

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Tesis Doctoral



Desarrollo e implementación en gran escala de
técnicas de velocimetría por imágenes para
caracterizar flujos de agua con superficie libre.

Autor: MSc. Ing. Antoine Patalano

Director: Dr. Ing. Carlos Marcelo García

Córdoba, Marzo 2017

Desarrollo e implementación en gran
escala de técnicas de velocimetría por
imágenes para caracterizar flujos de agua
con superficie libre.

POR

MSc. Ing. Antoine Patalano

Dr. Ing. Carlos Marcelo García
Director

COMISIÓN ASESORA

Dr. Ing. Carlos Marcelo García

Dr. Ing. Andrés Rodríguez

Dr. Ing. Tobias Bleninger

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

Córdoba, Argentina
Marzo de 2017



UNC

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA

Facultad de Cs. Exactas, Físicas y Naturales

ACTA DE EXAMENES

Libro: 00001

Acta: 03796

Hoja 01/01

LLAMADO: 1

16/03/2017


CATEDRA - MESA:

DI002 TESIS DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA

NUMERO	APELLIDO Y NOMBRE	DOCUMENTO	INGRESO	COND.	NOTA	FIRMA
05243	PATALANO, Antoine	Pas: 07AB05243	2011	T	APROBADO	

SCAVUZZO, Carlos - RICCARDI, Gerardo - ARTANA, Guillermo - PREIDIKMAN, Sergio - TAMAGNO, José -

Observaciones:



C. M. SCAVUZZO

Córdoba, ____/____/____.

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

1 - 7 - 7
 Inscriptos Ausentes Examinados Reprobados Aprobados
 09/03/2017 12:30:28

*A la memoria de Denise (1915-2011) y
Marie-Thérèse (1922-2011)*

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis es el fruto de muchas pequeñas casualidades de la vida que ocurrieron durante y después de un viaje iniciático a través de las Américas. Si bien aparece solamente un nombre sobre la tapa, es realmente la tesis de todas las personas que estoy por mencionar.

Agradezco a mis padres, Philippe y Françoise por los valores que me transmitieron; por la educación que me dieron; por la infancia feliz que tuve con mis hermanos Solenn, Florence y Julien; y a pesar del océano que nos separa les agradezco por estar siempre a mi lado. Simplemente, Merci !

Yanina sos sin duda el origen de esta aventura. Te quiero agradecer por ser mi compañera de vida; por la complicidad cotidiana que tenemos; por tu amor que me alentó durante los momentos más difíciles; por tus atenciones; y por seguir haciéndome soñar. Te admiro y te amo. Gracias a tus padres Mario y María por aceptarme en su familia.

Muchas gracias Marce por dirigir esta tesis; por haber confiado en mí; por la oportunidad que me has dado; por tu apoyo y tus generosos consejos; y sobre todo por los asados del fin de año! Espero poder seguir investigando con vos!

Gracias Andrés por haberme abierto las puertas del laboratorio cuando era todavía un mochilero sin beca. Siempre me acordare de ese día que nos presentó el Ing. Oscar Sartori y que empezaste a garabatear el tema de mi tesis sobre la mitad de un sobre en la esquina de una mesa.

Quisiera agradecer a todos los miembros del team LH-CETA (los jóvenes y los menos jóvenes) con quienes aprendí muchísimo durante los años compartidos. Especialmente a mis amigos y excelentes personas Horacio, Erica, Paolo, Leticia, Alejo, Matías y a los que conocí por ahí, Chelo, Santi y Silvia. Gracias por todos los momentos pasados juntos, gracias por el aguante, gracias por tantas risas. Es un orgullo haber iniciado el ritual semanal de los viernes cerveceros con ustedes!

Agradezco a mis compañeros uruguayos queridos que me recibieron de la mejor forma tres veces durante el doctorado en el IMFIA y especialmente a Francisco, Christian, Fede, Guille, Memi, Fio, Magdalena y Rodrigo. Son un grupo de excelencia formado de excelentes personas.

Finalmente, agradezco profundamente a Kevin y Frank de la oficina de USGS de Urbana por la confianza que nos dieron como grupo de trabajo y por las invitaciones a colaborar con ellos en los Estados Unidos. Aprovecho para agradecer todo el grupo de trabajo de allí que es siempre muy disponible.

Las técnicas de velocimetría por imágenes han sido ampliamente utilizadas en hidráulica durante más de 30 años en experimentos de laboratorio. Esta tesis presenta el desarrollo y la implementación en gran escala de las técnicas de velocimetría por imágenes disponibles en el estado del arte para caracterizar flujos de agua con superficie libre durante condiciones hidrológicas extremas (crecidas y estiaje). En esta tesis se denominan a estas técnicas Velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala (LSPIV) y Velocimetría por Seguimiento de Partículas a Gran Escala (LSPTV). La primera trabaja en un marco de referencia Euleriano, es decir que se calcula el desplazamiento medio de un “patrón” o “dibujo” dentro de ventanas de interrogaciones de una imagen a la siguiente; La segunda trabaja en un marco de referencia Lagrangiano y procesa la posición y rastreo de los centroides de cada partícula visible. Las técnicas de velocimetría por imágenes aplicadas en laboratorio y las técnicas LSPIV/LSPTV difieren en las complejidades asociadas a mediciones de campo a gran escala, tales como iluminación variable, y la accesibilidad limitada a vistas no-ortogonales de la cámara. Las vistas de cámara no-ortogonales requieren una rectificación geométrica precisa de las imágenes o resultados de velocidad para superar las apreciables distorsiones producidas por el ángulo de visión de la cámara. En primer lugar, en esta tesis se desarrollan las herramientas computacionales necesarias para la implementación a gran escala de LSPIV y LSPTV. Se presentan aplicaciones de las herramientas desarrolladas en ríos de diferentes tamaños en condiciones de extremos hidrológicos (crecidas y estiaje). En cada aplicación se valida la metodología desarrollada en esta tesis con resultados obtenidos con instrumentos usados comúnmente en hidrometría. Sintetizando la experiencia adquirida se presenta una guía metodológica para implementar LSPIV y LSPTV la cual fue elaborada en conjunto con la oficina de Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y la oficina de Servicio de Canadá (WSC). Además, se presentan tres usos innovadores de la metodología con el uso de Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) en un río, y con cámaras fijas en la rápida de descarga de un vertedero y para la cuantificación de la estabilidad de una persona en crecidas urbanas. Finalmente, el análisis se extiende a la realización de un proyecto de ciencia ciudadana que consiste en el análisis de material digital proviniendo de colaboración abierta distribuida. Se presentan las diferentes experiencias de 3 grupos de investigación en Argentina, Francia y Nueva Zelanda con este tipo de proyecto colaborativo para la caracterización posteriori de eventos hidrológicos. Los resultados obtenidos en el presente trabajo brindan un aporte frente a un requerimiento de la comunidad científica de investigación adicional para llegar a una mejor comprensión de los ríos en condiciones extremas.

ABSTRACT

The image based velocimetry techniques have been used extensively in hydraulic for over 30 years in laboratory experiments. This thesis presents the development and the implementation of the state of the art image velocimetry techniques to Large Scale in order to characterize water flows with free surface during extreme hydrological events. In this thesis, the mentioned techniques are denominated as Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) and Large Scale Particle Tracking Velocimetry (LSPTV). The first one works in an Eulerian frame of reference, meaning that it calculates the mean displacement of a "pattern" or "drawing" inside interrogation windows from an image to the next one; the second one works in Lagrangian frame of reference and processes the position and the tracking of the centroids of every single visible particles. The image velocimetry techniques applied in Laboratory and the LSPIV/LSPTV techniques differ in the complexities associated to Large Scale field measurements, like illumination variables, and the limited accessibility of non-orthogonal camera views. The non-orthogonal views of the camera requires a precise geometric rectification of the images or velocity results in order to overcome the appreciable distortions produced by the camera's viewing angle. In first place, in this thesis the necessary computational tools are developed for the Large Scale implementation of LSPIV and LSPTV. Applications of the developed tools are presented in rivers of different sizes in different conditions of extreme hydrological (flood and shallow water). In each application the developed methodology is validated with results obtained with instruments that are commonly used in hydrometry. Synthesizing the acquired experience, a guide is presented to implement LSPIV and LSPTV which was prepared in conjunction with the United States Geological Service (USGS) and Water Service Canada (WSC) office. In addition, innovative uses of the methodology will be presented with the utilization of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) in river, and with fixed cameras in a dam spillways and for the quantification of a person's stability during urban floods. Finally, the analysis is extended to the realization of a citizen science project that consists in the analysis of digital materials of from crowd-sourced data. The experiences of 3 research groups in Argentina, France and New Zealand with this kind of collaborative project for the later characterization of hydrological events is presented. The results obtained in the following work offer an additional contribution in response to a request of the scientific research community in order to reach a better understanding of the rivers in extreme conditions.

Les techniques de vélocimétrie par images ont été largement utilisées dans l'hydraulique depuis plus de 30 ans dans des expériences de laboratoire. Cette thèse présente le développement et la mise en œuvre à grande échelle des techniques de vélocimétrie par image disponibles dans l'art antérieur pour caractériser les flux d'eau avec leur surface libre dans des conditions hydrologiques extrêmes (inondations et sécheresse). Dans cette thèse, ces techniques sont appelées Particle Image Velocimetry à Grande Echelle (LSPIV) et Particules Tracking Velocimetry à Grande Echelle (LSPTV). La première travail dans un cadre de référence Eulérien, à savoir le déplacement moyen d'un "motif" ou "dessin" est calculé à l'intérieur de fenêtres d'interrogation, d'une image à la suivante; La seconde fonctionne dans un cadre de référence Lagrangien et traite la position et le suivi des centres de chaque particule visible. Les techniques de vélocimétrie par image appliquées en laboratoire et techniques LSPIV/LSPTV diffèrent dans les complexités associées à des mesures sur le terrain à grande échelle, tels que l'éclairage variable et l'accessibilité limitée de prises de vue non-orthogonale de la caméra. Les points de vue de la caméra non-orthogonaux nécessitent une rectification géométrique précise d'images ou de résultats vitesse pour corriger les distorsions visibles causées par l'angle de vue de la caméra. Dans un premier temps, les outils informatiques nécessaires pour mettre en œuvre à grande échelle LSPIV et LSPTV seront présentés. L'application des outils élaborés dans cette thèse seront présentés pour des rivières de différentes tailles dans des conditions hydrologiques extrêmes (inondations et sécheresse). Dans chaque application la méthodologie développée dans cette thèse sera validée avec des résultats obtenus avec les instruments couramment utilisés en hydrométrie. En faisant la synthèse de l'expérience acquise un guide méthodologique pour la mise en œuvre des technique LSPIV et LSPTV sera développé en collaboration avec le bureau de Géophysique des États-Unis (USGS) et le bureau de service des eaux du Canada (WSC). De plus, nous verrons trois utilisations innovantes de la méthodologie avec l'utilisation de véhicules aériens sans pilote (UAV) dans une rivière, de caméras fixes pour l'estimation de débit d'une décharge de barrage et pour quantifier la stabilité de personne lors de d'une crue urbaine. Finalement, l'analyse sera étendue à la réalisation d'un projet de science citoyenne consistant à analyser des données issues de collaboration participative. Nous verrons l'expérience de 3 groupes de recherche en Argentine, en France et en Nouvelle-Zélande ayant expérimenté ce type de projet de collaboration pour la caractérisation à posteriori des événements hydrologiques extrêmes. Les résultats obtenus dans cette étude fournissent une contribution face à une exigence de la communauté scientifique de poursuivre les recherches sur une meilleure compréhension des cours d'eau dans des conditions extrêmes.

ÍNDICE

I. Marco Referencial.....	1
II. Implementación a gran escala de las técnicas de velocimetría por imágenes	29
III. Velocimetría por Seguimiento de Partículas a Gran Escala (LSPTV) para flujos con superficie libre.....	45
IV. Rectificación de resultados de velocimetría por imágenes digitales. RIVeR: un paquete computacional simple y fácil de usar para las técnicas velocimetría por imagen de partículas (PIV) y la velocimetría por seguimiento de partículas (PTV).	57
V. Determinación experimental de caudales en ríos de montaña con LSPTV durante periodos de estiaje (mínimos hidrológicos)	73
VI. Determinación experimental de caudales en ríos de montaña con LSPIV durante periodos de crecidas (máximos hidrológicos).....	87
VII. Determinación experimental de caudales en grandes ríos con LSPIV durante periodos de crecidas (máximos hidrológicos)	101
VIII. Guía Metodológica recomendada para implementar las técnicas de velocimetría por imágenes digitales a gran escala	111
IX. Evaluación de usos innovadores de las técnicas de Velocimetría por imágenes digitales.....	119
X. Proyecto de Ciencia Ciudadana para estimar caudales escurridos durante inundaciones urbanas implementando LSPIV en videos obtenidos de colaboración ciudadana	135
XI. Conclusiones y Trabajo Futuro	151
Referencias Bibliográficas	171
Apéndice A Calibración de la cámara.....	181
Apéndice B Corrección del movimiento	185
Apéndice C Publicaciones	189

CAPÍTULO I
MARCO REFERENCIAL

I.1 INTRODUCCIÓN

IMPORTANCIA DE LA CUANTIFICACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO

Desde el punto de vista humano, el agua tiene un impacto positivo si se la considera como un recurso natural que puede ser utilizado con fines domésticos, industriales, agrícolas, mineros, recreativos, entre otros. Mientras que, también el agua puede tener un impacto negativo si se lo asocia con los fenómenos naturales que pueden convertirse en amenazas hídricas (por ejemplo, inundaciones y/o crecidas repentinas) para seres vivos, suelos, infraestructura, etc. Para el aprovechamiento sustentable del recurso hídrico (problema de regulación de aportes continuos a largo plazo) y para mitigar los efectos de amenazas hídricas (problema de control de eventos extremos) es necesario cuantificar el recurso hídrico para con esa información realizar el diseño sustentable de las medidas estructurales (infraestructura) y medidas no estructurales (por ejemplo medidas de gestión, disposiciones legales y reglamentarias, etc.) requeridas.

El diseño sustentable de estas medidas estructurales y no estructurales se define como el diseño consistente con los principios del desarrollo global sustentable, el cual prevé un desarrollo que satisface las necesidades presentes sin comprometer la capacidad de futuras generaciones de satisfacer sus propias necesidades (World Commission on environment and development, 1987). Un sobredimensionamiento de las medidas genera un impacto innecesario sobre el medio ambiente y es antieconómico, en tanto que si se subestiman estas medidas pueden fallar con resultados catastróficos con un impacto aun mayor para la sociedad y el medio ambiente, tanto por la pérdida de vidas humanas como de bienes públicos y privados. En este marco, el diseño sustentable de las medidas estructurales y no estructurales requiere la definición precisa de las variables hidrológicas de diseño (por ejemplo: caudal).

El diseño hidrológico se define como la evaluación del impacto de los procesos hidrológicos y la estimación de valores de las variables relevantes para modificarlo. La predicción de eventos extremos para diseño constituye un paradigma de este último tipo, puesto que su objeto es la mitigación de los efectos de amenazas hídricas durante desastres naturales. El término desastre hace referencia a un evento o suceso que ocurre, en la mayoría de los casos, en forma repentina e inesperada, causando perjuicios severos a una colectividad, una región o un país, sea por muerte o enfermedad en la población, destrucción o pérdida de sus bienes, desorganización de la estructura socioeconómica y/o daños marcados sobre el ambiente.

La mención de desastres lleva a considerar la idea de riesgo, que admite diferentes acepciones. Para los ingenieros se refiere a una función matemática, dependiente de la probabilidad de ocurrencia de fenómenos peligrosos. En cambio, quienes se dedican a las ciencias naturales (los geomorfólogos, por ejemplo) le asignan un significado más amplio, al interpretarlo como el resultado de relacionar la amenaza que entraña el fenómeno (equivalente al riesgo ingenieril) con la vulnerabilidad de los elementos expuestos (sensibilidad intrínseca a los efectos). Al margen de la cuestión semántica, y aun cuando el interés se reduzca a la evaluación de la amenaza, se utilizará aquí esta última concepción, ya que permite identificar las medidas de mitigación más adecuadas, estructurales (obras de protección e intervención sobre la vulnerabilidad) y no estructurales (planificación, difusión, mapas de riesgo, sistemas de alerta, regulación de uso del suelo, costos preventivos en presupuestos de inversión, entrenamiento para emergencias).

Evaluar la amenaza es pronosticar o predecir la ocurrencia y magnitud del fenómeno, con base en el estudio de su mecanismo generador, el monitoreo del sistema perturbador y/o el registro de eventos en el tiempo. Se pronostica si se asigna al suceso el monto y el tiempo de ocurrencia (o un lapso breve, a causa de la incertidumbre del proceso y/o de su estimación). El pronóstico es un anticipo a corto plazo (basado en interpretación de señales o eventos premonitorios), cuyo objetivo es informar a la población amenazada acerca del acontecimiento o inminencia de un fenómeno peligroso real. Por su parte, una predicción no especifica cuándo se producirá, sino cuál será la magnitud de un evento hipotético crítico, dada su duración y su recurrencia (según la información probabilística de parámetros indicadores), o bien, en el más largo plazo, cuál será el evento máximo probable. La magnitud de las medidas estructurales y no estructurales diseñadas para el aprovechamiento sustentable del recurso hídrico y para mitigar los efectos de amenazas hídricas guarda relación directa con el valor predicho del caudal o el nivel a que estarán expuestas en el futuro.

En la actualidad se utilizan dos opciones metodológicas para PREDECIR las variables de diseño de medidas estructurales y no estructurales para el aprovechamiento sustentable del recurso hídrico y para mitigar los efectos de amenazas hídricas.

Opción 1: Predicción de un evento hipotético de diseño (magnitud y probabilidad de ocurrencia).

Opción 2: Selección de las variables características de un evento hidrológico extremo observado

En ambos casos, la cuantificación experimental de las variables hidrológicas (especialmente el caudal) durante eventos hidrológicos extremos (que incluyan eventos

críticos máximos y mínimos) es fundamental. A continuación se presentan las técnicas y experimentales tradicionales para cuantificar caudales en sistemas fluviales y canales artificiales. En primer lugar se presentan los métodos y técnicas experimentales que no requieren mediciones de velocidad del flujo:

- **Método volumétrico:** El método volumétrico permite una medición directa del caudal de agua escurrido en una sección. Consiste en medir el tiempo necesario para un flujo a llenar un volumen conocido. El material necesario es simple: un recipiente calibrado y un cronómetro. Este método es simple, rápido y poco costoso pero la metodología experimental es aplicable para caudales bajos o arroyos de pequeñas secciones. Además, en la mayoría de los casos la construcción de una estructura es necesaria para facilitar la implementación de esta metodología (Figura I.1).



Figura I.1 Vertedero para la cuantificación del caudal por método volumétrico de un arroyo (Los Gigantes, Córdoba, Argentina, 2016), foto Silvia Navarro

- **Método del trazador (ISO, 1992a):** El método del trazador o método “químico” consiste en inyectar en el curso de agua un trazador de concentración conocida con un caudal conocido. El caudal del curso se calcula aplicando el principio de conservación de masa. Se puede inyectar el trazador de manera instantánea o continua. El método es particularmente adaptado a los ríos serranos en los cual el proceso de mezcla es importante y escurre un caudal pequeño. Una de las ventajas de este método es el material muy reducido que se requiere. Cuando

las condiciones de medición son ideales, la precisión obtenida es muy satisfactoria.

- Canaleta Parshall (ISO, 1992b): Ralf Parshall Profesor y alumno destacado de la Universidad Estatal de Colorado, empezó a trabajar en la medición de flujo en 1915. Seis años más tarde presentó una patente para su "Canal de flujo de Parshall", un dispositivo de medición basado en el efecto Venturi. El canal de Parshall es una estructura hidráulica que permite obtener la cantidad el caudal Q que pasa por una sección de un canal a partir de la medición del nivel de agua h arriba de la estructura. La precisión que se puede esperar de este método depende de la calidad de fabricación de la estructura. La canaleta Parshal es particularmente adecuada para canales de irrigación. Debido a las altas velocidades de flujo que genera su estructura, los sedimentos son transportados facialmente a través de la canaleta. Existen diferentes tamaños de canaletas y pueden ser fabricado en de acero inoxidable, de fibra de vidrio o embebido de hormigón Figura I.2.

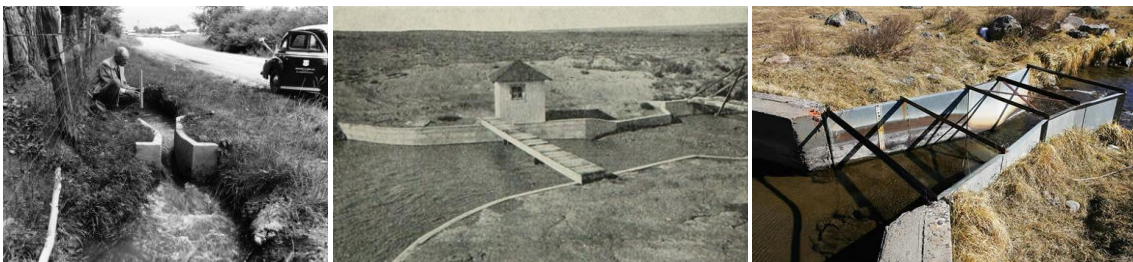


Figura I.2. A la izquierda: Ralph Parshall midiendo en su canaleta (Copyright/1946 CSU/Photography andDigital Imaging). En el medio: Canaleta Parshall de hormigón de 9.1 m en el Canal de Colorado (Parshall, 1932). A la derecha: una canaleta Parshall de acero inoxidable para riego.

A continuación se describen los métodos y técnicas experimentales de medición de caudal que requieren mediciones de la velocidad de flujo:

- Método del flotador (ISO, 2007): Es el método más simple a aplicar y sobre las bases de este método se basa el desarrollo tecnológico presentado en esta tesis. El flotador utilizado puede ser natural (ramas, troncos, ...) o artificial (botella, ramas, naranjas, etc.). Para su implementación se eligen dos secciones transversales a lo largo de un tramo recto del curso de agua que se quiere aforar. Las dos secciones deben ser suficiente distante para que el tiempo necesario a un flotador para viajar la distancia que separa las dos secciones sea medible con precisión. La metodología recomienda distribuir

un número de flotadores de manera uniforme a lo ancho de la sección transversal agua arriba. La velocidad del flotador es igual a la distancia que separa las dos secciones dividida por el tiempo de viaje del flotador multiplicada por un coeficiente de 0.85 a 0.88 que se utiliza comúnmente para convertir la velocidad superficial del flotador a la velocidad media de la columna de agua. El caudal en cada una de las sub-secciones se calcula multiplicando la velocidad media del flotador por el área de cada una de las subsecciones. El caudal total se obtiene como la suma de los caudales de cada una de las subsecciones. El método del flotador tiene limitaciones y una de las principales fuentes de error del método reside en la interpolación de la geometría del lecho y de las velocidades puntuales medidas. Además el viento en la superficie puede provocar sesgo en las estimaciones de las subsecciones.

- Molinete (ISO, 2007): Es el instrumento que ha sido más utilizado en el siglo anterior. Se utiliza el molinete para una medición puntual de la velocidad en el flujo. El molinete a hélice está calibrado por su fabricante de forma tal que existe una relación conocida entre la velocidad de rotación de la hélice y la velocidad del flujo aunque luego el instrumento debe ser recalibrado periódicamente. El molinete se puede presentar como un micro-molinete para la medición en pequeños ríos o lastrado con un peso de forma hidrodinámica. Se puede medir con el molinete por vadeo, desde un puente, desde un cable carril o desde una embarcación móvil (Figura I.3) aunque su implementación durante crecidas extraordinarias es muy dificultosa. La metodología recomendada prevé la medición de la velocidad del flujo en uno o varios puntos de la columna de agua según la profundidad de la sección y el caudal en cada una de las subsecciones se calcula multiplicando la velocidad media del flujo en la columna de agua por el área de cada una de las subsecciones. Las incertidumbres asociadas las mediciones de caudal se estiman con ecuaciones listadas en la norma ISO (Hersch, 2002).



Figura I.3. De la izquierda a la derecha: medición de caudal con molinete por vadeo, desde un cable carril en el río Anisacate, el río Pilcomayo y respectivamente.

- Velocímetros acústicos Doppler: Desde hace treinta años se han desarrollado los instrumentos acústicos de medición de velocidad como el Velocímetro Acústico Doppler o el Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADV y ADCP, respectivamente por sus siglas en inglés). Los instrumentos acústicos Figura I.4 determinan la velocidad del flujo utilizando el principio Doppler. El principio de funcionamiento consiste en enviar al fluido una onda acústica a una determinada frecuencia f_1 , la cual es luego reflejada por partículas en suspensión en el flujo (sedimentos, plancton, algas, etc.). La onda acústica reflejada es detectada por el instrumento y la misma posee una frecuencia f_2 diferente con la que fue emitida. El ADV permite la medición puntual de 2 o 3 componentes de la velocidad y la metodología para estimar el caudal de una sección es similar a la utilizada con el molinete y se recomienda su uso es para ríos chicos y poco profundos aunque está limitado para medir en condiciones extremas. El ADCP permite obtener las 3 componentes de velocidad en toda la columna de agua además de la batimetría; el caudal de una sección se obtiene moviendo el instrumento a lo largo de una sección. El rango de aplicación de los ADCPs va de los ríos relativamente pequeños (suficientes profundos para la inmersión y el uso del instrumento con profundidades mayores a 0.30m para los perfiladores diseñados para aguas poco profundas) a ríos de gran profundidad (profundidades mayores a 50m).

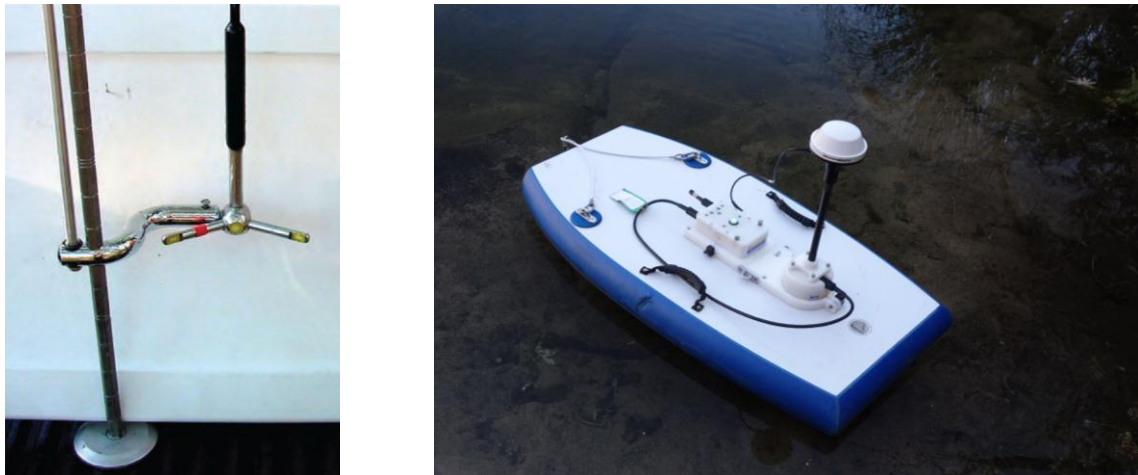


Figura I.4. ADV *flowtracker* de Sontek®(izquierda), ADCP S5 de Sontek® (derecha).

Finalmente, con los caudales determinados experimentalmente con algunos de los métodos presentados previamente, se puede elaborar una herramienta que permitirá realizar estimaciones de caudal a partir del relevamiento de una variable más sencilla de relvar: el nivel de superficie libre. Para ello se debe seleccionar un tramo de río o canal en el cual permanecen constantes sus características hidráulicas, es decir, no debe cambiar el área de la sección transversal para un mismo caudal, ni variar los niveles por abrir y cerrar compuertas aguas abajo. Una vez seleccionado el tramo, se realizan aforos con una de las metodologías o instrumentos mencionados anteriormente, determinado para cada aforo el tirante o profundidad del agua y el caudal total escurrido. Los aforos deben realizarse en el rango de caudales de operación del río o del canal y en cantidad suficiente para minimizar el error del muestreo. Con los resultados de los aforos es posible obtener una relación entre la altura de superficie libre y el caudal Figura I.5, mediante una ecuación empírica del tipo:

$$Q = a(H - H_{Q0})^b = a\Delta H^b$$

Donde a y b son constantes de calibración, H es el nivel o altura de superficie libre respecto a un nivel de referencia y H_{Q0} es un parámetro que representa la altura de superficie libre cuando no hay escurrimiento (caudal nulo). El parámetro H_{Q0} es hipotético y no puede ser medido in situ en cursos fluviales (donde la batimetría del lecho es irregular), pero si puede ser relevado en estructuras de control como vertederos. Generalmente se determina el parámetro H_{Q0} de forma tal que represente un comportamiento hidráulico adecuado, con exponentes del orden de $5/3$ para los caudales relevados en las diferentes secciones de cauces de un sistema fluvial y del orden de $3/2$ para las estructuras de control (vertederos).

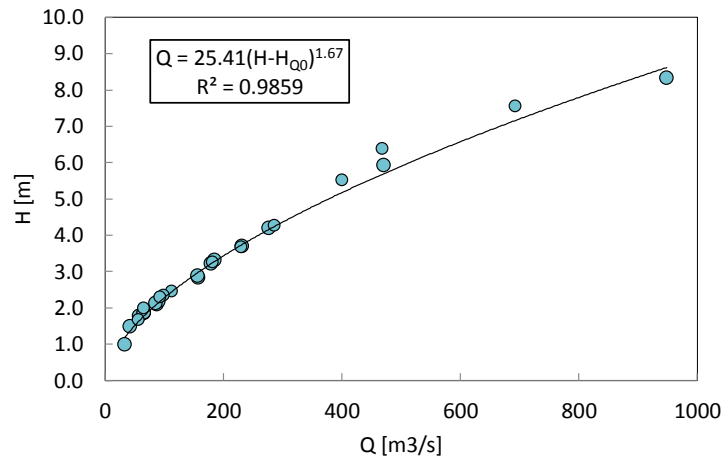


Figura I.5. Datos de altura de superficie libre y de caudal escurrido de la estación de aforo Cruz Alta del Rio Carcarañá.

MOTIVACIÓN TECNOLÓGICA

La cuantificación experimental de variables hidrológicas (especialmente el caudal) durante eventos hidrológicos extremos (que incluyan eventos críticos máximos y mínimos) es fundamental para la gestión eficiente de los recursos hídricos o la validación de los modelos hidrológicos. Generalmente las condiciones experimentales existentes durante estos eventos extremos imposibilitan el uso de técnicas y experimentales tradicionales presentadas previamente.

En el caso de eventos hidrológicos máximos, debido a la baja probabilidad de ocurrencia de estos eventos, estos son generalmente muy pocos observados o medidos. Además, en las zonas montañosas como las existentes en la provincia de Córdoba, las cuencas tienen una respuesta rápida a un evento de precipitación y las crecidas son de carácter repentino (Figura I.6) lo que hacen poca probable la caracterización experimental durante los máximos de crecidas por la baja probabilidad de estar presente con instrumentos en el lugar del evento al momento de la crecida. Las crecidas se caracterizan por niveles y velocidades de flujo mucho más altos que en régimen hidrológico normal. En la mayoría de los ríos, una crecida se asocia también a un alto transporte de material sólido en suspensión o arrastrado, y a un transporte de objetos flotantes natural (hojas, ramas, troncos, etc...) u objetos antrópicos pequeños (botella, bolsas de plástico) o grandes (muebles, autos, etc.).



Figura I.6 Río San Antonio en Cuesta Blanca, Córdoba, Argentina. El río normal a la izquierda y crecido a la derecha (6 de enero 1992). Ningún dato ha sido registrado ya que la crecida destruyó las estaciones de medición. Según testigos el nivel del río subió 7 m en algunas secciones en unos 10 minutos.

En este tipo de condiciones de flujo (crecidas), la medición intrusiva de los caudales (con molinete, ADV, ADCP, etc.) es prácticamente imposible ya que las velocidades altas y los objetos flotantes pueden poner en peligro la vida de los operadores y dañar los instrumentos en contacto con el agua. Además, el flujo de los ríos durante estas

crecidas no son estacionarios, por lo que no es posible realizarla con técnicas que requieren promediaciones temporales significativas (molinete, ADCP, etc.).

Ante la ausencia de mediciones de caudales en crecidas, los caudales picos son estimados extrapolando las curvas altura de superficie libre – caudal calibradas para caudales menores, lo cual genera una incertidumbre importante (Figura I.7). Otra alternativa utilizada consiste en estimar los caudales de crecidas con modelización hidráulicas forzando los niveles de agua medidos in-situ en lugares donde la crecida dejó una marca (marcas de sedimentos, ramas y/o escombros dejadas por el río al momento del descenso). Incertidumbres en las determinaciones de pendientes de energía y de los parámetros hidráulicos requeridos generan una incertidumbre significativa e las estimaciones de caudales.

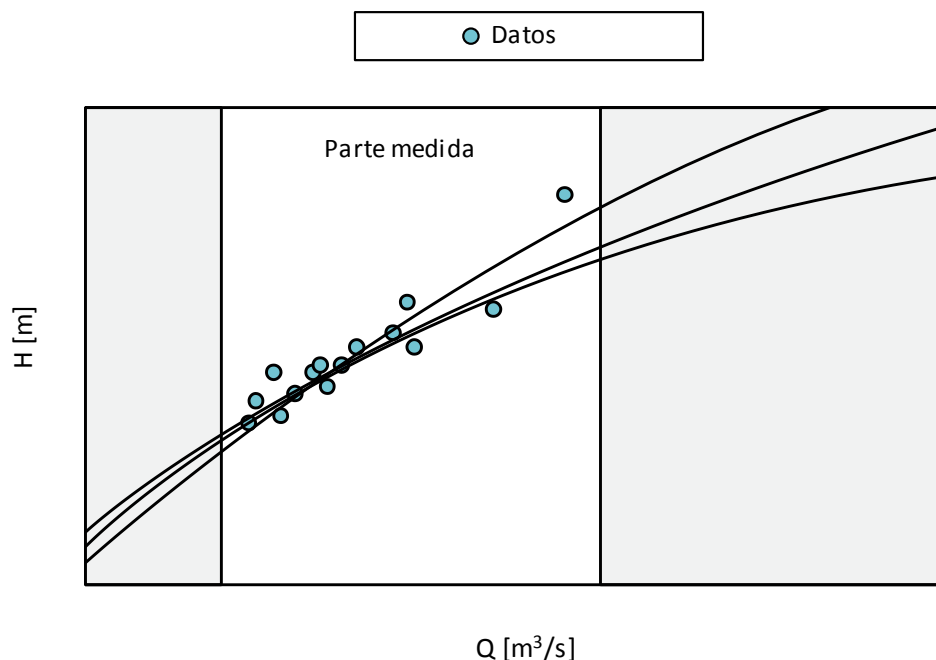


Figura I.7 Ejemplo de extrapolarion de una curva H-Q. Las mediciones (círculos) cubren solamente un rango de caudales. Los caudales extremos son muy distintos por una altura dada según la extrapolación.

Igual que las crecidas, los estiajes son eventos extremos y sus probabilidades de ocurrencia son muy bajas por lo tanto, los eventos son muy poco observados. Los valores de caudal en estiaje no son menos importantes que los de crecida ya que permiten una gestión adecuada de los recursos hídricos en casos de escasez. Los instrumentos intrusivos (molinete o ADCP) no son óptimos para medir en una pequeña lámina de agua ya que es necesario una altura de agua mínima para que los instrumentos estén sumergidos. Al igual que para los extremos máximos, los extremos

Capítulo I

mínimos también se obtiene extrapolando hacia abajo las curvas altura de superficie libre – caudal calibradas con caudales mayores.

En base a lo detallado anteriormente se destaca la necesidad de modernización en las mediciones de extremos hidrológicos ya que no existió una evolución tecnológica importante de la hidrometría desde hace un siglo. De manera provocativa, (Costa et al., 2000) compara la hidrometría y la medicina: mientras los instrumentos médicos tuvieron una importante evolución a lo largo del siglo XX, permitiendo avances científicos considerables, el desarrollo de la hidrometría parece ser más laborioso como se puede ver en la Figura I.8.



Figura I.8 Aforo con molinete desde un cable carril en 1880 a la izquierda, en 1996 a la derecha (imágenes USGS).

I.2 HIPÓTESIS

Las técnicas existentes para la estimación de caudales en ríos son limitadas, especialmente en condiciones extremas (estiaje y crecidas) y se requiere una modernización significativa. Desde los años 1980 se está desarrollando en laboratorio técnicas de medición en hidráulica/aeronáutica basadas en la implementación de velocimetría por imágenes digitales. Estas técnicas permiten caracterizar de manera cuantitativa un flujo cuando este contiene un trazador (sobre la suposición de que el trazador se desplaza de manera idéntica al flujo que lo lleva) y su movimiento es captado en una secuencia de imágenes digitales. Durante 30 años estas técnicas se han perfeccionado y han demostrado ser de una gran utilidad para la resolución de

problemas hidráulicos complejos en laboratorio. Estas técnicas permiten el procesamiento de desplazamientos y velocidades de flujo de manera remota. Las componentes necesarias para su implementación clásica son: una fuente de iluminación, un trazador y un sensor de imagen capaz de capturar el movimiento de los trazadores.

La hipótesis que da origen a esta tesis es que la implementación en gran escala de las técnicas de velocimetría por imágenes (adaptando las componentes y realizando todos los desarrollos requeridos) permitirá caracterizar flujos de agua con superficie libre durante condiciones hidrológicas extremas generando valiosa información para el diseño sustentable de medidas estructurales y no estructurales para el aprovechamiento integral de los recursos hídricos y para mitigar la amenaza hídrica.

I.3 ESTADO DEL ARTE

VELOCIMETRÍA CON IMÁGENES DIGITALES

PIV es el acrónimo inglés de *Particle Image Velocimetry* o Velocimetría por Imágenes de Partículas en castellano. Por más que el término apareció hace 30 años (Adrian, 1984), el principio de funcionamiento viene de lejos porque es simple: se trata de reconocer y cuantificar el desplazamiento de un trazador en un flujo. (Adrian, 2005) dice “It is almost inconceivable that a great intellect like Isaac Newton would not have observed the moving patterns and seen the potential for visualizing and even measuring the surface velocity from the displacements of the particles of algae”. Este principio básico es también al origen de la técnica de Velocimetría por Seguimiento de Partículas PTV (acrónimo inglés de *Particle Tracking Velocimetry*). Sin embargo las técnicas en sus formas modernas significan la medición cuantitativa de la velocidad de un flujo en una grande cantidad de puntos de manera simultánea. Los avances tecnológicos a nivel de grabación de imágenes (cámaras digital, aumento de la resolución de los sensores, frecuencia de imagen), así como en como a nivel de computación (cálculos más rápidos, más memoria) permite el estudio los flujos cada vez más complejos y rápidos (Willert y Gharib 1991; Malik y Dracos 1993; Raffel et al. 2007; Adrian y Westerweel 2011; Nezu y Sanjou 2011; Tien et al. 2013). Las dos técnicas procesan las imágenes de formas distintas, en particular, una característica que distingue a la técnica de PIV es que la velocidad estimada en un punto *no corresponde a una partícula dada* (como la técnica PTV) y es en cambio una medida estadística de

la velocidad en esa región del fluido. Sin embargo comparten el mismo principio de funcionamiento.

En su forma clásica el material necesario para implementar las técnicas de PIV/PTV es simple: una cámara digital, un trazador en el flujo, un dispositivo de emisión láser de alta potencia y una lente semi-cilíndrica. El tipo de láser más usado para la aplicación de la técnica es el láser Nd-YAG (acrónimo del inglés Neodymium-Doped Yttrium Aluminium Garnet), siendo su emisión característica con una longitud de onda de 1064 nanómetros, es decir, emite en el infrarrojo. El haz producido por el dispositivo pasa a través la lente semi-cilíndrica que transforma el haz en un plano que ilumina la zona de medición. El plano de láser sirve de iluminación a la cámara digital que captura la reflexión del láser sobre los trazadores (partículas) dentro del plano iluminado del flujo (Figura I.9). Esta configuración clásica no puede ser aplicada en campo para cuantificar caudales en sistemas fluviales durante condiciones hidrológicas extremas.

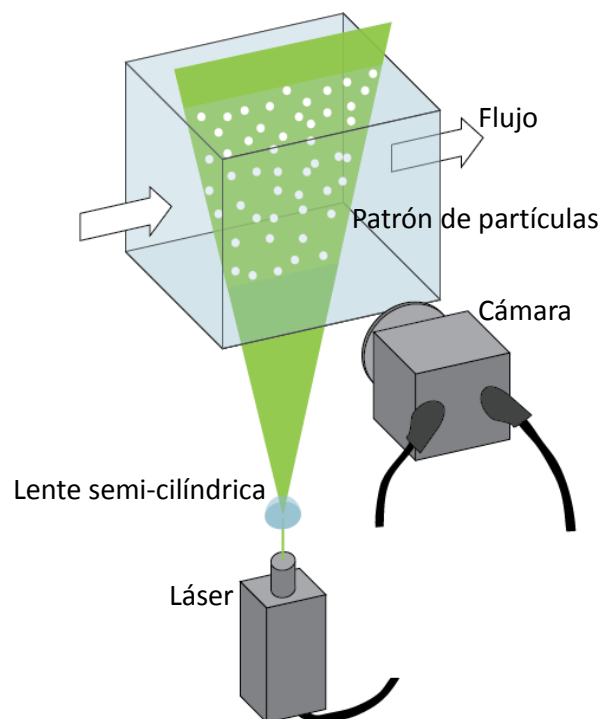


Figura I.9: Principio de funcionamiento de PIV en su forma clásica: el láser ilumina las partículas dentro de un flujo. Una cámara graba los desplazamientos del patrón de partículas.

Un aspecto muy importante en la implementación de las técnicas de velocimetría por imágenes digitales es verificar la hipótesis de que las partículas trazadoras siguen el movimiento del flujo. Según la ley de arrastre de Stokes, en un fluido que esta continuamente acelerando, el retardo de velocidad U_s entre la velocidad de una partícula ΔU y la velocidad del flujo U puede expresarse como (Raffel et al., 2007):

$$\Delta U = U_p - U = d_p^2 \frac{\rho_p - \rho}{18\mu} a \quad (1.1)$$

donde d_p = el diámetro de partícula; ρ_p = la densidad de partícula; ρ = la densidad del fluido; μ = la viscosidad dinámica; a = la aceleración. La diferencia de velocidad entre el flujo y la partícula puede ser minimizada reduciendo el tamaño de las partículas, reduciendo la diferencia de densidad, aumentando la viscosidad dinámica del fluido o minimizando la aceleración. Los últimos dos factores pueden difícilmente ser cambiados sin modificar las condiciones del experimento. Minimizando el tamaño de las partículas parece ser la solución la más conveniente, pero disminuye la cantidad de luz reflejada y entonces la relación señal a ruido de las imágenes capturadas (Melling, 1997). Por lo tanto, es muy importante optimizar el tamaño de las partículas.

VELOCIMETRÍA POR IMÁGENES DE PARTÍCULAS (PIV)

En su forma más sencilla, el método de PIV obtiene una estimación de dos de las tres componentes del campo instantáneo de velocidades, en una región de un fluido que puede aproximarse por un plano. Para calcular dicha estimación, se requiere contar con dos imágenes de partículas trazadoras, en una región (el plano de medición) del fluido, que presenta niveles de iluminación mucho mayores que el resto del fluido. Utilizando algún método de interrogación sobre las imágenes, se obtiene una medida del desplazamiento de las partículas, que puede relacionarse a la velocidad instantánea si se conoce el tiempo transcurrido entre las imágenes. Todas las técnicas de PIV disponibles, se reducen en esencia a este modelo.

La primera etapa de análisis es la etapa de pre-procesamiento en la implementación de la técnica PIV y se describe a continuación. Para medir la velocidad de las partículas trazadores es necesario obtener por lo menos dos imágenes sucesivas. Para reducir la cantidad de estimaciones erróneas de velocidad y garantizar una medición de alta calidad es común de usar filtros en pre-procesamiento (Figura I.10). En primer lugar, las imágenes son transformadas a escala de grises (si no es ya el caso después de la grabación) para disminuir el costo computacional.

Entre los filtros de pre-procesamiento más utilizados se encuentran la técnica de CLAHE (acrónimo inglés de *Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization*); en

este técnica las intensidades más frecuentes del histograma de la imagen son repartidas sobre todo el rango de datos (de 0 a 255 en una imagen a escala de grises de 8-bit) (Pizer et al., 1987). Entonces, las regiones de baja exposición y las regiones de sobre exposición están optimizadas de manera independiente.

Otro filtro que puede ser utilizado en caso de iluminación no homogénea es el filtro de paso-alto de intensidad (Gonzales y Wintz 1987). Tal filtro se calcula la aplica un filtro paso-bajo a la imagen (desenfocando la imagen), y restando el resultado a la imagen original. El filtro de paso alto hace hincapié en la información de las partículas en la imagen, y suprime cualquier información de baja frecuencia.

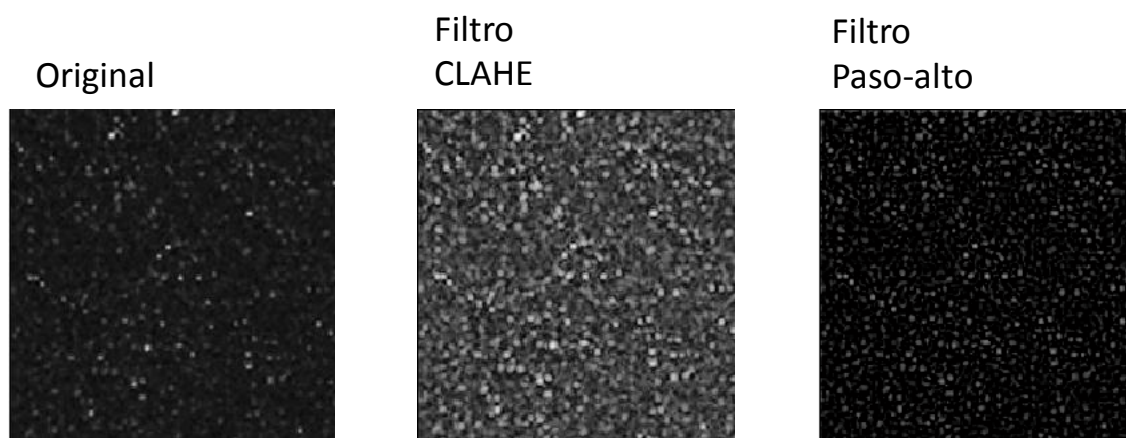


Figura I.10: El efecto de diferentes filtros de pre-procesamiento sobre una imagen de trazadores utilizados en laboratorio

La segunda etapa en el análisis de PIV es la implementación del método de interrogación de las imágenes. La parte más sensible de un análisis de PIV es la correlación cruzada. Esta parte impacta significativamente en la precisión de PIV. El principio de este método de interrogación más popular consiste en extraer sub-regiones (ventanas de interrogación) de una par de imágenes y aplicar una correlación cruzada entre ellas para derivar el desplazamiento de partículas más probable en las ventanas de interrogación. Básicamente, la correlación cruzada es una técnica estadística de búsqueda de patrones que intenta encontrar un de patrón de partículas dentro una ventana A a dentro de una ventana B . Esta técnica estadística se realiza con la función de correlación cruzada discreta (Huang et al., 1997):

$$C(m, n) = \sum_i \sum_j A(i, j)B(i - m, j - n) \quad (1.2)$$

donde A y B son las ventanas de interrogación de la imagen A e imagen B respectivamente. Por lo tanto, la función de correlación cruzada discreta mide la conformidad entre la ventana de interrogación A y la ventana de interrogación B para

un desplazamiento dado (Raffel et al., 2007). La ubicación del pico de intensidad en la matriz de correlación C resultante da el desplazamiento lo más probable de las partículas de A a B (Huang et al., 1997).

Existen dos formas de resolver la ecuación 1.2. El método lo más directo es de calcular la matriz en el dominio espacial. Encontramos este método bajo la denominación “Correlación Cruzada Directa” (DCC, p.ej. Okamoto et al. 2000) o “Emparamiento de Patrón de Imagen De Partícula” (PIPM, p.ej. Huang et al. 1997).

El otro método es de calcular la matriz de correlación en el dominio de frecuencia (Transformada Discreta de Fourier, DFT). La DFT se calcula a partir de la Transformada de Fourier Rápida (FFT, p.ej. Bastiaans 2000). Ambos métodos tienen sus ventajas como inconvenientes:

La DCC calcula la matriz de correlación en el dominio espacial. Las ventanas de interrogación A y B pueden ser de dos tamaños diferentes. Cuando B se elige dos veces mayor que A , un desplazamiento de partícula de hasta la mitad del tamaño de A no dará lugar a ninguna pérdida de información y proporcionar una matriz de correlación confiable con bajo nivel de ruido de fondo (ver Figura I.11.). El DCC mostró la capacidad a generar resultados más exactos que el método DFT (Thielicke y Stamhuis 2014a).

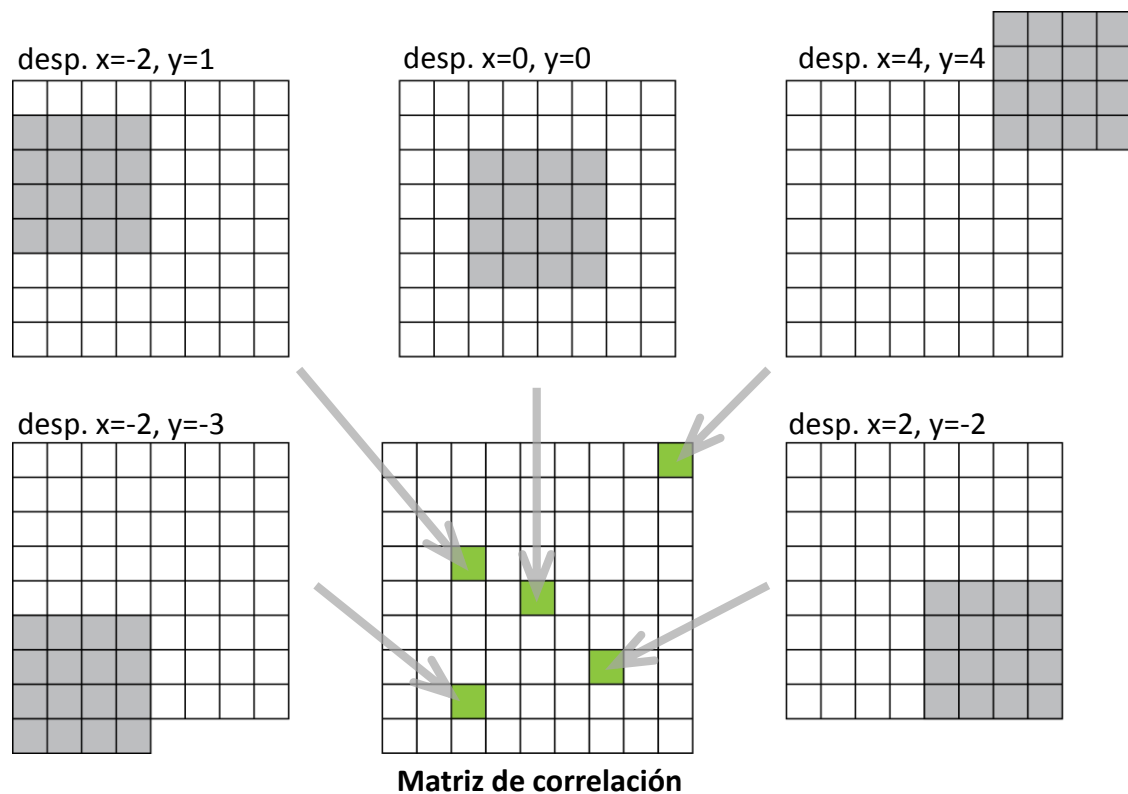


Figura I.11: Cálculo de la matriz de correlación usando DCC. La ventana de interrogación A (dim. 4.4 píxeles) es correlada con la ventana de interrogación B (dim. 8.8 píxeles) lo cual produce una matriz de correlación (dim. 9.9 píxeles). (desp.=desplazamiento).

Tanto el error sistemático como el error aleatorio disminuyen sustancialmente utilizando (Huang et al. 1997). La desventaja del DCC es el aumento del costo computacional con respecto a al método DFT, especialmente con grandes áreas de interrogación (Huang et al. 1997; Raffel et al. 2007). Sin embargo, los tecnológicos hacen posible llevar a cabo los cálculos en paralelo en Unidades de Procesamiento gráfico (GPU), lo cual aumenta considerablemente la velocidad de los cálculos (p.ej. Tarashima et al. 2010). Un problema que tiene la DFT es que la FFT, por definición, supone que los datos de entrada (ventana de interrogación) son periódicos, significa que se repiten en todas las direcciones (Raffel et al., 2007). Cuando el desplazamiento de las partículas es mayor a la mitad del tamaño de la ventana de interrogación, el pico de intensidad en la matriz de correlación se pliega hacia atrás en la matriz y aparecerá en el lado opuesto de la matriz (Raffel et al., 2007). Por lo tanto, el desplazamiento de las partículas tiene que ser menor a la mitad de la ventana de interrogación. Se aconseja reducir el desplazamiento hasta aproximadamente un cuarto de la ventana de interrogación, con el fin de mantener el ruido de fondo bajo en la matriz de correlación (Keane y Adrian 1990).

DETERMINACIÓN DEL PICO

El desplazamiento entero de dos ventanas de interrogación se puede determinar directamente desde la ubicación del pico de intensidad de la matriz de correlación.

Cuando se conoce la ubicación de pico entero en la matriz de correlación, una función gaussiana puede ser ajustada a la distribución de intensidad (ver Figura I.12). Basta utilizar sólo los píxeles verticales y horizontales directamente adyacentes (son dos (2) ajustes con tres (3) puntos; de ahí sale el ajuste *2.3 point fit*) para evaluar el eje x e y por separado. Una función gaussiana es un ajuste apropiado ya que la distribución de intensidad de una partícula individualmente una distribución de intensidad coincide de cerca una distribución de intensidad gaussiana. El pico de la función ajustada se utiliza para determinar el desplazamiento de partículas con una precisión de sub-píxel.

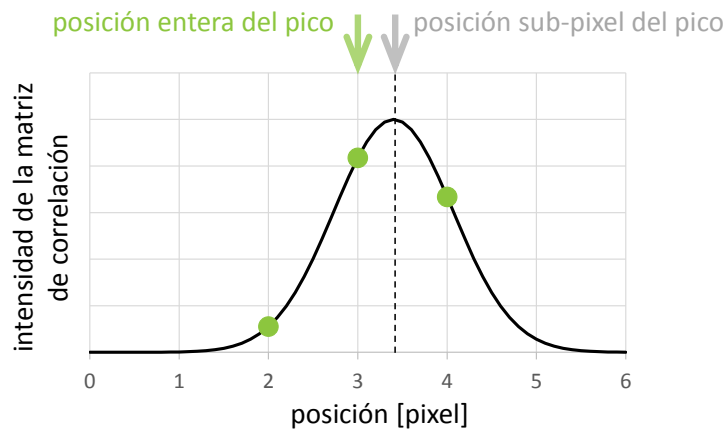


Figura I.12: Principio del ajuste "Gaussian 2.3-point fit": La precisión sub-píxel se logra ajustando un función Gaussiana unidireccional (línea continua) a la distribución entera de la intensidad que viene de la matriz de correlación (puntos). Solamente se muestra un eje.

VELOCIMETRÍA POR SEGUIMIENTO DE PARTÍCULAS (PTV)

Mientras que PIV determina campos de velocidades en un marco de referencia Euleriano, PTV lo hace en un marco de referencia Lagrangiano es decir, la cuantificación del cambio temporal de la velocidad a lo largo de la trayectoria de cada partícula. Es muy difícil determinar con certeza el origen de los métodos usados en PTV pero un ejemplo relacionado directamente con la Ingeniería Hidráulica, son las visualizaciones realizadas por el Profesor Theodor Rehbock en la Universidad de Karlsruhe en Alemania (Rehbock, 1926), donde las trayectorias de trazadores (velas) en campos de espigones fluviales fueron visualizados usando fotografía de alta exposición. La técnica se basa sobre un principio simple: si la posición de una partícula

trazadora \vec{x}_A y \vec{x}_B , en un intervalo de tiempo Δt , se conoce, entonces la velocidad de la partícula puede ser determinada por medio de:

$$\vec{u} = \frac{\vec{x}_B - \vec{x}_A}{\Delta t} \quad (1.3)$$

Por lo tanto, la determinación de la posición de las partículas es necesaria puede ser efectuada manualmente; sin embargo, como la operación se debe repetir muchas veces, es conveniente contar con algoritmos que permitan automatizar el proceso. A continuación se presenta los diferentes algoritmos del estado del arte para el pre-procesamiento, la detección de las partículas y la determinación de desplazamiento (por combinación de pares).

PRE-PROCESAMIENTO

Una de las técnicas más usadas y simples de pre-procesamiento de imágenes es la substracción del fondo de la imagen (Honkanen y Nobach 2005). Análogamente a la descomposición de Reynolds usada en caso de señales de flujos turbulentos, una imagen instantánea puede ser descompuesta en una imagen media y una parte fluctuante. Si las condiciones experimentales permanecen constantes durante una medición, la imagen media corresponderá al fondo de la imagen y la parte fluctuante a una imagen que contiene solo las partículas trazadoras. Esta técnica es muy simple de implementar y permite remover objetos sólidos, posibles desperfectos del sensor de imagen, y por sobre todo, permite mejorar la relación ruido señal. Figura I.13 muestra un ejemplo de la descomposición de un cuadro instantáneo en su parte media y fluctuante. La imagen corresponde a mediciones realizadas en un modelo experimental de un campo de espigones fluviales (Brevis, 2009).

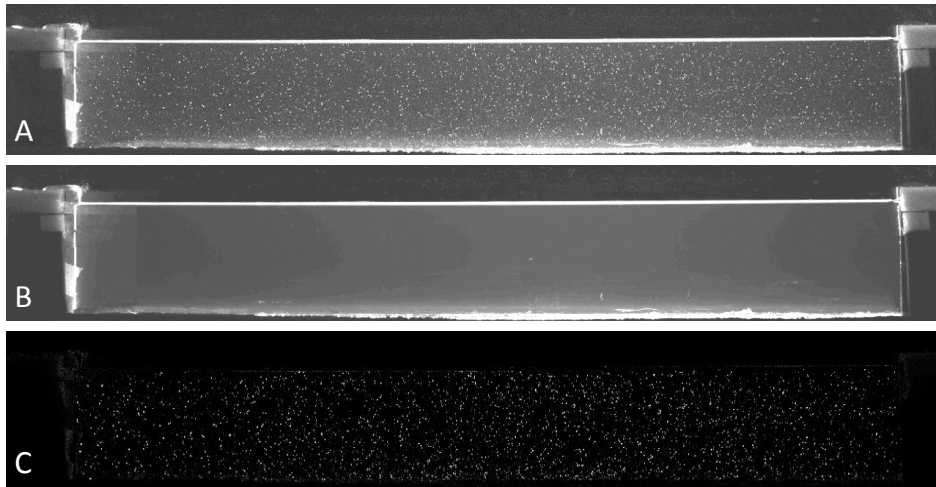


Figura I.13: Ejemplo de la sustracción del fondo de imagen. A) imagen instantánea del flujo vertical en un campo de espigones fluviales. B) imagen media calculada usando 14400 cuadros. C) imagen instantánea mostrada en A), pero con la imagen media sustraída. sacado de (Brevis, 2009)

DETECCIÓN DE PARTÍCULAS

Los errores asociados a la determinación de los centroides de partículas son particularmente importantes cuando los desplazamientos de las partículas son del mismo orden del tamaño de la imagen de partícula. Si los desplazamientos son lo suficientemente largos para evitar la influencia de los errores de detección de centroide, se puede registrar la deformación no lineal de los patrones de partículas especialmente en regiones de altos gradientes de velocidad, por lo que es difícil para los algoritmos de encontrar soluciones correspondencia. Históricamente, PTV ha sido clasificado como adecuado para las imágenes con baja densidad de partículas, donde la densidad se define como el número de partículas por pixel. El algoritmo del estado del arte de “mascara gaussiana” (Takehara y Etoh 1998) ha proporcionado un buen rendimiento para imágenes mediamente y altamente denso. Una máscara de partícula es el patrón de intensidad “ideal” de la imagen de una partícula. Generalmente, el patrón de intensidad de una partícula posee un pico cerca del centro de la imagen, y la intensidad decrece a medida que la distancia desde el centro crece. En el algoritmo de la máscara se asume que la intensidad tiene una distribución Gaussiana en dos dimensiones que se expresa de la manera siguiente:

$$I(x, y) = a \cdot e^{-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2\sigma^2}} \quad (1.4)$$

Donde, $I(x, y)$ es el valor de la intensidad a (x, y) , a es el pico de intensidad, σ es la desviación estándar (radio representativo), y (x_0, y_0) es la ubicación del centro de la imagen de partícula. Los 4 parámetros a , σ y (x_0, y_0) determinan la forma y la ubicación de la máscara de partícula. El pico de intensidad, a , puede ser fijado a un valor arbitrario, cuando el coeficiente de correlación cruzada entre la máscara de partícula y la imagen de partículas es calculada ya que el coeficiente de correlación es normalizado de tal forma que puede variar en un rango de -1.0 a 1.0 independiente del valor de a . Entonces el valor del coeficiente de la correlación cruzada depende de tres parámetros, σ y (x_0, y_0) . La metodología de la correlación de máscara de partícula tiene los siguientes pasos:

1) Cálculo de los coeficientes de correlación cruzada

El coeficiente de correlación cruzada entre el patrón de intensidad de la máscara de partícula, centrada en (x_0, y_0) , y el área de interrogación del plano de imagen de partícula, también centrado en (x_0, y_0) , es calculado. El coeficiente de correlación cruzado puede ser calculado con la siguiente ecuación:

$$r(x_0, y_0) = \frac{\sum_{i=x_0-\frac{m}{2}}^{x_0+\frac{m}{2}} \sum_{j=y_0-\frac{n}{2}}^{y_0+\frac{n}{2}} (I(i, j) - \hat{I})(I_m(i, j) - \hat{I}_m)}{\sqrt{\sum_{i=x_0-\frac{m}{2}}^{x_0+\frac{m}{2}} \sum_{j=y_0-\frac{n}{2}}^{y_0+\frac{n}{2}} (I(i, j) - \hat{I})^2} \sqrt{\sum_{i=x_0-\frac{m}{2}}^{x_0+\frac{m}{2}} \sum_{j=y_0-\frac{n}{2}}^{y_0+\frac{n}{2}} (I_m(i, j) - \hat{I}_m)^2}} \quad (1.5)$$

Donde $r(x_0, y_0)$ es el coeficiente de correlación cruzada a (x_0, y_0) , $I(i, j)$ es el valor de intensidad de la imagen de partícula a (i, j) , y $I_m(i, j)$ es el valor de intensidad de la máscara de partícula a (i, j) . El área de interrogación se define como $m \times n$. \hat{I} y \hat{I}_m son los promedios espaciales de la intensidad de la imagen de partícula y de la máscara de partícula dentro del área de interrogación respectivamente. La máscara de partícula escanea todo el plano de la imagen de partícula lo cual produce un plano de coeficiente de correlación.

2) Binarización

El plano de coeficiente de correlación es binarizado con un umbral elegido para ubicar las imágenes de partículas. En la imagen binarizada, un pixel que pertenece a una imagen de partícula tiene el valor 1, en el caso contrario el valor es 0.

3) Estimación de la posición y del tamaño de la partícula

El área de la imagen de partícula es calculada. Se estima la posición del centro de cada área. La posición y el tamaño de la partícula son calculados al centro de gravedad y el radio equivalente del área, respectivamente.

ALGORITMO DE EMPARAMIENTO

Para entender el algoritmo que se usa para el emparamiento de partículas algunas definiciones son necesarias. El método de emparamiento consiste en ubicar y etiquetar el centro de una misma partícula sobre dos imágenes sucesivas a Δt de intervalo. El término de partícula *blanco* (en el sentido de objetivo) es utilizado para identificar las partículas ubicadas en la primera imagen, a $t = t_0$, cuyas ubicaciones quedan para determinar en la segunda imagen, a $t = t_0 + \Delta t$. Una partícula blanco se identifica por un sub-índice " i_{emp} ", cuyo rango es de 1 a N , donde N es el número de partículas en la primera imagen. El término de partícula *candidata* se refiere a las partículas ubicadas en la segunda imagen que corresponden a una cierta partícula " i_{emp} ". Una partícula en la segunda imagen se identifica con el sub-índice " j_{emp} ", cuyo rango es de 1 a M , donde M es el número de partículas en la segunda imagen.

En el algoritmo que se explica a continuación, la velocidad asociada a una partícula se encuentra utilizando el coeficiente de correlación cruzada más alto después de comparar una matriz de intensidad en la primera imagen y un grupo de sub-matrices en la segunda. La primera matriz de referencia se encuentra después de extraer de la primera imagen las intensidades ubicadas a dentro de una ventana de interrogación cuadrada de tamaño l_w , la cual está centrada en la posición de la partícula blanco $\vec{x}_{i_{emp}}$. El grupo de matrices secundarias se obtiene después de extraer las intensidades de la segunda imagen ubicadas a dentro de una ventana de interrogación centrada sobre la posición de cada partícula candidata $\vec{y}_{j_{emp}(i_{emp})}$. En Figura I.14 se puede ver un esquema del algoritmo de correlación cruzada. En la figura, la matriz de referencia de una partícula posicionada en $\vec{x}_{i_{emp}}$ en la primera imagen es extraída utilizando la ventana de interrogación de tamaño l_w . La longitud l_w es una estimación del desplazamiento máximo de una partícula " i ". En la segunda imagen, la ventana de interrogación se ubica en la misma posición que en la primera imagen. Las partículas dentro de la ventana corresponden a las partículas candidatas de " i ". La ventana de interrogación está centrada sobre cada posición de partícula candidata $\vec{y}_{j_{emp}(i_{emp})}$, donde $j(i_{emp}) = 1, 2, \dots, ni_{emp}$ y " ni_{emp} " es el número total de candidatas asociadas a la partícula " i ". El coeficiente de correlación cruzada entre la matriz de referencia en imagen 1 y cada matriz centrada sobre las partículas candidatas se calcula como lo siguiente:

$$R = \frac{\sum_M \sum_N (A_{mn} - \bar{A})(B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{(\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})^2)(\sum_m \sum_n (B_{mn} - \bar{B})^2)}} \quad (1.6)$$

Donde R es el coeficiente de correlación cruzada, A y B son matrices de tamaño $m \times n$, y \bar{A} , \bar{B} , son los valores medios de las intensidades de los elementos de la respectivas matrices. El desplazamiento entre una partícula ubicada a una posición $\vec{x}_{i_{emp}}$ sobre la primera imagen y sus partículas candidatas ubicadas en $\vec{y}_{j_{emp}(i_{emp})}$ se define como $\vec{d}_{j_{emp}(i_{emp})} = \vec{u}_{j_{emp}(i_{emp})}\Delta t$, donde $\vec{u}_{j_{emp}(i_{emp})}$ es el desplazamiento medio de la partícula.

