



ESTIMACIÓN DEL CAUDAL A PARTIR DE LA TÉCNICA DE VELOCIMETRÍA POR IMÁGENES DE PARTÍCULAS A GRAN ESCALA APLICADO EN FLUJO A SUPERFICIE LIBRE

FLOW ESTIMATION FROM THE SPEEDOMETRY TECHNIQUE BY IMAGES OF LARGE-SCALE PARTICLES APPLIED IN FLOW TO A FREE SURFACE

Fredy Sandro, Rosas Flores¹; Shirley Pamela, Tejada Flores²; Ferrer, Canaza Rojas³

Recibido 04/11/2020: Aprobado: 20/12/2020

DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28763.08480>

RESUMEN

Este estudio tiene como objetivo estimar el caudal a partir de la técnica de velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala en flujo a superficie libre. El trabajo consistió en la grabación de videos en tres campañas, luego estas fueron extraídas y procesadas para el cálculo de la velocidad superficial media y finalmente la estimación del caudal, utilizando software de código abierto RIVeR y PIVlab. Se obtuvieron perfiles de velocidad para diferentes tipos de trazadores y alturas; los flujos con trazadores de espuma presentaron adecuados perfiles de velocidad, los flujos con trazadores de poli estireno fueron adecuados sólo a 2,00 m de altura y sin trazadores mostraron perfiles adecuados solo a 1,50 m, el producto de la velocidad superficial media, área y coeficiente de velocidad media da como resultado caudales para cada caso estudiado. En conclusión, los trazadores de espuma de jabón líquido presentaron mayores caudales, debido a la adecuada definición de la curva de perfil de velocidad y las mayores magnitudes de vectores de velocidad. Por lo tanto, la técnica LSPIV mostró ser sencilla, adaptable y asequible para conocer velocidades y caudales del flujo.

Palabras clave: técnica LSPIV; medición hidrológica; hidrodinámica

¹Fredy Sandro, Rosas Flores. Estudiante de Ingeniería Civil. Universidad Peruana Unión. Lima, Perú. Correo: fredyrosas@upeu.edu.pe. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1177-5576>

²Shirley Pamela, Tejada Flores. Estudiante de Ingeniería Civil. Universidad Peruana Unión. Lima, Perú. Correo: shirleytejeda@upeu.edu.pe ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7181-9342>

³Ferrer Canaza Rojas. Director de Investigación Escuela Profesional de Ingeniería Civil. Universidad Peruana Unión. Lima, Perú. Correo: fcanaza@upeu.edu.pe. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3952-0962>

ABSTRACT

The objective of this study is to estimate the flow from the speedometer technique for large-scale particle images in free surface flow. The work consisted in the recording of videos in three campaigns, then these were extracted and processed for the calculation of the average surface velocity and finally the estimation of the flow, using open source software RIVeR and PIVlab. Velocity profiles were obtained for different types of tracers and heights; the flows with foam tracers presented adequate velocity profiles, the flows with polystyrene tracers were adequate only at 2.00 m in height and without tracers they showed adequate profiles only at 1.50 m, the product of the average surface velocity, area and mean velocity coefficient gives flow rates for each case studied. In conclusion, liquid soap foam tracers had higher flow rates, due to the adequate definition of the velocity profile curve and the greater magnitudes of velocity vectors. Therefore, the LSPIV technique proved to be simple, adaptable and affordable to find flow rates and speed rates.

Keywords: LSPIV technique; hydrological measurement; hydrodynamics

1. INTRODUCCIÓN

El caudal es la medida de la hidráulica fluvial más común, siendo el principal parámetro para caracterizar la dinámica de un río o un canal. Por ello, una medición precisa de la velocidad es un asunto de importancia en los procesos hidrológicos. Las estaciones de medición de corrientes se han utilizado como un método de medición del flujo en canal abierto durante más de 100 años [1], utilizando tecnologías intrusivas basadas en instrumentos mecánicos como Perfilador de Corriente Doppler Acústico, correntómetros, molinetes. Sin embargo, la medición del flujo en el campo puede ser bastante desafiante, según el sitio y las condiciones.

Las primeras aplicaciones de campo del método *Velocimetría de Imágenes de Partículas a Gran Escala (LSPIV)*, por sus siglas en inglés) fueron en la década de los 90. Desde entonces, es una técnica no intrusiva que se utiliza para medir velocidades instantáneas. Este método prevé el análisis Eulero del desplazamiento de los trazadores debido a que, se obtiene los campos de velocidades del flujo comparando el desplazamiento promedio de patrones o grupos de partículas en un sector definido de una imagen [2]. El procesamiento de la información se realiza utilizando los programas computacionales de *Rectification of Image Velocity Results (RIVeR)* y *Particle Image Velocimetry (PIVlab)* para la caracterización del fluido.

En ese sentido, el objetivo de la investigación fue estimar el caudal a partir de la técnica de velocimetría por imágenes de partículas aplicado en flujo a superficie libre en tres campañas: c/s trazadores como son poliestireno expandido de 1/2" y espuma de jabón líquido, y a diferentes alturas (0,50, 1,00, 1,50 y 2,00 m).

