

Aforos de ríos y arroyos en la Cuenca Matanza-Riachuelo

Informe 09 – Análisis de incertidumbres en la metodología *Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV)*



Programa Hidráulica Computacional - Subgerencia Laboratorio de Hidráulica -
Instituto Nacional del Agua

Laboratorio de Hidráulica - Facultad Ciencias Exactas Físicas y Naturales de la
Universidad Nacional de Córdoba (FCEFN - UNC)

Proyecto INA 407
Informe LHA 09-407-22
Ezeiza, marzo de 2024

Equipo de trabajo (por orden alfabético)

Laboratorio de Hidráulica - Facultad Ciencias Exactas Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba (FCEFyN - UNC)

Msc. Ing. Leandro Massó | Dr. Antoine Patalano

Subgerencia Centro de la Región Semiárida – Instituto Nacional del Agua

Msc. Ing. Ana I. Heredia Ligorria

Programa Hidráulica Computacional – Subgerencia Laboratorio de Hidráulica – Instituto Nacional del Agua

Dr. Ing. Pablo E. García | Ing. Santiago Guizzardi | Ing. Leandro Kazimierski | Ing. Marina Lagos | Mayra Morale | Lic. Nicolás Ortiz | Msc. Ing. Mariano Re | Ing. Martín Sabarots Gerbec | Marina Sarti

Informe realizado por:

Antoine Patalano

Leandro Massó

Ana I. Heredia Ligorria

Pablo Ezequiel García

Nicolás Ortiz

Tabla de contenido

1.	Introducción	5
1.1.	Informe del análisis de incertidumbres de la metodología Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV)	6
2.	Campaña de aforos.....	7
2.1.	Principio de funcionamiento de velocimetría por imágenes	7
2.2.	Instrumentos utilizados.....	10
2.2.1.	Instrumentos relacionados a la velocimetría por imágenes	10
2.2.2.	Instrumentos acústicos Doppler	11
2.2.3.	Instrumentos para la aplicación de la técnica LSPIV	12
2.3.	Secciones de interés.....	12
2.4.	Base de datos obtenidos el día de la campaña	13
3.	Metodología de la campaña.....	14
3.1.	Procesamiento y análisis de video con visual oblicua (GoPro)	14
3.1.1.	Análisis de sensibilidad de los parámetros de procesamiento	15
3.1.1.1.	Sensibilidad a la duración de video procesado	16
3.1.1.2.	Sensibilidad al step.....	25
3.1.1.3.	Sensibilidad al tamaño de ventana de interrogación.....	29
3.1.2.	Análisis de sensibilidad de los métodos de relevamiento de datos topobatimétricos.....	32
3.1.2.1.	Sensibilidad al relevamiento batimétrico.....	33
3.1.2.2.	Sensibilidad a la rectificación de resultados	35
3.2.	Procesamiento y análisis de video con visual cenital (Drone)	37
3.2.1.	Análisis de sensibilidad de los parámetros de procesamiento	38
3.2.1.1.	Sensibilidad al step.....	41
3.2.1.2.	Sensibilidad al tamaño de ventana de interrogación.....	44
3.2.2.	Análisis de sensibilidad de los métodos de relevamiento de datos topobatimétricos.....	48
3.2.2.1.	Sensibilidad al relevamiento batimétrico.....	48
3.2.2.2.	Sensibilidad a la estabilización de las imágenes	50

3.3. Comparación de caudales medios	52
4. Conclusiones.....	55
5. Referencias	57

1. Introducción

El monitoreo de parámetros ambientales dentro de la Cuenca Matanza Riachuelo (CMR) es de suma importancia para la definición de acciones a realizar por la Autoridad de Cuenca Matanza Riachuelo (ACUMAR) en búsqueda de cumplir los objetivos propuestos en el Plan Integral de Saneamiento Ambiental (PISA).

Los estudios de la calidad de agua superficial y subterránea, sedimentos y aire, se llevan a cabo en la red de estaciones de monitoreo puntual y continuo extendidas a lo largo de toda la CMR. Toda la información obtenida a partir de dichos estudios constituye un conjunto de herramientas de gestión fundamental para evaluar las acciones planificadas en materia de reducción de las fuentes de contaminación tienen sobre la calidad ambiental de la Cuenca.

Para monitorear la calidad del agua superficial, ACUMAR estableció una red que incluye puntos sobre el río principal Matanza Riachuelo, sus afluentes, distintos arroyos a lo largo de la extensión aguas arriba y hasta sus nacientes, involucrando a las 14 subcuencas que conforman la Cuenca Hídrica del Matanza Riachuelo.

El presente proyecto tiene por objetivo principal darle continuidad al monitoreo integrado y simultáneo de calidad de agua superficial y caudales que viene realizando la Autoridad de Cuenca Matanza Riachuelo (ACUMAR) en forma sistemática desde el año 2007. Para eso se plantean 2 Campañas de aforos en diferentes estaciones de la red.

Los aforos previstos para cada una de las Campañas se efectuarán utilizando diferentes técnicas, entre las que se destacan aquellas que utilizan tecnología Doppler como es el caso de ADV (*Acoustic Doppler Velocity*) y ADCP (*Acoustic Doppler Current Profilers*) y una nueva tecnología de medición indirecta de velocidades superficiales del agua, a partir de la utilización de cámaras terrestres, aéreas e incluso radares, que permiten estimar caudales líquidos mediante el postprocesamiento de los videos registrados. Para esta última tecnología, denominada velocimetría por imágenes, se usará como algoritmo de análisis el denominado '*Large Scale Particle Image Velocimetry*' (LSPIV).

Adicionalmente a las campañas mencionadas previamente, durante el Proyecto se realizarán una serie de aforos especiales, que buscarán registrar las ondas de crecida en diferentes cursos de agua, con el objetivo principal de ampliar, mejorar y/u optimizar las curvas de relaciones altura-caudal (HQ) que posee la ACUMAR. Y se evaluará la performance de la técnica de aforo LSPIV.

Por último, el proyecto plantea una campaña para empezar a evaluar las incertidumbres asociadas a la técnica Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV).

1.1. Informe del análisis de incertidumbres de la metodología Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV)

Con el objetivo central de evaluar la técnica de velocimetría por imágenes para la estimación de caudal en los ríos que componen la Cuenca Matanza Riachuelo se realizó una campaña de aforo el día 11 de diciembre de 2023. La técnica de velocimetría por imágenes se fundamenta en la hipótesis de que la velocidad superficial de un río o canal puede ser medida siguiendo un trazador visible a través de una cámara. En situaciones donde no existe un trazador natural, se procede a la introducción artificial de un trazador, como es el caso de la siembra artificial aguas arriba de la sección aforada.

En el marco de este informe, se llevará a cabo un estudio preliminar centrado en el análisis de sensibilidad y evaluación de la incertidumbre asociada con la implementación de la técnica. Con este fin, se utilizarán virutas de madera como trazador, y se realizarán grabaciones en video desde distintos puntos de vista, tanto cenitales como oblicuos. La elección de las virutas de madera como trazador se fundamenta en su capacidad para ser fácilmente identificadas en las imágenes y su movimiento representativo de la velocidad superficial del agua. Además, se emplearán diversos parámetros de procesamiento, con el propósito de analizar cómo afectan los resultados finales, particularmente en lo que respecta a la estimación del caudal.

La comparación de los resultados obtenidos mediante la técnica de velocimetría por imágenes se llevará a cabo con mediciones realizadas en la misma campaña con instrumentos acústicos Doppler, considerados estándar en la medición de perfiles de velocidad superficial y caudales en ríos. Esta comparación proporcionará una validación adicional de la precisión y confiabilidad de la técnica propuesta.

Es importante destacar que la iniciativa de implementar la técnica de velocimetría por imágenes contó con la colaboración del Instituto Nacional del Agua (INA), que invitó a expertos de la Universidad Nacional de Córdoba para participar en la campaña. Los integrantes de la Universidad Nacional de Córdoba que contribuyeron a la campaña, el Dr. Antoine Patalano y el Mag. Leandro Massó, son desarrolladores con más de una década de experiencia en la creación de herramientas para velocimetría por imágenes.

Este informe busca mejorar el punto de vista operativo para la implementación exitosa de la técnica de velocimetría por imágenes en la medición de caudal, con el objetivo de impactar positivamente en futuras iniciativas y proyectos relacionados con la cuenca.

2. Campaña de aforos

El día 11 de diciembre de 2023 se llevó a cabo una Campaña para analizar incertidumbres asociadas a la estimación de caudales utilizando la metodología LSPIV. Los ensayos se realizaron en la estación EM03, ubicada sobre el arroyo Cañuelas (ver Figura 2.1).

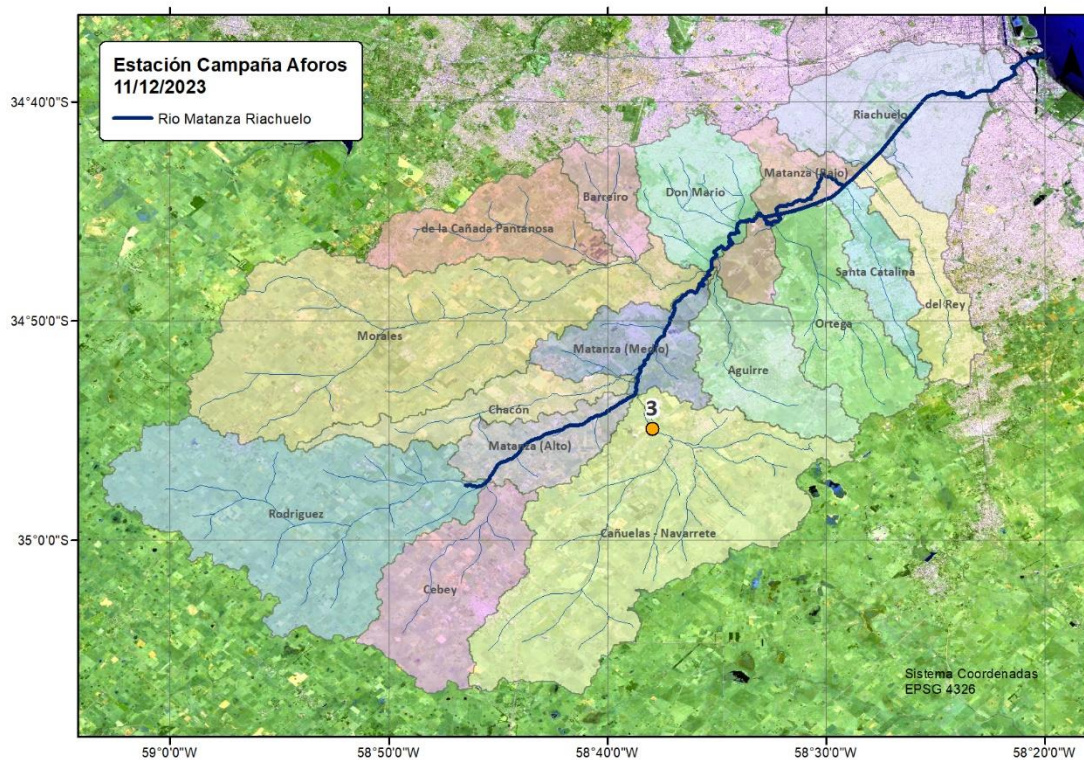


Figura 2.1. Estación de aforo.

2.1. Principio de funcionamiento de velocimetría por imágenes

La técnica de Velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala (LSPIV, por sus siglas en inglés) permite realizar estimaciones de campos de velocidades superficiales en flujos a superficie libre de manera cuasi instantánea y con alta resolución espacio-temporal. Esta metodología se deriva de las técnicas de velocimetría por imágenes originalmente desarrolladas para aplicaciones en laboratorio, tales como PIV o PTV (Adrian, 1991; Cenedese & Querzoli, 1997). Tal como las técnicas de laboratorio, básicamente la metodología de implementación de LSPIV consiste en obtener imágenes, a intervalos conocidos de tiempos, de

un flujo a superficie libre con trazadores naturales o artificiales. En base a dos imágenes consecutivas se identifican las posiciones de los trazadores/patrones o grupos de ellos en cada una de las imágenes y mediante un determinado procesamiento se calcula el desplazamiento de estos. Con el desplazamiento y el intervalo de tiempo entre pares de imágenes es posible determinar los vectores velocidad. El concepto de gran escala hace referencia a que el área de interés del flujo aumenta órdenes de magnitud respecto a las implementaciones en laboratorio, y que se hace hincapié en la caracterización de las grandes estructuras turbulentas del flujo, es decir el flujo medio. Esta técnica presenta importantes ventajas respecto a otras técnicas de medición como las clásicas e hidro-acústicas. En primer lugar, se trata de una técnica no intrusiva, permitiendo realizar aforos en condiciones de flujo con grandes profundidades y altas velocidades, y además es aplicable en flujos altamente imperantes, condiciones usuales durante eventos hidrológicos extremos máximos. Y, por último, es una técnica con costo de aplicación bajo.

Los componentes básicos necesarios para su implementación son (Figura 2.2):

- Sensor de imágenes que permita capturar una secuencia de imágenes con un intervalo de tiempo conocido. Ej.: cámara digital.
- Flujo a superficie libre con sembrado artificial o con patrones naturales en el flujo (Ej.: espuma, residuos de baja inercia trasportados por el flujo, patrones generados por ondulaciones de la superficie libre con transporte de masa, etc.)
- Sistema de iluminación que permita la visualización de los trazadores/patrones superficiales del flujo, que puede ser natural (iluminación solar) o artificial.

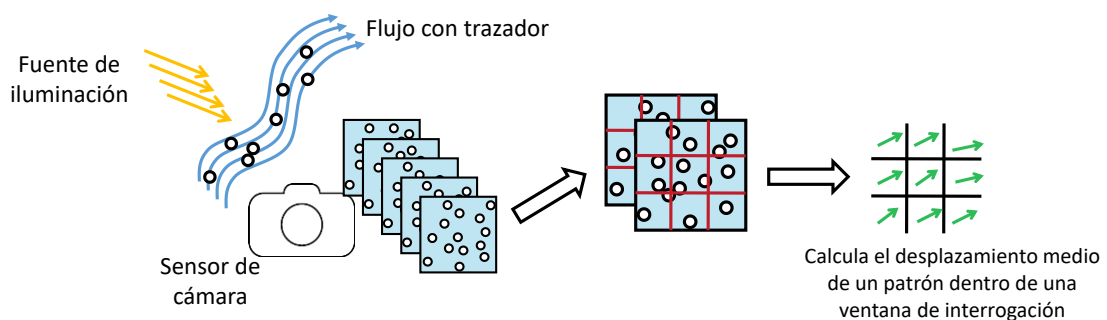


Figura 2.2. Principio de funcionamiento de PIV.

Además de ello, en la implementación de LSPIV generalmente existe una dificultad práctica de conseguir una visual cenital al área de interés del flujo. Ello provoca que exista una distorsión por perspectiva en las imágenes capturadas, con la consecuente necesidad de realizar una corrección.

El proceso e implementación de la técnica de LSPIV para la estimación de caudales líquidos en términos generales se puede resumir cómo:

1. Obtención de una serie de imágenes con intervalo de tiempo conocido entre ellas del área de interés del flujo. Esto puede realizarse a partir de la captura de un video digital.
2. Extracción de imágenes: Si se capturó un video, será necesario extraer las imágenes digitales de éste. En esta etapa podrá definirse la cantidad de imágenes por segundo (fps) a extraer, siempre que este valor sea menor o igual al fps del video original.
3. Pre procesamiento de las imágenes: consiste en la aplicación de filtros sobre las imágenes digitales para mejorar la visualización de los trazadores/patrones superficiales, tal como el filtro de ecualización de histograma por contraste adaptativo limitado (CLAHE, por sus siglas en inglés).
4. Procesamiento de las imágenes: se realiza el procesamiento sobre un par de imágenes consecutivas. Se subdivide a las imágenes en muestras, denominadas Ventanas de Interrogación (IA) y se analizan buscando el mejor ajuste local entre las dos imágenes estadísticamente. Para ello se utiliza una función discreta de correlación cruzada, que mide en términos estadísticos el grado de coincidencia de las dos muestras. El valor más alto del plano de correlación puede usarse entonces como una estimación directa del desplazamiento de los trazadores/patrón dentro de la IA. Para resolver la ecuación de correlación cruzada se puede realizar una Correlación Cruzada Directa (DDC) o utilizar la Transformada Rápida de Fourier Discreta (DFFT). Ésta última presenta la ventaja de un ahorro de costo computacional significativo respecto a DDC. Repitiendo el análisis sobre todas las muestras, y sobre todos los pares de imágenes, se obtienen los campos de desplazamiento en [px/par de imagen].
5. Post procesamiento de resultados: se pueden realizar una serie de procedimientos sobre los resultados obtenidos con el objetivo de mejorar su precisión, tales como la validación de datos, la interpolación de datos, el suavizado, etc.
6. Rectificación de resultados: si las imágenes no fueron registradas desde una posición cenital a la superficie del flujo, será necesario corregir el error por perspectiva. Para ello se utiliza el concepto de homografía (Bouguet, 2010) que permite realizar una transformación desde el sistema proyectivo de la imagen en pixel (con distorsión) a un sistema ortogonal real en unidades de longitud (rectificado). De esta forma, los campos de velocidades en [px/par de imágenes] se transforman a unidades de [m/s]. En la Figura 2.3 se muestra un ejemplo gráfico de rectificación de resultados de LSPIV. Para la rectificación de los resultados es necesario el relevamiento in situ de 4 puntos de control (PC) en el mismo plano que la superficie que se puede llevar a cabo con estación total, GPS, o simplemente con cinta métrica, midiendo las 6 distancias que separan los 4 CPs.