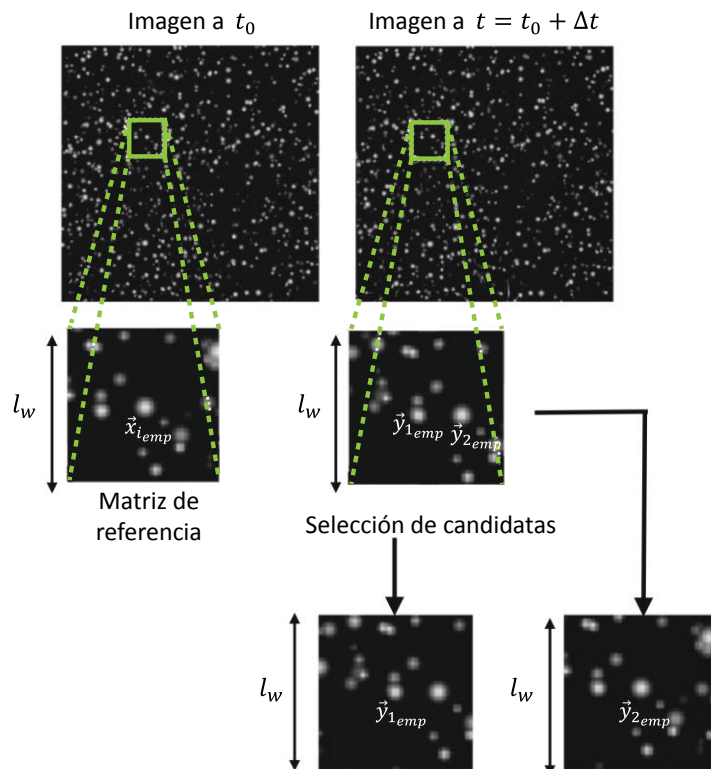


Figura I.14 Fundamentos de PTV con Correlación Cruzada. Se aplica la función de correlación cruzada entre la matriz de referencia y la matriz de interrogación centrada sobre cada partícula candidata. En este caso, el valor más alto de coeficiente de correlación cruzado es obtenido cuando la matriz de la segunda imagen está centrada a $\vec{y}_{2_{emp}}$. Fuente de imagen: PIV-Standard Project of the Visualization Society of Japan (VSJ)

I.4 ÁREAS DE VACANCIA Y MOTIVACIÓN CIENTÍFICA

Para dar respuestas a las motivaciones tecnológicas citadas anteriormente en relación a que las técnicas existentes para la estimación de caudales en ríos son limitadas, especialmente en condiciones extremas (estiaje y crecidas), y sobre la hipótesis de que la implementación en gran escala de las técnicas de velocimetría por imágenes existentes para uso en laboratorio permitirá caracterizar flujos de agua con superficie libre en estas condiciones extremas, el estudio de antecedentes detallado anteriormente muestra que se requiere investigación científica en distintas áreas de vacancia que serán detalladas a continuación.

- 1) Se requieren metodologías y paquetes computacionales específicos para implementar PIV y PTV a gran escala.
- 2) Se requiere metodologías y paquetes computacionales específicos para implementar PIV y PTV a gran escala en forma continua.
- 3) Se requiere metodologías y paquetes computacionales específicos para implementar PIV y PTV a gran escala utilizando videos proporcionados por los ciudadanos (ciencia ciudadana).
- 4) Se requiere avanzar en la detección y cuantificación de fuentes de incertidumbre.

Se define “gran escala” como la escala del ancho un río chico (~1m) a mediano (~200 m).

I.5 OBJETIVOS GENERAL Y ESPECÍFICOS

El objetivo general de esta tesis es el desarrollo e implementación eficiente en gran escala de técnicas de velocimetría por imágenes para caracterizar flujos de agua con superficie libre en condiciones hidrológicas extremas (máximos y mínimos).

Para cumplimentar el objetivo general mencionado se definieron los siguientes objetivos específicos:

- 1) Desarrollar programas computacionales específicos para implementar a gran escala las técnicas de velocimetría por imágenes.
- 2) Determinar experimentalmente caudales en ríos de montaña con LSPTV/LSPIV durante periodos de mínimos/máximos hidrológicos.
- 3) Determinar experimentalmente caudales en grandes ríos con LSPIV durante periodos de crecidas (máximos hidrológicos)
- 4) A partir de la experiencia obtenida en el desarrollo de los objetivos previos se elabora una guía metodológica para implementar a gran escala las técnicas de velocimetría por imágenes
- 5) Evaluar usos innovadores de la técnica, incluyendo el uso de vehículos aéreos no tripulados -VANT, flujos sobre estructuras hidráulicas e inundaciones urbanas.
- 6) Elaborar un proyecto de ciencia ciudadana para estimar el caudal escurrido durante inundaciones urbanas utilizando datos de colaboración ciudadana distribuida.

I.6 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

Para cumplir el objetivo general, la tesis se organiza de la manera siguiente:

El Capítulo II presenta una de las principales dificultades esperadas para la implementación de las técnicas de velocimetría por imágenes digitales a gran escala y se proponen técnicas y metodologías para solucionarlo. En particular se analiza la posición de la cámara digital ya que implementado las técnicas de velocimetría por imágenes digitales a pequeña escala (generalmente en laboratorio) es relativamente simple ubicar la cámara digital perpendicular al plano medido. A gran escala, es más complicado visualizar completamente la región de interés con una cámara ubicada perpendicular a la superficie del agua ya que requiere tomar una posición cenital, lo cual implica tomar altitud. La más común es de realizar un video de un punto de vista oblicuo (p. ej. desde una orilla, un puente, un edificio, etc...). En estos casos las imágenes extraídas de los videos realizados de un punto de vista oblicuo requieren una cierta rectificación al fin de obtener resultados coherentes.

Los Capítulos III y IV presentan las herramientas computacionales desarrolladas en esta tesis para la implementación a gran escala de las técnicas de velocimetría por imágenes digitales. En el Capítulos III se introduce un paquete computacional desarrollado para implementar a gran escala la técnica de velocimetría por seguimiento de partículas (LSPTV) denominado PTVlab, que proporciona una interfaz gráfica de usuario (GUI) al algoritmo de seguimiento de partículas introducido por Brevis et al. (2011). En el Capítulo IV se presenta la herramienta computacional RIVeR (Rectificación de Resultados de Velocimetría de Imagen) utilizados para la rectificación de los resultados generados por ambas técnicas de velocimetría por imágenes digitales implementadas a gran escala (LSPIV y LSPTV).

Una vez desarrolladas las herramientas necesarias para implementar a gran escala las técnicas de velocimetría por imágenes digitales, se las utiliza en los Capítulos V a VII para la determinación experimental de caudales en ríos de distintas características (pequeños arroyos de montaña o grandes ríos) en diferentes condiciones de escurrimiento (estiaje o crecida). Las metodologías y herramientas computacionales propuestas se las valida comparando los resultados con los obtenidos con otras técnicas convencionales cuando estos están disponibles. Sobre la base de la experiencia obtenida, y con el fin de popularizar las técnicas y herramientas desarrolladas en esta tesis, en el Capítulo VIII se presenta una guía metodológica para el registro eficiente de videos destinados a ser procesados con las técnicas de velocimetría por imágenes digitales para la estimación de caudal en cursos fluviales. Esta guía se desarrolló en colaboración con dos instituciones internacionales de Estados Unidos y Canadá.

Capítulo I

En el Capítulo IX se presentan tres usos innovadores de técnicas de velocimetría por imágenes digitales para caracterizar y cuantificar escurrimientos hídricos superficiales: a) aplicación de LSPIV utilizando imágenes digitales registradas desde un vehículo aéreo no tripulado (VANT) para cuantificar caudales escurridos superficialmente; b) la cuantificación y caracterización del campo de velocidad de flujo en estructuras de descarga de excedentes hídricos en una presa; y c) la determinación de la vulnerabilidad sobre la estabilidad de las personas en inundaciones urbanas.

En las aplicaciones presentadas en los Capítulos previos, los videos han sido registrados específicamente por el grupo de trabajo en el cual se ha desarrollado esta tesis. En el capítulo X se presenta la experiencia realizada utilizando videos generados en un marco de colaboración abierta distribuida (crowdsourced data) en un proyecto de ciencia ciudadana. Se presenta el uso de vídeos no profesionales como una superación al método indirecto de la cuantificación de caudal en cursos fluviales generalmente utilizada para eventos extremos. Finalmente el Capítulo XI presenta las principales conclusiones alcanzadas en esta tesis y diferentes propuestas de trabajo

CAPÍTULO II

IMPLEMENTACIÓN A GRAN ESCALA DE LAS TÉCNICAS DE VELOCIMETRÍA POR IMÁGENES

II.1 INTRODUCCIÓN

Las técnicas presentadas en el estado del arte han sido desarrolladas para un uso óptimo en laboratorio. Típicamente, las imágenes generadas en laboratorio están compuestas de un fondo negro sobre lo cual las partículas visibles reflejan la luz del láser y parecen blancas sobre una imagen de escala de grises. La escala de medición es de algunos centímetros (2-20 cm). Por lo tanto, el uso de dichas técnicas a gran escala (p. ej. del ancho de un río) implica tres mayores diferencias con su uso clásico.

- Sobre la fuente de iluminación: a gran escala, lo más probable es que la fuente de iluminación sea difusa en lugar de coherente (luz del láser). El tipo de luz utilizada para iluminar la superficie del agua puede ser natural (p. ej. luz del sol) o artificial en el caso de un modelo físico en laboratorio.
- Sobre las partículas: en el caso de PIV, como lo visto en el capítulo I, se determina el desplazamiento de las partículas como el desplazamiento medio del patrón (o dibujo) que las mismas forman dentro de una ventana de interrogación de una imagen a la siguiente. Por lo tanto, no es necesario que el trazador sea específicamente partículas, sino que cumpla con el requisito de formar patrones identificables sobre toda la superficie y de forma homogénea de una imagen a la siguiente. Si bien a gran escala el trazador puede de otro tipo (p. ej. hojas, troncos, ramas, escombros, ondas, etc..) seguiremos denominando la técnica “Velocimetría por Imágenes de Partículas”. En el caso de PTV
- Sobre la posición de la cámara digital: es el punto que requiere la mayor atención. A pequeña escala, en laboratorio, es relativamente simple ubicar la cámara digital perpendicular al plano medido. A gran escala, es más complicado visualizar completamente la región de interés con una cámara ubicada perpendicular a la superficie del agua ya que requiere tomar una posición cenital, lo cual implica tomar altitud. La más común es de realizar un video de un punto de vista oblicuo (p. ej. desde una orilla, un puente, un edificio, etc...). Veremos en el capítulo 9 que el uso de Vehículo Aero No Tripulado (VANT) puede ser utilizado para mejorar la calidad de la medición en algunos casos. En el caso de no disponer de un VANT durante la medición o de ubicar la cámara perpendicular a la región de interés, los videos realizados de un punto de vista oblicuo requieren una cierta rectificación al fin de obtener resultados coherentes. Las imágenes oblicuas son una transformación proyectiva, o más específicamente una proyección perspectiva de la realidad a una imagen.

Típicamente, las imágenes grabadas son una proyección de un espacio en 3 dimensiones a un plano de 2 dimensiones: $\mathbb{R}^3 \mapsto \mathbb{R}^2$; Líneas rectas en la realidad son proyectadas como líneas rectas sobre las imágenes; Las paralelas en la realidad son proyectadas como líneas que se cruzan en puntos de fuga (Figura II.1a); Los cónicos en la realidad son proyectados como cónicos en sobre la imágenes, p. ej. Un círculo se proyecta como un círculo o un elipse (Figura II.1b); La relación del mapeo no es biunivoque. Por (x, y) dados no es posible determinar de manera única (X, Y, Z) . Donde (x, y) son las coordenadas de un punto de la imagen proyectadas y (X, Y, Z) son las coordenadas de un punto en el espacio; La transformación no es conforme – no respecta las formas ya que los ángulos no son preservados.

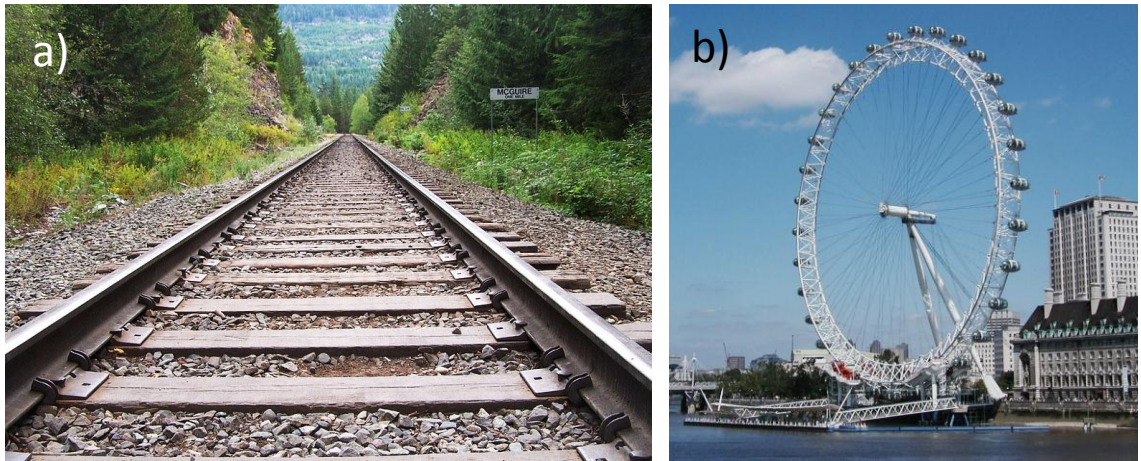


Figura II.1. El efecto de la transformación proyectiva. a) Las paralelas convergen, b) los círculos se transforman en elipses

En este capítulo veremos cómo transformar coordenadas de la realidad a una imagen proyectada y como usaremos la matriz de homografía para establecer una relación biunivoque.

II.3 MATRIZ DE HOMOGRAFÍA

“Cuando las imágenes de unos objetos iluminados... penetran a través de un pequeño agujero en una habitación muy oscura... verá (en la pared opuesta) estos objetos en su forma y color, de tamaño reducido... en una posición invertida, debido a la intersección de los rayos”

Leonardo Da Vinci

La cámara estenopeica es una de las primeras técnicas utilizadas en el ámbito de la fotografía. Sin embargo, aún es practicada esporádicamente tanto por fotógrafos profesionales como por aficionados a la fotografía y a la fotografía artística. En inglés se lo denomina *pinhole* (agujero de aguja). Una cámara estenopeica es una cámara de fotos sin lente, que está formada por una caja/habitación a prueba de luz con un agujero muy pequeño por donde entra la luz.

Esta cámara es conocida desde hace muchos años cuando Aristóteles escribió sobre las cámaras estenopeicas que se formaban con cosas naturales como hojas. Pero, nunca se entendió del todo estas cámaras porque se pensaba que eran nuestros ojos los que emitían rayos para poder ver hasta que un matemático en el siglo X dijo que eran los rayos los que entraban en el ojo y no al revés. Además, el mismo matemático hizo la primera cámara estenopeica. Años después muchas personas experimentaron la cámara estenopeica como Shen Kuo, Robert Grosseteste, Roger Bacon... Además entre los años 1000 y 1600 personas como Ibn al-Haytham, Gemma Frisius y Gimbattista della Porta escribieron sobre la cámara oscura y empezaron a explicar cómo funcionaba (Figura II.2). Además, con esa cámara se podían ver los eclipses de sol.



Figura II.2. Ilustración de Reiners-Gemma Frisius, "cámara oscura" 1544. La ilustración está representando un eclipse utilizando una cámara oscura.

Un punto P en un espacio cartesiano bidimensional tiene dos coordenadas de tal forma que $P = (x, y)$. En matemáticas, y más concretamente en geometría proyectiva, las coordenadas homogéneas son un instrumento usado para describir un punto en el espacio proyectivo. Fueron introducidas por el matemático alemán August Ferdinand Möbius en el año 1837. En coordenadas homogéneas, todo punto bidimensional está definido por tres coordenadas. De tal modo que un punto de dimensiones (x, y) en el espacio cartesiano, se lo representa como $\tilde{P} = (x, y, 1)$. Para convertir un punto en coordenadas homogéneas $\tilde{P} = (\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ a coordenadas cartesianas se divide el primer y el segundo elemento por el tercero:

$$x = \frac{\tilde{x}}{\tilde{z}}, \quad y = \frac{\tilde{y}}{\tilde{z}} \quad (2.1)$$

Generalizando, se puede establecer la relación entre las coordenadas cartesianas de un punto en el espacio con sus coordenadas homogéneas con la siguiente ecuación:

$$\begin{pmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ \tilde{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Donde X, Y y Z son las coordenadas de un punto en el espacio y \tilde{x}, \tilde{y} y \tilde{z} las coordenadas homogéneas de la proyección de este punto según el modelo estenopeico y f la longitud focal (la distancia entre el centro óptico de la lente y el foco (Figura II.3)). Utilizando la ecuación (2.2) se puede convertir las coordenadas homogéneas de la proyección del punto a coordenadas cartesianas.

$$x = \frac{fX}{Z}, \quad y = \frac{fY}{Z} \quad (2.3)$$

La ecuación (2.3) relaciona las coordenadas de un punto en la realidad con su proyección en función de la distancia que separa el punto del modelo de una cámara. El inconveniente de esta relación es que no es lineal. La división por Z significa que mientras más lejos un objeto de una cámara, más chico es su protección. La gran ventaja de usar las coordenadas homogéneas en lugar de coordenadas cartesianas es la linealidad de la relación entre la realidad y su proyección:

$$\tilde{x} = fX, \quad \tilde{y} = fY, \quad \tilde{z} = Z \quad (2.4)$$

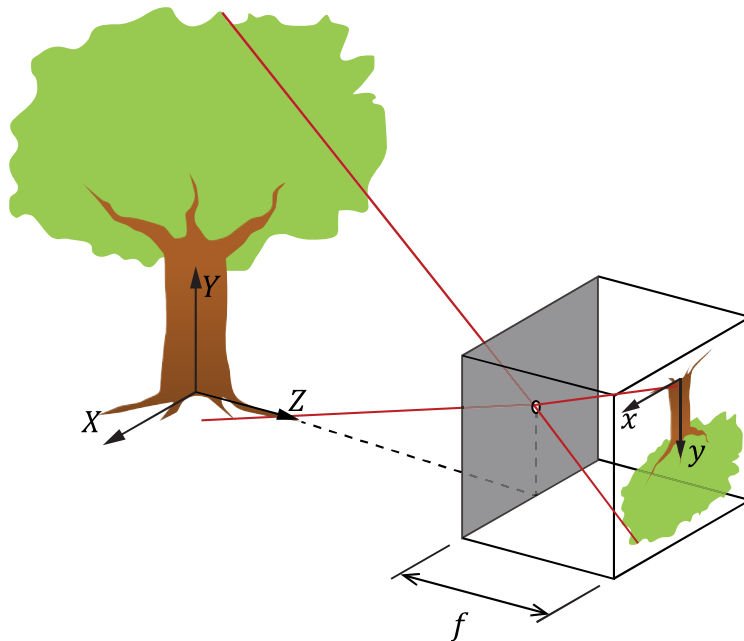


Figura II.3.
Ilustración del modelo
de una cámara
estenopeica

Si el modelo de cámara es más sofisticado que el modelo estenopeico, como por ejemplo una cámara digital compuesta de una lente y de un sensor (Figura II.4). Entonces la relación entre las coordenadas reales y las coordenadas proyectadas en pixel se puede escribir de la manera siguiente:

$$\begin{pmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \\ \tilde{w} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\rho_u} & 0 & u_0 \\ \rho_u & 1 & v_0 \\ 0 & \frac{1}{\rho_v} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

Donde \tilde{u} , \tilde{v} y \tilde{w} son las coordenadas homogéneas de los pixeles ρ_u y ρ_v el tamaño de un pixel en las dos direcciones respectivamente, u_0 y v_0 representan la posición del centro del sensor de la cámara. Esta primera matriz se utiliza para escalar la realidad a su proyección sobre un sensor. La segunda matriz, que hemos visto anteriormente representa las características de la lente. Las dos primeras matrices juntas forman lo que se llama comúnmente los parámetros *intrínsecos* de la cámara. En la última matriz $\begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{pmatrix}$ define la posición del centro de cámara en el mundo. \mathbf{R} es la matriz de rotación que indica la orientación de la lente y \mathbf{T} es la posición del origen del sistema de la realidad (a menudo erróneamente considerado como la posición de la cámara). \mathbf{R} y \mathbf{T} forman los parámetros *extrínsecos* de la cámara. Las tres matrices juntas forman la matriz *cámara* \mathbf{C} . Es una matriz compleja difícil de solucionar y que contiene parámetros desconocidos. Su resolución se puede realizar a través de un proceso de calibración. El proceso de calibración de una cámara está descrito en Apéndice A. La relación entre las coordenadas homogéneas del mundo real y las coordenadas

homogéneas proyectadas sobre el sensor de la cámara se puede escribir de la manera siguiente:

$$\begin{pmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \\ \tilde{w} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Con

$$u = \frac{\tilde{u}}{\tilde{w}}, \quad v = \frac{\tilde{v}}{\tilde{w}} \quad (2.7)$$

donde u y v son las coordenadas proyectadas cartesianas sobre el sensor de la cámara.

Con una matriz cámara C y un punto del mundo real de coordenada P dados:

$$C = \begin{pmatrix} 512 & -800 & 0 & 800 \\ 512 & 0 & -800 & 1600 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad P = \begin{pmatrix} 5 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

Utilizando (2.6) y (2.7) tenemos las coordenadas proyectadas en pixel:

$$u = 352 \quad y \quad v = 832 \quad (2.9)$$

Una particularidad de la relación (2.6) es su invariancia. Si multiplicamos la matriz cámara por un factor λ :

$$\begin{pmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \\ \tilde{w} \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (2.10)$$

la relación (2.7) sigue invariada. Por lo tanto, la existencia del elemento C_{34} de la matriz cámara es totalmente arbitraria y podemos re-escribir la relación (2.6) como:

$$\begin{pmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \\ \tilde{w} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (2.11)$$

Si todos los puntos del mundo real se encuentran en un mismo plano $Z = 0$. Entonces la tercera columna de la matriz cámara se vuelve inútil porque todos sus elementos se encuentran multiplicados por 0. Por lo tanto la relación (2.6) se puede simplificar de la manera siguiente:

$$\begin{pmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \\ \tilde{w} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} \\ H_{31} & H_{32} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

Donde H es una matriz de 9 elementos en la cual 8 son desconocidos. La matriz H se denomina como la matriz *homografía*. Esta matriz relaciona las coordenadas de los puntos de un mismo plano en el mundo real con sus proyecciones en pixel. Eliminando la dimensión de la profundidad, se puede solucionar la matriz homografía con solo 4 puntos cuyas coordenadas son conocidas en el mundo real como en la proyección.

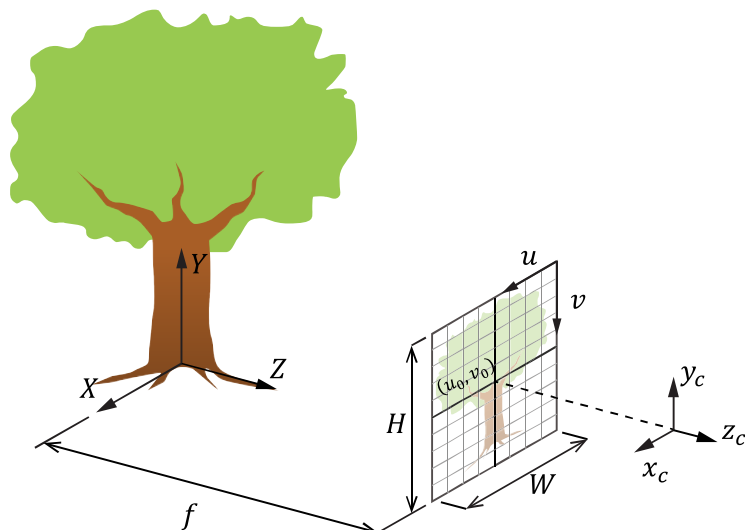


Figura II.4.

Ilustración del modelo de un modelo de cámara digital. Con H y W la altura y el ancho del sensor en pixel; x_c , y_c y z_c las coordenadas del centro de la cámara.

Además, la matriz homografía permite el mapeo inverso de la proyección sobre una imagen hacia la realidad. Esta característica permite transformar cualquier coordenada de una imagen a su correspondencia en un plano definido de la realidad. En la Figura II.5, se puede ver como rectificar las coordenadas de los píxeles de una imagen para rectificarla a partir de 4 puntos conocidos.

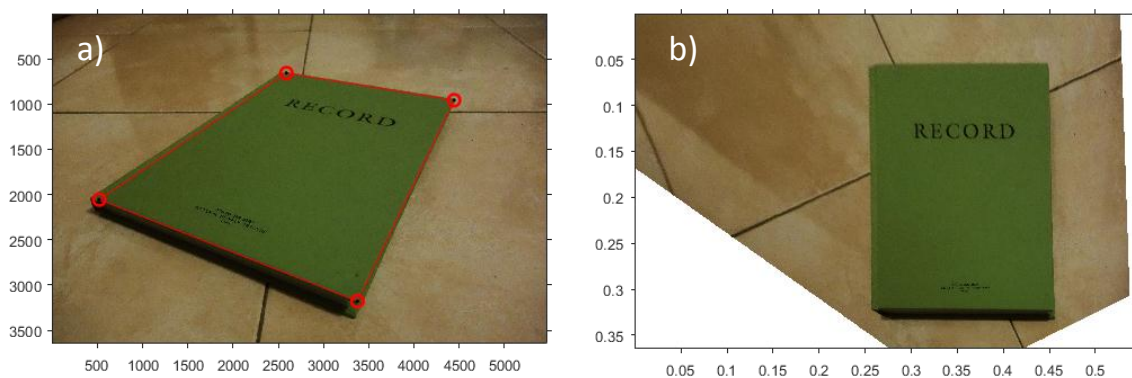


Figura II.5. Imagen original con 4 puntos coplanarios cuyas coordenadas son conocidas en la proyección y en la realidad a). Imagen rectificada a partir de la matriz de homografía calculada con los 4 puntos.

II.4 RESOLUCIÓN DE LA MATRIZ CÁMARA

Tomando la ecuación (2.10) para cualquier coordenada, tenemos:

$$\begin{pmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ \tilde{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} x &= \frac{C_{11}X + C_{12}Y + C_{13}Z + C_{14}}{C_{31}X + C_{32}Y + C_{33}Z + C_{34}} \\ y &= \frac{C_{21}X + C_{22}Y + C_{23}Z + C_{24}}{C_{31}X + C_{32}Y + C_{33}Z + C_{34}} \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} x(C_{31}X + C_{32}Y + C_{33}Z + C_{34}) &= C_{11}X + C_{12}Y + C_{13}Z + C_{14} \\ y(C_{31}X + C_{32}Y + C_{33}Z + C_{34}) &= C_{21}X + C_{22}Y + C_{23}Z + C_{24} \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} C_{31}xX + C_{32}xY + C_{33}xZ + C_{34}x &= C_{11}X + C_{12}Y + C_{13}Z + C_{14} \\ C_{31}yX + C_{32}yY + C_{33}yZ + C_{34}y &= C_{21}X + C_{22}Y + C_{23}Z + C_{24} \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} C_{31}xX + C_{32}xY + C_{33}xZ + C_{34}x - C_{11}X - C_{12}Y - C_{13}Z - C_{14} &= 0 \\ C_{31}yX + C_{32}yY + C_{33}yZ + C_{34}y - C_{21}X - C_{22}Y - C_{23}Z - C_{24} &= 0 \end{aligned} \quad (2.17)$$

Que podemos escribir bajo la forma matricial:

$$\begin{pmatrix} -X & -Y & -Z & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & xX & xY & xZ & x \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -X & -Y & -Z & -1 & yX & yY & yZ & y \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ C_{13} \\ C_{14} \\ C_{21} \\ C_{22} \\ C_{23} \\ C_{24} \\ C_{31} \\ C_{32} \\ C_{33} \\ C_{34} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

Utilizando la ecuación (2.18) con N puntos cuyas coordenadas son conocidas en la realidad y sobre la imagen proyectada, tenemos:

$$\begin{pmatrix} -X_1 & -Y_1 & -Z_1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_1X_1 & x_1Y_1 & x_1Z_1 & x_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -X_1 & -Y_1 & -Z_1 & -1 & y_1X_1 & y_1Y_1 & y_1Z_1 & y_1 \\ -X_2 & -Y_2 & -Z_2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_2X_2 & x_2Y_2 & x_2Z_2 & x_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -X_2 & -Y_2 & -Z_2 & -1 & y_2X_2 & y_2Y_2 & y_2Z_2 & y_2 \\ -X_3 & -Y_3 & -Z_3 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_3X_3 & x_3Y_3 & x_3Z_3 & x_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -X_3 & -Y_3 & -Z_3 & -1 & y_3X_3 & y_3Y_3 & y_3Z_3 & y_3 \\ -X_4 & -Y_4 & -Z_4 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_4X_4 & x_4Y_4 & x_4Z_4 & x_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -X_4 & -Y_4 & -Z_4 & -1 & y_4X_4 & y_4Y_4 & y_4Z_4 & y_4 \\ -X_5 & -Y_5 & -Z_5 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_5X_5 & x_5Y_5 & x_5Z_5 & x_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -X_5 & -Y_5 & -Z_5 & -1 & y_5X_5 & y_5Y_5 & y_5Z_5 & y_5 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -X_N & -Y_N & -Z_N & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_NX_N & x_NY_N & x_NZ_N & x_N \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -X_N & -Y_N & -Z_N & -1 & y_NX_N & y_NY_N & y_NZ_N & y_N \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ C_{13} \\ C_{14} \\ C_{21} \\ C_{22} \\ C_{23} \\ C_{24} \\ C_{31} \\ C_{32} \\ C_{33} \\ C_{34} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

En este caso, por lo menos 6 puntos en el espacio son necesarios para la resolución de la ecuación (2.19) ya que la matriz *cámara* \mathbf{C} tiene 12 incógnitas. Se usara la Descomposición en Valores Singulares (SVD) tal que:

$$A = U * S * V^T \quad (2.20)$$

Donde A es la matriz conocida de (2.19), U y V son las matrices unitarias cuyas columnas contienen los vectores singulares y S contiene los valores singulares. La solución de los elementos de la matriz *cámara* \mathbf{C} es la última columna de la matriz V :

$$\begin{pmatrix} V_{1,12} & V_{2,12} & V_{3,12} & V_{4,12} \\ V_{5,12} & V_{6,12} & V_{7,12} & V_{8,12} \\ V_{9,12} & V_{10,12} & V_{11,12} & V_{12,12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

La matriz cámara resuelta permite la proyección de cualquier coordenada en la realidad sobre una imagen utilizando (2.13). Es posible entonces generar 4 puntos ficticios en el mismo plano y proyectarlos sobre la imagen por más que los puntos usados para la resolución de la ecuación (2.19) sean colocados en varios niveles en el espacio (Figura II.6). Los 4 nuevos puntos pueden ser luego utilizados para generar una nueva matriz de Homografía y establecer una relación biunivoque entre la realidad y su proyección.

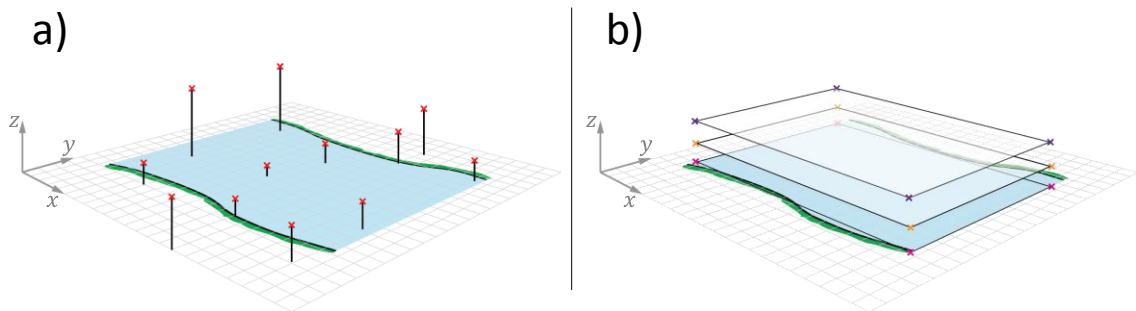


Figura II.6. Puntos de Control relevados en las tres dimensiones en todo el espacio de la realidad a). Puntos coplanarios (3 planos diferentes) generados con la ecuación (2.13).

II.5 USO DE SFM PARA LA GENERACIÓN DE PUNTOS DE CONTROL

La SFM, del inglés “Structure From Motion” es una técnica de estimación de estructuras tridimensionales a partir de secuencias de imágenes bidimensionales. En la visión biológica, se refiere a SFM como el fenómeno por el cual los seres humanos (y otros seres vivos) puede reconstruir las estructuras 3D a partir de sus proyecciones en 2D (retina del ojo) de un objeto en movimiento o escena. Si bien podría ser parte del estado del arte, en esta sección se explicará cómo se aprovecha la técnica al fin de generar una cantidad extremadamente alta de Puntos de Control en a partir de un modelo digital de terreno 3D (Westoby et al., 2012).

La SFM opera bajo los mismos principios básicos de la fotogrametría estereoscópica, es decir, que la estructura 3D se puede resolver a partir de una serie de solapamiento de imágenes (Figura II.7). Sin embargo, difiere fundamentalmente de la fotogrametría convencional, en que la geometría de la escena, las posiciones de cámara y la orientación se resuelve automáticamente sin la necesidad de especificar a priori, una red de blancos (targets) cuyas posiciones en el espacio son conocidas. En lugar de ello, éstos se resuelven simultáneamente usando un procedimiento de ajuste, iterativo y basado en una base de datos de características extraídos automáticamente de un conjunto de múltiples imágenes solapadas (Snavely, 2008). Como se describe a continuación, la técnica es más adecuada para conjuntos de imágenes con un alto grado de solapamiento que captura completamente la estructura tridimensional de la escena observada a partir de una amplia gama de posiciones, o como su nombre indica, las estructuras derivadas de un sensor de imagen en movimiento.

Desarrollada en la década de 1990, esta técnica tiene sus orígenes en la comunidad de la visión por ordenador (Boufama et al. 1993; Spetsakis y Aloimonos 1991; Szeliski y Kang 1993) y el desarrollo de algoritmos automáticos de patrones-coincidentes en la década anterior (Harris y Stephens 1988). La técnica se ha popularizado a través de los motores de procesamiento en la nube, más notablemente Microsoft Photosynth™ (Microsoft®, 2010) , que utiliza la técnica de SFM explicada en (Snavely, 2008) y (Snavely et al., 2008). Estas herramientas se pueden utilizar con fotografía directamente subidas por el usuario o/y de Cooperación Abierta Distribuida (o “crowd-sourcing”) para generar la cobertura necesaria de una escena y generar automáticamente las nubes de puntos 3D dispersas del juego de fotografías.

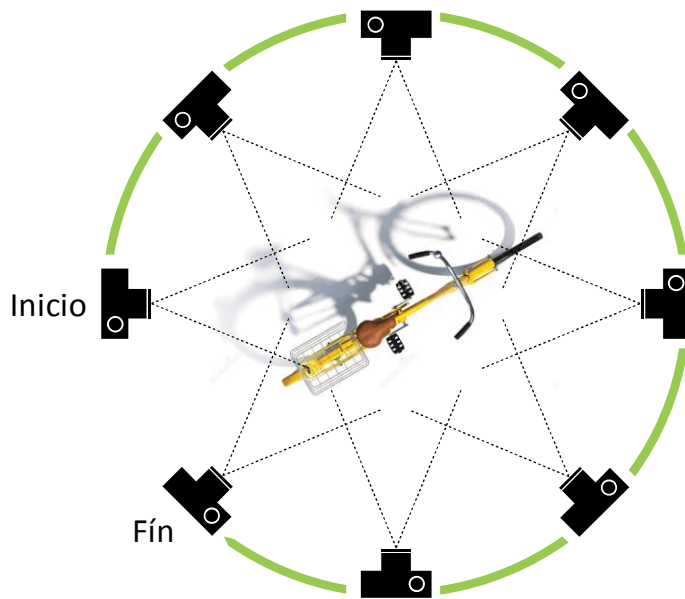


Figura II.7. Principio de SFM. En lugar de un par estéreo único, la técnica SFM requiere múltiples fotografías solapadas como entrada a los algoritmos de reconstrucción 3D.

Para determinar la ubicación 3D de los puntos dentro de una escena, los métodos tradicionales fotogramétricos requieren la ubicación 3D y orientación de la(s) cámara(s), o la ubicación 3D de una serie de puntos de control conocidos. En el primer caso, en ausencia de un GPS y brújula electrónica en la cámara, se puede utilizar la triangulación para reconstruir la geometría de la escena, en cambio, en el segundo caso, los puntos de control se identifican manualmente en las fotografías, y un proceso llamado “resección” se utiliza para determinar la posición de la cámara. En contraste, la técnica de SFM requiere ninguno del anterior para la reconstrucción de escenas. La posición y orientación de la cámara y la geometría de la escena se reconstruyen de forma simultánea a través de la identificación automática de patrones característicos en varias imágenes. Estos patrones característicos son rastreados de una a imagen a la otra, permitiendo las estimaciones iniciales de las posiciones de cámara y coordenadas de la escena, los cuales se refinan luego de forma iterativa utilizando la minimización no lineal de los mínimos cuadrados (ya que múltiples soluciones son posibles por la amplia gama de patrones característicos en la base de datos de imágenes (Snavely, 2008)).



Figura II.8 Ejemplo de modelo 3D generado con SFM a partir de un juego de imágenes de una misma escena

A diferencia de la fotogrametría tradicional, las posiciones de la cámara derivadas de SFM carecen de escala y de orientación proporcionadas por las coordenadas de puntos de control. En consecuencia, las nubes de puntos 3D se generan en un sistema de coordenadas relativo, que debe ser alineado a un sistema de coordenadas de la realidad. En la mayoría de los casos, la transformación de un sistema de coordenadas SFM a un sistema de coordenadas absolutas se puede lograr utilizando una transformación de similitud 3D basada en un pequeño número de “puntos de control de tierra” (GRP) cuyas coordenadas en la realidad son conocidas. En la práctica, lo más común es colocar objetivos materiales con un alto contraste y centroide claramente definido en el campo antes de la adquisición de imágenes. Esta metodología simplifica la alineación de las imágenes. También es útil para incorporar un grado de redundancia en la red de los GRP para contrarrestar la posibilidad de la escasez de datos en la escena de interés.

Idealmente, la generación de un modelo 3D generado con la técnica de SFM permite que cada pixel de las imágenes utilizadas sea asociado a una coordenada de la realidad. Lo cual duplica dramáticamente la cantidad de puntos para la resolución de la ecuación (2.13).

II.6 RECTIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados de procesamiento de PIV o PTV, expresados en pixel, son campos de desplazamiento o coordenadas de centroides respectivamente. Hemos visto que la matriz Homografía permite transformar coordenadas de la realidad ubicadas en un mismo plano a sus proyecciones en pixel, y viceversa. En el caso de PTV la rectificación de los centroides de partículas se efectúa utilizando directamente con la inversa de la matriz Homografía inversa como lo siguiente:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix} = H^{-1} \begin{pmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

En el caso de PIV disponemos de vectores de desplazamiento cuyos orígenes se encuentran sobre una grilla regular. La ecuación 2.22 permite la transformación de coordenadas y no de desplazamientos. Por lo tanto es necesario expresar los vectores de desplazamiento de PIV por sus coordenadas de origen y del extremo final:

$$\vec{x}_i^F = \vec{x}_i^O + \vec{d}_i \quad (2.23)$$

donde \vec{d}_i es el vector desplazamiento en pixel numero i de grilla, \vec{x}_i^O y \vec{x}_i^F son las coordenadas del origen y del extremo final de este vector respectivamente. Las coordenadas \vec{x}_i^O y \vec{x}_i^F son rectificadas con la ecuación 2.22 para obtener las coordenadas que definen el desplazamiento real en metro:

$$\begin{pmatrix} X_i^O \\ Y_i^O \\ 1 \end{pmatrix} = H^{-1} \begin{pmatrix} x_i^O \\ y_i^O \\ 1 \end{pmatrix} \quad \text{y} \quad \begin{pmatrix} X_i^F \\ Y_i^F \\ 1 \end{pmatrix} = H^{-1} \begin{pmatrix} x_i^F \\ y_i^F \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

donde \vec{X}_i^O y \vec{X}_i^F son las coordenadas rectificadas del origen y del extremo final respectivamente del desplazamiento real. El desplazamiento real \vec{D}_i se calcula entonces de la forma siguiente:

$$\vec{D}_i = \vec{X}_i^F - \vec{X}_i^O \quad (2.25)$$

CAPÍTULO III

VELOCIMETRÍA POR SEGUIMIENTO DE PARTÍCULAS A GRAN ESCALA (LSPTV) PARA FLUJOS CON SUPERFICIE LIBRE

III.1 INTRODUCCIÓN

Los ríos y los canales artificiales son cruciales para las actividades humanas. Los velocímetros mecánicos y los sensores acústicos, como los perfiles de corriente Doppler acústicos (ADCP), son la instrumentación típica utilizada para cuantificar caudales escurridos en sistemas fluviales. Estas técnicas son intrusivas y no pueden ser operadas de forma remota, por lo que no pueden utilizarse en caso de caudales máximos situación típica durante eventos extremos de inundación. Por otro lado, en la actualidad los sensores de imagen están evolucionando rápidamente, principalmente debido al uso masivo de dispositivos multimedia, por lo que es importante evaluar su potencial aplicación en varios campos, y particularmente para la cuantificación remota de velocidades de flujo superficial. El uso remoto de dispositivos de imagen puede también ofrecer varias ventajas sobre los sensores intrusivos tradicionales en caso de condiciones normales de descarga. Por ejemplo, en el caso de mediciones en corrientes muy poco profundas (Legout et al., 2012) o en flujos con transporte de sedimento importante (Jodeau et al., 2008).

En el campo de la Mecánica de Fluidos, la Velocimetría de Imagen de Partículas (PIV) es actualmente la técnica estándar para las mediciones de campos de velocidad de flujo turbulento en investigaciones experimentales de laboratorio (Adrian, 2005, 1997). Existen varios artículos que han intentado adaptar las técnicas PIV a las grandes escalas involucradas en las mediciones fluviales, en lo que se denomina Velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala (LSPIV) (Le Coz et al. 2014a; Creutin et al. 2003a; Detert y Weitbrecht 2015; Fujita y Muste 2011; Fujita et al. 1998; Gunawan et al. 2012; Kim et al. 2008; Muste et al. 2008). PIV y LSPIV difieren en las complejidades intrínsecas asociadas a mediciones de campo a gran escala, tales como iluminación variable, y la vista de cámara no ortogonal, que requieren una rectificación precisa de las imágenes. En la mayoría de los casos prácticos, la región de interés se distorsiona significativamente debido al ángulo de visión de la cámara.

Análogamente al PIV, la Velocimetría de Seguimiento de Partículas (PTV, Lloyd et al. (1995), Nezu y Sanjou (2011), Perkins y Hunt (1989) es también una técnica no intrusiva basada en imágenes que tiene como objetivo la cuantificación del movimiento de partículas trazadoras. PTV se utiliza para determinar la velocidad de partículas trazadoras individuales a lo largo de sus trayectorias (Baek y Lee 1996; Brevis et al. 2011), es decir, se utiliza un marco de referencia lagrangiano, mientras que PIV trabaja en un marco de referencia euleriano, es decir, se determina la velocidad de grupos de partículas trazadoras en posiciones fijas. Este capítulo presenta los detalles involucrados en el desarrollo y aplicación de herramientas para la estimación de las

velocidades de flujo de flujos a superficie libre basados en la Velocimetría por Seguimiento de Partículas a Gran Escala (LSPTV). El método presenta varias ventajas en comparación con la técnica LSPIV, y se discuten en este capítulo.

Durante los últimos años se han desarrollado muchos programas PIV de código abierto. Entre ellos, OpenPIV y PIVlab (Thielicke y Stamhuis 2014b) están entre los más populares. Hasta donde el autor conoce, a pesar de que algunas herramientas han sido desarrolladas para el análisis de procesos hidráulicos usando LSPIV (Bechle y Wu 2014; Detert y Weitbrecht 2015; Yu et al. 2015), sólo una está disponible actualmente (Jérôme Le Coz et al., 2014b), y ninguna está disponible para LSPTV. Este capítulo detalla los aspectos involucrados en una aplicación a gran escala de PTV (LSPTV) e introduce dos paquetes computacionales de código abierto: *PTVlab*, que proporciona una interfaz gráfica de usuario (GUI) al algoritmo de seguimiento de partículas introducido por Brevis et al. (2011) y *RIVeR* (Rectificación de Resultados de Velocimetría de Imagen, presentado en el capítulo anterior) utilizados para la rectificación de los resultados. En primer lugar, la detección del trazador y la solución del problema de la correspondencia temporal se realizan con *PTVlab*. Esta herramienta se basa en la interfaz gráfica de usuario desarrollada para *PIVlab*, por lo que permite operaciones similares como la definición de la región de interés, el procesamiento previo de imágenes, etc. Una vez finalizado el proceso PTV, los resultados se exportan a *RIVeR* para corregir errores en la determinación del campo de velocidad de flujo causadas, por ejemplo, por distorsiones de la lente o por el registro no ortogonal del movimiento del trazador. Todo el proceso se lleva a cabo con dos paquetes computacionales para mantener *PTVlab* como una herramienta genérica para actividades de laboratorio y de campo, y porque *RIVeR* permite el post-procesamiento de los resultados obtenidos de *PIVlab* (Thielicke y Stamhuis 2014a), haciendo así el paquete *PIVlab* adecuado para LSPIV.

III.2 PAQUETE COMPUTACIONAL PTVLAB PARA VELOCÍMETRÍA POR SEGUIMIENTO DE PARTÍCULAS A GRAN ESCALA

Históricamente, los algoritmos utilizados en la implementación de PTV y PIV fueron diseñados originalmente para experimentos bien controlados en laboratorios, donde todas las fuentes de luz son relativamente constantes durante las mediciones. En la mayoría de las aplicaciones de laboratorio un láser ilumina la región de interés y una cámara se utiliza para capturar el movimiento de las partículas trazadoras. Debido a la corta exposición del sensor a la luz, las imágenes se caracterizan normalmente por un alto contraste entre la luz dispersada por las partículas y el fondo. Desde un punto de vista computacional, siempre es más rápido procesar imágenes en escala de grises que las imágenes en color compuestas por capas Rojas, Verdes y Azules (RGB). La mayoría de las cámaras comerciales utilizadas para implementar a gran escala SLPIV o LSPTV registran imágenes en color. PTVlab permite al usuario extraer imágenes de un vídeo RGB y transformarlas en imágenes en escala de grises con el paquete computacional libre y abierto ffmpeg (FFmpeg, 2015).

DEFINICIÓN DE LA REGIÓN DE INTERÉS

La Región de Interés (ROI) es una subárea del área total registrada por la cámara. El ROI puede reducirse al mínimo para reducir el costo computacional de procesamiento y debe definirse para todos los cuadros que se van a analizar (Figura III.1a).

Velocimetría por seguimiento de partículas a gran escala (LSPTV) para flujos con superficie libre

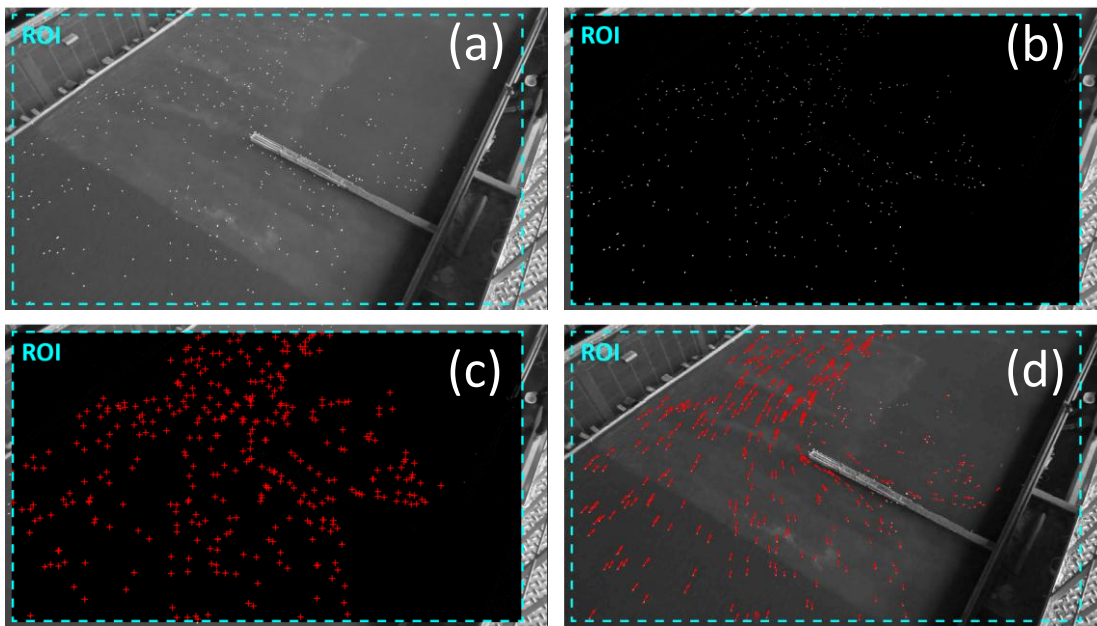


Figura III.1 PTVlab: (a) Las imágenes han sido extraídas de un video registrado en un modelo físico. Las imágenes se convirtieron a escala de grises y se importaron al paquete computacional. El recuadro de línea de puntos representa la región de interés ROI. (b) Imagen instantánea del video registrado en el modelo físico después de la sustracción de fondo, sólo se observan las partículas de poliestireno en movimiento. (c) Detección de centroides de partículas en el ROI definido utilizando el algoritmo de máscara gaussiana. (d) Vectores de velocidad instantánea, que corresponden al resultado de la coincidencia de pares de partículas desde una imagen a la siguiente.

PREPROCESAMIENTO DE LA IMAGEN

Las imágenes registradas en una medición a gran escala son mucho más ruidosas que las típicas imágenes registradas en un laboratorio utilizando la iluminación láser. El ruido puede reducirse restando el promedio de todas las imágenes de todos los fotogramas instantáneos de la serie (Figura III.1b). En otras palabras, todo lo que permanece estancado en la imagen se supone que es una fuente de sesgo y se elimina (Honkanen y Nobach 2005).

DETECCIÓN DEL CENTROIDE DE LAS PARTÍCULAS

Para la detección de las partículas, 3 parámetros deben ser establecidos por el usuario. Se supone que el patrón de brillo de la imagen de una partícula presenta una distribución gaussiana en dos dimensiones. El método de correlación de la máscara de partículas (Takehara y Etoh 1998) se utiliza para detectar centroides de partículas: una imagen de partículas de referencia "ideal" es definida por el usuario a través de los parámetros σ y a , que definen la forma de la máscara de partículas, donde σ es el radio representativo de una partícula, y a es un umbral de brillo del pico. Cada imagen se escanea y se detecta una partícula cuando la correlación entre la imagen de partícula de referencia y un área de la imagen actual es mayor que un valor también definido por el usuario (Figura III.1c). Basado en estas suposiciones, este algoritmo es adecuado para partículas circulares que todas tienen un diámetro similar y el valor R lo hace flexible. El usuario también puede seleccionar algoritmos alternativos tanto para el preprocesamiento de imágenes como para la detección de centroides de partículas.

CORRESPONDENCIA TEMPORAL DE PARTÍCULAS

Al igual que en la etapa anterior, esta es una etapa importante en el análisis PTV y tiene una fuerte influencia en la calidad y cantidad de la información espacio-temporal recuperada. PTVlab permite la selección de los 3 algoritmos (2 más 1 que los combina) descritos e introducidos por Brevis et al. (2011): a) correlación cruzada estándar (CC); b) algoritmos de métodos de relajación (RM) y; c) el algoritmo ICCRM híbrido integrado. (RM) y (ICCRM) son adecuados cuando la densidad de partículas es alta y el flujo es altamente dinámico. Así, en la mayoría de los casos de Gran Escala, (CC) es el más eficiente y se describe a continuación.

El algoritmo de correlación cruzada se caracteriza por su rápida ejecución. El desplazamiento asociado con una partícula se encuentra utilizando el coeficiente de correlación cruzada (R) más alto obtenido después de comparar una matriz de intensidad de referencia en la primera imagen y un conjunto de sub-matrices en la segunda (Figura III.2).

La matriz de referencia se extrae de la ventana de interrogación en el cuadro 1 que está centrado en una partícula candidata "i" cuya posición es \vec{x}_i . El tamaño de las ventanas de interrogación lw es determinado por el usuario y se supone que el desplazamiento de las partículas está dentro de esta distancia. Las partículas candidatas son la partícula cuyos centroides están dentro de la ventana de interrogación proyectada en la imagen 2. Las submatrices están centradas en cada una de las

partículas candidatas $j(i)$ cuyas posiciones son $\vec{y}_{j(i)}$. El desplazamiento asociado \vec{U}_i de una partícula “ i ” está determinado por:

$$\vec{U}_i = (\vec{y}_{j(i)} - \vec{x}_i) / \Delta t$$

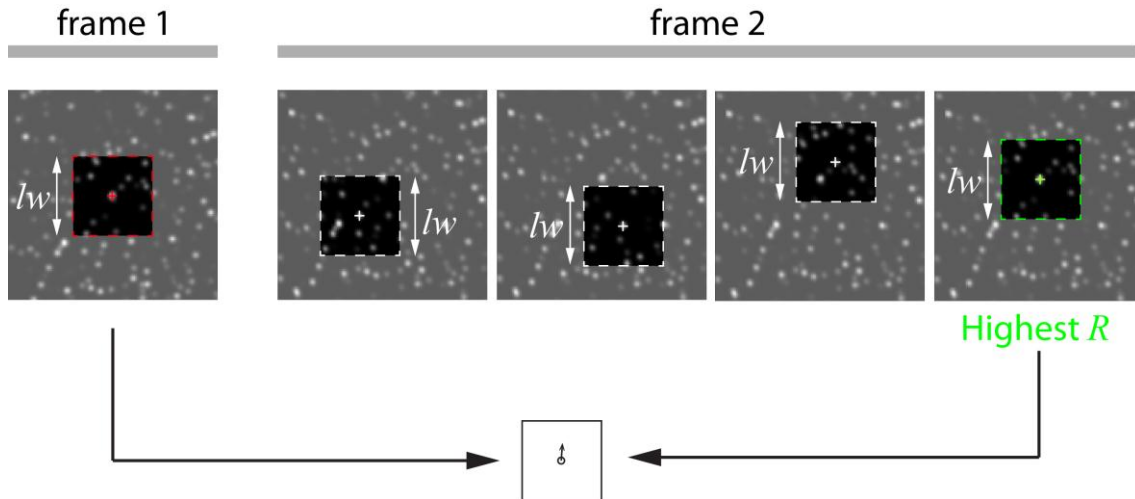


Figura III.2 Fundamentos de correlación cruzada. Se aplica la función de correlación cruzada entre La matriz de referencia y la ventana de interrogación de cada partícula candidata. El desplazamiento asociado a una partícula i se determina se encuentra el valor más alto de correlación cruzada C .

La Figura III.1d muestra los resultados de la correspondencia de pares usando (CC) en PTVlab entre dos imágenes sucesivas de nuestro ejemplo. Los vectores indican la magnitud y la dirección de cada desplazamiento de partículas en [píxel / fotograma]. La conversión en [m / s] no es posible ya que los resultados deben ser rectificadas. Una vez que el análisis se ha hecho para todas las imágenes, la sesión PTVlab con todos los resultados se exporta a RIVeR.

III.3 ORTORECTIFICACIÓN Y POSTPROCESAMIENTO DE RESULTADOS DE LSPTV UTILIZANDO EL PAQUETE COMPUTACIONAL RIVER

La transformación de coordenadas de centroides de partículas en coordenadas del mundo real es mucho más rápida que la corrección de toda la imagen. En esta etapa del procesamiento con LSPTV se utiliza un paquete computacional desarrollado en esta tesis y que será explicado en detalle en el próximo capítulo. Básicamente, el paquete computacional llamado RIVER tiene como objetivo vincular el sistema de coordenadas del mundo real con su proyección 2D en el plano de la imagen. Para rectificar los resultados del procesamiento de la imagen, 4 puntos de control o de referencia deben estar bien definidos. Una de las características especiales de RIVER es la entrada de longitudes entre los 4 puntos de control (CP) no alineados en el mismo plano que son necesarios para la rectificación de resultados. Generalmente se requiere un GPS diferencial o una estación topográfica para la medición de coordenadas del mundo real, especialmente si se miden más de 4 PC. Sin embargo, estos instrumentos hacen que la implementación de LSPTV sea más costosa. Se mostrará que, en algunos casos, es decir, pequeños ríos o modelos físicos, la medida de no más de 4 PC es la opción más eficiente, y en esos casos una cinta métrica puede ofrecer suficiente. Dado que es difícil asignar coordenadas a los CPs con una cinta métrica, se miden las distancias entre cada uno de los 4 CP (6 distancias incluyendo las diagonales). La Figura III.3 muestra la interfaz de usuario. En el ejemplo 4 las CP se definen midiendo simplemente las distancias entre ellas. Se rectifica una sola imagen y se utiliza como fondo para que los resultados se superpongan (Figura III.4). Los resultados instantáneos y promediados se interpolan en una malla regular definida por el usuario sobre la base del número de nodos en ambas direcciones.

Velocimetría por seguimiento de partículas a gran escala (LSPTV) para flujos con superficie libre

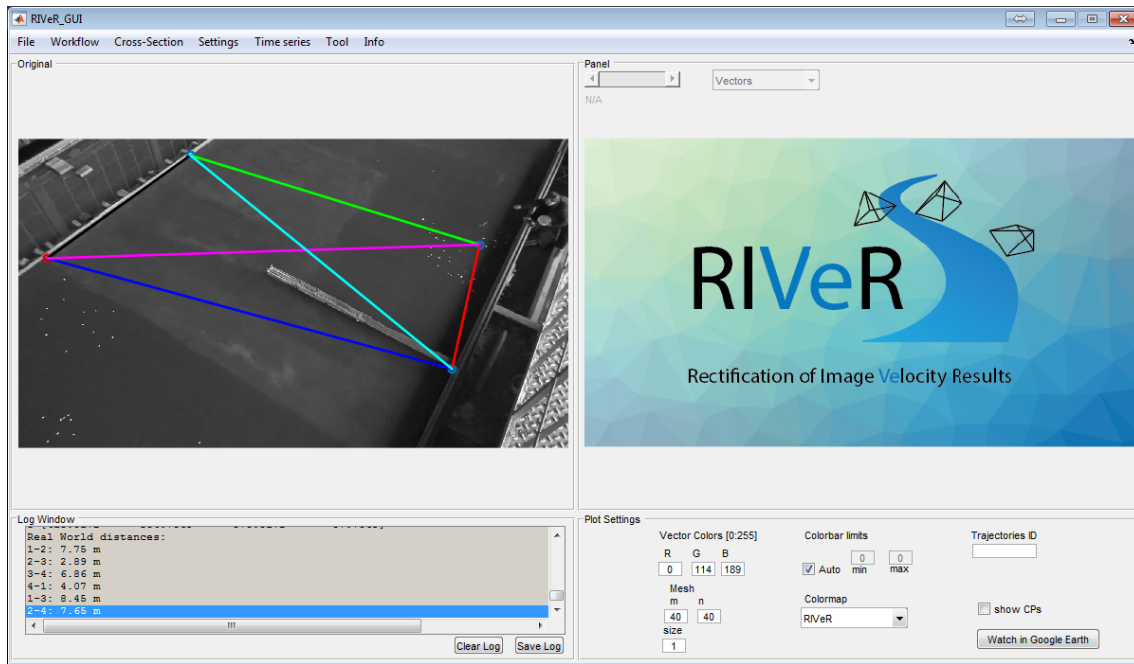


Figura III.3 RIVeR: Distancias entre los 4 CPs definidos en el modelo físico (azul, verde, rojo, negro, cian y magenta).

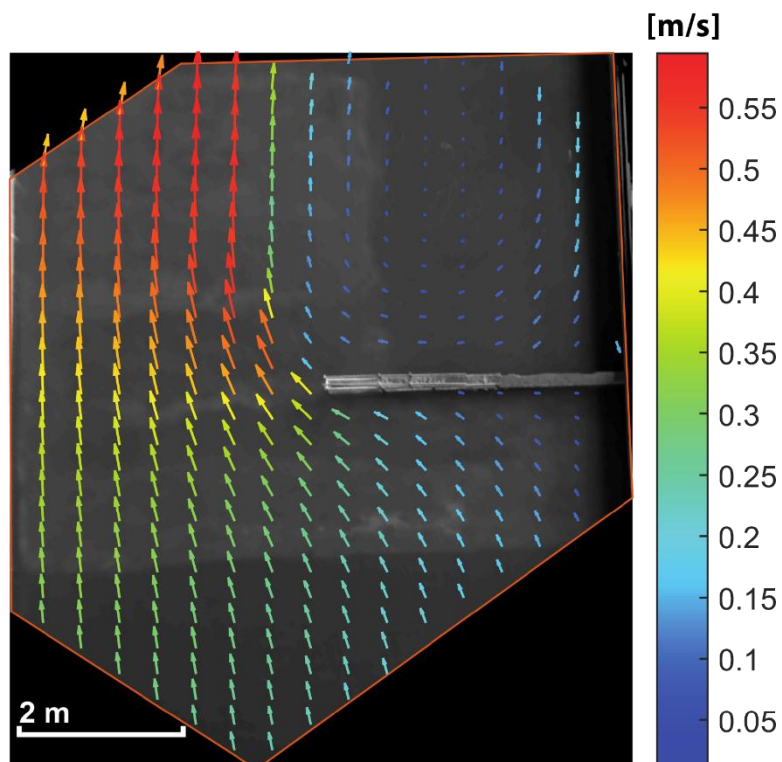


Figura III.4 Imagen rectificada utilizada como "imagen de fondo" para los resultados superpuestos del campo de velocidad media y la escala

Todos los resultados de PTVlab se rectifican y se muestran sobre la imagen de fondo rectificada, incluyendo las trayectorias individuales de las partículas (Figura III.5). Además, todos los resultados se interpolan sobre una malla regular, por lo que se pueden calcular los valores medios de los componentes de velocidad; así los resultados son exportables.

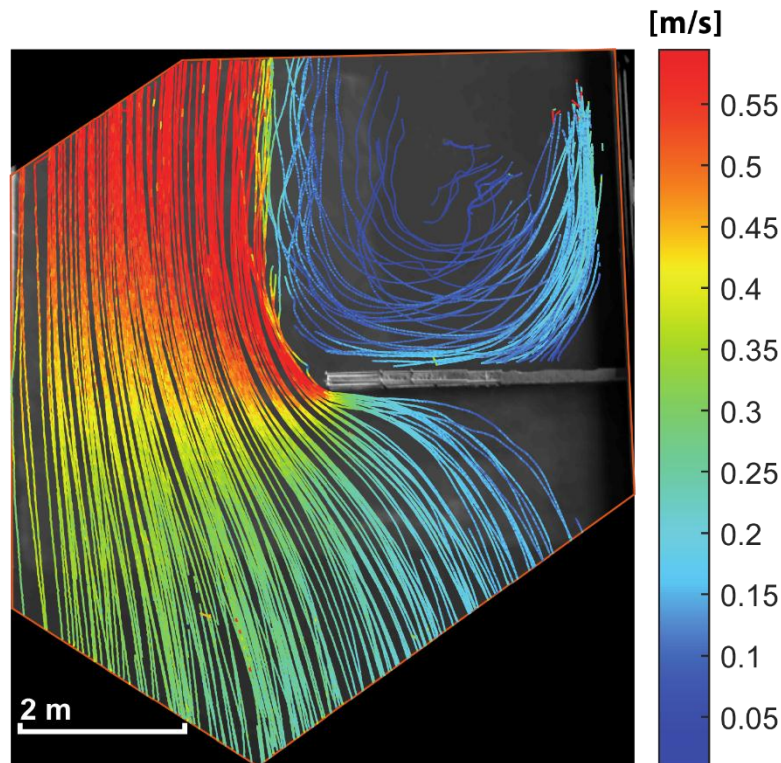


Figura III.5 RIVeR: Algunas de las trayectorias rectificadas y la magnitud de la velocidad en [m / s] de las partículas trazadoras sembradas en el modelo físico

En el siguiente ejemplo, la técnica LSPTV se utiliza para la caracterización del flujo en un corte de meandro representado en un modelo físico de lecho móvil del río Morava en Eslovaquia. El modelo ha sido presentado en (Le Coz et al., 2010a) como parte de un estudio experimental sobre la morfodinámica a la salida de un meandro abandonado. En este ejemplo particular, la salida del meandro está conectada al canal principal y la entrada aguas arriba está cerrada (Figura III.6). Esta es una situación común para muchos meandros durante las inundaciones ordinarias, ya que la frecuencia de inundación suele ser mucho mayor en la salida que la entrada. Este estudio de caso es un desafío para LSPTV debido a las direcciones de flujo heterogéneo y magnitudes y la distribución heterogénea de trazadores en el espacio y el tiempo, ya que requiere para procesar el giro y las principales áreas del canal por separado, a continuación, combinar los resultados. Le Coz et al. (2010a) tuvieron que usar filtros con medidas LSPTV para eliminar los resultados espurios obtenidos donde y cuando faltaban los trazadores.

