

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería Civil



Método LSPIV para el cálculo de la velocidad superficial en
escurrimientos fluviales

Por:

Fredy Sandro Rosas Flores

Shirley Pamela Tejeda Flores

Asesor:

Ferrer Canaza Rojas

Lima, septiembre 2020

DECLARACION JURADA DE AUTORIA DE TRABAJO DE INVESTIGACION

Ferrer Canaza Rojas, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que el presente trabajo de investigación titulado: "Método LSPIV para el cálculo de la velocidad superficial en escurrimientos fluviales" constituye la memoria que presenta los estudiantes Fredy Sandro Rosas Flores y Shirley Pamela Tejeda Flores para aspirar al grado de bachiller en Ingeniería Civil, cuyo trabajo de investigación ha sido realizado en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este trabajo de investigación son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en Lima, a los 21, septiembre del 2020.



Ferrer Canaza Rojas

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

En Lima, Ñaña, Villa Unión, a los 18 días del mes de setiembre del año 2020, siendo las 11:15 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión campus Lima, bajo la dirección del (de la) presidente(a): Mg. Leonel Chahuares Paucar, el (la) secretario(a): Ing. Reymundo Jaulis Palomino y los demás miembros: Ing. David Díaz Garamendi y el (la) asesor(a) Ing. Ferrer Canaza Rojas con el propósito de administrar el acto académico de sustentación del trabajo de investigación titulado: "Método LSPIV para el cálculo de la velocidad superficial en escurrimientos fluviales" de los (las) egresados (as):

a) **FREDY SANDRO ROSAS FLORES**
 b) **SHIRLEY PAMELA TEJEDA FLORES**
 conducente a la obtención del grado académico de Bachiller en:

INGENIERÍA CIVIL

(Denominación del Grado Académico de Bachiller)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al candidato(a)/s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por el candidato(a)/s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato/a (a): **FREDY SANDRO ROSAS FLORES**

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
APROBADO	17	B+	MUY BUENO	SOBRESALIENTE

Candidato/a (b): **SHIRLEY PAMELA TEJEDA FLORES**

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
APROBADO	16	B	BUENO	MUY BUENO

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al candidato(a)/s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

 Presidente
 Mg. Leonel Chahuares
 Paucar



 Secretario
 Ing. Reymundo Jaulis
 Palomino

 Asesor
 Ing. Ferrer Canaza
 Rojas

 Miembro

 Miembro
 Ing. David Díaz
 Garamendi

 Candidato (a)
 Fredy Sandro Rosas
 Flores

 Candidato/a (b)
 Shirley Pamela Tejeda
 Flores

Método LSPIV para el cálculo de la velocidad superficial en escurrimientos fluviales

ROSAS FLORES FREDY SANDRO* TEJEDA FLORES SHIRLEY PAMELA*

EP. Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión, Perú

Resumen

Este artículo evalúa el método de velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV). LSPIV es sin duda una técnica no intrusiva muy eficiente a la hora de medir velocidades en superficie libre. De hecho, la metodología es muy prometedora en situaciones adversas donde el acceso a las mediciones es imposible. Se valora el método LSPIV revisando un estudio de caso donde se determina la vulnerabilidad basado en la estabilidad de vehículos utilizando videos de colaboración abierta distribuida, para el cual se calcula el producto de la velocidad superficiales (v) y profundidad del agua (h), a pesar de las condiciones grabadas de los videos, esta metodología logra controlar esta situación y una vez más reafirma su versatilidad. LSPIV demuestra que es una técnica que tiene uso potencial en situaciones críticas, zonas donde varían rápidamente el caudal u otros parámetros hidrológicos, zonas de difícil acceso y/o propensas a inundaciones, usando sistemas de aeronave no tribulado la UAS y RPAS, para zonas a a gran escala, ríos de más 5000 m² de área. Concluyendo así que esta metodología es muy versátil y prometedor en sus diferentes aplicaciones durante estas dos últimas décadas.

Palabras clave: Método LSPIV, Velocidad superficial, Uso potencial, Eficiencia.