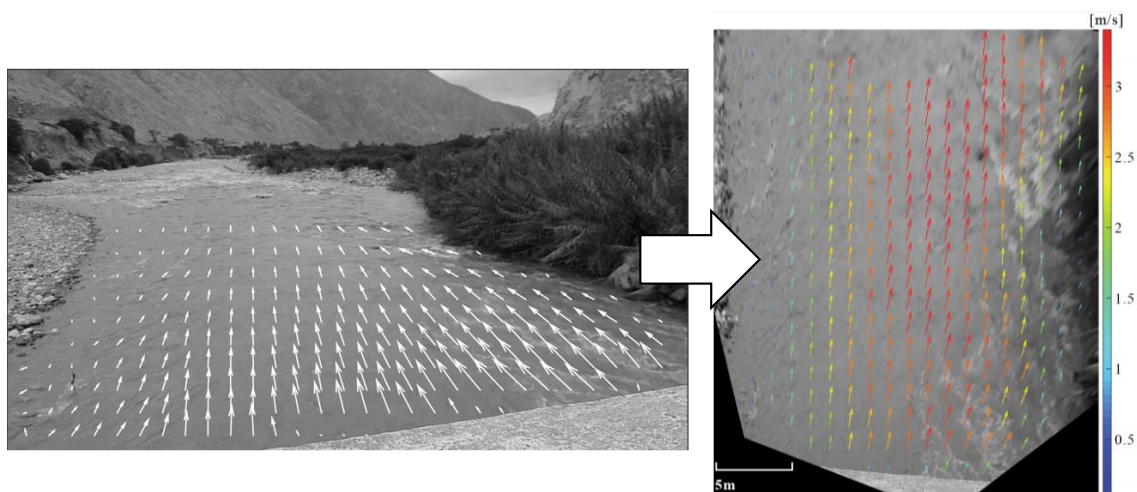


Figura 2.3. Ejemplo de rectificación de resultados de LSPIV en el río Pisco, Perú.

7. Estimación de caudal líquido: Del campo de velocidad medio es posible extraer perfiles de velocidad sobre una sección de interés. Con esta información y con datos batimétricos de dicha sección se estima el caudal líquido escurrido a partir del método de la sección medida. La técnica LSPIV estima velocidades superficiales, pero el valor necesario para estimar el caudal es la velocidad media en la vertical. Si se asume un perfil logarítmico en la columna de agua, la velocidad media V_m puede expresarse como: $V_m = \alpha * V_s$, donde α es el coeficiente que relaciona la velocidad media V_m y la velocidad superficial V_s , y tiene un valor teórico de 0.85. Por lo que el caudal escurrido será $Q = A * \alpha * V_s$, donde A es el área de la sección transversal del flujo.

Para la implementación de LSPIV en el presente informe se utiliza el paquete computacional RIVeR (Patalano et al., 2017) desarrollado por parte del equipo de trabajo a cargo de este informe. RIVeR permite realizar la extracción de imágenes de videos, el proceso de rectificación de los resultados y la estimación de caudales líquidos sobre secciones transversales de interés, entre otras facilidades. Además de ello, incorpora el paquete computacional PIVlab (Thielicke & Stamhuis, 2014), que permite realizar el pre procesamiento y procesamiento de las imágenes.

2.2. Instrumentos utilizados

2.2.1. Instrumentos relacionados a la velocimetría por imágenes

- Drone Mavic Pro 2 de la marca DJI para la grabación de video cenital.
- Gopro Hero 11 para la grabación de video oblicua, desde la margen.
- GPS diferencial Hiper V de la marca Topcon para la rectificación de resultados de procesamiento y relevamiento batimétrico.

- Cinta métrica y palo graduado para la rectificación de resultados de procesamiento

2.2.2. Instrumentos acústicos Doppler

- Flow Tracker II de la marca Sontek, para la realización de perfiles de velocidad verticales y transversales (Figura 2.4).



Figura 2.4. Aforo con FlowTracker II en el Arroyo Cañuelas el 11/12/2023

- ADCP RS5 de la marca Sontek, permite para la realización de perfiles de velocidad, batimetrías y cálculo de caudal en ríos y canales (Figura 2.5)



Figura 2.5. Aforo con ADCP RS5 en el Arroyo Cañuelas el 11/12/2023

2.2.3. Instrumentos para la aplicación de la técnica LSPIV

- Notebook con las siguientes características: Procesador AMD Ryzen 7 4800H con Radeon Graphics y 16Gb de memoria RAM.

2.3. Secciones de interés

La sección de estudio es tramo del arroyo Cañuelas que se encuentra en la parte alta de la Cuenca Matanza Riachuelo, en la Provincia de Buenos Aires, Argentina. Este segmento particular se encuentra aguas abajo del puente correspondiente a la Autopista N°205 de Ezeiza-Cañuelas. Cabe destacar que el nivel del arroyo está siendo monitoreado de manera continua mediante un sensor de nivel acústico, propiedad de ACUMAR. En el marco de este estudio, se han seleccionado dos secciones transversales específicas del arroyo, designadas como XS1 y XS2 (Figura 2.6). Ambas secciones presentan una profundidad relativamente baja, aproximadamente de 30 cm. Es necesario tener en cuenta que estas secciones se caracterizan por un lecho compuesto principalmente por barro, con presencia notable de residuos sólidos y algas. Estas condiciones particulares proporcionan un contexto relevante para el análisis de la técnica de velocimetría por imágenes en un entorno fluvial con ciertas características morfológicas y ambientales. Además, es relevante destacar que, en el momento del estudio, se registró un viento con una velocidad aproximada de 18 km/h, con ráfagas alcanzando los 25 km/h en la región de Buenos Aires, según datos proporcionados por la aplicación UAV Forecast¹. Esta información es especialmente significativa para la planificación y ejecución de vuelos de drones, ya que las condiciones meteorológicas y geomagnéticas pueden influir en la

¹ <https://www.uavforecast.com/>

estabilidad y precisión de la captura de imágenes aéreas necesarias para la aplicación de la técnica de velocimetría por imágenes.

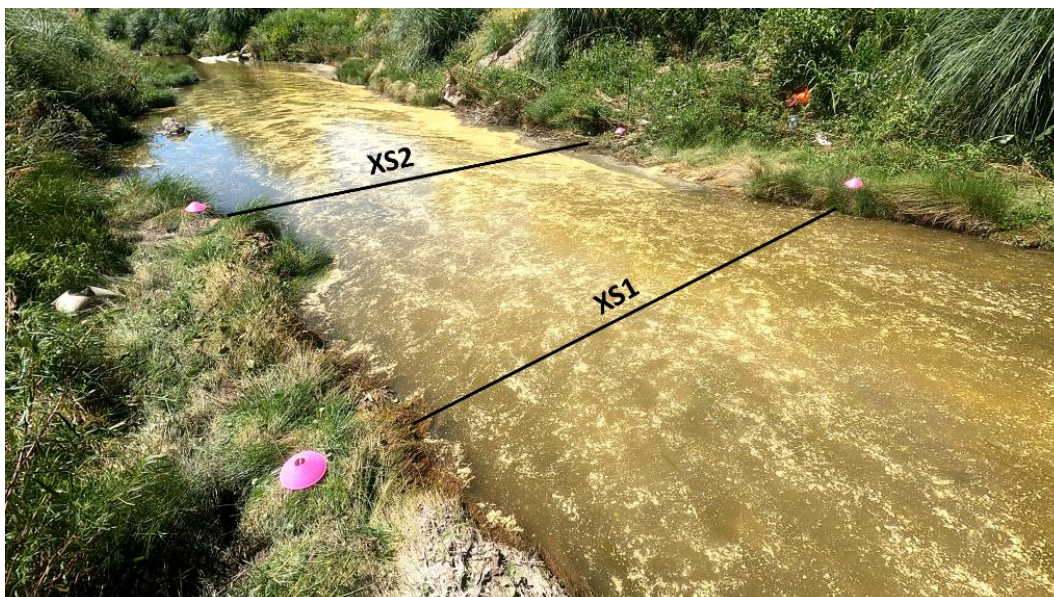


Figura 2.6. Secciones transversales de interés en el Aº Cañuelas. XS1 se encuentra aguas arriba de XS2.

2.4. Base de datos obtenidos el día de la campaña

- Medición de caudal utilizando Flow Tracker II en las secciones XS1 y XS2.
- Medición de perfil de velocidades superficial utilizando Flow Tracker II (mediciones aprox. a 5cm por debajo de la superficie libre) en las secciones XS1 y XS2.
- Medición de caudal utilizando ADCP Sontek RS5 en la sección XS2.
- Relevamiento batimétrico de las secciones XS1 y XS2 utilizando cinta métrica y palo graduado.
- Relevamiento batimétrico de las secciones XS1 y XS2 utilizando GPS diferencial RTK.
- Demarcación de 4 PCs para rectificación de resultados de LSPIV. Medición de distancias entre ellos utilizando cinta métrica. Relevamiento de coordenadas geoespaciales de los puntos utilizando GPS diferencial RTK.
- Video con visual cenital al área de interés utilizando el dron Mavic Pro 2
- Video con visual oblicua del área de interés utilizando GoPro en trípode sobre margen.
- Control de variación de nivel de superficie libre por sensor de nivel de la red de ACUMAR.

3. Metodología de la campaña

La metodología de la campaña se basó en la captura simultánea de dos videos en el campo. El primero, grabado con la cámara GoPro que estaba ubicada sobre un trípode en la margen izquierda del arroyo. El segundo video fue registrado por el dron Mavic2 Pro, capturando imágenes de manera cenital. Ambos videos se grabaron simultáneamente.

En una primera etapa del análisis, se evaluó la sensibilidad de los parámetros de procesamiento de la técnica, centrándose en la implementación típica de LSPIV, para la estimación de velocidades superficiales. Como velocidades de referencia, se utilizó un perfil medido con el dispositivo Flow Tracker II sobre la sección transversal XS1, ubicado a aproximadamente 5 cm por debajo de la superficie libre del agua.

Para la segunda fase del análisis, se realizará una evaluación de la sensibilidad sobre el valor del caudal, utilizando dos enfoques distintos para el relevamiento de puntos de control (PC) y batimetría. En primer lugar, se implementará un análisis utilizando el GPS diferencial para el relevamiento de los PC y la medición batimétrica. Este enfoque proporciona mediciones de alta precisión, permitiendo una referencia geoespacial exacta. Por otro lado, se llevará a cabo un relevamiento alternativo utilizando cinta métrica y un palo graduado para la medición de distancias y profundidades, respectivamente. Aunque este método es más tradicional, se busca evaluar la viabilidad de una aproximación más sencilla y accesible en comparación con tecnologías de alta precisión. Ambos enfoques se compararán en términos de la influencia en el valor del caudal calculado, destacando las diferencias y similitudes entre las metodologías empleadas. Este análisis proporcionará una visión integral de la sensibilidad de la técnica de velocimetría por imágenes ante distintos métodos de relevamiento de datos topográficos y batimétricos.

Ambas fases se aplicarán de forma separada para los videos registrados con visión oblicua (GoPro) y cenital (Drone). A su vez, para el primero se analizará la sensibilidad al tipo de datos utilizado para la corrección de la distorsión por perspectiva, y para el caso de drone se analizará la sensibilidad de los resultados a la aplicación o no de la estabilización del movimiento de la cámara.

3.1. Procesamiento y análisis de video con visual oblicua (GoPro)

Se presentarán en esta sección los análisis realizados sobre el video grabado desde una posición oblicua. Esta posición de cámara produce una deformación por perspectiva sobre las

imágenes que debe ser corregida mediante rectificación. A continuación la información sobre las condiciones de grabación del video con la GoPro (Tabla 3.1):

Tabla 3.1. Características de la grabación del video con la GoPro

Nombre de archivo	GH010227.mp4
Resolución	3840x2160
Fps	30
FOV (Field Of View)	Lineal
Mejora del video	Sin suavizado de imagen ni estabilización automática de cámara
Soporte	Trípode
Duración total	00:08:51
Sembrado	Artificial, viruta de madera

3.1.1. Análisis de sensibilidad de los parámetros de procesamiento

En el análisis de sensibilidad de los parámetros de procesamiento, se enfocará en tres variables clave:

1. *Tiempo de video procesado*: este parámetro determina la duración del intervalo de video que se utilizará para el procesamiento. Se evaluarán distintas duraciones para comprender su impacto en la precisión de la técnica.
2. *Step*: el "Step" define el tiempo entre imágenes consecutivas y afecta la frecuencia de muestreo temporal. Se estudiarán diferentes intervalos de tiempo entre imágenes para evaluar cómo influyen en la calidad de los resultados.
3. *Tamaño de ventana de interrogación*: la ventana de interrogación es esencial para determinar la precisión espacial de la técnica. Se analizarán varios tamaños de ventana para entender cómo afectan la resolución espacial y la exactitud de las mediciones.

Cada parámetro será analizado de manera individual debido a la complejidad asociada con la evaluación de variaciones simultáneas. Se establecerá un conjunto inicial de parámetros estándar basado en las mejores prácticas de implementación y la experiencia del equipo de trabajo.

La métrica de evaluación principal será la raíz del error medio cuadrático (RMSE), utilizada como estadístico descriptivo y de optimización. Los datos de velocidad obtenidos mediante la técnica hidroacústica servirán como referencia para comparar y ajustar los resultados. Se utilizará el perfil de velocidades superficiales medido con el Flow Tracker II en la sección XS1 como referencia fundamental en este análisis de sensibilidad (ver Tabla 3.2; la progresiva 0 se corresponde con la margen izquierda).

Tabla 3.2. Perfil de velocidades superficial medido con Flow Tracker II en sección XS1

Progresiva [m]	Velocidad [m/s]	Desv. Estándar [m/s]
0.60	0.178	0.045
0.80	0.207	0.036
1.00	0.242	0.036
1.40	0.295	0.036
1.60	0.267	0.054
1.80	0.276	0.045
2.20	0.248	0.027
2.60	0.286	0.054
2.80	0.281	0.036
3.00	0.318	0.036
3.20	0.288	0.018
3.40	0.275	0.036
3.80	0.239	0.027
4.20	0.276	0.036
4.60	0.139	0.018
5.00	0.104	0.018

3.1.1.1. Sensibilidad a la duración de video procesado

Para evaluar la sensibilidad a la duración de video procesado, se llevarán a cabo las siguientes etapas del procesamiento:

- a) Extracción de Imágenes: se realizará la extracción de imágenes en escala de grises, sin aplicar corrección de distorsión por lente debido al uso de un campo de visión (FOV) lineal. Con el objetivo de reducir el costo computacional, se disminuirá la resolución a 2560x1440px. Se extraerán todas las imágenes disponibles con un "Step" igual a 1. El análisis se limitará al intervalo temporal en el cual se observa un sembrado artificial homogéneo en toda el área de estudio, comprendido entre los segundos 70 y 430.
- b) Pre-Procesamiento de Imágenes: se aplicará un filtro de adaptación de contraste CLAHE para mejorar la visualización de patrones superficiales (Figura 3.1).



Figura 3.1. Imagen original – Imagen con filtro CLAHE aplicado sobre ROI, video con visión oblicua.

- c) **Procesamiento:** se aplicará el algoritmo FFT con doble pasada y deformación de ventana. Se utilizarán tamaños de área de interés (IA) de 128 píxeles y 64 píxeles, ambos con una superposición del 50%. Los campos de velocidades cuasi instantáneos se obtendrán en píxeles por par de imágenes (Figura 3.2).

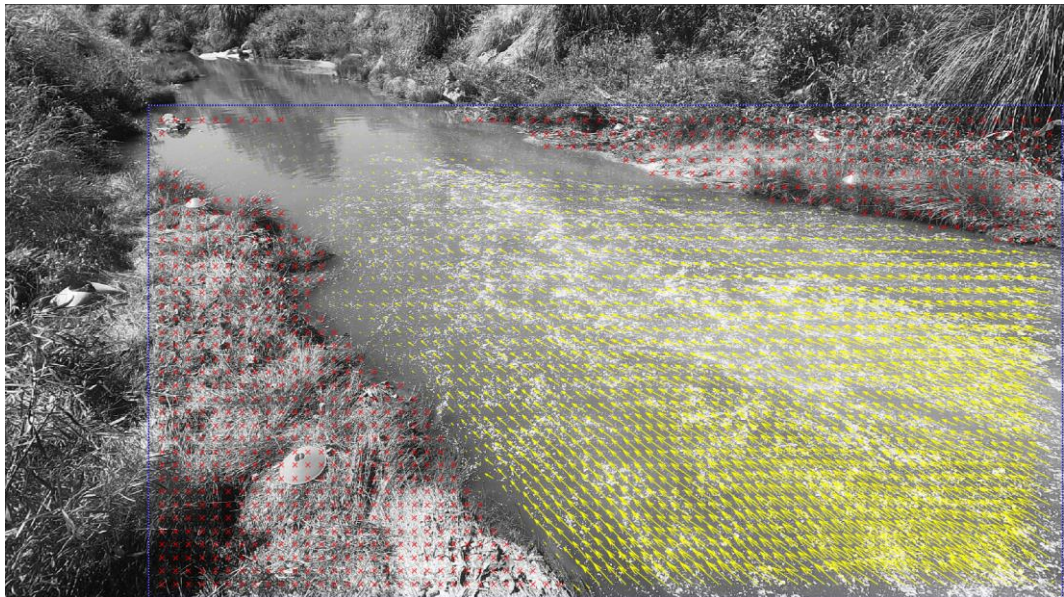


Figura 3.2. Ejemplo de campo de desplazamiento instantáneo en píxeles por imágenes, video con visión oblicua

- d) **Rectificación de Resultados:** se implementará la rectificación utilizando cuatro Puntos de Control (dos por margen) ubicados en un plano cercano al definido por la superficie libre del flujo (Figura 3.3). Las coordenadas en píxeles de los Puntos de Control se definirán manualmente como (x, y) , y las coordenadas reales se determinarán a partir de los datos obtenidos por GPS diferencial (Este, Norte).

