

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXIII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**DINÁMICA DEL FLUJO TURBULENTO EN UNA ZONA DE ALMACENAMIENTO  
SUPERFICIAL NATURAL: CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA MEDIANTE  
ESTUDIO DE TERRENO Y MODELACIÓN NUMÉRICA APLICADOS AL RÍO  
LLUTA**

**JORGE SANDOVAL U.<sup>1</sup>**  
**CRISTIÁN ESCAURIAZA M.<sup>2</sup>**  
**EMMANUEL MIGNOT.<sup>3</sup>**  
**LUCA MAO.<sup>4</sup>**

**RESUMEN**

El flujo turbulento que se desarrolla en zonas de almacenamiento superficial en los ríos controla muchos procesos físicos y biogeoquímicos que se desarrollan en estos. Estas zonas se caracterizan por poseer bajas velocidades y largos tiempos de residencia que favorecen la deposición de contaminantes, absorción de nutrientes e interacciones con sedimentos reactivos. La dinámica del flujo en estas zonas se caracteriza típicamente por una capa de corte que induce un área de recirculación y múltiples estructuras coherentes del flujo que exhiben diferentes escalas temporales y espaciales. En este trabajo se analiza el flujo en una cavidad lateral del Río Lluta, en un entorno andino de gran altitud (~ 4.000 msnm), con un valor de  $Re = 45.800$ . Caracterizamos las estructuras turbulentas usando mediciones de terreno y simulaciones numéricas en 3D. Las técnicas utilizadas correspondieron a LSPIV (Large Scale Particle Velocimetry) para el campo superficial de velocidades promedio y mediciones con ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) para mediciones puntuales del flujo instantáneo.

Las simulaciones numéricas del flujo se realizan utilizando un modelo de turbulencia DES. Nos centramos en los procesos de transporte de masa y cantidad de movimiento entre la cavidad y el canal principal, específicamente en la evolución de la concentración de contaminantes en ambas a lo largo del tiempo para un caso de estudio.

---

<sup>1</sup> Alumno de Magíster, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile – jcsandov@uc.cl

<sup>2</sup> Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile. Centro de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales (CIGIDEN) y Marine Energy Research Center (MERIC) – cescauriaz@ing.puc.cl

<sup>3</sup> Profesor Asociado, LMFA, INSA de Lyon, France - emmanuel.mignot@insa-lyon.fr

<sup>4</sup> Profesor Asociado, Departamento de Ecosistemas y Medioambiente (DEMA), Pontificia Universidad Católica de Chile – lmao@uc.cl

## 1. INTRODUCCIÓN

El Río Lluta es un fuente de agua esencial para los habitantes de la XV Región de Arica y Parinacota, así como para los ecosistemas y sistemas geofísicos que se desarrollan a lo largo de la cuenca (Leiva, et al., 2014). Este río nace de la confluencia entre los ríos Caracarani y Azufre, aproximadamente a 22 km aguas abajo del origen de este último en los faldeos del volcán Tacora. Aunque este río constituye un elemento crucial en este contexto, su calidad está fuertemente afectada por la existencia de algunos agentes tóxicos, especialmente arsénico. Esto es consecuencia de la actividad hidrotermal de parte del área de drenaje que contribuye al río Azufre, principal tributario del Río Lluta. Este fenómeno es ocasionado principalmente por la actividad del Volcán Tacora y el legado de la minería, especialmente de azufre, desarrollada en las laderas de éste en el pasado (Contreras et al., 2015). La combinación de estos factores produce la generación de un fenómeno conocido como “drenaje ácido”, el cual está caracterizado por bajos valores de pH y altas concentraciones de metales pesados y otros elementos tóxicos (Akcil & Koldas, 2006). Una vez que estos elementos tóxicos llegan al río, muchos de procesos biogeoquímicos que determinan la calidad del agua, están fuertemente relacionados con la hidrodinámica del flujo (Guerra et al., 2016).