2. DESARROLLO

2.1. Técnica Experimental no Intrusiva de Velocimetría por Imágenes de Partículas

En la actualidad existen muchas técnicas experimentales denominadas técnicas no intrusivas como la *Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV)* por su sigla en inglés). El *PIV* ha sido utilizado por más de 30 años en experimentos de laboratorio de hidráulica; permite medir el campo instantáneo de velocidades en un plano del fluido utilizando el procesamiento de imágenes. La primera etapa de análisis es el pre procesamiento que consiste en medir la velocidad de las partículas trazadores en al menos dos imágenes sucesivas [3]. La segunda etapa es la implementación del método de la interrogación de las imágenes, que consiste en extraer ventanas de interrogación de un par de imágenes [4].

2.2. Velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala (LSPIV)

Velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala se desarrolló a partir del *PIV*. Desde entonces, se ha convertido en una herramienta ampliamente utilizada en la ingeniería de la hidráulica, debido a su sencilla adaptabilidad y costos razonables [5]. Esta técnica no intrusiva permite cuantificar el caudal del flujo de río a partir de una grabación de video, realizadas principalmente en condiciones hidrológicas extremas (crecidas y estiaje), donde los métodos tradicionales ya no son aplicables [6].

2.3. Componentes del Sistema LSPIV

Visualización, iluminación y grabación del flujo. Existen recomendaciones de estos componentes ya sean en ambientes externos o laboratorios. El primero corresponde al reflejo de la luz generado por la luz natural y el segundo al sembrado de trazadores naturales o artificiales (troncos, hojas), puede existir factores adversos al grabar durante fuertes vientos y estos pueden modificar los resultados [7]. La obtención de campos de velocidad y la precisión está en función de las condiciones ambientales, trazadores y la posición de la cámara.

Procesamiento de imágenes. El software de código abierto *PIVlab*, permite la aplicación del *PIV* clásico en una serie de imágenes, que dependerá de la información deseada y tipo de trazadores, este proceso incluirá filtros para la mejora de las imágenes *CLAHE*, aumentando la probabilidad de detectar vectores válidos. Los desplazamientos de las partículas se calculan mediante el uso de algoritmo transformada de *Fourier Discreta (DFT)*. El algoritmo *DFT* utiliza múltiples pasadas y ventanas gradualmente deformadas de mayor a menor tamaño (128x128, 64x64 y 28x28 pixeles), hasta obtener campos distribuidos de velocidades entre pares de imágenes [9].

Ortorectificación de la imagen. En las imágenes registradas en la superficie de ríos o canales generalmente se utilizan un ángulo oblicuo al plano de la superficie. Para la ortorectificación es necesario de los puntos de control por ejemplo, arboles postes, piedras, y ser exportadas al software *RIVeR*, esta es una herramienta que puede vincular el sistema de coordenadas del mundo real con su proyección 2D en el plano de la imagen [10].

Resultados de la medición y precisión. La velocidad de superficie *LSPIV* junto con la batimetría puede proporcionar caudales; el calculado Q_s no es el caudal real Q porque se calcula utilizando los campos de velocidad superficial. La relación teórica que es utilizado para canales de concreto es el coeficiente de velocidad media $\alpha=0,90$ [11].

3. METODOLOGÍA

La zona de estudio se localiza en la progresiva 0+020 del “Canal de derivación Carapongo bajo” ubicado en la margen derecha del río Rímac, Provincia de Lima en Perú (ver Figura 1). Su función es derivar parte del caudal del Río Rímac para abastecer la zona agrícola de Carapongo. La estructura es de sección trapezoidal y revestida de concreto.



Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio. Fuente: Google Maps

La investigación presenta un diagrama de flujo de los procesos que se desarrollaron durante los estudios de campo, extracción de imagen, procesamiento de imágenes para la estimación de velocidades superficiales y finalmente obtenemos del caudal para cada caso observado en la Figura 2.

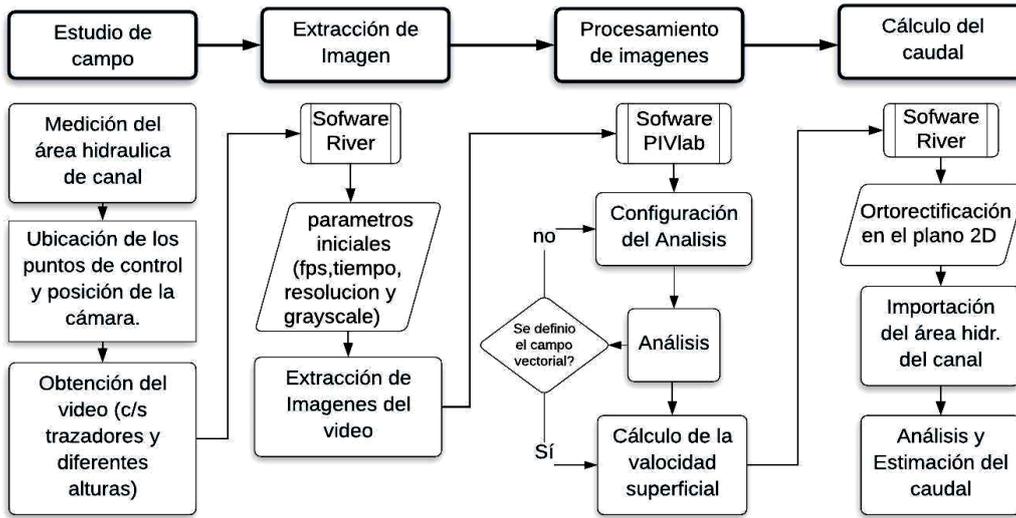


Figura 2. Diagrama de flujo de la Metodología para la Estimación del Caudal. Fuente: los autores