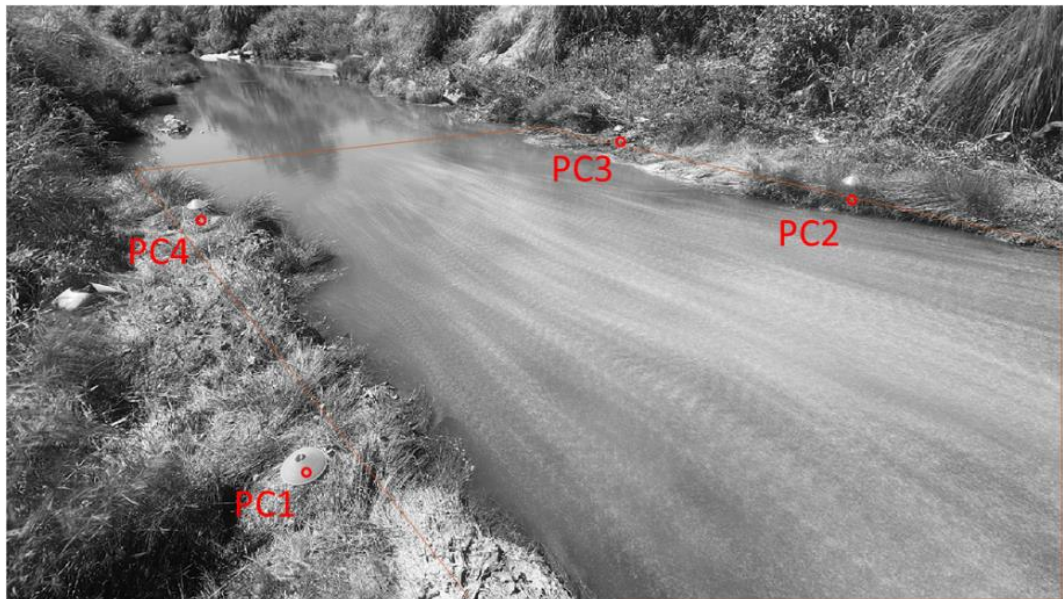


Figura 3.3. Ubicación de Puntos de Control (PCs) sobre imagen original de video con visión oblicua.

Se realizará la rectificación de una única imagen para su uso exclusivo en la visualización de resultados, y se aplicará a la totalidad de los campos de velocidades obtenidos en la etapa anterior (ver Figura 3.4).

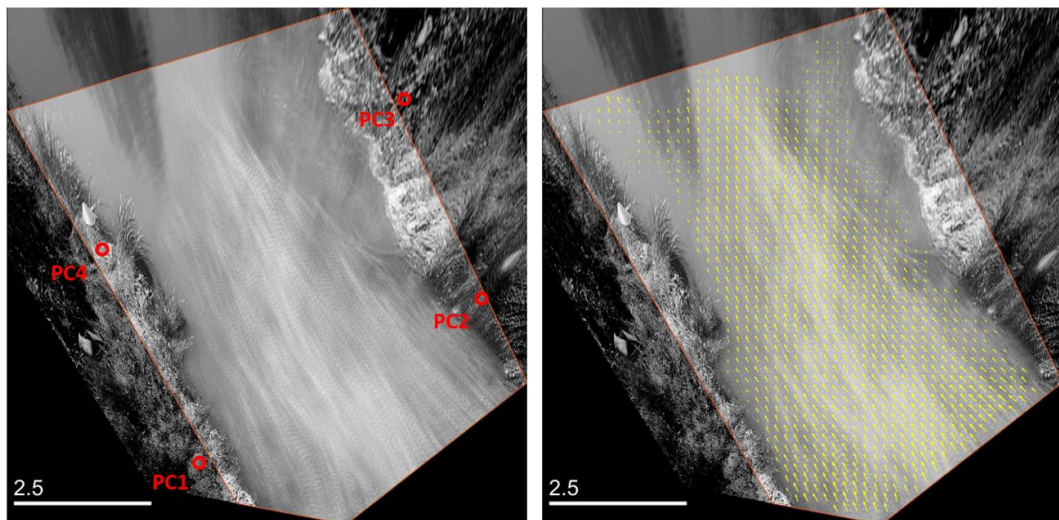


Figura 3.4. Izq.: Imagen rectificada con ubicación de Puntos de Control (PC). Der.: Ejemplo de campo de velocidades rectificado.

A continuación, en la

Tabla 3.3, se presentan para los diferentes PC las coordenadas relevadas con el GPS diferencial y su respectiva proyección en pixel sobre las imágenes.

Tabla 3.3. Coordenadas Reales de Puntos de Control y coordenadas en pixeles de sus proyecciones en las imágenes

ID	Este	Norte	x	y
PC1	5624966.73	6135923.78	727	1129.5
PC2	5624971.83	6135926.74	2048	471
PC3	5624970.43	6135930.35	1488	330.25
PC4	5624964.98	6135927.63	472	520

- e) Extracciones de perfiles de velocidad superficiales instantáneos en XS1: luego de obtener los campos de velocidades superficiales cuasi instantáneos, se procedió a extraer de cada uno de ellos un perfil de velocidades a lo largo de la sección de análisis XS1. Las coordenadas las extremidades de esta sección se detallan en la
- f) Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Coordenadas de la sección XS1 relevadas con GPS RTK

Margen	Este	Norte
Izquierda	5624966.73	6135923.78
Derecha	5624971.83	6135926.74

Este análisis de perfiles transversales (Figura 3.5) en el tiempo permitirá una comprensión más profunda de la variabilidad de la velocidad a lo ancho del arroyo en la sección XS1, proporcionando información para la validación de los resultados obtenidos mediante la técnica de velocimetría por imágenes. La extracción y comparación de estos perfiles será esencial para evaluar la concordancia con los perfiles de velocidades medidos con el Flow Tracker II, sirviendo como base para la evaluación de la técnica implementada.

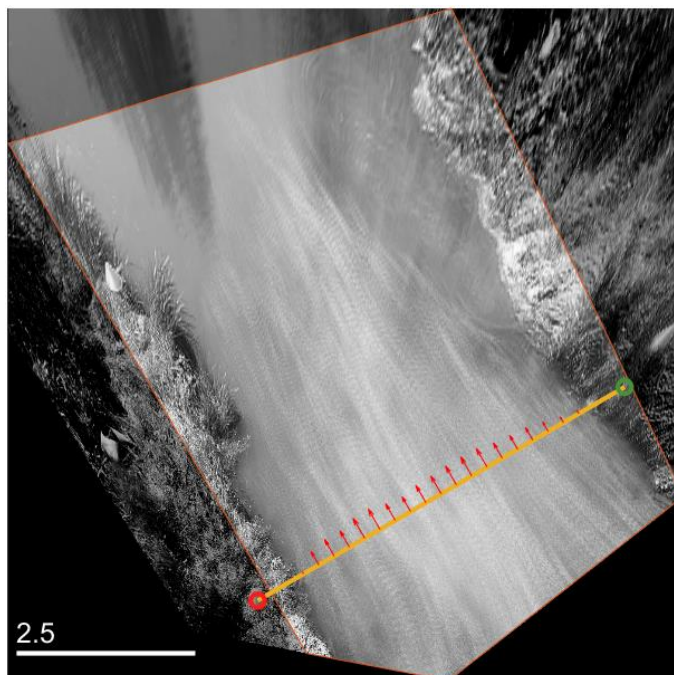


Figura 3.5. Ejemplo de perfil de velocidades extraído de los campos rectificados de video con visión oblicua.

- g) Análisis temporal de la sección transversal XS1: se procedió a graficar las series temporales de la componente de velocidad transversal con respecto a la orientación de la sección XS1, que configuran el perfil de velocidades en estudio (Figura 3.6). Durante la observación de las series temporales, se destacan fluctuaciones significativas en todas las localizaciones. Se identificaron casos puntuales de fluctuaciones más pronunciadas, especialmente en los segundos 40, 100, 130, 180, 260, 290 y 340.

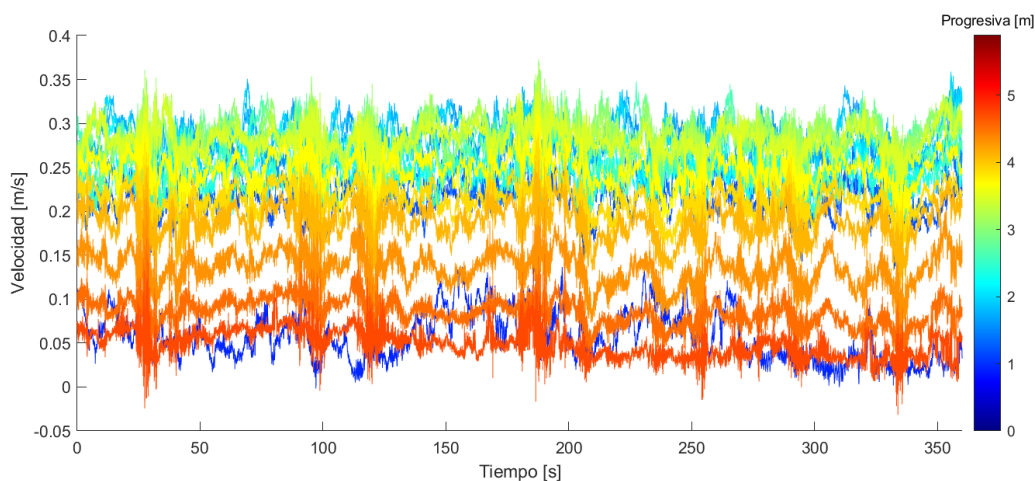


Figura 3.6. series temporales de la componente de velocidad transversal con respecto a la orientación de la sección XS1

Se llevó a cabo una inspección visual detallada de todas las imágenes disponibles extraídas, y se observó lo siguiente:

Homogeneidad del Sembrado Artificial: no se encontraron variaciones en el sembrado artificial a lo largo del tiempo. Se constató su homogeneidad tanto en el espacio como en el tiempo, proporcionando una condición adecuada para la aplicación de la técnica de velocimetría por imágenes.

Patrones Superficiales sin Alteraciones Anómalas: no se observaron alteraciones anómalas en los patrones superficiales generados por el sembrado artificial. La consistencia en estos patrones respalda la confiabilidad de los datos recopilados.

Presencia de Viento: se registró la presencia constante de viento durante todo el video. Momentos de ráfagas más intensas se identificaron por los movimientos excesivos de la vegetación en las márgenes del arroyo. Estos momentos coincidieron con las mayores fluctuaciones en las series temporales de velocidad.

Debido a estos hallazgos, se atribuyen las fluctuaciones identificadas en las series temporales de velocidad al efecto cortante del viento sobre la superficie libre del flujo. Se realizó el cálculo del perfil medio utilizando la totalidad de los datos disponibles de LSPIV, que abarca un periodo de 360 segundos de video, junto con su correspondiente desviación estándar. Se generó un gráfico comparativo con el perfil superficial obtenido mediante el Flow Tracker II (Figura 3.7).

El acuerdo general entre las velocidades obtenidas con el Flow Tracker II y las obtenidas mediante LSPIV es muy bueno. Más allá de esto, se identificaron diferencias significativas en la margen derecha del arroyo. Se destacó una discrepancia en el valor del Flow Tracker II en la progresiva de 4.3m aproximadamente, donde la señal acústica no mostró anomalías significativas. La presencia de un gradiente de velocidad marcado en esta zona resultó llamativa y podría estar relacionada con condiciones de viento local durante el tiempo de medición. Aunque esta hipótesis es actualmente difícil de validar, no se descarta debido a la presencia de fluctuaciones en las series temporales de velocidad relacionadas con viento vistas en la Figura 3.6.

El valor de la raíz del error medio cuadrático (RMSE) obtenido fue de 0.0326 m/s, lo que proporciona una medida cuantitativa de la discrepancia entre los perfiles de velocidad calculados mediante LSPIV y los obtenidos con el Flow Tracker II. Este análisis contribuye a la evaluación de la precisión y confiabilidad de la técnica implementada en condiciones específicas de la sección XS1.

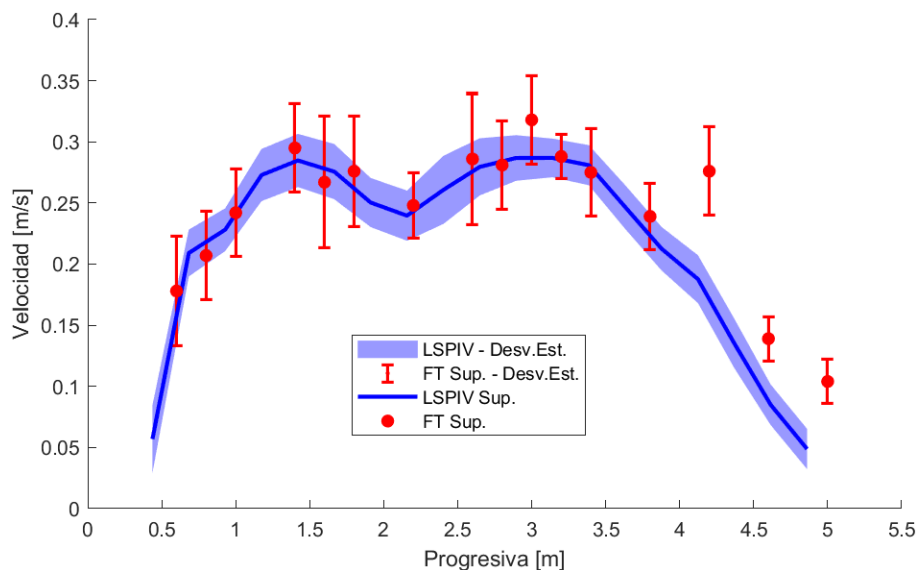


Figura 3.7. Gráfico comparativo del perfil superficial obtenido mediante el FlowTracker y el perfil de velocidad obtenido con LSPIV

- h) Evaluación de la sensibilidad a la duración de video procesado: Con el propósito de entender la influencia de la duración del video procesado, se ajustó la cantidad de resultados para calcular el perfil medio de velocidades. Iniciando con un solo perfil de velocidades del primer par de imágenes (0.033 segundos de video procesado), se progresó incrementando gradualmente la cantidad de perfiles hasta utilizar la totalidad disponible (360 segundos de video procesado). En cada paso, se calculó el RMSE respecto al perfil de velocidades medido con el FlowTracker II. Este análisis revela cómo la variación en el tiempo de video procesado impacta la concordancia entre los perfiles de velocidades obtenidos mediante LSPIV y los medidos con el FlowTracker II.

En la Figura 3.8 se observan ligeras variaciones del RMSE debidas a las fluctuaciones de velocidad mencionadas, convergiendo hacia un valor asintótico de aproximadamente 0.031 m/s. Es notable que este valor se alcanza rápidamente, incluso considerando un tiempo de video procesado de solo algunos segundos.

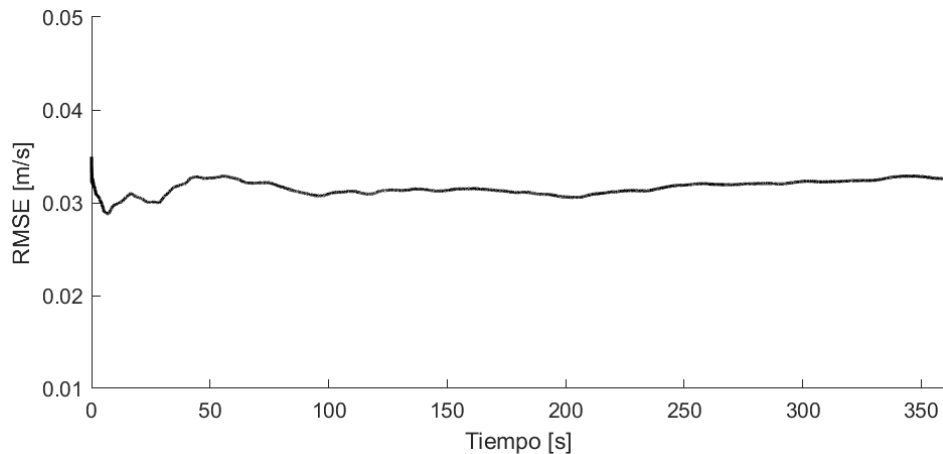


Figura 3.8. Variación de RMSE respecto a la duración de video utilizado para el cálculo del perfil medio de velocidad.

De manera similar, se evaluó la sensibilidad en la estimación de la velocidad media para cada progresiva en la sección de análisis. Se tomaron los valores de velocidad media estimados con diferentes tiempos de video procesado y se dividieron por la velocidad media estimada con 360 segundos de video (valor máximo de tiempo procesado disponible).

En la Figura 3.9 con la escala de colores (indicativa de la progresiva en la sección transversal), se observa que solo para los valores cercanos a las márgenes la variabilidad es relativamente alta, con una tendencia limitada hacia la estabilización del valor medio. No obstante, al excluir estos pocos datos, se aprecia una estabilización general de la media a partir de aproximadamente entre 30 y 60 segundos de video procesado.

Es relevante señalar que, según la experiencia del grupo de trabajo en la implementación de la técnica, este tiempo de estabilización suele ser significativamente menor, acercándose comúnmente a valores entre 5 y 10 segundos. La discrepancia en este caso se atribuye a las fluctuaciones en las series temporales de velocidad, causadas por los efectos cortantes del viento sobre la superficie libre del flujo.