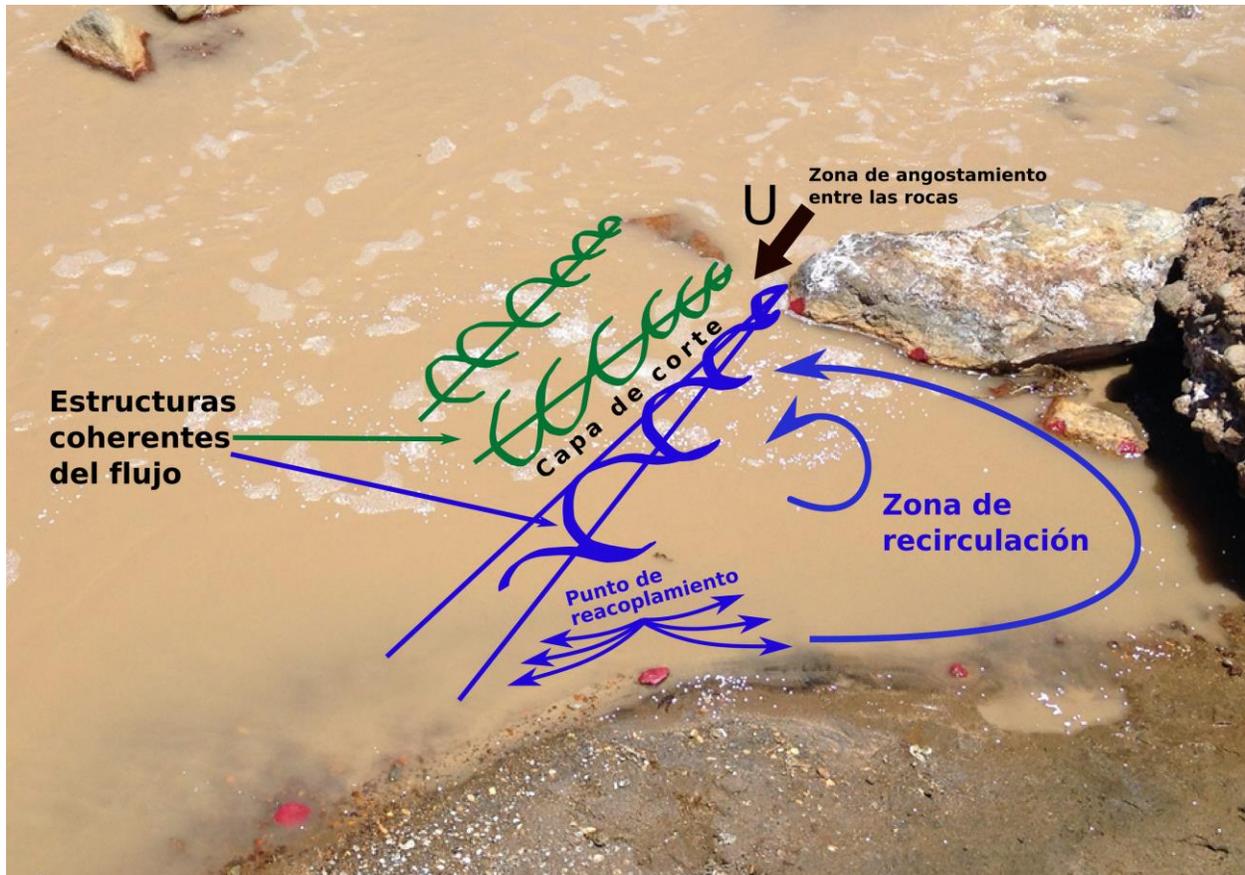
En general, el flujo desarrollado en los cauces, puede ser separado en dos zonas: la zona advectiva (escurrimiento principal) y la no advectiva (zonas de almacenamiento superficial) (Johnson et al., 2014). Las cavidades laterales son un tipo de zona de almacenamiento superficial, las cuales se desarrollan de forma natural en ríos y poseen gran importancia en los ecosistemas acuáticos formados en éstos (Jackson et al., 2013). Se caracterizan por poseer bajas velocidades y largos tiempos de residencia, lo cual genera que éstas sean hábitats propicios para peces y especies vegetales (Engelhardt et al., 2004; Uijttewaal, 2005; Constantinescu et al., 2009). Además, debido al flujo recirculatorio, aumenta el potencial de que partículas disueltas y en suspensión participen en reacciones biogeoquímicas, muchas de las cuales son responsables de remover metales, nutrientes u otros contaminantes (Newbold et al., 1983; Bencala et al., 1984; Triska et al., 1989; Cerling et al., 1990; D'Angelo et al., 1993; Valett et al., 1994, 1996, 1997; Benner et al., 1995; Mulholland et al., 1997; Squillace et al., 1993; Gücker and Boëchat, 2004; Ensign and Doyle, 2005; Argerich et al., 2011). La dinámica del flujo entre el escurrimiento principal y la cavidad ha sido ampliamente estudiada tanto numérica como experimentalmente (Jackson et al., 2013). Sin embargo, pocos estudios han analizado las características del flujo turbulento en cavidades en condiciones naturales a altos números de Reynolds (Jackson et al., 2013).

El objetivo de esta investigación es caracterizar la dinámica del flujo turbulento en zonas de almacenamiento superficial en condiciones naturales y su influencia en los procesos de transporte de masa y cantidad de movimiento entre el escurrimiento principal y la cavidad. Adicionalmente, en este trabajo se presenta una metodología de trabajo en terreno para obtener información detallada sobre el flujo a través de dos técnicas experimentales: mediciones del campo de velocidades superficial mediante LSPIV (Large Scale Particle Velocimetry) y mediciones puntuales del flujo instantáneo a través de un dispositivo ADV (Acoustic Doppler Velocimeter). Además se presentan los resultados de simulaciones numéricas tridimensionales del flujo en la cavidad mediante el uso de un modelo DES (Detached-Eddy Simulation) de turbulencia acoplado a un modelo tridimensional de transporte de masa para escalares pasivos que permite conocer en detalle la variación espacial y temporal de la concentración de contaminantes.

## 2. METODOLOGÍA

### Sitio de estudio

El sitio de estudio escogido corresponde a un tramo de río ubicado aproximadamente a 1 km aguas abajo de la confluencia entre los ríos Azufre y Caracarani. En este lugar, una cavidad lateral se forma debido a la presencia de una gran roca en la ribera izquierda. La presencia de una roca más pequeña en el flujo principal, genera un angostamiento y aceleración del flujo. La interacción entre el escurrimiento y estos obstáculos, genera una combinación de estructuras coherentes de distintas escalas, las cuales emergen desde el angostamiento y son transportadas aguas abajo. En terreno se pudo observar la existencia de un flujo superficial altamente complejo, caracterizado por una extensa zona de recirculación en la cavidad (Figura 1).



**Figura 1.** Representación esquemática de las principales estructuras del flujo en la cavidad analizada.

Este sitio fue escogido debido a su cercanía a la confluencia, ya que representa un punto de gran interés para analizar fenómenos relacionados al transporte de masa como tiempo de residencia de contaminantes y deposición de partículas, además de la dinámica del flujo turbulento desarrollado en esta configuración natural.