3.1. Estudio de Campo

La primera fase del estudio consistió en mediciones de elementos geométricos de la sección transversal del canal e identificación de los puntos de control. La grabación consta de 36 videos: sin trazador, esferas de poli estireno expandido de 1/2” y espuma de jabón líquido (Figura 3a), con duración de 40s cada uno. La ubicación de los Puntos de Control (PC), deben estar intersecado con el espejo del agua y la superficie del canal [12], las distancias se midieron en campo incluyendo los diagonales (Figura 3b).

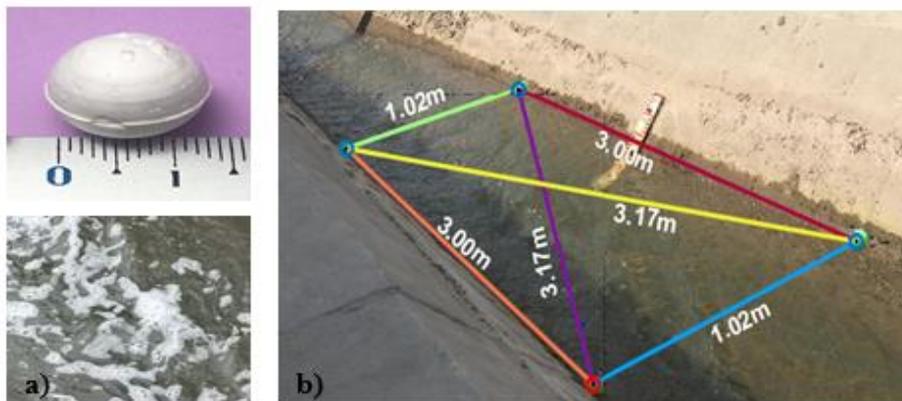


Figura 3. a) Trazadores utilizados para caracterizar el campo de velocidad, b) Puntos de Control (PC), en la superficie del flujo en la fecha 9/10/2020. Fuente: los autores

Los trazadores se sembraron homogéneamente y sin aglomeración, con el objetivo de caracterizar la superficie del flujo (Figura 4) [13]. En todas las mediciones los trazadores de poli estireno expandido fueron recogidas aguas abajo posteriormente a la filmación. La instalación de la cámara fue en el margen derecho del canal a alturas de 0,50, 1,00, 1,50 y 2,00 m (Figura 4a), adecuando una posición oblicua al plano de la superficie libre, para ello se utilizó un soporte universal de teléfono inteligente que permite enfocar los PC. Durante el

desarrollo de este proyecto se realizaron tres campañas de medición, como se observa en la Tabla 1, donde las condiciones climáticas de viento y la luz solar fueron variables en la zona de estudio.