Velocimetría por seguimiento de partículas a gran escala (LSPTV) para flujos con superficie libre

El video fue adquirido con un camescopio mini-DV (CanonMv750i) con una resolución de 720x576 píxeles a 25 cuadros por segundo durante 60s y las imágenes fueron extraídas a 25Hz. La superficie libre de flujo se sembró con papel flotante confeti (diámetro ~ 1 cm). Estas partículas son adecuadas para el algoritmo de detección de partículas descrito previamente. Las imágenes fueron procesadas con PTVlab siguiendo los pasos explicados en este capítulo y las trayectorias rectificadas con 4 CPs que pertenecían a una cuadrícula colocada sobre el modelo físico. Los resultados se pueden ver en la Figura III.6. La formación de una recirculación se evidencia bien en la boca del canal de baja velocidad.

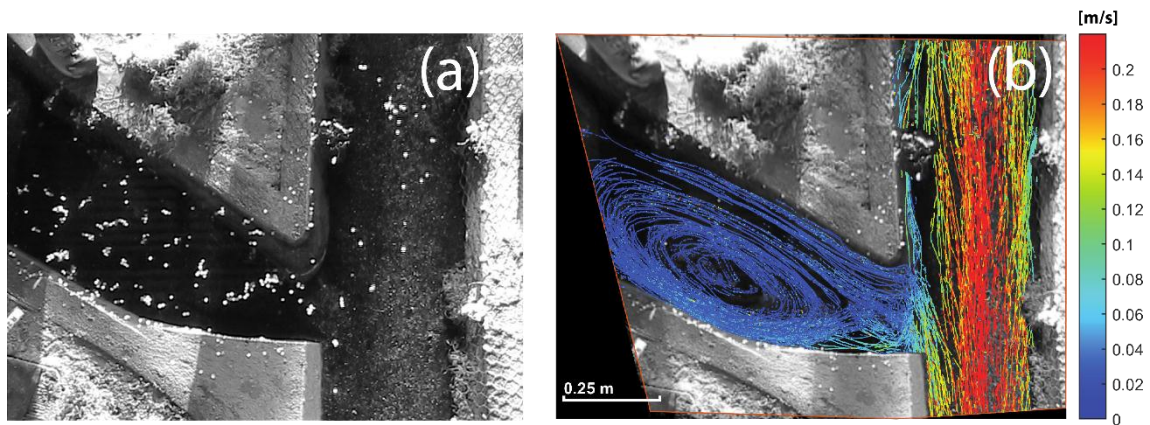


Figura III.6 (a) Imagen instantánea no rectificada de la boca de salida, el canal principal se ubica en la parte izquierda de la imagen. (b) Trayectorias de las partículas sobre una imagen de fondo, el color corresponde a la magnitud de la velocidad (m/s).

CAPÍTULO IV

RECTIFICACIÓN DE RESULTADOS DE VELOCIMETRÍA POR IMÁGENES DIGITALES. RIVER: UN PAQUETE COMPUTACIONAL SIMPLE Y FÁCIL DE USAR PARA LAS TÉCNICAS VELOCIMETRÍA POR IMAGEN DE PARTÍCULAS (PIV) Y LA VELOCIMETRÍA POR SEGUIMIENTO DE PARTÍCULAS (PTV).

El contenido del siguiente capítulo corresponde a un artículo en revisión en la revista del “Computers and Geosciences” como:

Patalano, A., García, C. M., Rodríguez, A. “Rectification of Image Velocity Results (RIVeR): a simple and user-friendly toolbox for large scale water surface Particle Image Velocimetry (PIV) and Particle Tracking Velocimetry (PTV)”, Computers and Geosciences.

IV.1 INTRODUCCIÓN

La Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV) ha sido ampliamente utilizada en hidráulica durante más de 30 años en experimentos de laboratorio (Adrian, 2005, 1991, 1984). Desde la década de 1980, varios investigadores han intentado adaptar las técnicas de PIV para caracterizar escalas más grandes que las de laboratorio, incluyendo las mediciones de campo, denominándolas Velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala (LSPIV) (Creutin et al., 2003b; Fujita et al., 1998; Gunawan et al., 2012; Jérôme Le Coz et al., 2014a; Muste et al., 2008). Principalmente LSPIV se ha utilizado para el análisis de la velocidad superficial del agua y la estimación de la descarga en ríos. La principal diferencia entre PIV (pequeña escala) y LSPIV (escala grande) son las escalas de flujo de interés. PIV y LSPIV también difieren en las complejidades asociadas a mediciones de campo a gran escala, tales como iluminación variable, y la accesibilidad limitada a vistas de cámara ortogonales. Las vistas de cámara ortogonales requieren una rectificación geométrica precisa de las imágenes o resultados de velocidad para superar las apreciables distorsiones producidas por el ángulo de visión de la cámara. Similar a PIV, la Velocimetría por Seguimiento de Partículas (PTV) también es una técnica no intrusiva basada en imágenes, pero PTV se utiliza para determinar la velocidad asociada con partículas individuales (trazadores) a lo largo de sus trayectorias (Baek y Lee 1996; Brevis et al. 2011; Lloyd et al. 1995; Perkins y Hunt 1989). Esta técnica (PTV) se aplica en un marco de referencia Lagrangiano, una diferencia importante con el enfoque PIV estándar, que se aplica en un marco euleriano, por ejemplo, determinando la velocidad de los grupos de partículas trazadoras en posiciones espaciales fijas.

Se han desarrollado varias herramientas computacionales gratuitas durante los últimos 5-10 años para el análisis de PIV (por ejemplo, OpenPIV, Taylor et al., 2010 o PIVlab, Thielicke y Stamhuis, 2014) o análisis de PTV (por ejemplo, OpenPTV, Liberzon y Meller, 2013 o PTVlab, Patalano et al., 2013). Sus Interfaces Gráficas de Usuario (GUI) de uso fácil contribuyeron para que las técnicas de velocimetría no

Rectificación de resultados de velocimetría por imágenes digitales.
RIVeR: un paquete computacional simple y fácil de usar para las técnicas PIV y PTV.

intrusivas por imágenes digitales bidimensional y tridimensional sean fácil de usar para experimentos de laboratorio.

Basándose en las herramientas y técnicas descritas anteriormente, se ha desarrollado un nuevo y sencillo programa computacional para complementar estas herramientas y técnicas para la caracterización de flujos de agua superficiales a gran escala. La recopilación bibliográfica desarrollada por el autor de esta tesis muestra que hasta el momento, se han desarrollado pocas técnicas para la aplicación de análisis LSPIV con fines hidráulicos (Bechle y Wu 2014; Detert y Weitbrecht 2015; y Yu et al. 2015). Actualmente (2016), sólo una técnica está disponible públicamente (Jérôme Le Coz et al., 2014a), y no hay software alternativo disponible para LSPTV. El objetivo de este capítulo es: a) describir el sistema implementado en el programa computacional RIVeR (rectificación de resultados de velocimetría por imágenes digitales por sus siglas en inglés) para la caracterización de flujo superficial a gran escala; b) describir la primera versión operativa disponible del programa computacional RIVeR; y c) discutir varias aplicaciones de las técnicas y de los programas computacionales.

Vale aclarar que la herramienta que se presenta a continuación no es un producto de ingeniería de software y es desprovisto de la normativa necesaria para considerarla como tal.

IV.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA IMPLEMENTADO EN RIVeR

RIVeR es una aplicación autónoma desarrollada en el Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA) de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, a partir de 2013. Esta aplicación es gratuita y desarrollada en Matlab®. RIVeR se ha desarrollado con el fin de proporcionar una caracterización experimental de flujos de agua a superficie libre a gran escala en ríos, canales artificiales (por ejemplo, riego, plantas de tratamiento y otros) y/o grandes - modelos físicos hidráulicos. La caracterización mencionada incluye la determinación de velocidades de flujo y trayectorias y estimación de caudales. En la actualidad (2016), las técnicas de análisis utilizadas en PIV / PTV clásico se actualizan y mejoran constantemente con nuevos algoritmos, pero no están adaptadas para el análisis a gran escala ya que a gran escala las imágenes capturadas son oblicuas e inducen deformaciones y los resultados necesitan ser rectificadas. Así, RIVeR se ha desarrollado como un complemento a los sistemas de análisis disponibles para producir un eficiente análisis a gran escala. En la Figura IV.1 se muestra un diagrama de flujo del sistema de análisis a gran escala implementado en RIVeR. Los módulos en azul son partes del paquete computacional

RIVeR, que se desarrolla en Windows 7 y 10 con Matlab® (release 2015a); Los módulos en negro representan el procesamiento de imágenes en PIVlab y PTVlab. El sistema de análisis a gran escala presentado aquí está diseñado para ser fácil de usar, bajo costo y flexible. Para cumplir con estos requisitos, se aplica la siguiente estrategia de desarrollo:

- Separar la adquisición del vídeo, el procesamiento de imágenes y las tareas de rectificación para que el sistema sea independiente de la cámara y la técnica de procesamiento de la imagen.
- Uso de herramientas computacionales gratuitas y actualizadas.
- Desarrollar una interfaz sencilla y fácil de usar que permita que el sistema sea utilizado por científicos, profesionales y técnicos sin capacitación avanzada en informática.

El sistema de análisis a gran escala presentado aquí se compone de tres o cuatro módulos principales, dependiendo del resultado deseado: Extracción de imágenes, procesamiento de imágenes, rectificación de resultados y cálculo del caudal (opcional).

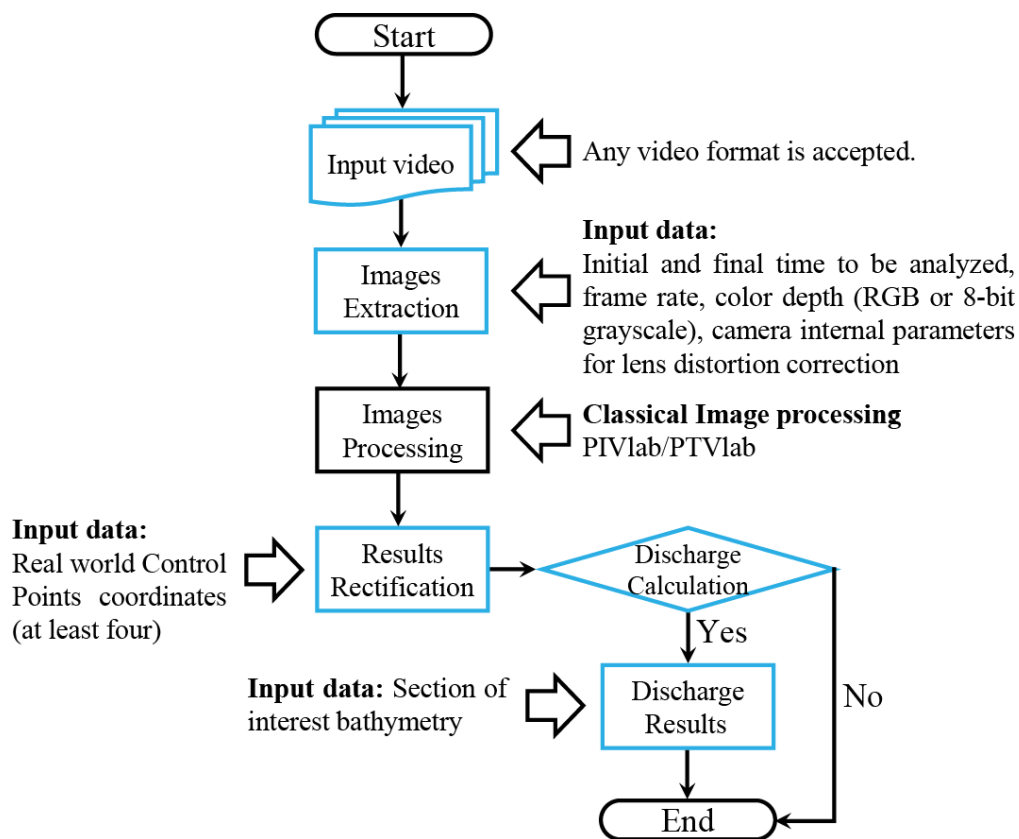


Figura IV.1 Diagrama de flujo del sistema de análisis de gran escala. Los módulos en azul forman parte de la caja de herramientas RIVeR.

Rectificación de resultados de velocimetría por imágenes digitales.
 RIVeR: un paquete computacional simple y fácil de usar para las técnicas PIV y PTV.

MÓDULO DE EXTRACCIÓN DE IMÁGENES

Las imágenes registradas en escala de grises de 8 bits se extraen de un vídeo a través de la interfaz de usuario de RIVeR (Figura IV.2) con el paquete computacional multimedia gratuito, ffmpeg (FFmpeg, 2015).

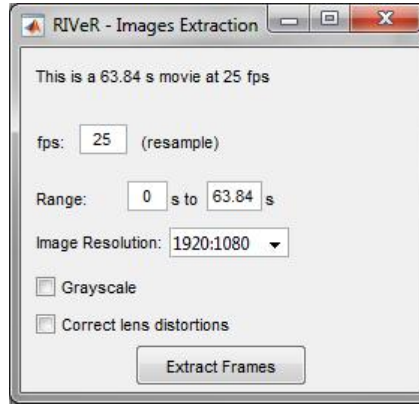


Figura IV.2 Muestra de la interfaz de usuario de RIVeR para la extracción de imágenes

El módulo contiene bibliotecas y sus desarrolladores afirman que "soporta los formatos de vídeo antiguos más oscuros hasta la actualidad" (FFmpeg, 2015). En este paso, la frecuencia de cuadros del video puede ser remuestreada, si es necesario, considerando que la frecuencia de muestreo es demasiado alta para el rango de velocidad de flujo que se analizará. También se puede aplicar una corrección de lente opcional si la cámara utilizada para el registro del vídeo se ha calibrado previamente para obtener los parámetros internos de ajuste. El modelo que corrige esta distorsión (Heikkilä y Silvén 1997) es una subrutina basada en Matlab® que también se presenta en el trabajo realizado por Taborda y Silva (2012). La subrutina es descrita a continuación:

$$\begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ 1 \end{pmatrix} = KK \begin{pmatrix} X_d \\ Y_d \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (4.1)$$

donde

$$KK = \begin{pmatrix} f_{cx} & \alpha_0 * f_{cx} & c_{cx} \\ 0 & f_{cy} & c_{cy} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (4.2)$$

donde X_p, Y_p y X_d, Y_d representan las coordenadas de un punto en el sistema de coordenadas distorsionado y no distorsionado, respectivamente, f_{cx} y f_{cy} son la longitud focal en las direcciones x e y, respectivamente, c_{cx} y c_{cy} representan las coordenadas del centro de la imagen, y α_0 es el coeficiente de asimetría que define el ángulo entre los ejes x e y. KK se obtiene de varias imágenes registradas de un tablero de ajedrez de dimensiones conocidas con la subrutina de calibración de cámara (Vision Caltech, 2009).

MÓDULO DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

Como se ha descrito anteriormente, la etapa descrita aquí es parte del sistema de análisis a gran escala, pero se realiza fuera de paquete computacional RIVeR. Las secuencias se muestran en la Figura IV.3 y se describen a continuación. Se aclara que el propósito de este documento no es describir los diferentes algoritmos utilizados fuera RIVeR, sino que se describe una nueva técnica de procesamiento a gran escala. Las imágenes previamente extraídas se procesan utilizando PIVlab o PTVlab con algoritmos avanzados de última generación, incluyendo pre-procesamiento y mejora de imagen. El uso del análisis PIV o PTV para la serie de imágenes dependerá de la información deseada y del número y tipo de trazadores utilizados en la superficie del agua. PIV se utiliza en un marco euleriano si la determinación del campo de velocidad media es el objetivo principal del análisis (por ejemplo, para la estimación de caudales) y si los trazadores naturales (por ejemplo, trazadores naturales como espuma, ramas de árboles y estructuras coherentes en la superficie del agua) o trazadores agregados al flujo (virutas de madera u otro material ecológicamente inofensivo y biodegradable) se distribuyen homogéneamente y densamente sobre la superficie del agua. De lo contrario, si la densidad del trazador es escasa y se requieren trayectorias individuales, (por ejemplo, para la caracterización del campo de velocidad de flujo cerca de estructuras hidráulicas) entonces PTV debería ser usado en un marco de análisis lagrangiano.

Rectificación de resultados de velocimetría por imágenes digitales.
RIVeR: un paquete computacional simple y fácil de usar para las técnicas PIV y PTV.

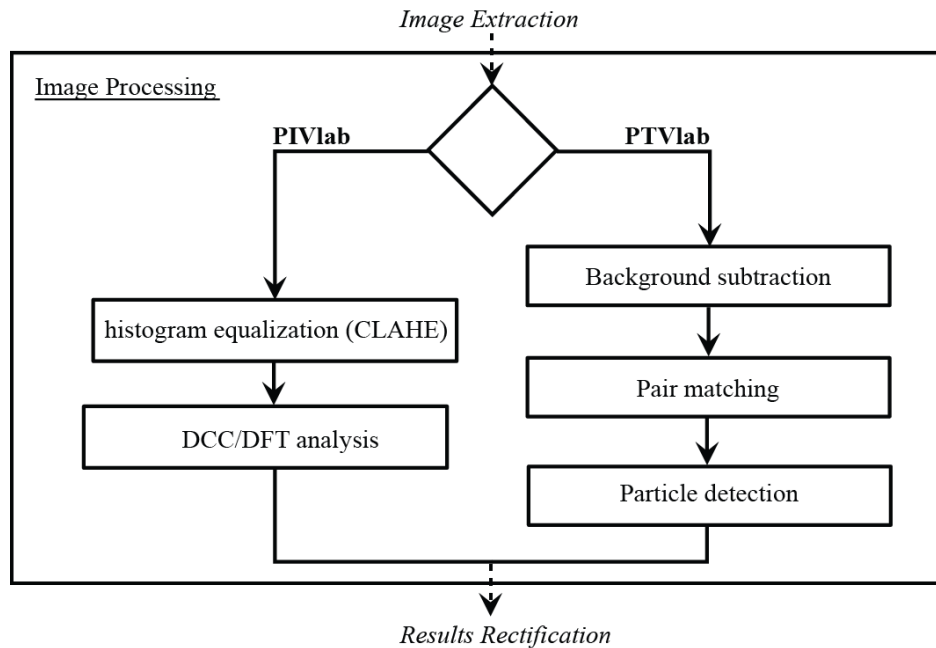


Figura IV.3 Diagrama de flujo de las sub secuencias de procesamiento clásico de imágenes con PIVlab o PTVlab

Para el análisis de PIV, se ha utilizado PIVlab, que integra algunos filtros que mejoran el procesamiento de imágenes, como la ecualización adaptable del histograma (CLAHE). Este filtro extiende los histogramas de intensidad al rango de datos completo (de 0 a 255 en imágenes de 8 bits) y opera en pequeñas áreas de la imagen (Pizer et al., 1987). Este filtro se aplica para mejorar la probabilidad de detectar vectores válidos en imágenes experimentales. El desplazamiento de píxeles se puede calcular con el robusto algoritmo de correlación de correlación directa (DCC) (Stamhuis, 2006) o con la transformada discreta de Fourier (DFT), que calcula la matriz de correlación en el dominio de frecuencia usando FFT (Raffel et al., 2007). El algoritmo DFT es multi-paso y utiliza ventanas deformadas de un paso al paso siguiente con el fin de mejorar la alta resolución espacial en el mapa vectorial final. Para ambos algoritmos de desplazamiento de píxeles, cuando se conoce el número entero que indica la localización de pico en la matriz de correlación, se puede ajustar una función gaussiana a la distribución de intensidad para obtener el desplazamiento de subpíxeles.

PTVlab se ha utilizado para el análisis PTV. Con el fin de mejorar la detección de centroides de partículas, se puede usar una etapa preliminar para eliminar el fondo de la imagen. Cualquier parte de la imagen sin movimiento quedará en negro. Los resultados deseados de este paso es que minimiza el ruido de fondo en la imagen (Honkanen y Nobach 2005). El algoritmo de máscara gaussiana se utiliza para la detección de centroides de partículas. El algoritmo busca partículas en la imagen que coincidan con una máscara definida con Cross-Correlation (Takehara et al., 2000). El

algoritmo de emparejamiento en PTVlab utiliza las posiciones de las partículas para calcular el desplazamiento de cada partícula de una imagen a la imagen siguiente con el algoritmo Cross-Correlation (CC) o el algoritmo CC-Relaxation combinado descrito en Brevis et al. (2011).

Los resultados de PIVlab y PTVlab son desplazamientos en píxeles y la sesión de resultados Matlab® debe ser exportada. Los cálculos resultantes consisten en matrices o vectores de desplazamiento para cada par de imágenes analizadas. Para ambos algoritmos de desplazamiento de píxeles, cuando se conoce el número entero que indica la localización del pico en la matriz de correlación, se puede ajustar una función gaussiana a la distribución de intensidad para obtener el desplazamiento de subpíxeles.

MÓDULO DE RECTIFICACIÓN DE RESULTADOS

Después del procesamiento clásico de imágenes bidimensionales, el paquete computacional RIVeR se usa de nuevo para rectificar los resultados a gran escala. En la versión actual del paquete computacional (v2.1), la entrada soportada son sesiones de resultados de Matlab® de PIVlab o PTVlab. La Rectificación de resultados es el módulo principal de RIVeR y representa el mayor desarrollo de este capítulo. Básicamente, este paso relaciona directamente el sistema de coordenadas del mundo real con su proyección bidimensional en las imágenes. En el siguiente enfoque, se supone que la superficie del agua del área de interés analizada en el paso anterior representa el plano que será rectificado. El plano no tiene que ser horizontal porque, en algunos casos puede ser inclinado, pero la rugosidad superficial debe ser lo suficientemente pequeña para que pueda considerarse como plana.

La matriz C denominada de la cámara incluye tanto los parámetros intrínsecos de la cámara como los parámetros extrínsecos (posición y rotación de la cámara), que dependen únicamente de la cámara, como la distancia focal, el zoom de la cámara y la escala de píxeles. Este enfoque establece una relación directa y única que proyecta coordenadas del mundo real al sistema homogéneo de imagen (Corke, 2011):

$$\begin{pmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ \tilde{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (4.3)$$

donde \tilde{x} , \tilde{y} , y \tilde{z} son los componentes de las coordenadas homogéneas de la imagen y X , Y , y Z son las coordenadas cartesianas del mundo real. Las coordenadas de la imagen en un sistema cartesiano se calculan como:

$$x = \frac{\tilde{x}}{\tilde{z}} \quad y = \frac{\tilde{y}}{\tilde{z}}, \quad (4.4)$$

En el siguiente enfoque, se supone que la superficie del agua del área de interés analizada en el paso anterior representa el plano que será rectificado. Por lo tanto, los componentes Z en la ecuación (1) pueden ser ignorados y la matriz de cámara C se reduce a la matriz de homografía H (Corke, 2011) y se da como la ecuación (2) a continuación.

$$\begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} \\ H_{31} & H_{32} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_r \\ Y_r \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (4.5)$$

Mientras que el vector en el lado izquierdo de la ecuación (2) representa las coordenadas del mundo real, el vector en el lado derecho representa la proyección de la imagen en coordenadas del mundo real, y H es la matriz de homografía. Así, H tiene ocho incógnitas que pueden ser resueltas conociendo las coordenadas (X_r, Y_r) de sólo cuatro Puntos de Control (CPs), también conocidos como Puntos terrenos de Referencia que están en el mismo plano. El plano $z = 0$ es elegido como la superficie del agua. Por lo tanto, para rectificar los resultados del procesamiento de imagen, al menos cuatro CP conocidos deben definirse en el plano de la superficie del agua. Cabe señalar que los CP no deben alinearse. En RIVeR, la matriz H de homografía se calcula utilizando la aplicación informática de código abierto Camera Calibration Toolbox para MATLAB®, desarrollada por Vision Caltech (2009). Entonces, una vez que una sesión PIVlab / PTVlab (incluyendo los resultados) se importa en RIVeR, los resultados se ortorectifican usando la ecuación (2). Mientras que la matriz de cámara C permite transformar coordenadas del mundo real en píxeles (Jodeau et al., 2008), la transformación H puede invertirse. Esta inversión indica que es posible transformar coordenadas en ambas direcciones, lo que es necesario para la rectificación de resultados, aunque esto no es el caso para la matriz de cámara C . La resolución de la matriz de homografía H , en lugar de la matriz de cámara completa, simplifica las mediciones porque estas se pueden tomar con una cinta métrica simple, mientras que instrumental más complejo es requerido para tomar medidas en el espacio tridimensional. Los resultados de PIVlab o PTVlab son desplazamientos que pueden expresarse como

$$\vec{d}_i = X_{pi}^e - X_{pi}^o, \quad (4.6)$$

donde \vec{d}_i es el vector de desplazamiento, X_{pi}^o y X_{pi}^e son coordenadas proyectadas del origen y del final del vector, respectivamente. Ambas coordenadas se rectifican en

coordenadas del mundo real con la ecuación (2). El desplazamiento del mundo real se calcula entonces como

$$\vec{D}_i = X_{ri}^e - X_{ri}^o, \quad (4.7)$$

donde \vec{D}_i es el vector de desplazamiento rectificado, X_{ri}^o y X_{ri}^e son las coordenadas reales del origen, y el final del vector, respectivamente, y la velocidad del mundo real se calcula como

$$\vec{V}_i = \vec{D}_i / \Delta t, \quad (4.8)$$

donde Δt es el paso de tiempo entre las imágenes extraídas elegidas en el módulo de extracción de imágenes cuando se elige la frecuencia de muestreo de los videos. Por ejemplo, para una frecuencia de muestreo de 15 cuadros por segundo (fps) el paso del tiempo es $\Delta t=66.67$ ms. En el caso del análisis PIV, los resultados se interpolan luego en una grilla definida por el usuario con el número de nodos en ambas direcciones. En el caso del análisis de PTV, las posiciones de centroide de partícula se rectifican para cada paso de tiempo.

Para la rectificación de resultados, los puntos de control CP seleccionados pueden ser rocas identificables, bordes de estructura, troncos de árbol, palos y otros. RIVeR permite importar tablas de Excel® que enumere las coordenadas de CP en el mundo real y su proyección en píxeles (las coordenadas también pueden ser geográficas, pero esto no es un requisito). Una de las características especiales de RIVeR es la entrada de cuatro puntos de control. Como se ha descrito anteriormente, se requieren al menos cuatro CP no alineados en el mismo plano para la rectificación de resultados. Un sistema de posicionamiento global diferencial (GPS) o una estación topográfica son adecuados para la medición de coordenadas del mundo real, especialmente si se miden más de cuatro CP, sin embargo, el uso de este instrumental hace que la implementación de LSPIV / LSPTV sea más cara. Se demostrará que, en algunos casos, por ejemplo, pequeños ríos o modelos físicos, no se requieren más de cuatro CP. Para la mayoría de estos casos se puede usar una cinta métrica para tomar medidas. Debido a que es difícil asignar coordenadas a los CPs con una cinta métrica, se miden las distancias entre cada CP (seis distancias incluyendo las diagonales). Entonces, se construye un sistema de coordenadas usando el método de mínimos cuadrados y tomando uno de los cuatro PC como origen. La Figura IV.4 muestra la interfaz de usuario utilizada para la definición de CPs si sólo se localizan cuatro CPs midiendo distancias entre los CP Este procedimiento hace que el sistema sea simple y asequible para determinar.

Rectificación de resultados de velocimetría por imágenes digitales.
RIVeR: un paquete computacional simple y fácil de usar para las técnicas PIV y PTV.

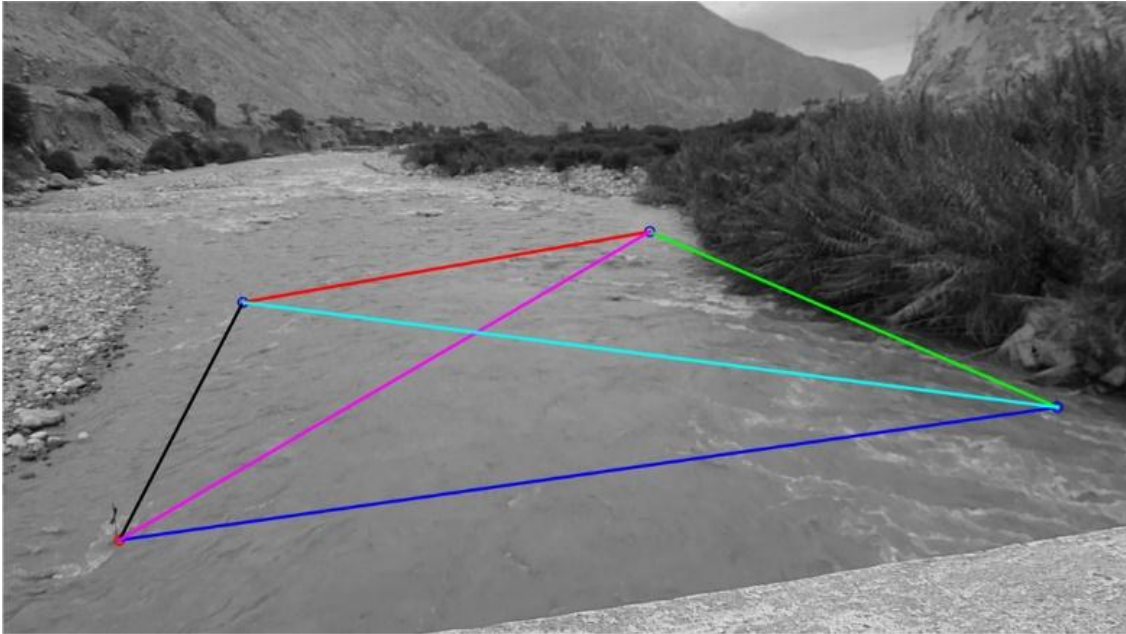


Figura IV.4 Interfaz de usuario de RIVeR para la definición de puntos de control (sólo si se utiliza la opción de cuatro CP). Las distancias entre cada uno de los cuatro CP se presentan por un color diferente. Las distancias de la realidad son necesarias para la entrada a la interfaz de usuario. Vista mirando hacia agua arriba.

Una vez calculada la matriz de homografía H , los vectores de velocidad se rectifican usando la ecuación (4.5) para el análisis PIV o PTV (Figura IV.5). Una sola imagen puede tener millones de píxeles dependiendo de la resolución de la cámara. El tiempo computacional de todo el proceso se reduce entonces mediante la rectificación de los resultados que establecen una grilla en lugar de cada posición de píxel. Además, el resto del software necesario puede desarrollarse independientemente de RIVeR. Una sola imagen también se rectifica y se utiliza como un fondo para los resultados que se superponen. Si la entrada es una sesión de PTVlab, las trayectorias de partículas individuales también se rectifican y representan gráficamente con su magnitud de velocidad (Figura IV.5). La rectificación de los resultados en lugar de las imágenes indica que RIVeR no requiere una cantidad apreciable de tiempo computacional. La mayor parte del tiempo computacional necesario para todo el proceso resulta del análisis clásico de PIV y PTV.

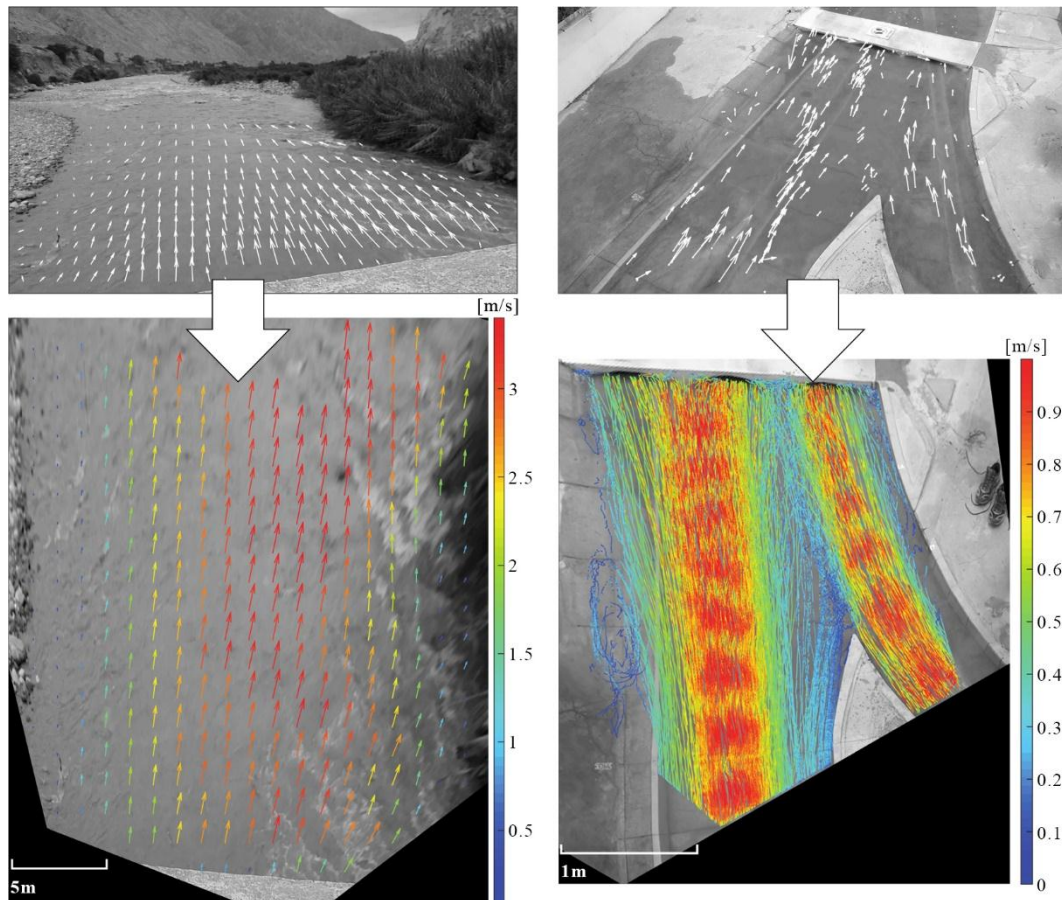


Figura IV.5 Rectificación de resultados del análisis de LSPIV y LSPTV usando RIVeR. En el lado izquierdo: LSPIV, imágenes grabadas en el río Pisco, en Perú. De arriba a abajo: Procesamiento de imágenes con PIVlab; Campo de velocidad rectificado. En el lado derecho: LSPTV, las imágenes se registraron en un modelo físico a gran escala en Argentina. De arriba a abajo: Procesamiento de imágenes con PTVlab; trayectorias individuales rectificadas.

MÓDULO DE CÁLCULO DE CAUDALES

El módulo de Cálculo de caudales ha sido desarrollado para la estimación de caudales escurridos en diferentes secciones transversales de un río o canal utilizando el campo de velocidad superficial calculado en el módulo anterior. El perfil horizontal de velocidad extraído del campo de velocidad media se muestra en la Figura IV.6. Los datos del perfil deben cubrir toda el área de interés. En el caso de localizaciones con datos faltantes, los datos de caudal serán interpolados linealmente. Una vez seleccionadas las secciones transversales, la batimetría de cada sección debe importarse de un archivo Excel® para los cálculos de caudal. Además, la altura de la superficie libre

Rectificación de resultados de velocimetría por imágenes digitales.
RIVeR: un paquete computacional simple y fácil de usar para las técnicas PIV y PTV.

debe incluirse como entrada adicional (Figura IV.7). El caudal se calcula utilizando el método de sección media que consiste en dividir la sección transversal en N verticales adyacentes a una distancia igual d .

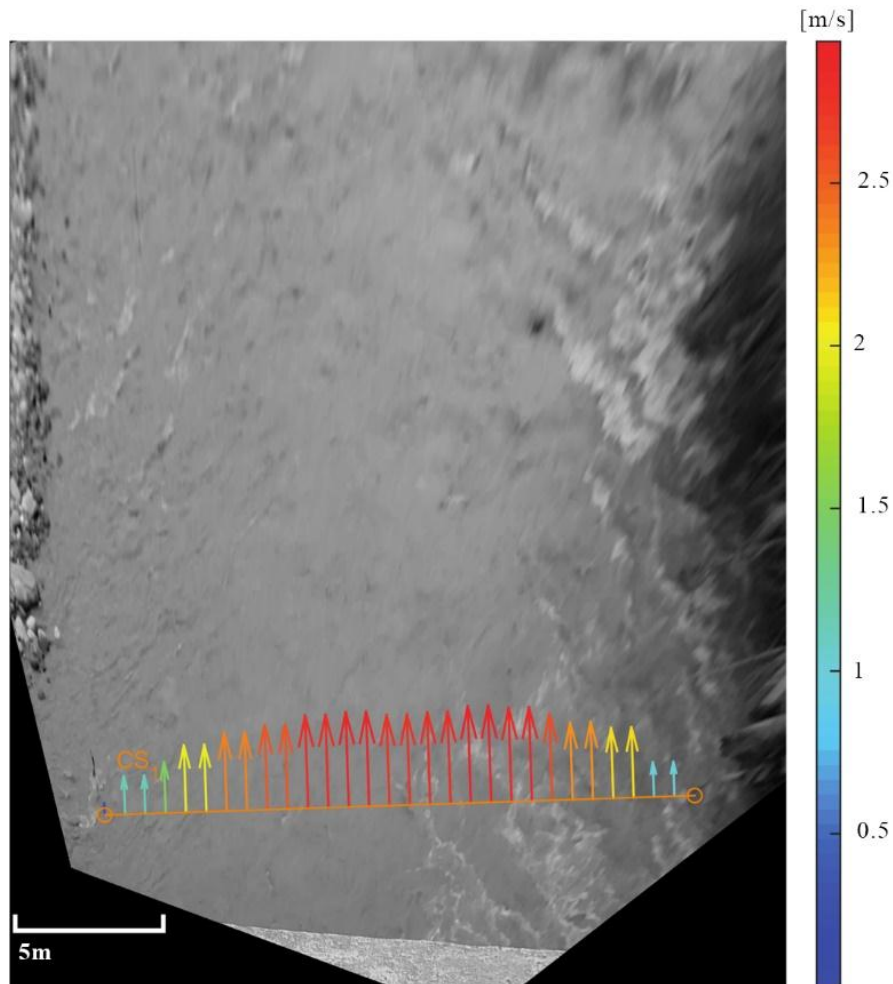


Figura IV.6 Perfil medio de la velocidad superficial longitudinal para una sección seleccionada. El perfil de velocidad se superpone sobre una imagen de fondo única rectificadas.

Como la distribución horizontal de la velocidad se distribuye homogéneamente, se aplica el método de la sección media para calcular la descarga total. Así, Q_s se calcula como la suma de los productos de las profundidades medias de dos verticales

adyacentes (h_i y h_{i+1} , respectivamente) por la media de la componente de velocidad de superficie normal a la sección en esas dos verticales (V_{si} y V_{si+1} , respectivamente).

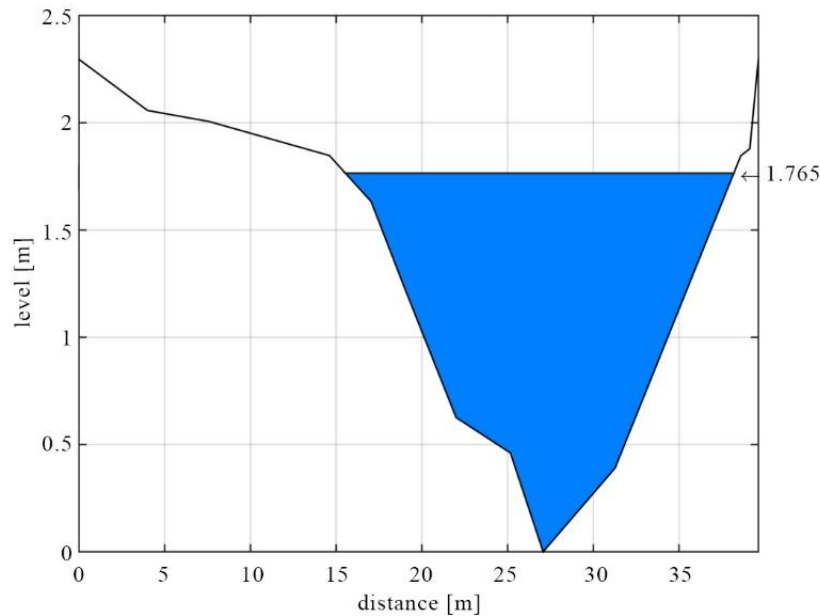


Figura IV.7 Sección transversal (ver Figura IV.6) batimetría importada con la etapa de agua disponible.

$$Q_s = \sum_{i=1}^{N-1} d \cdot (h_i + h_{i+1}/2) \cdot (V_{si} + V_{si+1}/2), \quad (4.9)$$

El caudal calculado Q_s no es exactamente el caudal real Q porque se ha calculado utilizando el campo de velocidad de superficie. Suponiendo que el perfil de velocidad vertical sigue la ley logarítmica (Chow, 1959), la relación teórica entre la velocidad media del flujo y la velocidad superficial es $\alpha = 0,85$. Este valor se utiliza generalmente para un flujo uniforme de rugosidad promedio (por ejemplo, Le Coz et al., 2010). Así, la descarga real debe calcularse de la siguiente manera:

$$Q = \alpha \cdot Q_s, \quad (4.10)$$

La relación α depende de muchos parámetros, tales como la geometría de la sección, la rugosidad del lecho, la geometría aguas arriba y abajo de la sección, flujos secundarios y otros. Depende del usuario elegir el valor más fiable de α . Cheng et al.

Rectificación de resultados de velocimetría por imágenes digitales.
RIVeR: un paquete computacional simple y fácil de usar para las
técnicas PIV y PTV.

(2004) concluyeron que es confiable usar la velocidad superficial como un índice para determinar la descarga de un flujo en el río porque el valor de α siempre cae en el mismo rango de 0.80 a 0.93.

CAPÍTULO V

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE CAUDALES
EN RÍOS DE MONTAÑA CON LSPTV DURANTE
PERIODOS DE ESTIAJE (MÍNIMOS HIDROLÓGICOS)

V.1 INTRODUCCIÓN

Se publicó el contenido del siguiente capítulo en la revista del UNESCO, *Aqua-LAC* como:

Patalano, A., García, C. M., Guillén, N., García, C., Díaz, É., Rodríguez, A., y Ravelo, A. (2014). "Evaluación Experimental De La Técnica De Velocimetría Por Seguimiento De Partículas A Gran Escala Para La Determinación De Caudales En Ríos Serranos." Aqua-LAC UNESCO, 6, 17-24.

El manejo sustentable del recurso hídrico superficial requiere una cuantificación precisa de la disponibilidad del mismo para que los planes de gestión de ese recurso sean eficientes. La magnitud que cuantifica la disponibilidad del agua superficial en cursos fluviales para su uso como provisión de agua potable, riego o generación de energía hidroeléctrica es el caudal. Los modelos numéricos continuos de simulación hidrológica son herramientas muy útiles para la predicción y pronóstico de caudales escurridos, pero su calibración y validación requiere determinaciones experimentales precisas de caudales escurridos superficialmente tanto en épocas de aguas altas (crecidas) como de aguas bajas (estiaje).

A continuación, se evalúa experimentalmente una técnica específica de cuantificación de aguas superficiales en ríos serranos de la provincia de Córdoba, que escurren en una región perteneciente a las zonas áridas y semiáridas de la República de Argentina. La técnica evaluada se basa en la implementación a gran escala de una técnica no intrusiva de Velocimetría por Seguimiento de Partículas (PTV) que permitiría a priori obtener descripciones de los campos superficiales de flujo en cursos fluviales durante periodos de aguas bajas y altas. La técnica de PTV (también conocida como Velocimetría lagrangiana por imágenes de partículas) consiste en obtener (desde una de las márgenes o desde un puente) imágenes digitales de la posición de trazadores previamente "sembrados" en el agua a intervalos constantes de tiempo. En base a dos imágenes capturadas en un intervalo de tiempo conocido, se identifican (mediante el uso de programas computacionales específicos) las posiciones de los trazadores en cada imagen. Luego se rectifican las coordenadas de los trazadores teniendo en cuenta la ubicación oblicua de la cámara digital en relación al plano superficial de movimiento de las partículas y luego se calcula el desplazamiento de los trazadores en dos imágenes sucesivas, el cual dividido el tiempo de exposición entre las imágenes permite obtener el vector de velocidad superficial del flujo para cada trazador. En este capítulo, los resultados obtenidos con esta técnica se los compara con resultados de aforos

Determinación experimental de caudales en ríos de montaña con LSPTV durante periodos de estiaje (mínimos hidrológicos)

realizados con instrumental convencional (molinete) y con Perfiladores de corriente acústicos Doppler –ADCP, disponible desde hace pocos años para su implementación en aguas poco profundas.

V.2 METODOLOGÍA

Los sitios de medición evaluados en este capítulo constituyen dos tramos de un curso fluvial emplazado en la cuenca alta de los Ríos Suquía (Primero) en la zona serrana de provincia de Córdoba en Argentina. El primer sitio de medición (Figura V.1) está emplazado en un tramo del río San Antonio en proximidades de la localidad de Cuesta Blanca (aguas arriba y al sur de la ciudad de Villa Carlos Paz) lo que permite cuantificar el flujo superficial aguas abajo de la toma de agua de la ciudad de Villa Carlos Paz y localidades vecinas. La sección del tramo donde se realizaron las mediciones un ancho aproximado de 6 m y una profundidad máxima aproximada de 0.6m. El segundo tramo (Figura V.2) se encuentra en las proximidades del centro de Villa Carlos Paz. La sección del tramo donde se realizaron las mediciones tiene un ancho aproximado de 12 m y una profundidad máxima aproximada de 1.0m. Si bien las condiciones analizadas corresponden al periodo de estiaje en ambas secciones, trabajos experimentales futuros, en desarrollo prevén la realización de trabajos de campo en periodos de crecidas.



Figura V.1 Sitio de medición emplazado en un tramo del río San Antonio en proximidades de la localidad de Cuesta Blanca

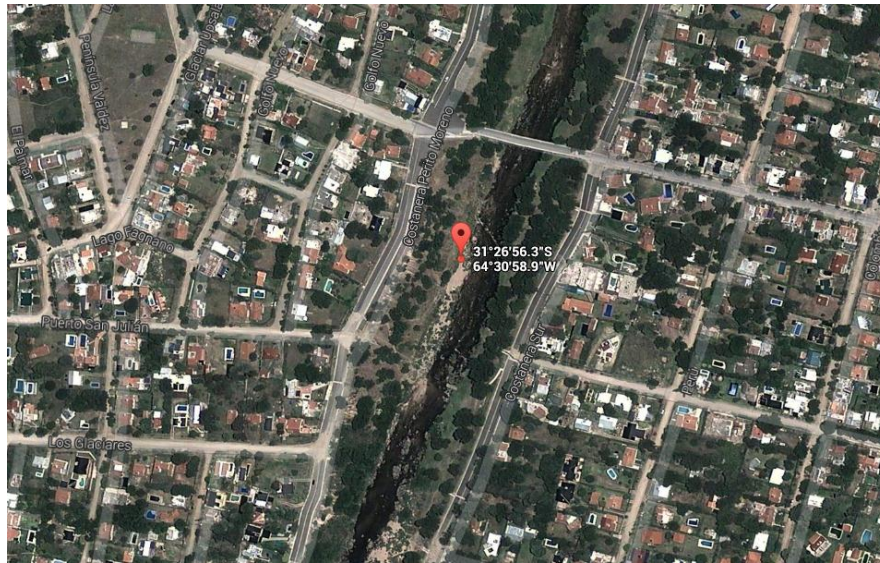


Figura V.2 Sitio de medición emplazado en un tramo del río San Antonio en proximidades de la localidad de Villa Carlos Paz

Para ambos casos, se realizó primero una cuantificación del caudal (aforo) por método de vadeo (sección media) con un molinete a eje vertical (Modelo 6215 USGS Tipo AA-MH Tipo AA). Además se utilizó un perfilador de corriente acústico Doppler ADCP RiverSurveyor S5 YSI/Sontek. Este último está equipado con un GPS que permite obtener en forma alternativa la posición del perfilador en cada instante del recorrido con una resolución del orden del 1cm. Además, cuenta con un dispositivo denominado “SmartPulse”, el cual en base a la profundidad, velocidad y niveles de turbulencia del flujo, adapta el esquema de pulso acústico para esas condiciones con el fin de proveer la máxima resolución de datos de velocidad (en las tres dimensiones), lo que permite capturar perfiles de velocidad de flujo con una frecuencia de 1 Hz y tamaños de celda pequeños de hasta 2cm. Con el ADCP instalado sobre una plataforma móvil (Figura V.3), se realizaron números pares de transectas o cruces (de ida y vuelta para evitar efectos direccionales) muestreando el campo de flujo y la batimetría de la sección evaluada de manera de completar un tiempo total de medición superior a los 12 minutos (Tarrab et al., 2012) con el fin de minimizar la incertidumbre asociada a la determinación experimental de caudales de flujo. Para estimar la velocidad en las regiones no medidas del flujo, en la parte superior (debido a la sumergencia del instrumento) e inferior (para evitar interferencias del fondo en el pulso acústico) se ajustó una ley potencial de velocidades sobre todo el perfil de velocidades (exponente = 1/6). Las velocidades no medidas en la margen derecha e izquierda (zonas de menor profundidad) se estimaron utilizando el método recomendado para cursos con márgenes con pendiente. El valor del caudal

Determinación experimental de caudales en ríos de montaña con LSPTV durante periodos de estiaje (mínimos hidrológicos)

determinado con esta tecnología consiste en el promedio de los caudales cuantificados en todas las transectas.



Figura V.3 Medición con ADCP en la sección de estudio en el río San Antonio en proximidades de la localidad de Cuesta Blanca

En relación a las mediciones de PTV se utilizaron dos trazadores diferentes para caracterizar el campo de velocidad superficial en el primer tramo seleccionado del río San Antonio (Figura V.3) con el fin de evaluar la sensibilidad de los resultados a la selección del trazador óptimo. Uno de los trazadores seleccionados son elementos formados por dos tapas plásticas abrochadas entre sí cuyo diámetro comercial es 63 mm logrando cierto peso de forma tal que la acción del viento no modifique su velocidad, manteniendo la flotabilidad y constituyendo partículas simétricas respecto de sus dos caras (Figura V.4). Los motivos de la elección son fundamentalmente su visibilidad y bajo costo. Se ensayó además una alternativa que consiste en el uso de naranjas (de diámetro medio similar a las tapas plásticas) como trazadores naturales. En la sección de medición en el segundo tramo del río se utilizaron solamente naranjas como trazadores ya que los resultados obtenidos con ellos en el primer tramo de Cuesta Blanca pareció sustentable .

Durante las mediciones se monitoreo la velocidad del viento con un anemómetro localizado en las márgenes a la altura de la superficie del agua. La cámara de fotografía digital utilizada en las mediciones realizadas en el tramo del Río San Antonio fue una Sony RX-100, que registra videos con una resolución de 1444x1080 pixeles a 30 cuadros por segundo con un sensor CMOS. En el tramo del Río Anisacate se utilizó una cámara digital Sony DSC-WX300 que registra videos con una resolución de 1920x1080 pixeles a 30 cuadros por segundo con un sensor CMOS. En ambos tramos, la cámara digital fue ubicada sobre una de las márgenes de manera tal que la zona capturada incluya la región donde se realizaron las mediciones con ADCP y molinete.

En las imágenes capturadas la zona de interés se muestra en perspectiva por lo que se ve distorsionada debido a que la cámara se colocó oblicuamente al plano de la superficie libre (Figura V.5). Por ello, los resultados obtenidos con PTV se corrigieron para rectificar las coordenadas de la imagen a una proyección ortogonal (Patalano et al. 2013b). Para cada medición se registró un video de 60s de duración a 30 imágenes por segundos. La secuencia metodológica desarrollada en la implementación de PTV se detalla a continuación:

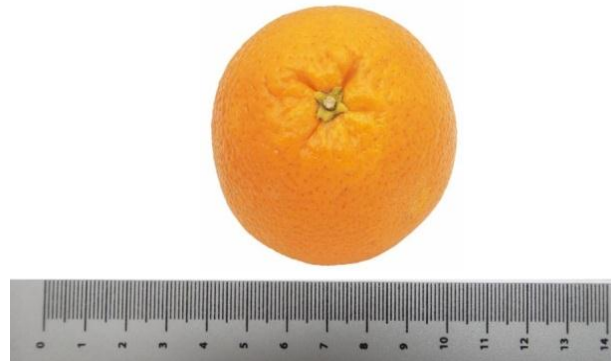


Figura V.4 Trazadores utilizados para caracterizar el campo de velocidad superficial en el tramo seleccionado del primer sitio en la sección de estudio en el río San Antonio

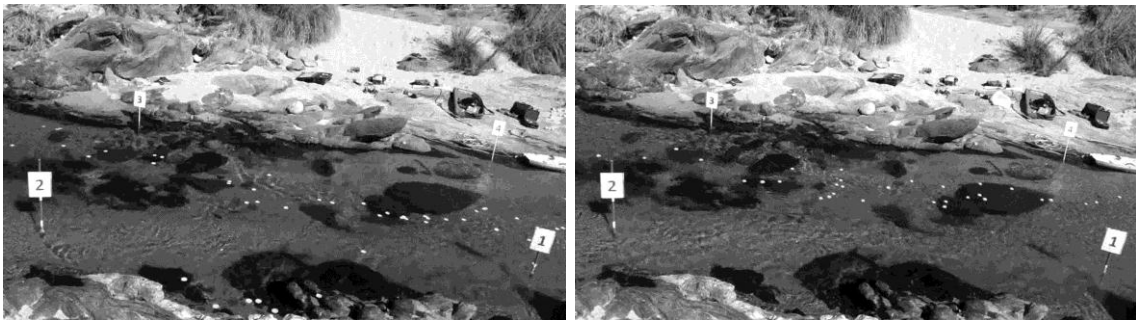


Figura V.5 Flujo sembrado con dos trazadores diferentes en el tramo seleccionado del río San Antonio en proximidades de la localidad de Cuesta Blanca. Izquierda: tapas plásticas abrochadas entre sí cuyo diámetro comercial es 63 mm. Derecha: naranjas (de diámetro medio similar a las tapas plásticas).

Durante las mediciones se monitoreo la velocidad del viento con un anemómetro localizado en las márgenes a la altura de la superficie del agua. La cámara de fotografía digital utilizada en las mediciones realizadas en el tramo del Río San Antonio fue una Sony RX-100, que registra videos con una resolución de 1444x1080 pixeles a 30 cuadros por segundo con un sensor CMOS. En el tramo del Río Anisacate se utilizó una cámara digital Sony DSC-WX300 que registra videos con una resolución de

Determinación experimental de caudales en ríos de montaña con LSPTV durante periodos de estiaje (mínimos hidrológicos)

1920x1080 pixeles a 30 cuadros por segundo con un sensor CMOS. En ambos tramos, la cámara digital fue ubicada sobre una de las márgenes de manera tal que la zona capturada incluya la región donde se realizaron las mediciones con ADCP y molinete. En las imágenes capturadas la zona de interés se muestra en perspectiva por lo que se ve distorsionada debido a que la cámara se colocó oblicuamente al plano de la superficie libre (ver Figura 5). Por ello, los resultados obtenidos con PTV se corrigieron para rectificar las coordenadas de la imagen a una proyección ortogonal (Patalano et al. 2013b). Para cada medición se registró un video de 60s de duración a 30 imágenes por segundos. La secuencia metodológica desarrollada en la implementación de PTV se detalla a continuación:

a) Pre-procesamiento de imagen que consiste a transformar las imágenes en escala de gris, substrair de las imágenes el “fondo” (todo lo que no sea partículas) y detectar cada una de las partículas: el “fondo” de las imágenes se obtiene calculando el promedio de toda la serie de imágenes. Según las partículas usadas, diferentes filtros son utilizados sobre las imágenes de tal manera que las partículas sean blancas con una distribución gaussiana a partir del centroide de ellas hacia fuera. Cuando se resta el fondo de cada imagen individualmente se quedas las partículas blancas sobre un fondo negro.

b) Procesamiento de las coordenadas de las partículas detectadas y extracción de la velocidad del flujo en tiempo y espacio con por Correlación Cruzada (Brevis et al., 2011);

c) Post-Procesamiento que consiste a rectificar los resultados a una vista ortogonal y calibrarlos para transformar las velocidades en [pixel/intervalo de imagen] a [m/s]. Todo el proceso de PTV ha sido realizado con el programa libre *PTVlab* y su interface gráfica de usuario desarrollada por el grupo de trabajo (Patalano et al. 2013a). En la Figura V.6 se presenta un ejemplo de rectificación digital realizada a partir de 4 puntos de control que vinculan las coordenadas del Mundo Real y las de la fotografía.



Figura V.6 Ejemplo de rectificación digital de la zona de interés del río San Antonio al primer tramo: A la izquierda imagen original de la zona de interés con los 4 puntos de control, a la derecha la misma imagen rectificada en un plan ortogonal. Para disminuir el costo computacional, en el post-procesamiento, una imagen única es rectificada para poder graficar encima los resultados rectificados.

Los puntos de control seleccionados para rectificar las imágenes digitales en la implementación de la técnica PTV sobre el río San Antonio en proximidades de la localidad de Villa Carlos Paz fueron materializados a través de un marco de 3m x 6m construido con tuberías de polipropileno bicapa de 1.27cm de diámetro (Figura V.7). El marco se retira de la imagen unos segundos después de iniciar el registro del video.

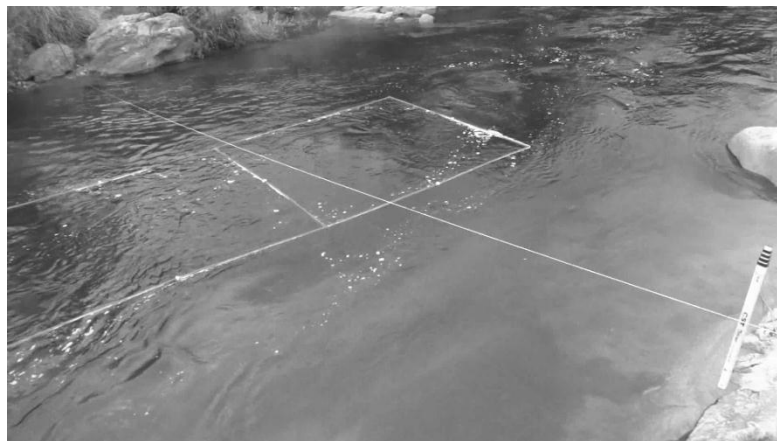


Figura V.7 Marco de tamaño de 3m x 6m construido con tuberías de polipropileno bicapa de 1.27cm de diámetro, utilizado para la rectificación digital de imágenes registradas en la sección de medición sobre el Río San Antonio, en Carlos Paz

V.3 RESULTADOS

La técnica de velocimetría PTV presenta una ventaja sobre el resto de las técnicas experimentales utilizadas en este capítulo ya que la implementación de la técnica PTV a gran escala provee el campo de velocidad superficial media en la región cubierta por el sensor de la cámara. Para obtener el campo de velocidad media, los campos de velocidades de las partículas instantáneos son interpolados sobre un grilla común y promediados en el tiempo. La Figura V.8 muestra los campos de medios de velocidades de flujo rectificadas en los dos tramos estudiados del río San Antonio.

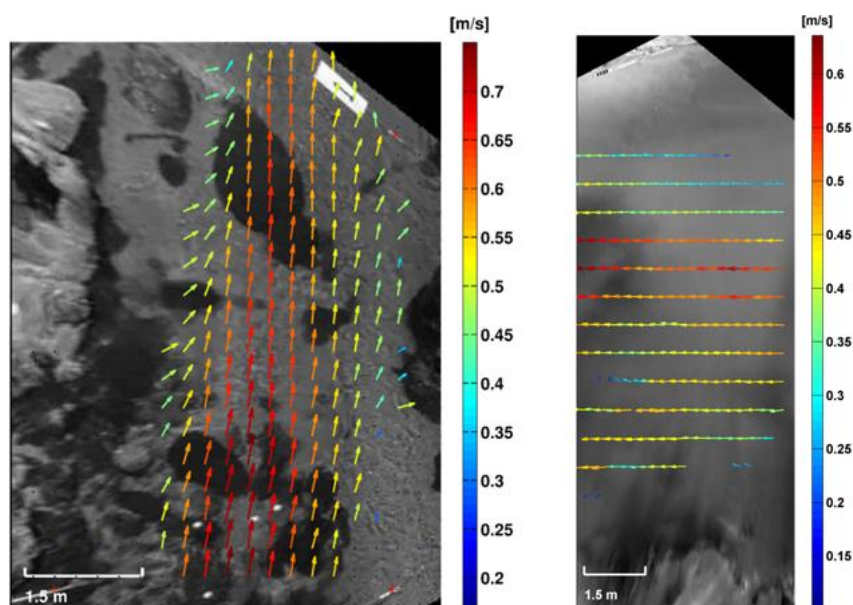


Figura V.8 Campos de velocidades medias de flujo interpolados [m/s] y rectificadas del río San Antonio en Cuesta Blanca (izquierda) y en el ejido urbano de la ciudad de Villa Carlos Paz (derecha).

A partir de la información de los campos medios de velocidades de flujo obtenidos con PTV, se extrajeron los valores correspondientes a los perfiles trasversales de velocidades superficiales donde se implementaron las otras técnicas de medición (molinetes y ADCP). Las Figuras Figura V.9 y Figura V.10 muestran los perfiles trasversales de velocidad superficial de flujo registrados en las dos secciones del río San Antonio con las distintas técnicas. Los valores de ADCP incluidos en estas Figuras corresponden a valores registrados en las celdas más cercanas a la superficie libre (0.15m desde esta superficie) mientras que las mediciones con molinete corresponden a valores de velocidad superficial (con molinete sumergido) específicamente registrados para este capítulo. Los perfiles relevados muestran una buena correspondencia entre los valores observados, $RMS = 0.089$ y 0.083 entre los datos la

señal de ADCP y las señales de PTV con Naranjas y tapas de plástico respectivamente en la sección de Cuesta Blanca y $RMS = 0.089$ en la sección de Villa Carlos Paz. En la Figura V.9, se observa un buen acuerdo entre los perfiles de velocidad superficial determinados con LS PTV utilizando diferentes partículas trazadoras (para la sección del río San Antonio en Cuesta Blanca) y las pequeñas diferencias observadas podrían explicarse por los efectos sobre las partículas plásticas de la fricción superficial del viento presente el día de las mediciones en sentido contrario a la dirección del flujo medio.

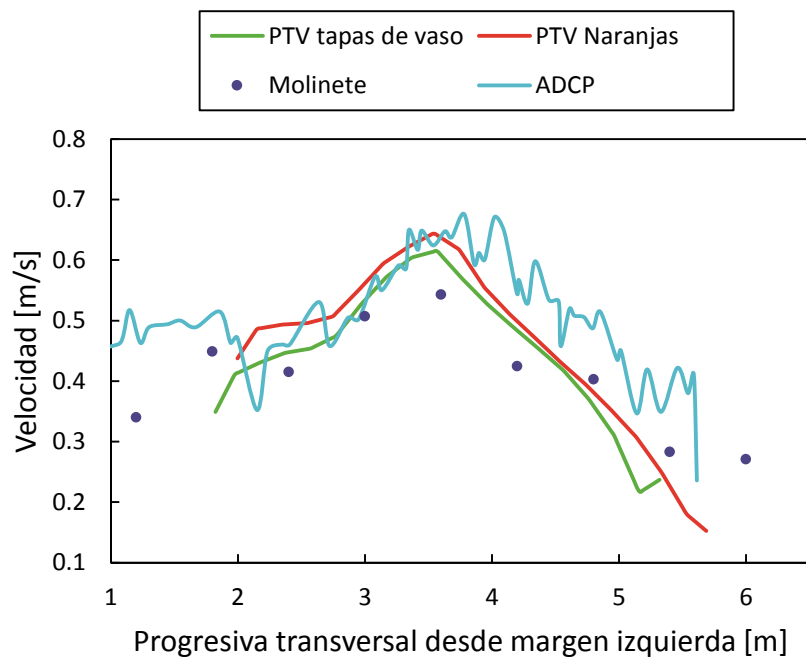


Figura V.9 Perfiles transversales de velocidades medias de flujo medidos con molinete y PTV en la sección relevada en el río San Antonio en Cuesta Blanca.

Determinación experimental de caudales en ríos de montaña con LSPTV durante periodos de estiaje (mínimos hidrológicos)

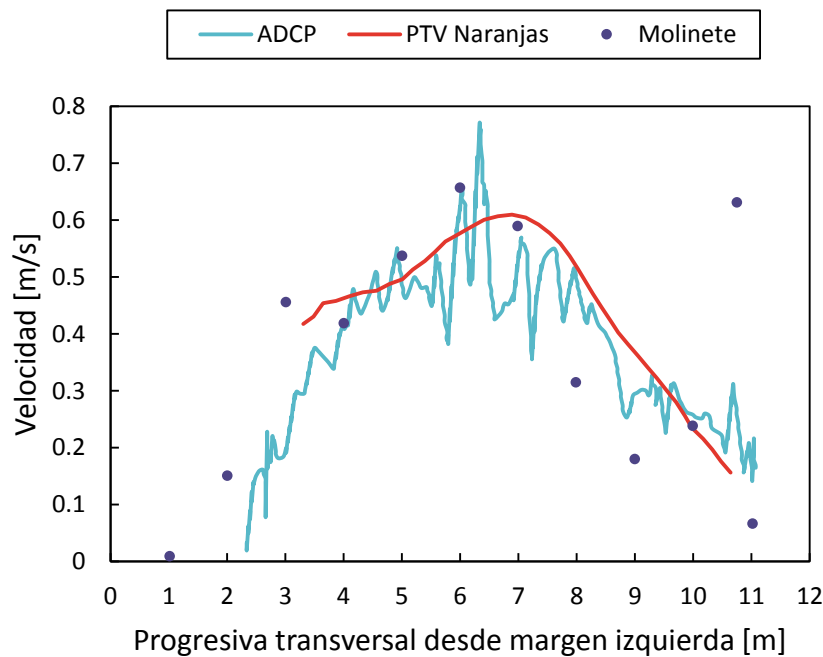


Figura V.10 Perfiles transversales de velocidades medias de flujo medidos con molinete y PTV en el sección relevada en el río San Antonio en el ejido urbano de la ciudad de Villa Carlos Paz.