## Mediciones con ADV

Mediciones puntuales de la velocidad instantánea fueron llevadas a cabo mediante la utilización de un dispositivo micro-ADV. Este instrumento es capaz de obtener la velocidad puntual a alta resolución temporal (50 Hz). El instrumento utilizado para las mediciones fue un dispositivo Sontek 16-MHz MicroADV, con el cual se medieron un total de 70 puntos repartidos en cuatro secciones transversales al flujo. El tiempo de medición fue de aproximadamente 3 minutos en cada caso. Este tiempo fue elegido, ya que luego de una calibración previa del equipo en el laboratorio, representaba una ventana en la cual se aseguraba la convergencia temporal de las velocidades promedio y de los estadísticos del flujo de orden superior (esfuerzos de Reynolds y espectros) para números de Reynolds similares a los que se esperaba para el terreno.

La configuración de terreno del sistema para llevar a cabo las mediciones consistió en un sistema de rieles montado sobre una estructura de madera ensamblada sobre el río. Un carro, con el micro-ADV acoplado en él, era desplazado sobre estos rieles de manera de poder llevar a cabo las mediciones en puntos específicos, sin perturbar mayormente el flujo (Figura 2).



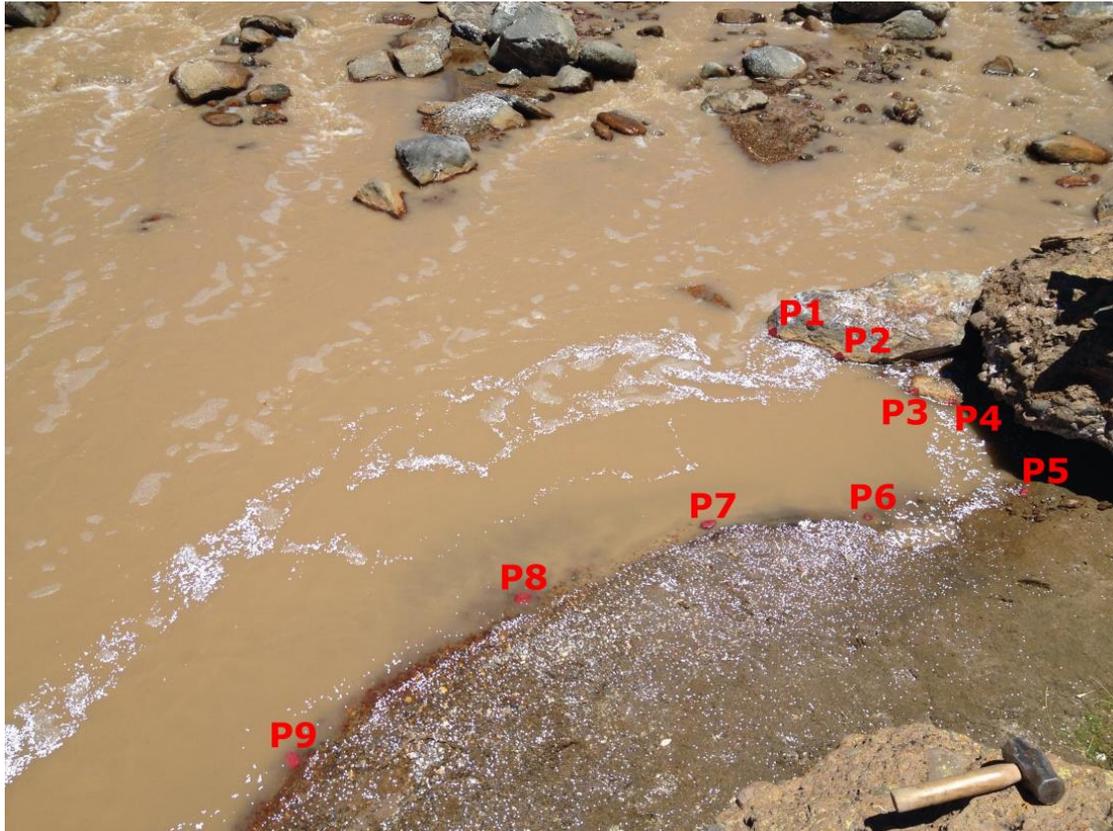
**Figura 2.** Montaje de la configuración de terreno para las mediciones con ADV.

El montaje implementado proporcionaba un sistema local de coordenadas, el cual fue georreferenciado mediante un dispositivo DGPS (Differential Global Positioning System), de manera de asegurar la concordancia y homología espacial con el resto de las técnicas de terreno utilizadas.

## LSPIV

LSPIV es una técnica basada en el análisis estadístico de imágenes consecutivas, a través del cual se pretende determinar el campo de velocidades instantáneo de la superficie libre mediante la identificación de patrones formados por las partículas (típicamente pedazos de papel) que son movilizadas por el flujo. El desplazamiento de estos patrones es calculado mediante el cómputo