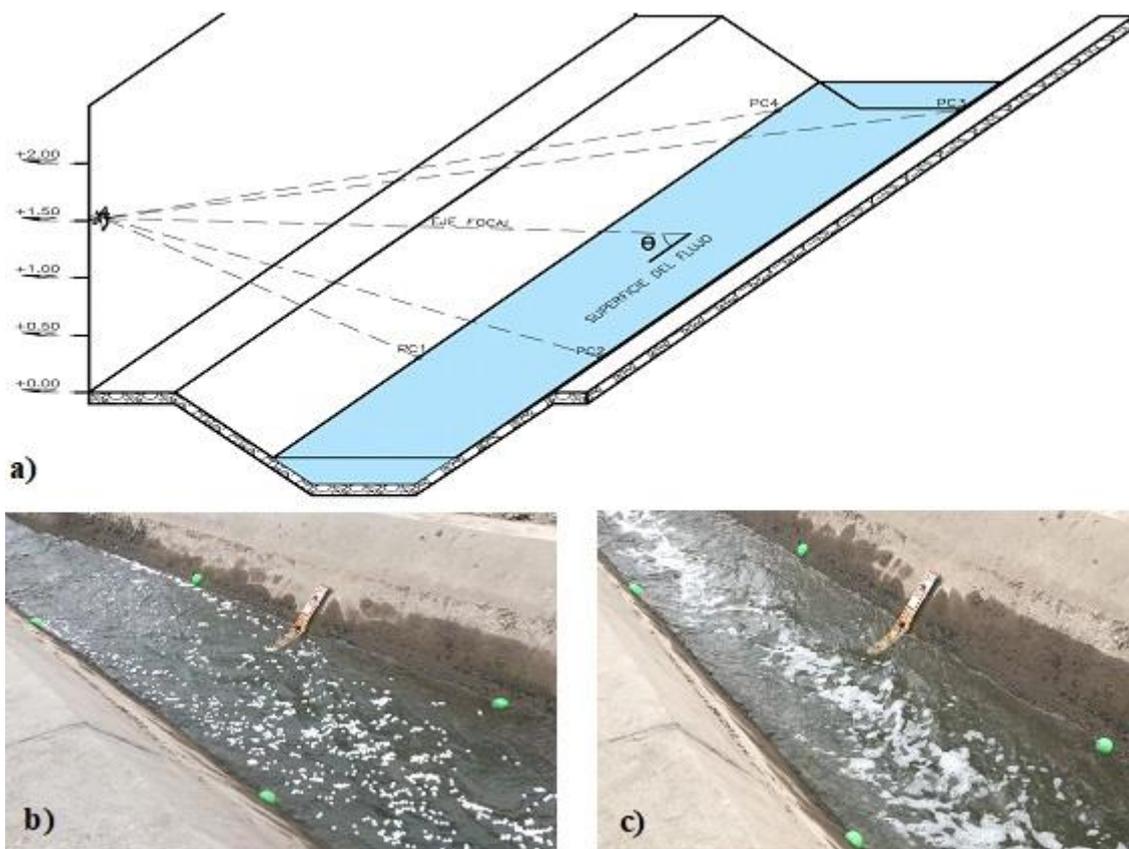


Figura 4. a) Grabación a diferentes alturas- ángulos, b) Sembrado con trazadores de esferas de poli estireno expandido de 1/2" c) Sembrado con trazadores de espuma de jabón líquido. Fuente: los autores

Tabla 1. Campañas de medición con el método LSPIV

Fecha de Medición	Sitio de medición	Clima	Tipo de Trazador		Sin trazador
			Poli estireno expandido	Espuma de Jabón	
7/10/2020	Canal	Soleado, reflejo	x	x	x
8/10/2020	Canal	Sombra, viento	x	x	x
9/10/2020	Canal	Soleado, viento fuerte, reflejo	x	x	x

3.2. Extracción y Procesamiento de Imagen

La extracción de las imágenes del video se realizó con el software *RIVeR* considerando los parámetros iniciales que la cámara registra, video de alta definición con una resolución 3840:2100 pixeles a 30 fotogramas por segundo (fps). Esta fase consiste en convertir un video de 10 s a 30 fps obteniendo 300 imágenes para el procesamiento [10]. El procesamiento de imágenes consistió en importarlas para el análisis en el software *PIVlab*. Se configuró el

análisis, seleccionando la región de interés donde sea visible los CP [14]. Se definió las dimensiones de las áreas de interrogación, con tres pasadas gradualmente (256 x 256, 128x128 y 64 x 64 píxeles), para una mayor precisión del método. Luego, se seleccionó las velocidades que estuvieron dentro del rango común, eliminando los vectores erróneos, finalmente se calculó el campo vectorial promedio también llamado vectores de velocidad promedio (velocidad media superficial del flujo (px/fr)).

3.3. Cálculo del Caudal

El cálculo del caudal se trabajó con el software *RIVeR* con el que se ortorectifica la velocidad superficial media del flujo (px/fr a m/s), para ello se requiere importar los PC observados en la Figura 3b, seleccionar el región de interés y definir el tiempo de frecuencia entre imágenes [12]. En la Figura 5 se presenta un ejemplo de ortorectificación de los vectores de velocidad, obteniendo el vector de velocidad promedio, luego se importó el área de la sección del canal y se empleó el coeficiente de velocidad media $\alpha=0,90$ para canales de concreto [15].

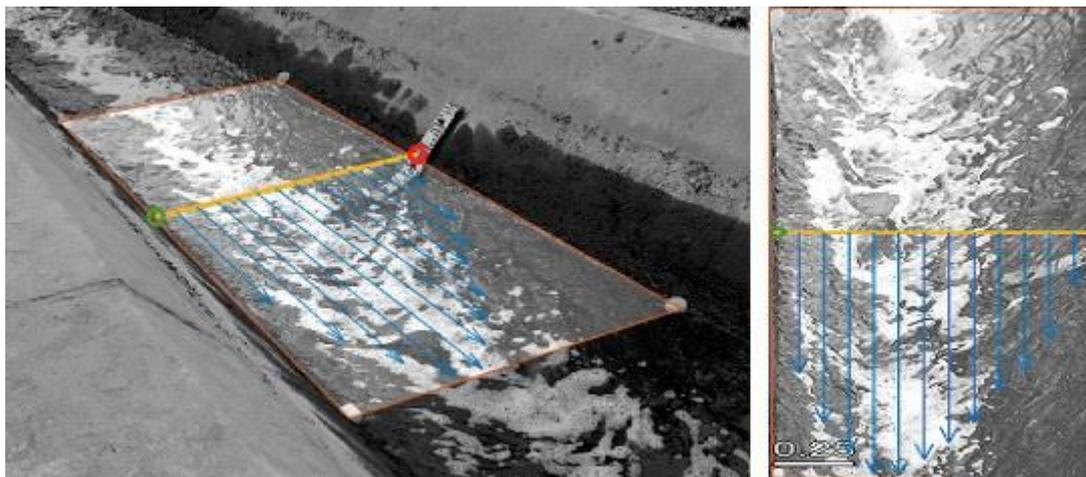


Figura 5. Ejemplo de ortorectificación en la zona de interés con el software *RIVeR*. Fuente: los autores

4. RESULTADOS

4.1. Área del canal

En la Tabla 2 se expresa los elementos geométricos e hidráulicos medidos del canal, las cuales son importantes para su determinación.