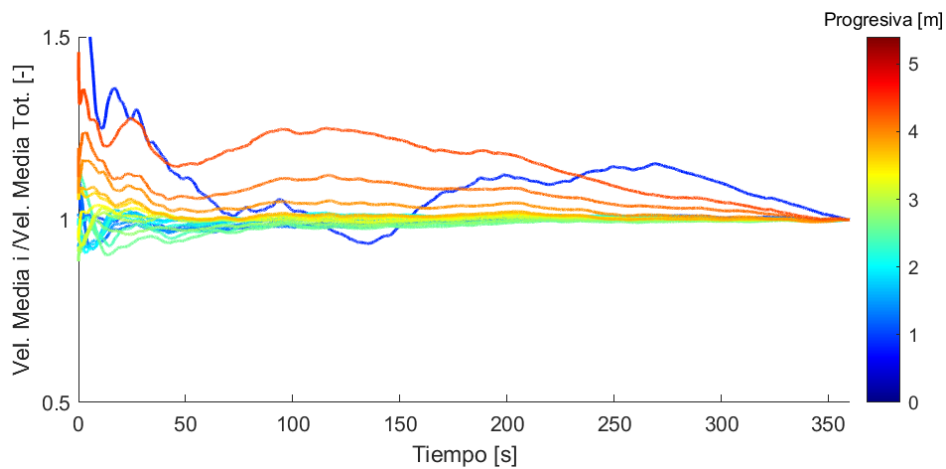


Figura 3.9. Variación de la velocidad media para cada progresiva respecto a la duración de video utilizado.

- i) Elección de la duración de video utilizado: En base al análisis anterior, se estableció que el tiempo de video procesado óptimo es de 60 segundos. Este valor se empleará en los análisis subsiguientes. Posteriormente, se exploró si existían variaciones en los errores al elegir un segmento específico de 60 segundos del video original. Para esto, se realizaron análisis similares a los anteriores, pero ahora utilizando una media móvil con una ventana de 1800 resultados (este valor surge al disponer de 30 resultados por cada segundo de video aproximadamente). Aunque se observaron algunas variaciones, estas no fueron sustanciales (Figura 3.10). La leve tendencia al aumento del RMSE a partir de los 200s puede explicarse fundamentalmente por dos razones: en primer lugar el intervalo temporal más cercano al final del sembrado suele presentar una menor cantidad de trazadores en superficie, y por otro lado, podría tratarse de una no estacionariedad propia del flujo. En última instancia, se determinó que se considerarán los primeros 60 segundos del video para los análisis posteriores.

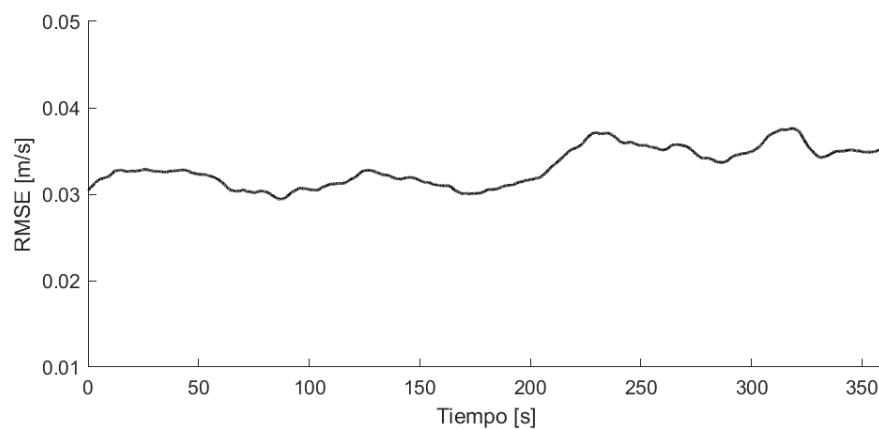


Figura 3.10. Variación de la media móvil del RMSE de un segmento de 60s de duración en función del tiempo del video

3.1.1.2. Sensibilidad al step

Un video es esencialmente una secuencia de imágenes capturadas a una tasa de muestreo constante (fps) para cámaras digitales convencionales. En la implementación de técnicas de velocimetría por imágenes, la variable 'step' se utiliza para definir cuántas imágenes consecutivas se extraerán de la secuencia original del video. Por ejemplo, un valor de step 1 extraería todas las imágenes disponibles, mientras que un valor de step 2 extraería una imagen cada dos disponibles, modificando así el tiempo entre imágenes en la secuencia a procesar.

La elección de este valor depende de factores como la resolución de las imágenes, la tasa de muestreo del video, el desplazamiento en píxeles de los patrones superficiales y el tamaño de las ventanas de interrogación. Sin embargo, las cámaras convencionales utilizadas para LSPIV en campo (teléfonos celulares, GoPro, cámaras réflex, drones, etc.) generalmente tienen tasas de muestreo entre 30 y 60 fps, adecuadas para la implementación de la técnica. En la práctica, los valores usuales de 'step' varían entre 1 y 3, salvo casos excepcionales.

En este análisis, se evaluará la sensibilidad en la estimación de velocidades superficiales variando el parámetro 'step'. La parametrización restante se definirá con valores usuales y recomendados, similar al análisis anterior. Se utilizará el perfil superficial medido con técnica hidroacústica en la sección XS1 como referencia, y se empleará el RMSE como estadístico. El procesamiento se llevará a cabo con los primeros 60 segundos de video, como se estableció anteriormente, utilizando valores de 'step' definidos en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Valores de Step utilizados para realizar el análisis de sensibilidad.

Step	Tiempo entre imágenes [s]
1	0.0333
2	0.0666
3	0.0999
4	0.1332
5	0.1665
10	0.3330

En la Tabla 3.6 y

Tabla 3.7 se proporcionan detalles sobre los perfiles de velocidad medios y los perfiles de desviación estándar de la media en la sección XS1, obtenidos bajo las diversas condiciones analizadas. Los valores definidos como *NaN* (Not a Number) se corresponden a localizaciones en donde no se disponía de velocidades estimadas por LSPIV. Estas se encuentran en las zonas más cercanas a las márgenes, en donde en función del tamaño de ventana de interrogación utilizado puede suceder que no existan estimaciones en dichas progresivas. La representación gráfica de esta información se presenta en la Figura 3.11. No se observan variaciones significativas tanto en los valores medios como en la dispersión de los datos, siendo coherentes con los resultados obtenidos mediante técnicas hidroacústicas.

Sin embargo, se visualiza una leve tendencia hacia el aumento de la velocidad media en la margen derecha a medida que se incrementa el tiempo entre imágenes. Esta margen se encuentra más distante de la cámara, lo que, debido a efectos de perspectiva, resulta en una menor resolución y, por ende, mayores incertidumbres y sensibilidad a la parametrización del procesamiento. Estos hallazgos son consistentes con la comprensión intuitiva de cómo la distancia y la perspectiva pueden influir en la precisión de la técnica de LSPIV.

Tabla 3.6. Perfiles de velocidad media sobre la sección XS1 para diferentes valores de Step para video con visual oblicua.

Progresiva [m]	Velocidad sección XS1 [m/s]					
	<i>Step1</i>	<i>Step2</i>	<i>Step3</i>	<i>Step4</i>	<i>Step5</i>	<i>Step10</i>
0.192	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
0.437	0.060	0.062	0.059	0.058	0.054	0.061
0.683	0.206	0.201	0.201	0.201	0.201	0.200
0.929	0.221	0.223	0.223	0.224	0.225	0.226
1.175	0.266	0.266	0.268	0.269	0.270	0.270
1.420	0.282	0.282	0.281	0.280	0.279	0.276
1.666	0.273	0.272	0.271	0.270	0.270	0.269
1.912	0.249	0.248	0.248	0.247	0.246	0.247
2.158	0.236	0.237	0.237	0.237	0.237	0.236
2.403	0.253	0.254	0.253	0.254	0.255	0.256
2.649	0.269	0.270	0.269	0.268	0.267	0.266
2.895	0.280	0.281	0.283	0.282	0.281	0.281
3.141	0.286	0.286	0.290	0.288	0.287	0.289
3.386	0.281	0.280	0.284	0.283	0.282	0.283
3.632	0.247	0.243	0.249	0.250	0.249	0.248
3.878	0.212	0.211	0.215	0.218	0.220	0.223
4.124	0.188	0.192	0.191	0.191	0.190	0.193
4.369	0.138	0.157	0.151	0.148	0.147	0.146
4.615	0.090	0.101	0.120	0.133	0.130	0.145
4.861	0.057	0.062	0.072	0.079	0.086	0.099
5.107	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN

Tabla 3.7. Perfiles de desvío estándar de la media sobre la sección XS1 para diferentes valores de Step para video con visual oblicua.

Progresiva [m]	Desvío Estándar [m/s]					
	<i>Step1</i>	<i>Step2</i>	<i>Step3</i>	<i>Step4</i>	<i>Step5</i>	<i>Step10</i>
0.192	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
0.437	0.020	0.022	0.033	0.041	0.046	0.050
0.683	0.018	0.017	0.018	0.018	0.018	0.018
0.929	0.015	0.015	0.015	0.015	0.016	0.018
1.175	0.019	0.018	0.019	0.018	0.018	0.019
1.420	0.019	0.019	0.019	0.020	0.020	0.020
1.666	0.022	0.021	0.022	0.022	0.022	0.022
1.912	0.021	0.019	0.019	0.019	0.020	0.020
2.158	0.018	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016
2.403	0.027	0.027	0.028	0.030	0.032	0.033
2.649	0.025	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023
2.895	0.017	0.013	0.014	0.015	0.016	0.018
3.141	0.018	0.017	0.016	0.017	0.018	0.018
3.386	0.018	0.017	0.015	0.017	0.018	0.018
3.632	0.016	0.014	0.012	0.017	0.015	0.018
3.878	0.017	0.013	0.015	0.018	0.019	0.026
4.124	0.018	0.014	0.017	0.017	0.018	0.026
4.369	0.018	0.018	0.015	0.016	0.019	0.022
4.615	0.015	0.017	0.023	0.023	0.021	0.022
4.861	0.014	0.013	0.022	0.030	0.034	0.025
5.107	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN

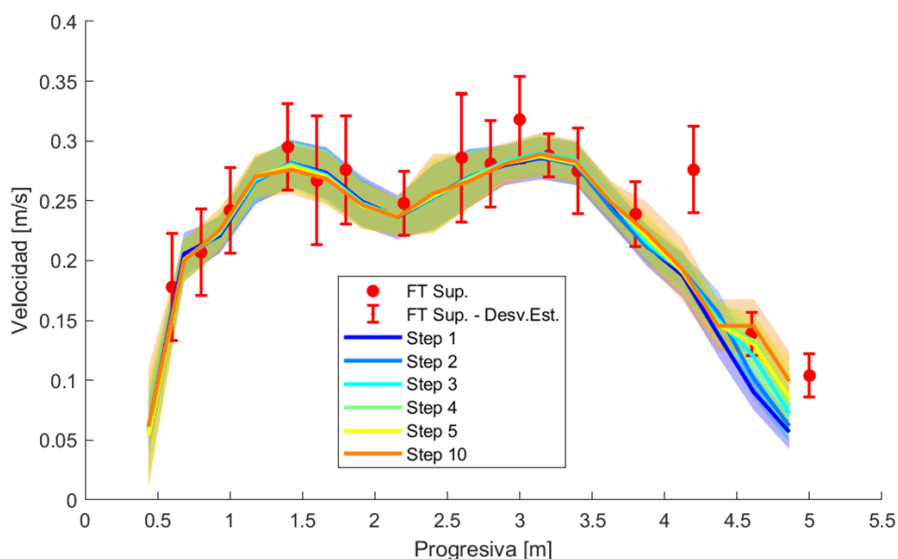


Figura 3.11. Perfiles de velocidad media de LSPIV para diferentes valores de Step en comparación con mediciones hidroacústicas para video con visual oblicua.

Al igual que con la variable de duración del video procesado, se calcularon los valores de RMSE para cada uno de los perfiles disponibles en función de la variación del parámetro 'step'. Los resultados se detallan en la Tabla 3.8 y se presentan de forma gráfica en la Figura 3.12. No se observan variaciones significativas en la magnitud del error en relación con la variación del 'step', lo que demuestra la robustez de los resultados de la técnica en esta situación particular de ajuste de dicho parámetro.

Tabla 3.8. Estimaciones de la raíz del error medio cuadrático de perfiles de velocidades obtenidos con diferentes Steps mediante LSPIV para video con visual oblicua.

Step	Tiempo entre imágenes [s]	RMSE [m/s]
1	0.0333	0.033
2	0.0666	0.030
3	0.0999	0.029
4	0.1332	0.029
5	0.1665	0.030
10	0.3330	0.029

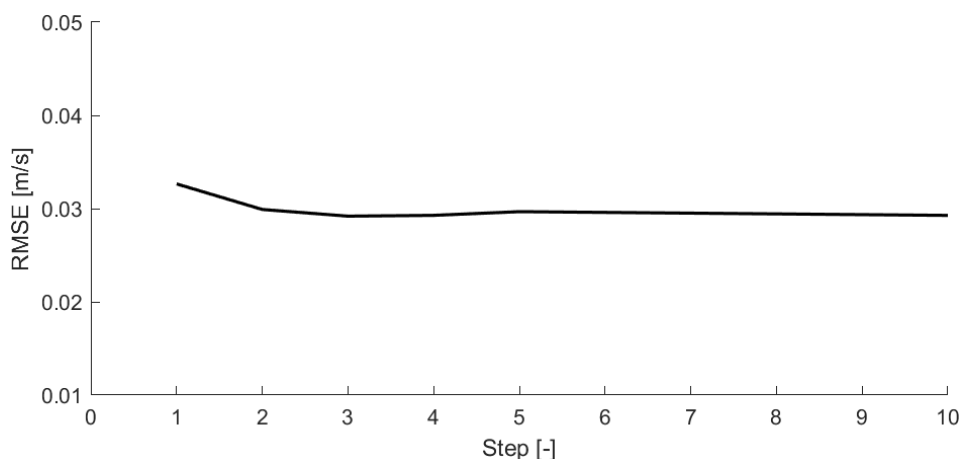


Figura 3.12. Variación del RMSE para cada uno de los perfiles de velocidades obtenidos con diferentes Steps mediante LSPIV para video con visual oblicua.

Para los análisis subsiguientes, se optará por utilizar un valor de 'step' igual a 2, lo que permite reducir el tiempo de procesamiento a la mitad al procesar la mitad de las imágenes disponibles.

3.1.1.3. Sensibilidad al tamaño de ventana de interrogación

La ventana de interrogación es una subregión de la imagen sobre la cual se aplica el algoritmo de correlación cruzada para la determinación del desplazamiento medio del patrón superficial que sea visible en la misma. La elección del tamaño de esta ventana depende de varios factores, entre los que se destacan la resolución de las imágenes, el desplazamiento en píxeles esperado de los patrones superficiales, y la resolución espacial deseada de los resultados. Al usar algoritmos de correlación basados en la transformada de Fourier de imágenes, el tamaño de estas ventanas se define como potencias de 2.

Además de definir el tamaño de las ventanas, es posible realizar múltiples pasadas de correlación, que permiten evitar efectos indeseados de Aliasing, aumentar la precisión en las estimaciones de desplazamientos de los patrones visibles, aumentar la resolución espacial de los resultados y ampliar el rango dinámico de los mismos. En la práctica, para la estimación de velocidades en cursos naturales mediante LSPIV se utilizan dos pasadas, ya que usualmente no es necesario disponer de campos de velocidades con resoluciones espaciales exageradas para la estimación de un perfil medio de velocidad necesario para el cálculo de caudal líquido. Otro último aspecto, es que estas ventanas pueden superponerse espacialmente para aumentar la resolución de la grilla de resultados.

En esta ocasión, se optó por fijar una cantidad de pasadas igual a 2 y una superposición de ventanas del 50% (lo usualmente aplicado en estos casos). Para analizar la sensibilidad al tamaño de ventana se definieron tres configuraciones que se detallan en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9. Configuraciones de tamaños de ventanas de interrogación analizadas para el video con visual oblicua.

Configuración	Tamaño de Ventana [px]		Superposición [%]
	Pasada 1	Pasada 2	
1	256	128	50
2	128	64	50
3	64	32	50

En la Tabla 3.10 y la Tabla 3.11 se presentan los perfiles medios de velocidad junto con sus rangos de desviación estándar para las tres configuraciones analizadas, en comparación con los datos hidroacústicos de referencia. Estos resultados también se ilustran gráficamente en la Figura 16. Se observan ligeras diferencias entre ellos, principalmente para la configuración 3, que presentaba un tamaño final de ventana menor. Esto implica una mayor capacidad de detección de gradientes de velocidades (como se observa en las progresivas 1.4m y 3.4m), pero también una mayor sensibilidad a las condiciones de visualización de patrones superficiales debido a la menor área utilizada en la correlación cruzada.

Las diferencias encontradas no fueron sustanciales, reflejándose en valores de RMSE similares, como se describen en la Tabla 3.12 y se presentan en la Figura 3.14.

Tabla 3.10. Perfiles de velocidad media sobre la sección XS1 para diferentes tamaños de ventanas de interrogación para video con visual oblicua.

Progresiva	Velocidad Transversal [m/s]		
	Config. 1	Config. 2	Config. 3
0.192	NaN	NaN	NaN
0.437	NaN	0.062	0.184
0.683	0.196	0.201	0.217
0.929	0.229	0.223	0.217
1.175	0.250	0.266	0.249
1.420	0.273	0.282	0.296
1.666	0.274	0.272	0.264
1.912	0.246	0.248	0.234
2.158	0.242	0.237	0.229
2.403	0.255	0.254	0.260
2.649	0.262	0.270	0.271
2.895	0.276	0.281	0.275
3.141	0.274	0.286	0.287
3.386	0.268	0.280	0.282
3.632	0.264	0.243	0.242
3.878	0.235	0.211	0.235
4.124	0.169	0.192	0.170
4.369	0.142	0.157	0.157
4.615	0.102	0.101	0.106
4.861	NaN	0.062	0.042
5.107	NaN	NaN	NaN

Tabla 3.11. Perfiles de desvío estándar de la media sobre la sección XS1 para diferentes tamaños de ventanas de interrogación para video con visual oblicua.