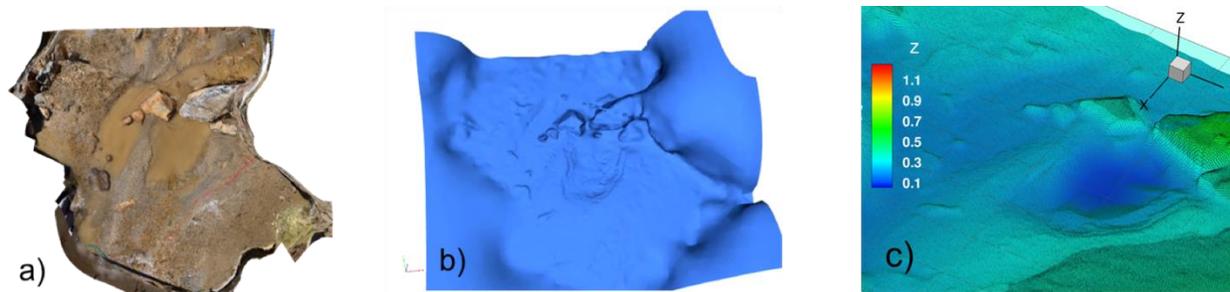
de la correlación cruzada entre pares de imágenes ortorrectificadas separadas por un intervalo de tiempo conocido. La ortorrectificación fue llevada a cabo mediante la medición con DGPS de 9 puntos de referencia (Figura 3). Este proceso permite referenciar espacialmente cada pixel de las imágenes. El cálculo de la velocidad en cada pixel de la grilla definida a partir de las imágenes es filtrado por un valor umbral de correlación, bajo el cual se desecha el valor calculado en el cómputo del campo de velocidades instantáneo entre dos pares de fotos.



**Figura 3.** Puntos de referencia para la ortorrectificación de las imágenes para el análisis mediante LSPIV.

### **Levantamiento tridimensional de la batimetría en la cavidad**

Un modelo digital de elevación (DEM por sus siglas en inglés), fue generado a partir de una técnica de fotogrametría digital llamado SfM (Structure from Motion) (Micheletti, Chandler, & Lane, 2015). El software utilizado para el procesamiento de las imágenes fue Photoscan (Agisoft, 2008). El resultado de la reconstrucción de la batimetría a partir de este procedimiento se muestra en la Figura 4.



**Figura 4.** Procesamiento de la batimetría del lecho en la zona de la cavidad. En a) se muestra el lecho de la zona tras haber sido secado para realizar la toma de fotografías. En b) se muestra el resultado crudo obtenido tras procesar las imágenes, mientras que en c), se muestra el resultado filtrado y resamplado a resolución de 1cm para ser utilizado para la malla del modelo numérico.

El modelo de elevación de terreno procesado fue filtrado para obtener una grilla de resolución de aproximadamente 1 cm. Esta fue utilizada posteriormente en la construcción de una malla estructurada para el modelo numérico de las simulaciones tridimensionales del flujo.

### Modelación numérica del flujo turbulento en la cavidad

El modelo utilizado resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes para flujo incompresible en 3D con un esquema de volúmenes finitos integrado con un método de compresibilidad artificial para la presión (Escalaiza & Sotiropoulos, 2009). Por su parte el modelo de turbulencia utilizado corresponde a un modelo híbrido DES (Spalart et al., 1997; Spalart, 2009). A estas ecuaciones, se le acopla un modelo que resuelve la ecuación de advección-difusión para escalares pasivos para la representación del transporte de masa en el dominio computacional.

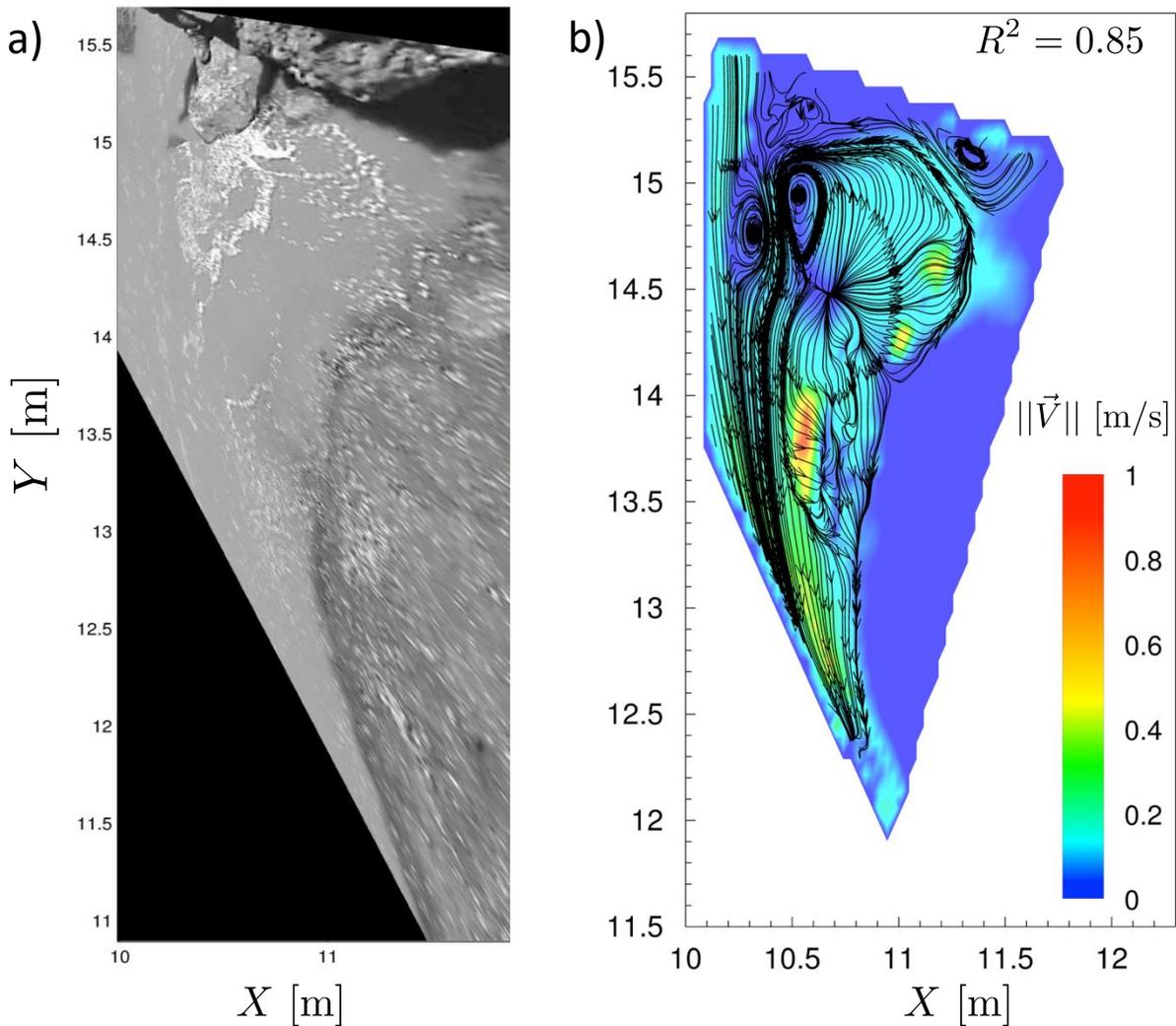
A partir de la información levantada en terreno fue posible construir simulaciones numéricas tridimensionales del flujo. Utilizando la batimetría obtenida mediante fotogrametría se generó una malla estructurada de aproximadamente 6.5 millones de nodos. Combinando la información batimétrica con mediciones de caudal y velocidad media en el canal principal ( $U_b$ ), se determinó el número de Reynolds para las simulaciones, el cual correspondió a 45800.