Abstract

This article evaluates the Large-Scale Particle Imaging Velocimetry (LSPIV) method. LSPIV is undoubtedly a very efficient non-intrusive technique when it comes to measuring free surface speeds. In fact, the methodology is very promising in adverse situations where access to measurements is impossible. The LSPIV method is evaluated by reviewing a case study where vulnerability is determined based on vehicle stability using distributed open collaboration videos, for which the product of surface velocity (v) and water depth (h) is calculated, Despite the recorded conditions of the videos, this methodology manages to control this situation and once again reaffirms its versatility. LSPIV shows that it is a technique that has potential use in critical situations, areas where the flow rate or other hydrological parameters vary rapidly, areas of difficult access and / or prone to flooding, using non-tribulated aircraft systems the UAS and RPAS, for areas aa large scale, rivers of more than 5000 m² in area. Thus, concluding that this methodology is very versatile and promising in its different applications during these last two decades.

Keywords: LSPIV method, Surface speed, Potential use, Efficiency

**Correspondencia de Fredy Sandro Rosas Flores, Shirley Pamela Tejada Flores*

Km. 19 Carretera Central, Ñaña, Lima.

E-mail: fredyrosas@upeu.edu.pe

INTRODUCCION

El agua es muy esencial para la vida, y se considera como un recurso natural que puede ser aprovechado de muchas formas ya sea consumo, agrícolas, industriales, mineros, entre otros. Mientras que el agua también puede tener un impacto negativo si se habla de fenómenos naturales (por ejemplo, inundaciones) que conllevan desastres para los seres vivos, infraestructura y suelos. Por lo que la medición precisa de la velocidad en los ríos es un asunto de importancia en los procesos hidrológicos para evaluar el balance hídrico, controlar la calidad del agua, diseñar estructuras, validar y calibrar los modelos hidrológicos de precipitaciones, escorrentías e inundaciones.

La velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV) es una técnica no intrusiva que se utiliza para medir velocidades instantáneas de superficie libre, de una manera que produzca un campo vectorial de velocidad de flujo. El método LSPIV se desarrolló a partir de la Velocimetría de partículas (PIV), un método bastante utilizado para medir velocidades de flujo en áreas pequeñas. (Kantoush, Schleiss, Sumi, & Murasaki, 2009) mencionan que el método LSPIV fue desarrollado con el propósito de proporcionar campos de velocidad que abarcan grandes áreas de flujo en condiciones de campo o laboratorio.

LSPIV utiliza trazadores flotantes y una cámara de video que rastrea el desplazamiento temporal de los trazadores. Esto implica el uso de una técnica de procesamiento de imágenes digitales, u fotogrametría y una técnica de análisis de vectores, que se puede aplicar fácilmente. El objetivo de este estudio fue evaluar el método LSPIV para el cálculo de la velocidad superficial en escurrimientos fluviales en sus diferentes situaciones y aplicaciones, teniendo en cuenta la recopilación de datos de artículos de campo y experimentales que son necesario para comprender mejor el método LSPIV.

Métodos tradicionales

Hasta hace poco, muchas medidas de descarga han confiado en velocímetros mecánicos, estos instrumentos se han ido aplicando ampliamente a escala global que produjo una cantidad de datos que todavía sirve como referencia para modernos instrumentos de medición de caudal fluvial. Muy a menudo, medidores de corriente (es decir un dispositivo mecánico que consta de hélices o vasos giratorios), se sumergen en el agua para medir velocidades de flujo de una sección transversal de un río (Antonie Patalano, 2017). En reciente décadas, sensores o perfiladores acústicos Doppler (ADCP), que flotan a través de la superficie del agua, se han vuelto populares por su velocidad de medición en grandes ríos (Muste, Ho, & Kim, 2011).