Progresiva	Desvío Estándar [m/s]		
	Config. 1	Config. 2	Config. 3
0.192	NaN	NaN	NaN
0.437	NaN	0.022	0.024
0.683	0.015	0.017	0.019
0.929	0.012	0.015	0.020
1.175	0.015	0.018	0.025
1.420	0.015	0.019	0.020
1.666	0.018	0.021	0.025
1.912	0.016	0.019	0.020
2.158	0.013	0.016	0.021
2.403	0.012	0.027	0.036
2.649	0.013	0.023	0.026
2.895	0.010	0.013	0.018
3.141	0.009	0.017	0.021
3.386	0.011	0.017	0.017
3.632	0.010	0.014	0.016
3.878	0.010	0.013	0.017
4.124	0.014	0.014	0.017
4.369	0.016	0.018	0.018
4.615	0.017	0.017	0.013
4.861	NaN	0.013	0.008
5.107	NaN	NaN	NaN

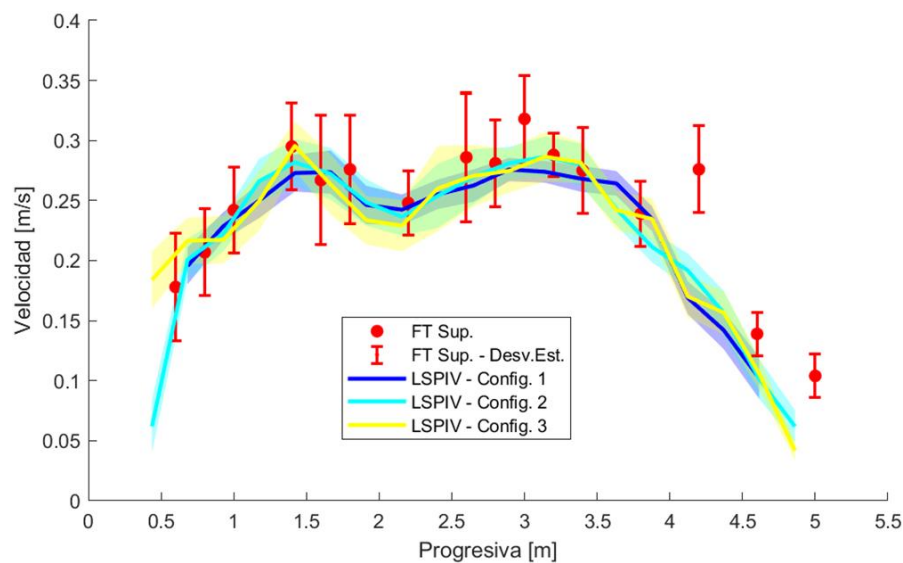


Figura 3.13. Perfiles de velocidad media de LSPIV para diferentes configuraciones de tamaño de ventanas en comparación con mediciones hidroacústicas para video con visual oblicua.

Tabla 3.12. Valores del RMSE para cada configuración de tamaño de ventana para video con visual oblicua.

Configuración	RMSE [m/s]
1	0.036
2	0.030
3	0.034

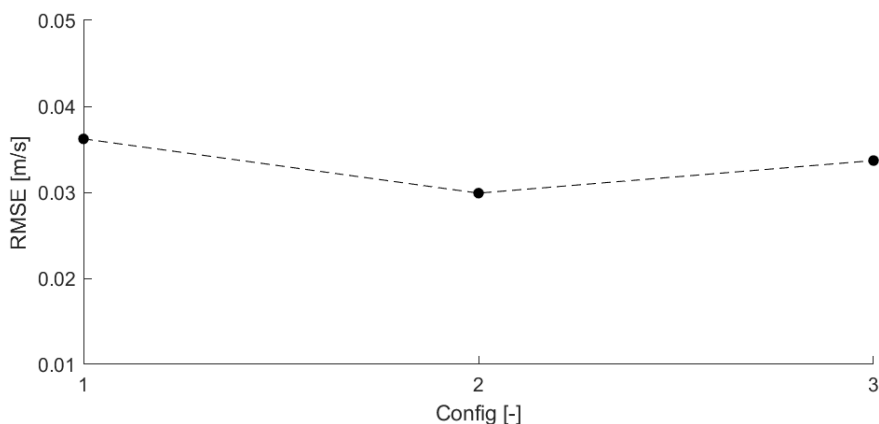


Figura 3.14. Gráfico del valor del RMSE para cada configuración de tamaño de ventana para video con visual oblicua.

Se opta por definir como óptima a la configuración número 2, que es aquella que se había definido como ‘estándar’ para la realización de los análisis anteriores. Y a su vez, se corresponde a una configuración usualmente utilizada en la implementación de LSPIV en cursos naturales para la estimación de caudales líquidos.

3.1.2. Análisis de sensibilidad de los métodos de relevamiento de datos topobatimétricos.

En esta sección, evaluaremos la sensibilidad a la rectificación de los resultados en dos casos diferentes. En el primer caso, consideraremos la disponibilidad de instrumentos como GPS diferencial o estación total. En el segundo caso, exploraremos la situación en la que no se cuenta con estos instrumentos de alta precisión, teniendo únicamente a disposición un palo graduado/regla graduada y cinta métrica para el relevamiento de la batimetría y de los Puntos de Control (PC) respectivamente. Se analizarán los videos con los parámetros determinado en la sección 3.1.1 (ver en Tabla 3.13)

Tabla 3.13. Parámetros de procesamiento utilizados para el análisis de sensibilidad de los métodos de relevamiento de datos batimétricos y topográficos para el video con visual oblicua.

Duración:	De 00:00:00 a 00:01:00
Step:	2
Ventanas de interrogación	128px y 64px

3.1.2.1. Sensibilidad al relevamiento batimétrico

Se llevó a cabo el relevamiento topográfico de la batimetría en la sección XS1 mediante dos metodologías distintas: una utilizando GPS y la otra sin contar con este dispositivo de alta precisión. Además, se incluyó una tercera opción de batimetría utilizando los datos proporcionados por el FlowTracker, ya que se encontraban disponibles:

- GPS: Utilizando un GPS diferencial RTK se relevaron posiciones planimétricas y altimétricas.
- Palo graduado: Se utilizó un palo de madera al que se le adicionó un centímetro plástico. Respecto a las progresivas se utilizó una cinta métrica dispuesta transversal al flujo en coincidencia con la sección XS1. Metodología usualmente empelada si no se dispone de instrumental más sofisticado.
- FlowTracker: Se utilizó la batimetría relevada durante la medición de caudal líquido. Para ello la varilla de soporte del instrumental se encuentra graduada cada 2cm, y se utiliza para medir la profundidad local en la zona de medición. Respecto a las progresivas se utilizó una cinta métrica dispuesta transversal al flujo en coincidencia con la sección XS1.

En la Figura 3.15 se muestra la comparación de las batimetrías disponibles, observándose en términos generales un buen acuerdo entre ellas. Para el caso del palo Graduado, en la zona cercana a margen derecha y en parte del tramo central, las profundidades relevadas son algunos centímetros mayores respecto a los otros métodos. Esto se deba probablemente al palo graduado utilizado que no presentaba una adecuada verticalidad del centímetro adicionado y también que éste podría haberse desplazado levemente durante las mediciones. El FlowTracker si bien es en esencia un ‘palo metálico’ graduado, posee en su parte inferior una base rectangular para dar estabilidad al instrumento, además de garantizar una adecuada graduación, la base evita que se hunda en el lecho.

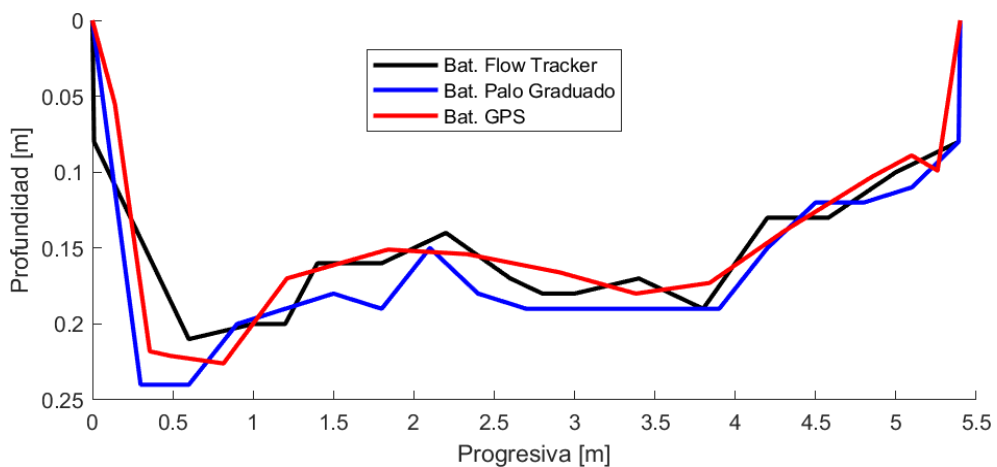


Figura 3.15. Batimetrías relevadas con diferentes metodologías en la sección XS1

Se utilizaron las tres batimetrías para la estimación de caudal líquido. Respecto al perfil de velocidad de LSPIV utilizado se trató de aquel derivado de la parametrización óptima definida anteriormente (60s de video procesado, step igual a 2, y tamaños de ventana de 128px y 64px). Para el cálculo de caudal se utilizó el método de la sección mediana. Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 3.14, tanto para un valor de alpha unitario como de 0.85, este último sería el utilizado en este caso particular si no se conociera información alguna sobre la relación velocidad media vs. Velocidad superficial y el flujo no se encuentra en condición de crecida. Los resultados obtenidos utilizando batimetrías de FlowTracker y GPS son muy consistentes, mientras que para el caso de palo graduado se presentan caudales ~10% superiores derivado del aumento del área por la situación ya comentada. Esto mismo se observa en las curvas de caudal acumulado de la Figura 3.16, en donde se presenta un despegue de la curva acumulada sobre margen izquierda y en la zona central del cauce aproximadamente en la progresiva 1.50m.

Tabla 3.14. Estimaciones de caudal líquido mediante LSPIV utilizando diferentes batimetrías para el video con visual oblicua.

Batimetría	Área [m ²]	$\alpha = 1.00$		$\alpha = 0.85$	
		Caudal [m ³ /s]	Vel. Media [m/s]	Caudal [m ³ /s]	Vel. Media [m/s]
FlowTracker	0.840	0.174	0.207	0.148	0.155
Palo Graduado	0.917	0.188	0.205	0.160	0.174
GPS	0.829	0.172	0.207	0.146	0.176

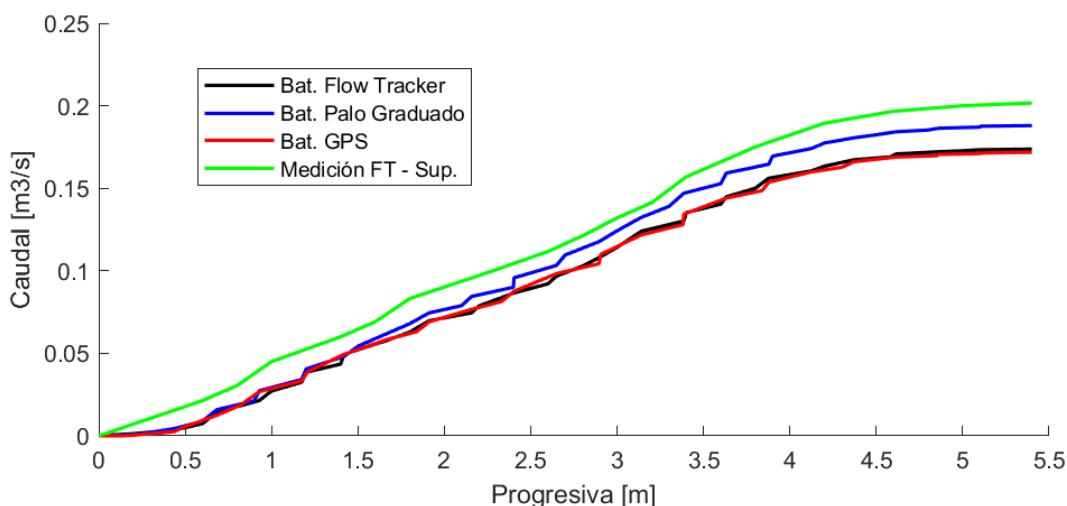


Figura 3.16. Curvas de caudal acumulado según el tipo de batimetría para el video con visual oblicua.

En la Tabla 3.15 se presentan los resultados de las mediciones con FlowTracker en ambas secciones de estudio. Se incluyen estimaciones de caudal utilizando los perfiles de velocidad superficial medidos (Método: caudal superficial). Al comparar los caudales superficiales con los

obtenidos mediante LSPIV para un $\alpha = 1.0$, se observa una gran coherencia para el dato de la sección XS2. Sin embargo, para XS1 se obtuvo un valor ligeramente superior. La comparación de las curvas acumuladas de caudal en la Figura 3.16 revela que esta diferencia puede atribuirse, por un lado, al caudal muy cercano a la margen izquierda, donde la curva correspondiente a la medición con FlowTracker es superior a las obtenidas mediante LSPIV. Esto puede deberse a que en esa zona se encuentra la mayor profundidad del cauce, y el instrumento hidroacústico asigna un valor de velocidad en la margen vertical igual al inmediatamente adyacente, mientras que con LSPIV se asume una velocidad de margen nula y se realiza una interpolación entre datos. También se observa una discrepancia en la progresiva cercana a 4.30m, donde la velocidad medida con ADV fue superior a la estimada con imágenes. En la sección 3.3 se realizan comparaciones y análisis sobre los valores de caudal medio.

Tabla 3.15. Resultados de las mediciones superficiales con FlowTracker en las secciones XS1 y XS2

Instrumento	Sección	Método	Caudal [m ³ \s]	Área [m ²]	Ancho [m]	Vel. Media [m\s]
FT II	XS1	Caudal Superficial	0.202	0.85	5.4	0.237
FT II	XS2	Caudal Superficial	0.177	1.31	5.5	0.135

3.1.2.2. Sensibilidad a la rectificación de resultados

Se llevó a cabo el relevamiento de los puntos de control mediante dos metodologías distintas: una utilizando GPS y la otra sin contar con este dispositivo de alta precisión, midiendo con una cinta métrica las seis distancias entre los 4 PCs (ver Figura 3.17). La batimetría utilizada para el cálculo de caudal fue la del GPS y del FlowTracker para la rectificación GPS y con cinta respectivamente. Se eligió la batimetría del FlowTracker y no la del palo graduado, ya que creemos que el palo graduado mostraba diferencias con los otros métodos, suponiendo que se hundía en el barro. El FlowTracker, al ser también un palo graduado con una base rectangular, evita este problema.

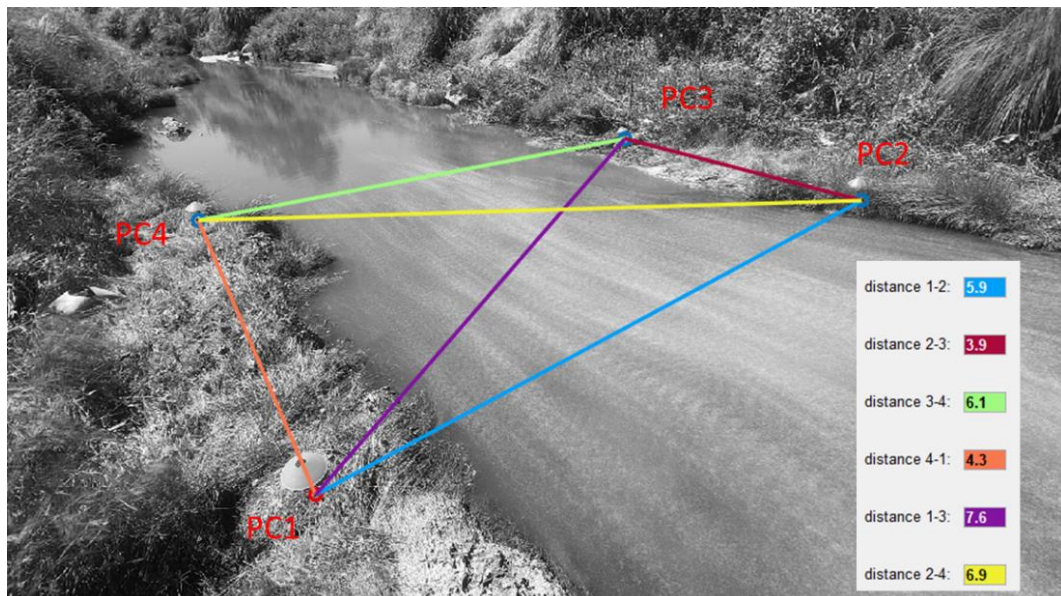


Figura 3.17. Distancias (6) medida con cinta métrica entre los 4 PCs

En la Figura 3.18, se pueden visualizar los perfiles de velocidad de la sección XS1 para cada metodología de rectificación. No se observan diferencias significativas en los perfiles. Además, en la Tabla 3.16, están reportados los valores de los RMSE respectivos a cada metodología. Los valores de RMSE de los perfiles de velocidad son muy parecidos. En cuanto a los valores de caudal, se pueden visualizar en la Tabla 3.17 utilizando $\alpha = 1.0$; la diferencia entre los caudales es despreciable.