Finalmente se realiza el contraste de los caudales medios de flujo estimados por las distintas técnicas de medición (Tabla V.1). Para ambos secciones relevadas del río San Antonio, se adopta como valor de referencia al caudal medido con ADCP. La incertidumbre asociada a la determinación de caudal con ADCP depende de configuración de registro adoptado, del ruido electrónico y el ruido ambiental presente durante las mediciones (Tarrab et al, 2012). Durante la medición reportada en este resumen, el caudal medido por el ADCP en el primer tramo fue $0.94 \pm 0.12 \text{ m}^3/\text{s}$. El caudal estimado a partir de las mediciones con molinete ($0.97 \text{ m}^3/\text{s}$) presenta una diferencia de (-3%) relativa al ADCP siendo estadísticamente similares. De la misma forma, en el segundo tramo el caudal medido con ADCP fue $3.03 \pm 0.38 \text{ m}^3/\text{s}$ para la sección relevada en el segundo tramo y presenta una diferencia de (-7%) con el valor estimado a partir de las mediciones con molinete.

La estimación de caudales a partir de los campos superficiales de velocidad del flujo determinados con LSPTV de manera no intrusiva requiere definir la relación α entre los valores medios de velocidad media de flujo en la columna de agua y los valores de velocidades superficiales. Esta relación depende de la geometría del fondo, de la rugosidad, de las corrientes secundarias y del efecto del viento. (Cheng et al., 2004) realizaron una estimación de este coeficiente utilizando ADCP para las mediciones de velocidad de flujo en la columna de agua y velocimetría por radar para evaluar las

velocidades de flujo superficiales. Estos autores sugieren que es factible usar las velocidades superficiales como índice para determinar caudales de flujo ya que el valor de α cae siempre en el mismo rango del valor teórico ($\alpha \approx 0.85$) calculado empíricamente (Plant et al., 2005).

En la Tabla V.1 se muestran los valores de los caudales medidos con las diferentes técnicas presentadas en este capítulo y para cada uno de los casos visto. Los caudales evaluados con LS PTV han sido calculados integrando el producto de las velocidades superficiales ajustadas con el factor $\alpha = 0.85$ y $\alpha = 1$ por el área de escurrimiento obtenida durante las mediciones con el molinete. Con el factor teórico $\alpha = 0.85$, el error relativo entre los caudales medidos con ADCP y con LSPTV es de 12% y 13% respectivamente para las secciones relevadas y 14% y 20% respectivamente con el molinete. Usando el factor $\alpha = 1$ los errores relativos entre los caudales medidos con los dos instrumentos (ADCP y molinete) y con LSPTV son significativamente menores: 3% y 2% (relativo a ADCP) respectivamente y 0% y 6% (relativo a molinete) respectivamente.

Tabla V.1 Resumen de los caudales medidos para los casos diferentes.

Sección de estudio	Q_{ADCP} [m ³ /s]	$Q_{molinete}$ [m ³ /s]	$Q_{PTV(naranjas)}$ [m ³ /s]		$Q_{PTV(tapas)}$ [m ³ /s]	
San Antonio (Cuesta Blanca)	0.94	0.97	$\alpha=0.85$	0.83	$\alpha=0.85$	0.80
			$\alpha=1$	0.97	$\alpha=1$	0.93
San Antonio (Carlos Paz)	3.03	3.27	$\alpha=0.85$	2.63	-	-
			$\alpha=1$	3.09	-	-

A continuación se sintetizan algunas de las principales fuentes de errores detectadas en la implementación de la técnica de LS PTV en gran escala para estimar caudales de aguas superficiales en cursos fluviales:

- Factores ambientales: En la implementación de LS PTV a gran escala estas fuentes de errores son relevantes. El tipo de iluminación (la reflexión de la luz del Sol sobre la superficie del agua puede perturbar los algoritmos de detección de partículas) y el viento (influye directamente la velocidad de las partículas) son dos de los fenómenos físicos del medio ambiente que influyen en forma más notoria en las mediciones.

- La siembra de las partículas: como se muestra en la Figura 8, no se pudo caracterizar las velocidades a las orillas de los ríos ya que las partículas sembradas arriba del tramo de medición tienden a entrar en las zonas de mayores velocidades y salir de las zonas de estancamiento o menores velocidades.

Determinación experimental de caudales en ríos de montaña con LSPTV durante periodos de estiaje (mínimos hidrológicos)

- Técnica de procesamiento de las coordenadas de las partículas detectadas y extracción de la velocidad del flujo en tiempo y espacio.

- El post-procesamiento que consiste a rectificar los resultados a una vista ortogonal y calibrarlos para transformar las velocidades en [pixel/intervalo de imagen] a [m/s]: La calidad de la rectificación depende esencialmente del método (marco flotante o puntos fijos) y del usuario que determina las distancias entre los puntos de control en la realidad y luego sobre las imágenes.

- El valor del factor α que depende de cada sección medida. El valor del coeficiente que relaciona la velocidad superficial y la velocidad media es función de la geometría de la sección, de la pendiente del tramo, de la rugosidad del fondo, de la configuración aguas arriba y aguas abajo del tramo. El valor adoptado por defecto es $\alpha = 0.85$ pero según los resultados, el valor real del factor para ambos tramos es mayor (entre 0.96 y 0.98 respectivamente).

CAPÍTULO VI

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE CAUDALES EN RÍOS DE MONTAÑA CON LSPIV DURANTE PERIODOS DE CRECIDAS (MÁXIMOS HIDROLÓGICOS)

VI.1 INTRODUCCIÓN

Los cursos fluviales de la provincia de Córdoba, Argentina, en especial aquellos que ocurren en las regiones áridas y semiáridas, presentan características significativas como por ejemplo: a) marcada variabilidad de volúmenes escurridos y profundidades de flujo en las épocas de aguas altas (crecidas) y aguas bajas (estiaje) que impide la adopción de una única tecnología experimental de cuantificación óptima del recurso para ambos periodos; b) características torrenciales en sus hidrogramas de crecidas (crecidas repentinas) con tiempos al pico pequeños y grandes volúmenes escurridos en cortos intervalos de tiempo (lo que implica que el proceso no podrá asumirse como estacionario durante la actividad experimental; c) Importante tasa de transporte de sedimentos (incluyendo sedimentos de gran tamaño) y otros elementos (por ejemplo troncos de árboles) durante los eventos de crecidas que impiden el uso de técnicas de medición intrusivas; y d) Elevados niveles de turbulencia con fluctuaciones importantes de la superficie libre y velocidades de flujo.

La complejidad de la cuantificación de caudales de flujo en cursos fluviales con las características mencionadas presenta un desafío tecnológico importante. Los molinetes convencionales y recientemente los perfiladores de corriente acústico Doppler (ADCP) desarrollados específicamente para aguas poco profundas están siendo utilizados para la determinación del caudal en ríos de montaña durante condiciones de aguas medias y bajas en régimen estacionario. La implementación de estas tecnologías en flujos torrenciales no estacionarios, con tiempos característicos de crecidas de unos pocos minutos no es factible ya que el tiempo de medición requerido para estimar un valor de caudal es del orden o mayor que el tiempo característico de la crecida. Además las tecnologías mencionadas son intrusivas y durante las crecidas repentinas, mantener el instrumento sumergido es muy difícil, se corre el riesgo de dañarlo con troncos u otros materiales en suspensión que pueda llevar el río y las condiciones presentan una amenaza para la seguridad del personal. Por estos condicionantes no es habitual la disponibilidad de datos de caudales registrados durante crecidas repentinas en ríos de montaña de la provincia de Córdoba.

El uso de Velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala (LSPIV) permite la determinación del campo de velocidad superficial del río de manera remota con una simple cámara digital (Le Coz et al., 2010b; Muste et al., 2008). Con estos datos de velocidad superficial estimados con LSPIV en la sección transversal, su relación con la

Determinación experimental de caudales en ríos de montaña con LSPIV durante periodos de crecidas (máximos hidrológicos)

velocidad media integrada en la sección, y los datos batimétricos (anteriormente o posteriormente relevada), el monitoreo de caudales escurridos durante un evento de crecida repentina es posible. Durante su implementación, es probable que los videos (o secuencia de imágenes) se registren con una cámara ubicada oblicuamente al flujo y desde un puente o a margen. Por ello, los resultados del análisis digital están distorsionados y se requiere la rectificación digital de estos resultados. (Patalano et al., 2013b) propusieron, para esta rectificación, el uso de la técnica de homografía y la identificación de 4 Puntos de Control (PC) cuyas coordenadas en las tres dimensiones son conocidas en ambos sistema (el mundo real y sobre la imagen). Durante el monitoreo de crecidas, la rectificación digital de los resultados cambia a medida que el nivel de la superficie libre cambia por lo que es necesario ajustar el proceso de homografía continuamente para cada nivel.

A continuación se presenta una metodología experimental para el monitoreo continuo de velocidades y caudales de flujo durante un evento de crecida repentina en un tramo del Rio San Antonio, un río de montaña en la Provincia de Córdoba, Argentina. La metodología experimental propuesta, que preserva la seguridad del personal y la fiabilidad de las mediciones, consiste en implementar en gran escala la técnica remota de velocimetría por imágenes de partículas (LSPIV por sus siglas en inglés) a la cuantificación de caudal.

VI.2 METODOLOGÍA

La metodología experimental propuesta se implementa en un tramo de un río de montaña, el río San Antonio en la zona serrana de la Provincia de Córdoba, Argentina ($31.448402^{\circ}\text{S}$; $64.515929^{\circ}\text{O}$). La sección de medición se ubica en la ciudad de Villa Carlos Paz, aguas arriba del puente de la calle Juncal (Figura VI.1). La batimetría de la sección transversal aforada (geomorfológicamente estable) se relevó posteriormente con una estación topográfica total. La Figura VI.2 muestra los resultados de este relevamiento topográfico.

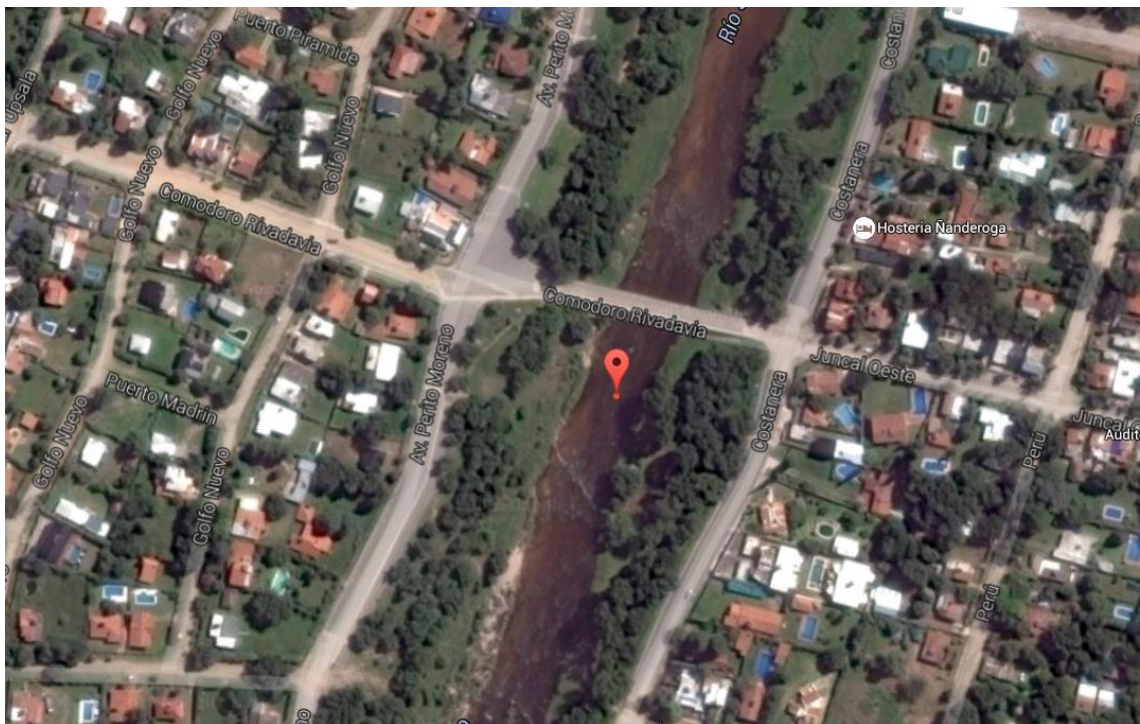


Figura VI.1 La sección de medición se ubica en la ciudad de Villa Carlos Paz, aguas arriba del puente de la calle Juncal.

Determinación experimental de caudales en ríos de montaña con LSPIV durante periodos de crecidas (máximos hidrológicos)

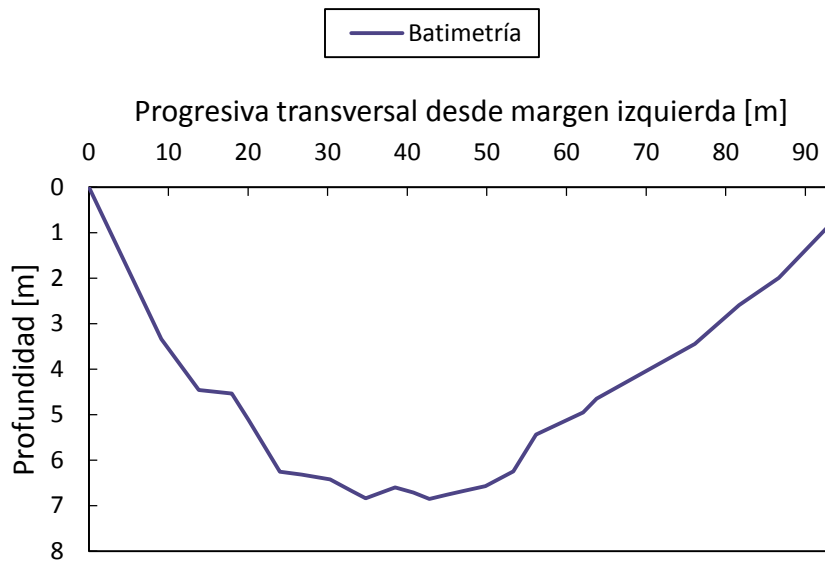


Figura VI.2 Relevamiento topográfico de la sección de medición

En la implementación de la metodología se utilizó una cámara digital (Sony WX300) montada sobre un trípode que permite enfocar todo el ancho del río. La cámara digital registra un video de alta definición con una resolución de 1920 x 1080 píxeles a una frecuencia de 30 cuadros por segundo. Las imágenes son extraídas de los videos sin compresión y el mapa de color es convertido de un formato RGB (Rojo, Verde, Azul) a escalas de grises de 255 bits. Las imágenes son procesadas con el programa libre y abierto PIVlab, desarrollado en Matlab (Thielicke y Stamhuis 2014a).

La Figura VI.3 muestra algunas imágenes capturadas del video registrado durante la crecida repentina ocurrida en el río San Antonio el día 2 de enero de 2014, donde se muestra que el nivel del río sube en unos pocos minutos.

Sobre las imágenes registradas, se implementó el algoritmo de PIV el cual calcula la correlación cruzada sobre ventanas de 32×32 píxeles entre dos imágenes consecutivas utilizando el método de FFT (Fast Fourier Transform). Después del cálculo de la correlación cruzada la estimación de desplazamiento sub-píxel local entre las imágenes (cerca de las orillas) se consigue por regresión gaussiana bidimensional. A partir de 4 Puntos de control (PCs) relevados con GPS, no alineados en un plano paralelo a lo de la superficie del agua, se aplica el proceso de homografía para rectificar los resultados procesados [píxel/s] y calibrar estos últimos para obtener el campo de velocidad superficial en [m/s] (Patalano et al. 2013). Para estimar el caudal a partir del campo de velocidades superficiales se utiliza una relación α entre los valores medios de velocidad media de flujo en la columna de agua y los valores de velocidades superficiales. Esta

relación depende de la geometría del fondo, de la rugosidad, de las corrientes secundarias y del efecto del viento. (Cheng et al., 2004) realizó una estimación de este coeficiente utilizando ADCP (perfiladores de corriente acústico Doppler) para medir velocidades de flujo en la columna de agua y velocimetría por radar para evaluar las velocidades superficiales. Estos autores sugieren que es factible usar las velocidades superficiales como índice para determinar caudales de flujo ya que el valor de α se encuentra habitualmente en el mismo rango del valor ($\alpha \approx 0.85$) calculado empíricamente (Plant et al., 2005). La batimetría relevada en una sección estable permite monitorear la evolución del campo de velocidades de flujo y del caudal.

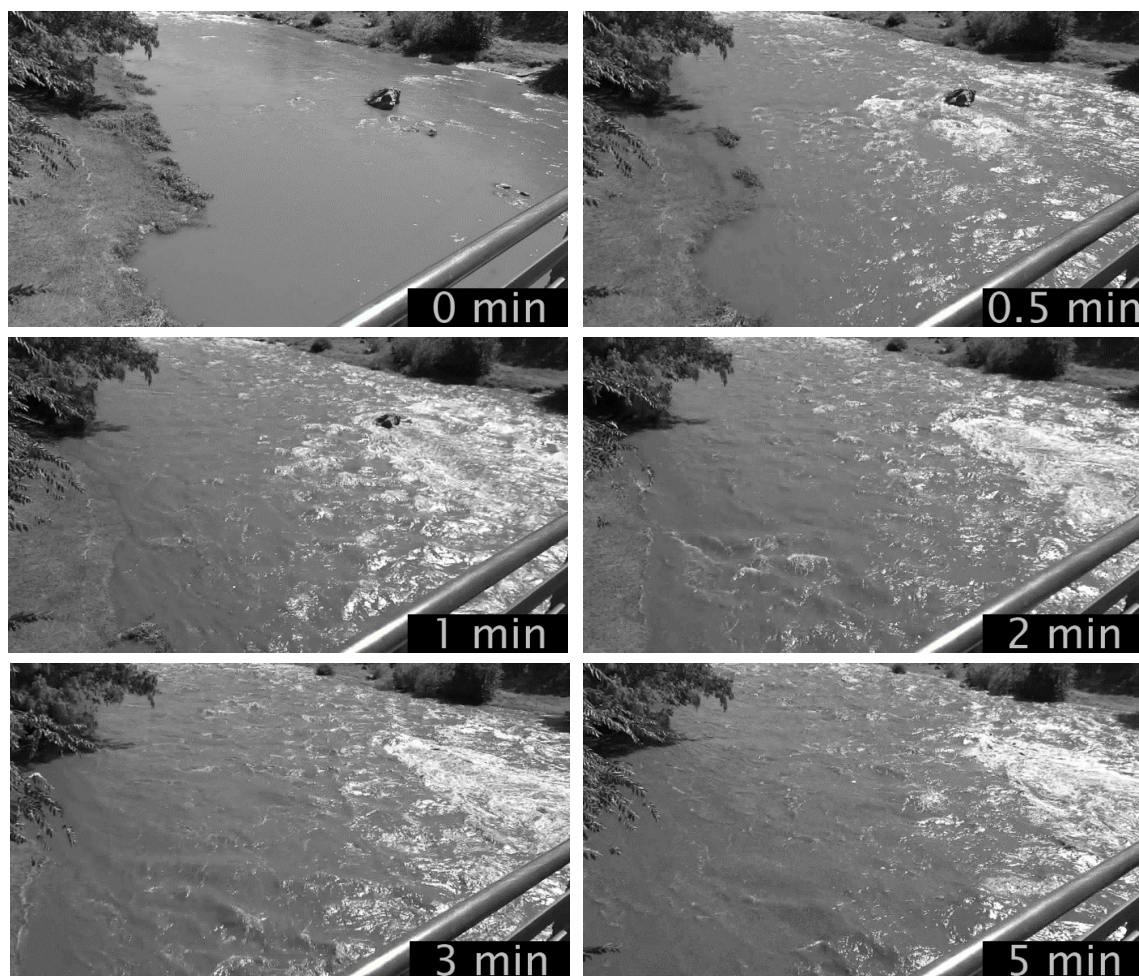


Figura VI.3 Imágenes extraídas del video de la crecida rápida a $T=0, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0$ y 5.0 s. La cámara se ubica oblicuamente desde un puente.

La dificultad adicional en medir una crecida con la técnica de LSPIV de forma continua es en la rectificación dinámica de los resultados: los 4 puntos de control (PCs) relevados pertenecen en la realidad a un mismo plano paralelo a la superficie del agua. Las crecidas repentinas son caracterizadas por la elevación del nivel de agua en un

Determinación experimental de caudales en ríos de montaña con LSPIV durante periodos de crecidas (máximos hidrológicos)

tiempo relativamente corto. Por lo tanto el plano de la superficie sube y las distancias reales en el mismo se ven distorsionadas por el efecto de perspectiva. Por ejemplo, en la Figura VI.4, las áreas P_A y P_B son paralelos y tienen dimensiones idénticas en la realidad, sin embargo desde el punto de vista de un observador, sus proyecciones 2D generan una distorsión de ellos debido a los tres puntos de fuga (V_1 , V_2 , V_3) y los áreas se ven diferentes. De la misma forma, las distancias que separan los 4 PCs relevados en un plano se ven con distancias diferentes en un plano paralelo de otro nivel. Los tres puntos de fuga son vinculados entre ellos. Sus posición dependen del observador o mejor dicho en este caso de la cámara digital y de sus parámetros internos. La técnica de homografía vincula las coordenadas de la realidad con las de la imagen: Además permite conocer la posición de los dos puntos de fuga horizontales. La posición del tercer punto de fuga se calcula a partir de la relación que vincula los tres puntos de fuga y los parámetros internos de la cámara digital (Hartley et al. 2004) obtenidos con imágenes desde diferentes punto de vista de una grilla de calibración de dimensiones conocidas (MPRT, 2012). La homografía inversa permite entonces de rectificar los resultados de velocidad medidos a partir del registro de las imágenes digitales de la creciente repentina.

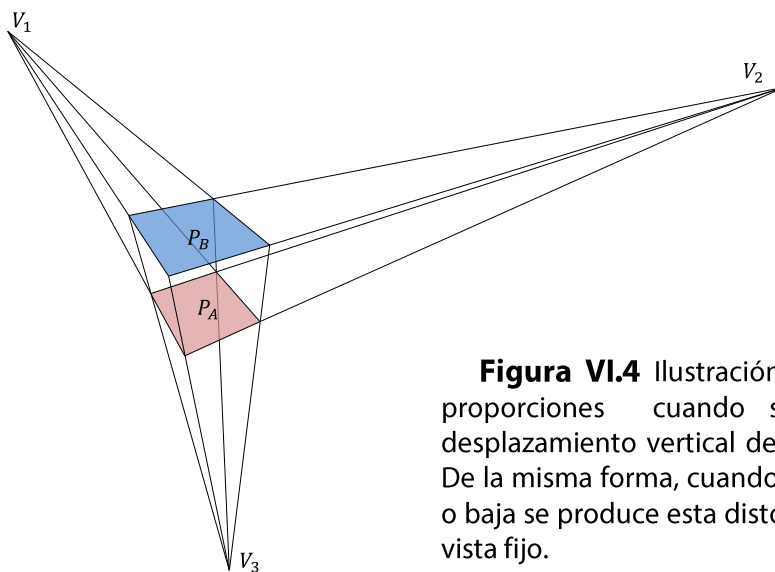


Figura VI.4 Ilustración de la distorsión de las proporciones cuando se proyecta en 2D el desplazamiento vertical de un plano en la realidad. De la misma forma, cuando la superficie del río sube o baja se produce esta distorsión desde un punto de vista fijo.

Para rectificar los resultados observados con LSPIV se relevó con una estación total los puntos de control PCs y las distancias entre cada uno de estos puntos.

Antes de aplicar la metodología a crecidas repentinas (donde las metodologías intrusivas no pueden ser implementadas) la técnica LSPIV se validó en condiciones

más favorables para el uso de ADCP (régimen permanente y velocidades menores). Para ello se utilizó un ADCP “River Surveyour S5” (YSI/Sontek) de 3.0 MHz, desarrollado específicamente para profundidades menores a 5m el cual fue utilizado simultáneamente sobre la misma sección que la técnica de LSPIV en régimen permanente.

VI.3 RESULTADOS

La validación de la técnica LSPIV, en contraste con la implementación de los ADCP “River Surveyour S5” (YSI/Sontek) de 3.0 MHz se realizó el día 25 de febrero de 2014 en condiciones de que el río estaba ya se encontraba crecido y se consideró como estacionario. El caudal medido con ADCP de 150 m³/s mientras el caudal estimado con la técnica de LSPIV (con $\alpha=0.85$) fue 6.7% menor. La velocidad superficial medida alcanzaba los 3m/s en ciertas zonas de la sección transversal.

Las 6 distancias que separan respectivamente los PCs se ven en la Figura VI.5 además del proceso de homografía aplicado a la región de interés. La Figura VI.6 muestra el resultado del Procesamiento sin rectificar del primer instante del video de la crecida ($t=0$ min). Mientras la Figura VI.7 muestra los resultados rectificados de la velocidad superficial longitudinal en [m/s] de la sección medida. El caudal correspondiente fue calculado según la metodología explicada con un coeficiente $\alpha=0.85$. Se repitió el proceso para los instantes 0.5; 1; 2; 3; 4 y 5 min. Los resultados de la evolución en el tiempo del caudal de la sección medida son visibles en la Figura 6. En 5 minutos el caudal aumento de 2.5 a 126 m³/s con una leve mayor aceleración durante los 3 primeros minutos.

Determinación experimental de caudales en ríos de montaña con LSPIV durante periodos de crecidas (máximos hidrológicos)

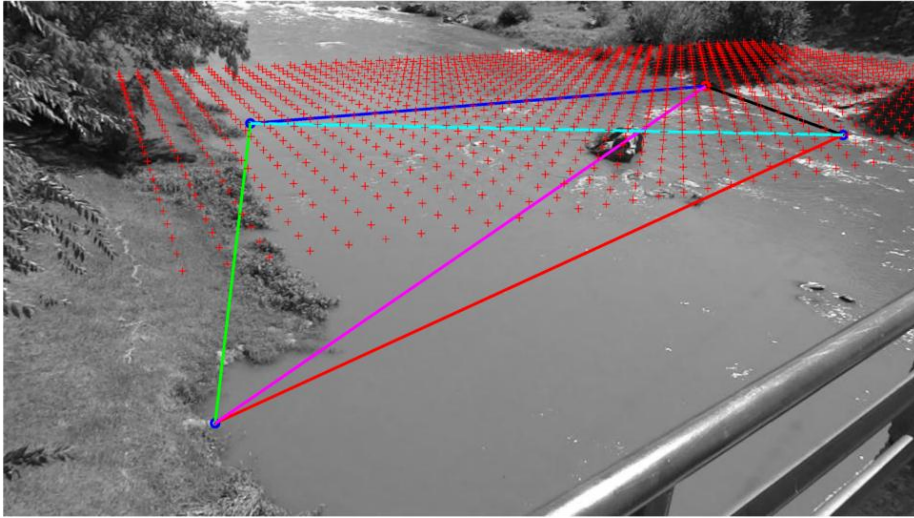


Figura VI.5 Imagen extraída del video de la crecida al instante $t=0\text{min}$ con los 4 Puntos de Control (circulo azules) y las 6 distancias que les separan entre ellos. La grilla compuesta de cruces rojas representa la región analizada. Proyectadas en la realidad, las cruces rojas se verían repartidas de forma homogénea y equidistante.

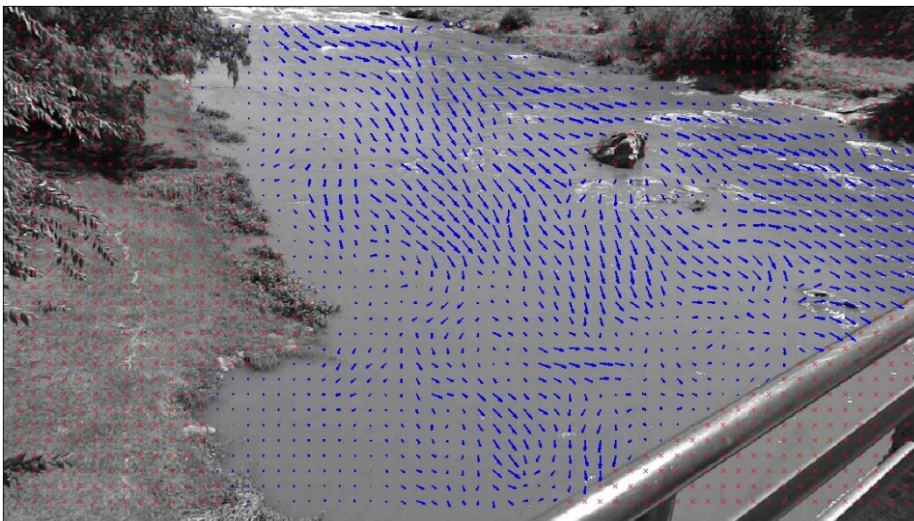


Figura VI.6 Vectores de velocidades superficiales (sin rectificar) determinados con LSPIV para el instante $t=0\text{min}$

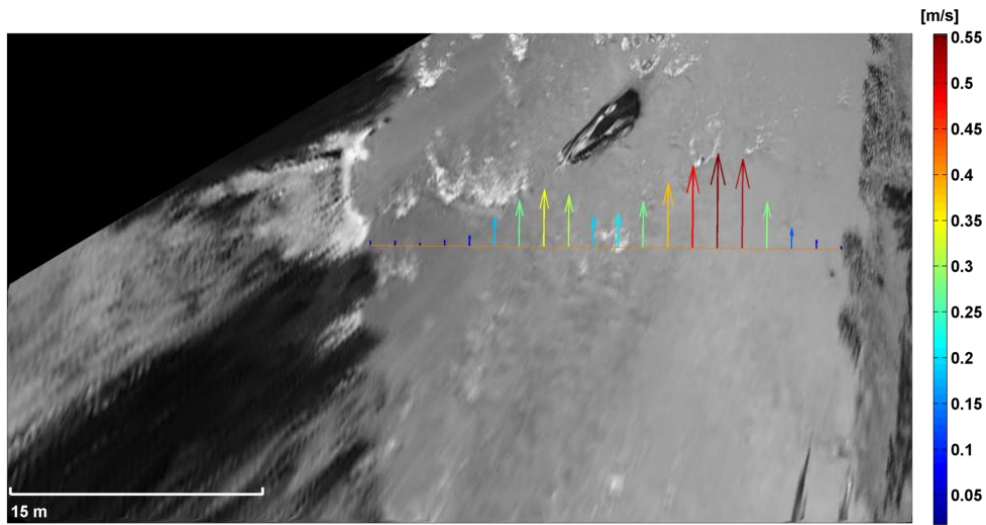


Figura VI.7 Perfil de Velocidad longitudinal [m/s] de la sección medida obtenido a partir de la rectificación de los resultados de la Figura VI.6

La Figura VI.8 muestra los perfiles transversales de velocidades superficiales determinados con LSPIV en 6 instantes durante la crecida repentina. Se observa un incremento importante (casi un orden de magnitud) de las velocidades superficiales en el tiempo.

Determinación experimental de caudales en ríos de montaña con LSPIV durante periodos de crecidas (máximos hidrológicos)

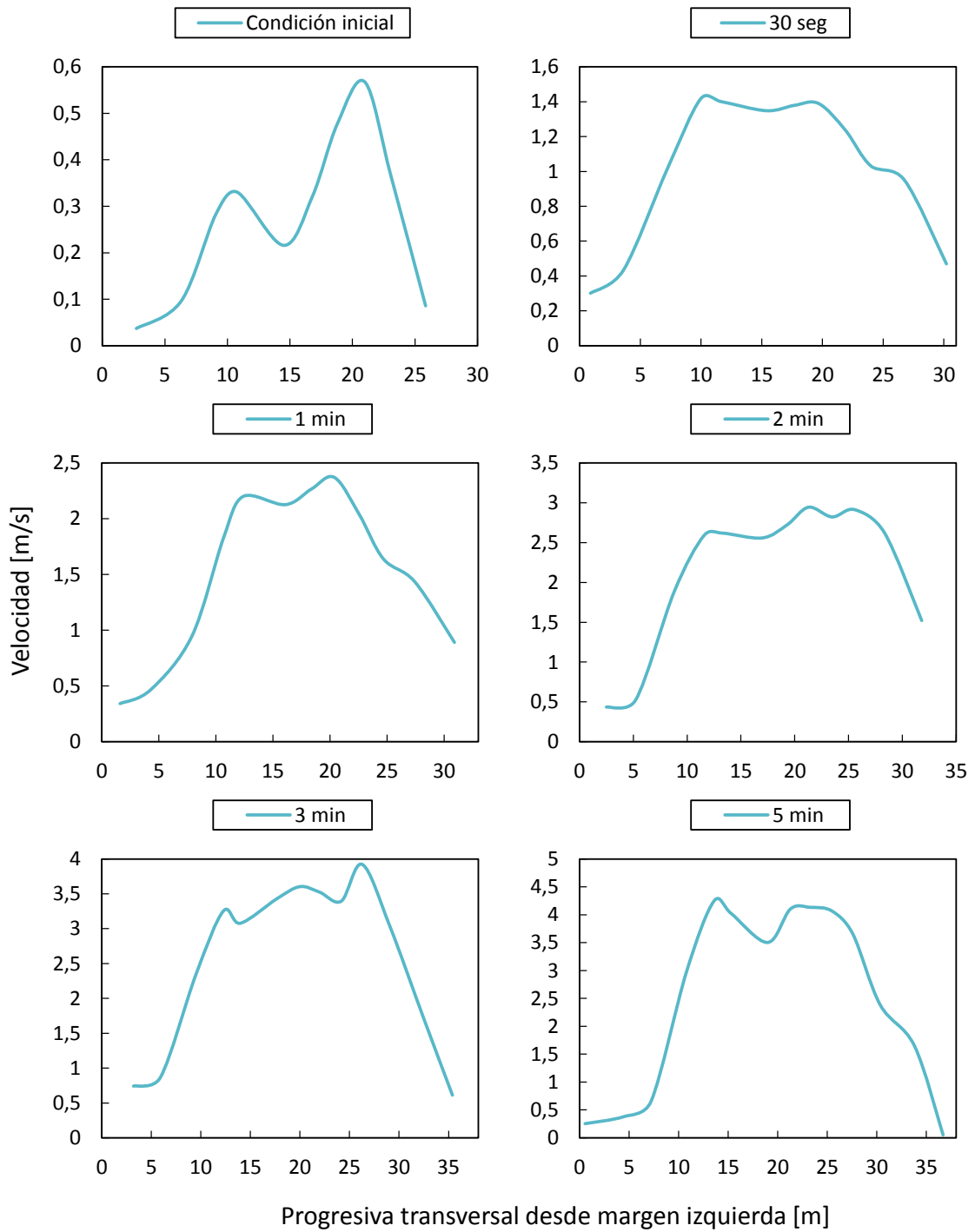


Figura VI.8 Perfiles transversales determinados en 6 instantes durante la crecida repentina

Las Figuras Figura VI.9, Error! Reference source not found.Figura VI.11 Figura VI.12 muestran la evolución temporal durante la crecida repentina de los caudales escurridos, la máxima profundidad del flujo, el área mojada y la velocidad media estimada como la relación entre el caudal y el área de escurrimiento. Se incluyen además en las Figuras Figura VI.9 y Figura VI.11 una tendencia polinómica de segundo orden ajustado sobre los datos observados mostrando un buen ajuste. Sin embargo la tendencia de la velocidad media de escurrimiento (Figura VI.12) cambia en el tercer minuto manteniéndose aproximadamente constante después de ese tiempo.

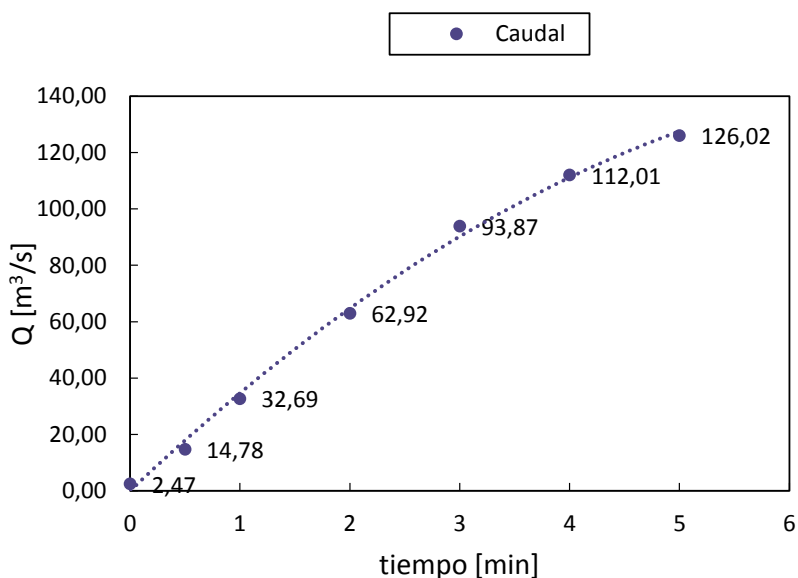
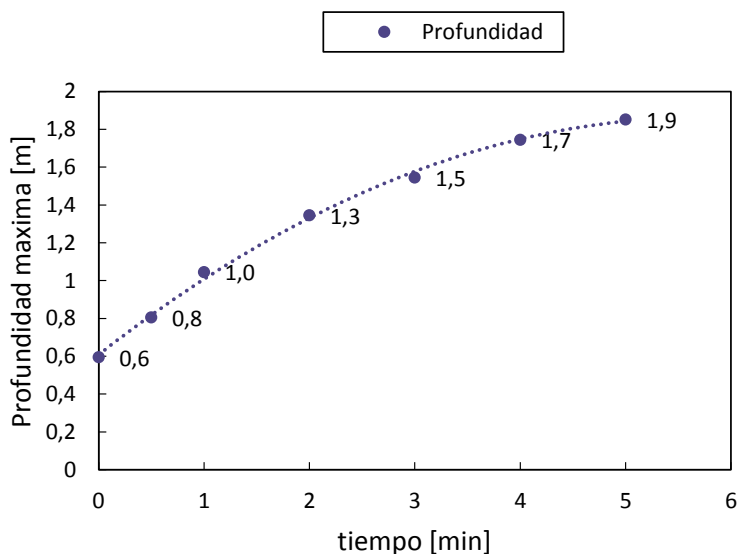


Figura VI.9 Evolución temporal del caudal medido en la sección con la técnica de LSPIV.



Determinación experimental de caudales en ríos de montaña con LSPIV durante periodos de crecidas (máximos hidrológicos)

Figura VI.10 Evolución temporal de la profundidad máxima en la sección de escurrimiento.

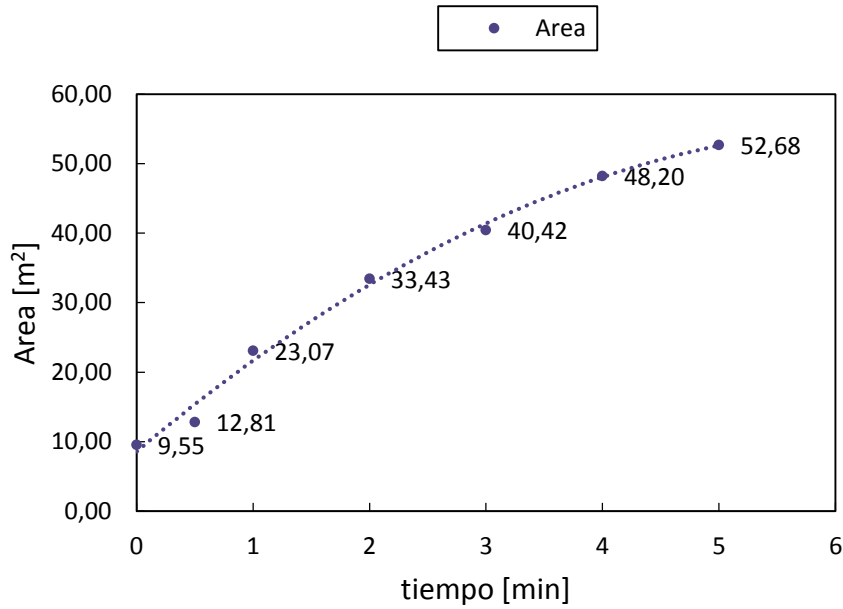


Figura VI.11 Evolución temporal del área de escurrimiento.

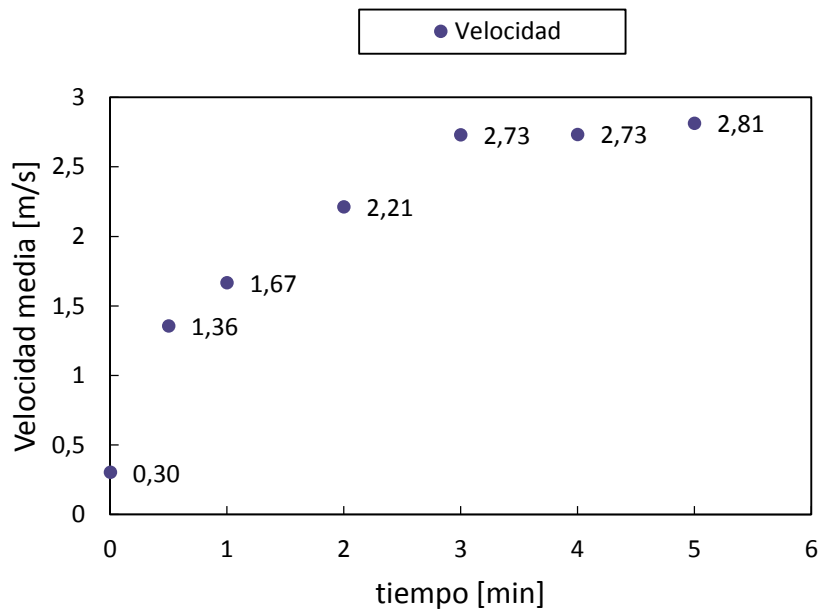


Figura VI.12 Evolución temporal de la velocidad media de escurrimiento.

CAPÍTULO VII

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE CAUDALES EN GRANDES RÍOS CON LSPIV DURANTE PERIODOS DE CRECIDAS (MÁXIMOS HIDROLÓGICOS)

VII.1 INTRODUCCIÓN

La cuenca hidrográfica del río Pilcomayo se sitúa aproximadamente entre los 19° y 26° Lat. Sur y entre los 57° y 67 ° de Long. Oeste. Abarca una superficie de aproximadamente 290.000 km² que se extiende en territorios de los países de Argentina, Bolivia y Paraguay e integra la gran Cuenca del Plata. El Río Pilcomayo es un río de montaña en la Cuenca Alta, con una extensión de 1.000 km, y al abandonar los Andes en la Localidad de Villamontes se convierte en un río de llanura. Aguas abajo de Villamontes, como consecuencia de las muy bajas pendientes, se presentan zonas de desbordes que anegan extensiones considerables de tierra en las épocas de crecidas. Uno de los principales objetivos presentes en los acuerdos suscritos por los tres países en los cuales se extiende su cuenca es la cuantificación del recurso hídrico en ese sistema y el análisis de su evolución espacial y temporal. Así ha quedado reflejado por ejemplo en los acuerdos entre Paraguay y Argentina (Creación de la Comisión Trinacional para el Desarrollo de la Cuenca del Río Pilcomayo y Comisión Binacional Administradora de la Cuenca Inferior del Río Pilcomayo) en los que ambos países han recogido el principio instituido en el Tratado de la Cuenca del Plata en cuanto al aprovechamiento múltiple y equitativo de los cursos de agua. En el avance de los estudios previstos a futuro y para el cumplimiento de los acuerdos existentes se hace necesaria una cuantificación precisa de los caudales utilizando modernas técnicas de medición disponibles en el estado del arte para verificar la precisión de la técnicas tradicionales utilizadas en la actualidad (por molinete desde vagoneta), así como también para obtener una caracterización detallada en espacio y tiempo de los flujos y un mayor conocimiento del transporte sólido para comprender principalmente los fenómenos de acreción, retroceso del cauce, atarquinamiento y posibilidad de avulsión.

La tecnología 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 actualmente una práctica universal en hidráulica fluvial debido a su simplicidad y bajo costo relativo, a lo que se le adiciona el hecho de proveer una alta resolución temporal y espacial del campo de flujo adquiriendo información que no es posible obtener por medio de métodos convencionales (Mueller y Wagner 2009; Oberg y Mueller 2007). El instrumento acústico utilizado comúnmente en el caso de mediciones en campo, es el ADCP. Aun cuando se ha comprobado que los ADCP son muy eficientes para cuantificar los caudales escurridos, caracterizar los campos de flujo y estimar las descargas sólidas de sedimentos en suspensión, algunas mediciones realizadas con esta tecnología en el Río Pilcomayo mostraron inconvenientes en su implementación debido a las altas tasas de transporte de sedimentos en suspensión

Determinación experimental de caudales en grandes ríos con LSPIV durante periodos de crecidas (máximos hidrológicos)

presentes, las que atenúan significativamente las señales acústicas. Por lo tanto, veremos en este capítulo que la técnica LPSIV puede ser implementada y representa un potencial para la estimación de caudal en ríos grandes.

Se evalúan experimentalmente distintas tecnologías para la cuantificación de caudales y caracterización del flujo en una sección del río Pilcomayo. En particular se evalúan las siguientes tecnologías: a) técnicas convencionales utilizando molinete desde vagoneta; b) tecnología Acústica utilizando tres diferentes ADCP con diferentes frecuencias acústicas; y c) LSPIV.

VII. 2 METODOLOGÍA

La evaluación experimental se realizó el día 20 de febrero de 2014 en la sección de Aforo “Villamontes” que se encuentra en la localidad de mismo nombre en Bolivia (Figura VII.1), en el departamento de Tarija a los 21,26° de Lat. Sur y 63,50° de Long. Oeste a 407 msnm y es operada por Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia (SENAMHI) en acuerdo con la Dirección Ejecutiva de la Comisión Trinacional para el desarrollo de la cuenca del río Pilcomayo (DE CTN). Es una sección estable ubicada al pie de los Andes unos kilómetros aguas arriba del comienzo de la cuenca baja, donde sus sedimentos todavía son gruesos. La importancia de esta estación es que proporciona valores de caudales tanto líquidos como sólidos de ingreso a la cuenca baja. En esta estación se poseen registros de caudales medios diarios desde Agosto de 1976 y registros de sedimentos en suspensión y granulometría desde 1981. El caudal medio anual es de 237 m³/s y los picos de crecidas han llegado a 6500 m³/s. Previo a las mediciones realizadas con las nuevas tecnologías se realizaron aforos líquidos y sólidos con técnicas convencionales (molinetes y muestreadores de sedimento en suspensión). La importancia de un preciso conocimiento de los caudales líquidos y sólidos pasantes por esa sección se manifiesta, particularmente, al calcular el balance de descargas líquidas y sólidas entre la misma y Misión la Paz, ubicada 190 km aguas abajo de aquella, y la magnitud de los desbordes que ocurran por ambas márgenes en dicho tramo.



Figura VII.1 Localización de la sección de medición

En la Figura VII.2 se muestra la sección de medición aforada con las distintas técnicas experimentales. Esta sección coincide con la sección de aforo Villamontes (Bolivia) la cual incluye un sistema de vagoneta para desplazarse a lo ancho de la sección del río.

Determinación experimental de caudales en grandes ríos con LSPIV durante periodos de crecidas (máximos hidrológicos)



Figura VII.2 Sección de medición aforada del río Pilcomayo en Villamontes, Bolivia.

En la evaluación in situ se utilizaron tres Perfiladores de Corriente Acústico Doppler con diferentes frecuencias acústicas que definen las configuraciones de registro espacial y temporal. Así, se utilizó un ADCP “River Surveyour S5” para aguas poco profundas con una frecuencia acústica de 3MHz fabricado por la compañía YSI/Sontek y dos ADCP denominados “Workhorse Río Grande” fabricado por la compañía Teledyne RD Instruments, que presentan ambos similares características físicas pero trabajan a diferentes frecuencias, (600 kHz y 1200 kHz), brindándoles diferentes capacidades y condiciones para aforar, caracterizar el flujo y el transporte de sedimentos. Todos los ADCP se instalaron en plataforma móviles para su utilización y se operaron desde la vagoneta (Figura VII.2).

En los casos de mediciones desde plataformas móviles (como por ejemplo las utilizadas en este capítulo), la estrategia de muestreo espacial y temporal actualmente recomendada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos – (USGS) para la determinación del caudal medio en ríos y canales consiste en realizar múltiples transectas (cruces) del canal en pares recíprocos. En cada transecta se obtienen datos en tiempo real vía bluetooth de la geometría de la sección, de la distribución de la velocidad del flujo en la sección, y por lo tanto del caudal. Los valores de caudales reportados en este informe corresponden al promedio de dos transectas realizadas en cada sección con cada uno de los perfiladores. En todos los casos se utilizó al GPS como sistema de referencia para monitorear la posición de cada plataforma

móvil. Para la adquisición de datos con el Perfilador de Corriente Acústico Doppler “River Surveyour S5” para agua poco profundas se utilizó el software RiverSurveyour Live v.2.00 y firmware RiverSurveyour firmware v1.0, de acuerdo a las recomendaciones sugeridas por YSI/Sontek. Una de las principales características de esta versión es la incorporación del algoritmo “SmartPulse” el cual, en base a la profundidad, velocidad y niveles de turbulencia del flujo, adapta el esquema de pulso acústico 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. Para la adquisición de datos con el Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP) “Workhorse Río Grande” se utilizó el software WinRiver II firmware v2.10, de acuerdo a las recomendaciones sugeridas por el U.S. Geological Survey de los Estados Unidos. Para la implementación de LSPIV (medición del campo de velocidad superficial en la sección de interés) se ha utilizado una cámara digital WX300 de marca SONY. La cámara fue colocada sobre una grúa encima de un trípode lo que permitió tener suficiente altura para enfocar sobre la sección de interés y la cámara digital se controló de forma remota. Se asumió que los patrones visibles de a la superficie del agua se desplazan a la misma o “quasi” a la misma velocidad que ella. Esta hipótesis nos permite utilizar las imperfecciones visibles a la superficie del agua como trazador. Todo el sistema experimental descrito se ubicó sobre la margen izquierda del río (Figura VII.3). La resolución de las imágenes en modo “video” es de 1920 x 1080 pixeles y la frecuencia de grabación de imágenes en el mismo modo es de 30 imágenes o cuadros por segundo. Se grabó una película de 4 minutos de la sección de interés a 30fps. Las imágenes fueron extraídas de la película a una frecuencia de 2fps. A esta frecuencia los patrones visibles a la superficie del agua se desplazan de una cantidad de pixeles adecuada entre una imagen y la siguiente para el buen funcionamiento de la técnica. Se utilizó el método DFT (Capítulo I) con ventanas de interrogación de 128, 64 y luego 32 pixeles para obtener el campo de desplazamiento de toda la sección del río. El resultado obtenido luego de la aplicación de este algoritmo en [pixel/imagen], no es representativo todavía de campo de velocidad superficial ya que los desplazamientos entre imágenes son distorsionados debido a la oblicuidad de la cámara (una distancia arbitraria en [m] no representa la misma cantidad de pixeles según su ubicación sobre la imagen). Por ello después del procesamiento es necesario rectificar los resultados al fin de obtener el campo de velocidad real en [m/s] de la sección de interés. Para rectificar los resultados de PIV, se calculó la matriz homografía (Capítulo II) para la cual es necesario conocer las coordenadas de 4 Puntos de Control (PC) en ambos sistemas: Imagen en [pixel] y Realidad [m]. Por eso se utilizó se relevó 4 PCs con GPS. El caudal se estimó integrando el perfil de velocidad superficial obtenido sobre la batimetría medida con el ADCP “Workhorse Río Grande”. Se multiplica el caudal estimado por un coeficiente α

Determinación experimental de caudales en grandes ríos con LSPIV durante periodos de crecidas (máximos hidrológicos)

(Cheng et al., 2004) que caracteriza la relación entre la velocidad media y la velocidad superficial de la sección aforada ($\alpha=0.85$ teórico).



Figura VII.3 Vista de la cámara digital ubicada sobre la margen izquierda del río.

A continuación se detallan aspectos positivos y negativos observados en la implementación de los tecnologías y metodologías experimentales evaluadas en este capítulo. Los Perfiladores RDI “Workhorse Río Grande” de ambas frecuencias (600 kHz y 1200 kHz) demostraron ser aptos para determinar el caudal, perfil de velocidades y morfología del fondo en la sección de estudio. Ajustes de parámetros de configuración del instrumento debieron realizarse para ampliar los rangos de medición con estos perfiladores producto de las elevadas atenuaciones de la señal generadas por la presencia de sedimento en suspensión. El ADCP de 600 kHz presenta mayor robustez (sin pérdidas de datos de velocidad ni registro del fondo) aunque su resolución espacial es menor que perfiladores con mayor frecuencia acústica. El perfilador ADCP “River Surveyour S5” para aguas poco profundas caracterizó solamente el campo de velocidades de la región cercana a la superficie libre (2.5m) a lo largo de toda la sección transversal y no registró valores de velocidad a profundidades mayores debido a su elevada frecuencia acústica y a la elevada carga de sedimentos en suspensión. La Figura VII.4 muestra un contraste entre perfiles transversales de velocidad medidos con las diferentes técnicas incluyendo los valores relevados utilizando molinetes. Para ello se seleccionaron los datos de velocidad registrados por cada técnica y/o instrumento en la región cercana a la superficie libre; los datos de

ADCP utilizados corresponden a las celdas más cercanas a la superficie del agua. Para los Perfiladores RDI “Workhorse Río Grande” de ambas frecuencias (600 kHz y 1200 kHz) los datos más cercanos a la superficie libre se registraron a profundidades de 1.1m y 0.92m, respectivamente mientras que para el ADCP “River Surveyour S5” se registraron valores de velocidad a una profundidad de 0.15m (mayor frecuencia acústica, menor el tamaño de celda utilizado y menor la profundidad hasta la primera celda con datos de velocidad válidos). Se observa un buen contraste entre los valores relevados por las distintas técnicas y se destaca que la técnica LSPIV reprodujo en forma satisfactoria el campo de velocidades superficiales de flujo.

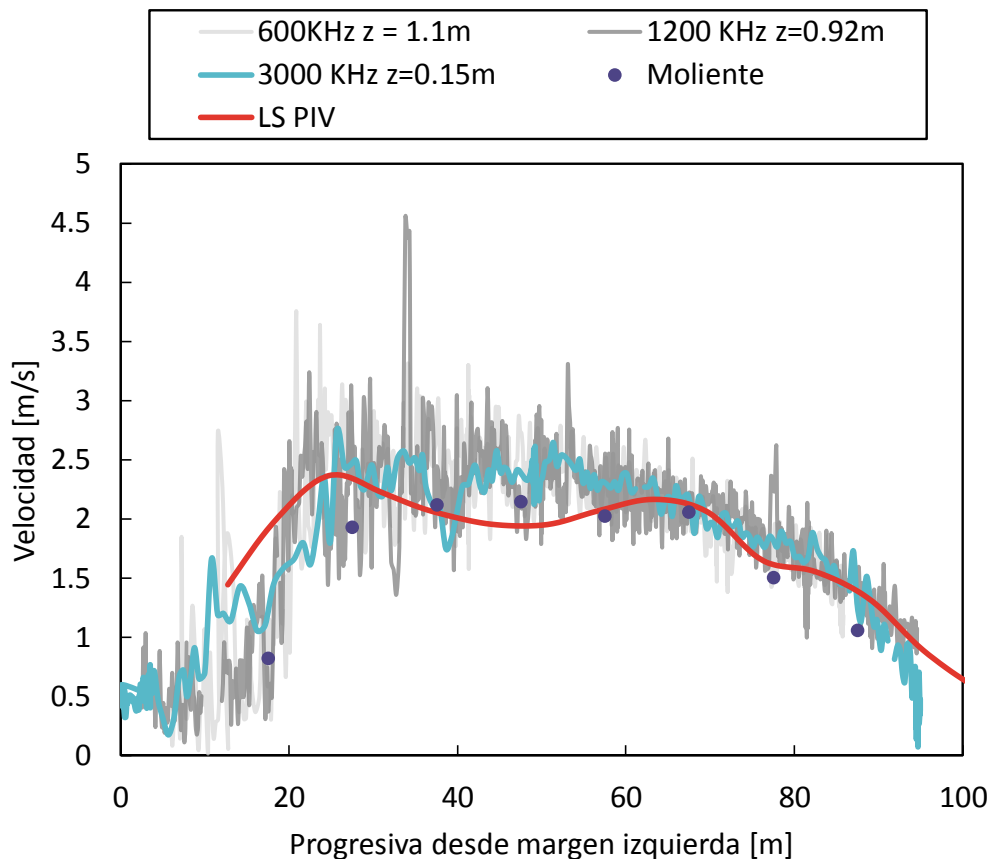


Figura VII.4 Contraste entre perfiles transversales de velocidad medidos en la región cercana a la superficie libre con las diferentes técnicas.

La Figura VII.5 muestra un contraste entre la batimetría de la sección transversal relevada durante la medición de caudales con las diferentes técnicas incluyendo los valores de profundidad relevados durante la medición con molinetes. Se destaca que el ADCP “Workhorse Río Grande” de 600 kHz de frecuencia acústica no presenta

Determinación experimental de caudales en grandes ríos con LSPIV durante periodos de crecidas (máximos hidrológicos)

perdidas de datos de velocidad ni registro del fondo, en contraste con los otros perfiladores.

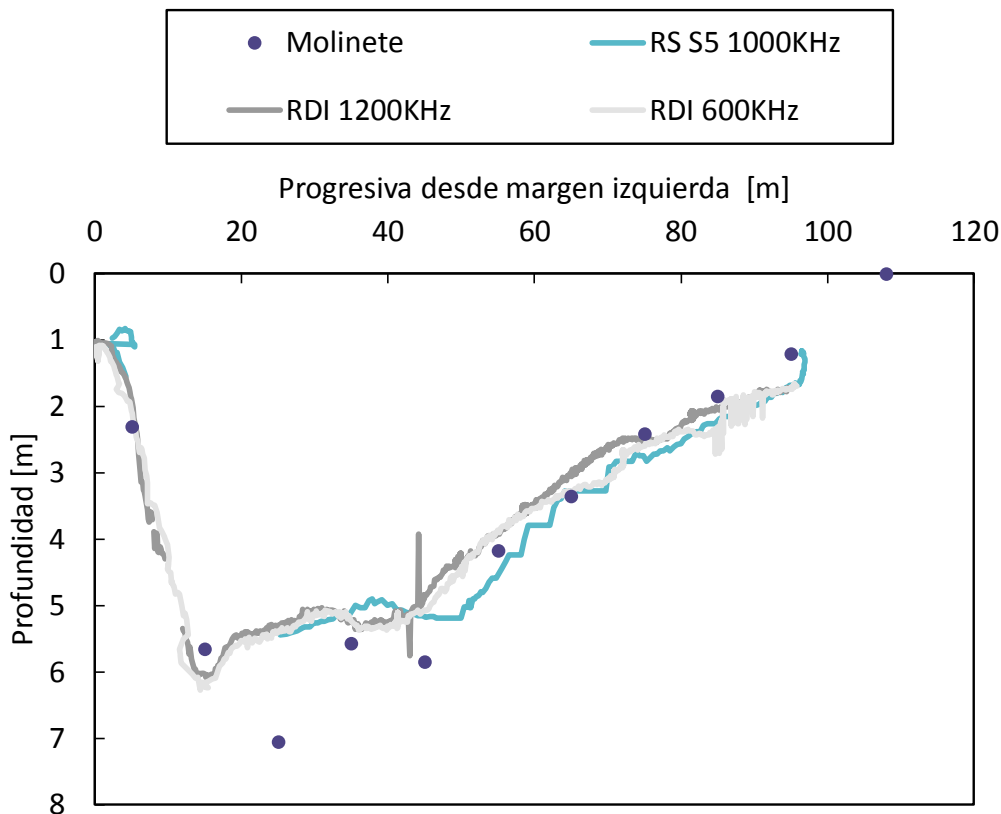


Figura VII.5 Contraste entre la batimetría de la sección transversal relevada durante la medición de caudales con las diferentes técnicas

En lo que respecta a los valores de caudal aforados con técnicas convencionales (molinetes desde vagoneta) fue de $628\text{m}^3/\text{s}$ mientras que los valores aforados con los ADCP “Workhorse Río Grande” fueron de $659\text{ m}^3/\text{s}$ (diferencia con molinete de 4.9%) y $640\text{ m}^3/\text{s}$ (diferencia con molinete de 1.9%) para las frecuencias acústicas de 600KHz y 1200KHz, respectivamente. A partir del perfil transversal de velocidades superficiales relevados con LSPIV y la batimetría medida con ADCP se estimó el valor de caudal escurrido igual a $582\text{ m}^3/\text{s}$ (diferencia menor al 7% con el valor aforado con ADCP “Workhorse Río Grande” de 600 kHz).

CAPÍTULO VIII

GUÍA METODOLÓGICA RECOMENDADA PARA
IMPLEMENTAR LAS TÉCNICAS DE VELOCIMETRÍA
POR IMÁGENES DIGITALES A GRAN ESCALA

El contenido del siguiente capítulo corresponde a una guía publicada en inglés en forma conjunta con USGS y WSC en la siguiente página:

<https://my.usgs.gov/confluence/pages/viewpage.action?pageId=546865360>

VIII.1 INTRODUCCIÓN

En fin de promulgar la técnica desarrollada en esta tesis se elaboró una guía metodológica para la grabación eficiente de videos destinados a ser procesados para la estimación de caudal. Dos instituciones internacionales, “U.S. Geological Survey” de los Estados Unidos (USGS) y “Water Survey of Canada” de Canadá (WSCa), están explorando la posibilidad de usar la técnica de velocimetría por imágenes de partículas a gran escala (LSPIV) para obtener mediciones de velocidades superficiales del flujo en arroyos y ríos. Actualmente (2016), se espera que la técnica LSPIV sea una herramienta valiosa para realizar mediciones de caudal cuando las técnicas tradicionales no sean viables, ya sea para la verificación de mediciones indirectas o como respaldo de mediciones directas de caudal. Por ejemplo, este método podría ser especialmente utilizado en ríos y arroyos que experimentan cambios muy rápidos en su estado (y por ende de caudales), como en aquellos que experimentan crecidas repentinas. LSPIV también puede ser utilizado para realizar mediciones de velocidades superficiales para la calibración de modelos u otros estudios hidráulicos.

Las siguientes recomendaciones han sido desarrolladas en base a recomendaciones y la experiencia de grupos de investigación de USGS, el WSCa y el Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA) de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Se espera que estas recomendaciones sigan evolucionando a medida que aprendamos de nuestra experiencia.

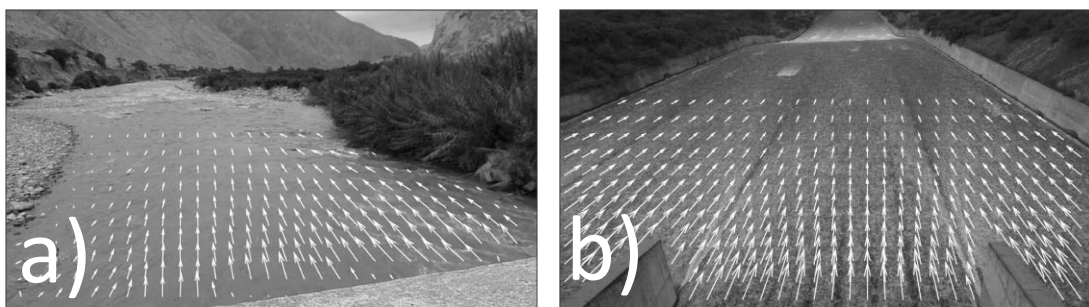


Figura VIII.1 Imágenes con ejemplos de aplicación de LSPIV. a): Campo de desplazamientos promedio de la superficie del agua del río Pisco, Pisco, Perú. b): Campo de desplazamientos promedio del flujo sobre el vertedero de la presa de Arroyo Corto, Córdoba, Argentina

VIII.2 SÍNTESIS METODOLÓGICA RECOMENDADA

- La mayoría de los sensores digitales de imágenes (cámaras, teléfonos, etc.) pueden ser utilizados para capturar videos para luego ser procesados con LSPIV. Es recomendable evitar el uso de lentes con gran angular y otras fuentes de distorsión de imagen. Se deben utilizar resoluciones de cámara de al menos 640x480 pixeles.
- Grabar un video de al menos 1 minuto para aumentar la posibilidad de obtener resultados de buena calidad. Si bien durante el procesamiento el video probablemente sea recortado, a mayor longitud de registro del mismo, mejores serán los resultados alcanzados.
- La plataforma de la cámara (trípode, persona, etc.) debe ser lo más estable posible. Si no se dispone de un trípode u otro montaje fijo, tratar de estabilizar la imagen apoyando la cámara sobre objetos o sobre sus rodillas. Existen algunos ejemplos en internet con recomendaciones para estabilizar un video sin trípode (<https://wistia.com/blog/stabilizing-handheld-video>).
- Si se toma un video oblicuamente (por ejemplo desde una margen o desde un puente), es preferible capturar el video de la superficie del agua con una orientación de costa a costa capturando el video sobre una sección en vez de hacerlo con una orientación hacia aguas abajo o aguas arriba desde un puente. NOTA: esto aplica solamente a perspectivas oblicuas del video. Esto es aceptable si se captura el video desde arriba en forma perpendicular al flujo y se observa la región de interés.
- Asegúrese que en el encuadre del video se incluya el ancho total de la sección de medición típica. (ej., es preferible mirar hacia abajo del agua que medir a través de ella).
- Asegúrese que el encuadre incluya puntos fijos (ej., arboles, estructuras, costa) en ambos lados en la imagen. Trate de conseguir puntos fijos que se encuentren cercanos a la superficie del agua.

Capítulo VIII

- Incluya un mínimo de cuatro (4) puntos fijos y permanentes, en donde las distancias entre ellos puedan ser medibles en el mismo momento en que se toma el video o en un tiempo posterior (estacas u otras marcas temporales pueden ser instaladas si no existen puntos de referencia adecuados).
- Filme en una zona donde los patrones superficiales del flujo sean uniformes en el tiempo. Algunos patrones superficiales son aceptables, pero si los mismos se propagan en la corriente debido a otros procesos diferentes a la advección, los mismos alterarán los resultados de LSPIV (por ejemplo, las olas formadas por el viento que viajan hacia aguas arriba del flujo reducirán las velocidades superficiales medidas por la técnica). Además, se debe asumir que los patrones se van moviendo en el mismo plano que la superficie del agua (por ejemplo, grandes depresiones en la superficie del agua deben ser evitadas).
- Es preferible tomar el video sobre una sección del río en que el lecho sea estable (que no esté sujeta a erosión). Cuando esto no sea posible, se deben buscar secciones que sean más estables.
- Evitar reflexiones, sombras y patrones brillantes en la superficie filmada.