## 3. RESULTADOS

### Caracterización del flujo medio e instantáneo a partir de las mediciones

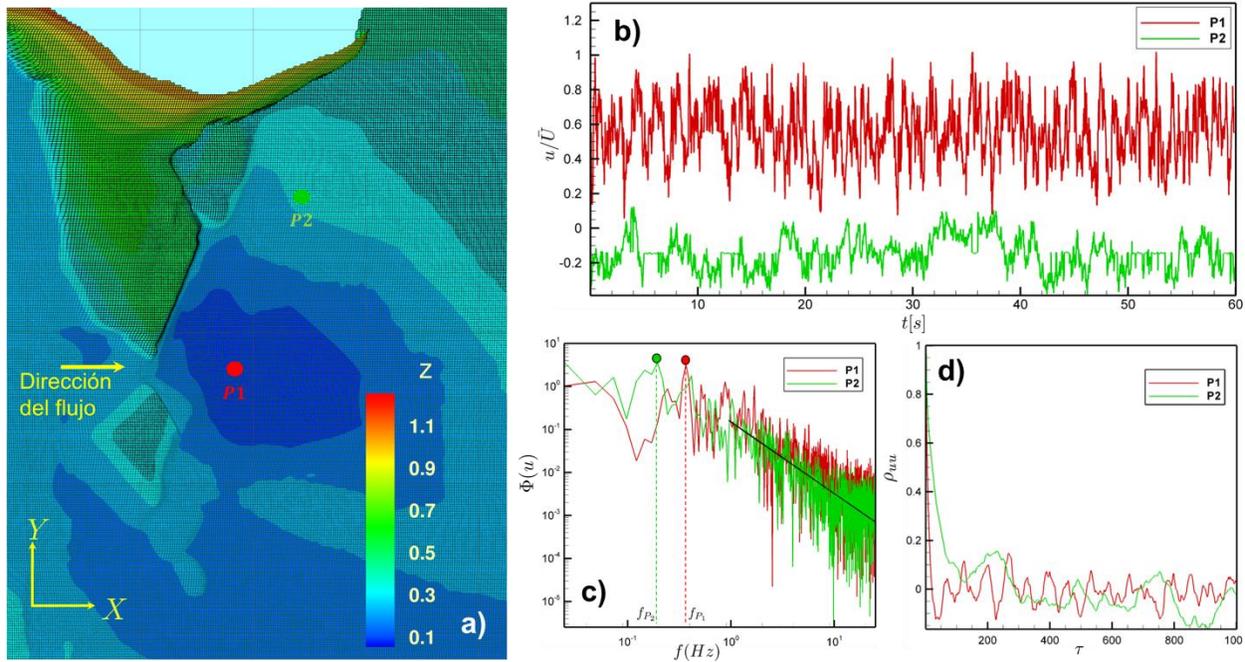
Los campos de velocidades instantáneos, filtrados bajo un umbral de correlación de 0.85, fueron promediados en el tiempo para obtener el campo de velocidades promedio. A partir de este y mediante la visualización de las líneas de corriente es posible la identificación de algunas de las estructuras principales del flujo. En la Figura 5, es posible observar la presencia de una gran zona de recirculación en la cavidad, acompañada de celdas de recirculación secundarias de menor tamaño. La presencia de estas estructuras es de gran interés desde el punto de vista del transporte

de masa, ya que tienen gran influencia en los tiempos de residencia de contaminantes en la cavidad (Weitbrecht & Jirka, 2001; Weitbrecht et al., 2002).



**Figura 5.** Analisis del flujo mediante LSPIV. En la figura a) se puede observar la imagen ortorrectificada de la zona de estudio. En la figura b) se muestran los resultados del campo de velocidades superficial coloreadas por la norma del vector de velocidad promedio.