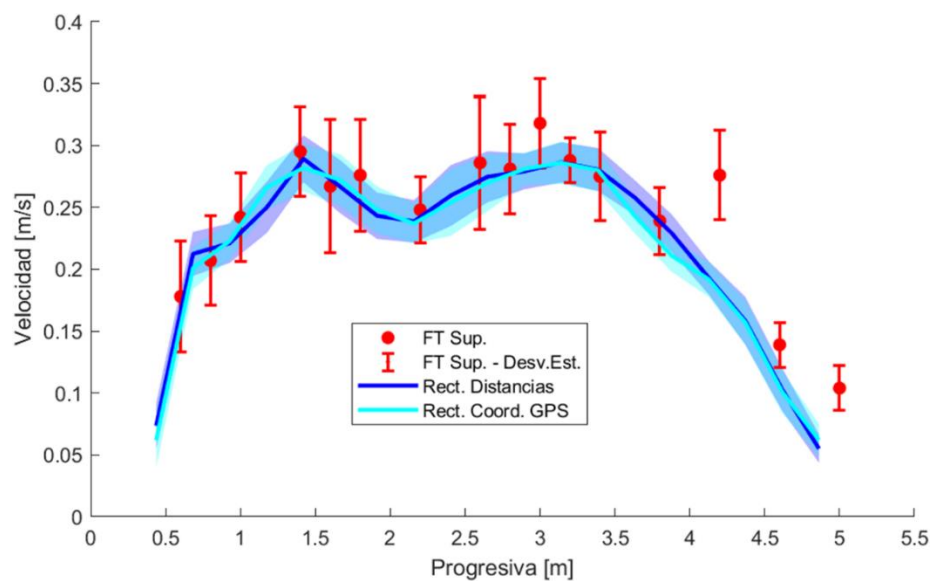


Figura 3.18. Perfiles de velocidad media de LSPIV para diferentes rectificaciones en comparación con mediciones hidroacústicas

Tabla 3.16. Estimaciones de la raíz del error medio cuadrático de perfiles de velocidades obtenidos con diferentes Rectificaciones.

Rectificación	RMSE [m/s]
GPS diferencial	0.030
Cinta métrica	0.029

Tabla 3.17. Estimaciones de caudal líquido mediante LSPIV utilizando diferentes rectificaciones

Rectificación	Área [m ²]	$\alpha = 1.00$	
		Caudal [m ³ /s]	Vel. Media [m/s]
Distancias	0.840	0.176	0.209
Coord. GPS	0.840	0.174	0.207

Las curvas de caudales acumulados sobre la progresiva tampoco muestran diferencia significativa (Figura 3.19). Esto señala que el valor de caudal no es sensible al método de relevamiento de las coordenadas de los PCs. Es relevante, ya que los instrumentos como GPS diferenciales son costosos, y la técnica de velocimetría por imágenes busca ser una alternativa económica a los instrumentos hidroacústicos. Es positivo poder prescindir del GPS para aplicar la velocimetría por imágenes.

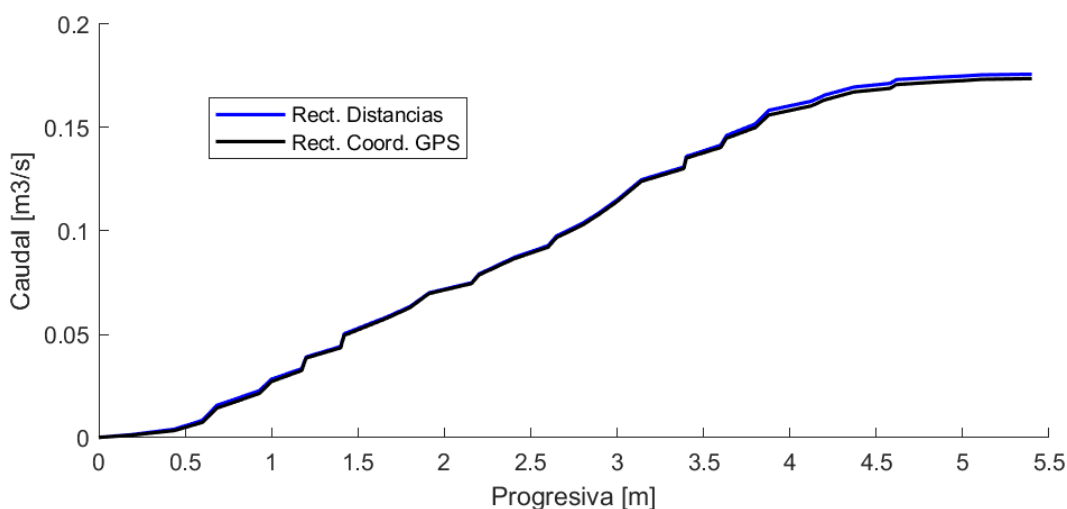


Figura 3.19. Curvas de caudal acumulado según el tipo de rectificación

3.2. Procesamiento y análisis de video con visual cenital (Drone)

Se presentarán en esta sección los análisis realizados sobre el video grabado desde una posición cenital a la superficie del flujo. Esta posición de cámara no produce ningún tipo de deformación por perspectiva sobre las imágenes por lo que solo es necesario realizar una

calibración de los resultados que se detallará en las siguientes secciones. A continuación la información sobre las condiciones de grabación del video con drone (Tabla 3.18):

Tabla 3.18. Características de la grabación del video con drone.

Nombre de archivo	DJI_0849_W.mp4
Resolución [px]	1920x1080px
Fps	30
FOV (Field Of View)	Lineal
Mejora del video	Sin suavizado de imagen ni estabilización automática de cámara
Soporte	Vehículo aéreo no tripulado
Duración total	00:08:15
Sembrado	Artificial, viruta de madera

3.2.1. Análisis de sensibilidad de los parámetros de procesamiento

En esta ocasión se realizará el análisis de sensibilidad de los parámetros de procesamiento *Step* y *Tamaño de ventana de interrogación*. No se realizará la sensibilidad a *Tiempo de video procesado* por los resultados favorables encontrados en el análisis del video con visual oblicua. Al igual que en el análisis anterior, cada parámetro será analizado de manera individual y se establecerá un conjunto inicial de parámetros estándar basado en las mejores prácticas de implementación y la experiencia del equipo de trabajo. Nuevamente se utilizará RMSE como estadístico de evaluación principal, tomando como velocidades de referencia a las descriptas en la Tabla 3.2.

Se describirán a continuación las etapas de procesamiento del video necesarias para la realización de los análisis de sensibilidad. Las mismas presentan pequeñas variaciones en comparación a lo mencionado en la sección 3.1.1.1:

- a) Extracción de Imágenes: se realizará la extracción de imágenes en escala de grises, sin aplicar corrección de distorsión por lente. La resolución de las imágenes será idéntica a la de grabación (1920x1080px). Se extraerán todas las imágenes disponibles con un "Step" igual a 1. El análisis se limitará al primer intervalo temporal de 60s de duración en el cual se observa un sembrado artificial homogéneo en toda el área de estudio, comprendido entre los segundos 180 y 240.
- b) Pre-Procesamiento de Imágenes: se aplicará un filtro de adaptación de contraste CLAHE para mejorar la visualización de patrones superficiales (Figura 3.20).

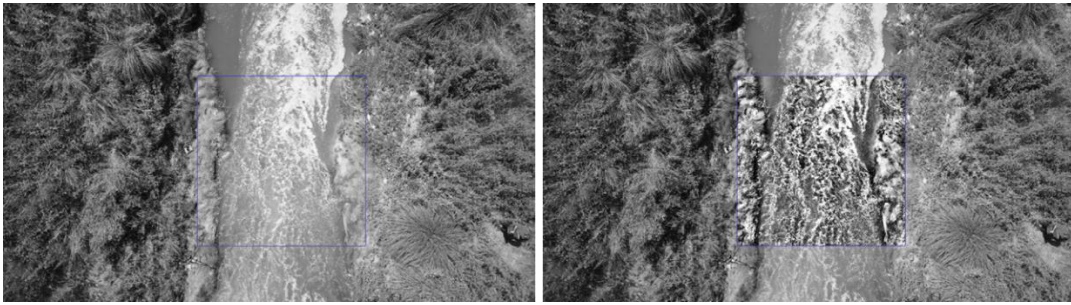


Figura 3.20. Imagen original – Imagen con filtro CLAHE aplicado sobre ROI, video con visión cenital

- c) Procesamiento: se aplicará el algoritmo FFT con doble pasada y deformación de ventana. Se utilizarán tamaños de área de interés (IA) de 64 píxeles y 32 píxeles, ambos con una superposición del 50%. Los campos de velocidades cuasi instantáneos se obtendrán en píxeles por par de imágenes (Figura 3.21).

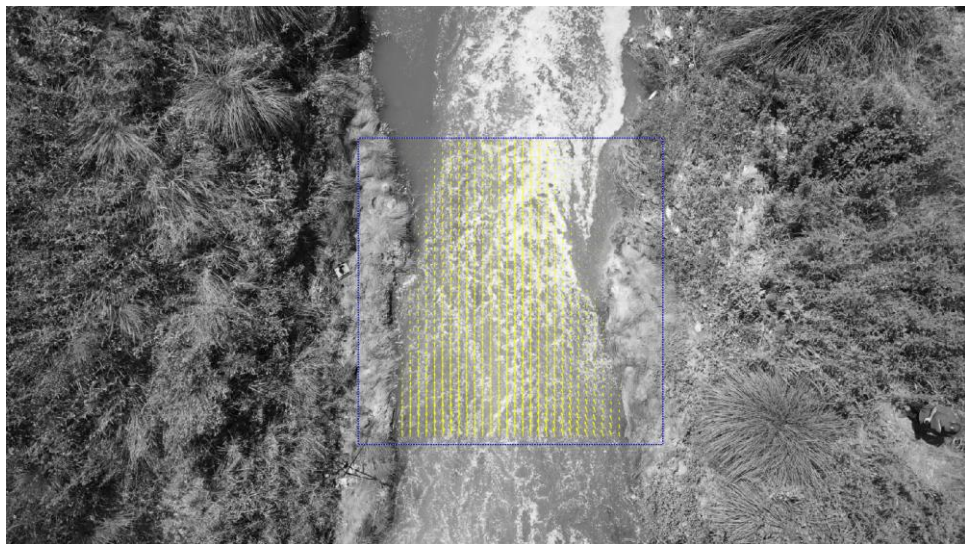


Figura 3.21. Ejemplo de campo de desplazamiento instantáneo en píxeles por imágenes, video con visión cenital

- d) Rectificación de Resultados: debido a que la posición de la cámara fue cenital a la superficie del flujo, no es necesario realizar corrección por perspectiva. Se implementará una calibración del tamaño real de pixel a nivel de terreno. Para ello se determina la distancia en píxeles entre dos Puntos de Control relevados (Figura 3.22). Esta misma distancia fue medida en campo tomando un valor de 6.90m. Por lo que la escala de pixel a nivel de terreno es de 0.0114m/px. Con dicho valor y el tiempo entre imágenes consecutivas es posible transformar los campos de velocidades de [px/par de imágenes] a [m/s].



Figura 3.22. Ubicación de Puntos de Control y distancia real entre ellos para la definición de la escala de pixel, video con visión cenital.

- e) Extracciones de perfiles de velocidades superficiales instantáneos en XS1: de los campos de velocidades expresados en [m/s] se procedió a extraer de cada uno de ellos un perfil de velocidades a lo largo de la sección de análisis XS1. Ejemplo de esto se muestra en la Figura 3.23. A partir de los perfiles de velocidad instantáneos sobre la sección es posible calcular el perfil medio y el desvío estándar de la velocidad que será utilizado para la comparación con las velocidades de referencia del FlowTracker II.

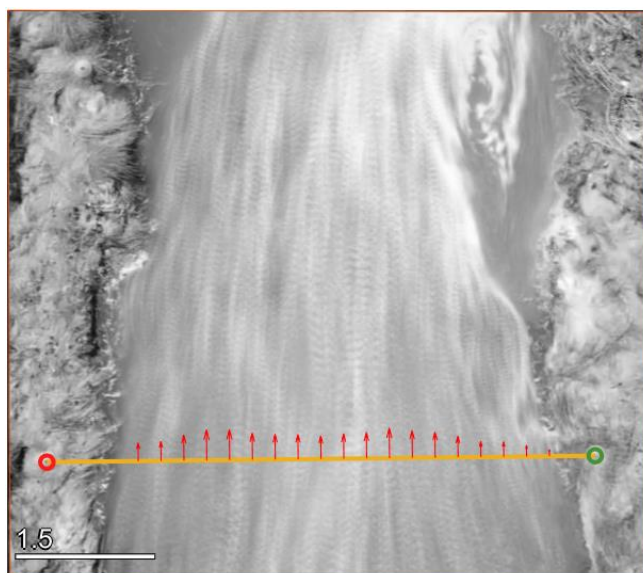


Figura 3.23. Ejemplo de perfil de velocidades extraído de los campos rectificados de video con visión oblicua.

Este procedimiento se aplicó en cada caso de análisis de sensibilidad que se desarrollarán a continuación, con las variaciones paramétricas correspondientes.

3.2.1.1. Sensibilidad al step

En este análisis, se evaluará la sensibilidad en la estimación de velocidades superficiales variando el parámetro 'step'. El procedimiento empleado será similar a los realizado sobre el video con visual oblicua (Sección 3.1.1.2). Se utilizará el perfil superficial medido con técnica hidroacústica en la sección XS1 como referencia, y se empleará el RMSE como estadístico de evaluación de performance. Los valores de step utilizados serán idénticos al análisis anterior, variando el mismo entre 1 y 10 (para más detalle consulte la Tabla 3.5).

En la Tabla 3.19 y

Tabla 3.20 se proporcionan detalles sobre los perfiles de velocidad medios y los perfiles de desviación estándar de la media en la sección XS1, obtenidos bajo las diversas condiciones analizadas. Esta misma información se muestra gráficamente en la Figura 3.24. No se observan variaciones significativas en los valores medios siendo estos coherentes con las velocidades de referencia. Respecto al desvío estándar del perfil medio, para la condición de step igual a 1 se obtuvieron valores levemente superiores al resto. Esto se debe a la relación entre la escala de tamaño de pixel y el desplazamiento medio de trazadores entre imágenes sucesivas en pixeles. La velocidad media superficial es de $\sim 0.25\text{m/s}$, es decir que para un step igual a 1 (tiempo entre imágenes de 0.0333s) el desplazamiento medio de los trazadores es de aproximadamente 0.01m . Este valor es muy cercano a la escala de tamaño de pixel (0.0114m/px), es decir que en promedio los trazadores se desplazan 1px en cada par de imágenes sucesivas. Esto conlleva que se aumenten las incertidumbres en la estimación de velocidades por una cuestión inherente a la técnica vinculada a la detección del pico de correlación cruzada.

En contraposición a lo observado en los resultados del video grabado con GoPro, los resultados obtenidos sobre margen derecha presentan una muy buena coherencia con los datos de referencia. Esto se debe a que la visual de cámara cenital, en la que no se presentan distorsiones por perspectiva. Permitiendo tener una resolución espacial idéntica en todo el ancho de la sección transversal.

Tabla 3.19. Perfiles de velocidad media sobre la sección XS1 para diferentes valores de Step para video con visual cenital.

Progresiva [m]	Velocidad sección XS1 [m/s]					
	<i>Step1</i>	<i>Step2</i>	<i>Step3</i>	<i>Step4</i>	<i>Step5</i>	<i>Step10</i>
0.682	0.183	0.195	0.202	0.203	0.206	0.211
0.928	0.219	0.221	0.227	0.230	0.233	0.232
1.173	0.243	0.254	0.254	0.255	0.255	0.254
1.419	0.284	0.286	0.288	0.288	0.288	0.290
1.664	0.276	0.281	0.283	0.283	0.283	0.284
1.910	0.250	0.265	0.266	0.266	0.266	0.266
2.155	0.234	0.241	0.242	0.241	0.241	0.241
2.401	0.236	0.243	0.244	0.244	0.244	0.244
2.647	0.257	0.269	0.271	0.271	0.271	0.272
2.892	0.272	0.277	0.279	0.279	0.279	0.280
3.138	0.279	0.286	0.288	0.289	0.289	0.289
3.383	0.287	0.291	0.293	0.294	0.294	0.295
3.629	0.266	0.268	0.270	0.270	0.270	0.269
3.874	0.246	0.254	0.256	0.255	0.255	0.254
4.120	0.230	0.238	0.239	0.240	0.240	0.245
4.365	0.172	0.195	0.195	0.196	0.195	0.198
4.611	0.159	0.151	0.152	0.151	0.150	0.147
4.856	0.124	0.121	0.123	0.123	0.123	0.122
5.102	0.058	0.047	0.046	0.046	0.046	0.042
5.348	NaN	0.015	0.013	0.012	0.010	0.005

Tabla 3.20. Perfiles de desvío estándar de la media sobre la sección XS1 para diferentes valores de Step para video con visual cenital.

Progresiva [m]	Desvío Estándar [m/s]					
	Step1	Step2	Step3	Step4	Step5	Step10
0.682	0.030	0.019	0.016	0.014	0.014	0.011
0.928	0.028	0.019	0.015	0.013	0.012	0.010
1.173	0.029	0.019	0.016	0.015	0.015	0.015
1.419	0.031	0.018	0.016	0.015	0.014	0.012
1.664	0.033	0.021	0.019	0.018	0.017	0.017
1.910	0.031	0.020	0.017	0.016	0.015	0.014
2.155	0.031	0.018	0.016	0.015	0.014	0.013
2.401	0.035	0.024	0.022	0.022	0.021	0.020
2.647	0.037	0.026	0.024	0.023	0.023	0.022
2.892	0.038	0.025	0.023	0.022	0.022	0.020
3.138	0.038	0.023	0.020	0.019	0.019	0.017
3.383	0.038	0.021	0.018	0.016	0.016	0.014
3.629	0.037	0.020	0.016	0.015	0.014	0.013
3.874	0.037	0.019	0.016	0.015	0.014	0.013
4.120	0.039	0.024	0.021	0.019	0.018	0.017
4.365	0.040	0.028	0.024	0.024	0.023	0.023
4.611	0.039	0.024	0.018	0.016	0.015	0.013
4.856	0.040	0.023	0.019	0.017	0.015	0.014
5.102	0.041	0.019	0.015	0.012	0.010	0.007
5.348	NaN	0.020	0.015	0.011	0.009	0.007

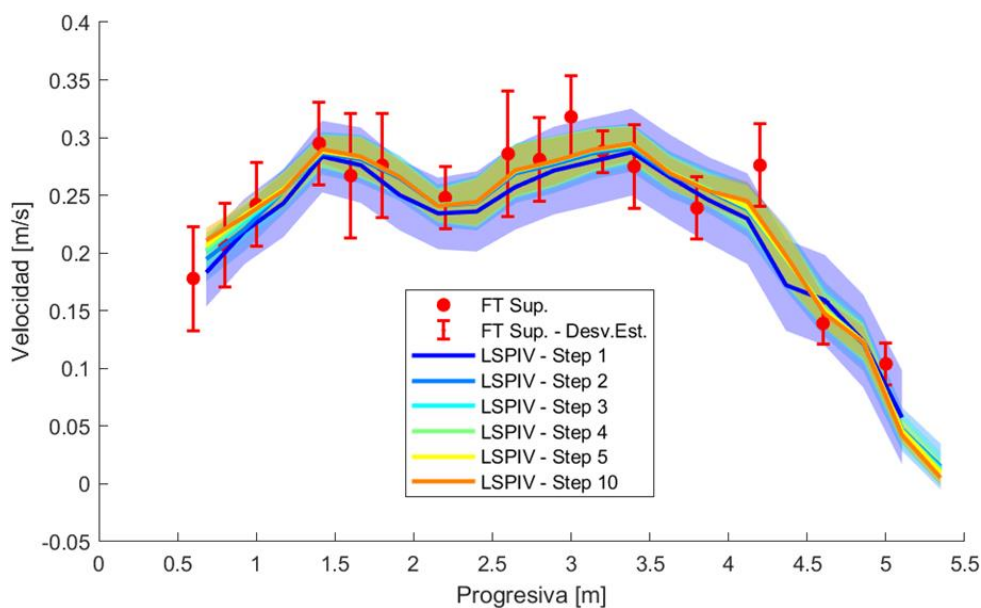


Figura 3.24. Perfiles de velocidad media de LSPIV para diferentes valores de Step en comparación con mediciones hidroacústicas para video con visual cenital.