Existe también métodos de medición acústica entre ellos tenemos el método del flotador analizado por (Eduardo et al., 2012), método del molinete o correntómetro (Fluidos, 2002), y estos requieren botes, teleféricos o vadear en la corriente, con el fin de medir las velocidades de una sección transversal de un río. Este procedimiento requiere mucho tiempo y contribuye significativamente al costo del monitoreo de los ríos. Y más aún, la medición es difícil durante periodos de alto caudal ya que pone en peligro a los operadores y equipos, y pueda ver la posibilidad de errores en las mediciones, comprometiendo la calidad y el resultado.



Figura 1. Medición de caudal con molinete por vadeo(izquierda), Velocímetro acústico Doppler ADCP S5(derecha).

Durante las últimas dos décadas, las técnicas cuantitativas de imágenes se han utilizado ampliamente para laboratorio y experimentos de fluidos a escala. Recientemente, (Creutin, Muste, Bradley, Kim, & Kruger, 2003), mencionan que se han utilizado técnicas de teledetección para la exploración de los ríos con la esperanza de proporcionar una precisión y un bajo enfoque de los costos para el monitoreo.

Método PIV (Velocimetría de Imágenes)

La forma más rudimentaria del método PIV probablemente podría remontarse a un concepto de velocidad en que se observó pequeños escombros moviéndose sobre la superficie de una corriente que fluye. Desde este punto de vista de (Adrian, 2005), la velocidad de las partículas es muy antiguo y simple. Ahora, en su forma moderna, PIV significa la medición cuantitativa precisa de vectores de velocidad del fluido en un gran número de puntos simultáneamente.

En 1977 los primeros investigadores se interesaron en el método PIV porque ofreció un medio nuevo y muy prometedor de estudiar la estructura del flujo turbulento. A mediados de la década de 1980, se tenía una gran cantidad de opciones en la que se podría encontrar docenas de artículos como en el caso de (Raffel, Willert, Wereley, & Kompenhans, 2005), que describen diferentes tipos de flujo y sistemas de medición en la que utilizan imágenes ópticas de partículas en la que cada uno difiere del otro por sus medios de iluminación, codificación, partículas, grabación e interrogación.

(Fujita, Muste, & Kruger, 1998) mencionan que la energía necesaria para iluminar partículas finas y producir imágenes de suficiente exposición y claridad fue un problema importante en el método PIV, pero se tenía ya experiencia en Velocimetría con láser Doppler, existía una buena comprensión de los tamaños de partícula necesarios para seguir los flujos turbulentos, y de dispersión de luz. Por lo que (Adrian, 2005), manifiesta que fue posible demostrar que los láseres pulsados proporcionarían energía suficiente para obtener buenas imágenes fotográficas a partir de partículas del tamaño de una micra en el aire y partículas del tamaño de 10 a 30 μm en el agua.

En la primera década de PIV, el mayor desafío fue el interrogatorio de las imágenes, porque las computadoras tenían 128 KB de RAM y un disco duro de 30 MB, en la que el programa ejecutable y los datos en un espacio RAM tenía el mismo tamaño que el tamaño mínimo de archivo de documento utilizado por los procesadores. Prácticamente, era imposible realizar dos dimensiones transformadas de Fourier bidimensionales o análisis de correlación bidimensional en tales máquinas. Por lo tanto, hubo un interés de (Vogt, Reichel, & Kompenhans, 1996) en

realizar métodos no estadísticos, que implicaba operar con una densidad de imagen baja, por ende la probabilidad de encontrar más de un par de partículas por punto de interrogación era pequeña. Por lo que se utilizó el principio de que las imágenes del vecino más cercano que corresponden a la misma partícula (que es sólo aproximada para una densidad de imagen pequeña, pero finita), donde se podrían realizar mediciones exitosas (Tauro, Piscopia, & Grimaldi, 2019).

La dificultad de este método era que, la densidad de imagen reducida que acompañaba a la concentración de partículas, número de vectores por unidad de área no era lo suficientemente grande como para resolver los campos turbulentos por completo. La medición precisa de los flujos de las corrientes, desempeñaba un papel fundamental en los procesos hidrológicos en la que es altamente deseable para muchas aplicaciones prácticas (como manejo de inundaciones y operación de reservorios) (Huang, Young, & Liu, 2018).