VIII.3 RECOMENDACIONES: DE DETALLE

1. Puede ser utilizado cualquier sensor de cámara que tenga una resolución mayor a 640x480 píxeles (ej., mayoría de smartphones). Utilice la mayor definición que tenga el dispositivo. El video debe ser capturado como mínimo con 15 fotogramas por segundo (fps). En flujos de gran velocidad (ej. vertedero de una presa), se prefiere y son potencialmente necesarios videos con mayor resolución temporal (mayor cantidad de fps). Cámaras capaces de captar hasta 60 fps se están convirtiendo en productos cada vez más comunes. La captura del video debe ser lo más estable posible, ya se apoyando la cámara sobre un objeto fijo, la baranda de un puente o, idealmente, utilizando un trípode (Figura VIII.2). Evitar utilizar zoom y tomas panorámicas.



Figura VIII.2 Ejemplo en donde una cámara digital se apoyó sobre una baranda por encima de una compuerta.

2. Se debe evitar utilizar lentes que distorsionan la imagen. Cuando se utiliza un lente de zoom tener cuidado de no utilizar las opciones de gran angular. En el caso de utilizar este tipo de lentes es importante anotar y guardar información sobre el tipo de lente para que puedan realizarse las correcciones por distorsión durante el procesamiento del video.
3. Buscar un lugar adecuado para tomar el video, que incluya 4 puntos de referencia fijos fácilmente visibles y que la distancia entre ellos pueda ser medida por el operador, ya sea en el momento en que se traba el video o bien durante una visita posterior. El video puede ser obtenido desde un puente (Figura VIII.3) o desde la costa (Figura VIII.4), teniendo especial cuidado de evitar zonas con apreciables efectos producidos aguas abajo de pilas.



Figura VIII.3 Imagen de un video tomado desde un Puente en donde los puntos de control son rocas.



Figura VIII.4 Imagen de un video tomado desde la costa en donde los puntos de control son troncos de árboles.

4. Capturar el video (que incluya el ancho total de la sección de medición) desde lo más alto posible, incluyendo ambas costas en la imagen (Figura VIII.5, Figura VIII.6 y Figura VIII.7). Los errores en los resultados del procesamiento con LSPIV aumentan a medida que disminuye el ángulo entre la cámara y la superficie del agua.

Guía Metodológica recomendada para implementar las técnicas de velocimetría por imágenes digitales a gran escala



Figura VIII.5 Imagen de un video tomado desde un puente en donde se observan ambas costas.



Figura VIII.6 Imagen de un video tomado desde una compuerta en donde ambas costas son visibles.



Figura VIII.7 Imagen de un video en donde las costas y los puntos de control no son visibles.

5. Evitar tramos susceptibles a la socavación o sedimentación ya que con esta técnica no se puede captar la variación de las batimetrías de las secciones transversales durante un evento de crecida.
6. Evitar reflejos, sombras y patrones brillantes en la superficie filmada, tales como los que se muestran en Figura 8.8. Se pueden utilizar filtros de polarización para mitigar o remover estos reflejos sobre la superficie.



Figura VIII.8 Imagen de un video tomado desde un Puente en donde se observan reflexiones y patrones brillantes.

7. Registrar la fecha y hora exacta de la filmación, utilizando la zona horaria de la zona.

CAPÍTULO IX

EVALUACIÓN DE USOS INNOVADORES DE LAS TÉCNICAS DE VELOCIMETRÍA POR IMÁGENES DIGITALES

IX.1 INTRODUCCIÓN

La técnica remota de Velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala (LSPIV, por sus siglas en inglés) permite la medición de campo de velocidad superficial y la cuantificación de caudal, preservando la seguridad del personal y la fiabilidad de las mediciones (Fujita et al. 1998; Creutin et al. 2003; Hauet 2006; Jodeau et al. 2008; Muste et al. 2008, 2011; Le Coz et al. 2010, 2014; Bechle y Wu 2014). Fujita et al. (1998) implementó la técnica para cuantificar caudales en el río Yodo en Japón mientras estaba crecido. Los cuatro trabajos siguientes (Creutin, Hauet, Jodeau y Muste) utilizaron LSPIV para medir el caudal en el Río Iowa (EEUU) y el río de Arc (Francia) de forma continua durante varios meses a partir de imágenes captadas por una cámara digital fija. Además, Le Coz et al. (2010) aplicó la técnica para la evaluación de caudal en crecidas repentinas de ríos mediterráneos en Francia. Además, Bechle y Wu (2014) utilizaron varias cámaras para cubrir todo el ancho del estuario del río Danshui en Taiwán para estimar su caudal (cuya característica es su no-estacionariedad). La técnica experimental LSPIV en la actualidad se encuentra en constante desarrollo. En ese marco, los autores del presente capítulo no solamente aplican la técnica experimental sino que se encuentran realizando desarrollos tecnológicos continuamente para mejorar su eficiencia e implementarla en flujos de alta velocidad que hasta la actualidad no habían sido caracterizados. El desarrollo e implementación de nuevos programas informáticos libres y abiertos, basados sobre algoritmos del estado del arte es parte de las actividades del grupo de investigación del CETA - UNC (Centro de Estudio y Tecnología del Agua – Universidad Nacional de Córdoba).

En este trabajo se presentan tres usos innovadores de la técnica LSPIV para caracterizar y cuantificar escurrimientos hídricos superficiales:

- a) aplicación de LSPIV utilizando imágenes digitales registradas desde un vehículo aéreo no tripulado (VANT) para cuantificar caudales escurridos superficialmente; y
- b) la cuantificación y caracterización del campo de velocidad de flujo en estructuras de descarga de excedentes hídricos en una presa.
- c) la determinación de la vulnerabilidad sobre la estabilidad de las personas en inundaciones urbanas

El uso de VANT permitiría reducir los errores asociados a la implementación de LSPIV por la oblicuidad de la cámara cuando se realizan las mediciones desde puentes y/o márgenes de los cursos fluviales de medianas y grandes escalas. En un estudio interno realizado recientemente en el CETA (Lucero, 2015), se evaluaron los errores

en la implementación de LSPIV para la determinación de caudales según la posición de la cámara. Se utilizó la metodología descrita en el presente capítulo y se analizaron imágenes sintéticas, probando diferentes posiciones de cámara con respecto a la dirección del flujo (cenital, lateral 45° y 15° , esquina 45° y 15° y frontal 45° y 15°). Se repitieron los análisis para 11 condiciones diferentes y se determinó el caudal en 3 secciones diferentes. Un total de 231 caudales fueron determinados y comparados con el caudal teórico. Lo que se concluyó de ese estudio fue que el sesgo generado sobre la determinación de caudal debido a la orientación de la cámara solamente es del orden de 1% para una posición cenital mientras que el sesgo es del orden del 6% para una posición lateral a 15° medidos desde el eje horizontal (considerando la altura humana promedio desde una orilla) y aún mayor cuando el ángulo respecto a la horizontal disminuye. Al analizar estos resultados es que se justifica el uso de VANT para una mejor calidad en la medición de caudales.

Por otra parte, en la actualidad no se encuentran disponibles tecnologías de medición que puedan ser implementadas en las condiciones de flujo presentes en estructuras de descarga de excedentes hídricos de una presa que presenten flujos a superficie libre. Estos flujos presentan elevadas velocidades de escurrimiento (en algunos casos superiores a los 10m/s) que impiden la implementación de técnicas intrusivas y elevadas concentraciones de burbujas de aire lo que impide el uso de técnicas hidroacústicas. Es por esto, que se evalúa la implementación de LSPIV sobre estas estructuras de descarga para caracterizar la distribución espacio temporal de las velocidades del flujo durante el funcionamiento de la estructura.

Finalmente, en los últimos años, la probabilidad de ocurrencia de inundaciones urbanas ha aumentado significativamente. Recientemente se han publicado diversos artículos científicos-técnicos relacionados a problemáticas específicas generadas por escurrimientos superficiales durante inundaciones urbanas como, por ejemplo, efectos nocivos sobre infraestructura urbana por anegamiento e impactos de altas velocidades de flujo sobre La mayoría de los trabajos publicados se basan en investigaciones realizadas utilizando modelos numéricos y modelos físicos a pequeña escala (estos últimos presentan efectos de escala). Se presenta una metodología experimental para la cuantificación de caudales y velocidades de flujo durante inundaciones urbanas utilizando la técnica de LSPIV.

IX.2 SITIOS DE MEDICIÓN

A continuación, se presentan los sitios de medición en los cuales se aplicó la técnica LSPIV:

- a) Sitio de medición en el cual se implementó LSPIV con imágenes digitales registradas desde un VANT para cuantificar caudales escurridos superficialmente

El sitio de medición evaluado para esta aplicación de LSPIV es un tramo del río Suquía en la provincia de Córdoba, Argentina ($31.418865^{\circ}\text{S}$; $64.172883^{\circ}\text{O}$). La sección aforada del río en condición de crecida se encuentra al frente de la Casa de Gobierno de la provincia de Córdoba (Figura IX.1). Como se puede observar en esa figura, si se coloca la cámara a nivel del ojo humano (aproximadamente a 1.8 m. de altura desde el nivel del suelo), la zona más lejana vista desde la orilla (es decir la margen derecha del flujo ubicada a 35 metros desde la otra margen) posee una resolución espacial considerablemente más baja que la zona más cercana (margen izquierda del flujo), lo cual produce errores en los resultados de velocidad al aplicar LSPIV. Es por ello que se justifica el uso de VANT para registrar las imágenes y de esa manera reducir los efectos ocasionados por la oblicuidad de la cámara, ya que al captar las imágenes desde el VANT, se reducirá notablemente el efecto de oblicuidad producto de la posición de la cámara.



Figura IX.1 Sitio de medición en el cual se implementó LSPIV utilizando imágenes digitales registradas desde un VANT para cuantificar caudales escurridos superficialmente. Vista oblicua de la zona de interés desde la margen izquierda.

b) Sitio de medición utilizado para la cuantificación y caracterización del campo de velocidad de flujo en estructuras de descarga de excedentes hídricos en una presa.

El sitio de medición seleccionado en esta aplicación es la estructura de descarga de excedentes hídricos (Figura IX.2) de la Presa Arroyo Corto, en el Río Ctalamochita de la provincia de Córdoba, región central de Argentina, a la salida de la cuenca del Río Grande ($-32.218063^{\circ}\text{S}$; $-64.569177^{\circ}\text{O}$). La presa es de materiales sueltos, tiene una altura sobre lecho del río de 43.50 m y una longitud de 1528.60 m, lo que le permite almacenar 34.47 Hm³ de volumen de agua. El caudal medio anual del río es de 12.02 m³/s, habiéndose registrado crecidas de hasta 750 m³/s. El vertedero es del tipo libre, posee un ancho de 75.40 metros, se encuentra ubicado sobre la margen izquierda de la presa y presenta 4 compuertas que regulan los caudales evacuados.



Figura IX.2 Sitio de medición utilizado para la cuantificación y caracterización del campo de velocidad de flujo en la estructura de descarga de excedentes hídricos de la Presa Arroyo Corto.

- c) Sitio de medición utilizado para la cuantificación y caracterización de campo de velocidad en zona urbana para la determinación del riesgo debido a una amenaza.

El evento de inundación repentina que causó daños importantes ocurrió el 29 de noviembre de 2012 en la calle Amancio González a pocos metros de la intersección con la calle Pirizal en la ciudad de Asunción ($25.318459^{\circ}\text{S}$; $57.612005^{\circ}\text{O}$). Este evento de inundación fue generado por una fuerte tormenta de gran magnitud (95 mm de profundidad de lluvia en 7 horas entre 6:40 y 13:40); Y la máxima intensidad registrada de lluvia durante este evento fue de 115 mm / h. La recurrencia de este evento de lluvia es de menos de 5 años, por lo que el evento que estamos estudiando no es extraordinario. Este valor de recurrencia se calculó a partir de la curva intensidad pluviométrica - duración - recurrencia de Asunción, Paraguay.



Figura IX.3 Sitio de medición utilizado para la cuantificación y caracterización del campo de velocidad de flujo en la calle Amancio González, Asunción

IX.3 INSTRUMENTOS UTILIZADOS

Los instrumentos utilizados para las mediciones que se presentan en este capítulo son los siguientes:

a) Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT conocido como “Drone” en inglés) : el VANT utilizado en este trabajo es un Phantom 2+ de la marca DJI, equipado de una cámara de alta resolución que graba video con una resolución de 1920 x 1080 pixeles a una frecuencia de 30 cuadros por segundo. La cámara está colocada sobre un dispositivo (denominado “gimbal”) que absorbe las vibraciones del vehículo y estabiliza la cámara para una mejor calidad de imagen. En los ensayos cuyos resultados se describen aquí, se grabó una película durante 60 segundos con el VANT volando en forma estacionaria a una altura aproximada de 25m.

b) Cámara digital Sony WX300 con sensor CMOS, montada sobre un trípode que permite una cierta estabilidad y enfocar todo el ancho del río. La cámara digital registra un video de alta definición con una resolución de 1920 x 1080 pixeles a una frecuencia de 30 cuadros por segundo.

c) Una estación total que permite relevar las coordenadas de los puntos de control necesarios para la ortorectificación de los resultados.

d) Un Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP, por sus siglas en inglés) YSI/SonTek Riversurveyor S5, equipado con un GPS que permite obtener en forma alternativa la posición del perfilador en cada instante del recorrido con una resolución del orden de 1cm. El ADCP tiene 4 sensores de velocidad de 3Mhz y una ecosonda para batimetría de 1Mhz. Este instrumento mide velocidades hasta 5 metros de profundidad y batimetría hasta 15 m. Los caudales medidos con este instrumento son utilizados para el contraste y la validación de LSPIV.

IX.4 METODOLOGÍA

METODOLOGÍA UTILIZADA PARA LA DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL DEL CAMPO DE VELOCIDAD SUPERFICIAL DE FLUJO EN LOS DISTINTOS USOS

La metodología experimental recomendada para la implementación de la técnica de Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV) convencional, requiere tres etapas: iluminación, grabación de imágenes y procesamiento de imágenes. Teniendo en cuenta que la técnica implementada a gran escala (LSPIV), cubre una mayor área grabando imágenes desde un ángulo oblicuo a la superficie, es necesario un paso adicional: la ortorectificación de los resultados (Patalano et al., 2014). La metodología recomendada para la medición de campo de velocidad con LSPIV, es la siguiente:

Visualización del flujo, iluminación y registro de videos: por definición la técnica de velocimetría se basa en la suposición que en el flujo de agua observado se encuentren partículas (“trazadores”) que se desplazan a la misma velocidad que el flujo. En el campo, los trazadores naturales en la superficie de los ríos, pueden ser ramas de árboles, espuma, o las irregularidades de la superficie debidas a la eclosión de las estructuras coherentes y burbujas de aire. La ubicación de la cámara se elige de tal manera que, se minimice la deformación de las imágenes a causa de su posición oblicua.

Procesamiento de las imágenes: luego de extraer las imágenes a escala de grises del video, éstas son procesadas con la herramienta de Matlab, PIVlab (Thielicke y Stamhuis, 2014) que permite calcular el campo de desplazamiento dentro pares de imágenes. El algoritmo usa correlación cruzada directa dentro de ventanas de interrogación, para determinar el desplazamiento de las irregularidades de la superficie de una imagen a la otra. Cada campo de desplazamiento instantáneo de este trabajo ha sido procesado y se ha calculado el campo de desplazamiento medio en [pixel/par de imagen].

Post-procesamiento: A partir de 4 Puntos de Control (PCs relevados en el terreno con instrumentos tales como GPS, estación total o cinta métrica) no alineados en un plano paralelo al de la superficie del agua, se aplica el proceso de homografía para rectificar los resultados procesados [pixel/s] y calibrar estos últimos para obtener el campo de velocidad superficial en [m/s] (Patalano et al., 2013c).

METODOLOGÍA UTILIZADA PARA LA ESTIMACIÓN DE CAUDAL

Una vez que se ha caracterizado el campo de velocidad medio superficial del flujo, el caudal se obtiene integrando el producto de la velocidad del flujo por el área de escurrimiento. Para estimar el caudal a partir del campo de velocidades superficiales se utiliza una relación α entre los valores medios de velocidad media de flujo en la columna de agua y los valores medios de velocidades superficiales. Esta relación depende de la geometría del fondo, de la rugosidad, de las corrientes secundarias y del efecto del viento. Cheng et al. (2004) realizó una estimación de este coeficiente utilizando ADCP (para medir velocidades de flujo en la columna de agua) y velocimetría por radar (para evaluar las velocidades superficiales). Cheng et al. (2004) sugiere que es factible usar las velocidades superficiales como índice para determinar caudales de flujo ya que el valor de α se encuentra habitualmente en el rango de valores entre 0.80 y 0.93 con un valor promedio de 0.88. El valor teórico del coeficiente α es 0.85 (Plant, Keller, Hayes, y Spicer, 2005), para el caso de distribución logarítmica de las velocidades en la columna de agua.

IX.5 RESULTADOS

- a) Resultados obtenidos en la implementación de LSPIV utilizando imágenes digitales registradas desde un VANT para cuantificar caudales

En este caso, se asume que la rectificación de los resultados no es necesaria, ya que la posición de la cámara enfocando perpendicularmente al campo de flujo (Figura IX.4) genera un mínimo de deformación. Solamente se corrigieron las imágenes en pre-procesamiento para eliminar distorsiones en las mismas debido al efecto barrilete de la lente a gran ángulo de la cámara y se calibraron los resultados a partir de una distancia conocida (entre los dos postes de luz de la margen derecha). De esta forma se transformaron los datos de desplazamiento a datos de velocidad [m/s] (Figura IX.5). Debido a la condición de crecida del río y a partir de los resultados obtenidos en el punto a) se eligió un coeficiente $\alpha=1$ para estimar su caudal a partir de la velocidad superficial con la metodología descrita.

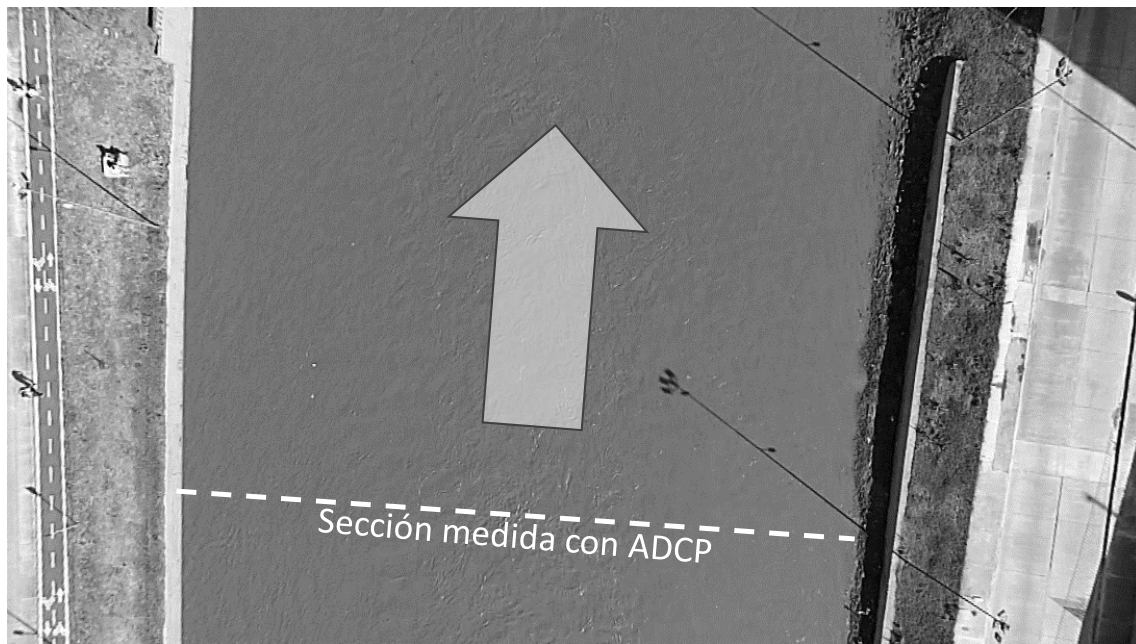


Figura IX.4 Vista de la zona de interés a 25 m desde el VANT volando en forma estacionaria. La totalidad de la zona posee la misma resolución espacial.

En forma simultánea a la medición con LSPIV, y para validar los resultados obtenidos con esta técnica, se utilizó un perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP). Con el instrumento instalado sobre una plataforma móvil, se realizaron números pares de transectas o cruces (de ida y vuelta para evitar efectos direccionales) muestreando el campo de flujo y la batimetría de la sección evaluada (Figura IX.4) de

manera de completar un tiempo total de medición superior a los 12 minutos (Tarrab et al., 2012) con el fin de minimizar la incertidumbre asociada a la determinación experimental de caudales de flujo. El valor del caudal determinado con esta tecnología es el promedio de los caudales cuantificados en las transectas o cruces realizados.

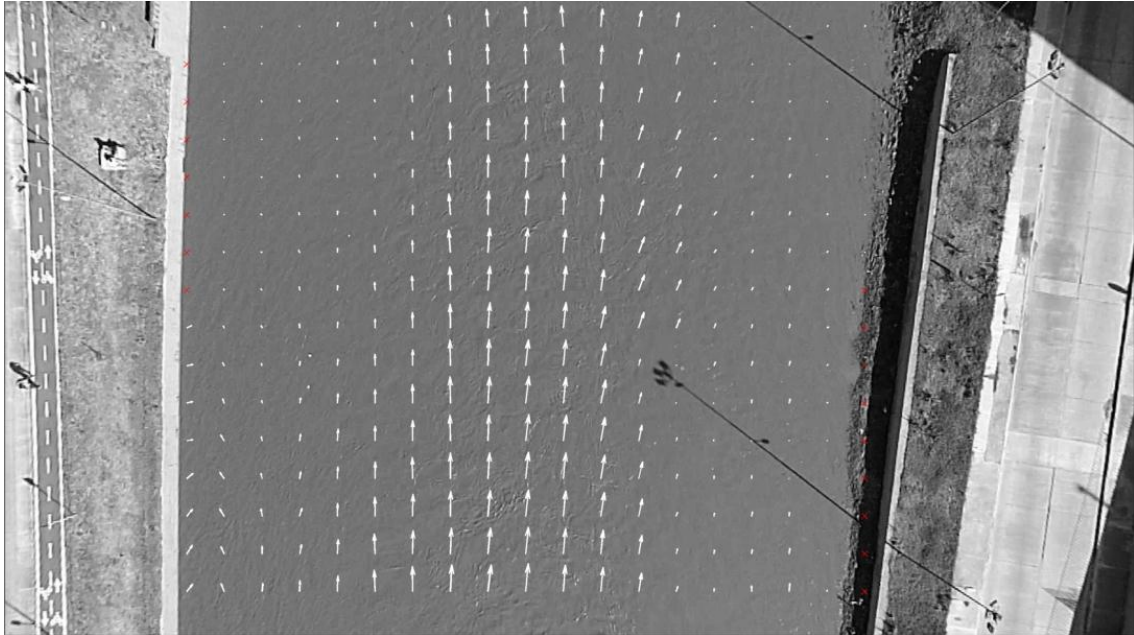


Figura IX.5 Campo de Velocidad media superficial del flujo obtenido a partir de imágenes registradas con VANT.

La Figura IX.6 muestra los perfiles transversales medidos con las distintas técnicas (LSPIV y ADCP) en la misma sección transversal mostrando una buena correspondencia. En el caso de la técnica LSPIV corresponde a la velocidad superficial mientras que en el caso de ADCP corresponde a los valores reportados por el instrumento en las celdas de medición localizadas más cerca de la superficie libre (sumergencia de 0.07m). Durante la medición reportada en este resumen, el caudal medido con la técnica LSPIV fue de 73 m³/s mientras que con ADCP se midieron 74 m³/s, lo cual presenta una diferencia menor al 2%. Vale reiterar que para la determinación experimental de caudales con LSPIV, se ha adoptado la velocidad superficial como representativa de las velocidades medias de flujo ($\alpha = 1$). A pesar de esta comprobación, se requiere un estudio detallado para establecer el factor α que vincule la velocidad media en la columna de agua y la velocidad superficial medida con LSPIV.

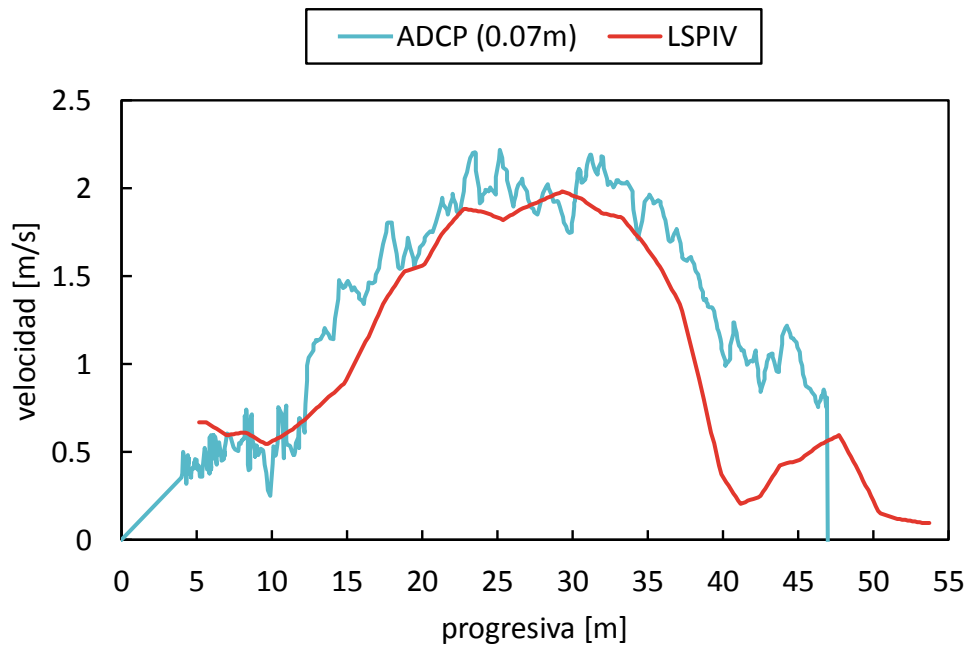


Figura IX.6 Perfiles transversales de velocidad medidos con LSPIV (velocidad superficial) y ADCP (en esta figura se reportan los valores medidos en las con sumergencia de 0.07m).

- b) Resultados obtenidos de la cuantificación y caracterización del campo de velocidad de flujo en estructuras de descarga de excedentes hídricos en una presa.

El día 10 de marzo de 2014 se realizó una filmación de un minuto de duración del escurrimiento sobre la rápida del vertedero de Arroyo Corto durante la evacuación de los caudales excedentes (Figura IX.7). En el momento en que se realizó la filmación, el personal de la presa informó que la erogación de esa estructura de descarga era 108 m³/s. A partir del video registrado fue posible calcular, utilizando la técnica de LSPIV, los campos superficiales de velocidad superficial del flujo y la distribución transversal de velocidades. Las condiciones de aireación de la lámina de escurrimiento en la rápida (Figura IX.2) proporcionan trazadores óptimos para la implementación de la técnica LSPIV.

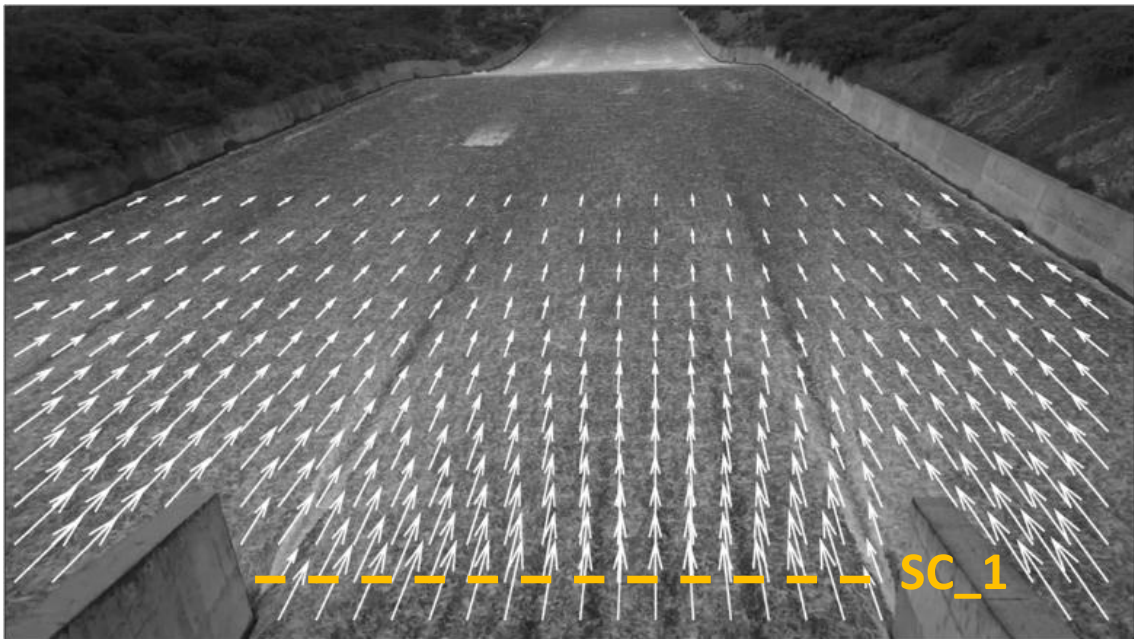


Figura IX.7 Campo de desplazamiento [pixel/imagen] medio superficial (sin rectificar) resultante del procesamiento de LSPIV de imágenes registradas en la estructura de descarga de excedentes hídricos de la presa Arroyo Corto.

En la implementación de la técnica de velocimetría LSPIV se procesó el video capturado según la metodología descrita en este capítulo. Para rectificar los datos de desplazamiento en [pixel/imagen] a datos de velocidad [m/s] se determinaron 4 PCs que se distinguen en el video. Debido a que el vertedero se encontraba en funcionamiento al momento de la medición, no fue posible relevar en campo la geometría del vertedero. Es por ello que se tuvieron que obtener los PCs necesarios de los planos de proyecto de la obra. En la Figura IX.7 se muestra el campo de velocidades del flujo sin rectificar. Se puede observar una determinación eficiente de los vectores de velocidad con la técnica LSPIV. La Figura IX.8 muestra el resultado de campo de velocidades rectificado.

Se observa en la Figura IX.9 que las velocidades superficiales varían entre 13 y 15 m/s. Las menores velocidades se dan aguas abajo de los muros separadores de las compuertas debido a la separación del flujo generada en esas zonas y las máximas velocidades se observan en la línea central entre las compuertas.

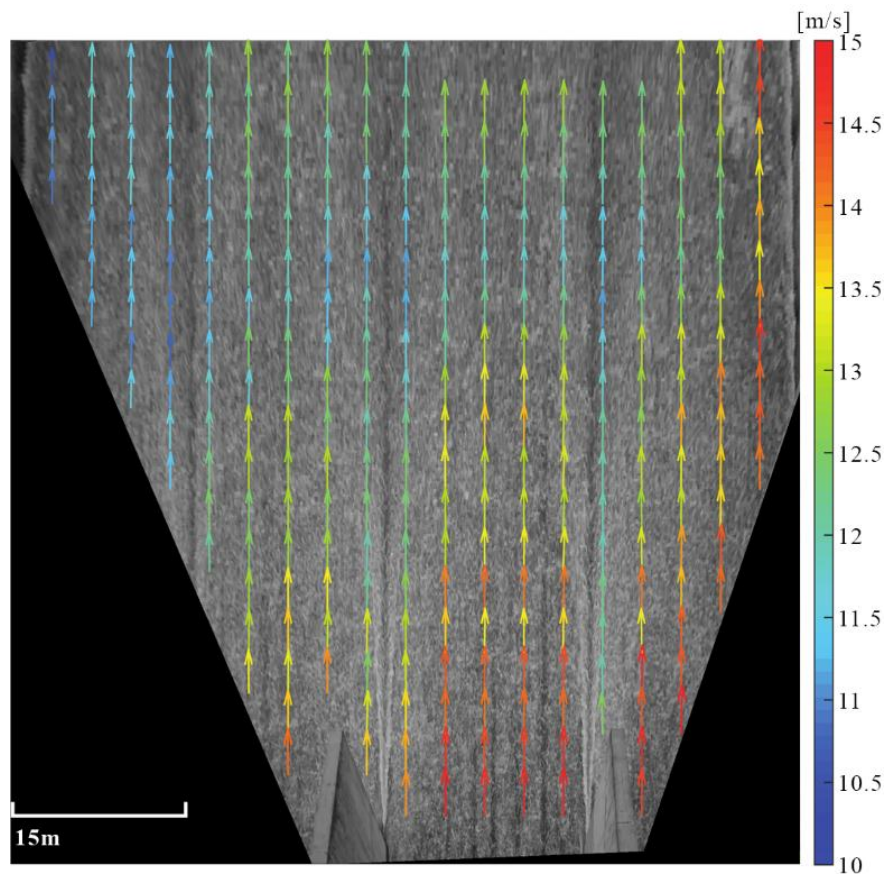


Figura IX.8 Componente longitudinal del campo de Velocidad media superficial [m/s] resultante del procesamiento de LSPIV de imágenes registradas en la estructura de descarga de excedentes hídricos de la presa Arroyo Corto.

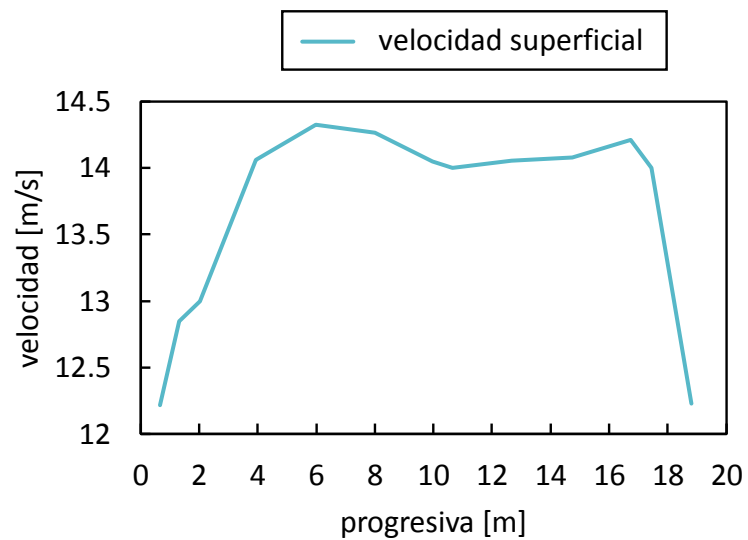


Figura IX.9 Perfil de velocidad media superficial en la sección (SC_1) de estudio mostrada en la Figura IX.7.

c) Resultados obtenidos de la cuantificación y caracterización del campo de velocidad de flujo en zona urbana

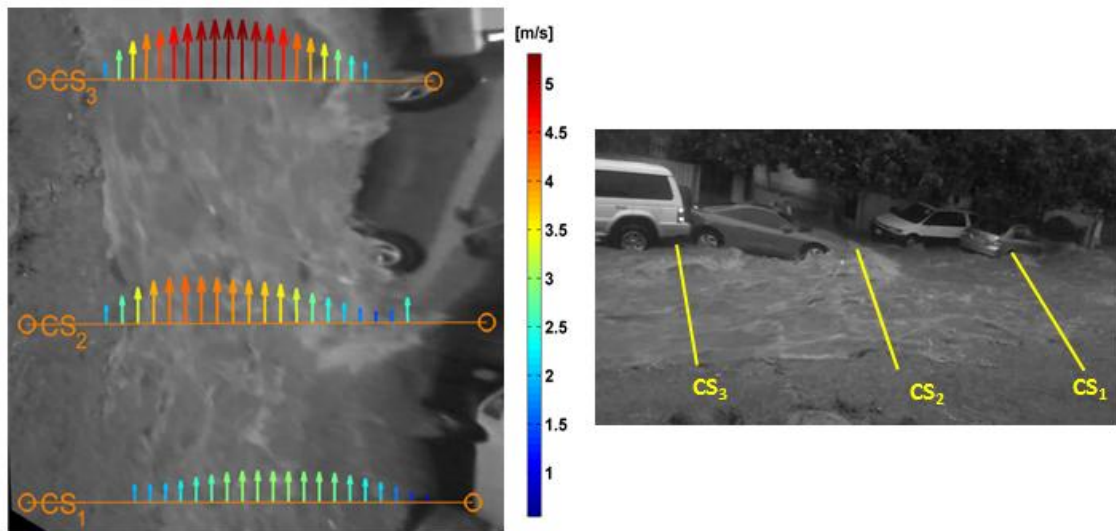


Figura IX.10 Velocidad superficial de secciones transversales (izquierda) extraídas en tres secciones diferentes con su correspondiente ubicación en el video (derecha).

La Figura IX.11 representa los valores de velocidad-profundidad ($v-h$) observados en las tres diferentes secciones transversales con la curva $v-h$ preparada por (Milanesi et al., 2015) que incluye regiones de ahogamiento (A), derribo (B) y deslizamiento (C) en el caso de agua dulce y terreno horizontal (pendiente nula) para un adulto y para un niño. Esta grafica también define los umbrales que separan a los niños de los adultos: bajo (bajo la línea de los niños), medio (entre la línea de los niños y la línea de los adultos) y alta vulnerabilidad (por encima de la línea de los adultos). Los valores observados en la sección transversal CS₁ se ubican en la zona con vulnerabilidad media y el mecanismo de inestabilidad se controla por deslizamiento. Sin embargo, los valores medidos en CS₂ y CS₃ corresponden a la región de alta vulnerabilidad que muestra la vulnerabilidad extrema durante la inundación urbana presentada.

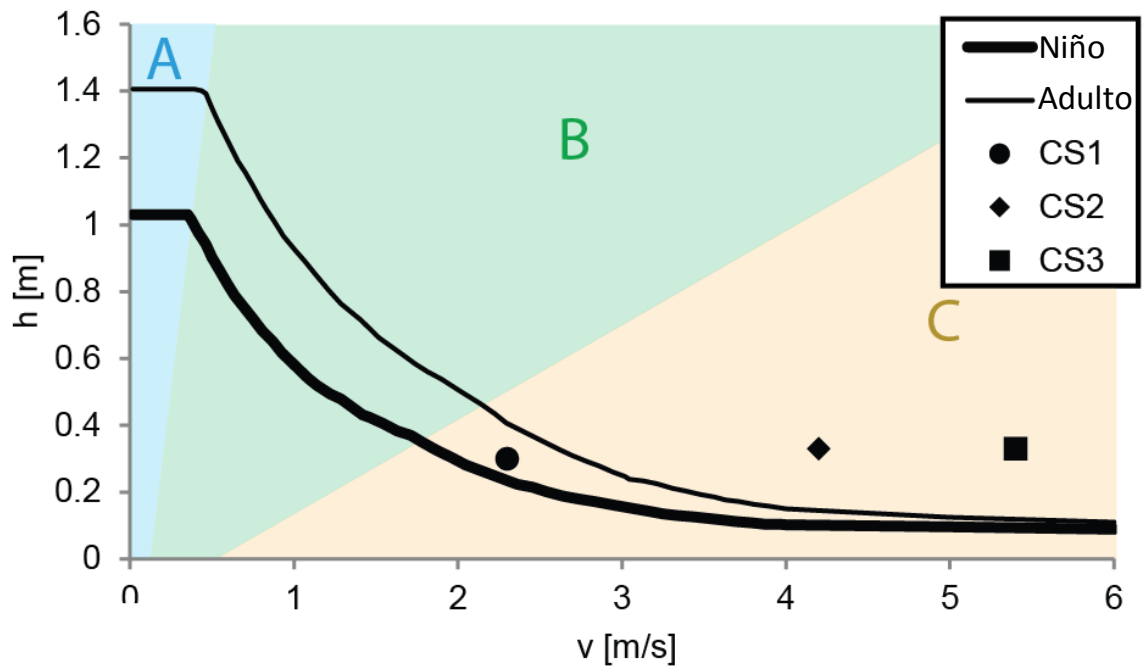


Figura 9.1. Zonas de estabilidad definidas por Milanesi et al. (2015) para adultos (línea delgada) y niños (línea gruesa)

CAPÍTULO X

PROYECTO DE CIENCIA CIUDADANA PARA
ESTIMAR CAUDALES ESCURRIDOS DURANTE
INUNDACIONES URBANAS IMPLEMENTANDO
LSPIV EN VIDEOS OBTENIDOS DE
COLABORACIÓN CIUDADANA

X.1 INTRODUCCIÓN

El contenido del siguiente capítulo se ha publicado en la revista “Journal of Hydrology” como:

Le Coz, J., Patalano, A., Collins, D., Guillén, N. F., García, C. M., Smart, G. M., Bind, J., Chiaverini, A., Le Boursiqueau, Raphaël Dramais, G., y Braud, I. (2016). “Crowd-sourced data for flood hydrology: feedback from recent citizen science projects in Argentina, France and New Zealand.” Journal of Hydrology.

Los nuevos medios de comunicación y los avances tecnológicos han permitido al público de producir una grande cantidad de material digital sobre las crecidas y compartirla a través de las redes sociales. Este tipo de información se encuentran a menudo con una autoría, fechados y en unos casos geo-referenciados antes de ser compartidos (Fohringer et al., 2015). Las redes sociales vinculan informaciones diversas sobre las crecidas repentinas que ocurren en la provincia como informes de riesgo de inundación y daños, pero también discusiones racionales, debates, apelación y observación a las autoridades gubernamentales y locales, y mensajes emocionales y expresión de sentimientos (Al-Saggaf y Simmons 2015).

De la misma manera que en otros sectores, la iniciativas para colaboración abierta distribuida (CAD o "crowdsourcing" en inglés) para la recopilación de datos de crecida empezó en los últimos años con el mismo enfoque de generar mapeos en cuasi tiempo real de informes de emergencias o daños, los cuales soportan el manejo eficiente del desastre (Fohringer et al., 2015; Koswatte et al., 2015). Por lo tanto, es necesario el desarrollo de herramientas eficientes para la recolección y el análisis de grandes cantidades de datos en las redes sociales.

Fohringer et al. 2015 implementó la herramienta PostDistiller para la minería de datos de mensajes de Twitter y lo aplicó para la realización de un mapeo del área y de las profundidades de la inundación del mes de junio de 2013, en Dresden, Alemania. Como se ha hecho para otros tipos de información geográfica voluntaria, se han desarrollado también mapas interactivos para CAD de datos de inundación, como por ejemplo:

PetaJakartam, un mapa interactivo de Jakarta, Indonesia para compartir información de inundaciones en tiempo real utilizando Twitter;

El QLD Flood Crisis Map, otro mapa interactivo basado sobre la plataforma código abierto Ushahidi y operado por el canal Australian Broadcasting Corporation (ABC)

Proyecto de ciencia ciudadana para estimar caudales escurridos durante inundaciones urbanas implementando LSPIV en videos obtenidos de colaboración ciudadana

para permitir a los ciudadanos de compartir información sobre las inundaciones de 2011 (Koswatte et al., 2015);

Flooding Points, un mapa de colaboración de inundación de São Paulo, Brasil, también basado en la plataforma Ushahidi y sobre el concepto y prototipo creado por Hirata et al. (2015).

Una alternativa para mejorar la adquisición de datos de inundaciones por CAD se puede realizar a través de aplicaciones de celulares como por ejemplo:

Flood Patrol (Filipinas), una aplicación para celulares Android desarrollado para permitir a la gente informar de inundaciones a la NOAA (Nationwide Operational Assessment of Hazards) y mapear estas informaciones.

SIGNALERT (Francia), otra aplicación de celular que permite informar diferentes situaciones de desastres naturales incluyendo inundaciones.

mPING (Meteorological Phenomena Identification Near the Ground, 54 NOAA, USA), una aplicación de celular utilizada para la recolección de información pública sobre inundaciones a través los EEUU.

La mayoría de estos proyectos vinculados a sus investigaciones respectivas se enfocan sobre la información geográfica voluntaria. Generalmente esta información es relacionada a los daños y las consecuencias de las inundaciones y no a datos hidráulicos cuantitativos. A pesar de los problemas de calidad y credibilidad relacionados a los datos proviniendo de CAD, su filtrado y mapeo permite un análisis espacio-temporal del peligro y daños causados por inundación. La combinación de datos de CAD y de autoridad (Schnebele et al., 2014), permitieron evaluar la dinámica espacio-temporal de los daños a la infraestructura de transporte en la ciudad de Nueva York inundada por el huracán Sandy (29-30 de octubre de 2012). Con el uso de reportes telefónicos de incidentes de inundación en Rotterdam entre 2004 y 2011, (Gaitan et al., 2015) analizaron la distribución espacial de los daños por inundación y su falta de relación con las sub-cuencas y vías de flujo extraídas de un DEM de la zona urbana.

Los datos cuantitativos hidráulicos tales como el área y la profundidad de las zonas inundadas (Fohringer et al., 2015) o estimaciones caudal pueden ser calculados por medio de mensajes , fotos y videos de testigos y ayudar mejorar la comprensión y la modelización del riesgo de inundación. De esta manera, los ciudadanos comunes o algunos cazadores entusiastas de crecidas pueden contribuir a la ciencia hidrológica. De la misma manera, los llamados “storm chasers” (cazadores de tormenta) han contribuido históricamente a la ciencia meteorológica desde que existe el Proyecto

“Tornado Intercept” (1975) del Laboratorio Nacional de Tormentas Extremas (EEUU).

Al parecer, los proyectos para estimular al público para actuar como ciudadanos científicos en hidrología son todavía escasos. La principal iniciativa bien establecida de ese tipo es el proyecto CrowdHydrology (Lowry y Fienen 2013), que anima a los ciudadanos a leer y mandar por mensaje el número de estación y el nivel de agua al número de teléfono que aparece en el indicador de las estaciones de aforo en los EE.UU. Se agrega entonces el nivel de agua a una base de datos a disposición del público.

X.2 OBJETIVO

Los ríos serranos de la provincia de Córdoba, Argentina, se caracterizan por la ocurrencia de inundaciones con un gran volumen de flujos rápidos durante la época de lluvias (octubre a abril). Debido a la naturaleza repentina de inundaciones, es muy poco probable que sea capaz de inspeccionar varios tramos fluviales de interés utilizando los instrumentos y las técnicas adecuadas para la grabación del caudal máximo y su evolución temporal durante la inundación. En caso de que sea posible llegar a tiempo a los sitios de estudio, las velocidades de flujo y los desechos flotantes en el río ponen en peligro tanto los operadores como los instrumentos. A raíz de esto se inició el proyecto *Cazadores de Crecidas* con el objetivo de armar una base de datos de videos y fotos digitales de las inundaciones en los ríos de la provincia de Córdoba. El material es grabado y compartido por los ciudadanos que utilizan la tecnología digital moderna (teléfonos móviles, cámaras digitales, tabletas, etc.), basado sobre la predisposición de la gente a filmar estos eventos hidrológicos extremos al fin de compartir sus imágenes en las redes sociales, sitios web, foros, etc.

Los videos de crecidas grabadas por los ciudadanos son procesados para estimar la velocidad y el caudal de los ríos utilizando la metodología descrita en esta tesis. La implementación de LSPIV utilizando videos no profesionales debe ser una superación del método indirecto de la cuantificación de caudal por imágenes y ha demostrado ya un gran potencial en la provincia de Córdoba, Argentina. Durante la temporada de lluvias (2014-2015), fenómenos hidrológicos extremos se produjeron en la provincia de Córdoba y en algunos casos los datos obtenidos con la técnica desarrollada es la única información disponible para caracterizar los eventos hidrológicos observados.

X.3 IMPLEMENTACIÓN

El primer paso para realización de este proyecto era crear un sitio web con el dominio de la Universidad Nacional de Córdoba, y luego, realizar una difusión intensiva de la existencia de esta página web en los principales periódicos y algunos canales de televisión. En el sitio web la gente puede subir sus vídeos de crecida junto con los metadatos (fecha y hora de grabación, ubicación exacta de la sección del río, etc.). En caso de que las condiciones de grabación son favorables, los videos son examinados, analizados y procesados utilizando la metodología de LSPIV explicada en esta tesis. Como se ha visto, esta técnica permite cuantificar el campo de velocidades de superficie de los ríos de forma remota. El sitio web proporciona una guía para los usuarios sin conocimiento previo de la hidráulica sobre la mejor manera de hacer contribuciones útiles para la cuantificación de los caudales en situación de crecida. Así, los usuarios graban vídeos utilizando un dispositivo electrónico digital al momento de ser testigo de este tipo de evento extremo. Los usuarios que estén interesados en participar en el proyecto de Cazadores de Crecidas puede enviar o subir sus vídeos a través de diferentes plataformas (Dropbox, Mega, WeTransfer,..) a través de tutoriales básicos también proporcionados en la página. Se puede encontrar una lista de todas las crecidas de la provincia de Córdoba grabadas en la misma página. A su vez, existe un canal de YouTube llamado "Cazadores de Crecidas" en la cual los investigadores pueden cargar su propia colección de vídeos, que también están publicados en la web. Los videos caseros son procesados según la metodología descripta en el Capítulo 2.

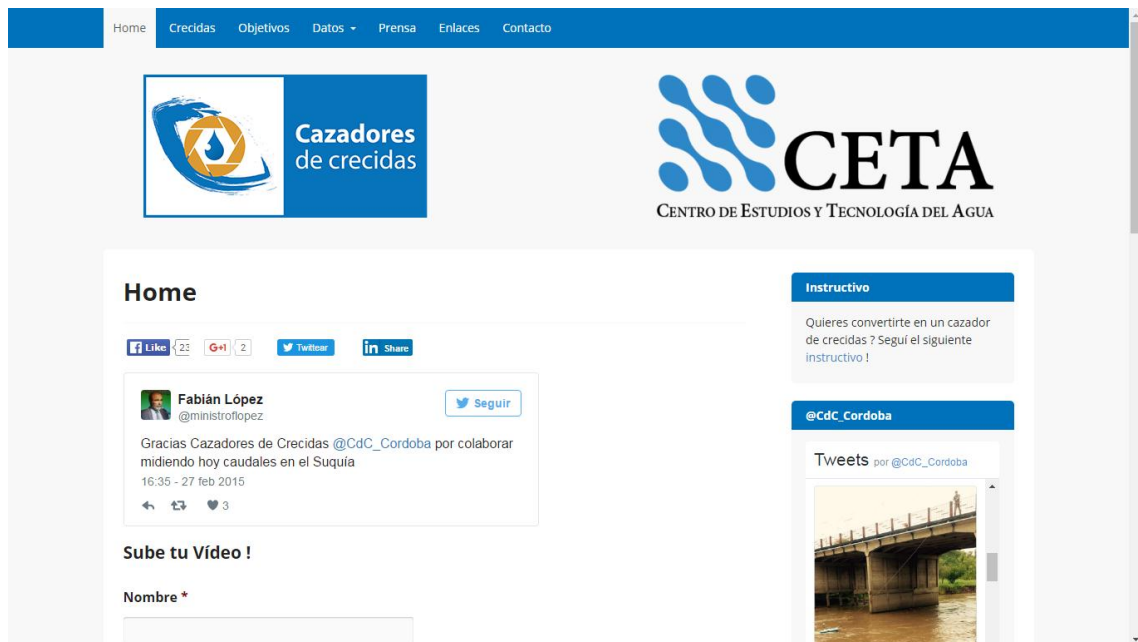


Figura X.1 Entrada de la página internet de Cazadores de Crecidas

La relación con los investigadores del proyecto Cazadores de Crecidas y las autoridades gubernamentales de Córdoba es más que óptimo. El ministro de Agua, Ambientes y Servicios Públicos, Dr. Ing. Fabián López, es profesor de la Universidad Nacional de Córdoba (en licencia) y demostró sus intereses en la aplicación de la técnica desarrollada. Los resultados obtenidos en el proyecto han sido utilizados por el gobierno para evaluar hidrológicamente algunos de los eventos registrados, en particular en Río Ceballos. Debido a este interés el proyecto ha recibido el apoyo del gobierno, incluyendo la logística para la realización de los estudios necesarios (topografía, trabajo de campo, etc.).

X.4 RESULTADOS

La metodología se aplicó a un vídeo grabado por un ciudadano testigo de una crecida que se produjo en el río Ceballos en la ciudad del mismo nombre, Córdoba, Argentina. La crecida ocurrió después de un evento de lluvia extremo que pasó mañana del 15 de febrero de 2015. El período de retorno del evento de lluvia se estimó en más de 100 años con una precipitación observada de cerca de 250 mm durante 12 horas. El ciudadano subió este vídeo a la página web de Cazadores de Crecidas con los metadatos suficientes para poder llegar al lugar donde se grabó el vídeo. Posteriormente, se organizó un viaje hasta este lugar y se midió la batimetría de la sección transversal del río usando con una estación total topográfica. Se corrigió de manera preliminar el movimiento de la cámara debido al camarógrafo que sostiene la cámara con la mano durante a la grabación. Tal movimiento crea errores significativos en el procesamiento de las imágenes (Figura X.2). Luego, se calculó el perfil de velocidad rectificado de la superficie según la metodología descrita en esta tesis (Figura X.3).



Figura X.2 Imágenes sucesivas de vídeo grabado durante la crecida del río. Se puede constatar el movimiento de la cámara

Se utilizaron los datos de velocidad de superficie en el área de interés para la calibración del modelo numérico hidráulico (HEC-RAS) implementado para simular las condiciones de flujo del evento analizado. El modelo digital del terreno de toda la zona de interés, necesario para implementar el modelo hidráulico, fue proporcionado por el gobierno de la Provincia de Córdoba. A partir del campo de velocidad superficial y de la nivel de agua a la sección de medición, el fondo y la rugosidad han sido iterados y el caudal estimado.

En el momento en que el vídeo ha sido grabado, el caudal que se estimó utilizando el modelo calibrado fue de $225 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura X.4), lo cual, no fue él el caudal pico. El nivel máximo de agua (no se observa en el video) se midió in situ y posterior al evento con la marca de agua que quedó de la crecida en sección de interés. Utilizando el modelo numérico calibrado con la marca de agua, se calculó el caudal máximo del evento de $290 \text{ m}^3 / \text{s}$. El área inundado de Río Ceballos estimado con el modelo se puede ver en Figura X.5.



Figura X.3 Campo de desplazamiento medio de la superficie en el área de interés

Proyecto de ciencia ciudadana para estimar caudales escurridos durante inundaciones urbanas implementando LSPIV en videos obtenidos de colaboración ciudadana

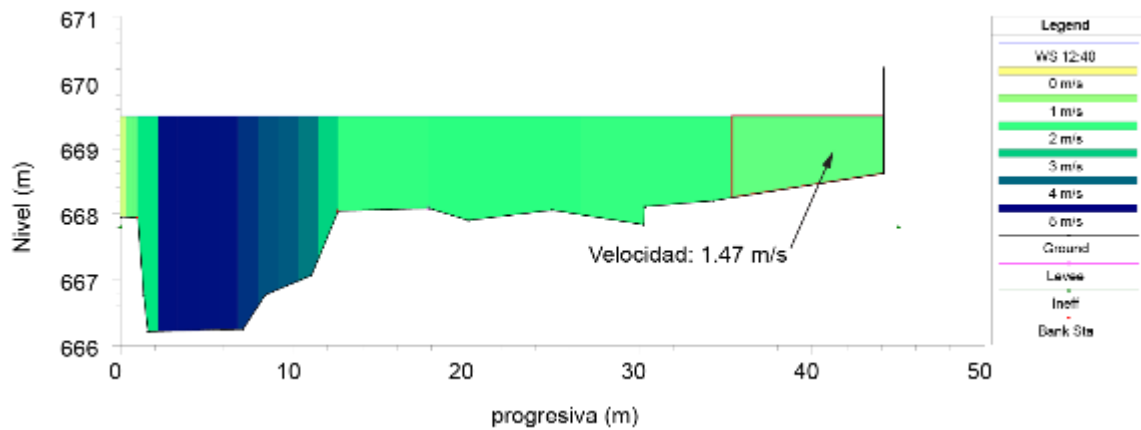


Figura X.4 Batimetría de la sección transversal de interés y campo de velocidad vertical promediado, estimado a partir de HEC-RAS. La velocidad en la margen derecha es la velocidad obtenida con LSPIV, utilizada para la calibración del modelo numérico



Figura X.5 Área inundada calcula utilizando el modelo de inundación HEC-RAS, calibrado con el campo de velocidades obtenido con LSPIV y la marca de agua. EL caudal pico estimado fue de 290 m³/s

El principal problema que se enfrentó en el proyecto de Cazadores de Crecidas es que muchos de los videos compartidos no son adecuados para el procesamiento. Eso se debe los videos no cumplen las condiciones requeridas ya que la mayoría de la gente graba vídeo con movimientos continuos de la cámara (paneo), utilizan el zoom y en muchos casos no es posible detectar los puntos de control en tierra, los cuales son necesarios para orto-rectificar los resultados. Por lo tanto el grupo de trabajo está actualmente trabajando sobre la formación de grupos de personas que pueden ser de gran ayuda para la próxima temporada de lluvias. Por ejemplo se estableció contacto con los trabajadores de defensa civil o los bomberos ya que son los primeros en llegar a los ríos cuando se ocurren crecidas. También se capacitará de grado y de escuelas secundarias que se encuentran cerca de los ríos. Los jóvenes de esa edad suelen utilizar los teléfonos celulares que ahora tienen la resolución mínima necesaria para poner en práctica esta técnica. Un fuerte mensaje de seguridad también se transmite a todas las personas capacitadas, ya que es muy importante para evitar de poner vidas en peligro, y estar seguro de que no haya riesgo en la grabación de un vídeo.

X.5 LA CIENCIA CIUDADANA, UN FENÓMENO GLOBAL

Mientras se iniciaba el proyecto de Cazadores de Crecidas en Córdoba, dos otros proyectos independientes de este y de concepto similar se estaban desarrollando en el mundo.

El primero, en Francia, el proyecto Floodscale se inició con la intención de disminuir la incertidumbre de las curvas de altura-caudal y de los caudales máximos. Métodos innovadores para medir los ríos durante las inundaciones fueron implementados, incluyendo radares de velocidad superficial portátil y LSPIV con cámara de vídeo fijas en estaciones de medición (Le Coz et al., 2010b) o utilizando videos caseras después de las crecidas (Le Boursicaud et al., 2015). Se tomó medidas específicas de comunicación para la determinación de los caudales de crecidas dentro de la cuenca del río Ardèche (Francia) utilizando videos caseros compartidos por los observadores y voluntarios. Instrucciones de seguridad y un procedimiento simplificado de campo fueron compartidos a través de los medios de comunicación locales y se pusieron a disposición en Francés y en Inglés en el sitio web del proyecto. Aspectos legales, incluyendo un formulario de transferencia de derechos de autor han sido resueltos con el instituto al origen de la propuesta: el IRSTEA (Instituto Nacional

Proyecto de ciencia ciudadana para estimar caudales escurridos durante inundaciones urbanas implementando LSPIV en videos obtenidos de colaboración ciudadana

de Investigación de Ciencia y Tecnología para el Medio Ambiente y Agricultura). De esta manera, los testigos de crecidas o incluso algunos cazadores de crecidas entusiastas pueden contribuir a la ciencia hidrológica participativa.

El segundo proyecto

El Instituto Nacional de Investigación de Agua e Atmosfera (NIWA) de Nueva Zelanda ha hecho una llamada a los ciudadanos a contribuir al mapeo de recientes eventos de crecidas en las ciudades de Christchurch (2014) y Dunedin (2015). Los residentes fueron invitados a enviar sus imágenes de áreas inundadas, las cuales fueron utilizadas para construir mapas de riesgo de inundación en el marco del proyecto llamado RiskScape.

El nivel del agua se deriva de las fotos junto con el modelo LiDAR de la ciudad. En los lugares donde las fotos no se puedan identificar con precisión los niveles de agua, se llevaron a cabo visitas de campo para realizar mediciones adicionales. Los datos puntuales resultantes fueron interpolados, junto con datos de campañas de medición adicional, para construir un modelo de riesgo de inundación y calcular el riesgo de inundaciones y pérdidas potenciales en toda la ciudad.

X.6 LECCIONES APRENDIDAS

REALIZACIÓN DE PROCEDIMIENTO SIMPLE Y CLARO

Los tres grupos de trabajo compartieron sus experiencias respectivas con la ciencia ciudadana al servicio de la hidráulica y tirar unas lecciones comunes.

Una vez que los objetivos y herramientas del proyecto son definidos, un procedimiento claro y simple tiene que ser escrito para la atención del público. Este es un factor clave del éxito de todos los proyectos de ciencia ciudadana. Los tres proyectos han producido los procedimientos en forma de instrucciones simples para grabar las imágenes y el envío de los datos de acuerdo a sus objetivos distintos. La metodología para enviar las imágenes y sus metadatos a los científicos, junto con los aspectos de seguridad y de derechos de autor fueron tratados de una manera concisa y precisa. Sin embargo, los requisitos simples pero más exigentes para el tratamiento de los videos de crecidas con LSPIV de ambos proyectos de Cazadores de Crecidas FloodScale resultó ser mucho menos seguido que los de las fotos de marca de inundación para el proyecto RiskScape. La cantidad de fotos que pudo utilizarse para el mapeo de inundación era mucho mayor que la cantidad de vídeos utilizables para la estimación de caudal. Para la captura de videos aprovechables, puede ser que no sea suficiente un procedimiento escrito sino que una formación adicional debe ser proporcionada a través de tutoriales y películas cortas.

Los datos de hidrología de eventos extremos que provienen de CAD representan lo último de las tecnologías de imágenes digitales modernas y de las redes sociales. Es aconsejable dirigirse al tipo de material utilizado comúnmente por la gente, teléfonos inteligentes pero también los VANT que conocen un crecimiento de popularidad. Las imágenes de VANT muestran un gran potencial para la técnica LSPIV, a través de una estabilidad excelente y del punto de vista que reduce de manera significativa los efectos de perspectiva ya que las imágenes se toman a menudo verticalmente desde el cielo. La orto-rectificación de las imágenes o de los resultados se vuelve innecesaria y solamente se estima el tamaño de los píxeles, lo que requiere mucho menos puntos de referencia en tierra.

DESARROLLAR HERRAMIENTAS ADECUADAS PARA LA RECOLECCIÓN Y

PROCESAMIENTO DE DATOS

Desde un punto de vista técnico, se solicita a las herramientas adecuadas para recoger, procesar las imágenes, y evaluar la calidad de los resultados, con el fin de alcanzar los objetivos científicos del proyecto. Es necesario el desarrollo de plataformas capaz de recoger grandes cantidades de datos que vienen con los formatos de diferentes y niveles de calidad. Los formularios y los archivos subidos por páginas web, así como las aplicaciones de teléfono: los teléfonos son herramientas eficaces para juntar datos de una multitud de fuentes, siempre cuando el esfuerzo requerido por el usuario es minimizado. El desarrollo de aplicaciones especiales para teléfonos inteligentes podría ser muy eficiente para la recogida de datos.

Sin embargo, a veces se mantiene más eficiente la recolección de material sobre las plataformas de intercambio y redes sociales, además se puede localizar y contactar con los autores para obtener más información. Es común a los tres proyectos descritos en el presente documento que las formas de recolección de datos deben ser exploradas.

El proceso de recolectar datos requiere generalmente técnicas específicas y herramientas que son fuera del estante. Los grupos de investigación necesitan ser comprometidos en el desarrollo de técnicas adecuadas de imágenes, modelos hidrológicos e hidrodinámicos, aplicaciones de los SIG, y de métodos de evaluación del riesgo de crecida. Es importante revisar con cuidado la calidad de los datos de multitud de fuentes, en particular mediante la investigación de campo post-evento y la comprobación cruzada de los resultados con las demás fuentes de información. Localizar con precisión los puntos de vista de las fotografías y videos puede ser una tarea relativamente fácil mientras su ubicación precisa en el tiempo es a menudo más complicada, sobre todo cuando no se puede entrar en contacto con los autores. La determinación del nivel de agua es una fuente importante de incertidumbre en las estimaciones de los caudales.

El uso de los datos de CAD en modelos hidrológicos y estudios científicos requiere también tecnologías adecuadas y fiables capaces de asimilar los datos de mucho contraste y posiblemente amplias incertidumbres. Este es el caso de la técnica Bayesiana implementada en el proyecto FloodScale para el desarrolla de curva de nivel-caudal (J. Le Coz et al., 2014). Los proyectos de Cazadores de Crecidas y RiskScape ilustran cómo tales datos se pueden incluir con éxito en modelos 1D / 2D hidrodinámicos, y en la evaluación de riesgo y daños.

IMPLEMENTACIÓN DE UN PLAN DE COMUNICACIÓN EFICIENTE

La comunicación es clave para movilizar eficientemente los observadores de eventos de crecida/inundaciones: es necesario hacerles tomar consciencia de los riesgos relacionados con las crecidas (y disuadirlos de poner sus vidas en peligro), evitar conflictos con autoridades locales, y proporcionarles información sobre el uso de los datos recolectados. Explicaciones simples y directas son esenciales, incluso cuando se trata de ciencia o términos legales. Este tipo de iniciativas son bien recibidas por los locales y los medios de comunicación. Los esfuerzos de comunicación deberían estar dirigidos tanto al público general como a los grupos comunitarios y públicos específicos, tales kayakistas o cazadores de tormentas / inundaciones. Es significativo comunicar con grupos de operadores más avanzados (bomberos, protección civil, servicios hidrológicos, voluntarios, etc.) para que puedan hacer vídeos de mejor calidad de acuerdo a los requisitos del procesamiento de datos.

La experiencia reportada resalta la necesidad de adaptar los vectores de comunicación a cada proyecto. La comunicación a través de la radio y la TV permite llegar a un público más amplio. Los periódicos locales y blogs científicos, probablemente, pueden alcanzar una audiencia más específica pero son eficientes para liberar recordatorios puntuales y periódicos de los proyectos lo cual es útil, sobre todo al comienzo de la temporada de las crecidas. La distribución de folletos y carteles exhibidos en puntos estratégicos con amplia asistencia de público cuando ocurre una crecida puede ser complicada en una grande cuenca pero podría aumentar dramáticamente la cantidad de material de imagen en sitios estratégicos.