Se calcularon los valores de RMSE para cada uno de los perfiles disponibles en función de la variación del parámetro 'step'. Los resultados se detallan en la Tabla 3.8 y se presentan de forma gráfica en la Figura 3.12. Para la condición de step 1 se obtuvo un error ligeramente superior, vinculado a lo comentado anteriormente. Para el resto de las condiciones, el valor de RMSE permanece prácticamente constante, lo que demuestra nuevamente la robustez de los resultados de la técnica bajo la variación del parámetro en estudio. Por último, estos valores son menores a los obtenidos en el análisis con visual oblicua (RMSE ~0.03m/s). Esta diferencia, se explica por la mejora en la descripción del perfil de velocidad medio sobre la margen derecha. Para los análisis subsiguientes, se utilizará un step igual a 2, valor a partir del cual se observa la estabilización del error calculado.

Tabla 3.21. Estimaciones de la raíz del error medio cuadrático de perfiles de velocidades obtenidos con diferentes Steps mediante LSPIV para video con visual cenital.

Step	Tiempo entre imágenes [s]	RMSE [m/s]
1	0.0333	0.025
2	0.0666	0.021
3	0.0999	0.021
4	0.1332	0.020
5	0.1665	0.021
10	0.3330	0.020

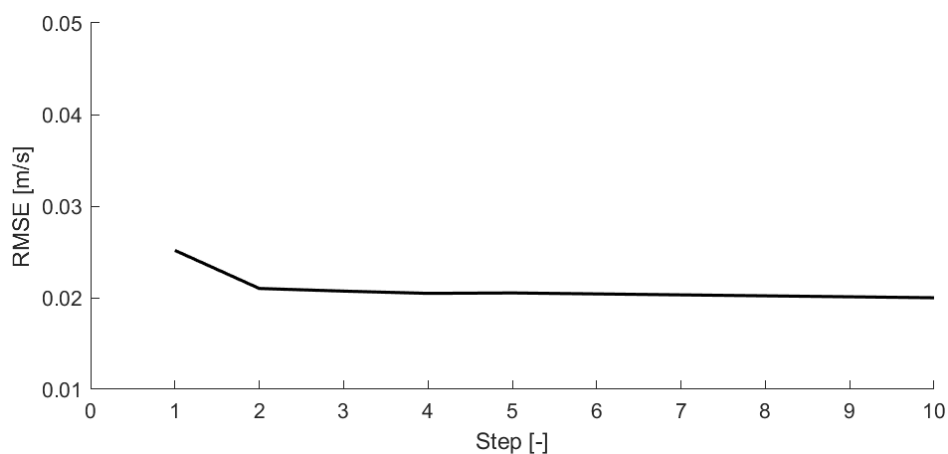


Figura 3.25. Variación del RMSE para cada uno de los perfiles de velocidades obtenidos con diferentes Steps mediante LSPIV para video con visual cenital.

3.2.1.2. Sensibilidad al tamaño de ventana de interrogación

Al igual que en el procesamiento del video anterior, se optó por fijar una cantidad de pasadas igual a 2 y una superposición de ventanas del 50%. Para analizar la sensibilidad al tamaño de ventana se definieron tres configuraciones que se detallan en la Tabla 3.22.

Tabla 3.22. Configuraciones de tamaños de ventanas de interrogación analizadas para el video con visual cenital.

Configuración	Tamaño de Ventana [px]		Superposición [%]
	Pasada 1	Pasada 2	
1	128	64	50
2	64	32	50
3	32	16	50

En la Tabla 3.23 y la Tabla 3.24 se presentan los perfiles medios de velocidad junto con sus rangos de desviación estándar para las tres configuraciones analizadas. Estos resultados también se muestran gráficamente en la Figura 3.26. Tal como se mencionó en el caso de visual oblicua, a medida que disminuye el tamaño de ventana de la pasada final se tiene una mayor capacidad de detección de fuertes gradientes de velocidad. Pero esto también implica mayor sensibilidad a las condiciones de sembrado, ya que el área de la ventana de interrogación disminuye considerablemente. Si bien existen diferencias, especialmente para la configuración 3, estas no se traducen en el valor de RMSE en comparación con las velocidades de referencia. Los errores obtenidos se detallan en la Tabla 3.25 y se presentan en la Figura 3.27. No existen argumentos válidos suficientes para concluir si la distribución lateral de velocidades obtenida para esta configuración es más representativa de la realidad o si las variaciones más marcadas que se observan responden a la mayor incertidumbre asociada al pequeño tamaño de ventana utilizado.

Se opta por definir como óptima a la configuración número 2, que es aquella que se había definido como ‘estándar’ para la realización de los análisis anteriores. Y a su vez, se corresponde a una configuración usualmente utilizada en la implementación de LSPIV en cursos naturales para la resolución de las imágenes disponible.

Tabla 3.23. Perfiles de velocidad media sobre la sección XS1 para diferentes tamaños de ventanas de interrogación para video con visual cenital.

Progresiva	Velocidad Transversal [m/s]		
	Config. 1	Config. 2	Config. 3
0.682	0.193	0.195	0.155
0.928	0.215	0.221	0.240
1.173	0.253	0.254	0.231
1.419	0.265	0.286	0.296
1.664	0.267	0.281	0.288
1.910	0.262	0.265	0.246
2.155	0.254	0.241	0.234
2.401	0.257	0.243	0.247
2.647	0.270	0.269	0.264
2.892	0.277	0.277	0.277
3.138	0.285	0.286	0.277
3.383	0.282	0.291	0.288
3.629	0.278	0.268	0.269
3.874	0.254	0.254	0.235
4.120	0.220	0.238	0.253
4.365	0.198	0.195	0.186
4.611	0.141	0.151	0.153
4.856	0.111	0.121	0.116
5.102	0.053	0.047	0.042
5.348	NaN	0.015	0.002

Tabla 3.24. Perfiles de desvío estándar de la media sobre la sección XS1 para diferentes tamaños de ventanas de interrogación para video con visual cenital.

Progresiva	Desvío Estándar [m/s]		
	Config. 1	Config. 2	Config. 3
0.682	0.017	0.019	0.030
0.928	0.016	0.019	0.020
1.173	0.016	0.019	0.023
1.419	0.016	0.018	0.024
1.664	0.017	0.021	0.027
1.910	0.015	0.020	0.024
2.155	0.016	0.018	0.022
2.401	0.018	0.024	0.033
2.647	0.019	0.026	0.034
2.892	0.020	0.025	0.031
3.138	0.019	0.023	0.026
3.383	0.018	0.021	0.030
3.629	0.017	0.020	0.028
3.874	0.017	0.019	0.026
4.120	0.019	0.024	0.029
4.365	0.021	0.028	0.039
4.611	0.021	0.024	0.025
4.856	0.021	0.023	0.025
5.102	0.020	0.019	0.023
5.348	NaN	0.020	0.021

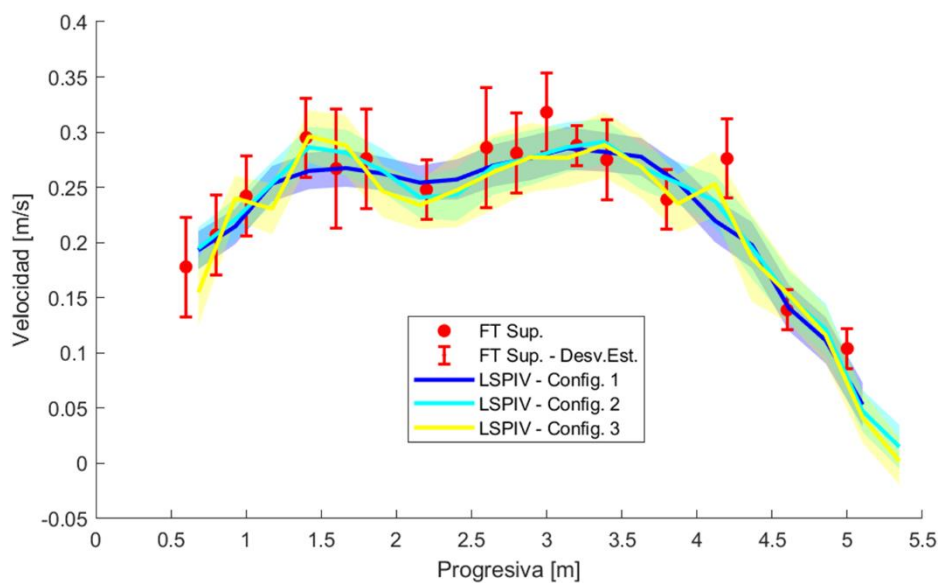


Figura 3.26. Perfiles de velocidad media de LSPIV para diferentes configuraciones de tamaño de ventanas en comparación con mediciones hidroacústicas para video con visual cenital.

Tabla 3.25. Valores del RMSE para cada configuración de tamaño de ventana para video con visual cenital.

Configuración	RMSE [m/s]
1	0.024
2	0.021
3	0.021

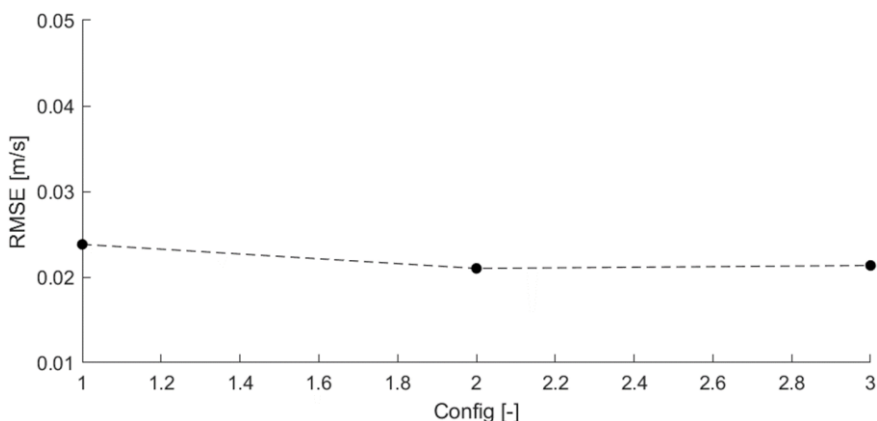


Figura 3.27. Gráfico del valor del RMSE para cada configuración de tamaño de ventana para video con visual cenital.

3.2.2. Análisis de sensibilidad de los métodos de relevamiento de datos topobatimétricos.

En esta ocasión se analizará en primer lugar la sensibilidad en la estimación de caudal al método utilizado para realizar el relevamiento topobatimétrico de la sección transversal. Este proceso será idéntico al realizado para el video con visual oblicua. Posteriormente se analizará la sensibilidad en la estimación de caudal al proceso de estabilización de movimiento de las imágenes por pequeños cambios en la posición del drone durante el registro de video. Se analizarán los videos con los parámetros óptimos determinado en la sección 3.2.1.1 (ver en Tabla 3.26).

Tabla 3.26. Parámetros de procesamiento utilizados para el análisis de sensibilidad de los métodos de relevamiento de datos batimétricos y topográficos para el video con visual cenital.

Duración:	De 00:00:00 a 00:01:00
Step:	2
Ventanas de interrogación	64px y 32px

3.2.2.1. Sensibilidad al relevamiento batimétrico

Se estimó el caudal líquido utilizando las tres batimetrías disponibles descriptas anteriormente, que fueron medidas con GPS, Palo Graduado y el mismo FlowTracker II (Figura 3.15). Para realizar las estimaciones, el perfil de velocidad de LSPIV utilizado se trató de aquel derivado de la parametrización óptima definida anteriormente- Para el cálculo de caudal se

utilizó el método de la sección mediana. Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 3.27, tanto para un valor de α unitario como de 0.85, este último sería el utilizado en este caso particular si no se conociera información alguna sobre la relación velocidad media vs. Velocidad superficial y el flujo no se encuentra en condición de crecida. El igual que lo observado en el caso de video con visual oblicua, los caudales estimados a partir de batimetrías de FlowTracker y GPS presentan diferencias ínfimas mientras que el correspondiente a Palo Graduado fue $\sim 10\%$ superior por el aumento del área mojada ya descripta. Nuevamente, en las curvas de caudal acumulado (Figura 3.28) el despeque de la curva de Palo Graduado comienza en la zona central del cauce aproximadamente en la progresiva 1.50m como era de esperar por el aumento de profundidades y ser la zona de mayores velocidades de flujo.

Tabla 3.27. Estimaciones de caudal líquido mediante LSPIV utilizando diferentes batimetrías para el video con visual cenital.

Batimetría	Área [m ²]	$\alpha = 1.00$		$\alpha = 0.85$	
		Caudal [m ³ /s]	Vel. Media [m/s]	Caudal [m ³ /s]	Vel. Media [m/s]
FlowTracker	0.840	0.187	0.222	0.140	0.167
Palo Graduado	0.917	0.204	0.222	0.173	0.189
GPS	0.829	0.186	0.225	0.158	0.191

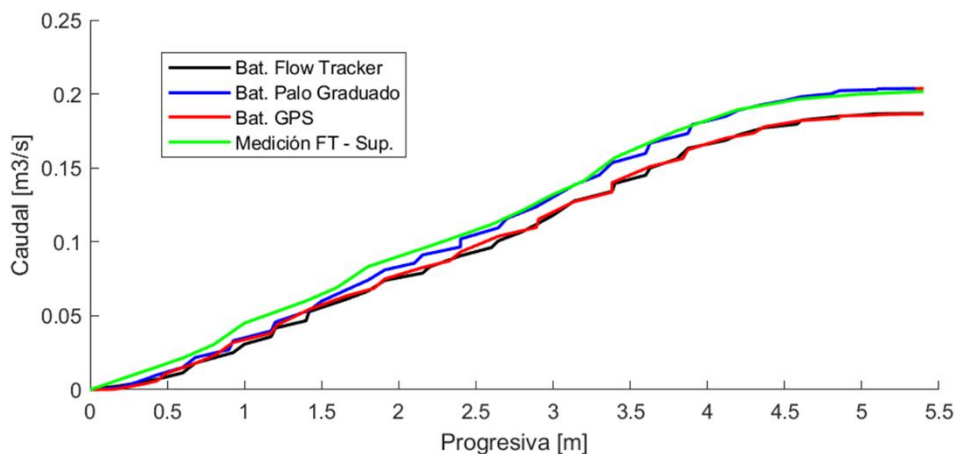


Figura 3.28. Curvas de caudal acumulado según el tipo de batimetría para el video con visual cenital.

Si se compara los caudales obtenidos mediante FlowTracker II (Tabla 3.15) con los estimados por LSPIV para un $\alpha = 1.0$, se presenta algunas particularidades. El caudal estimado superficialmente con FlowTracker II en la sección XS1 ($0.201\text{m}^3/\text{s}$) es coincidente con el obtenido por LSPIV para la batimetría de Palo Graduado en esa misma sección ($0.204\text{m}^3/\text{s}$). Esto puede verse también en la comparación de las curvas de caudal acumulado de la Figura 3.28. Sin embargo, esto podría no ser más que una coincidencia. Ya que debido a las diferencias encontradas en los datos batimétricos para Palo Graduado, las áreas de la sección transversal de FlowTracker superficial (0.85m^2) y Palo Graduado (0.91m^2) difieren en casi un

10%. A su vez, como ya se ha mencionado, lo que produce un aumento del caudal medido con FlowTracker puede estar vinculado al dato de velocidad elevado en la progresiva $\sim 4.0\text{m}$ y a la forma de extrapolación de velocidades hacia las márgenes de esta metodología. Por otra parte, los caudales obtenidos por LSPIV para batimetrías de GPS y FlowTracker presentan se asemejan al obtenido por la técnica hidroacústica en la sección XS2 ($0.177\text{m}^3/\text{s}$). En la sección 3.3 se realizan comparaciones y análisis sobre los valores de caudal medio.

3.2.2.2. Sensibilidad a la estabilización de las imágenes

Cuando se utilizan drones para el registro de videos puede suceder que por efectos del viento el mismo presente desplazamiento de su posición original. Si bien los fabricantes de estos dispositivos continuamente mejoran los diseños para minimizar estos efectos, la gran mayoría de drones comerciales son susceptibles a sufrirlos.