Tabla 2. Elementos geométricos e hidráulicos del canal trapezoidal

Fecha de medición	Base del canal b (m)	Profundidad total del canal H (m)	Talud z (m)	Ancho de Corona C (m)	Tirante y (m)	Espejo de Agua T (m)
7/10/2020	0,60	0,85	1	0,55	0,23	1,05
8/10/2020	0,60	0,85	1	0,55	0,22	1,04
9/10/2020	0,60	0,85	1	0,55	0,21	1,02

4.2. Velocidad Superficial del Flujo

La Figura 6 y 7 son perfiles de velocidad media con tendencia hacia la derecha, debido a la progresiva del punto de estudio, ésta se encuentra 8 metros después de una curva horizontal, formando fuerzas de inercia en el flujo de recuperación lenta. Además, las curvas de los perfiles no fueron detectadas en todo el ancho del espejo de agua, debido a las diferentes condiciones para la grabación durante las campañas.

La Figura 6 muestra la comparación de los flujos con trazadores: Poli estireno expandido (POLI) espuma de jabón (ESPU) y sin trazadores (SINT) en cada altura grabada. El flujo sin trazadores SINT a 0,50 m presenta un perfil de velocidad achatada y magnitudes de velocidad menores, sin embargo, los flujos con la adición de trazadores como: ESPU y POLI, presentaron vectores de velocidad con mayores valores, pero con una caracterización poco precisa en los perfiles de velocidad. Los flujos estudiados a 1,00 m de altura mejoran significativamente en la descripción de los perfiles de velocidad, sin embargo, las magnitudes de velocidades se ven reducidas en cada punto de la estación.