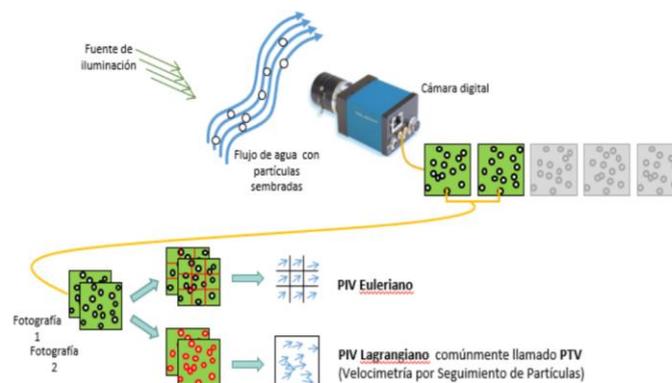


Figura 2. Esquema de la metodología de trabajo para PIV

En los últimos años, las mediciones no intrusivas basadas en radar por ejemplo: en el artículo (Costa et al., 2006) y/o sistemas de imágenes, se han aplicado cada vez más, proporcionando una alternativa más segura para medir la descarga de inundaciones sin la necesidad de muestreo físico y adquisición de datos operados por personas, donde las velocidades de superficie eran caracterizados por imágenes continuas de flujos observados (fluido sembrado) utilizando principalmente dos tipos de algoritmos, es decir, trazadores de partículas y análisis de imágenes (Tauro, 2016).

Ahora, los métodos de correlación comúnmente usados en el marco de PIV son la correlación cruzada directa (DCC) y la transformada de Fourier (FT). En el artículo de (Thielicke & Stamhuis, 2014); realiza la correlación cruzada (DCC) en el dominio espacial en la que requiere dos parámetros: tamaño del área de interrogación (IA) y el tamaño del área de búsqueda (SA), de modo que el tamaño de la SA supere al tamaño del IA. (Schuth & Buerakov, 2017) menciona que para cada par de imágenes en una secuencia de fotogramas, DCC busca el patrón presente en el SA de la primera imagen dentro del IA de la segunda imagen. Por tanto, el tamaño de la SA tiene que ser seleccionado de una manera que tenga la magnitud del desplazamiento de partículas entre imágenes consecuentes.

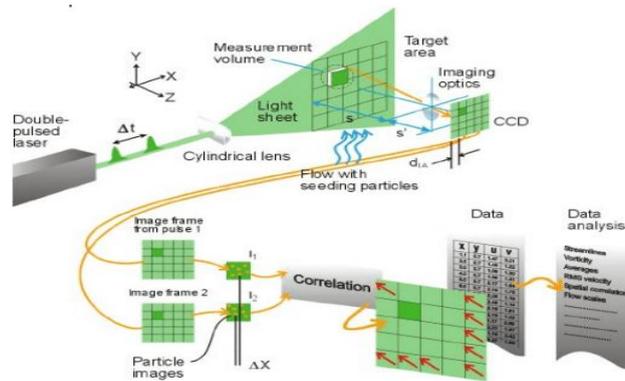


Figura 3. Esquema del conjunto de elementos para la aplicación de PIV clásico

Históricamente, la técnica basada en imágenes fue la primera y continúa sirviendo como una herramienta importante para el flujo investigación.

Método LSPIV (Velocimetría de Imágenes a gran escala)

(Kaiwei Chen, 2018) menciona que el método LSPIV sigue siendo una alternativa potencial y que ha ganado una creciente popularidad en técnicas de medición de velocidad basadas en imágenes. Siendo (Fujita, 1994) como uno de los pioneros de la comunidad de ingenieros, trabajó su primer artículo “Application of Video Image Analysis for Measurements of river-Surface Flows”, siendo mejorada por (Fujita & Aya, 2000);(Fujita, 2002); donde se aplicaron para medir velocidades de superficie libre en ríos a gran escala que abarcan hasta 45000 m² bajo diferentes rangos de velocidad.