Si un video registrado para la implementación de LSPIV sufre de movimientos, al procesar las imágenes consecutivas la técnica no podrá diferenciar si el desplazamiento de los patrones superficiales se debe a la advección propia del flujo o al desplazamiento de la cámara. Sinó más bien considerará a la suma de ambos en simultaneo pudiendo afectar las estimaciones de velocidades superficiales. Sin embargo, no es un limitante para la implementación de la técnica ya que existen algoritmos que permiten corregir y estabilizar el movimiento de las imágenes.

En las secciones anteriores se realizaron los análisis de sensibilidad sobre el video de drone con estabilización de movimiento aplicada. RIVeR cuenta con un módulo de estabilización, sin embargo se aplicó sobre la secuencia de imágenes del video registrado y se obtuvieron resultados pobres. No se logró una adecuada estabilización debido a que sobre las márgenes, que son utilizadas por los algoritmos como zonas estáticas de referencia, había presencia de vegetación que por efectos del viento presentaba un movimiento casi constante y aleatorio. Se opto por ello el uso de Adobe Affter Effects, un paquete computacional profesional para la edición de videos, para realizar la estabilización con algoritmos más sofisticados. Se obtuvo en esta ocasión un resultado aceptable, utilizado a lo largo de toda la sección 3.2. Para visualizar los efectos del movimiento de cámara, en la Figura 3.29 se muestra dos imágenes medias del video con y sin estabilización. Para el caso sin estabilización la imagen media se presenta difusa, lo que implica que ha presentado movimiento en la posición de cámara a lo largo de toda la secuencia.

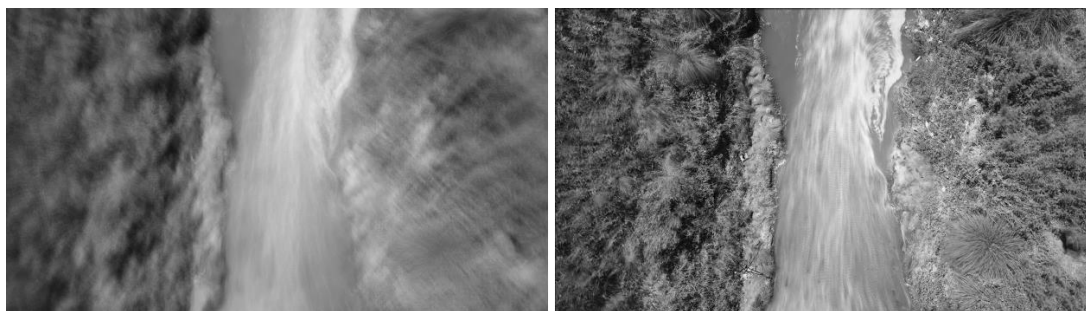


Figura 3.29. Izquierda: Imagen media de la secuencia sin estabilización de movimiento. Derecha: Imagen media de la secuencia con estabilización de movimiento.

Se procesó la secuencia de imágenes sin estabilizada utilizando la parametrización definida en la Tabla 3.26. En la Figura 3.30, se pueden visualizar los perfiles de velocidad de la sección XS1 para las secuencias de imágenes con y sin estabilización de movimiento. En términos del perfil medio hay un buen acuerdo entre ambas, con una leve tendencia a la subestimación en margen derecha por parte de la condición sin estabilización. No obstante, el desvío estándar aumenta un orden de magnitud para la condición sin estabilización. Los perfiles medios presentan coincidencia debido a que el movimiento del dron fue aleatorio pero alrededor del punto de origen, sin una tendencia clara hacia una dirección. Si esto no hubiese ocurrido así, los perfiles medios de velocidad podrían presentar diferencias más significativas. En la Tabla 3.28 están reportados los valores de los RMSE respectivos a cada metodología, con un aumento para la condición sin estabilización por los resultados en margen derecha. En cuanto a los valores de caudal, se pueden visualizar en la Tabla 3.29 utilizando $\alpha = 1.0$, con una disminución del caudal de aproximadamente el 10% para la secuencia sin estabilizar respecto a la estabilizada.

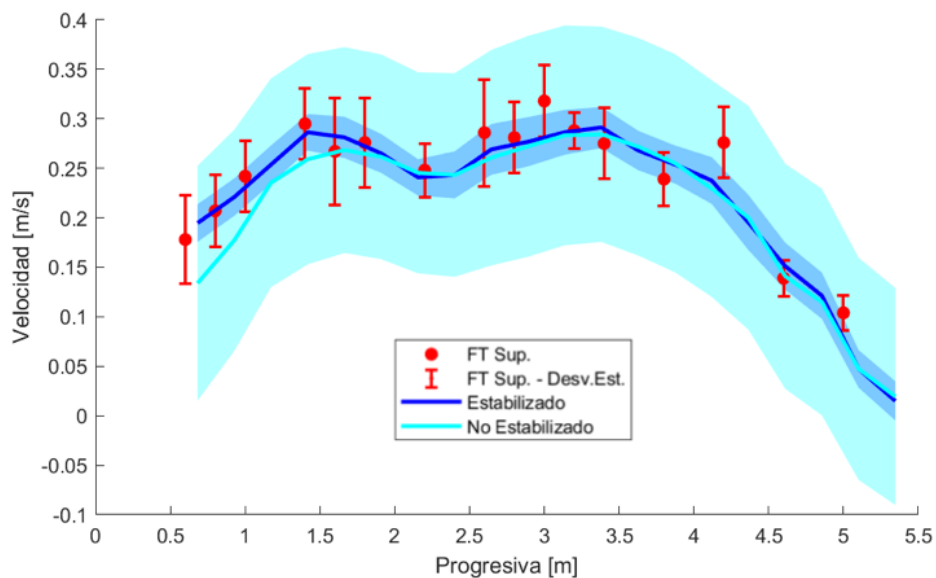


Figura 3.30. Perfiles de velocidad media de LSPIV con y sin estabilización de las imágenes en comparación con mediciones hidroacústicas

Tabla 3.28. Estimaciones de la raíz del error medio cuadrático de perfiles de velocidades obtenidos con y sin estabilización de las imágenes.

Estabilización	RMSE [m/s]
Estabilizado	0.021
No estabilizado	0.031

Tabla 3.29. Estimaciones de caudal líquido mediante LSPIV con y sin estabilización de las imágenes.

Estabilización	Área [m ²]	$\alpha = 1.00$	
		Caudal [m ³ /s]	Vel. Media [m/s]
Estabilizado	0.840	0.187	0.222
No estabilizado	0.840	0.175	0.209

Si bien en este caso particular se obtuvieron perfiles de velocidad medios y caudales relativamente similares, con diferencias menores al 10%, la no estabilización de la secuencia de imágenes podría deteriorar los resultados en casos en donde el movimiento del dron sea mayor o bien presente una tendencia hacia una dirección en particular. Es por esto que se recomienda siempre realizar la etapa de estabilización de movimiento previo al procesamiento de las imágenes, aunque está no otorgue resultados perfectos, para minimizar los posibles efectos indeseados sobre los campos de velocidades superficiales.

3.3. Comparación de caudales medios

En las secciones anteriores se hizo hincapié en la comparación de velocidades superficiales entre LSPIV y FlowTracker, realizando diferentes análisis de sensibilidad. Para ambos videos a su vez, se compararon caudales superficiales entre ambas metodologías para evaluar la performance de la técnica ante diferentes disponibilidades de datos de campo. Sin embargo, en la gestión de recursos hídricos el valor de caudal que presenta mayor relevancia no es el superficial si no el medio. Para estimar este variable a partir de velocidades superficiales (obtenidas mediante LSPIV) es necesario considerar un factor de transformación de velocidad superficial a media en profundidad, al que comúnmente se lo conoce como α (tal como se comentó en la sección 2.1).

$$\alpha = \frac{V_{media}}{V_{superficial}}$$

Para una distribución en vertical logarítmica teórica este coeficiente toma un valor de 0.85. sin embargo, en cursos naturales α presenta variaciones en función de muchas características entre las que se encuentran el tipo de material de fondo, la presencia de corrientes secundarias, el efecto cortante de viento en superficie libre, irregularidades en la geometría de la sección, entre otras. Existen números estudios en donde se ha intentado encontrar relaciones entre estas características y el valor del coeficiente (α). En ellos no se ha arribado a una expresión general para la definición del valor de α , sino más bien rangos de valores usuales en función por ejemplo del tipo de material de fondo y la condición hidrológica del cauce natural (Chiu, 1995; Hauet et al., 2018; Le Coz et al., 2008).

En la práctica pueden darse dos situaciones: en primer lugar pueden realizarse mediciones en la sección de estudio con instrumentos que permitan describir la distribución vertical de velocidades (p.ej. utilizando ADCP) y a partir de estos resultados ajustar un perfil de velocidad

y estimar el valor de α . Esto mismo puede realizarse para diferentes niveles de superficie libre y encontrar la variación de α en función del tirane de flujo. Estas tareas son laboriosas y tampoco necesariamente garantizan una reducción significativa en la incertidumbre del parámetro. Esto es debido a la complejidad, aun con instrumentos de alto desarrollo tecnológico, de medir la totalidad del perfil vertical de velocidad en cauces naturales, y también a la posibilidad de que el coeficiente presente una variación en el ancho de la sección y no sea un valor constante. Es sin duda este coeficiente el que le imprime la incertidumbre en la estimación de caudales a la técnica de LSPIV. La restante posibilidad, es asumir un valor de α en función de características simples y puntuales de la condición del cauce en estudio. Utilizar el valor teórico (0.85) si se desconoce por completo la sección y se está ante la presencia de un flujo uniforme y estacionario. Otros valores usualmente empelados por la comunidad hidrométrica internacional son utilizar valores cercanos a 0.90 si se trata de secciones revestidas de hormigón y valores cercanos a 1.0 si se trata de condiciones de crecidas repentinas en donde el efecto de fondo sobre la distribución vertical de velocidades se ve minimizado.

Para los casos en estudio, en primer lugar se utilizará el valor teórico de 0.85 en la comparación de caudales. También debido a que esta situación refleja lo que se realizaría en otras estaciones de la red de monitoreo en donde no se mida con otros instrumentos más que LSPIV.

Se considerará como caudal de referencia al valor medio entre las mediciones realizadas con FlowTracker II en ambas secciones, detallado en la Tabla 3.30. En la Tabla 3.31 se detallan los caudales estimados a partir de ambos videos disponibles (con visión oblicua y visión cenital), utilizando el set de parámetros optimo definido a lo largo de los análisis de sensibilidad ya presentados, y para las tres batimetrías disponibles. Para α de 0.85 se observan diferencias respecto al caudal de referencia del orden de 40-60 l/s, exceptuando los casos de batimetría de Palo Graduado por lo comentado en los análisis de sensibilidad ya presentados. Estas diferencias se corresponden a errores relativos porcentuales del orden de entre 10-20%, valores usualmente observados para la metodología propuesta. Sin embargo, en la sección de estudio se disponía de caudales medidos con FlowTracker tanto superficiales como medios. A partir de la relación entre ambos es posible estimar un valor del coeficiente α más cercano al real. De esta relación se obtuvieron valores del coeficiente en el rango de $0.67 < \alpha < 0.75$ para las secciones XS1 y XS2, respectivamente. Al utilizar el valor de $\alpha = 0.75$ (debido a la particularidad observada en la XS1), las diferencias de caudales se reducen a < 10 l/s y los errores relativos se encuentran en el rango de $\pm 5\%$. Este orden de magnitud del error es similar al adoptado para las técnicas de medición hidroacústicas, por lo que los resultados muestran una alta coherencia entre ambos grupos de técnicas.

Tabla 3.30. Resultados de las mediciones con FlowTracker en las secciones XS1 y XS2

Instrumento	Sección	Método	Caudal [m ³ \s]	Área [m ²]	Ancho [m]	Vel. Media [m\s]
FT II	XS1	Caudal Medio	0.136	0.842	5.4	0.161
FT II	XS2	Caudal Medio	0.132	1.258	5.5	0.105
Caudal promedio de Referencia			0.134			

Tabla 3.31. Caudales medios estimados con LSPIV en el sitio de estudio. Errores en relación al valor de referencia de FlowTracker II

Visión	Batimetría	Caudal [m ³ /s]		Diferencia [m ³ /s]		Error Relativo [%]	
		$\alpha = 0.85$	$\alpha = 0.75$	$\alpha = 0.85$	$\alpha = 0.75$	$\alpha = 0.85$	$\alpha = 0.75$
Oblicua (GoPro)	FlowTracker	0.148	0.130	0.014	-0.004	10.2	-2.8
	Palo Graduado	0.160	0.141	0.026	0.007	19.2	5.2
	GPS	0.146	0.129	0.012	-0.005	8.9	-3.9
Cenital (Drone)	FlowTracker	0.159	0.140	0.025	0.006	18.5	4.6
	Palo Graduado	0.173	0.153	0.039	0.019	29.2	14.0
	GPS	0.158	0.140	0.024	0.006	18.2	4.3

4. Conclusiones

- La técnica de velocimetría por imágenes de partículas a gran escala permite la estimación de caudales líquidos en cursos fluviales naturales de manera no intrusiva y a bajo costo (en comparación por ejemplo a las técnicas hidroacústicas). A su vez permite realizar mediciones en condiciones extremas, en donde las técnicas convencionales e hidroacústicas se ven limitadas. Para caudales de estiaje, en donde las profundidades son del orden de pocos centímetros, las técnicas intrusivas pueden no ser aplicables por la poca profundidad del flujo que imposibilita un adecuado ingreso del instrumento al curso de agua. En el otro extremo, durante condiciones de crecidas utilizar técnicas intrusivas puede poner en riesgo tanto al operario como al instrumental por las fuertes velocidades del flujo. Siendo en ambos casos las técnicas remotas metodologías aplicables en la actualidad para la caracterización de los extremos hidrológicos.
- Las técnicas de velocimetría basadas en imágenes digitales no vienen a reemplazar a los sistemas de monitoreo actualmente utilizados a nivel mundial. Si no más bien a diversificar a los sistemas para ampliar la disponibilidad de información hidrológica necesaria para una adecuada gestión de los recursos hídricos.
- En base a los análisis de sensibilidad llevados a cabo en el presente informe se observó la robustez de la técnica a la variación de tres de los parámetros de mayor importancia en la implementación de LSPIV. Estos son el tiempo de video procesado, el tiempo entre imágenes consecutivas (definido por la variable Step), y la cantidad de pasadas y tamaños de ventana de interrogación utilizadas en los algoritmos de correlación cruzada. No se encontraron diferencias significativas al variar estos parámetros en los casos de estudio. Es necesario recalcar que los resultados obtenidos presentan una fuerte dependencia al sembrado artificial utilizado, en donde se realizaron esfuerzos en campo en lograr una distribución homogénea en todo el ancho de cauce espacial y temporalmente. Si esto no fuese así, los resultados podrían verse afectados significativamente.
- También se encontró coherencia entre los resultados obtenidos de un video grabado con visual oblicua (desde la margen del río) y con visión cenital (desde un dron). Esto posibilita el uso de cámaras digitales de menor costo que los drones (tales como teléfonos celulares, GoPro, etc.) sin temor a una pérdida significativa en la calidad de los resultados. Siempre y cuando la ubicación de la cámara se óptima en términos de visual completa del ancho del cauce, altura y orientación.
- Se realizaron análisis de sensibilidad sobre la estimación del caudal líquido a partir de información topográfica y batimétrica necesaria para el procesamiento de los videos obtenida por instrumentos de distinta complejidad, desde GPS diferencial a cinta

métrica y palo graduado. Respecto a la información necesaria para la rectificación de resultados, se observó nuevamente la robustez de la técnica, lo que permite realizar campañas de aforo sin la necesidad de utilizar un GPS para el relevamiento de los Puntos de Control. Por otro lado, como es usual en condiciones de aguas bajas, la calidad de la información batimétrica juega un papel importante en la determinación del caudal. Se observaron ciertas discrepancias en las batimetrías relevadas en campo que impactaron sobre los caudales estimados. Es por ello que se aconseja, independientemente del instrumental que se utilice, un relevamiento cuidadoso y detallado de la batimetría de las secciones de estudio.

- En términos globales, los caudales obtenidos mediante LSPIV presentaron una variación del orden de entre 5-20% respecto a los medidos con técnicas hidroacústicas. Este orden de magnitud es lo usualmente observado en aplicaciones en campo a nivel internacional. La disminución o aumento del mismo dependerá del conocimiento que se tenga sobre la sección y fundamentalmente del set up que se utilice en campo para realizar el registro de videos, partiendo desde la elección del sitio de estudio, el punto de ubicación de la cámara, la configuración de registro de imágenes hasta el sembrado artificial que se realice si es requerido.

5. Referencias

- Adrian, R. J. (1991). Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 23(1), 261–304.
<https://doi.org/10.1146/annurev.fl.23.010191.001401>
- Cenedese, A., & Querzoli, G. (1997). Lagrangian statistics and transilient matrix measurements by PTV in a convective boundary layer. *Measurement Science and Technology*, 8(12), 1553–1561. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/8/12/018>
- Chiu, C. (1995). Maximum and mean velocities and entropy in open-channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(7564), 26–35.
- Hauet, A., Morlot, T., & Daubagnan, L. (2018). Velocity profile and depth-averaged to surface velocity in natural streams: A review over a large sample of rivers. *E3S Web of Conferences*, 40. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184006015>
- Le Coz, J., Pierrefeu, G., & Paquier, A. (2008). Evaluation of river discharges monitored by a fixed side-looking Doppler profiler. *Water Resources Research*, 44(4).
<https://doi.org/10.1029/2008WR006967>
- Patalano, A., García, C. M., & Rodríguez, A. (2017). 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*, 109(June), 323–330. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.07.009>
- Thielicke, W., & Stamhuis, E. J. (2014). PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. *Journal of Open Research Software*, 2.
<https://doi.org/10.5334/jors.bl>