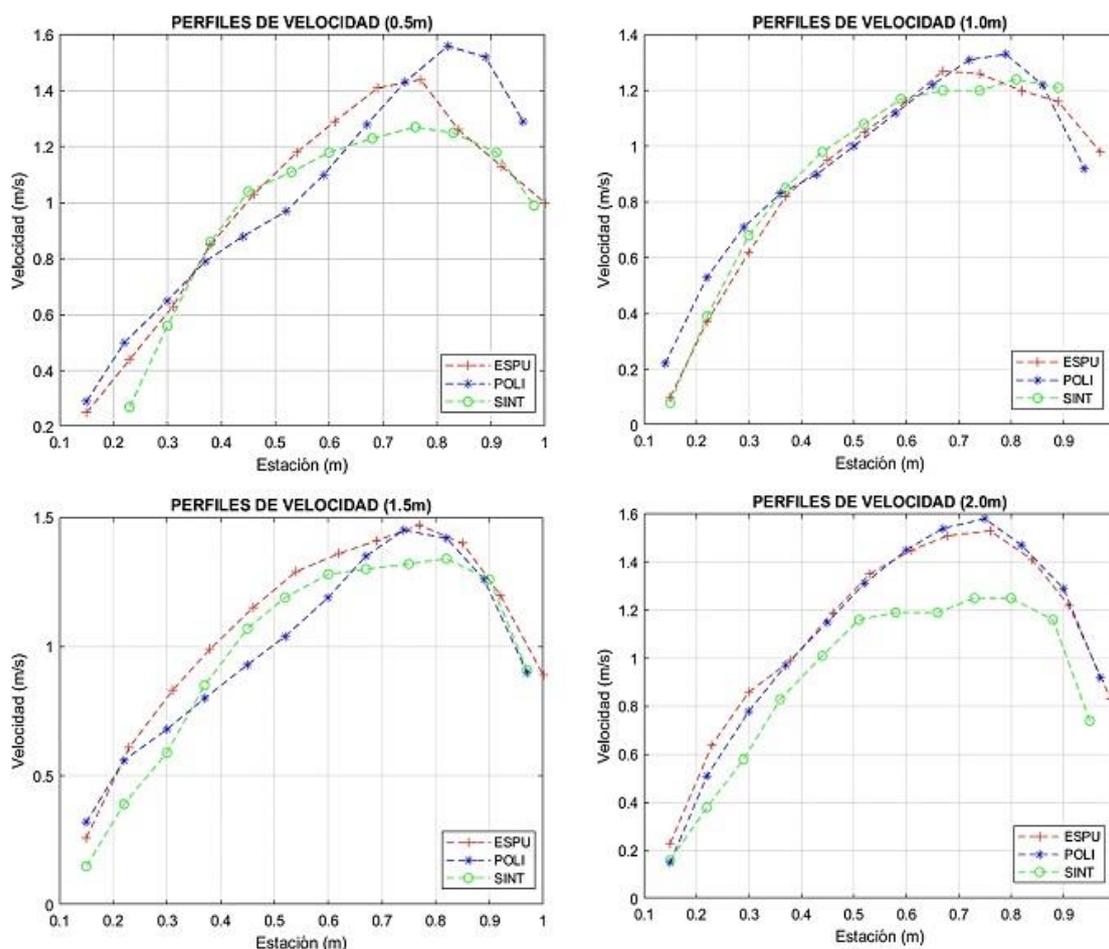


Figura 6. Ejemplo de Perfiles transversales de velocidades superficiales medidos con espuma de jabón líquido, sin trazadores y poli estireno expandido de 1/2" en el canal trapezoidal en el día 9/10/20. Fuente: los autores

Los flujos estudiados a 1,50 m de altura presentan adecuada caracterización en los perfiles de velocidad, mejorando los valores de las magnitudes de velocidad en todos los casos estudiados. Los flujos estudiados a 2,00 m de altura presentan curvas adecuadas como perfiles de velocidad para los casos ESPU y POLI, sin embargo, la curva SINT sigue siendo achatada y con menores valores de magnitud de velocidad. Cabe destacar que a ésta altura se encuentran las máximas velocidades encontradas en todo el estudio.

La figura 7 muestra el comportamiento de los perfiles de velocidad superficial media del flujo para los trazadores ESPU, POLI y SINT para alturas de (0,50, 1,00, 1,50 y 2,00 m). Se observa en la Figura 7a las curvas de 1,50 y 2,00 m presentan un perfil de velocidades mejor definida y con magnitudes vectoriales mayores en cada punto de la estación. La figura 7b muestra las curvas de 0,50, 1,00 y 1,50 m con un comportamiento similar de curvas poco precisas, sin embargo, en 2,00 m se observa una curva adecuada para el flujo, garantizando una estimación confiable de velocidad.