Durante más de una década, los autores (Muste, Fujita, & Hauet, 2008), han abordado en colaboración los aspectos multifacéticos de LSPIV. La primera década el desarrollo e implementación de LSPIV estuvo dominada por el ajuste de las técnicas y algoritmos PIV convencionales para medir flujos, han estado colaborando activamente en los desarrollos de LSPIV, por lo que la capacidad y confiabilidad de visualización de flujo se comparó con otros instrumentos de medición a través de investigaciones de laboratorio en el artículo de (Creutin, Muste, & Li, 2002). A lo largo de los años, se han mapeado áreas de 100 a 5000m² de forma no intrusiva con LSPIV para proporcionar campos vectoriales de velocidad superficial instantáneos, documentando patrones de flujo y mediciones de descargas de ríos. Siendo estos artículos destacados(Fujita et al., 1998) ;(Bradley, Kruger, Meselhe, & Muste, 2002) ;(Weitbrecht, Muste, Creutin, & Jirka, 2007) en esos años. El análisis de errores debido a la obtención de imágenes desde ángulos oblicuos se estimó en un entorno de laboratorio controlado por (Kim et al., 2008), y se ha ido investigando varios enfoques como el acoplamiento de la velocimetría de imagen y la simulación numérica para la inferencia de información de flujo fuera del área medida por (M. Jodeau, Hauet, Paquier, Le Coz, & Dramais, 2008).

Recientemente, LSPIV fue equipado con nuevos algoritmos de procesamiento y mejora de imagen desarrollados por (Houser & Hamilton, 2009), incorporando nuevas configuraciones de LSPIV. (Muste et al., 2008) y (Fujita & Aya, 2004) menciona que la velocimetría de imagen de partículas a gran escala (LSPIV) es una técnica no intrusiva utilizada para medir las velocidades instantáneas de la superficie libre, de una manera que produce un campo vectorial bidimensional de velocidad de flujo y que fue desarrollada a partir de Particle Image Velocimetría (PIV). Más tarde, fue etiquetada como partícula a gran escala velocimetría de imagen (LSPIV) teniendo en cuenta el gran tamaño del área de imagen.

(Gutiérrez, 2012) describe que el PIV convencional incluye cuatro componentes: visualización

de flujo, iluminación, grabación de imágenes y procesamiento de imágenes. Dado que las imágenes LSPIV cubren grandes áreas que generalmente se registran desde un ángulo oblicuo a la superficie del flujo y que habitualmente se involucra un paso adicional: la orto rectificación de la imagen.

Estudio de Caso

El trabajo fue realizado por (Mag, Nicolás, & Guillén, 2019) titulado “Optimización en el uso de LSPIV para determinar la vulnerabilidad de vehículos utilizando videos de colaboración abierta y distribuida” en el año 2019. En este trabajo se recopilieron videos de diferentes fuentes de búsqueda como (Google, YouTube, etc.) donde se pueda observar flujos de agua donde las crecidas son repentinas. Se encontraron videos de inundaciones relacionados con el movimiento el arrastre y/o pérdida de vehículos debido a las fuertes velocidades que los flujos presentan. Este artículo busca estimar la vulnerabilidad de los vehículos según el criterio de estabilidad. El principal problema que los autores tuvieron fue el desconocimiento de los puntos de control, ya que son muy importantes para la aplicación de la metodología LSPIV y peor aún ir a relevar esos puntos in-situ, era imposible. Por esta razón se propone optimizar esta metodología LSPIV para poder estimar la vulnerabilidad de vehículos utilizando videos de colaboración abierta y distribuida, haciendo uso de las dimensiones de diferentes vehículos sumergidos en los flujos estudiados.

Metodología:

En esta sección los autores seleccionan videos a partir de varios criterios, como: autenticidad, calidad y el tipo de evento grabado. Además, que en la calidad algunos videos eran muy bajas en resolución. En otras situaciones el cálculo de las longitudes de los puntos de control se vio afectado por la oblicuidad de las cámaras, esto distorsionaba fuertemente la perspectiva. El equipo investigó 20 videos de las cuales 8 videos permitieron su cuantificación adecuada de la velocidad y la altura del flujo, según la tabla.