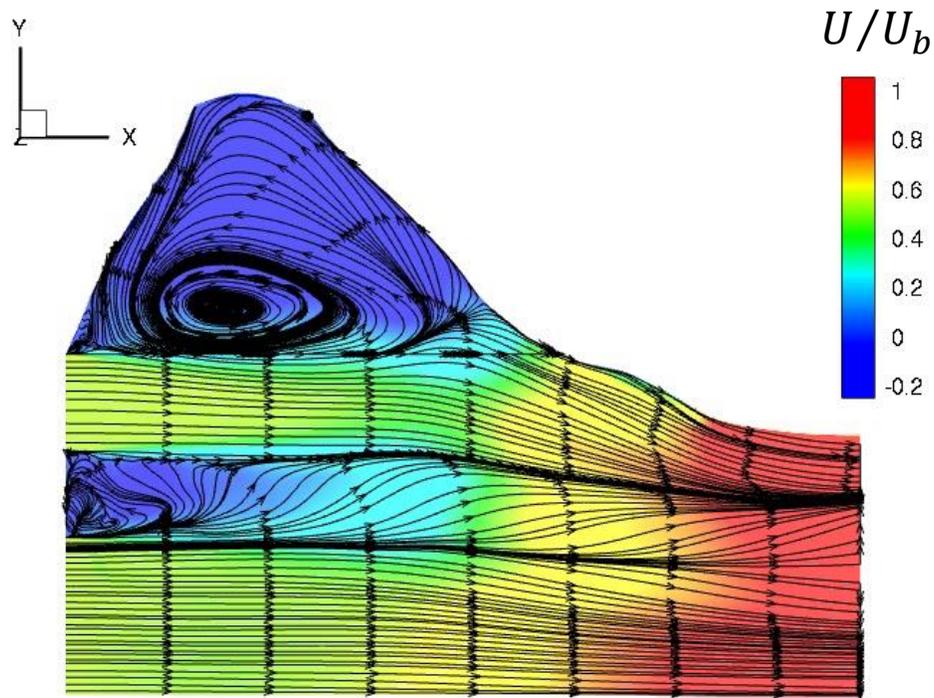
Por su parte, en la figura 6 es posible observar la componente de velocidad en la dirección X en dos puntos distintos de la cavidad. El punto P1 está ubicado en la capa de corte a la salida de la zona de angostamiento, mientras que el punto P2 se encuentra dentro de la cavidad, en la cercanía del perímetro mojado. En el punto P1, la velocidad es predominantemente positiva, con fluctuaciones de alta frecuencia, mientras que el punto P2 presenta velocidades mayoritariamente negativas, de menor magnitud y fluctuaciones de frecuencias notoriamente más bajas. Este comportamiento se puede observar de forma más detallada en los espectros y funciones de autocorrelaciones de estas series de velocidad. Estas funciones muestran que las velocidades en estos puntos están fuertemente influenciadas por procesos periódicos a diferentes frecuencias.



**Figura 6.** Vista en planta de la cavidad. En esta figura podemos ver una representación esquemática de la cavidad y dos puntos representativos donde se midió la velocidad con ADV. En la figura b) se muestra las series de tiempo de velocidad  $u$  para los puntos P1 y P2 señalados en a). En las figuras c) y d), respectivamente, se muestran los espectros y funciones de autocorrelación de estas variables.

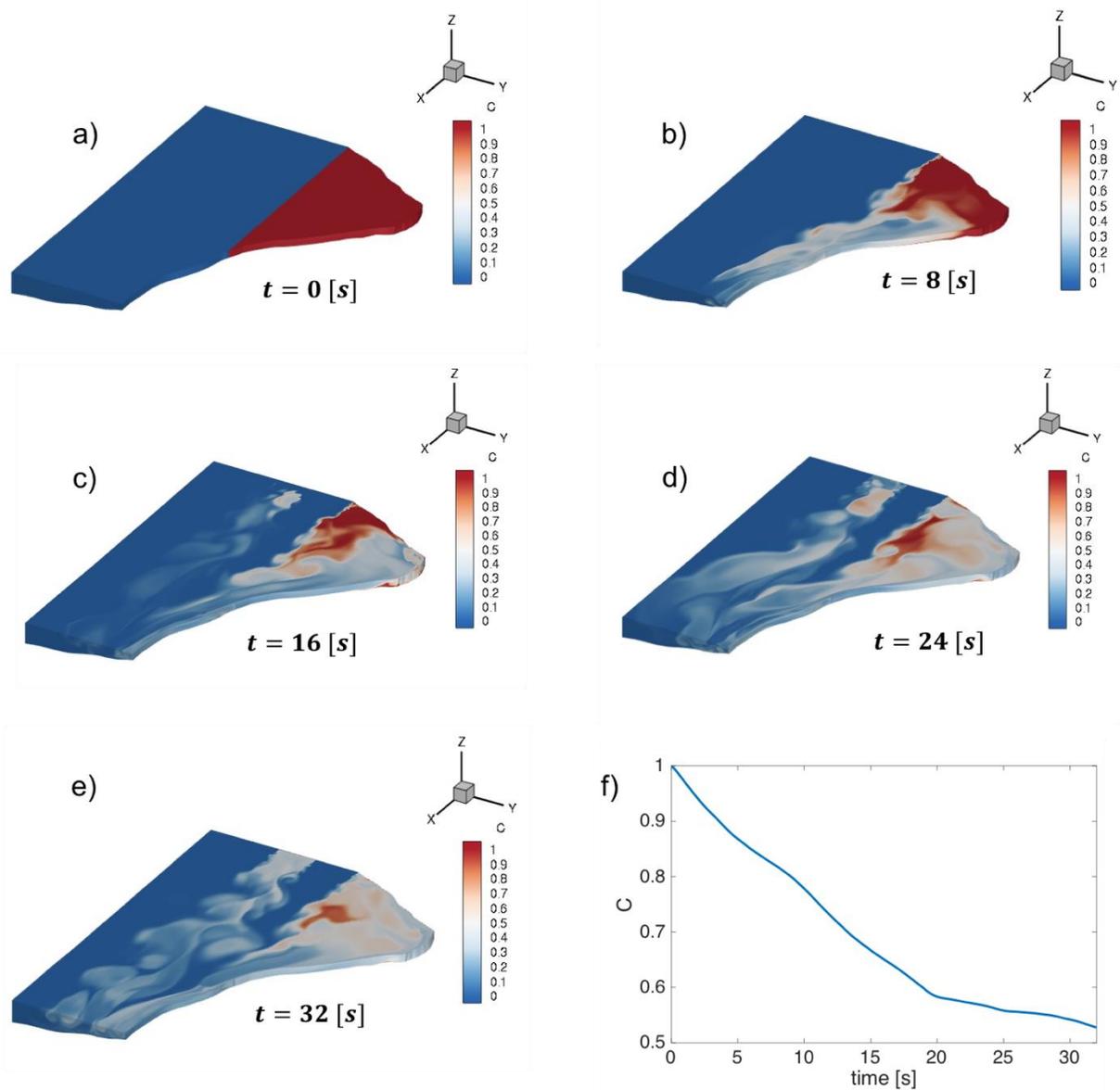
### Resultados preliminares de las simulaciones numéricas