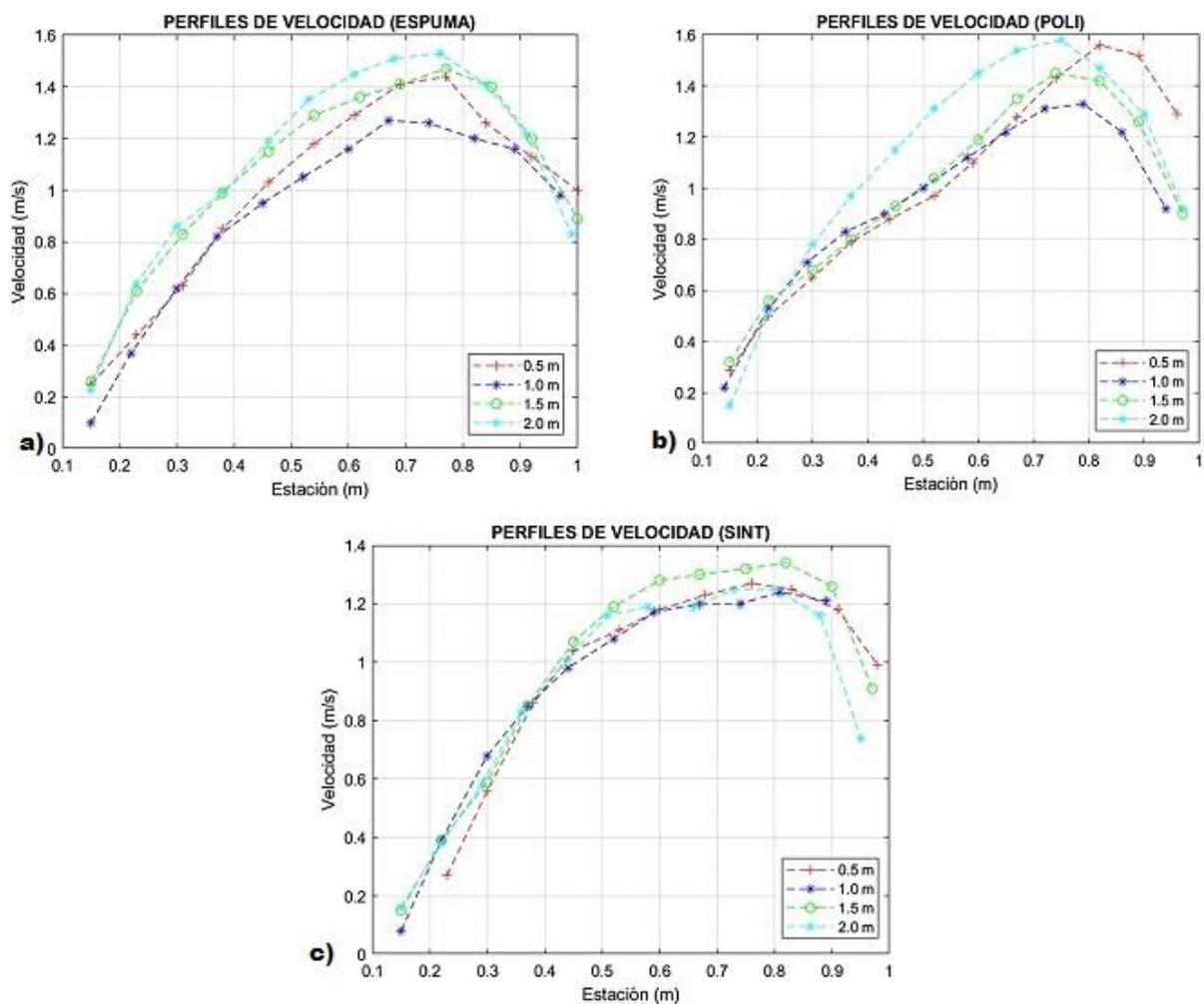


Figura 7. Ejemplo de perfiles transversales de velocidades superficiales con respecto a los trazadores y alturas. Fuente: los autores

La Figura 7c muestra curvas similares, ni una de ellas tiende a ser parabólica, todas son achatadas y con un punto en común en la estación de espejo de agua en 0,75 m debido a la sombra que presentaba la región grabada, sin embargo, de todas ellas la que presenta mayores magnitudes vectoriales es la de 1,50m debido a la adecuada oblicuidad de la cámara que detecta las turbulencias, rugosidad y ondas del flujo. La caracterización de los perfiles de velocidad superficial media depende de factores como la adecuada siembra de trazadores, ángulo oblicuo de la cámara y la iluminación.

Las partículas esparcidas en la superficie del flujo son utilizadas para calcular el vector de velocidad. El resultado de las curvas de velocidades de poli estireno expandido muestra una curva con cambios súbditos, pendientes pronunciados poco precisos de velocidad por la presencia de aglomeración de partículas inducidas por la fuerza de atracción electrostática y por las bajas velocidades del flujo en los extremos del espejo de agua, Dal Sasso [16]. Esto indica que las fuentes de error no solo están en la aglomeración de los trazadores, sino también en la influencia de resistencia del aire en dirección opuesta al flujo.

Las curvas sin trazadores presentan menores magnitudes de velocidad debido principalmente al seguimiento inexacto de las partículas naturales, reflejos de luz en el agua que durante el procesamiento se identifican como partículas de trayectorias irregulares y pérdidas de patrón de movimiento en los siguientes fotogramas, además las condiciones de iluminación en el estudio no fueron homogéneas, la sombra del canal divide el campo de visión en dos regiones, la derecha más brillante y la izquierda más oscura. Así mismo, Tauro [17] mencionó que la iluminación puede sesgar las estimaciones y dar lugar a velocidades irreales.

Las alturas y la orientación de la cámara generan campos de visión oblicua en este estudio. En alturas de 1,50 y 2,00 m muestran curvas de perfiles adecuadas para flujos con trazadores de espuma y poli estireno. Sin embargo, para alturas de 0,50 y 1,00 m los errores se reflejan no sólo en la caracterización inadecuada de los perfiles de velocidad sino también en las bajas magnitudes de vectores de velocidad. Estos mismo errores encontró Harpold [18], sobre la posición de la cámara para ángulos menores a 15° debido a las pérdidas de vectores fuera de plano.

4.3. Estimación del Caudal

La Tabla 3 muestra los resultados de la medición de velocidades medias y caudales, realizadas en distintas fechas, utilizando dos tipos de trazadores y sin trazador, grabadas a diferentes alturas.

Tabla 3. Resumen velocidades y caudales medidos en diferentes casos

Altura (m)	Tipo de trazador	MEDICIONES								
		07/10/2020			08/10/2020			09/10/2020		
		Área (m ²)	Vm (m/s)	Q (m ³ /s)	Área (m ²)	Vm (m/s)	Q (m ³ /s)	Área (m ²)	Vm (m/s)	Q (m ³ /s)
0,50	ESPU	0,19	0,90	0,17	0,18	0,90	0,16	0,17	0,90	0,15
	POLI	0,19	0,88	0,16	0,18	0,66	0,12	0,17	0,91	0,15
	SINT	0,19	0,89	0,16	0,18	0,79	0,14	0,17	0,83	0,14
1,00	ESPU	0,19	0,97	0,18	0,18	1,04	0,19	0,17	0,84	0,14
	POLI	0,19	0,90	0,17	0,18	0,93	0,17	0,17	0,85	0,14
	SINT	0,19	0,94	0,17	0,18	0,94	0,17	0,17	0,91	0,15
1,50	ESPU	0,19	1,00	0,19	0,18	1,06	0,19	0,17	0,98	0,17
	POLI	0,19	0,84	0,16	0,18	0,81	0,15	0,17	0,90	0,15
	SINT	0,19	0,95	0,18	0,18	0,96	0,17	0,17	0,90	0,15
2,00	ESPU	0,19	0,97	0,18	0,18	1,03	0,19	0,17	1,02	0,17
	POLI	0,19	0,84	0,16	0,18	0,86	0,16	0,17	1,02	0,17
	SINT	0,19	0,97	0,18	0,18	0,94	0,17	0,17	0,84	0,14

El producto de velocidad superficial media, coeficiente de velocidad media y el área de la sección da como resultado el caudal en cada caso de este estudio. La variación de los valores en caudales por campaña, se debe principalmente a dos factores: la altura de grabación y el sembrado de trazadores, sin embargo, también hay otras como: viento y el reflejo del sol, que incidieron directamente al flujo, estos factores reducen los valores de velocidad media y por consiguiente al caudal.