Las redes sociales como Twitter y Facebook son esenciales, ya que permiten llegar a un público amplio y de hacerlo en cualquier momento, con la condición necesaria que la gente "sigue" el proyecto. Por ejemplo, el proyecto de los Cazadores de Crecidas recibió más vídeos cuando el ministro de Agua, Ambiente y Servicios Públicos de la Provincia de Córdoba, Argentina, "re-twitteó" el proyecto en Twitter. Luego, él publicó se olvidó de ello hasta que una publicación se hizo en un periódico local. Es clave ser constantemente activo en toda la gama de medios disponibles.

OBTENER EL APOYO DE LAS AUTORIDADES LOCALES

Como se mencionó en el cuento de las experiencias Argentinas y Francesas, tener el apoyo de las autoridades (o no) es relevante para el éxito (o no) de cada proyecto. El contexto local y los perfiles de las personas en cargo tienen una importancia mayor y la estrategia de comunicación lo debe tener en cuenta desde el principio. En el contexto

específico del proyecto FloodScale, hacer un llamado para las imágenes antes del evento en lugar de después o durante la crecida parece ser la principal fuente de preocupación para la administración. Aunque podría decirse que hipócrita, no se puede culpar estimular a las personas a un comportamiento inseguro si se llama a imágenes existentes, como se realiza generalmente en los medios de comunicación. Parece ser ventajoso centrarse en zonas recientemente afectadas por las crecidas en lugar de gastar esfuerzos de comunicación sobre un área más amplia en la preparación de futuras crecidas.

Sin embargo, el respaldo de los actores locales y autoridades debe ser buscado activamente. Siempre hay una posibilidad que se dan cuenta del potencial de las iniciativas de ciencia ciudadana para el éxito y la aceptación de las políticas de riesgo de crecida/inundación.

LA CONCIENCIA PÚBLICA Y CUESTIÓN DE COMPROMISO

La llamada es mucho más exitosa cuando el público y los medios de comunicación están preparados y conscientes de los peligros naturales, como fue el caso en Christchurch, Nueva Zelanda, después de los terremotos de 2010 y 2011. Durante este tiempo, ambos, el público y los medios se volvieron en sintonía con la ciencia de riesgo natural, y han sido más receptivas a las iniciativas basadas en la ciencia ciudadana.

Siempre y cuando haya suficiente supervisión de expertos durante el diseño del proyecto y el análisis de datos, la ciencia ciudadana parece un medio viable de mejorar nuestra comprensión de los riesgos de inundación. A su vez, los proyectos mencionados resaltan el valor de las iniciativas de ciencia ciudadana como un medio de recolección de datos y de compromiso con la comunidad. En algunos casos, el valor de los datos para ello se obtiene es mucho menor que el impacto y la participación de la comunidad ciudadana (Lowry y Fienen 2013). La retroalimentación hacia el público es absolutamente esencial, a través de cualquier vía: sitio web del proyecto, bases de datos en línea, publicación de los resultados, seguimientos de los blogs científicos y la comunicación a través de los medios.

Estudios sociales podrían también beneficiar de la retroalimentación de CAD de la gente sobre cómo ha sido afectada por los eventos y cómo ha reaccionado. Los testigos individuales de los eventos como las comunidades más amplias, que no siempre son visibles en los procedimientos de información más formales, podrán utilizar las redes sociales para expresar sentimientos y su contribuir al debate público (Al-Saggaf y Simmons 2015).

CAPÍTULO XI

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

XI.1 CONCLUSIÓN SOBRE LA VELOCIMETRÍA POR SEGUIMIENTO DE PARTÍCULAS A GRAN ESCALA

Se ha presentado una nueva metodología y un paquete computacional para la implementación de la técnica LSPTV en flujos con superficie libre. En el paquete computacional se agregaron algoritmos matemáticos de última generación para la detección de partículas, correspondencia de partículas y la rectificación ortogonal. El uso de la técnica ha sido demostrado en grandes modelos hidráulicos físicos y próximos capítulos se mostrará su aplicación para mediciones de caudal en ríos. LSPTV no requiere una alta densidad de partículas como lo hace LPSIV. Por otra parte, LSPTV es adecuado para direcciones de flujo heterogéneo, y con distribuciones no homogéneas de magnitudes de velocidad y distribución de partículas (sólo una sola partícula es suficiente para los algoritmos). Entonces las trayectorias individuales se pueden reconstruir con las posiciones individuales de los centroides de las partículas en el tiempo que puede ser muy valioso para los estudios de la recirculación o de la erosión / sedimentación. Las obras futuras apuntarán a combinar la robustez de LSPIV con la resolución espacial que ofrece LSPTV; El seguimiento de partículas trazadoras individuales es en general difícil de realizar en condiciones con alta densidad de partículas sembradas. Stitou y Riethmuller (2001) realizaron un método predictor-corrector al combinar las ventajas de las dos técnicas de procesamiento: la técnica es un algoritmo híbrido que comienza por la evaluación estadística del desplazamiento del trazador (análisis PIV) y refina la resolución de la medición con El seguimiento de partículas individuales (PTV).

XI.2 CONCLUSIÓN SOBRE LA RECTIFICACIÓN DE RESULTADOS DE VELOCIMETRÍA POR IMÁGENES DIGITALES

El capítulo IV describe RIVeR, un paquete computacional práctico y fácil de usar para las técnicas PIV y PTV a gran escala. Este paquete debe ser visto como un complemento a las herramientas de procesamiento de imagen y velocidad disponibles, tales como PIVlab o PTVlab. RIVeR rectifica los resultados del procesamiento de la velocidad de la imagen resolviendo la matriz homográfica H que es la forma reducida de la matriz de la cámara asumiendo que todos los CP están en el mismo plano. Actualmente (2016), RIVeR está operativo y ya ha sido aplicado con éxito en América del Sur. Las técnicas de LSPIV y LSPTV se usan para la medición de caudales de flujo durante eventos de crecidas y estiaje. RIVeR es también una herramienta útil para la caracterización sinóptica de superficies de agua de modelos físicos a gran escala en laboratorios y flujos sobre estructuras hidráulicas. Los hidrólogos, ingenieros civiles y ambientales, así como los técnicos, son alentados a aplicar estas técnicas. Una guía se incluye y un foro está disponible en <http://riverdischarge.blogspot.com/>. Con el próximo lanzamiento, la matriz completa de la Cámara se resolverá usando varios PC en el espacio tridimensional. Además, se permitirá un formato genérico como entrada para que puedan usarse los resultados de otros programas de velocimetría por imagen; Por ejemplo, el flujo óptico (Dérian et al., 2013; Liu et al., 2003) o STIV (Fujita et al., 2007). Mejorar el módulo de cálculo de caudal es también uno de los principales objetivos de implementación del método de entropía explicado en Chen y Chiu (2004), Chiu y Said (1995) y también se aplicó en Bechle y Wu (2014) para estimar la relación entre la velocidad superficial y la velocidad media en la profundidad media.

XI.3 CONCLUSIÓN SOBRE LA DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL

DE CAUDALES EN RÍOS DE MONTAÑAS CON LSPTV

En el capítulo V se presenta una evaluación experimental de una técnica de cuantificación de caudales de aguas superficiales en dos tramos de un río serrano de la provincia de Córdoba. La técnica evaluada consiste en la implementación a gran escala de la técnica de velocimetría por seguimiento de partículas (LSPTV por sus siglas en inglés). Si bien las condiciones analizadas en este capítulo corresponden a periodos de aguas bajas y medias, esta técnica puede ser aplicada eficientemente en periodos de crecidas con un bajo costo. La técnica no intrusiva LSPTV constituye una alternativa satisfactoria (con costos relativos significativamente menores) para la determinación experimental de caudales escurridos superficialmente en los ríos con características físicas y geométricas similares, a condición de conocer la batimetría de la sección aforada. En este capítulo se sintetizaron algunas de las principales fuentes de errores detectadas en la implementación de la técnica de LSPTV en gran escala para estimar caudales de aguas superficiales en cursos fluviales en ríos serranos. Estudios relacionados específicamente a cada uno de estos errores representan un área de vacancia. Estudios posteriores además incluyen relevamientos experimentales en cursos fluviales con similares características para realizar una estimación más precisa de la relación α entre los valores medios de velocidad media de flujo en la columna de agua y los valores de velocidades superficiales para ríos serranos de la provincia de Córdoba.

XI.4 CONCLUSIONES SOBRE LA DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE CAUDALES EN RÍOS DE MONTAÑAS CON LSPIV

Este capítulo presenta una metodología experimental para el monitoreo continuo de velocidades y caudales de flujo durante un evento de crecida repentina en un tramo de un río de montaña en la Provincia de Córdoba, Argentina. La técnica no intrusiva LSPIV ha sido validada con perfiladores de corriente acústicos Doppler (ADCP) en la sección de medición para condiciones de flujo estacionarias. Los resultados obtenidos muestran que la técnica constituye una alternativa satisfactoria (con costos relativos significativamente menores) para la determinación experimental de caudales escurridos superficialmente durante crecidas repentinas en ríos con características físicas y geométricas similares a las analizadas en este capítulo, con la condición de conocer la batimetría de la sección aforada.

XI.5 CONCLUSIÓN SOBRE LA DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL

DE CAUDALES EN GRANDES RÍOS CON LSPIV

Los instrumentos y las metodologías experimentales evaluadas presentaron aspectos positivos y negativos. Los Perfiladores RDI “Workhorse Río Grande” de ambas frecuencias (600 kHz y 1200 kHz) demostraron ser aptos para determinar el caudal, perfil de velocidades y morfología del fondo. Ajustes de parámetros del instrumento debieron realizarse para ampliar los rangos límites producto de las elevadas atenuaciones de la señal. El ADCP de 600 kHz presenta mayor robustez (sin pérdidas de datos de velocidad ni registro del fondo) aunque su resolución espacial es menor que perfiladores con mayor frecuencia acústica. El valor de caudal registrado con ambos ADCP RDI difiere en menos de un 5% respecto al método tradicional. La técnica LSPIV reprodujo en forma satisfactoria el campo de velocidades superficiales de flujo. El perfilador ADCP “River Surveyour S5”, si bien presenta la mayor resolución espacial (celdas de hasta 2cm) solo registra el campo de velocidades de la región cercana a la superficie libre (2.5m) a lo largo de toda la sección transversal. Este perfilador no registro valores de velocidad a profundidades mayores debido a su elevada frecuencia acústica. En definitiva, la técnica LSPIV tiene un buen potencial para la estimación de caudal en ríos grandes y con alta carga de sedimentos a condición de conocer la batimetría de la sección de interés.

XI.6 CONCLUSIÓN SOBRE LA EVALUACIÓN DE USOS

INNOVADORES DE LAS TÉCNICAS DE VELOCIMETRÍA POR IMÁGENES DIGITALES

La gran resolución temporal y espacial de la técnica LSPIV, como así también su carácter no intrusivo y su posibilidad de aplicación en sitios de difícil accesibilidad y/o en donde existen grandes velocidades del flujo, la convierten una metodología adecuada para caracterizar y cuantificar escurrimientos hídricos superficiales. En el capítulo VIII se presentaron tres usos innovadores de la técnica LSPIV para caracterizar y cuantificar escurrimientos hídricos superficiales:

- a) aplicación de LSPIV utilizando imágenes digitales registradas desde un vehículo aéreo no tripulado (VANT) para cuantificar caudales escurridos superficialmente; y
- b) la cuantificación y caracterización del campo de velocidad de flujo en estructuras de descarga de excedentes hídricos en una presa.
- c) la determinación de la vulnerabilidad sobre la estabilidad de las personas en inundaciones urbanas

Los resultados reportados validan el uso de imágenes digitales registradas con VANT en cursos fluviales para monitorear velocidades y caudales de flujo durante un evento de crecidas. El caudal medido con la técnica de LSPIV tuvo una diferencia menor al 2% con respecto a lo medido utilizando ADCP, una técnica intrusiva y significativamente más costosa.

Al determinar experimentalmente las velocidades del flujo en la estructura de descarga de la presa Arroyo Corto fue posible representar el comportamiento bidimensional en planta del flujo en la estructura caracterizado por una distribución no uniforme del flujo.

La técnica LSPIV permitió por primera vez evaluar las velocidades de escurrimiento en inundaciones urbanas. Este experimento abre nuevas posibilidades sobre el estudio de la estabilidad de las personas en prototipo.

El grupo de trabajo del CETA-UNC, se encuentra activamente desarrollando y aplicando esta técnica para diferentes usos, con resultados positivos. Finalmente, el deseo del grupo de investigación es de concientizar al mundo científico y a los ingenieros involucrados en el área, del potencial del análisis de las imágenes digitales

Capítulo XI

para cuantificar y caracterizar los diferentes recursos hídricos superficiales, a ser utilizados en riego, potabilización, energía, tratamiento, etc. y es a través de publicaciones y de programas informáticos libres, que resulta posible.

XI.7 CONCLUSIÓN SOBRE EL PROYECTO DE CIENCIA

CIUDADANA PARA ESTIMAR CAUDALES ESCURRIDOS

DURANTE INUNDACIONES URBANAS

Los tres proyectos presentados son típicos de las iniciativas de ciencia ciudadana emergentes para los datos de hidrología de CAD. Estos mapas de inundaciones basado en fotografías (RiskScape, Nueva Zelanda) y los proyectos sobre la estimación de los flujos basados en vídeo (Cazadores de Crecidas, Argentina, y FloodScale, Francia) fueron diseñados específicamente para producir cantidades hidráulicas georeferenciadas y marcada en el tiempo que sean utilizables para los estudios de hidrología de crecida y modelización hidráulica. En comparación con otros proyectos similares, implican de la misma manera algunos procedimientos sencillos para el público, pero utilizan procesamientos de datos avanzados y revisión por científicos. Una actividad muy interesante para trabajos futuros podría ser la combinación de estos enfoques de “medición orientada” y “ciudadanos hidrólogos” con las poderosas herramientas desarrolladas en demás proyectos de minería de datos contenido de las redes sociales y realizar un análisis espacial de la información geográfica voluntaria.

Los tres proyectos ilustran el gran potencial de las iniciativas de ciencia ciudadana para mejorar la evaluación del riesgo de inundación con la interacción de las comunidades locales. Los factores clave para el éxito parece ser un procedimiento claro y simple, las herramientas adecuadas para la recolección y procesamiento de datos, un plan de comunicación eficaz, el soporte de las autoridades locales, y la conciencia pública de los peligros naturales. Más allá de los desafíos técnicos y de comunicación, esta es una forma eficaz para sensibilizar el riesgo de inundación y hacer que la gente sea comprometida de forma colectiva. Esperamos que esta información puede ayudar a que estas iniciativas surjan y desarrollen estrategias exitosas.

XI.8 CONCLUSIONES GENERALES

En la presente tesis, se desarrolló y se implementó a Gran Escala las técnicas de velocimetría por imágenes LSPIV y LSPTV para caracterizar flujos de agua con superficie libre en ríos durante condiciones hidrológicas extremas.

En primer lugar, se elaboró una metodología para la rectificación de los resultados de procesamiento PIV y PTV a partir de la resolución de la matriz cámara C . Para la resolución completa de la matriz C es imprescindible conocer las coordenadas de 6 puntos de control (PC) cuyas coordenadas en el espacio sean conocidas en la realidad (en m) así como las coordenadas proyectadas sobre la imagen (en pixel). Hemos visto que, eliminando su componente vertical, la matriz C se puede simplificar en la matriz Homografía H de 3 x 3 elementos que se revuelve con tan solo 4 PC en el mismo plano. La ventaja de usar esta simplificación es significativa durante su implementación en el campo al momento de relevar 4 PC coplanarios en lugar de 6 en el espacio. Se demostró que con una simple cinta métrica es posible relevar las 6 distancias relativas entre cada PC cuando es necesario otra tecnología más sofisticada para relevar por los menos 6 PCs en el espacio (estación total o GPS diferencial). Se demostró también que la técnica Structure of motion – SFM- permite el relevamiento masivo de PC en el espacio con la construcción de un modelo de terreno digital 3D, siempre que algunos PC sean conocidos.

A partir del estado del arte y de la resolución de la matriz de la cámara se desarrollaron los paquetes computacionales necesarios para el análisis de LSPIV y LSPTV. El software libre con código abierto “PTVlab” permite el seguimiento de partículas blancas con forma circular. PTVlab con su análisis de PTV complementa su homólogo “PIVlab” dedicado al análisis PIV y desarrollado por Thielicke y Stamhuis (2014a). La mayor contribución en términos computacionales fue el desarrollo del software libre “RIVeR” que permite la rectificación de los resultados de procesamiento tanto de PIVlab como de PTVlab. RIVeR permite la caracterización del flujo superficial a partir de los campos de velocidades y trayectorias de partículas rectificadas como la estimación de caudal de la sección de un río (siempre cuando se conozca batimetría de la sección).

Se validó la metodología desarrollada en esta tesis a partir de varios ejemplos, comparando los resultados obtenidos con los obtenidos por medio de otros instrumentos (ADCP, molinete). Se aplicó la técnica a ríos de montaña en crecida y en estiaje como así también en un río ancho con alta carga de sedimentos. Hemos visto que la técnica tiene alto potencial para las mediciones de ríos en condiciones extremas

que no permiten el uso de ningún instrumento convencional. Además, se presentó tres usos novadores de la técnica que abren posibilidades de futuras investigaciones.

En base en la metodología desarrollada y la experiencia adquirida por el grupo de investigación, se elaboró una guía en conjunto con el USGS y WSC de los Estados Unidos y Canadá respectivamente. La guía está destinada a la realización de videos destinados a ser procesados para la computación de caudal en secciones de río. El documento reúne todos los elementos en tener en cuenta cuando se realiza un video en campo tales como la posición de la cámara, los puntos de control, etc...

Para terminar, se han descrito tres proyectos de colaboración abierta distribuida en Argentina, Francia y Nueva Zelanda para la cuantificación de eventos hidrológicos extremos. Este tipo de proyecto de ciencia ciudadana tiene un gran potencial y se compartió la experiencia de cada uno de los proyectos. Los factores clave para el éxito de un proyecto de este tipo parece ser un procedimiento claro y simple, las herramientas adecuadas para la recolección y procesamiento de datos, un plan de comunicación eficaz, el soporte de las autoridades locales, y la conciencia pública de los peligros naturales. Más allá de los desafíos técnicos y de comunicación, esta es una forma eficaz para sensibilizar el riesgo de inundación y hacer que la gente sea comprometida de forma colectiva.

XI.9 TRABAJOS FUTUROS

ASPECTOS GENERALES

Las temáticas de mayor interés a corto plazo son:

- La estimación sistemática del coeficiente α entre la velocidad media y la velocidad superficial en un perfil de vertical según el tramo de río aforado.
- La evaluación de los errores en la cuantificación de caudal según la posición de la cámara digital con respecto a la superficie del agua. Actualmente el grupo de investigación está utilizando imágenes sintéticas de perfiles de velocidad conocidos para evaluar el error debido al ángulo de la cámara.
- La herramienta computacional RIVeR presentada en el Capítulo IV será sometida a una revisión rigurosa para que cumpla con los requisitos necesarios de ingeniería de software al fin de tener un producto profesional. El freeware tendrá una Licencia Pública General de GNU.

ESTACIÓN FIJA DE LSPIV

Todas las aplicaciones vistas anteriormente son mediciones puntuales realizadas a partir de un video registrado en una posición única. En ningún caso la cámara ha sido ubicada exactamente en la misma posición y con la misma orientación para la obtención de un resultado. Por lo tanto, cada video analizado con la técnica de LSPIV es asociada a una matriz de transformación única entre la realidad y su proyección en pixel. Tener a disposición una cámara fija en el tiempo y espacio para la estimación continua de caudal permite resolver la matriz de transformación una única vez para todas las condiciones de flujo (Bechle et al., 2012; Hauet et al., 2008).

Por otra parte, se ha observado que la técnica LSPIV es de bajo costo para la estimación de caudal ya que los sensores de cámaras son cada vez más económicos y con mejores características (más resolución, más rápidas, mejor sensor, infra rojas, etc.)

En la era de Internet de las Cosas (IoT), cada día es más factible la posibilidad de una red de sistemas autónomos interconectados y parametrizable por celular para de estimación en tiempo real de caudal con LSPIV.

En este capítulo se presenta el desarrollo y su evolución de un sistema automático LSPIV para el monitoreo continuo de caudal con una cámara fija IP. El sistema que se

presenta a continuación es el piloto de una futura red de sistemas idénticos. Se instaló el sistema sobre una sección ya monitoreada con un sensor de nivel de burbujas por el USGS (estación #03337000).

El desarrollo del sistema piloto de monitoreo de caudal se ha iniciado dentro de las oficinas del USGS Illinois en Urbana, Estados Unidos. El sitio elegido es un tramo del río de Boneyard Creek que atraviesa campus de la Universidad de Illinois (40.111321°N, -88.226492°W) y se encuentra cerca de las oficinas de USGS (Figura XI.1 a). El ramo del río se encuentra debajo de un puente justo después de una canaleta Parshall. El autor de esta tesis ha participado activamente en el desarrollo de este sistema

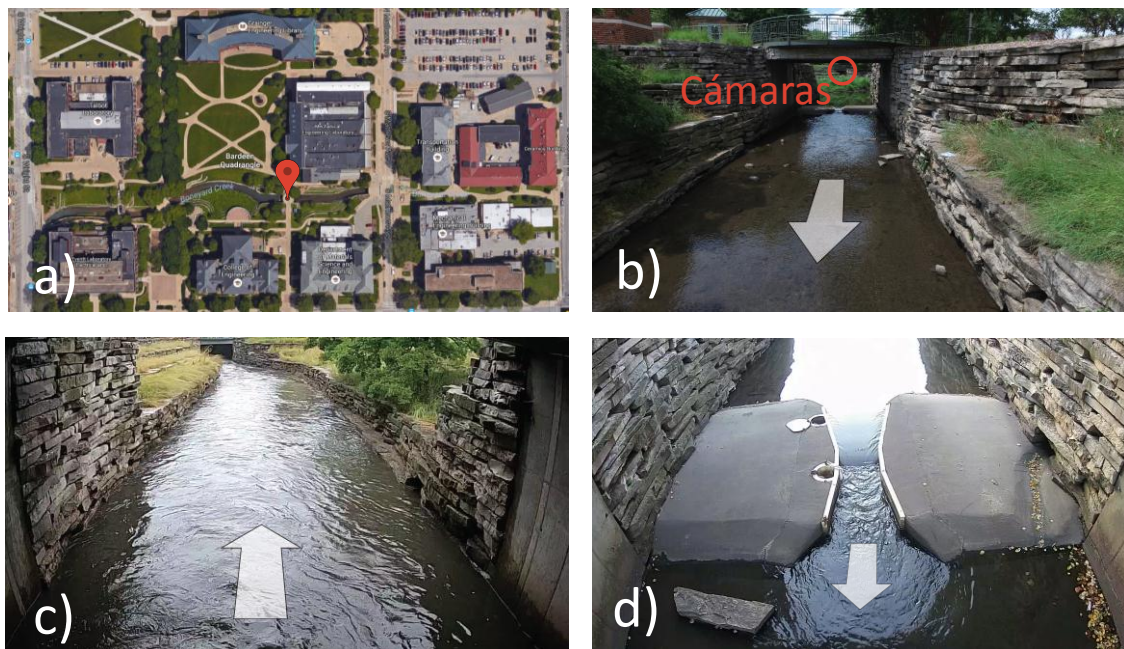


Figura XI.1 a) Sitio del sistema piloto de monitoreo de caudal con LSPIV. Se encuentra sobre el río de Boneyard Creek que atraviesa el campus de la Universidad de Illinois, Urbana, EEUU (Imagen ©2016 Google). b) posición de la cámara de seguridad, debajo del puente. c) vista desde la Cámara 1. d) vista de la Cámara 2

La cámara utilizada es una cámara de seguridad IP tipo “bullet” de la marca Hikvision, modelo DS-2CD2T42WD-I5 que graba con una resolución de 1280 x 720 a 25 fps. El sensor de la cámara graba la región visible e infrarrojo cercano o NIR (del inglés “Near Infrared”) lo cual permite una visión nocturna del sitio de interés. En este trabajo, evaluaremos también el potencial de las imágenes NIR para sus procesamientos de noche. La cámara se colocó de manera fija abajo del puente que cruza el río Boneyard Creek (Figura XI.1b), apuntando el área de interés hacia agua abajo (Figura XI.1c). Se denominará esta cámara como “Cámara 1” en la Figura XI.2. Una

segunda cámara “Cámara 2” de la marca Hikvision, modelo DS-2CD2142FWD-I se encuentra también en el sistema a fines de aporte de datos cualitativos. Cámara 2 se encuentra pegada atrás de Cámara 1 apuntando hacia agua arriba.

Una Computadora de Placa Simple (SBC) de marca Raspberry Pi, modelo 3 se utiliza para la grabación automática de videos. La SBC está conectada al registrador de datos del sensor de burbujas de forma tal que la grabación de videos se activa cuando el nivel del agua supera un umbral (nivel 3,5m) ya que, pasado este umbral, la superficie del agua tiene suficiente textura para su procesamiento. Por lo tanto, se analizará solamente las imágenes del río en condiciones de crecida. El datalogger, de marca Campbell Scientific Datalogger (modelo CR100) que recibe los datos del sensor de nivel manda un voltaje a la Raspberry. Cuando el voltaje corresponde al nivel de agua mínimo definido la Raspberry ordena la grabación de un video de 30s a la Cámara 1. El archivo video se almacena provisoriamente sobre la Raspberry para luego ser transferido via FTP hacia la computadora (“PC” en Figura XI.2).

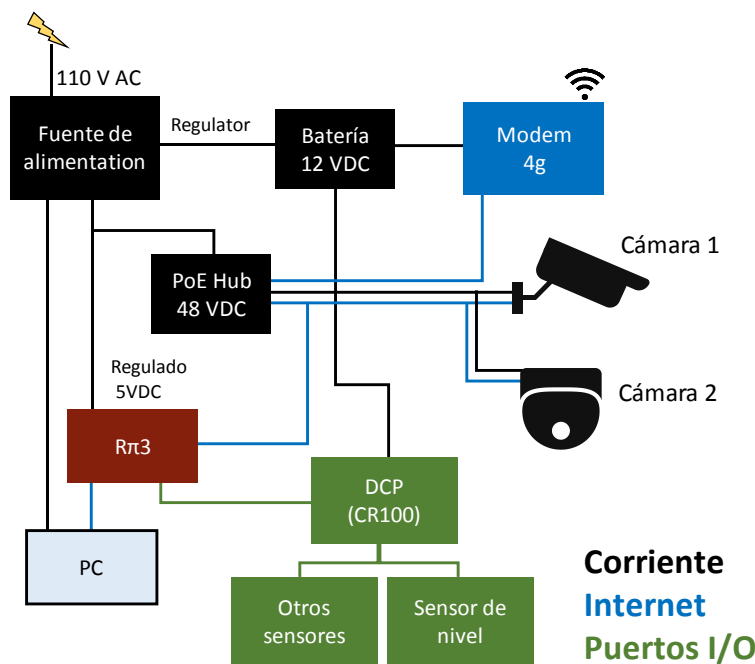


Figura XI.2 Esquema de la estación de LSPIV fija

Se realizó un modelo de terreno 3D de del tramo de medición con la técnica de SFM (Capítulo II) y a partir de fotografías tomadas con dron (DJI, modelo Inspire 1, res: 4000 x 2250), con celular (Samsung, SM-G930V, res: 4032 x 3024) y una cámara (Canon, PowerShot SX260, res: 4000 x 3000). Un total de 182 fotografías se utilizaron con el software Agisoft Photoscan para la reconstrucción de la escena en 3D. Se relevaron las coordenadas de 15 puntos (1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 27, 29, 31, 33, r1 y

r2) con una estación total al fin de calibrar el modelo SFM. Un error total de 2cm sobre el modelo de 31 x 20 m (ver Figura XI.3). La componente vertical del modelo 3D comparte su origen con la escala de aforo presente en la sección.

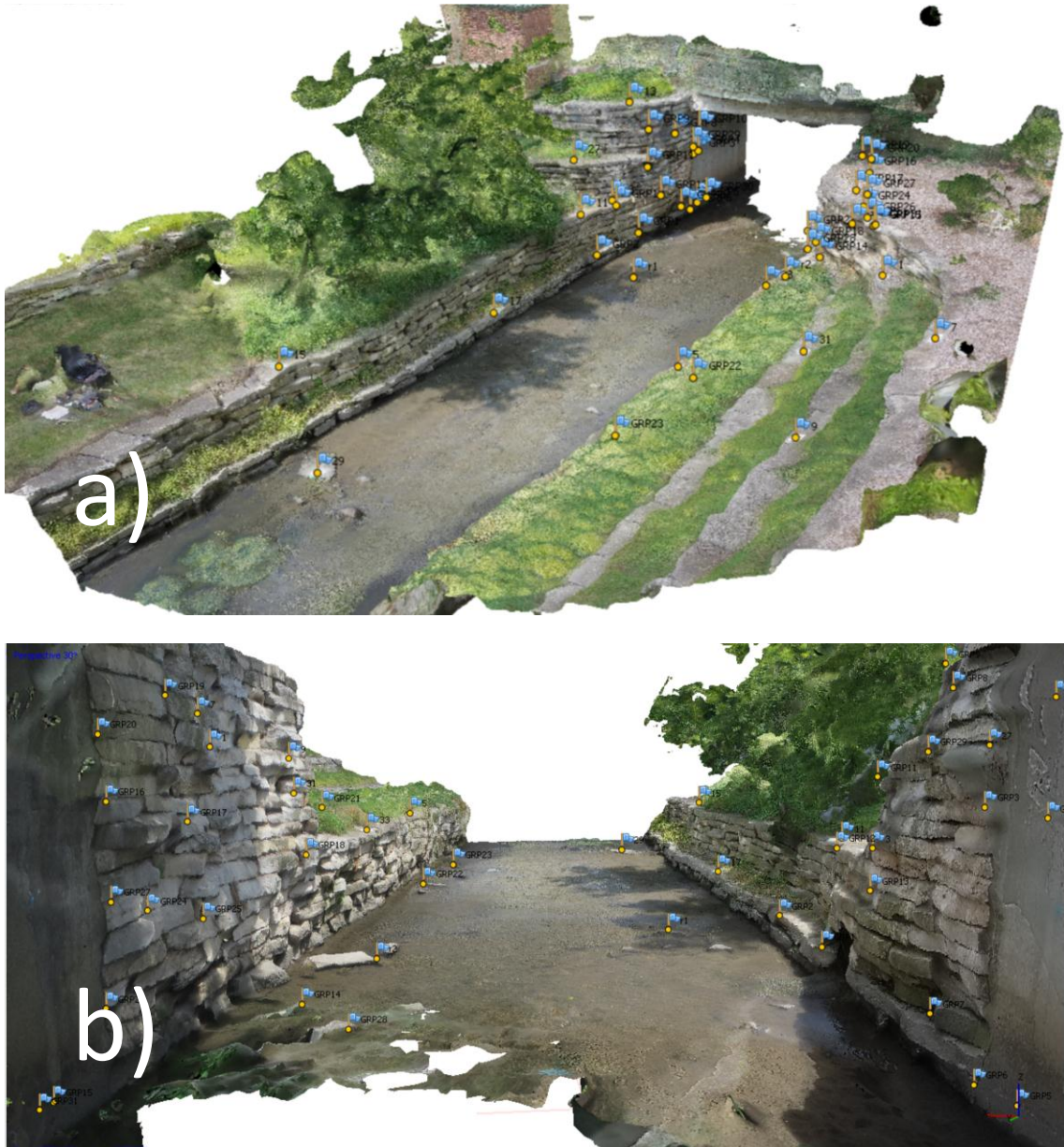


Figura XI.3 resultado del modelo 3D SMF calibrado con los puntos medidos con estación total. Vista global del tramo de interés a) y punto de vista similar a lo de la cámara 1.

PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES

Los videos son procesados de manera automática después de su creación sobre la PC. Las imágenes son extraídas con el software libre FFmpeg (FFmpeg, 2015) a 25 fps y son corregidas de la deformación de la lente (ver Anexa A). Luego de la extracción, se utiliza el código de PIVlab (Thielicke y Stamhuis 2014a) en una versión modificada del software, adaptada al procesamiento automático de los videos. Las imágenes son procesadas con el algoritmo DFT presentado en el Capítulo I con ventanas de interrogación de 128 y 64 píxeles.

RECTIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS

Se esperan variaciones de niveles de la superficie suficiente grandes para justificar una rectificación dinámica de los resultados. Es decir que es necesario que los Puntos de Control (PC) sean ubicados de forma tal que enmarcan toda la región de interés en el espacio, anticipando los niveles extremos. Por lo tanto, se utiliza la metodología presentada en el capítulo II para la obtención de PCs en el espacio a partir del modelo de terreno SFM generado. En Figura XI.3, los puntos marcados “GRP_#” son relevados desde el modelo SFM y son utilizados para la resolución de la matriz Cámara 2.13 del capítulo II. Las coordenadas en pixel del plano de rectificación se calcula luego con la ecuación 2.13 y con el valor de Z constante e igual al nivel de la superficie registrado por el datalogger de la estación. En la Figura XI.4 se puede ver dos planos de rectificación generados por dos niveles de distintos.

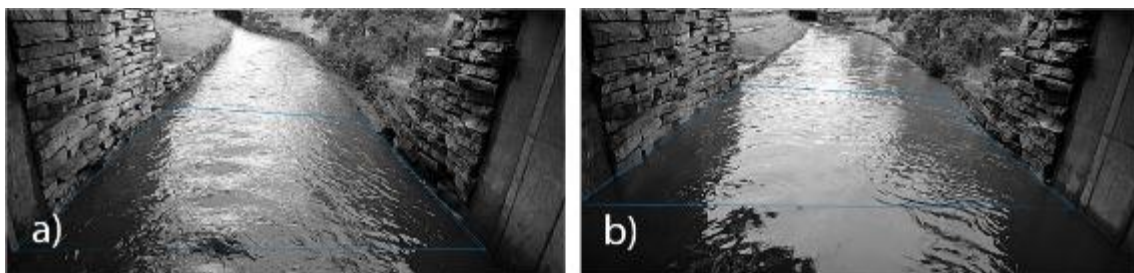


Figura XI.4 Planos de rectificación calculado para la cota $Z = 3.39$ m a) y $Z = 4.05$ m b)

Una vez definido el plano de rectificación se puede utilizar la matriz Homografía para la rectificación de los resultados. La estación de LPSIV fija se encuentra operacional desde el día 24 de Agosto de 2016. El trabajo futuro será el análisis de los datos adquiridos y la comparación de ellos con otras técnicas.

ESTIMACIÓN DE CAUDAL DE RÍOS DE LLANURA CON LSPIV Y LSPTV ENÉPOCA DE ESTIAJE

La comprensión y el manejo de los recursos hídricos y las complejas interacciones de los procesos hidrológicos involucrados hacen necesario el empleo de un enfoque integrado a escala de cuenca. Solamente de esta forma se puede dar una respuesta integral a las demandas de usuarios (abastecimiento, riego, generación de energía, extracción de áridos del cauce, sostenimiento del hábitat fluvial). Esto se hace aún más necesario en el contexto de intensificación del uso del recurso y aumento de incertidumbres asociadas al cambio climático. En este marco, el disponer de una red hidrométrica confiable constituye una herramienta imprescindible para generar la información necesaria para la toma de decisiones y la gestión sustentable del recurso.

En Uruguay, se dispone de una extensa red hidrométrica en la mayor parte de los arroyos y ríos del Uruguay, con cuencas mayores a los 1000 Km² de superficie. Esta red acumula información desde comienzos del Siglo XIX, siendo gestionada en la actualidad por la Dirección Nacional de Aguas (DINAGUA). La red hidrométrica nacional tiene importancia estratégica para el desarrollo del país, y la información recolectada 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. En efecto, la tecnología de medición de velocidades (correntómetros) y niveles (limnímetros y limnógrafos) en las secciones de aforo, es adecuada para el registro de escurrimientos medios, presentando importantes dificultades en la estimación de caudales bajos. En términos cuantitativos, el trabajo de (Genta et al., 2001) analiza el error cometido al utilizar la curva de aforos en relación a los puntos tirante- caudal (H,Q) relevados en campo, en 16 cuencas representativas de Uruguay. Si se considera la totalidad del rango de la curva de aforo, se obtiene en promedio un error relativo de 11% y un error máximo de 30% para las 16 cuencas. Por el contrario, si se consideran solamente el tramo de caudales bajos en cada curva de aforo, se obtiene un error promedio de 68% y un error máximo de 145%. En conclusión, si se trabaja en la zona de caudales bajos, el error asociado al uso de las curvas de aforo disponibles, es del mismo orden de magnitud que el valor que se estima. El régimen hídrico de ríos y arroyos de Uruguay se caracteriza por disponer de volúmenes de escurrimiento medio (anual e incluso mensual) muy por encima de la demanda de los usuarios en una cuenca, pero dada su altísima variabilidad, los caudales instantáneos en época de sequías muchas veces son insuficientes. En particular, el Uruguay tiene problemas de disponibilidad de agua únicamente en períodos de sequías

(estiaje), cuando por competencia entre usuarios el escurrimiento superficial resulta insuficiente para cumplir con el 100% de las demandas. Por otro lado disponer de una serie de caudales mínimos confiables es la base para la determinación de los caudales ecológicos o ambientales. En efecto, la mayor parte de los métodos de cálculo propuestos en la bibliografía internacional (Magdaleno Mas, 2009; Poff et al., 1997) utilizan los estadísticos hidrológicos basados en el tramo de caudales bajos de las curvas de permanencia. (Rodríguez Gallego 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 grande como su magnitud. El Uruguay viene realizando un esfuerzo muy importante para mejorar la gestión de los recursos hídricos desde el año 2005, con la reforma del artículo 47 de la Constitución Nacional, la creación de la DINAGUA en la órbita del MVOTMA, la promulgación de la ley nacional de políticas de aguas en octubre de 2009, la creación de los consejos regionales de recursos hídricos y la creación y puesta en operación de los comités de cuencas. Sin embargo, este conjunto de acciones que tiene como objetivo mejorar la gestión del recurso, debe estar acompañada por herramientas técnicas que sustenten a los tomadores de decisión (integrantes de los consejos y comités de cuenca y autoridades de DINAGUA). Para ello, un aspecto fundamental es disponer de una red de monitoreo suficientemente confiable, inserta en un proceso de revisión y mejora continua. Considerando que los principales conflictos entre usuarios en materia de recursos hídricos ocurren en época de sequía, resulta fundamental disponer de aforos confiables para caudales mínimos en ríos y arroyos del Uruguay. Frente a esta necesidad de mejorar la medición de caudales de estiaje en Uruguay, en este capítulo se evalúa la aplicación las técnicas de velocimetría por imágenes para la medición de caudales bajos en las condiciones hidrogeomorfológicas presentes en las secciones de aforo de Uruguay. Se busca 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. Se propone también la validación de las estimaciones de velocímetros y correntómetros acústicos del tipo ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) y ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler).

Se utilizó como cuenca piloto, la cuenca del arroyo Maldonado con cierre en el puente de la Ruta Nacional N° 9 (34.747837°S; 54.953050°O). En dicho punto (Figura XI.5), la cuenca ocupa 350 Km² de superficie. Esta cuenca está aforada en el punto de cierre definido (Ruta N°9) y cuenta con monitoreo de nivel y caudal desde 1983. Se trata de una de las cuencas monitoreadas por DINAGUA de menor superficie, lo que constituye una ventaja en términos de escala y dimensión espacial para la medición, en términos del ancho y profundidad de la sección a medir en las campañas.

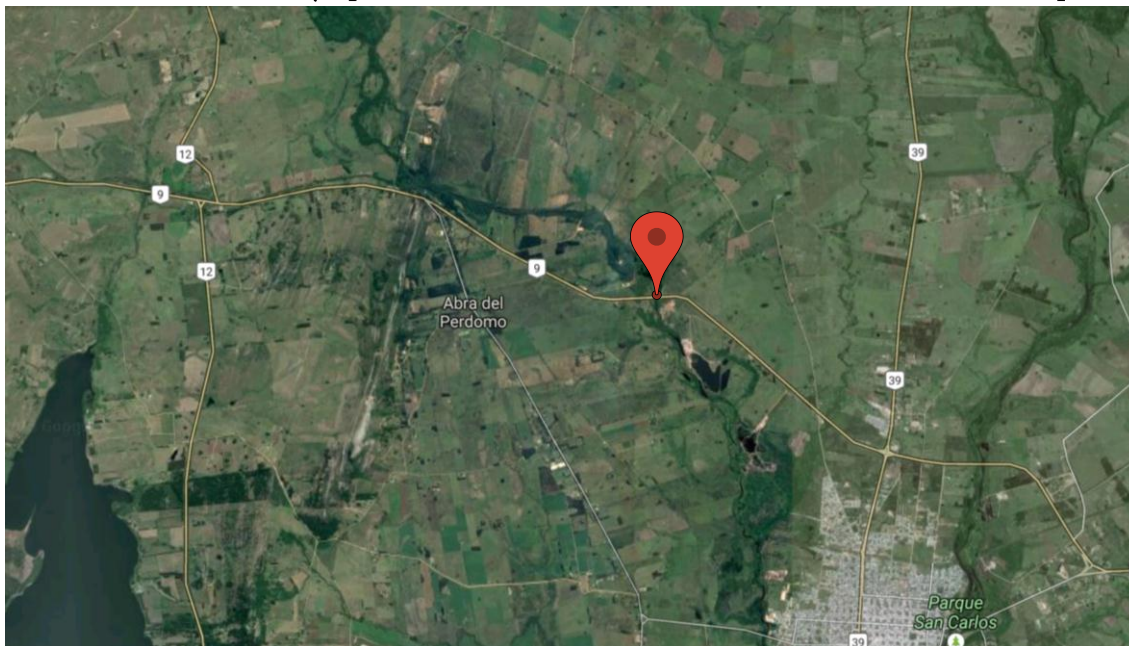


Figura XI.5 Ubicación de la sección de aforo del arroyo Maldonado, abajo del puente de la ruta 9.

Se realizaron 10 campañas de aforo entre noviembre del año 2014 y noviembre del año 2016 utilizando ambas técnicas de LSPTV y LSPIV, aguas debajo del puente de la ruta 9 (Figura XI.6). Las cámaras utilizadas fueron el modelo RX100 (1920 x 1080) de marca Sony en 2014 y el modelo D5200 (1920 x 1080) de marca Nikon para los años 2015 y 2016. Para los aforos realizados con LPTV se utilizaron naranjas como trazador mientras que se utilizaron chips de eucalipto para la técnica de LSPIV (Figura XI.7). La batimetría de la sección fue relevada con regla y nivel.

Los resultados de esta aplicación siguen siendo procesados y serán utilizados para la calibración de un modelo hidrológico concentrado basado en (Perrin et al., 2003).



Figura XI.6 Sección de interés del arroyo Maldonado visto desde el puente de la ruta 9. La 4 PCs utilizados para la rectificación de los resultados se encuentran donde la superficie del agua cruz cada una de las estacas (azul)

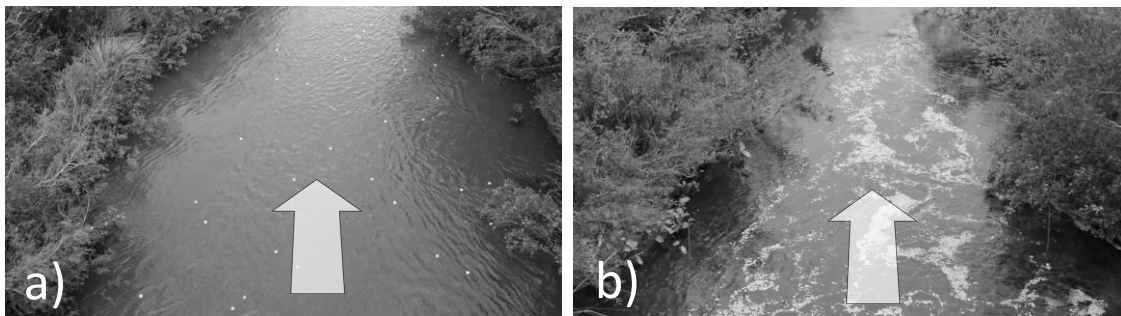


Figura XI.7 Sección de interés sembrada con naranjas para LSPTV a) y con chips de madera para LSPIV b)

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adrian, R.J., 2005. Twenty years of particle image velocimetry. *Exp. Fluids* 39, 159-169. doi:10.1007/s00348-005-0991-7
- Adrian, R.J., 1997. Dynamic ranges of velocity and spatial resolution of particle image velocimetry. *Meas. Sci. Technol.* 8, 1393.
- Adrian, R.J., 1991. Particle-Imaging Techniques For Experimental Fluid-Mechanics. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 23, 261-304. doi:10.1146/annurev.fluid.23.1.261
- Adrian, R.J., 1984. Scattering particle characteristics and their effect on pulsed laser measurements of fluid flow: speckle velocimetry vs particle image velocimetry. *Appl. Opt.* 10-11.
- Adrian, R.J., Westerweel, J., 2011. Particle image velocimetry, 30.^a ed. Cambridge University Press.
- Al-Saggaf, Y., Simmons, P., 2015. Social media in Saudi Arabia: Exploring its use during two natural disasters. *Technol. Forecast. Soc. Change* 95, 3-15. doi:10.1016/j.techfore.2014.08.013
- Baek, S.J., Lee, S.J., 1996. A new two-frame particle tracking algorithm using match probability. *Exp. Fluids* 22, 23-32. doi:10.1007/BF01893303
- Bastiaans, R.J.M., 2000. Cross-correlation PIV; theory, implementation and accuracy.
- Bechle, A.J., Wu, C.H., 2014. An entropy-based surface velocity method for estuarine discharge measurement. *Water Resour. Res.* 50, 6106-6128. doi:10.1002/2014WR015353
- Bechle, A.J., Wu, C.H., Liu, W.-C., Kimura, N., 2012. Development and Application of an Automated River-Estuary Discharge Imaging System. *J. Hydraul. Eng.* 138, 327-339. doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000521
- Boufama, B., Mohr, R., Veillon, F., 1993. Euclidian constraints for uncalibrated reconstruction, en: Fourth International Conference on Computer Vision. pp. 466-470. doi:10.1109/ICCV.1993.378179
- Brevis, W., 2009. Experimental investigation of the flow hydrodynamics in open-channel dead zones. Universidad de Chile.
- Brevis, W., Niño, Y., Jirka, G.H., 2011. Integrating cross-correlation and relaxation algorithms for particle tracking velocimetry. *Exp. Fluids* 135-147. doi:10.1007/s00348-010-0907-z
- Brown, D.C., 1965. Decentering distortion and the definitive calibration of metric cameras, en: The American Society of Photogrammetry Convention.
- Chen, Y.-C., Chiu, C.-L., 2004. A fast method of flood discharge estimation. *Hydrol. Process.* 18, 1671-1684. doi:10.1002/hyp.1476
- Cheng, R.T., Gartner, J.W., Mason, R.R., Costa, J.E., Plant, W.J., Spicer, K.R., Haeni, F.P., Melcher, N.B., Keller, W.C., Hayes, K., 2004. Evaluating a Radar-Based , Non Contact

- Streamflow Measurement System in the San Joaquin River at Vernalis , California. Menlo Park, California.
- Chiu, C.-L., Said, C.A.A., 1995. Maximum and Mean Velocities and Entropy in Open-Channel Flow. *J. Hydraul. Eng.* 121, 26-35. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:1(26)
- Chow, V. Te, 1959. *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill Higher Education, Tokyo.
- Corke, P., 2011. *Robotics, Vision and Control*, Springer Tracts in Advanced Robotics. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-20144-8
- Costa, J.E., Spicer, K.R., Cheng, R.T., Haeni, F.P., Melcher, N.B., Thurman, E.M., Plant, W.J., Keller, W.C., 2000. Measuring stream discharge by non-contact methods: A proof-of-concept experiment 553-556.
- Creutin, J.-D., Muste, M., Bradley, A.A., Kim, S.C., Kruger, A., 2003a. River gauging using PIV techniques: a proof of concept experiment on the Iowa River 277, 182-194. doi:10.1016/S0022-1694(03)00081-7
- Creutin, J.-D., Muste, M., Bradley, A., Kim, S.C., Kruger, A., 2003b. River gauging using PIV techniques: a proof of concept experiment on the Iowa River. *J. Hydrol.* 277, 182-194. doi:10.1016/S0022-1694(03)00081-7
- Dérian, P., Héas, P., Herzet, C., Mémin, É., 2013. Wavelets and Optical Flow Motion Estimation. *Numer. Math. Theory, Methods Appl. Glob. Sci. Press* 116-137.
- Detert, M., Weitbrecht, V., 2015. A low-cost airborne velocimetry system: proof of concept. *J. Hydraul. Res.* 53, 532-539. doi:10.1080/00221686.2015.1054322
- FFmpeg, 2015. <https://www.ffmpeg.org/>.
- Fohringer, J., Dransch, D., Kreibich, H., Schröter, K., 2015. Social media as an information source for rapid flood inundation mapping. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 15, 2725-2738. doi:10.5194/nhess-15-2725-2015
- Fujita, I., Muste, M., 2011. Preface to the special issue on image velocimetry. *J. Hydro-environment Res.* 5, 213. doi:10.1016/j.jher.2011.08.004
- Fujita, I., Muste, M., Kruger, A., 1998. Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications. *J. Hydraul. Res.* 36, 397-414. doi:10.1080/00221689809498626
- Fujita, I., Watanabe, H., Tsubaki, R., 2007. Development of a non-intrusive and efficient flow monitoring technique: The space-time image velocimetry (STIV). *Int. J. River Basin Manag.* 5, 105-114. doi:10.1080/15715124.2007.9635310
- Gaitan, S., ten Veldhuis, M., van de Giesen, N., 2015. Spatial Distribution of Flood Incidents Along Urban Overland Flow-Paths. *Water Resour. Manag.* 29, 3387-3399. doi:10.1007/s11269-015-1006-y
- Genta, J.L., Charbonnier, F., Failache, N., Alonso, J., 2001. *Balances hídricas superficiales en cuencas del Uruguay*.

- Gonzales, R.C., Wintz, P., 1987. *Digital Image Processing*. Addison-Wesley Publishing, Reading MA.
- Gunawan, B., Sun, X., Sterling, M., Shiono, K., Tsubaki, R., Rameshwaran, P., Knight, D.W., Chandler, J.H., Tang, X., Fujita, I., 2012. The application of LS-PIV to a small irregular river for inbank and overbank flows. *Flow Meas. Instrum.* 24, 1-12. doi:10.1016/j.flowmeasinst.2012.02.001
- Harris, C., Stephens, M., 1988. A Combined Corner and Edge Detector. *Proceedings Alvey Vis. Conf.* 1988 147-151. doi:10.5244/C.2.23
- Hartley, R., Zisserman, A., 2004. *Multiple View Geometry in Computer Vision*, 2.^a ed. Cambridge University Press.
- Hauet, A., 2006. Estimation de débit et mesure de vitesse en rivière Large-Scale Particle Image Velocimetry. Institut National Polytechnique De Grenoble, LTHE, UMR 5564, CNRS-INPG-IRD-UJF.
- Hauet, A., Kruger, A., Krajewski, W.F., Bradley, A., Asce, A.M., Muste, M., Asce, A.M., Creutin, J., Wilson, M., 2008. Experimental System for Real-Time Discharge Estimation Using an Image-Based Method 13, 105-110.
- Heikkilä, J., Silvén, O., 1997. A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction, en: *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'97)*. San Juan, Puerto Rico, p. 1106-1112.
- Herschy, R.W., 2002. The uncertainty in a current meter measurement. *Flow Meas. Instrum.* 13, 281-284. doi:10.1016/S0955-5986(02)00047-X
- Hirata, E., Giannotti, M.A., Larocca, A.P.C., Quintanilha, J.A., 2015. Flooding and inundation collaborative mapping - use of the Crowdmapp/Ushahidi platform in the city of Sao Paulo, Brazil. *J. Flood Risk Manag.* n/a-n/a. doi:10.1111/jfr3.12181
- Honkanen, M., Nobach, H., 2005. Background extraction from double-frame PIV images. *Exp. Fluids* 38, 348-362. doi:10.1007/s00348-004-0916-x
- Huang, H., Dabiri, D., Gharib, M., 1997. On errors of digital particle image velocimetry. *Meas. Sci. ...* 1427.
- ISO, 2007. *Hydrometry - Measurement of Liquid Flow in Open Channels Using Current - Meters or Floats*, ISO 748:2007(E).
- ISO, 1992a. *Measurement of liquid flow in open channels - Tracer dilution methods for the measurement of steady flow - Part 3: Chemical tracers*, ISO 9555-3:1992(E).
- ISO, 1992b. *Measurement of liquid flow in open channels — Parshall and SANIIRI flumes*, ISO 9826:1992(E).
- Jodeau, M., Hauet, A., Paquier, A., Le Coz, J., Dramais, G., 2008. Application and evaluation of

- LS-PIV technique for the monitoring of river surface velocities in high flow conditions. *Flow Meas. Instrum.* 19, 117-127. doi:10.1016/j.flowmeasinst.2007.11.004
- Keane, R.D., Adrian, R.J., 1990. Optimization of particle image velocimeters. Part I: Double pulsed systems. *Meas. Sci. Technol.* 1202-1215.
- Kim, Y., Muste, M., Hauet, A., Krajewski, W.F., Kruger, A., Bradley, A., 2008. Stream discharge using mobile large-scale particle image velocimetry: A proof of concept. *Water Resour. Res.* 44, n/a-n/a. doi:10.1029/2006WR005441
- Koswate, S., McDougall, K., Liu, X., 2015. SDI and crowdsourced spatial information management automation for disaster management. *Surv. Rev.* 47, 307-315. doi:10.1179/1752270615Y.0000000008
- Le Boursicaud, R., Pénard, L., Hauet, A., Thollet, F., Le Coz, J., 2015. Gauging extreme floods on YouTube: application of LSPIV to home movies for the post-event determination of stream discharges. *Hydrol. Process.* n/a-n/a. doi:10.1002/hyp.10532
- Le Coz, J., Hauet, A., Pierrefeu, G., Dramais, G., Camenen, B., 2010a. Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flash-flood discharge measurements in Mediterranean rivers. *J. Hydrol.* 394, 42-52. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.05.049
- Le Coz, J., Hauet, A., Pierrefeu, G., Dramais, G., Camenen, B., 2010b. Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flash-flood discharge measurements in Mediterranean rivers. *J. Hydrol.* 394, 42-52. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.05.049
- Le Coz, J., Jodeau, M., Hauet, A., Marchand, B., Le Boursicaud, R., 2014a. Image-based velocity and discharge measurements in field and laboratory river engineering studies using the free FUDAA -LSPIV software, en: *River Flow*. Lausanne, Switzerland.
- Le Coz, J., Jodeau Magali, Hauet, A., Marchand, B., Le Boursicaud, R., 2014b. Image-based velocity and discharge measurements in field and laboratory river engineering studies using the free FUDAA-LSPIV software, en: *River Flow*. Lausanne, Switzerland.
- Le Coz, J., Renard, B., Bonnifait, L., Branger, F., Le Boursicaud, R., 2014. Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: A Bayesian approach. *J. Hydrol.* 509, 573-587. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.11.016
- Lee, K.-Y., Chuang, Y.-Y., Chen, B.-Y., Ouhyoung, M., 2009. Video Stabilization Using Robust Feature Trajectories. *Natl. Taiwan Univ.*
- Legout, C., Darboux, F., Nédélec, Y., Hauet, A., Esteves, M., Renaux, B., Denis, H., Cordier, S., 2012. High spatial resolution mapping of surface velocities and depths for shallow overland flow. *Earth Surf. Process. Landforms* 37, 984-993. doi:10.1002/esp.3220
- Liberzon, A., Meller, Y., 2013. Openptv [WWW Document]. URL <https://github.com/OpenPTV>
- Liu, H., Chellappa, R., Rosenfeld, A., 2003. Fast two-frame multiscale dense optical flow estimation using discrete wavelet filters. *J. Opt. Soc. Am. A. Opt. Image Sci. Vis.* 20, 1505-

- Lloyd, P.M., Stansby, P.K., Ball, D.J., 1995. Unsteady surface-velocity field measurement using particle tracking velocimetry. *J. Hydraul. Res.* 33, 519-534. doi:10.1080/00221689509498658
- Lowry, C.S., Fienen, M.N., 2013. CrowdHydrology: Crowdsourcing hydrologic data and engaging citizen scientists. *GroundWater* 51, 151-156. doi:10.1111/j.1745-6584.2012.00956.x
- Lucero, J.M., 2015. Cuantificación de errores en la implementación de LSPIV para la determinación de caudales en cursos fluviales. Universidad Nacional de Córdoba.
- Magdaleno Mas, F., 2009. Manual técnico de cálculo de caudales ambientales., España. ed.
- Malik, N. a., Dracos, T., 1993. Lagrangian PTV in 3D flows. *Appl. Sci. Res.* 51, 161-166. doi:10.1007/BF01082531
- Melling, A., 1997. Tracer particles and seeding for particle image velocimetry. *Meas. Sci. Technol.* 8, 1406-1416. doi:10.1088/0957-0233/8/12/005
- Microsoft®, 2010. Photosynth™ [WWW Document]. URL <http://www.photosynth.net>
- Milanesi, L., Pilotti, M., Ranzi, R., 2015. A conceptual model of people's vulnerability to floods. *Water Resour. Res.* 1-16. doi:10.1002/2014WR016172.Received
- MPRT, 2012. The Mobile Robot Programming Toolkit [WWW Document]. URL <http://www.mrpt.org/Application:camera-calib>
- Mueller, D.S., Wagner, C.R., 2009. Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat.
- Muste, M., Fujita, I., Hauet, A., 2008. Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments. *Water Resour. Res.* 44, 1-14. doi:10.1029/2008WR006950
- Muste, M., Ho, H., Kim, D., 2011. Considerations on direct stream flow measurements using video imagery : Outlook and research needs 1-14. doi:10.1016/j.jher.2010.11.002
- Nezu, I., Sanjou, M., 2011. PIV and PTV measurements in hydro-sciences with focus on turbulent open-channel flows. *J. Hydro-environment Res.* 5, 215-230. doi:10.1016/j.jher.2011.05.004
- Oberg, K., Mueller, D.S., 2007. Validation of Streamflow Measurements Made with Acoustic Doppler Current Profilers. *J. Hydraul. Eng.* 133, 1421-1432. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:12(1421)
- Okamoto, K., Nishio, S., Saga, T., Kobayashi, T., 2000. Standard images for particle-image velocimetry. *Meas. Sci. Technol.* 11, 685-691. doi:10.1088/0957-0233/11/6/311
- Parshall, R.L., 1932. Parshall flumes of large size. Colorado Agricultural College, Colorado

Experiment Station.

- Patalano, A., Brevis, W., García, C.M., Bleninger, T., Rodríguez, A., 2013a. PTVlab, una herramienta grafica para el procesamiento digital en Velocimetría por Seguimiento de Partículas, en: Tercer Simposio de Metodos Experimentales en Hidraulica. Santa Fe, Argentina.
- Patalano, A., Brevis, W., Guillén, N.F., Alvarez, J., García, C.M., Bleninger, T., Rodriguez, A., 2013b. Rectificación Digital Para Mediciones De Velocidad De Flujo A Gran Escala Utilizando Velocimetría Por Imágenes De Partículas, en: Tercer Simposio de Metodos Experimentales en Hidraulica Simposio Sobre Métodos Experimentales En Hidráulica. Santa Fe, Argentina.
- Patalano, A., Brevis, W., Guillén, N.F., Alvarez, J., García, C.M., Bleninger, T., Rodríguez, A., 2013c. Rectificación digital para mediciones de velocidad de flujo a gran escala utilizando Velocimetría por imágenes de partículas, en: Tercer Simposio de Metodos Experimentales en Hidraulica. Santa Fe, Argentina.
- Patalano, A., García, C.M., Guillén, N.F., García, C., Díaz, É., Rodriguez, A., Ravelo, A., 2014. Evaluación Experimental De La Técnica De Velocimetría Por Seguimiento De Partículas A Gran Escala Para La Determinación De Caudales En Ríos Serranos. Aqua-LAC UNESCO 6, 17-24.
- Perkins, R.J., Hunt, J.C.R., 1989. Particle tracking in turbulent flows. *Adv. Turbul.* 2 286-291.
- Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *J. Hydrol.* 279, 275-289. doi:10.1016/S0022-1694(03)00225-7
- Pizer, S.M., Amburn, E.P., Austin, J.D., Cromartie, R., Geselowitz, A., Greer, T., ter Haar Romeny, B., Zimmerman, J.B., Zuiderveld, K., 1987. Adaptive histogram equalization and its variations. *Comput. Vision, Graph. Image Process.* 39, 355-368. doi:10.1016/S0734-189X(87)80186-X
- Plant, W.J., Keller, W.C., Hayes, K., Spicer, K., 2005. Streamflow Properties from Time Series of Surface Velocity and Stage. *J. Hydraul. Eng.* 131, 657-664. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:8(657)
- Poff, N.L., Allan, J.D., Bain, M.B., Karr, J.R., Prestegard, K.L., Richter, B.D., Sparks, R.E., Stromberg, J.C., 1997. The Natural Flow Regime. *Bioscience* 47, 769-784. doi:10.2307/1313099
- Raffel, M., Willert Christian E, Wereley, S.T., Kompenhans, J., 2007. Particle Image Velocimetry, *Experimental Fluid Mechanics*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/978-3-540-72308-0
- Rehbock, T., 1926. Das Flussbaulaboratorium der Technischen Hochschule in Karlsruhe, VDI Verlag. Berlin.
- Rodríguez Gallego, L., Chreties, C., Crisci, M., Colombo, N., Lanzilotta, B., Saravia, M., Neme, C., Sabaj, V., Conde, D., 2014. Fortalecimiento del concepto de Caudales Ambientales

- como Herramienta para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. Doc. Técnico N° 34, Bibl. Virtual del Programa Hidrológico Int. para América Lat. y el Caribe la UNESCO.
- Schnebele, E., Cervone, G., Waters, N., 2014. Road assessment after flood events using non-authoritative data. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 14, 1007-1015. doi:10.5194/nhess-14-1007-2014
- Snavely, N., 2008. Scene reconstruction and visualization from Internet photo collections. *IPSI Trans. Comput. Vis. Appl.* University of Washington, USA. doi:10.2197/ipsjtcva.3.44
- Snavely, N., Seitz, S.M., Szeliski, R., 2008. Modeling the world from Internet photo collections. *Int. J. Comput. Vis.* 80, 189-210. doi:10.1007/s11263-007-0107-3
- Spetsakis, M., Aloimonos, J.Y., 1991. A multi-frame approach to visual motion perception. *Int. J. Comput. Vis.* 6, 245-255. doi:10.1007/BF00115698
- Stamhuis, E.J., 2006. Basics and principles of particle image velocimetry (PIV) for mapping biogenic and biologically relevant flows. *Aquat. Ecol.* 40, 463-479. doi:10.1007/s10452-005-6567-z
- Stitou, A., Riethmuller, M.L., 2001. Extension of PIV to super resolution using Adel Stitou and M L Riethmuller. *Meas. Sci. Technol.* 12, 1398-1403.
- Szeliski, R., Kang, S.B., 1993. Recovering 3D shape and motion from image streams using nonlinear least squares. *Comput. Vis. Pattern Recognit.* 752-753. doi:10.1109/CVPR.1993.341157
- Taborda, R., Silva, A., 2012. COSMOS: a lightweight coastal video monitoring system. *Comput. Geosci.* doi:10.1016/j.cageo.2012.07.013
- Takehara, K., Adrian, R.J., Etoh, G.T., Christensen, K.T., 2000. A Kalman tracker for super-resolution PIV. *Exp. Fluids* 29, S034-S041. doi:10.1007/s003480070005
- Takehara, K., Etoh, T., 1998. A Study on Particle Identification in PTV. *J. Vis.* 1, 313-323.
- Tarashima, S., Tange, M., Someya, S., Okamoto, K., 2010. GPU accelerated direct cross-correlation PIV with window deformation. *Proc. 15th Int ...* 5-8.
- Tarrab, L., García, C.M., Cantero, M.I., Oberg, K., 2012. Role of turbulence fluctuations on uncertainties of acoustic Doppler current profiler discharge measurements. *Water Resour. Res.* 48, W06507. doi:10.1029/2011WR011185
- Taylor, Z.J., Gurka, R., Kopp, G. a., Liberzon, A., 2010. Long-Duration Time-Resolved PIV to Study Unsteady Aerodynamics. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 59, 3262-3269. doi:10.1109/TIM.2010.2047149
- Thielicke, W., Stamhuis, E.J., 2014a. PIVlab – Towards User-friendly , Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB.
- Thielicke, W., Stamhuis, E.J., 2014b. PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate

- Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. J. Open Res. Softw. 2. doi:10.5334/jors.bl
- Tien, W., Dabiri, D., Lieu, V.H., Schwartz, D.T., 2013. Volumetric Velocity Measurements of an Acoustic Streaming Microeddy Array using Color-Coded Three-Dimensional Micro Particle Tracking Velocimetry.
- Vision Caltech, 2009. Camera Calibration Toolbox for Matlab [WWW Document]. URL http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/
- Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., Reynolds, J.M., 2012. «Structure-from-Motion» photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179, 300-314. doi:10.1016/j.geomorph.2012.08.021
- Willert, C.E., Gharib, M., 1991. Experiments in Fluids Digital particle image velocimetry 193, 181-193.
- World Commission on environment and development, 1987. World Commission on environment and development. doi:10.1016/S0378-777X(85)80040-8
- Yu, K., Kim, S., Kim, D., 2015. Correlation analysis of spatio-temporal images for estimating two-dimensional flow velocity field in a rotating flow condition. *J. Hydrol.* 529, 1810-1822. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.08.005

APÉNDICE A

CALIBRACIÓN DE LA CÁMARA

El proceso de calibración de una cámara es un paso que puede ser necesario (dependiendo de la lente) para obtener mediciones de desplazamiento/velocidades a partir de imágenes de la misma. La exactitud de la calibración determinará posteriormente la precisión de las mediciones que se realicen a partir de las imágenes. Es por este motivo que es imprescindible realizar la calibración de la cámara con plenas garantías de que los parámetros obtenidos son los más parecidos a los reales. Este compromiso implica tanto la elección del método de calibración, así como la correcta utilización del mismo. Existen numerosas técnicas de calibración; Usaremos el modelo de distorsión de Brown, (1965).