En la Figura 7 se presentan las líneas de corriente del flujo medio simuladas por el modelo. Como es posible observar, el modelo captura las estructuras principales del flujo, mostrando una buena representación de las estructuras reportadas por la técnica LSPIV. Además es posible observar la distribución espacial de la magnitud del campo de velocidades, donde se puede apreciar claramente magnitudes significativamente menores en la cavidad comparado con el flujo principal.



**Figura 7.** Vista en planta del flujo medio simulado en la cavidad.  $U_b$  corresponde a la velocidad promedio en el canal principal

La dinámica del transporte de masa se puede apreciar en la Figura 8. El caso simulado corresponde a un escenario idealizado en el que la cavidad parte llena de contaminante ( $C=1$ ) y posteriormente, este es transportado por el flujo, cambiando la magnitud y la distribución de la concentración en la cavidad y el canal principal en el tiempo. En la Figura 8 se puede observar como las estructuras coherentes de la capa de corte son las principales responsables de remover y transportar el contaminante desde la cavidad. Por su parte, se puede apreciar claramente, como la celda de recirculación principal observada en las estructuras del flujo medio, es la principal responsable de retener contaminante en la cavidad. Finalmente en la Figura 8.f, se puede observar la evolución temporal de la concentración promedio en la cavidad. Esta demuestra un comportamiento cuasi-exponencial del decaimiento de la concentración con una disminución de la pendiente de la curva aproximadamente a los 20 s, el cual representa el momento en el que la mayoría del contaminante externo a la zona de influencia de la celda de recirculación principal ha sido transportado y el que queda se transporta a una tasa mucho menor.



**Figura 8.** Evolución de la concentración en la cavidad y el flujo principal para distintos instantes de tiempo. En f) se puede ver la evolución de la concentración promedio en la cavidad a lo largo del tiempo.

#### 4. CONCLUSIONES

Mediante la combinación de diferentes técnicas de medición, es posible obtener información detallada acerca de las características hidrodinámicas del flujo en condiciones naturales. De esta forma, el levantamiento topográfico mediante fotogrametría provee información espacial a alta resolución de la batimetría del lecho en la zona, siendo de gran utilidad para las otras técnicas de medición y sobre todo para la construcción de simulaciones numéricas tridimensionales del flujo. Por su parte las técnicas de medición con ADV y LSPIV proveen información valiosa sobre las distintas escalas, tanto espaciales como temporales, que gobiernan la dinámica del flujo, siendo el

complemento de éstas una ventaja sustantiva sobre la utilización de cada una por separado. En particular, la técnica LSPIV provee la información del flujo medio necesaria para identificar las estructuras coherentes de mayor escala, las cuales gobiernan los procesos de transporte más importante en la cavidad. A su vez, las mediciones con ADV proporciona información sobre el flujo instantáneo (a escala de la turbulencia), el cual permite conocer las escalas temporales que gobiernan la dinámica del flujo.

Finalmente, las simulaciones numéricas permiten integrar ambos tipos de escalas (espaciales y temporales) a distintas resoluciones, lo cual provee la información necesaria para un análisis mucho más detallado de la dinámica del flujo en la cavidad. En particular, las simulaciones permiten conocer la distribución espacial y la evolución de las estructuras coherentes que gobiernan los principales procesos de transporte de masa y cantidad de movimiento entre el flujo principal y la cavidad.

## **AGRADECIMIENTOS**

Se agradece al proyecto de investigación FONDECYT 1130940 y al National Laboratory for High Performance Computing (NLHPC) por los recursos computacionales otorgados para llevar a cabo las simulaciones.

## **REFERENCIAS**

Agisoft. (2008). Tutorial (Beginner level): Orthomosaic and DEM Generation with Agisoft PhotoScan Pro 1.2 (without Ground Control Points), 2.

Argerich, A., E. Martí, F. Sabater, R. Haggerty, and M. Ribot (2011), Influence of transient storage on stream nutrient uptake based on substrata manipulation, *Aquat. Sci.*, 73, 365–376, doi: 10.0007/s00027-011-0184-9.

