenes de Partículas. *III Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica*, Santa Fe, Argentina.

Perrin, C., Michel, C. y Vazken, A., (2003): Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279, pp. 275-289.



Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Presteggaard, K. L., Richter B. D., Sparks R. E. y Stromberg, J. C. (1997). The natural flow regime. *BioScience*, 47 (11), pp 769-784.

Raffel, M., Willert, C., Wereley, S. y Kompenhans, J. (2007). *Particle Image Velocimetry, a Practical Guide*. Springer, Berlin, Germany.

Sabaj, V., Rodriguez-Gallego, L., Chreties, C., Crisci, M., Fernández, M., Colombo, N., Lanzilotta, B., Saravia, M., Neme, C. y Conde, D. (2014). *Qué son los caudales ambientales y cuál es la perspectiva de su aplicación en Uruguay*. Documento Técnico N° 34, Biblioteca Virtual del Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe de la UNESCO.

Thielicke, W. y Stamhuis, E. J. (2014). PIVlab - Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry. *Journal of Open Research Software.*, 2e30.