Las imperfecciones en las formas de las lentes provocan desviaciones laterales del haz de luz, que las atraviesa. Como resultado se obtiene una posición del punto observado en la imagen diferente a su posición esperada como reflejo de un punto del espacio. La posición correcta en píxeles de un punto en la imagen se expresa mediante las siguientes expresiones:

$$x = X/Z$$

$$y = Y/Z$$

$$x' = x(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6) + P_2(r^2 + 2x^2) + 2P_1xy$$

$$y' = y(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6) + P_1(r^2 + 2y^2) + 2P_2xy$$

$$u = c_x + x'f_x + y'skew$$

$$v = c_y + y'f_y$$

$$r = (x^2 + y^2)^{0.5}$$

Donde:

X, Y y Z las coordenadas del sistema local de la cámara

u y v las coordenadas proyectadas sobre la imagen

f_x y f_y las longitudes de focales

c_x y c_y las coordenadas del punto principal

K_1 , K_2 y K_3 los coeficientes de distorsión radial

P_1 y P_2 los coeficientes de distorsión tangencial

Skew es el coeficiente de non ortogonalidad (despreciable, la mayoría de los casos)

Procedimiento para la calibración

Captura de las imágenes

Capturar una serie de fotos de un patrón de calibración (damero) con diferentes ángulos. La cámara que se calibra debe estar en el mismo modo que cuando se utiliza para el procesamiento de imágenes. Por ejemplo, para la mayoría de las cámaras, es preferible tomar un video en cada ángulo en lugar de sacar fotos ya que generalmente el modo video tiene un formato diferente y entonces una calibración diferente. De la misma manera las tomas deben ser realizadas con la misma distancia focal. Una cantidad mínima de 3 fotos es necesaria para la resolución de las ecuaciones de calibración. Se recomienda evitar todo tipo de reflexión o sombras y cubrir totalmente el área de las fotos con el patrón de la calibración. A continuación (Figura A.1), se puede ver un set de fotos tomadas con la cámara IP utilizada en el Capítulo VI.

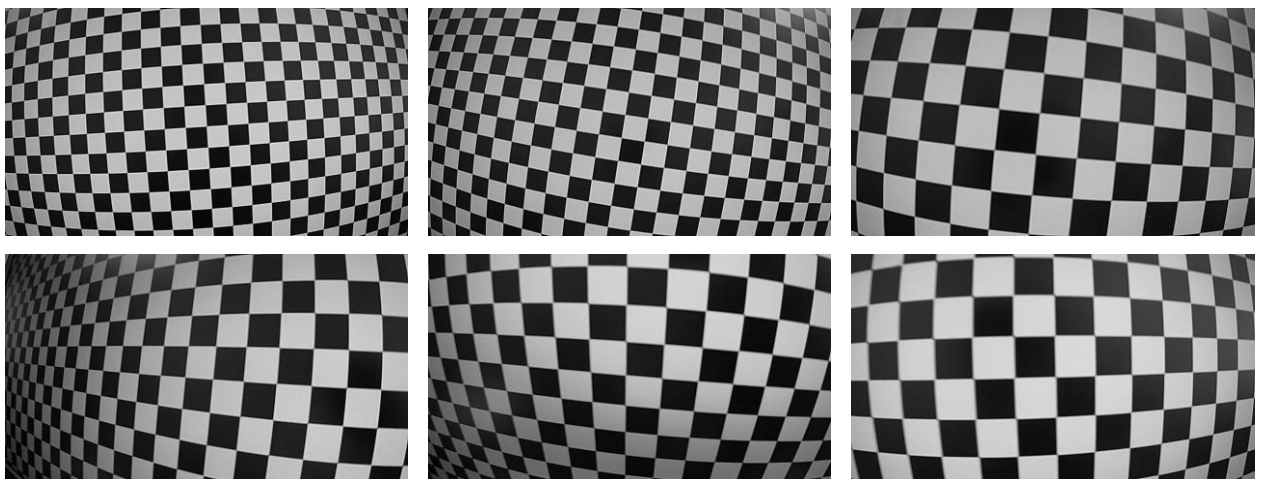


Figura A.1 Set de fotos para la calibración de la cámara. Las tomas son realizadas en modo videos. Se puede apreciar la deformación de la lente sobre cada una de las tomas.

Existen una cantidad numerosa de programas que resuelven las ecuaciones de calibración. Usaremos el software Agisoft Lens®. El software detectara automáticamente las esquinas del damero sobre cada una de las tomas antes de evaluar f_x , f_y , c_x , c_y , K_1 , K_2 , K_3 , P_1 , P_2 y Skew.

En la Figura A.2 se puede ver la corrección de la distorsión de una imagen utilizando los parámetros calculados.

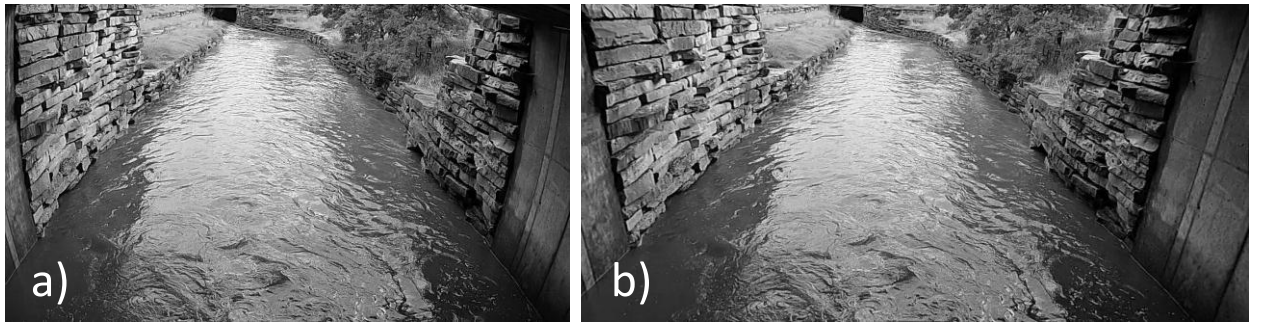


Figura A.2 Ejemplo de corrección de la distorsión debido a la lente con una imágenes tomada con la cámara usada en el capítulo VI. Foto original a), foto libre de distorsión b)

APÉNDICE B

CORRECCIÓN DEL MOVIMIENTO

Los videos realizados con movimientos no deseados y que son destinados al procesamiento de desplazamiento/velocidad es muy común: es típico de los videos realizados con cámaras de celular, sostenidos a mano (ver Capítulo X), o el uso de Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT). Mientras la gente disfruta el lujo de capturar momentos interesantes de la manera más fácil eso lleva también a la generación de una grande cantidad de material grabado por aficionados sin cuidadosa planificación.

Este tipo de video presentan a menudo saltos o fluctuaciones bruscas debido al movimiento molesto de una cámara de mano o una cámara montada sobre un vehículo. Un video puede ser estabilizado durante la grabación (con firmware o hardware) pero también a posteriori. La metodología utilizada en esta tesis se basa en el algoritmo descrito en (Lee et al., 2009) y disponible en Matlab®. Originalmente el algoritmo se basa en dos etapas principales: la primera es el rastreo de “patrones característicos” de una imagen a la otra; la segunda es la búsqueda del movimiento los más suave de esos patrones característicos. En Figura B.1 a se puede ver la detección de los patrones característicos con la función `detectFASTFeatures` de Matlab®.

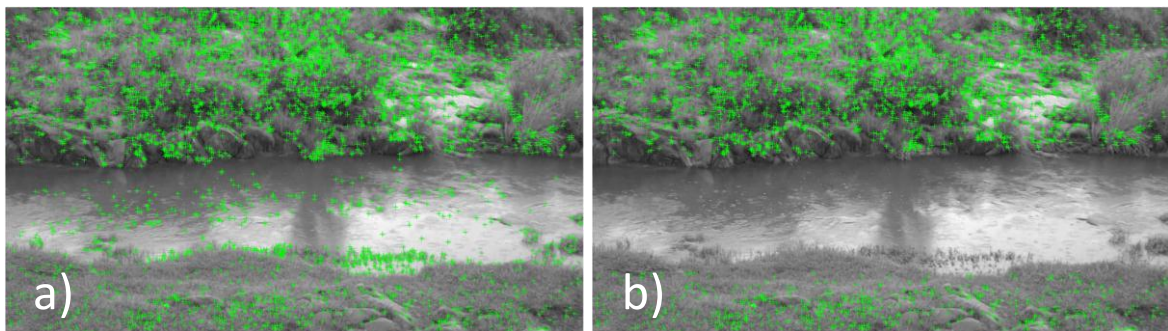


Figura B.1 Ejemplo de detección de patrones característicos. Detección original a), aplicación de una máscara sobre la superficie del agua b)

Aunque el método de RANSAC se aplica para estimar la distorsión entre cada imagen como una transformación afina, los patrones característicos encontrados sobre una superficie en movimiento puede inducir errores. Por lo tanto, en nuestros casos usaremos una máscara para eliminar todos los puntos encontrados sobre la superficie (Figura B.1b). A partir de la metodología presentada por (Lee et al., 2009) posible entonces resolver la matriz de transformación afina de 4 incógnitas: un factor de escala s , un ángulo ang y dos translaciones t_x y t_y :

A continuación, en la Figura B.2 se puede ver el resultado de estabilización de una serie de imágenes adquiridas por una cámara sostenida a mano.

Set de imágenes originales



Imágenes estabilizadas

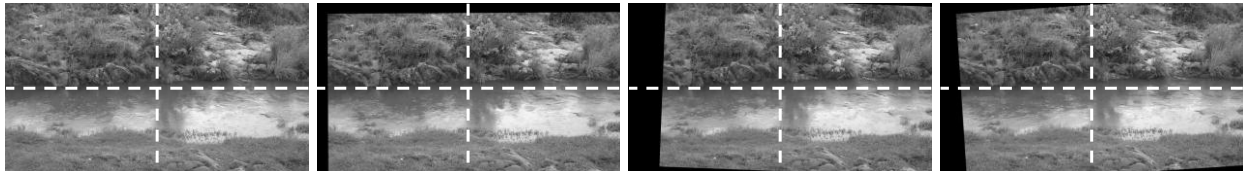


Figura B.2 Estabilización de una serie de imágenes adquiridas con una cámara sostenida a mano

APÉNDICE C
PUBLICACIONES

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA TÉCNICA DE VELOCIMETRÍA POR SEGUIMIENTO DE PARTÍCULAS A GRAN ESCALA PARA LA DETERMINACIÓN DE CAUDALES EN RÍOS SERRANOS

EXPERIMENTAL EVALUATION OF LARGE SCALE PARTICLE TRACKING VELOCIMETRY TECHNIQUE FOR FLOW DISCHARGE MEASUREMENTS IN MOUNTAINS RIVERS

Antoine Patalano¹, C. Marcelo García¹⁻³, Nicolás Guillén¹, Cesar García²⁻³,
Érica Díaz¹⁻³, Andrés Rodríguez¹⁻³ y Andrés Ravelo³⁻⁴

RESUMEN

Este trabajo presenta una evaluación experimental de una técnica de cuantificación de caudales de aguas superficiales en ríos serranos de la provincia de Córdoba. Los ríos serranos de la provincia de Córdoba se caracterizan por su alta variabilidad temporal definida por la ocurrencia de crecientes repentinas o torrenciales de corta duración y gran velocidad de la corriente (en épocas de lluvias) y por la presencia de periodos extensos de estiaje (período de aguas bajas) con caudales del orden de unos cientos de litros por segundo lo que dificulta la selección de una técnica experimental óptima para todas las condiciones de flujo presentes durante un año. En este trabajo se presenta como alternativa una técnica remota para estimar el caudal escurrido en un curso fluvial en el ámbito serrano implementando a gran escala la técnica de velocimetría por seguimiento de partículas (de sus siglas en inglés LS PTV) la cual puede ser aplicada eficientemente en periodos de aguas bajas y medias con un bajo costo relativo. El campo de velocidad superficial determinado experimentalmente con LS PTV en un curso fluvial sembrado con partículas o trazadores y la batimetría de la sección transversal conocida permiten realizar estimaciones del caudal escurrido. La metodología experimental propuesta es validada con resultados obtenidos utilizando simultáneamente otras técnicas en el río San Antonio en la región serrana de la provincia de Córdoba, en dos secciones diferentes, Cuesta Blanca y Villa Carlos Paz, en condiciones de aguas bajas y medias, respectivamente. Finalmente, se discuten las posibles fuentes de errores involucradas en la implementación de la metodología experimental presentada.

Palabras claves: Métodos experimentales, Medición de caudales, LS PTV.

ABSTRACT

This paper presents a validation of an experimental technique for surface water flows discharge measurements in mountain rivers of the of Córdoba province. The mountain rivers of the Córdoba province are characterized by high temporal variability defined by the occurrence of flash floods with very high volumes of fast flows (during the rainy season) and the presence of extended periods of low water conditions with flow rates of the order of a few hundred liters per second which makes difficult the selection of an optimal experimental technique for flow discharge measurement for the different flow conditions present during the year. This paper presents an alternative remote experimental technique, estimating flow discharges in rivers of mountain areas, based on large scale particle tracking velocimetry technique (LS PTV) which can be applied efficiently in periods of low and medium flow conditions with relatively low cost. The surface flow velocity field sampled using LS PTV in a fluvial reach seeded with tracer particles and the cross section bathymetry allow flow discharge estimation. The proposed experimental technique is validated with results obtained using other experimental techniques simultaneously in the San Antonio river in the mountainous region of the of Córdoba province, Argentina, at two different locations (Cuesta Blanca and Villa Carlos Paz). Finally, a discussion is performed on sources of error involved in the implementation of the LS PTV.

Keywords: Experimental Method, Flow discharge measurements, LS PTV.

¹ Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. Av. Filloy s/n, Ciudad Universitaria, CP 5000, Córdoba, Argentina, email: antoine.patalano@gmail.com

² Estudios Hidrológicos en Cuencas Pobremente Aforadas (EHCPA), Universidad Católica de Córdoba, Argentina.

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

⁴ Centro de Relevamiento y Evaluación Recursos Agrícolas y Naturales (CREAN) de la Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

INTRODUCCIÓN

El manejo sustentable del recurso hídrico superficial requiere una cuantificación precisa de la disponibilidad del mismo para que los planes de gestión de ese recurso sean eficientes. La magnitud que cuantifica la disponibilidad del agua superficial en cursos fluviales para su uso como provisión de agua potable, riego o generación de energía hidroeléctrica es el caudal. Los modelos numéricos continuos de simulación hidrológica son herramientas muy útiles para la predicción y pronóstico de caudales escurridos, pero su calibración y validación requiere determinaciones experimentales precisas de caudales escurridos superficialmente tanto en épocas de aguas altas (crecidas) como de aguas bajas (estiaje).

En este trabajo se evalúa experimentalmente una técnica específica de cuantificación de aguas superficiales en ríos serranos de la provincia de Córdoba, que escurren en una región perteneciente a las zonas áridas y semiáridas de la República de Argentina. La técnica evaluada se basa en la implementación a gran escala (LS) de una técnica no intrusiva de Velocimetría por Seguimiento de Partículas (PTV) que permitiría a priori obtener descripciones de los campos superficiales de flujo en cursos fluviales durante periodos de aguas bajas y altas. La técnica de PTV (también conocida como Velocimetría lagrangiana por imágenes de partículas) consiste en obtener (desde una de las márgenes o desde un puente) imágenes digitales de la posición de trazadores previamente "sembrados" en el agua a intervalos constantes de tiempo. En base a dos imágenes capturadas en un intervalo de tiempo conocido, se identifican (mediante el uso de programas computacionales específicos) las posiciones de los trazadores en cada imagen. En los casos en que se cuenta con una ubicación oblicua de la cámara digital en relación al plano superficial de movimiento de las partículas (situación habitual en la implementación a gran escala)

es necesario rectificar las coordenadas de los trazadores. Finalmente, se calcula el desplazamiento de los trazadores en dos imágenes sucesivas, el cual dividido el tiempo de exposición entre las imágenes permite obtener el vector de velocidad superficial del flujo para cada trazador. Para validar esta técnica, en este trabajo, los resultados obtenidos con LS PTV se los compara con resultados de aforos realizados con instrumental convencional (molinete) y con Perfiladores de corriente acústicos Doppler –ADCP, disponible desde hace pocos años para su implementación en aguas poco profundas.

SITIOS DE MEDICIÓN, INSTRUMENTAL Y METODOLOGÍA

Los sitios de medición evaluados en este trabajo constituyen dos tramos de un curso fluvial emplazado en la cuenca alta del Río Suquía (Primero) en la zona serrana de provincia de Córdoba en Argentina. El primer sitio de medición (Figura 1) está emplazado en un tramo del río San Antonio en proximidades de la localidad de Cuesta Blanca (aguas arriba y al sur de la ciudad de Villa Carlos Paz) lo que permite cuantificar el flujo superficial aguas abajo de la toma de agua de la ciudad de Villa Carlos Paz y localidades vecinas. Al momento de realizar el trabajo experimental, la sección de este tramo donde se realizaron las mediciones tenía un ancho aproximado de 6 m y una profundidad máxima aproximada de 0.6m. El segundo tramo (Figura 2) se encuentra en el ejido urbano de la ciudad de Villa Carlos Paz. La sección del tramo donde se realizaron las mediciones tenía al momento de la medición un ancho aproximado de 12 m y una profundidad máxima aproximada de 1.0m. Las condiciones analizadas en ambas secciones corresponden a periodos de aguas bajas y medias, respectivamente. Trabajos experimentales en desarrollo prevén la realización de trabajos de campo en periodos de crecidas.

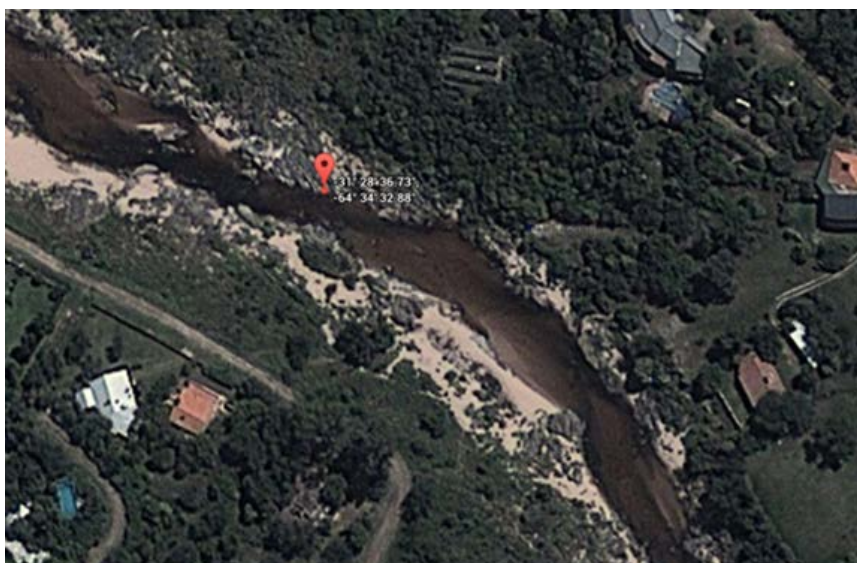


Figura 1. Sitio de medición emplazado en un tramo del río San Antonio en proximidades de la localidad de Cuesta Blanca.



Figura 2. Sitio de medición emplazado en un tramo del río San Antonio en el ejido urbano de la localidad de Villa Carlos Paz.

Para ambos casos, se realizó primero una cuantificación del caudal superficial (aforo) por método de vadeo (sección media) con un molinete a eje vertical (Modelo 6215 USGS Tipo AA-MH Tipo AA). Además se utilizó un perfilador de corriente acústico Doppler ADCP RiverSurveyor S5 YSI/Sontek. Este último está equipado con un GPS que permite obtener en forma alternativa la posición del perfilador en cada instante del recorrido con una resolución del orden del 0.01m. Además, este perfilador cuenta con un dispositivo denominado “SmartPulse”, el cual en base a la profundidad, velocidad y niveles de turbulencia del flujo, adapta el esquema de pulso acústico para esas condiciones con el fin de proveer la máxima resolución de datos de velocidad (en las tres dimensiones), lo que permite capturar perfiles de velocidad de flujo con una frecuencia de 1 Hz y tamaños de celda pequeños de hasta 0.02m. Con el ADCP instalado sobre una plataforma móvil (Figura 3), se realizaron

números pares de transectas o cruces (de ida y vuelta para evitar efectos direccionales) muestreando el campo de flujo y la batimetría de la sección evaluada de manera de completar un tiempo total de medición superior a los 12 minutos (Tarrab et al. 2012) con el fin de minimizar la incertidumbre asociada a la determinación experimental de caudales de flujo. Para estimar la velocidad en las regiones no medidas del flujo, en la parte superior (debido a la sumergencia del instrumento) e inferior (para evitar interferencias del fondo en el pulso acústico) se ajustó una ley potencial de velocidades sobre todo el perfil de velocidades (exponente = 1/6). Las velocidades no medidas en la margen derecha e izquierda (zonas de menor profundidad) se estimaron utilizando el método recomendado para cursos con márgenes con pendiente. El valor del caudal determinado con esta tecnología consiste en el promedio de los caudales cuantificados en todas las transectas realizadas en cada sección.



Figura 3. Medición con ADCP en la sección de estudio en el río San Antonio en proximidades de la localidad de Cuesta Blanca.

En relación a las mediciones con la técnica LS PTV se utilizaron dos trazadores diferentes para caracterizar el campo de velocidad superficial en el primer tramo seleccionado del río San Antonio en en proximidades de la localidad de Cuesta Blanca (Figura 1) con el fin de evaluar la sensibilidad de los resultados a la selección del trazador óptimo. Uno de los trazadores seleccionados son elementos formados por dos tapas plásticas abrochadas entre sí cuyo diámetro comercial es 63 mm logrando cierto peso de forma tal que la acción del viento no modifique su velocidad,

manteniendo la flotabilidad y constituyendo partículas simétricas respecto de sus dos caras (Figura 4). Los motivos de la elección son fundamentalmente su visibilidad y bajo costo. Se ensayó además una alternativa que consiste en el uso de naranjas (de diámetro medio similar a las tapas plásticas) como trazadores naturales. En la sección de medición en el segundo tramo del río en el ejido urbano de la localidad de Villa Carlos Paz, se utilizaron solamente naranjas a partir de los buenos resultados obtenidos en el primer tramo de Cuesta Blanca.

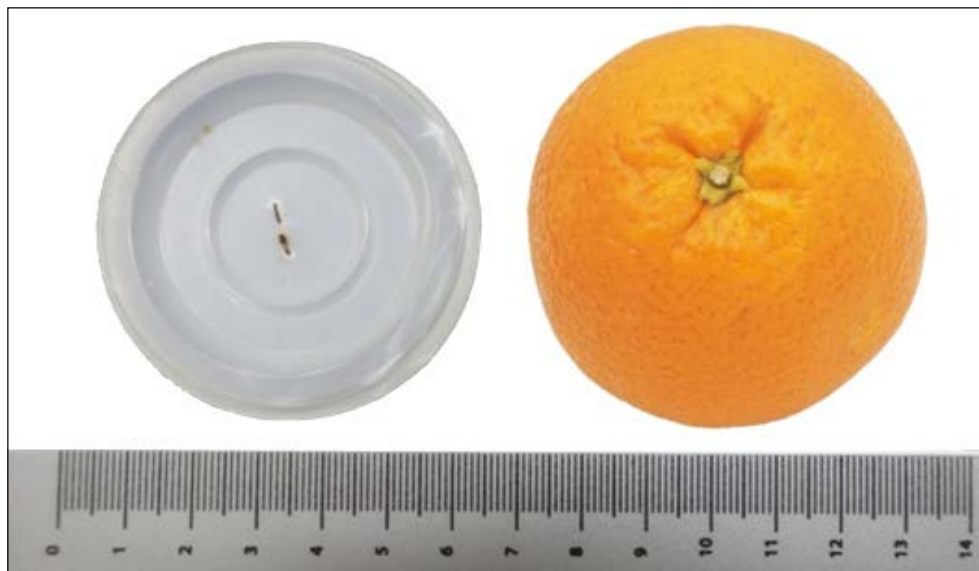


Figura 4. Trazadores utilizados para caracterizar el campo de velocidad superficial en el tramo seleccionado del primer sitio en la sección de estudio en el río San Antonio en proximidades de la localidad de Cuesta Blanca.

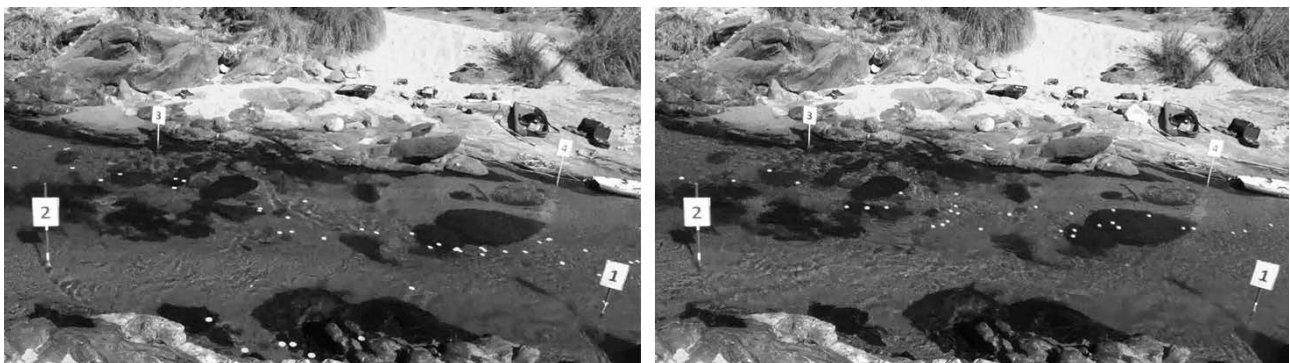


Figura 5. Flujo sembrado con dos trazadores diferentes en el tramo seleccionado del río San Antonio en proximidades de la localidad de Cuesta Blanca. Izquierda: tapas plásticas abrochadas entre sí cuyo diámetro comercial es 63 mm. Derecha: naranjas (de diámetro medio similar a las tapas plásticas).

La cámara de fotografía digital utilizada en la primera sección de medición fue una Sony RX-100, que registra videos con una resolución de 1444x1080 pixeles a 30 cuadros por segundo con un sensor CMOS. En la implementación de LS PTV en la sección del río emplazada en el ejido urbano de Villa Carlos Paz se utilizó una cámara digital (Sony WX300) montada sobre un trípode que permite enfocar todo el ancho del río. La cámara

digital registra un video de alta definición con una resolución de 1920 x 1080 pixeles a una frecuencia de 30 cuadros por segundo con un sensor CMOS. En ambos tramos, la cámara digital fue ubicada sobre una de las márgenes de manera tal que la zona capturada incluya la región donde se realizaron las mediciones con ADCP y molinete. En las imágenes capturadas la zona de interés se muestra en perspectiva por lo que se ve distorsionada

debido a que la cámara se colocó oblicuamente al plano de la superficie libre (ver por ejemplo Figura 5 para la primera sección de medición). Por ello, los resultados obtenidos con PTV se corrigieron para rectificar las coordenadas de la imagen a una proyección ortogonal (Patalano et al. 2013b). Para cada medición se registró un video de 60s de duración a 30 imágenes por segundos. La secuencia metodológica desarrollada en la implementación de PTV se detalla a continuación:

a) Pre-procesamiento de imagen que consiste a transformar las imágenes en escala de gris, sustraer de las imágenes el “fondo” (todo lo que no sea partículas) y detectar cada una de las partículas: el “fondo” de las imágenes se obtiene calculando el promedio de toda la serie de imágenes. Según las partículas usadas, diferentes filtros son utilizados sobre las imágenes de tal manera que las partículas sean blancas con una distribución gaussiana a partir del centroide de ellas hacia fuera. Cuando se resta el fondo de cada imagen individualmente se quedan las partículas blancas sobre un fondo negro.

b) Procesamiento de las coordenadas de las partículas detectadas y extracción de la velocidad del flujo en tiempo y espacio con por Correlación Cruzada (Brevis et al. 2011);

c) Post-Procesamiento que consiste a rectificar los resultados a una vista ortogonal y calibrarlos para transformar las velocidades en [pixel/intervalo de imagen] a [m/s]. Todo el proceso de LS PTV ha sido realizado con el programa libre *PTVlab* y su interface gráfica de usuario desarrollada por el grupo de trabajo (Patalano et al. 2013a). En la Figura 6 se presenta un ejemplo de rectificación digital realizada a partir de 4 puntos de control que vinculan las coordenadas del Mundo Real y las de la fotografía.

Los puntos de control seleccionados para rectificar las imágenes digitales en la implementación de la técnica PTV sobre el río San Antonio en el ejido urbano de la localidad de Villa Carlos Paz fueron materializados a través de un marco de 3m x 6m construido con tuberías de polipropileno bicapa de 0.0127m de diámetro (Figura 7). El marco se retira de la imagen unos segundos después de iniciar el registro del video.

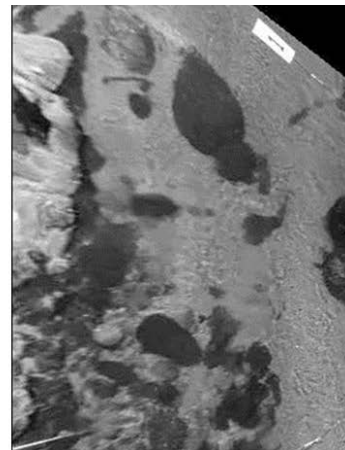


Figura 6. Ejemplo de rectificación digital de la zona de interés del río San Antonio al primer tramo: A la izquierda imagen original de la zona de interés con los 4 puntos de control, a la derecha la misma imagen rectificada en un plan ortogonal. Para disminuir el costo computacional, en el post-procesamiento, una imagen única es rectificada para poder graficar encima los resultados rectificados.

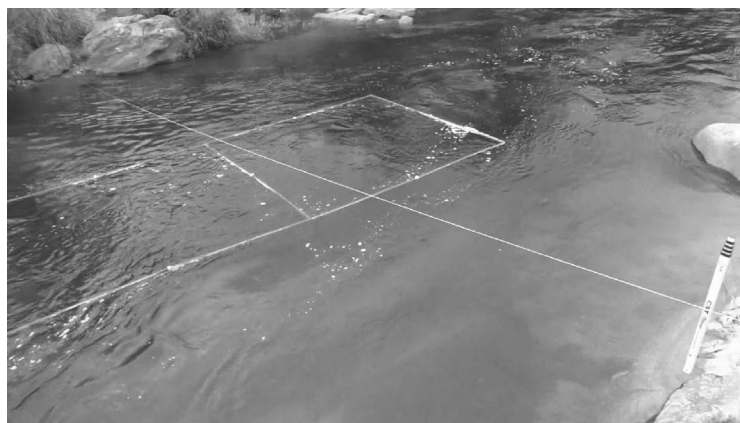


Figura 7. Marco de tamaño de 3m x 6m construido con tuberías de polipropileno bicapa de 0.0127m de diámetro, utilizado para la rectificación digital de imágenes registradas en la sección de medición emplazada en el Río San Antonio, en el ejido urbano de la ciudad de Villa Carlos Paz.

RESULTADOS

La técnica de velocimetría LS PTV presenta una ventaja sobre el resto de las técnicas experimentales utilizadas en este trabajo ya que la implementación de la técnica PTV a gran escala (LS PTV) provee el campo de velocidad superficial media en la región cubierta por el sensor de la cámara. Para obtener

ese campo de velocidad media, los campos instantáneos de velocidades de las partículas son interpolados sobre un grilla común y promediados en el tiempo. La Figura 8 muestra los campos de medios de velocidades de flujo rectificados en los dos tramos estudiados del río San Antonio.

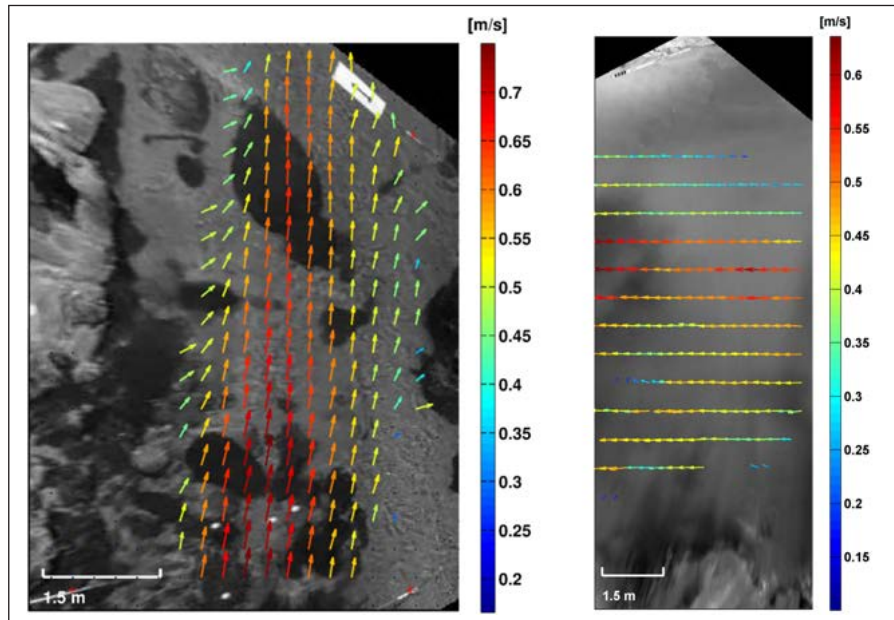


Figura 8. Campos de velocidades medias de flujo interpolados [m/s] y rectificados del río San Antonio en Cuesta Blanca (izquierda) y en el ejido urbano de la ciudad de Villa Carlos Paz (derecha).

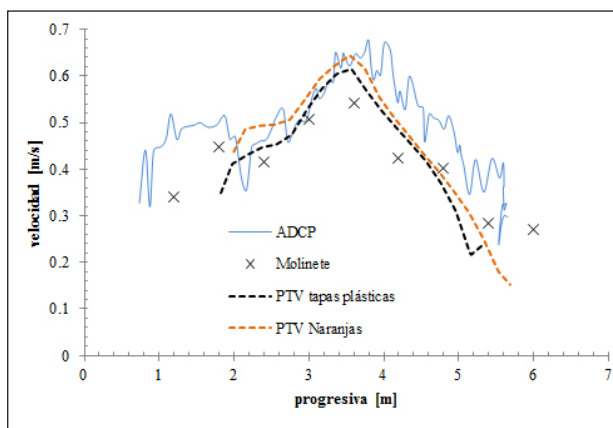


Figura 9. Perfiles transversales de velocidades medias de flujo medidos con molinete y PTV en la sección relevada en el río San Antonio en Cuesta Blanca.

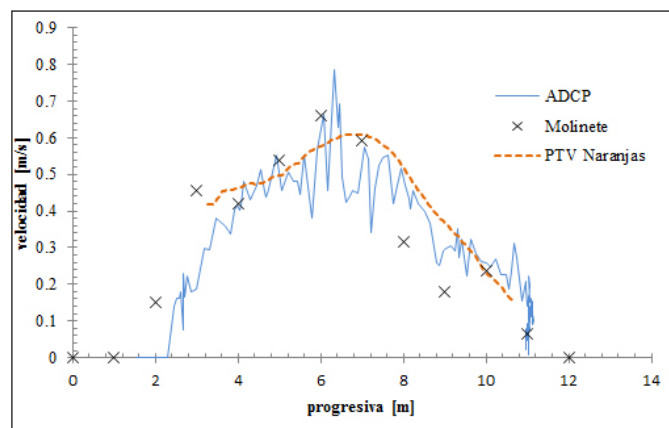


Figura 10. Perfiles transversales de velocidades medias de flujo medidos con molinete y PTV en la sección relevada en el río San Antonio en el ejido urbano de la ciudad de Villa Carlos Paz.

A partir de la información de los campos medios de velocidades de flujo obtenidos con PTV, se extrajeron los valores correspondientes a los perfiles trasversales de velocidades superficiales donde se implementaron las otras técnicas de medición (molinete y ADCP). Las Figuras 9 y 10 muestran los perfiles transversales de velocidad superficial de flujo registrados en las dos secciones del río San Anto-

nio con las distintas técnicas. Los valores de ADCP incluidos en estas Figuras corresponden a valores registrados en las celdas más cercanas a la superficie libre (0.15m desde esta superficie) mientras que las mediciones con molinete corresponden a valores de velocidad superficial (con molinete sumergido) específicamente registrados para este trabajo. Los perfiles relevados muestran una buena correspon-

dencia entre los valores observados. En la Figura 9, se observa un buen acuerdo entre los perfiles de velocidad superficial determinados con LS PTV utilizando diferentes partículas trazadoras (para la sección del río San Antonio en Cuesta Blanca) y las pequeñas diferencias observadas podrían explicarse por los efectos sobre las partículas plásticas de la fricción superficial del viento presente el día de las mediciones en sentido contrario a la dirección del flujo medio.

Finalmente se realiza el contraste de los caudales medios de flujo estimados por las distintas técnicas de medición (Tabla 1). Para ambas secciones relevadas del río San Antonio, se adopta como valor de referencia al caudal medido con ADCP. La incertidumbre asociada a la determinación de caudal con ADCP depende de configuración de registro adoptado, del ruido electrónico y el ruido ambiental presente durante las mediciones (Tarrab et al, 2012). Durante la medición reportada en este resumen, el caudal medido por el ADCP en el primer tramo fue $0.94 \pm 0.12 \text{ m}^3/\text{s}$. El caudal estimado a partir de las mediciones con molinete ($0.97 \text{ m}^3/\text{s}$) presenta una diferencia de (-3%) relativa al ADCP siendo estadísticamente similares. De la misma forma, en el segundo tramo el caudal medido con ADCP fue $3.03 \pm 0.38 \text{ m}^3/\text{s}$ para la sección relevada en el segundo tramo y presenta una diferencia de (-7%) con el valor estimado a partir de las mediciones con molinete.

La estimación de caudales a partir de los campos superficiales de velocidad del flujo determinados con LS PTV a gran escala de manera no intrusiva requiere definir la relación α entre los valores medios de velocidad media de flujo en la columna de agua y los valores de velocidades superficiales. Esta relación depende de la geometría del fondo, de la rugosidad, de las corrientes secundarias y del efecto del viento. (Cheng et al. 2004) realizaron una estimación de este coeficiente utilizando ADCP para las mediciones de velocidad de flujo en la columna de agua y velocimetría por radar para evaluar las velocidades de flujo superficiales. Estos autores sugieren que es factible usar las velocidades superficiales como índice para determinar caudales de flujo ya que el valor de α cae siempre en el mismo rango del valor teórico ($\alpha \approx 0.85$) calculado empíricamente (Plant et al. 2005).

En la Tabla 1 se muestran los valores de los caudales medidos con las diferentes técnicas presentadas en este trabajo y para cada uno de los casos visto. Los caudales evaluados con LS PTV han sido calculados integrando el producto de las velocidades superficiales ajustadas con el factor α y por el área de escurrimiento obtenida durante las mediciones con el molinete. Con el factor teórico $\alpha = 0.85$, el error relativo entre los caudales medidos con ADCP y con LS PTV es de 12% y 13% respectivamente para las secciones relevadas y 14% y 20% respectivamente con el molinete. Usando el factor $\alpha = 1$ los errores

relativos entre los caudales medidos con los dos instrumentos (ADCP y molinete) y con LS PTV son significativamente menores: 3% y 2% (relativo a ADCP) respectivamente y 0% y 6% (relativo a molinete) respectivamente.

Tabla 1: Resumen de los caudales medidos para los casos diferentes.

Sección de estudio	Q_{ADCP} [m^3/s]	$Q_{molinete}$ [m^3/s]	$Q_{PTV(naranjas)}$ [m^3/s]		$Q_{PTV(tapas)}$ [m^3/s]	
San Antonio (Cuesta Blanca)	0.94	0.97	$\alpha=0.85$	0.83	$\alpha=0.85$	0.80
			$\alpha=1$	0.97	$\alpha=1$	0.93
San Antonio (Carlos Paz)	3.03	3.27	$\alpha=0.85$	2.63	-	-
			$\alpha=1$	3.09	-	-

A continuación se sintetizan algunas de las principales fuentes de errores detectadas en la implementación de la técnica de LS PTV en gran escala para estimar caudales de aguas superficiales en cursos fluviales:

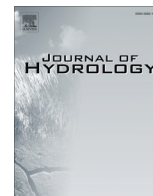
- Factores ambientales: En la implementación de LS PTV a gran escala estas fuentes de errores son relevantes. El tipo de iluminación (la reflexión de la luz del Sol sobre la superficie del agua puede perturbar los algoritmos de detección de partículas) y el viento (influye directamente la velocidad de las partículas) son dos de los fenómenos físicos del medio ambiente que influyen en forma más notoria en las mediciones.
- La siembra de las partículas: como se muestra en la Figura 8, no se pudo caracterizar las velocidades a las orillas de los ríos ya que las partículas sembradas agua arriba del tramo de medición tienden a entrar en las zonas de mayores velocidades y salir de las zonas de estancamiento o menores velocidades.
- Técnica de procesamiento de las coordenadas de las partículas detectadas y extracción de la velocidad del flujo en tiempo y espacio.
- El post-procesamiento que consiste a rectificar los resultados a una vista ortogonal y calibrarlos para transformar las velocidades en [pixel/intervalo de imagen] a [m/s]: La cualidad de la rectificación depende esencialmente del método (marco flotante o puntos fijos) y del usuario que determina las distancias entre los puntos de control en la realidad y luego sobre las imágenes.
- El valor del factor α que depende de cada sección medida. El valor del coeficiente que relaciona la velocidad superficial y la velocidad media es función de la geometría de la sección, de la pendiente del tramo, de la rugosidad del fondo, de la configuración aguas arriba y aguas abajo del tramo. El valor adoptado por defecto es pero según los resultados, el valor real del factor para ambos tramos es mayor (entre 0.96 y 0.98 respectivamente).

CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta una evaluación experimental de una técnica de cuantificación de caudales de aguas superficiales en dos tramos de un río serrano de la provincia de Córdoba. La técnica evaluada consiste en la implementación a gran escala de la técnica de velocimetría por seguimiento de partículas (LS PTV por sus siglas en inglés). Si bien las condiciones analizadas en este trabajo corresponden a periodos de aguas bajas y medias, esta técnica puede ser aplicada eficientemente en periodos de crecidas con un bajo costo. La técnica no intrusiva LS PTV constituye una alternativa satisfactoria (con costos relativos significativamente menores) para la determinación experimental de caudales escurridos superficialmente en los ríos con características físicas y geométricas similares, a condición de conocer la batimetría de la sección aforada. En este trabajo se sintetizaron algunas de las principales fuentes de errores detectadas en la implementación de la técnica de LS PTV en gran escala para estimar caudales de aguas superficiales en cursos fluviales en ríos serranos. Estudios relacionados específicamente a cada uno de estos errores representan un área de vacancia. Estudios posteriores además incluyen relevamientos experimentales en cursos fluviales con similares características para realizar una estimación más precisa de la relación α entre los valores medios de velocidad media de flujo en la columna de agua y los valores de velocidades superficiales para ríos serranos de la provincia de Córdoba.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brevis, W., Niño, Y. & Jirka, G.H., 2011. Integrating cross-correlation and relaxation algorithms for particle tracking velocimetry. *Experiments in Fluids*, pp.135–147.
- Cheng, R. T., Gartner, J. W., Mason, R. R., Costa, J. E., Plant, W. J., Spicer, K. R., Haeni, F. P., Melcher, N. B., Keller, W. C., and Hayes, K. (2004). Evaluating a Radar-Based , Non Contact Streamflow Measurement System in the San Joaquin River at Vernalis , California. Menlo Park, California, 24.
- Patalano, A., Brevis, W., García, C.M., et al., 2013. PTVlab, una herramienta grafica para el procesamiento digital en Velocimetría por Seguimiento de Partículas. Tercer Simposio de Metodos Experimentales en Hidraulica. Santa Fe, Argentina.
- Patalano, A., Brevis, W., Guillén, N.F., et al., 2013. Rectificación digital para mediciones de velocidad de flujo a gran escala utilizando Velocimetría por imágenes de partículas. Tercer Simposio de Metodos Experimentales en Hidraulica. Santa Fe, Argentina.
- Plant, W.J. et al., 2005. Streamflow Properties from Time Series of Surface Velocity and Stage. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(8), pp.657–664.
- Tarrab, L. et al., 2012. Role of turbulence fluctuations on uncertainties of acoustic Doppler current profiler discharge measurements. *Water Resources Research*, 48(6), p.W06507



Research papers

Crowdsourced data for flood hydrology: Feedback from recent citizen science projects in Argentina, France and New Zealand



Jérôme Le Coz^{a,c,*}, Antoine Patalano^b, Daniel Collins^c, Nicolás Federico Guillén^b, Carlos Marcelo García^b, Graeme M. Smart^c, Jochen Bind^c, Antoine Chiaverini^{c,a}, Raphaël Le Boursicaud^a, Guillaume Dramais^a, Isabelle Braud^a

^a Irstea, UR HHLY, Hydrology-Hydraulics, 5 rue de la Doua, BP 32108, 69616 Villeurbanne Cedex, France

^b Institute for Advanced Studies for Engineering and Technology (IDIT CONICET/UNC) and CETA – FCFyN – Universidad Nacional de Córdoba, Av. Velez Sarsfield 1611, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina

^c NIWA, Applied Hydrology, Hydrodynamics, 10 Kyle Street, Riccarton, Christchurch, New Zealand

ARTICLE INFO

Article history:

Received 1 June 2016

Received in revised form 19 July 2016

Accepted 21 July 2016

Available online 26 July 2016

This manuscript was handled by G. Syme, Editor-in-Chief

Keywords:

Crowdsourced data

Citizen science

Flood hydrology

Flood mapping

LSPIV

ABSTRACT

New communication and digital image technologies have enabled the public to produce large quantities of flood observations and share them through social media. In addition to flood incident reports, valuable hydraulic data such as the extent and depths of inundated areas and flow rate estimates can be computed using messages, photos and videos produced by citizens. Such crowdsourced data help improve the understanding and modelling of flood hazard. Since little feedback on similar initiatives is available, we introduce three recent citizen science projects which have been launched independently by research organisations to quantitatively document flood flows in catchments and urban areas of Argentina, France, and New Zealand. Key drivers for success appear to be: a clear and simple procedure, suitable tools for data collecting and processing, an efficient communication plan, the support of local stakeholders, and the public awareness of natural hazards.

© 2016 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

New communication and digital image technologies have enabled the public to produce and share large quantities of flood observations. Such observations are often authored, time-stamped, georeferenced and eventually shared through social media (Fohringer et al., 2015). Social media actually convey flood information of diverse nature including flood hazard and damage reports, but also rational discussion (understanding), public debate, appeal and remark to the government and local authorities, and emotional messages and expression of feelings (Al-Saggaf and Simmons, 2015).

As for other fields, initiatives for crowdsourcing flood data have emerged in the recent years, with a main focus on rapid, near real-time mapping of the reports of flood damages and emergencies, generally to support disaster management (Fohringer et al., 2015; Koswatte et al., 2015). Efficient tools for collecting, filtering, reviewing and analysing massive amounts of data in social media

have to be developed. Typically, Fohringer et al. (2015) implemented the PostDistiller tool for the data mining of Twitter posts and applied it to map the inundation extent and depths of the June 2013 flood in Dresden, Germany. As done for other types of volunteered geographical information, interactive maps have also been developed for crowdsourcing flood data and reports, for instance:

- PetaJakarta,¹ an open source flood map of Jakarta, Indonesia, to share real-time flood information using social media (Twitter);
- The QLD Flood Crisis Map, an interactive map based on the open-source Ushahidi² platform and operated by Australian Broadcasting Corporation (ABC) to allow citizens report information during the 2011 Queensland floods (Koswatte et al., 2015);
- Flooding Points,³ a collaborative flood map for São Paulo, Brazil, also based on the open-source Ushahidi platform and the concept and prototype elaborated by Hirata et al. (2015).

* Corresponding author at: Irstea, UR HHLY, Hydrology-Hydraulics, 5 rue de la Doua, BP 32108, 69616 Villeurbanne Cedex, France.

E-mail address: jerome.lecoz@irstea.fr (J. Le Coz).

¹ <https://www.petajakarta.org/banjir/en/>.

² <https://www.ushahidi.com/>.

³ <http://g1.globo.com/sao-paulo/mapa-do-alagamento/platb>.

Another way to enhance flood data crowdsourcing is through dedicated mobile phone applications such as, for instance:

- Flood Patrol (Philippines), an Android mobile phone application developed for allowing people send flood reports to NOAA⁴ (Nationwide Operational Assessment of Hazards) for mapping;
- SIGNALERT⁵ (France), a smartphone application to report various situations of natural hazards including floods;
- mPING⁶ (Meteorological Phenomena Identification Near the Ground, NOAA, USA), a free mobile phone application used to collect public weather reports, including flooding across the USA as contributions to the Flood Observations – Citizens As Scientists using Technology Project (FLOCAST⁷) launched in 2013.

Most of these projects and the related research focussed on volunteered geographic information, usually flood damages rather than quantitative hydraulic data. Despite of quality and credibility issues related to crowdsourced data, their filtering and mapping allows for unprecedented spatio-temporal analyses of the flood hazard and flood damages. Combining crowdsourced data and authoritative data, Schnebele et al. (2014) were able to assess the spatio-temporal dynamics of the damages to the transportation infrastructure in New York City flooded by Hurricane Sandy (29–30 October 2012). Using telephonic reports of flood incidents in Rotterdam from 2004 to 2011, Gaitan et al. (2015) analysed the spatial distribution of flood damages and their (lack of) relation with the subcatchments and flow paths derived from a DEM of the urban area.

Quantitative hydraulic data such as the extent and depths of inundated areas (Fohringer et al., 2015) or flow rate estimates (Fujita et al., 2013; Le Boursicaud et al., 2016) can be computed using messages, photos and videos from eyewitnesses and help improve the understanding and modelling of flood hazard. This way, ordinary citizens or some enthusiastic flood chasers can contribute to hydrological science in the same way the so-called storm chasers have historically contributed to meteorological science since the Tornado Intercept Project (1975) of the National Severe Storm Laboratory (USA).

Projects encouraging the public to act as citizen scientists in flood hydrology still appear to be scarce. The main well-established initiative of that kind is the CrowdHydrology⁸ project (Lowry and Fienen, 2013), which encourage citizens to read and text the station number and the water level to the phone number listed on the gauge of gauging stations in the USA. The water level is then added to a publicly available database. To our best knowledge, besides the CrowdHydrology project there is no available feedback on such specific projects, and more generally there is a lack of feedback and guidance on the failure and success factors of data crowdsourcing and citizen science projects for flood hydrology.

We introduce three recent citizen science initiatives which have been launched independently by research organisations to document floods in some catchments and urban areas of Argentina, France and New Zealand. These projects were specifically designed to derive quantitative hydraulic data from digital photos and videos from the public for further retrospective analysis and modelling of the flood processes. While the three projects differ in their objectives, methods and hydrological situations, they provide convergent feedback on the potential and limitations of such initiatives for flood hydrology.

2. The three projects

2.1. Flood Chasers (Argentina)

2.1.1. Objectives

The mountainous rivers of the Córdoba province, Argentina, are characterised by the occurrence of flash floods with very high volumes of fast flows during the rainy season (October to April). Due to the sudden nature of flash floods, it is very unlikely to be able to survey several river sections of interest using instruments and techniques suitable for recording the peak flow and its temporal evolution during the flood. Even when it is possible to visit the study sites in time, flow velocities and floating river debris endanger both the instruments and operators. Considering this issue, the researchers of the National University of Córdoba have developed and implemented the Flood Chasers Project (“Cazadores de crecidas” in Spanish, Patalano et al., 2015) to populate a database of videos and photos of flash floods in rivers of the province of Córdoba recorded and shared by citizens using advanced digital technology (cell phones, digital cameras, tablets, etc.) on the basis of the willingness of people filming these extreme hydrological events to share their footage in social networks, websites, forums, etc.

Flood videos recorded by citizens are then processed to estimate river flow velocity and discharge using image velocimetry techniques such as Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV, Patalano et al., 2014). The implementation of LSPIV using non-professional videos appears as a valuable alternative or supplemental technique to traditional post-flood discharge estimation methods such as the slope-area method, and proves great potential in the Córdoba province, Argentina (Patalano et al., 2015). During the last rainy season (2014–2015), extreme hydrological events occurred in the Córdoba province and in some cases the data obtained with such technique are the only available information to characterise the observed hydrological events.

2.1.2. Implementation

The first step of the Flood Chasers Project was to create a website with domain of the University, then perform an intensive dissemination of the existence of this webpage in major newspapers and some television channels. On the Project website (Fig. 1) people can upload their flood videos along with metadata (recording date and time, location of the river section, etc.). In case the recording conditions are favourable, the videos are manually screened, analysed and processed using the Large Scale Particle Image Velocimetry technique (LSPIV, Fujita et al., 1998). This technique allows quantifying the surface velocity field of the rivers remotely. The website provides guidelines for users without prior knowledge of hydraulics about the best way to make contributions that are useful for quantifying flood discharges. Users who are interested in participating in the Flood Chasers Project can send or upload their videos using different platforms (i.e. Dropbox, Mega and WeTransfer) following basic tutorials generated by the scientists. There is also a webpage listing all the recorded floods and including the flow results if the video has been suitable for analysis. In turn, there is a YouTube channel called “Cazadores de Crecidas” in which the Project leaders upload their own collection of videos, which are also published on the website.

The images are analysed following the methodology described by Patalano and García (2016) that uses state-of-the-art tools (i.e. that apply classical PIV/PTV analysis) and brings them to Large Scale surface flow characterisation, using the first operational version of the RIVER (Rectification of Image Velocity Results) software. RIVER has been developed in the Center for Water Research and Technology (CETA) at the National University of Córdoba, Argen-

⁴ <http://noah.dost.gov.ph/>.

⁵ <http://www.signalert.eu/>.

⁶ <http://www.nssl.noaa.gov/projects/ping/>.

⁷ <http://flash.ou.edu/flocast/>.

⁸ <http://crowdhydrology.geology.buffalo.edu/>.



Fig. 1. Home page of the website of the Flood Chasers Project (<http://www.cazadoresdecrecidas.unc.edu.ar/>).

tina, since 2013. It has been developed in order to provide an efficient experimental Large Scale water surface characterisation (e.g. flow velocities, streamlines) and flow discharge estimation in rivers and artificial channels (e.g. irrigation, treatment plant, etc.).

Image sequences of recorded videos are processed as follows: after converting the color images extracted from the videos to grayscale images, they are processed using Matlab tool PIVlab (Thielicke and Stamhuis, 2014) for calculating the displacement vector field from each pair of images. Each of these instantaneous velocity fields is processed and the average displacement field in pixels per image pair is calculated. The results are exported to the RIVeR (Rectification of Image Velocity Results) toolbox, which transform the displacement data into velocity data in [m/s] by rectifying the results for perspective due to the oblique capture of the videos with respect to the flow surface. The rectification is made using distances between fixed points (ground reference points) observed in the images that were surveyed in situ after the flood event. Combining the surface velocity profile in the area of interest with the bathymetry profile subsequently surveyed and a relationship between depth-average and surface velocity, the flood discharge at the time of the video in a defined river cross-section can be estimated.

The relationship of the Flood Chasers Project leaders with government authorities is more than optimal. The minister of water, environment and energy of the Córdoba province is a professor at Universidad Nacional de Córdoba (at leave) who is interested in the implementation of the technique. The results obtained in the project have been used by the government to hydrologically evaluate some of the recorded events. Due to this interest the project has received support from the government including logistics for conducting the required surveys (topography survey, fieldwork, etc.).

2.1.3. Examples of results

The methodology was applied to a video recorded by the witness of a flash flood that occurred in the Ceballos River in the city of Río Ceballos (31°10'S; 64°19'W), Province of Córdoba, Argentina,

after an extreme rainfall event occurred on the morning of 15th February 2015. The return period of the rainfall event was estimated to be more than 100 years with observed rainfall depth of about 250 mm during 12 h. The witness uploaded the video to the project website (Fig. 1) with the sufficient metadata so the scientists could reach the place where the video was recorded. Subsequently, the scientists went to the place and surveyed the river cross-section bathymetry using a topographic total station. The camera movement during the record due to the videographer holding the camera by hand without a tripod was preliminarily corrected. Such movement created significant errors in the processing of the images (Fig. 2a). Then, the surface velocity profile was computed (Fig. 2b) and ortho-rectified.

The computed surface velocity data in the area of interest were used for the calibration of the hydraulic numerical model (HEC-RAS) implemented to simulate the flow conditions of the analysed event. The Digital Terrain Model of the whole reach of interest required to implement the hydraulic model was provided by the government of the Córdoba Province. Based on the surface velocity field and the water level data at the measured section, the bed and banks roughness could be estimated iteratively and the flow discharge computed. By the time that the video was recorded, the total discharge estimated using the calibrated model was 225 m³/s (Fig. 3), which was not the peak discharge. The maximum water level (not observed in the video) was measured in situ using a post-event survey of the high water marks. Using the calibrated model, the peak discharge of the event was estimated to be 290 m³/s. The flooded area predicted using the calibrated flood model of the Ceballos River can be seen in Fig. 4.

The main problem faced in the Flood Chasers Project in Argentina is that many of the videos are not suitable for processing because they do not meet the required conditions: most people record videos with continuous movements of the camera and zooming, and in many cases it is not possible to detect the ground reference points necessary for image ortho-rectification. For the next rainy season, the scientists are looking for training groups of people who can be great partners. For example the civil defence

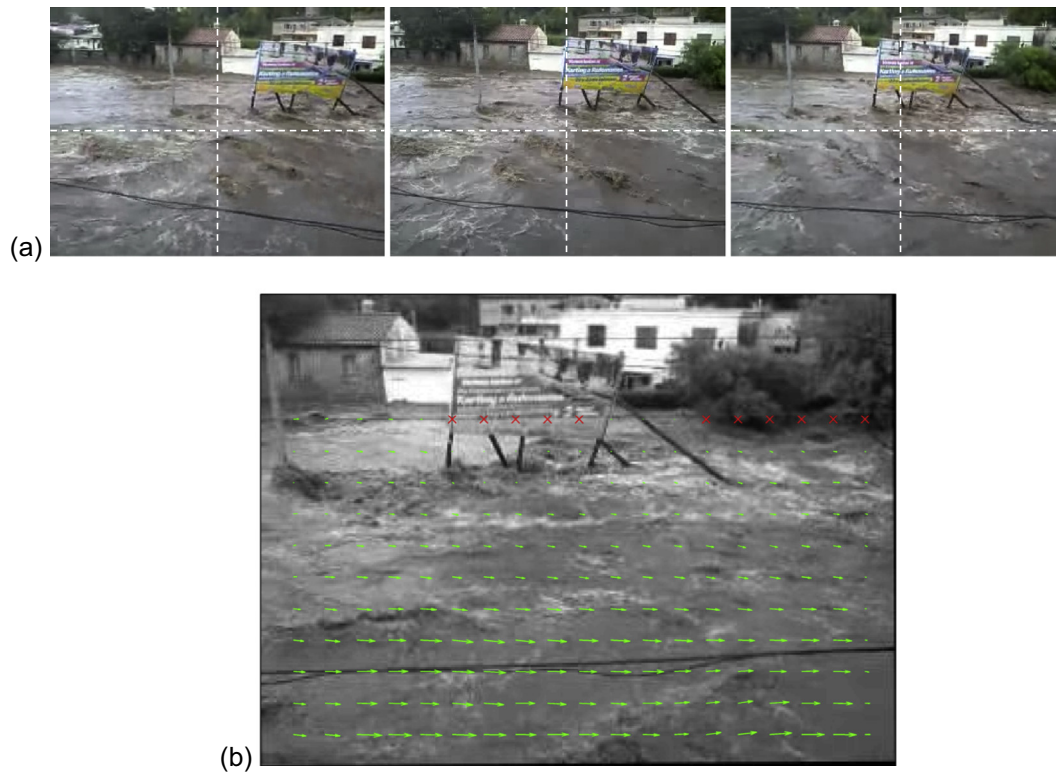


Fig. 2. Successive frames (a) of a video recorded during the flood in the Ceballos River in Río Ceballos, Province of Córdoba, Argentina, on 15 February 2015, and time-averaged surface displacement vector field (green vectors) in the area of interest (b). Red crosses show discarded grid nodes where the flow free surface is not visible. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

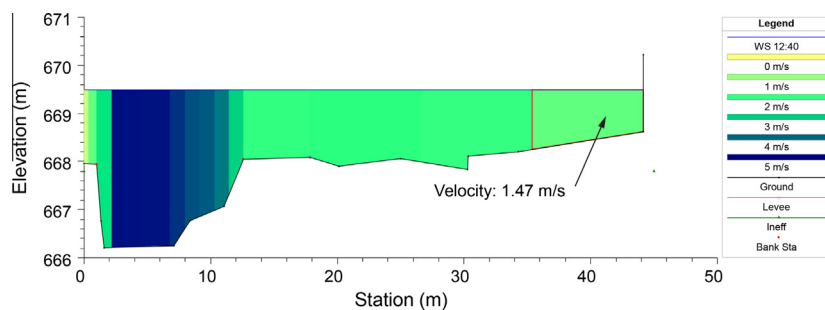


Fig. 3. Bathymetry of the cross-section of interest and depth-averaged velocity field estimated using a 1D hydrodynamic model (HEC-RAS). The velocity (1.47 m/s) on the right side is the velocity obtained by LSPIV and used for the model roughness calibration.

workers (i.e. firefighters) will be contacted for training since they are usually the first to arrive to the rivers when flash floods occur. Advanced students (16–17 years old) from high schools that are located near rivers will also be trained. The youth of that age usually use cell phones which now have the minimum resolution required to implement the image velocimetry technique. A strong message of safety is also transmitted to all trained people because it is very important to avoid any life in danger and be sure there is no risk in recording a video.

2.2. FloodScale (France)

2.2.1. Objectives and background

As part of the ANR⁹ FloodScale project (France) on Mediterranean flash floods (Braud et al., 2014), a similar action was independently launched throughout the Ardèche river catchment, South-East

France. The FloodScale project, a contribution to the HyMeX¹⁰ project (Hydrological cycle in the Mediterranean Experiment, Drobinski et al., 2014) was designed to make progress in the understanding and modelling of flash floods. The observation strategy combined a four year multi-scale data collection in two meso-scale catchments in South-East France with opportunistic measurements during the autumn season, when flash floods are more likely to occur. To decrease the uncertainty of stage-discharge ratings and streamflow records, innovative methods for gauging rivers during flash floods were implemented, including portable surface velocity radars (Welber et al., 2016) and Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) at permanent video camera stations (Le Coz et al., 2010) or using home movies from the public in post-flood surveys (Le Boursicaud et al., 2016).

Specific communication actions focussed on the determination of flood discharges within the Ardèche river catchment (France)

⁹ Agence Nationale pour la Recherche (National Agency for Research, France).

¹⁰ www.hymex.org.



Fig. 4. Flooded area estimated using the HEC-RAS flood model calibrated with the LSPIV velocity measurement and the water level data in the section of interest (marked Cs). The peak discharge was estimated to be $290 \text{ m}^3/\text{s}$.

using home movies shared by observers and volunteers. Safety instructions and a simplified field procedure (see flyer and poster in Fig. 5) were shared through local media and were made available in French and English on the project website.¹¹ Legal aspects including a copyright transfer form have been settled with the help of Irstea's (National Research Institute of Science and Technology for Environment and Agriculture) legal services. This way, simple flood observers or even some enthusiastic flood chasers were encouraged to contribute to hydrologic sciences.

2.2.2. Implementation

The processing of flood videos to extract surface flow velocities and discharges is based on the LSPIV technique originally proposed by Fujita et al. (1998). The cross-correlation analysis of visible movements in image pairs is similar to the conventional PIV technique used in hydraulic laboratory studies, but large-scale outdoor applications require suitable image ortho-rectification and discharge computation steps. The applicability of the LSPIV technique to flood home movies was investigated by Le Boursicaud et al. (2016), as already done by Fujita et al. (2013) using the STIV (Space-Time Image Velocimetry) technique, and is also the core of the Flood Chasers Project (Argentina). LSPIV steps are similar to the technique used in the Flood Chasers project, except that

ortho-rectification was applied to every image pair before velocity computation.

Flood videos recorded by witnesses usually do not match the requirements of the traditional LSPIV technique. Using such videos raises several issues (Le Boursicaud et al., 2015, 2016) that must be solved for the video to be successfully processed:

- Fixed points that can be located in the images and in the real world are needed to calibrate the orthorectification;
- Both river banks should be visible in the image so that a complete cross-section is monitored;
- The video should be recorded from a fixed point of view: a shake with limited amplitude was found to be acceptable;
- The precise location and timing of the video are necessary;
- Authors of the videos must be contacted in order to get their personal agreement for the use of their video materials and additional information.

Using flood home movies therefore requires some image pre-processing to be applied before the LSPIV analysis, such as:

- Correction of hand-held camera movement: image alignment;
- Correction of distortion due to non rectilinear camera lenses;
- Relative positioning of the free-surface.

The project followed a fully reproducible approach, based on free software only. LSPIV analysis was conducted using Fudaa-LSPIV (Le Coz et al., 2014a), a free, user-friendly software available online.¹² Frames were sampled from the video at an adequate time rate using ffmpeg,¹³ and image pre-processing was conducted using Hugin.¹⁴ The complete procedure to collect and pre-process home movies for further LSPIV analysis comes as a short methodological guide (Le Boursicaud et al., 2015).

Simple procedures for taking useful flood videos, highlighting safety warning (Fig. 5) have been disseminated to the public through various media including the project website¹⁵ and local media (newspapers, radio). Communication campaign was well received by locals and municipalities, but jeopardised by local issues (update of official flood risk mapping) and lack of coordination with and support from local authorities (civil defence and prefecture). The main expressed concerns were that the call would encourage the public to record videos from unsafe locations by the flooded rivers and that it would suggest that further research on flood discharges was required before a flood risk map could be firmly established. After long discussions, the communication campaign had to be postponed. Permissions for distributing flyers and putting posters in places attended by the public were never obtained.

2.2.3. Examples of results

Partly due to communication restrictions, few videos were received by the scientists, even after the series of significant floods which occurred during the 2014 autumn. And none of those were actually usable because they generally did not follow the recommendations. Some of them were not located in the study area. In turn, some useful videos were harvested by scientists after each flood of interest, especially drone videos (Fig. 6) shared on YouTube¹⁶ by a local company¹⁷ specialising in UAV-borne image recording. The footage was also shown by local and national TV channels. Valuable sequences with remarkable stability and clear

¹¹ <https://floodscale.irstea.fr/donnees-en/videos-amateurs-de-rivieres-en-crue/videos-amateurs-de-rivieres-en-crue>.