5. CONCLUSIONES

La aplicación de la técnica *LSPIV*, requiere una comprensión completa de principios y parámetros involucrados en el procesamiento, orientación de la cámara y sembrado de trazadores, así como el flujo sometido con el ambiente como reflejos y vientos. Los resultados obtenidos con la técnica de velocimetría por imágenes a gran escala muestran características similares con los diferentes casos evaluados. La determinación del área de interrogación para imágenes de resolución 4K fueron de suma importancia reduciendo cuadros de 512 pixeles hasta los 64 pixeles, para aminorar vectores de velocidad erróneos y aumentar la precisión del método estudiado.

La técnica *LSPIV*, demostró ser más efectivo utilizándose partículas trazadoras de espuma de jabón líquido, presentado perfiles de velocidad media de parábolas regulares y con magnitudes mayores en distintas condiciones climáticas y de altura. La altura de grabación del video es un factor muy importante si se va realizar la grabación sin el uso de partículas trazadoras, sin embargo, en los casos de flujos con trazadores y condiciones climáticas poco agresivas pueden ser poco importantes.

6. REFERENCIAS

- [1] F. P. H. John E. Costa, Kurt R. Spicer, Cheng, “Measuring stream discharge by non-contact methods: Aproof-of-concept experiment,” vol. 5, no. 4, pp. 1–2, 2000
- [2] A. Mag, I. Nicolás, and F. Guillén, “Optimización del diseño hidrológico e hidráulico utilizando LSPIV Optimización del diseño hidrológico e hidráulico utilizando LSPIV,” 2019
- [3] R. Bardera Mora, Aplicación del PIV a la medida del coeficiente de resistencia aerodinámica, Madrid. Universidad Complutense de Madrid, 2009
- [4] J. E. C. Gutiérrez, “Evaluacion y Aplicación de la Tecnica de LSPIV para estimar la velocidad superficial en obras hidráulicas,” Inst. Politec. Nac., p. 117, 2012
- [5] R. J. Adrian, “Twenty years of particle image velocimetry,” Exp. Fluids, vol. 39, no. 2, pp. 159–169, 2005
- [6] Hidrologia and E. e I. Hidrologicas, Estudios Hidrológicos del Senamhi, © Servicio. 2020
- [7] F. Tauro, “Particle tracers and image analysis for surface flow observations,” Wiley Interdiscip. Rev. Water, vol. 3, no. 1, pp. 25–39, 2016
- [8] M. Schuth and W. Buerakov, Particle Image Velocimetry. 2017
- [9] W. Thielicke and E. J. Stamhuis, “PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB,” J. Open Res. Softw., vol. 2, 2014
- [10] A. Patalano, C. M. García, and A. Rodríguez, “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),” Comput. Geosci., vol. 109, no. December, pp. 323–330, 2017
- [11] W. Plant, “Streamflow Properties from Time Series of Surface Velocity and Stage,” vol. 9429, no. May, 2020
- [12] F. M. Crivello, “Caracterizacion de flujos en modelos fisicos y prototipos usando tecnicas de velocimetria avanzadas(LSPIV, LSPTV Y ADV),” no. 1, pp. 1–2, 2018
- [13] J. C. G. Serge Tamari, “Informe final del Proyecto de Evaluación de la técnica de LSPIV para estimar la velocidad superficial del agua en obras hidráulicas,” p. 56 p, 2011
- [14] S. Creëlle, R. Roldan, A. Herremans, and Meire, “Validation of large-scale particle image velocimetry to acquire free-surface flow fields in vegetated rivers,” J. Appl. Water Eng. Res., vol. 6, no. 3, pp. 171–182, 2018
- [15] A. P. Lobo, “Implementacion de la tecnica experimental de velocimetria por

seguimiento de partículas (PTV) para cuantificar el recurso hídrico superficial en cursos fluviales de la provincia de Catamarca,” p. 240, 2019

- [16] S. F. Dal Sasso, A. Pizarro, C. Samela, L. Mita, and S. Manfreda, “Exploring the optimal experimental setup for surface flow velocity measurements using PTV,” *Environ. Monit. Assess.*, vol. 190, no. 8, 2018
- [17] F. Tauro, G. Olivieri, A. Petroselli, M. Porfiri, and S. Grimaldi, “Flow monitoring with a camera: a case study on a flood event in the Tiber River,” *Environ. Monit. Assess.*, vol. 188, no. 2, pp. 1–11, 2016
- [18] T. D. A.A. Harpold, S. Mostaghimi, P.P. Vlachos, K. Brannan, “Stream discharge measurement using a large-scale particle image velocimetry (LSPIV) prototype,” vol. 49, no. 6, pp. 1791–1806, 2006