Nº	Lugar del video registrado	Fuente
1	Asunción, Paraguay	https://www.youtube.com/watch?v=uqwuruy17wl
2	Lima, Perú	https://www.youtube.com/watch?v=TI_Hhh2igBE
3	R. Ceballos, Córdoba, Argentina	Video registrado por un vecino
4	Comodoro Rivadavia, Argentina	Video registrado por un vecino
5	Gaziantep, Turquía	https://www.youtube.com/watch?v=kE0H0qVJJMk
6	Kilmarnock, Escocia	https://www.youtube.com/watch?v=hut-r1TVyho&t=22s
7	Toowoomba, Australia	https://www.youtube.com/watch?v=kYUpkPTcqPY
8	S. Victoria Este, Salta, Argentina	https://www.youtube.com/watch?v=pUYRJwqSePs

Figura 4. Videos analizados del autor

En la figura 4 se observa, algunos vehículos en movimiento y otras no, dependiendo del video que se analiza, estas son claramente en función a las velocidades y altura de flujo y posición del vehículo.





Figura 5. Videos de vehículos en movimientos obtenidas por el autor

Los autores aplicaron la metodología LSPIV siguiendo los pasos aplicado en el artículo de (Antonie Patalano, 2017) la cual se resumen a continuación.

- Estabilización del video: esto es debido a que el video fue grabado por personas aficionadas a la grabación, la principal característica de estos videos son el movimiento tanto en el plano horizontal como el plano vertical, ya que no contaban con un trípode y la cámara no estaba fijada en una sola posición, sino que los usuarios lo grabaron girando tanto a la derecha como a la izquierda de sí mismo generando un ángulo de barrido. Se extrajeron las imágenes del video registrado y se convirtieron a escala grises y se estabilizaron digitalmente antes del procesamiento de imágenes.
- Las imágenes fueron procesadas con la herramienta de Matlab PIVLab de (A. M. Jodeau, Hauet, & Coz, 2018), la cual estima los campos de desplazamiento en pixeles, entre pares de imágenes. Seguidamente fue calculado el campo de desplazamiento medio a partir de los campos instantáneos estimados a lo largo de todo el video analizado.
- Debido a la posición oblicua de la cámara, el campo de desplazamiento medio de la región de interés tuvo que ser rectificado y escalado. Para ellos se han estimado seis distancias entre los cuatro puntos de control, como se observa en la imagen, teniendo en cuenta las dimensiones del vehículo que se encuentran dentro del flujo.



Figura 6. Distancias medidas entre los cuatro puntos de control

Los autores validan esta metodología de usar las seis distancias de los cuatro puntos de control (incluyendo diagonales), teniendo en cuenta las dimensiones del vehículo tal como se muestra en la figura 6. Finalmente se analiza el producto de las velocidades del agua estimadas (v) y las profundidades del agua (h) para evaluar la vulnerabilidad a la estabilidad del vehículo. Además, durante el mismo evento de crecida, se registraron dos videos más del mismo vehículo, pero en diferente ubicación. En uno de estos videos se analiza la iniciación del arrastre y en el otro video se ve fijo el vehículo (sin movimiento).

En los últimos años muchos autores empiezan a estudiar esta metodología porque existe algunas incertidumbres a la hora de medir las velocidades superficiales de los flujos. Y en base a la

experiencia que tuvieron el porcentaje de error oscila de $\pm 10\%$. Además, las estimaciones de la profundidad del agua realizada en este trabajo son de orden de 0.05m, por lo tanto, teniendo en cuenta estas incertidumbres, los intervalos de confianza para la velocidad y profundidad del agua se han incluido. Los valores v-h estimados se muestra en la figura 7, superpuestos con la gráfica de estabilidad preparado por (Xia, Teo, Lin, & Falconer, 2011), para dos tipos de vehículos y para diferentes tipos de ataques del flujo (paralelo o perpendicular al eje longitudinal de vehículos). Los casos con movimiento están por encima del umbral, y en los videos que se aprecia los vehículos estáticos están por debajo del umbral. En algunos casos donde la velocidad es alta se observa grandes desplazamientos de los vehículos que corresponden a las zonas altamente vulnerables.