¹² <https://forge.irstea.fr/projects/fudaa-lspiv/files>.

¹³ <https://www.ffmpeg.org/>.

¹⁴ <http://hugin.sourceforge.net/>.

¹⁵ <https://floodscale.irstea.fr>.

¹⁶ <https://www.youtube.com/watch?v=4lgws8pvFyg>.

¹⁷ <http://www.ardechevideo.com/>.

CALL FOR CONTRIBUTIONS FOR THE STUDY OF FLASH FLOODS


Estimations of water level and discharge of swollen rivers is fundamental for understanding the formation process of flash floods.

Unfortunately the speed and violence of the stream make flow measurements virtually impossible with conventional methods. We have developed image analysis techniques to estimate water levels and discharges from amateur films.


You can contribute to our research filming streams during flash flood events.

Measurements made from your movies will then be used in the Floodscale ANR project, whose goal is to better understand the formation of particularly devastating flash floods, and improve forecasting.

This document tells you how to participate in the measurement of these extreme events.




Example of a picture sampled from a flash flood movie made in June 2013 in Cauterets, South-West France.



SAFETY FIRST

During floods, access to surrounding streams and bridges presents significant risks. Flow conditions may change rapidly in all circumstances. Never go in the bed of the river or on its banks. Observe the safety rules and access prohibitions issued by the competent authorities.

Observing or recording a flood does not justify taking risks



(a)

How to record ?

- Film the river over the entire width of the flow. Make sure that the edges of both sides of the river are clearly visible in the image.
- Any kind of camera can be used, there is no resolution threshold, but avoid deforming lenses effect such as wide angle.
- Filming should be as stable as possible (steady braced position or use of tripod even better).
- In optimal conditions 5 seconds of film are enough.
- Note the exact date and time of the recording, as well as the precise location (name of the river, city, street,...)
- Choose the highest possible point of view (without taking risks!). A view from a bridge is more favorable than a view from the shore.
- Include fixed and permanent reference points that can later be surveyed (e.g. corners of buildings, road signs, windows, bridges, etc...).
- Film a zone where flow is more regular. Avoid wave or riffle patterns, and favor flow above some control like a dam).
- If known, preferably film over a river section that has a stable bottom not subject to erosion.
- Avoid reflections, shadows or sparkling patterns on filmed surface. Heavy rain and snow are not a problem, as long as the lens stays clean. If the movement of the water is visible to the eye on the film, it may be exploitable.

To contribute, please send your videos at:

crues.films@lists.irstea.fr

Along with your movies, please join contact information (name, phone number, and email address). That information will not be shared without your explicit agreement.

Feel free to join any observation as well.

Learn more :

Learn more about the image analysis process:
<http://floodscale.irstea.fr/donnees/videos-amateurs-de-rivieres-en-crue>

ANR FloodScale project (2012-2015): Multi-scale hydro-meteorological observation and modelling for flash floods understanding and simulation
http://floodscale.irstea.fr/front-page-en?set_language=en

Hydro-meteorological observatory of Mediterranean Cévennes-Vivarais
www.ohmcy.fr

HyMeX Project
www.hvmex.org

(b)

Fig. 5. Instructions provided to the public as a flyer (a, b) and a poster (c) for the information campaign of the FloodScale Project (<https://floodscale.irstea.fr/donnees-en/>).

views of the Ardèche river channel upstream and downstream of the submersible Sampzon bridge (44°25'46.4"N; 4°21'25.6"E) were selected (Fig. 6).

Some fixed ground reference points could be identified, especially road signs and marks and elements of the bridge structure.

Their positions were topographically surveyed using a differential GPS and cross-sectional bathymetry profiles were also measured using a hydro-acoustic profiler (ADCP). Then image sequences were extracted, converted in grey scale levels, ortho-rectified, and instantaneous velocity fields were computed. Time-averaged

Etude des rivières en crue...

Vous pouvez nous* aider !



En filmant quelques secondes de l'événement par tout moyen à votre disposition

(Smartphones, tablettes, appareils photo, etc...)

sur la rivière ARDECHE et ses affluents

Objectif

La connaissance des débits et des niveaux d'eau atteints par les rivières en crue est fondamentale pour l'étude des crues éclair.

Afin de récolter un maximum d'informations et d'enrichir nos connaissances sur ces événements, nous avons mis au point des techniques d'analyse d'images permettant de calculer des vitesses et des débits à partir de films amateurs.

Vous pouvez ainsi contribuer à nos travaux de recherche en filmant les cours d'eau en crue.

Ces mesures seront ensuite utilisées dans le cadre du projet de recherche ANR FloodScale dont l'objectif est de mieux comprendre la formation des crues éclair, et d'en améliorer la modélisation.

Méthode

- **Filmez la rivière sur toute sa largeur** : les deux berges de part et d'autre de la rivière doivent être visibles.
- **Englobez dans l'image des repères fixes** (coins de bâtiment, panneaux de signalisation, fenêtres, ponts, etc.).
- **La prise de vue doit être aussi stable que possible** : plans fixes, sans zoom ni mouvement de caméra.
- **Filmez de préférence une zone sans remous ni vagues.**
- **Ne vous mettez pas en danger**, restez à l'écart du cours d'eau et des infrastructures fragiles.
- **Tout type d'enregistreur vidéo est utilisable.**
- **Filmez au minimum 5 secondes par séquence.**
- **Indiquez le lieu, la date et l'heure de l'enregistrement.**

Envoyez-nous vos films par lien de téléchargement* ou de visualisation (YouTube) à : crues@irstea.fr avec vos coordonnées et toute remarque concernant la crue observée

* Sites d'envoi de fichiers volumineux :

www.wetransfer.com www.dl.free.fr www.mega.co.nz

En savoir plus...

Consulter la vidéo exemple et en savoir plus sur l'analyse d'images

<http://floodscale.irstea.fr/donnees/videos-amateurs-de-rivieres-en-crue>



Observatoire Hydro-météorologique Méditerranéen Cévennes-Vivarais
<http://www.ohmcv.fr>

Projet HyMeX
<http://www.hymex.org>

Projet de recherche ANR FloodScale (2012-2015)
<http://www.floodscale.irstea.fr>



⚠ Avertissement sécurité ⚠

Lors des crues, l'accès aux abords des cours d'eau et aux ponts présente des risques importants. Les conditions d'écoulement peuvent varier rapidement en toutes circonstances. Ne vous aventurez jamais dans le lit du cours d'eau ni sur ses berges. Respectez les consignes de sécurité et les interdictions d'accès émises par les autorités compétentes.

Observer ou filmer une crue ne justifie pas de prendre des risques !



* Chercheurs d'établissements publics de recherche

(c)

Fig. 5 (continued)

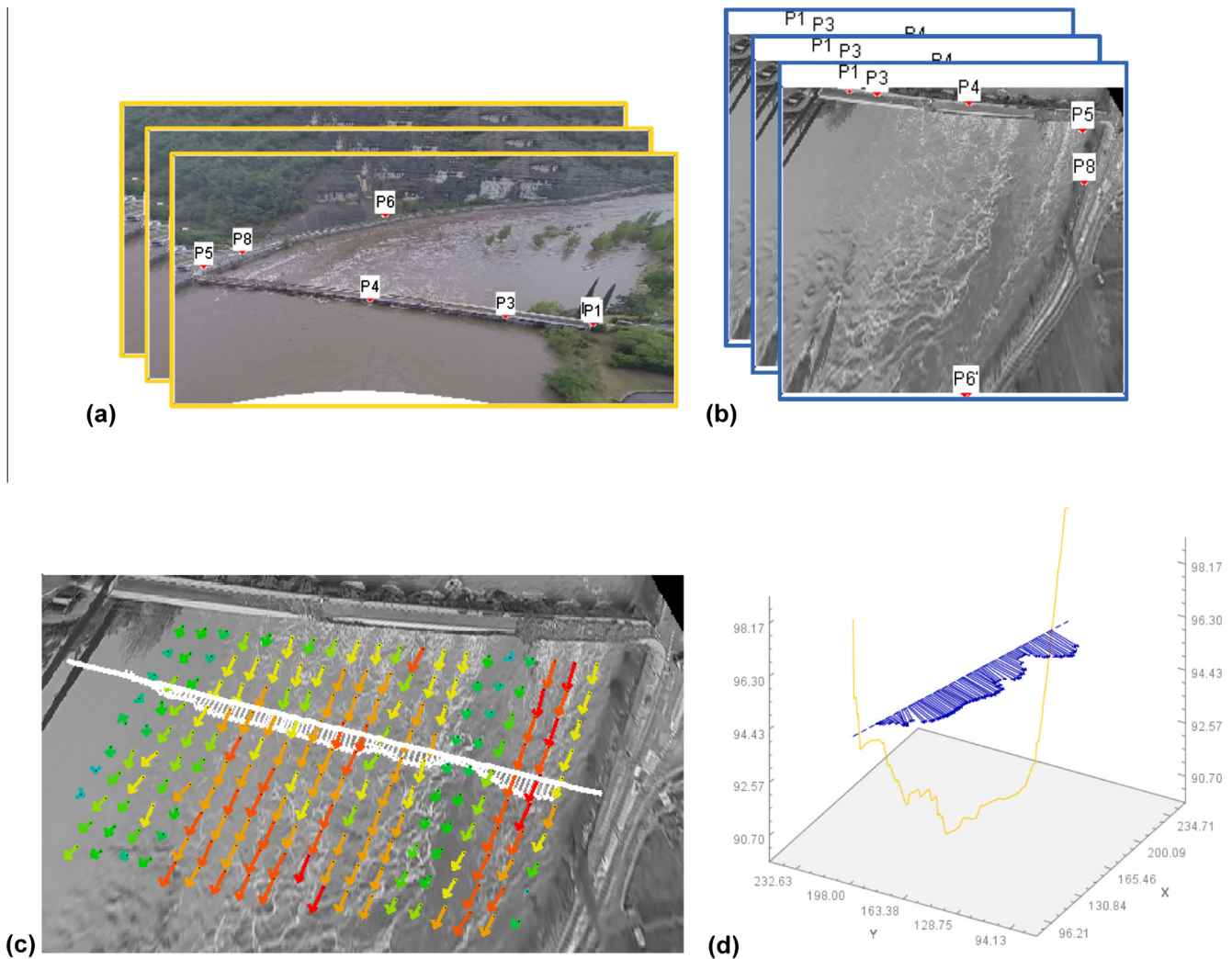


Fig. 6. Applying Fudaa-LSPiV software to a drone video of the Ardèche River at Sampzon Bridge, France, shared on YouTube after 2014 floods: raw image sequence with ground reference points (a), same images converted to grey scales and ortho-rectified (b), time-averaged surface velocity field (up to 4 m/s) and depth-averaged velocities interpolated at the transect used for discharge computation (c), 3-D view of the transect (d).

velocities were interpolated at each node of a transect used for discharge computation. As often, the water level estimation appeared to be the main source of uncertainty (Table 1). However, discharge estimates were found to be consistent with the flow rated at the upstream gauging station when realistic time lags due to flood propagation are considered (between 30 and 60 min). Even with uncertainties possibly as large as 15% or 20% such discharge estimates remain highly valuable to reduce the uncertainties of rating curve extension and post-flood peak discharge assessment.

The main perspectives are to reiterate communication campaigns with the twofold objective of mitigating issues with the local governmental authorities, and increasing the quantities of usable videos spontaneously provided by the public. This would certainly be reached with opportunistic calls to be launched through any media just after a flood in the affected area. Thus the hydrologic watch could focus on a broader region such as the French Mediterranean belt, or even at a larger scale as part of the HyMex project which develops post-flash flood surveys throughout the catchments contributing to the Western Mediterranean Sea.

Engaging with the locals in preparation of future floods at research sites like the Ardèche catchment would remain feasible through poster campaign at key observation points with safe conditions, especially near gauging stations which provide the water level data that are critical for velocity and discharge computations.

Such sites could be pre-surveyed and permanent ground reference points could be marked. A best viewpoint for videos could be marked and suggested on an adjacent poster or sign, for instance. The public could be asked to read the staff gauge like in the CrowdHydrology project and provide the water level along with their videos. Specialised partners such as technical staff from local municipalities, firemen, civil defence, volunteering observers, storm/flood chasers, kayakers, UAV-borne image companies, etc. could be informed and trained.

2.3. RiskScape (New Zealand)

2.3.1. Objectives

The New Zealand national institute NIWA has called citizens to contribute to flood mapping during recent inundation events in the cities of Christchurch (43°31'S; 172°38'E) in 2014 and Dunedin (45°52'S; 170°30'E) in 2015. Residents were invited to send in their pictures of flooded areas, which were further used to build flood hazard maps, as part of the RiskScape¹⁸ project.

The 2010–2011 Canterbury earthquakes changed surface elevations across the region and the city of Christchurch, in the South Island of New Zealand. This led to changes in flood risk, which was highlighted by the 5th March 2014 flood as some suburbs of

¹⁸ www.riskscape.org.nz.

Table 1
Discharge results and comparison with records from upstream gauging station.

Water level (metres above sea level)	LSPIV discharge Q (m ³ /s)	Q difference (%) time lag: 30 min	Q difference (%) time lag: 60 min
94.5	1053	+16	+25
94.0	913	+3.6	+13
93.5	795	–11	+0.6

Christchurch experienced uncharacteristically severe inundation. The flood not only highlighted the altered risk profile, but it also presented a rare opportunity to update flood hazard knowledge of the city. With the widespread availability of camera phones and photos of inundation, this research project sought to employ citizen science to supplement professional measurements of inundation.

2.3.2. Implementation

Two days after the flood peak, members of the public were invited, via press releases to mainstream media, a scientific blog¹⁹ and outreach via social media (Facebook, Twitter), to send photos of maximum flood levels to NIWA, indicating when and where each photo was taken. The photos were assessed by professionals in terms of the ability to identify a clear water level around the time of the peak inundation. Water surface levels were derived from the photos in conjunction with LiDAR scans of the city. In locations where photos did not permit clear identification of water levels, field visits were carried out to make supplemental measurements. The resulting point data were interpolated, along with additional survey data, to derive a RiskScape flood hazard model to calculate flood risk and potential losses across the city. During flooding in the city of Dunedin in 2015, the same request for photographs was made, but the project was discontinued due to a lack of responses.

2.3.3. Examples of results

Over 600 photos were received for the Christchurch study (e.g., Figs. 7 and 8). Not all photos were used or could be used, and for various reasons – the flood level may not have been discernible; the time or location was unknown; or flood data may have been available from other photos or another source. Ultimately, 300 photos were used to get a fix on 289 water levels around the city. Combined with field surveys, the resulting inundation map (Fig. 9) indicates flooding along the Avon and Heathcote Rivers as well as various residential suburbs throughout Christchurch, including the severely impacted Flockton Basin. High media and public interest suggested that, in addition to providing useful data, the public engagement fostered a greater appreciation of flood hydrology and its scientific study.

The resultant information has been invaluable in understanding the changed flood risk for post-earthquake Christchurch. These data were used to validate hydrodynamic models and are being used to plan mitigation, response and evacuation plans and to calculate human and economic costs of flooding. The widespread use of camera phones provided data on flood levels and extent that could not have been obtained by field surveys by hydrology technicians due to insufficient resources to cover the wide extent of relatively short duration flooding.

3. Lessons learnt

3.1. Write a clear and simple procedure

Once the objectives and tools of the project have been defined, a clear and simple procedure has to be written for the attention of

the public. This is a key driver of the success of all citizen science projects. The three projects have produced procedures in the form of simple instructions for recording the images and sending the data in good agreement with their distinct objectives, either flood mapping or flood discharge estimation. The type of images and metadata, the protocols to send them to the scientists and the safety and copyright aspects were dealt with in a concise and precise manner. However, the simple but more demanding requirements on flood videos for LSPIV applications in the Flood Chasers and FloodScale projects proved to be much less followed than those on flood mark photos for the RiskScape project. The rate of photos usable for flood mapping was much higher than the rate of videos usable for discharge estimation. For the capture of valuable videos, a written procedure may not be sufficient and additional training should be provided as tutorials and short videos, e.g. on collaborative websites like WikHydro in France.²⁰ Instructions displayed in situ may also be more efficient.

Crowdsourcing flood hydrology data makes the most of modern digital image technologies and social media. It is advisable to target the kinds of equipment most commonly used by people in the area of interest, smartphones typically but also drones (UAV) increasingly. Drone images show great potential for the LSPIV technique, through excellent viewpoint stability and negligible perspective effects to correct since images are often taken vertically from the sky. Then image ortho-rectification is not absolutely necessary, only estimation of the size of the pixels, which requires much less ground reference points to be surveyed. Aerial photos taken from drones could certainly be used in flood mapping projects as well, in conjunction with high-resolution DEM.

3.2. Develop suitable tools for data collection and processing

From a technical point of view, suitable tools are requested to collect, process the image materials, and assess the quality of results, in order to reach the scientific objectives of the project. It is necessary to develop platforms able to collect large quantities of data coming with contrasted formats and quality levels. Website forms and uploads, as well as smart (apps) or basic (texts) phones, are efficient tools to collect crowdsourced data, as long as the effort required from the user is kept minimal. Developing dedicated smartphone apps could be very efficient for the data collection.

However, it sometimes remains more efficient for scientists to harvest adequate image materials from sharing platforms and social media, and further locate and contact the authors for more information. As exemplified by the three projects described in this paper, both bottom-up and top-down ways of collecting data should be explored.

The processing of the collected data generally requires specific techniques and tools that are not previously available off the shelf. Research groups need to be committed into the development of suitable imagery techniques, hydrologic and hydrodynamic models, GIS applications and flood risk assessment methods. It is important to carefully review the quality of the crowdsourced data, in particular through post-event field investigation and cross-checking of the results with other sources of information, including professional data. Locating precisely the photo/video viewpoints is often easy whereas their precise timing may be not, especially when the authors cannot be contacted. The determination of the water level is a major source of uncertainty in the discharge estimation.

The use of crowdsourced hydrologic data in models and scientific studies also requires suitable techniques that are able to assimilate data coming with contrasted and possibly large uncer-

¹⁹ <http://sciblogs.co.nz/waiology/2014/03/07/calling-for-christchurch-flood-photos/>.

²⁰ <http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/>.



Fig. 7. Photos of the 5th March 2014 inundation in Christchurch, New Zealand, received from the public. (a) Slater Street, Richmond. (b) Francis Avenue, Mairehau. (c) Buxton Terrace flow gauging site, Saint Martins. (d) Intersection of Oxford Terrace and Barbadoes Street.

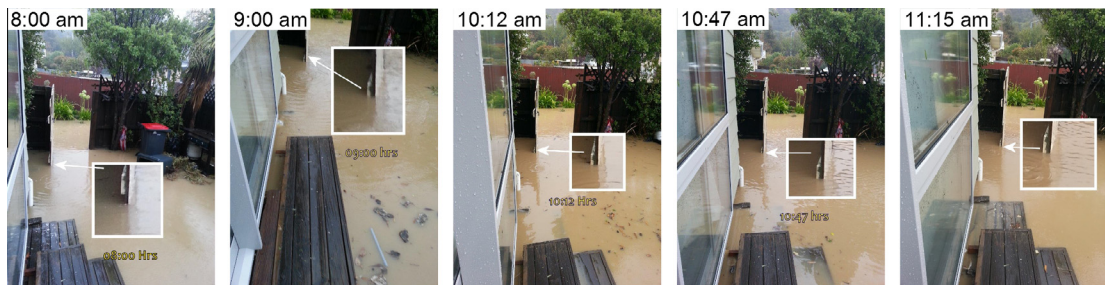


Fig. 8. Sequential photos of the same gate traces the flood hydrograph and can help pinpoint the time of maximum inundation during the 5th March 2014 flood in Christchurch, New Zealand.

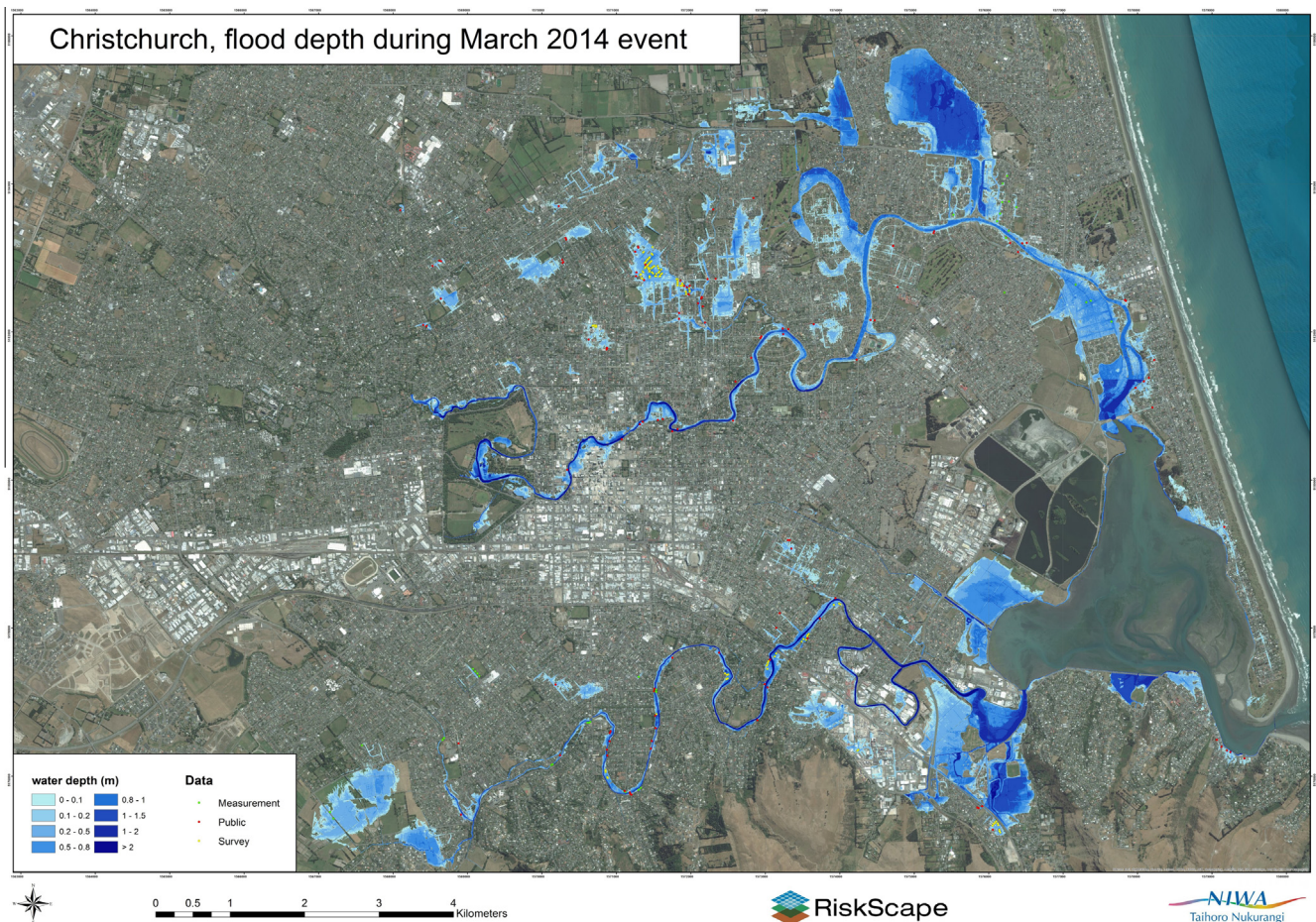


Fig. 9. Interpolated flood depths based on citizen scientist photos and field surveys, for the 5th March 2014 flood in Christchurch, New Zealand.

tainties. This is typically the case of the Bayesian techniques implemented in the FloodScale project for stage-discharge rating curve development (Le Coz et al., 2014b), hydrologic modelling and flood frequency analysis (Renard et al., 2010). The FloodChasers and RiskScape projects illustrate how such data can be successfully included in 1D/2D hydrodynamic models, post-flood surveys and flood risk and damage assessment.

3.3. Implement an efficient communication plan

Communication is key to efficiently mobilise flood observers, make them aware of flood-related dangers (and discourage them from risking their lives), avoid conflicts with local authorities, and provide feedback on the use of collected data. Simple and direct explanations are essential, even when it comes to science or legal terms. Such initiatives are usually well received by the locals and the media. Communication efforts should be directed at both the general public and specific community groups such as kayakers or storm/flood chasers. It is important to communicate with and train groups of more advanced operators (firemen, civil defence, hydrologic services, volunteers, etc.) so they can make better quality videos that fit the requirements of the data processing, in optimal safety conditions.

The reported experience highlights the necessity of adapting the communication vectors to each project. Communicating through radio and TV allows to reach a wide audience. Local newspapers and scientific blogs can probably reach a more specific audience but are efficient to release punctual and periodic reminders of the projects which are useful, especially at the beginning of the project or flood season, during or after flood events, and when results and outputs are available. Distributing flyers and displaying posters and signs at key observation points and at places attended by the public when there is a flood cannot be done extensively throughout a large catchment, but it may dramatically increase the quantity of image materials at particularly strategic sites.

Social media like Twitter and Facebook are essential as they allow to reach a wide audience and to do it at any time, but you first have to communicate to make people 'follow' you. Typically, the Flood Chasers Project received more videos when the minister of Water, Environment and Public Services of the Córdoba Province, Argentina, 're-tweeted' the project on Twitter. Then, people forgot about it until an article was published in a local newspaper. Being constantly active in the whole range of available media is important.

3.4. Get the support of local stakeholders

As consistently illustrated in the polarised French and Argentinian experiences, getting the support of local authorities or not can significantly enhance or jeopardise your citizen science project. The local context and profiles of people in charge are of course important as given factors of the issue, but the communication strategy should account for this issue from the beginning. In the specific context of the FloodScale project, calling for images before rather than during or just after the flood appeared to be the main source of concerns for the administration. Though arguably hypocritical, you will not be blamed for encouraging people to unsafe behaviour if you call for existing images, as usually done by mass media. It also appears advantageous to focus on a recently flood-affected area rather than spending communication efforts over a large region in preparation of future floods. Still, the support of local stakeholders and authorities should be sought actively. There is always a chance that they realise the potential of citizen science initiatives for the success and acceptance of flood risk policies.

3.5. Public awareness and engagement matter

The call is much more successful when the public and the media are prepared and aware of natural hazards, as was the case in Christchurch, New Zealand, after the earthquakes of 2010 and 2011. During this time, both the public and media became more attuned to natural hazard science, and also became more receptive to citizen science-based initiatives such as the earthquake felt reports on GeoNet website.²¹ This was not the case for Dunedin, hence one potential reason for the failure to receive photographs, although there are others (e.g., flooding was not as extensive and occurred during the end of the day).

Provided there is sufficient expert oversight during project design and data analysis, such citizen science seems a viable means of improving our understanding of flood risk. In turn, the reported projects highlight the value of citizen science initiatives as a means of both gathering data and engaging with the community. In some cases, the value of the obtained data is much less than the impact and engagement of the citizen community (Lowry and Fienen, 2013). Feedback to the public is absolutely essential, through any available means: project website, online database, publication of results, follow-ups on scientific blogs^{22,23} and communication through the media.

Social studies could also profit from such crowdsourced feedback from people on how they have been affected by the flood and how they have reacted, as done through calls and interviews in social science projects like in HyMex²⁴ project (Ruin et al., 2008). Not only eyewitnesses of the flood but broader communities, which are not always visible in more formal reporting procedures, may use social media to express their feelings and contribute to the public debate (Al-Saggaf and Simmons, 2015).

4. Conclusions

The reported three projects are typical of emerging citizen science initiatives for crowdsourcing flood hydrology data. These photo-based flood mapping (RiskScape, New Zealand) and video-based flow estimation (Flood Chasers, Argentina, and FloodScale, France) projects were specifically designed to produce georeferenced and time-stamped hydraulic quantities readily usable for flood hydrology studies and hydraulic modelling. Compared to other similar projects, they involved similarly simple procedures for the public, but more advanced data processing and reviewing by the scientists. An exciting perspective would be to combine such 'measurement-oriented' and 'citizen hydrologists' approaches with the powerful tools developed in other projects for data mining the social media contents and conducting the spatial analysis of volunteered geographic information.

The three projects illustrate the great potential of citizen science initiatives for improving flood risk assessment in interaction with the local communities. Key drivers for success appear to be: a clear and simple procedure, suitable tools for data collecting and processing, an efficient communication plan, the support of local stakeholders and authorities, and the public awareness of natural hazards. Beyond the technical and communication challenges, this is an efficient way to enhance the culture of flood risk and make people more engaged collectively. We hope that this feedback may help such initiatives emerge and develop successful strategies.

²¹ <http://www.geonet.org.nz/quakes>.

²² <http://sciblogs.co.nz/waiology/2014/06/16/citizen-scientists-help-map-christchurch-flooding/>.

²³ <http://sciblogs.co.nz/waiology/2014/09/04/full-citizen-science-flood-map-for-christchurch-March-2014/>.

²⁴ www.hymex.org and web form: <http://goo.gl/forms/q80gfQbPNN>.

Acknowledgements

All the citizens who have provided images and data for the three projects are gratefully thanked, as well as the field hydrologists who conducted the supplemental surveys. The Flood Chasers project acknowledges the support of the Government of the Córdoba Province, Argentina, through the PROTRI project. The FloodScale project was funded by the French National Agency for Research (ANR) under Contract No. ANR 2011 BS56 027, which contributes to the HyMeX program. Catherine Ambroise-Rendu and Thierry Fournier (Irstea) contributed to the FloodScale communication campaign. Collaboration between NIWA and Irstea was enhanced by the PHC Dumont D'Urville project 34185SH (2015–2016) and the Irstea grant and NIWA support for the one-year scientific visit of J. Le Coz at NIWA Christchurch (AWATERE Project).

References

- Al-Saggaf, Y., Simmons, P., 2015. Social media in Saudi Arabia: exploring its use during two natural disasters. *Technol. Forecast. Soc. Chang.* 95, 3–15.
- Braud, I., Ayrat, P.-A., Bouvier, C., Branger, F., Delrieu, G., Le Coz, J., Nord, G., Vandervaere, J.-P., Anquetin, S., Adamovic, M., Andrieu, J., Batiot, C., Boudevillain, B., Brunet, P., Carreau, J., Confoland, A., Didon-Lescot, J.-F., Domergue, J.-M., Douvinet, J., Dramais, G., Freydier, R., Gérard, S., Huza, J., Leblais, E., Le Bourgeois, O., Le Boursicaud, R., Marchand, P., Martin, P., Nottale, L., Patris, N., Renard, B., Seidel, J.-L., Taupin, J.-D., Vannier, O., Vincendon, B., Wijbrans, A., 2014. Multi-scale hydrometeorological observation and modelling for flash flood understanding. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18 (9), 3733–3761.
- Drobinski, P., Ducrocq, V., Alpert, P., Anagnostou, E., Béranger, K., Borga, M., Braud, I., Chanzy, A., Davolio, S., Delrieu, G., Estournel, C., Filali Boubrahmi, N., Font, J., Grubisic, V., Gualdi, S., Homar, V., Ivancan-Picek, B., Kottmeier, C., Kotroni, V., Lagouvardos, K., Lionello, P., Llasat, M.C., Ludwig, W., Lutoff, C., Mariotti, A., Richard, E., Romero, R., Rotunno, R., Rousset, O., Ruin, I., Somot, S., Taupier-Letage, I., Tintore, J., Uijlenhoet, R., Wernli, H., 2014. HyMeX, a 10-year multidisciplinary program on the mediterranean water cycle. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 95 (7), 1063–1082.
- Fohringer, J., Dransch, D., Kreibich, H., Schröter, K., 2015. Social media as an information source for rapid flood inundation mapping. *Nat. Hazard. Earth Syst. Sci.* 15, 2725–2738.
- Fujita, I., Muste, M., Kruger, A., 1998. Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications. *J. Hydraul. Res.* 36 (3), 397–414.
- Fujita, I., Kunita, Y., Tsubaki, R., 2013. Image analysis and reconstruction of the 2008 Toga River Flash Flood in an urbanised area. *Aust. J. Water Resour.* 16 (2), 12.
- Gaitan, S., ten Veldhuis, M.-C., van de Giesen, N., 2015. Spatial distribution of flood incidents along urban overland flow-paths. *Water Resour. Manage.* 29, 3387–3399.
- Hirata, E., Giannotti, M.A., Larocca, A.P.C., Quintanilha, J.A., 2015. Flooding and inundation collaborative mapping – use of the Crowdmap/Ushahidi platform in the city of Sao Paulo, Brazil. *J. Flood Risk Manage.* <http://dx.doi.org/10.1111/jfr3.12181> (in press).
- Koswate, S., McDougall, K., Liu, X., 2015. SDI and crowdsourced spatial information management automation for disaster management. *Survey Rev.* 47 (344), 307–315.
- Le Boursicaud, R., Le Coz, J., Dramais, G., 2015. Guide méthodologique – Collecte et préparation de film amateur en vue d'une exploitation par analyse d'image [Methodological Guide – Collection and pre-processing of home movies for operations by image analysis, in French], Technical report, Irstea, 23 p.
- Le Boursicaud, R., Pénard, L., Hauet, A., Thollet, T., Le Coz, J., 2016. Gauging extreme floods on YouTube: application of LSPIV to home movies for the post-event determination of stream discharges. *Hydrol. Process.* 30, 90–105.
- Le Coz, J., Hauet, A., Pierrefeu, G., Dramais, G., Camenen, B., 2010. Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flash-flood discharge measurements in Mediterranean rivers. *J. Hydrol.* 394 (1–2), 42–52.
- Le Coz, J., Jodeau, M., Hauet, A., Marchand, B., Le Boursicaud, R., 2014a. Image-based velocity and discharge measurements in field and laboratory river engineering studies using the free Fudaa-LSPIV software. In: RIVER FLOW 2014 Conference. Lausanne, Switzerland, pp. 1961–1967.
- Le Coz, J., Renard, B., Bonnifait, L., Branger, F., Le Boursicaud, R., 2014b. Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: a Bayesian approach. *J. Hydrol.* 509, 573–587.
- Lowry, C.S., Fienen, M.N., 2013. CrowdHydrology: crowdsourcing hydrologic data and engaging citizen scientists. *Ground Water* 51, 151–156.
- Patalano, A., García, C.M., Guillén, N., García, C., Díaz, E., Rodriguez, A., Ravelo, A., 2014. Evaluación experimental de la técnica de velocimetría por seguimiento de partículas a gran escala para la determinación de caudales en ríos serranos [Experimental evaluation of large scale particle tracking velocimetry technique for flow discharge measurements in mountain rivers, in Spanish]. *Aqua-LAC 6* (1), 17–24.
- Patalano, A., Moreno, L., García, C.M., Guillén, N.F., 2015. Desarrollo e implementación del proyecto “Cazadores de crecidas” en ríos de la provincia de Córdoba [Development and implementation of the Cazadores de crecidas project in rivers of the Córdoba province, in Spanish], IV Simposio sobre métodos experimentales en hidráulica, La Plata, Argentina, 2 p.
- Patalano, A., García, C.M., 2016. RIVeR – Towards affordable, practical and user-friendly toolbox for Large Scale PIV and PTV techniques. IAHR RiverFlow Conference, St. Louis, USA.
- Renard, B., Kavetski, D., Thyer, M., Kuczera, G., Franks, S.W., 2010. Understanding predictive uncertainty in hydrologic modeling: the challenge of identifying input and structural errors. *Water Resour. Res.* 46.
- Ruin, I., Creutin, J.D., Anquetin, S., Lutoff, C., 2008. Human exposure to flash-floods – relation between flood parameters and human vulnerability during a storm of September 2002 in Southern France. *J. Hydrol.* 361, 199–213.
- Schnebele, E., Cervone, G., Waters, N., 2014. Road assessment after flood events using non-authoritative data. *Nat. Hazard Earth Syst. Sci.* 14, 1007–1015.
- Thielicke, W., Stamhuis, E.J., 2014. PIVlab – towards userfriendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB. *J. Open Res. Softw.* 2.
- Welber, M., Le Coz, J., Laronne, J.B., Zolezzi, G., Zamler, D., Dramais, G., Hauet, A., Salvaro, M., 2016. Field assessment of non-contact stream gauging using portable surface velocity radars (SVR). *Water Resour. Res.* 52 (2), 1108–1126.

Use of LSPIV in assessing urban flash flood vulnerability

Nicolás Federico Guillén¹ · Antoine Patalano¹ ·
Carlos Marcelo García¹ · Juan Carlos Bertoni¹

Received: 23 May 2016 / Accepted: 30 January 2017
© Springer Science+Business Media Dordrecht 2017

Abstract The probability of the occurrence of urban flash floods has increased appreciably in recent years. Scientists have published various articles related to the estimation of the vulnerability of people and vehicles in urban areas resulting from flash floods. However, most published works are based on research performed using numerical models and laboratory experiments. This paper presents a novel approach that combines the implementation of image velocimetry technique (large-scale particle image velocimetry—LSPIV) using a flash flood video recorded by the public locally and the estimation of the vulnerability of people and vehicles to high water velocities in urban areas. A numerical one-dimensional hydrodynamic model has also been used in this approach for water velocity characterization. The results presented in this paper correspond to a flash flood resulting on November 29, 2012, in the city of Asunción in Paraguay. During this flash flood, people and vehicles were observed being carried away because of high water velocities. Various sequences of the recorded flash flood video were characterized using LSPIV. The results obtained in this work validate the existing vulnerability criterion based on the effect of the flash flood and resulting high water velocities on people and vehicles.

Keywords LSPIV · Surface water velocity measurement · Urban floods · Experimental techniques

Abbreviations

LSPIV Large-scale particle image velocimetry

✉ Nicolás Federico Guillén
nfguillen@hotmail.com

¹ Institute for Advanced Studies for Engineering and Technology (IDIT CONICET/UNC), CETA-FCEFYN, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 1611, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina

1 Introduction

The probability of the occurrence of urban flash floods has increased appreciably in recent years (World Meteorological Organization, WMO 2009). Scientists and engineers (Wright-Mc Laughlin Engineers 1969; Rooseboom et al. 1986; Federal Emergency Management Agency 1979; Australia Institute of Engineers 1987; Téméz 1992; Nanía 1999; Russo 2009; Engineers Australia 2010; Milanese et al. 2015; Martínez-Gomariz et al. 2016) have published various articles related to specific problems generated by surface runoff during urban floods. These articles described the harmful effects of these floods on urban infrastructure including the negative effects on people and vehicles resulting from high water velocities. Quantifying the risk levels resulting from flash flooding is essential for planning and possible mitigation of these effects.

People safety during a flash flood may be compromised when persons are affected by flows where it is difficult to remain stable and standing, crossing a street, or operating a vehicle. The stability of persons while walking through high water velocities has been studied by various researchers since the late 1960s in order to determine peoples' stability while walking through high water velocities. Although early studies evaluated people's instability based only on the maximum water depth (Wright-Mc Laughlin Engineers 1969; Rooseboom et al. 1986), later and more recent studies showed that in urban areas it is possible to demonstrate that people's stability is a function of water depth (h) and water velocity (v) (Federal Emergency Management Agency 1979; Australia Institute of Engineers 1987; Téméz 1992; Nanía 1999; Russo 2009; Engineers Australia 2010; Milanese et al. 2015; Martínez-Gomariz et al. 2016). The guide developed by the Australia Institute of Engineers (1987) and Engineers Australia (2010) established that in order to prevent people from being carried away on streets and surrounding runoff areas during a flash flood, the relation ($v \cdot h$) should not exceed the value of $0.4 \text{ m}^2/\text{s}$ for children and $0.6 \text{ m}^2/\text{s}$ for adults. Milanese et al. (2015) defined, using a numerical model, three vulnerability regions in an v - h plot shown later in this paper (drowning, toppling, and slipping by children and adults). All the studies referenced above, which analyzed people's instability during floods, do not apply to vehicles and infrastructure.

Thresholds have been established to describe the negative effects of urban floods on vehicles. Xia et al. (2011) developed a formula for predicting the incipient vehicle velocities moved by the flow. The parameters required in that formula were estimated based on experimental data collected in the laboratory using a channel and reduced scale vehicle models (including scale effects).

To evaluate the flood risk in real scale, water velocity data are required. However, these data in urban areas are not commonly available and difficult to collect during flash flood events with high flow variability. Extreme flow conditions during flash floods make the use of intrusive measurement technologies, generally used in natural channels but not typically used to measure overland flow, such as current meters, Acoustic Doppler Velocimeter (ADV), and Acoustic Doppler Current Profilers (ADCPs), difficult because of the high risk in instrument operation and operator safety. In this work, an advanced experimental technique for water velocity measurements during urban floods is implemented. This technique consists of implementing at large-scale particle image velocimetry technique (LSPIV) that is in constant development (Fujita et al. 1998; Creutin et al. 2003; Muste et al. 2005, 2008; Hauet et al. 2009; Fujita et al. 2013; Le Coz et al. 2014; Le Boursicaud et al. 2016; Stumpf et al. 2016). Presently (2016), the LSPIV technique is implemented on digital videos recorded from an unmanned aerial vehicle (UAV) and from fixed digital

cameras. The LSPIV technique allows, from the recorded digital images, the characterization of surface water velocity fields, and through further processing, the calculation of discharge. Implementing LSPIV insures operator safety because the video can be recorded from a safe area (out of the vulnerability region), and the distances required to analyze the images are measured after the flood event. More recent LSPIV applications include measurement of flash floods in mountain rivers (Patalano and García 2006; Le Coz et al. 2016) and flow in and around hydraulic structures (Patalano and García 2006). The technique has been adapted in this work for implementation with home videos, generally filmed by the public during urban flash flood events using various electronic devices (cell phones, digital cameras, and others). Corrections to the videos are needed because these videos are generally shaky because they are recorded with no tripod, and in most cases the cameras are panned on both sides. This paper presents the results of the implementation of LSPIV to a home video of a flash flood recorded on November 29, 2012, in the city of Asunción in Paraguay and the estimation of the vulnerability of people and vehicles based on stability criterion in flash floods proposed by previous work.

2 Materials and methods

The analyzed flash flood event that caused major damages in Asuncion, Paraguay occurred on November 29, 2012. This flash flood was generated by a large storm producing 95 mm of rainfall in 7 h (between 6:40 and 13:40). The maximum observed rainfall intensity during this event was approximately 115 mm/h. The hyetograph of this rainfall event is shown in Fig. 1. The hyetograph shows that the maximum rainfall occurred during the first hour of the event (45 mm).

The annual recurrence of this rainfall event is less than once every 5 years. Therefore, this event is not considered extraordinary. However, urban drainage systems are usually designed in Latin-American countries based on rainfall amounts with annual recurrences between 2 and 10 years (similar to the one described in this project). This recurrence value was estimated using the rainfall intensity, duration, and annual recurrence curve determined for Asuncion city, Paraguay.

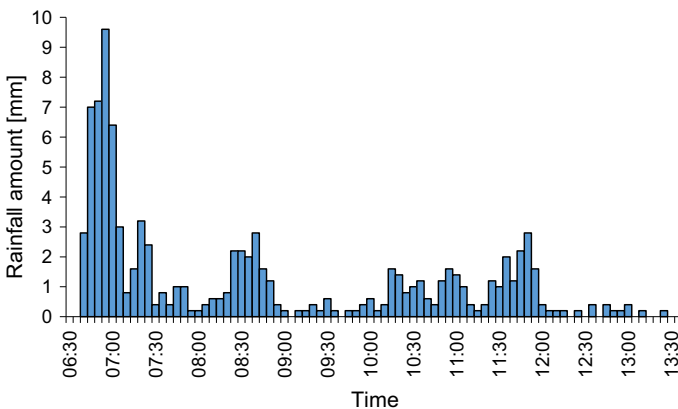


Fig. 1 Hyetograph recorded during the flood event of November 29, 2012 (time interval, $\Delta t = 5$ min)

During the analyzed flash flood event, a digital video was recorded at a 1280 by 720 pixels resolution and 30 frames per second by the public (an image of it is shown in Fig. 2) on Amancio Gonzalez Street 10 m from the intersection of Pirizal Street in Asuncion. During the flood, two vehicles were observed moving because of the water velocities (Fig. 3). Fortunately, no one was killed or injured at this site during the event.

The surface water velocity at the site has been processed using the LSPIV technique following the experimental method described in Patalano and García (2006) and summarized as follows:

- (a) The amateur video was recorded with no tripod. Thus, the video is shaky and the operator is slightly panning the camera on both sides. Once extracted, the images were converted to grayscale and then digitally stabilized before image processing (Patalano and García 2006).
- (b) Images were processed with the MATLAB toolbox PIVLab (Thielicke and Stamhuis 2014), which processes the displacement field (in pixels) within pairs of images. The mean displacement field of the site was then calculated from the instantaneous displacement fields of the entire video.
- (c) Because of the oblique position of the camera, the mean displacement field of the region of interest had to be rectified. Thus, after the event, six distances between four control points (including diagonals) observed in the images have been surveyed 1 week after the flood event in order to orthorectify the displacement and process the real velocity field [m/s] knowing the time steps between the extracted images. This post-processing was completed using the toolbox RIVeR (Patalano and García 2006).

3 Results

The unrectified mean displacement vectors determined implementing LSPIV on images recorded during the event is shown in Fig. 4.

The rectified mean surface water velocity field determined with the RIVeR MATLAB tool was calculated, and the following velocity cross sections were extracted (Fig. 5):



Fig. 2 Image of the digital video recorded by the public on Amancio Gonzalez Street (reference time = 0 s, being the starting time)



Fig. 3 Part of the analyzed video in which cars were carried away (reference time = 240 s)



Fig. 4 Mean unrectified surface water velocity field obtained after implementing LSPIV technique. *Arrows* represent surface water velocity vectors

The flow in the upstream cross section (CS_1) was uniformly distributed across the width of the street (Fig. 5). The maximum velocity in this cross section is about 3 m/s (in the center of the street), and the mean water velocity is about 2.3 m/s. The section CS_2 corresponds to the location of the vehicle that causes a major contraction in the right side of the street. In CS_2 , the maximum velocity is 4.2 m/s and the mean water velocity is about 2.9 m/s. Finally, the downstream cross section (CS_3) corresponds with the location of the maximum water velocities (5.4 m/s), and the mean water velocity is about 3.9 m/s.

In order to quantify water depths in Amancio Gonzales Street, the geometry of the street was surveyed after the flood event (see Fig. 7). The street and the sidewalks (on both sides)

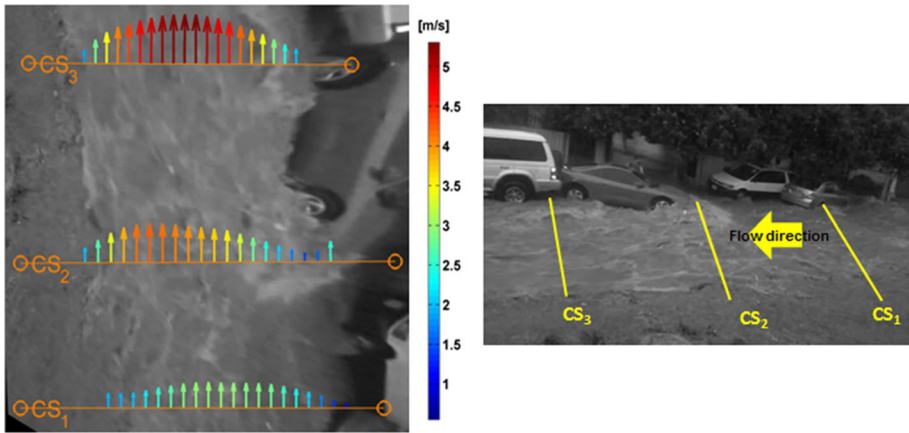


Fig. 5 Surface water velocity cross sections extracted in three different cross sections with its corresponding location in the video



Fig. 6 Water depth estimation in the analyzed zone

are unpaved. The lateral boundaries are mostly vertical, and the longitudinal slope of the street is 3.6%.

The water level never reaches the tire axis (except in cases where vehicles cause obstructions in the flow); thus, a water depth of 0.2 m over the sidewalk has been estimated (Fig. 6). Water depth is the variable in the analysis with the largest uncertainty as is discussed as follows: assuming that the tire is in an orthogonal plane to the direction of the camera and there is a lineal relation between the image pixels and the mean diameter of a tire, the water depth was estimated at $0.2 \text{ m} \pm 0.05 \text{ m}$.

The water depth in the place with maximum water velocity was determined using the water depth previously estimated based on the vehicle parked on the sidewalk (see Fig. 6) and the surveyed street cross section (see Fig. 7, indicating as water depth equal to 0 the water surface elevation).

Finally, the product of the measured water velocities (v) and water depths (h) was analyzed in order to evaluate the vulnerability to human stability (Table 1; Figs. 8, 12). Presently (2016), uncertainties in surface flow velocity measurements using LSPIV are

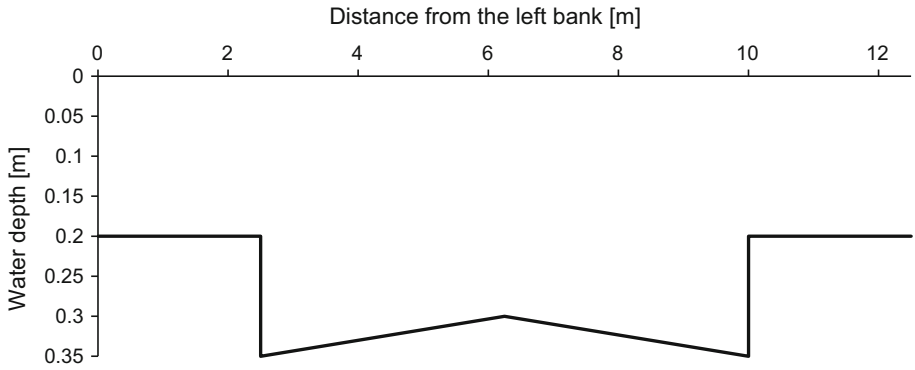


Fig. 7 Street section used to characterize the flood flow in CS₁

Table 1 Parameters characterizing flow conditions in the three analyzed cross sections

Cross section (see Fig. 5)	Maximum velocity v (m/s)	Water depth at the location of maximum velocity h (m)	Maximum velocity times the water depth $v \cdot h$ (m ² /s)
CS ₁	2.3	0.30	0.7
CS ₂	4.2	0.33	1.4
CS ₃	5.4	0.33	1.8

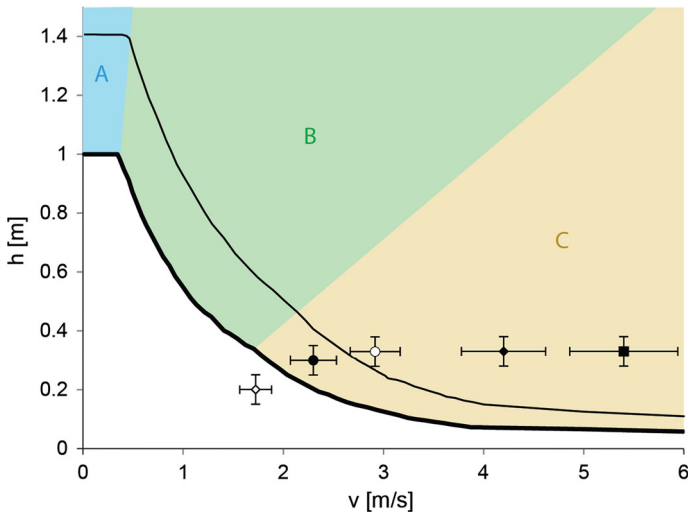


Fig. 8 Stability regions defined by Milanesi et al. (2015) for adults (*thin line*) and children (*thick line*): (A) drowning, (B) toppling, and (C) slipping. Here, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ and there is null slope (horizontal terrain). Symbols represent the results obtained of the flow velocity measurements in the three cross sections of the analyzed video (*filled circle* CS₁, *filled diamond* CS₂, *filled square* CS₃, *open square* CS₁ sequence a, and *open circle* CS₁ sequence b)

being studied by different research groups (i.e., Hauet et al. 2009). Based on the authors' experience, uncertainties on LSPIV surface flow velocity measurements errors are on the order of $\pm 10\%$. In addition, uncertainties in water depth estimations performed in this work are on the order of 0.05 m. Thus, accounting for the uncertainties in the estimation of the vulnerability of people and vehicles based on stability criterion error, confidence intervals for the water velocity and water depth have been included in Figs. 8 and 12.

Engineers Australia (2010) limit for $v \cdot h$ ($0.4 \text{ m}^2/\text{s}$ for children and $0.6 \text{ m}^2/\text{s}$ for adults) is significantly exceeded in cross sections CS_2 and CS_3 (Table 1).

The $v-h$ values observed in this work at the three different cross sections are represented in Fig. 8. This plot also includes the regions defined by Milanese et al. (2015) for drowning (A), toppling (B), and slipping (C) in the case of clear water ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$) and horizontal terrain (null slope), for a child (thick line) and adult (thin line). This plot also defines thresholds that separate children from adults: low vulnerability (under the children line), medium vulnerability (between the children and adult lines), and high vulnerability (above the adult line). The values observed in the CS_1 cross section are located in the region with medium vulnerability, and the instability mechanism is controlled by slipping. However, the values measured in CS_2 and CS_3 correspond to the high vulnerability region during the urban flood characterized in this work. Because, the velocity is so high ($>4 \text{ m/s}$) for both CS_2 and CS_3 , than the stability index ($v \cdot h$) is not sensitive to the depth (h) (Fig. 8), provided depth (h) remains above $\sim 0.1 \text{ m}$. Water flow depth is not a main factor at these two cross sections because the water velocity is so high in this region; and that is the reason of not taking into account sediment transport (erosion and deposition).

To complement the flow velocity field characterization, a numerical hydrodynamic model HEC RAS (USACE 2008) was implemented for the site. This model allows the user to perform a one-dimensional (steady flow) calculation, among other things if implemented.

To implement HEC RAS, first it was necessary to define roughness coefficients to simulate the flow resistance in the street and sidewalks. The roughness coefficients applied in this study (Manning coefficients n were used) are described below

1. n value equal to 0.030 for the unpaved sidewalks (Chow 1959 for floodplain consisting of pastures).
2. The n value of the street was calibrated using the maximum water velocity reached in the CS_1 section in the center of the street (about 3 m/s) and the estimated water depth (0.2 m on the sidewalks). The value of n that represents the case study is 0.028 (in the literature, this value corresponds to an open channel excavated without vegetation; therefore, this value is acceptable because the street is unpaved).

The velocity distribution in the CS_1 cross section simulated using the calibrated n roughness coefficients is shown in Fig. 9. The maximum velocity of about 3 m/s is reached near the center of the street and the water depth on the sidewalks is 0.2 m (Fig. 9) (both data were observed at the site).

Three sequences of the video have been analyzed using the flow measurements and the calibrated HEC RAS model. The results were compared with the plot presented by Milanese et al. (2015) and Xia et al. (2011). The selected sequences correspond to times when (a) people are standing on the sidewalk; (b) a man was carried away by the flow; and (c) vehicles were carried away by the flow.

- (a) During the first sequence of the video, people are standing on the right sidewalk of the flow (Fig. 10):

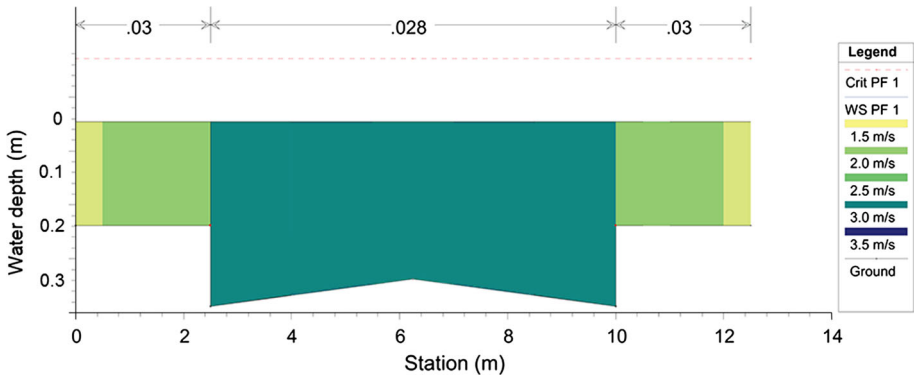


Fig. 9 Control section CS₁ used to calibrate the *n* roughness coefficient of the hydrodynamic model HEC RAS



Fig. 10 Sequence of the analyzed video when people are standing on the right sidewalk (reference time = 0 s)

Using the field measurements and the calibrated hydrodynamic model, a water velocity of 1.8 m/s and a water depth to 0.2 m was estimated at the site. Plotting the *v*–*h* values in Fig. 8, this flow condition corresponds to the low vulnerability region (there is no movement of the people affected by the flood) and region C (corresponding to the area where the instability mechanism is slipping).

- (b) In another part of the video, one man was trying to enter a vehicle. He was carried away by the flow. A colleague rescued him and a possible tragedy was avoided (Fig. 11).

In this case, the person was located in the right side of the street near the sidewalk. Using field measurements and the calibrated hydrodynamic model, a water velocity of 2.9 m/s and a water depth equal to 0.33 m were estimated in this region. If these values are plotted in Fig. 8, this flow condition corresponds to the high vulnerability region (the drag on the man is clear) and the region C (corresponding to the area where the instability mechanism is the slipping).



Fig. 11 Part of the analyzed video in which a man (within the *white circle*) was carried away while he was trying to get into one vehicle (reference time = 50 s)

(c) In the last sequence of the video, two vehicles were carried away by the flow as it is shown previously in Fig. 3. In this case, the region where the cars were carried away coincides with sections CS₂ and CS₃. The water velocities in these cross sections range between 4.2 and 5.4 m/s, and the water depth ranges between 0.3 and 0.35 m (see Table 1). The velocity and water depth values observed in this work (Fig. 12) for two of the analyzed cross sections (CS₂ and CS₃) in the *v*-*h* stability plot prepared by Xia et al. (2011) for two vehicle types and for different vehicle orientation angles (0 and 180°) aligned parallel to the water velocity vector and 90° being normal to this vector.

The values observed in CS₂ and CS₃ indicated that the measurements are above every threshold defined by Xia et al. (2011). The results reached in the analyzed video indicate that the vehicle stability thresholds are always exceeded. During the recorded event and

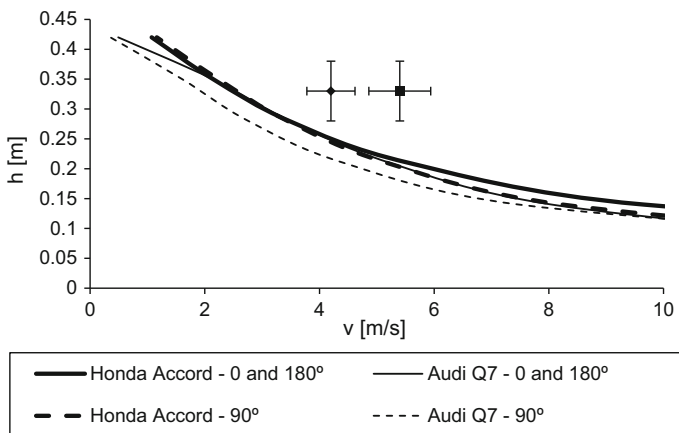


Fig. 12 Stability thresholds defined by Xia et al. (2011) for two vehicle types and for different orientation angles. The flow conditions in the CS₂ and CS₃ cross sections of the analyzed video (see Table 1) are represented by *filled diamond* and *filled square*, respectively

because of the high water velocities reached by the flow, large movements of large vehicles were observed. The vehicles move in the region of largest values of $v-h$ that corresponds to the high vulnerability zone defined by Xia et al. (2011) for vehicles.

4 Summary and conclusions

In this work, the water velocities in one street of Asuncion, Paraguay, are experimentally determined during an urban flash flood using an advanced experimental technique available for non-contact measurements of large-scale surface water velocities: LSPIV. During this urban flood and because of the high velocities measured, people slipping and carried away and appreciable movements of large vehicles were observed.

A one-dimensional numerical hydrodynamic model was also used for the velocity characterization during flood events. Based on the correct analysis of the video, valuable hydraulic data can be computed and used for the calibration of the hydrodynamic model.

Various sequences of the video were characterized taking into account the vulnerability criterion based on the stability of people and vehicles in flash floods proposed by Milanesi et al. (2015) and Xia et al. (2011), respectively. The maximum measured values of $(v \cdot h)$ always exceed the vulnerability limits of people defined in previous works (Engineers Australia 2010) to prevent people from being carried away in streets and other areas of runoff during a flash flood. It has been shown that if people remained on the sidewalk, they were in a region of low vulnerability; whereas if they were in the street they were in area a region of high vulnerability. For both cases, the associated instability mechanism for people is slipping. In addition, it was shown that the flow contraction caused by vehicles on the right bank (right side of the street) significantly increases the vulnerability and risk of the analyzed situation.

In order to analyze the stability thresholds for vehicles, the criterion proposed by Xia et al. (2011) was used. Using the measurements collected in Xia's study, it was shown that downstream of the flow contraction, the vehicle's instability limit is exceeded and corresponds to the appreciable movement of vehicles observed in the video.

This work illustrates the great potential of citizen science initiatives for improving flood risk assessment as valuable hydraulic data can be computed using messages, photographs and movies produced by citizens. Nowadays, new communication and digital image technologies have enabled the public to produce large quantities of flood observations and share them through social media. The authors of this paper are working in citizen science projects in Argentina focused in the generation of crowd-sourced data for flood hydrology. In addition to citizen science initiatives, the authors are also evaluating the application of near infrared surveillance camera networks in urban areas to quantify flood vulnerability in real time using LSPIV.

Acknowledgements The authors acknowledge Angel M. Martin, Jr., USGS retired, for his technical edit and constructive comments on the manuscript; Kevin A. Oberg, USGS—Office of Surface Water, for helping in the final edition of this work; and two anonymous reviewers provided useful comments and suggestions for improving the manuscript.

References

Australia Institute of Engineers (1987) Australian rainfall and runoff, vol 1&2. (Ed: Pilgrim, D.H.) Institution of Engineers, Australia

- Chow VT (1959) Open-channel hydraulics. McGraw-Hill, New York, p 680
- Creutin J-D, Muste M, Bradley A, Kim SC, Kruger A (2003) River gauging using PIV techniques: a proof of concept experiment on the Iowa River. *J Hydrol* 277(3–4):182–194
- Engineers Australia (2010) Australian rainfall and runoff revision projects. PROJECT 10 appropriate safety criteria for people. STAGE 1 REPORT P10/S1/006. April 2010
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) (1979) The floodway: a guide for community permit officials. EEUU
- Fujita I, Muste M, Kruger A (1998) Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications. *J Hydraul Res* 36(3):397–414
- Fujita I, Kunita Y, Tsubaki R (2013) Image analysis and reconstruction of the 2008 Toga River flash flood in an urbanized area. *Aust J Water Resour* 16(2):12
- Hauet A, Muste M, Ho HC (2009) Digital mapping of riverine waterway hydrodynamic and geomorphic features. *Earth Surf Proc Land* 34(2):242–252
- Le Boursicaud R, Pénard L, Hauet A, Thollet T, Le Coz J (2016) Gauging extreme floods on YouTube: application of LSPiV to home movies for the post-event determination of stream discharges. *Hydrol Process* 30:90–105
- Le Coz J, Magali Jodeau, Hauet A, Marchand B, Le Boursicaud R (2014) Image-based velocity and discharge measurements in field and laboratory river engineering studies using the free FUDAA-LSPiV software. *River Flow*, Lausanne
- Le Coz J, Patalano A, Collins D, Guillén NF, García CM, Smart GM, Bind J, Chiaverini A, Le Boursiqueau R, Dramais G, Braud I (2016) Crowd-sourced data for flood hydrology: feedback from recent citizen science projects in Argentina, France and New Zealand. *J Hydrol*. Available online 26 July 2016, ISSN 0022-1694. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.07.036>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169416304668>)
- Martínez-Gomariz E, Gómez M, Russo B (2016) Experimental study of the stability of pedestrians exposed to urban pluvial flooding. *Nat Hazards* 1–20
- Milanesi L, Pilotti M, Ranzi R (2015) A conceptual model of people's vulnerability to floods. *Water Resour Res* 51:182–197. doi:10.1002/2014WR016172
- Muste M, Schöne J, Creutin J-D (2005) Measurement of free-surface flow velocity using controlled surface waves. *Flow Meas Instrum* 16(1):47–55
- Muste M, Fujita I, Hauet A (2008) Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments. *Water Resour Res* 44:1–14
- Nanía LS (1999) Metodología numérico experimental para el análisis del riesgo asociado a la escorrentía pluvial en una red de calles. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España
- Patalano A, García CM (2006) RiVeR—towards affordable, practical and user-friendly toolbox for large scale PIV and PTV techniques. In: IAHR RiverFlow Conference, St. Louis, Missouri, USA
- Rooseboom A, Basson MS, Loots CH, Wiggett JH, Bosman J (1986) Manual on road drainage, 2nd edn. National Transport Commission, Chief Director of National Road, Republic of South Africa
- Russo B (2009) Design of surface drainage systems according to hazard criteria related to flooding of urban areas. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España
- Stumpf A, Augereau E, Delacourt C, Bonnier J (2016) Photogrammetric discharge monitoring of small tropical mountain rivers: a case study at Rivière des Pluies, Réunion Island. *Water Resour Res* 52(6):4550–4570
- Témez JR (1992) Control del desarrollo urbano en las zonas inundables. Monografías del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, vol 10, pp 105–115. Madrid, Spain
- Thielicke W, Stamhuis EJ (2014) PIVlab—towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB. *J Open Res Softw* 2(1):e30. doi:10.5334/jors.bl
- USACE [US Army Corps of Engineers] (2008) HEC-RAS Version 4.1. Davis, CA Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center
- WMO [World Meteorological Organization] (2009) Flood management in a changing climate. APFM technical document no. 9, Flood management tools series, associated programme on flood management (WMO), Geneva, Switzerland. www.apfm.info/pdf/ifm_tools/Tools_FM_in_a_changing_climate.pdf
- Wright-Mc Laughlin Engineers (1969) Urban drainage and flood control district, vol 861. Denver, Colorado, USA
- Xia J, Teo FY, Lin B, Falconer RA (2011) Formula of incipient velocity for flooded vehicles. *Nat Hazards* 58(1):1–14