Bencala, K. E., V. C. Kennedy, G. W. Zellweger, A. P. Jackman, and R. J. Avanzino (1984), Interactions of solutes and streambed sediments: 1. An experiment analysis of cation and anion transport in a mountain stream, *Water Resour. Res.*, 20, 1797–1803.

Benner, S. G., E. W. Smart, and J. N. Moore (1995), Metal behavior during surface-groundwater interaction, Silver Bow Creek, Montana, *Environ. Sci. Technol.*, 29, 1789–1795.

Cerling, T. E., S. J. Morrison, and R. W. Sobocinski (1990), Sediment-water interaction in a small stream: Adsorption of <sup>137</sup>Cs by bed load sediments, *Water Resour. Res.*, 26, 1165–1176.

Constantinescu, G., A. Sukhodolov, and A. McCoy (2009), Mass Exchange in a shallow channel flow with a series of groynes: LES study and comparison with laboratory and field experiments, *Environ. Fluid Mech.*, 9, 587-615, doi: 10.1007/s10652-009-9155-2.

Contreras, M. T., Mullendorff, D., Pastén, P., Pizarro, G. E., Paola, C., & Escauriaza, C. (2015). Potential accumulation of contaminated sediments in a reservoir of a high-Andean watershed:

Morphodynamic connections with geochemical processes. *Water Resources Research*, 51(5), 3181–3192. <http://doi.org/10.1002/2014WR016130>

D'Angelo, D. J., J. R. Webster, S. V. Gregory, and J. L. Meyer (1993), Transient storage in Appalachian and Cascade mountain streams as related to hydraulic characteristics, *J. N. Am. Benthol. Soc.*, 12(3), 223–235.

Engelhardt, C., A. Krüger, A. Sukhodolov, and A. Nicklisch (2004), A study of phytoplankton spatial distributions, flow structure and characteristics of mixing in a river reach with groynes: *J. Plankton Res.*, 26(11), 1351–1366.

Ensign, S. H., and M. W. Doyle (2005), In-channel transient storage and associated nutrient retention: Evidence from experimental manipulations, *Limnol. Oceanogr.*, 50(6), 1740–1751.

Escauriaza, C., & Sotiropoulos, F. (2010). Reynolds Number Effects on the Coherent Dynamics of the Turbulent Horseshoe. *Flow, Turbulence and Combustion*, 86(2), 231–262. <http://doi.org/10.1007/s10494-010-9315-y>

Guerra, P., Gonzalez, C., Escauriaza, C., Pizarro, G., & Pasten, P. (2016). Incomplete Mixing in the Fate and Transport of Arsenic at a River Affected by Acid Drainage. *Water, Air, and Soil Pollution*, 227(3). <http://doi.org/10.1007/s11270-016-2767-5>

Gücker, B., and I. G. Boëchat (2004), Stream morphology controls ammonium retention in tropical headwaters, *Ecology*, 5(10), 2818–2827.

Jackson, T. R., Haggerty, R., Apte, S. V., & O'Connor, B. L. (2013). A mean residence time relationship for lateral cavities in gravel-bed rivers and streams: Incorporation streambed roughness and cavity shape. *Water Resources Research*, 3642-3650.

Jackson, T. R., Haggerty, R., & Apte, S. V. (2013). A fluid-mechanics based classification scheme for surface transient storage in riverine environments: Quantitatively separating surface from hyporheic transient storage. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(7), 2747–2779. <http://doi.org/10.5194/hess-17-2747-2013>

Micheletti, N., Chandler, J. H., & Lane, S. N. (2015). Structure from motion (SFM) photogrammetry.

Mulholland, P. J., E. R. Marzolf, J. R. Webster, D. R. Hart, and S. P. Hendricks (1997), Evidence that hyporheic zones increase heterotrophic metabolism and phosphorus uptake in forest streams, *Limnol. Oceanogr.*, 42(3), 443–451.

Newbold, J. D., J. W. Elwood, R. V. O'Neill, and A. L. Sheldon (1983), Phosphorus dynamics in a woodland stream ecosystem: A study of nutrient spiraling, *Ecology*, 64, 1249–1265.

Spalart, P. R., Jou, W. H., Strelets, M., & Allmaras, S. R. (1997). Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach. *Advances in DNS/LES*, 1, 4-8.

Spalart, P. R. (2009). Detached-eddy simulation. *Annual review of fluid mechanics*, 41, 181-202.

Squillace, P. J., E. M. Thurman, and E. T. Furlong (1993), Groundwater as a nonpoint source of atrazine and deethylatrazine in a river during base flow conditions, *Water Resour. Res.*, 29(6), 1719–1729.

Triska, F. J., V. C. Kennedy, R. J. Avanzino, G. W. Zellweger, and K. E. Bencala (1989), Retention and transport of nutrients in a third-order stream in Northwestern California: Hyporheic processes, *Ecology*, 70, 1893–1905.

Valett, H. M., S. G. Fisher, N. B. Grimm, and P. Camill (1994), Vertical hydrologic exchange and ecological stability of a desert stream ecosystem, *Ecology*, 75(2), 548–560.

Weitbrecht, V., & Jirka, G. H. (2001). Flow patterns and exchange processes in dead zones of rivers. *Proceedings of the IAHR Congress 2001, Beijing*

Weitbrecht, V., Kühn, G., & Jirka, G. H. (2002). Large scale PIV-measurements at the surface of shallow water flows. *Flow Measurement and Instrumentation*, 13(5–6), 237–245. [http://doi.org/10.1016/S0955-5986\(02\)00059-6](http://doi.org/10.1016/S0955-5986(02)00059-6)