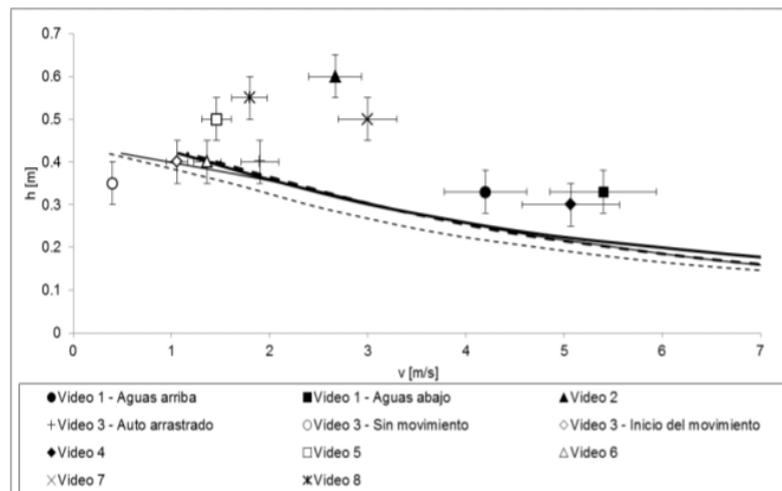


Figura 7. Umbrales de estabilidad

En la figura 7 se observa que siempre hubo movimiento de los vehículos, el valor de v-h estaba por encima del umbral establecido, mientras que en los casos donde no se observó movimiento no se superó dicho umbral. Los resultados que obtuvieron validan el umbral de movimiento crítico determinado por (Xia et al., 2011).

Uso potencial del método LSPIV

(Jasek, Muste, & Ettema, 2001) menciona que LSPIV es una técnica alternativa de uso potencial para la observación y para mantener la información de descarga y velocidad en situaciones donde otras técnicas pueden ser más costosas, menos precisas, y en algunos casos inviables. La velocimetría por imagen de partículas a gran escala es una buena promesa para aplicación con fotografías aéreas, radar y control remoto imágenes de satélite para monitorear el hielo en diversas situaciones de campo. Los avances en software están haciendo que LSPIV sea una técnica fácil y útil para monitorear flujos afectados por el hielo. ya en aplicación de laboratorio LSPIV puede producir campos vectoriales en tiempo real.

En el artículo de (Nomqophu, 2018) titulado “Potential remote sensing technologies to enhance the monitoring and reporting of water flow sel” en el año 2018, tiene como objetivo el desafío de explorar el uso potencial de tecnologías innovadoras para completar la constante disminución de las observaciones in situ en Sudáfrica. Mencionando también que la comunidad ha adoptado la técnica basadas en imágenes de satélite, altimetría laser, radar altimetría, vehículo aéreo no tripulado (UAV) o drones, etc. Para medir los niveles de agua, además se ha dedicado notablemente al desarrollo de flujos sin contacto o no intrusivo, y sensores de observaciones como el LSPIV, que implica la formación de imágenes del campo de visión y la orto-rectificación de la imagen mediante el esquema de transformación y procesamiento de imágenes y la correlación cruzada de alta velocidad. Concluyendo que Sudáfrica debería

obtener experiencias de la implementación de estas tecnologías de otras partes del mundo e investigar su potencia despliegue e implementación en este país.

En el artículo de (Samboko et al., 2020), realiza el seguimiento de los flujos de aguas arriba, esto es muy importante debido a que una ubicación de vía fluvial en el río aguas arriba puede proporcionar una habilidad significativa para tales pronósticos. La naturaleza del río está representada por la ramificación del río en diferentes canales. El cauce del río que se muestra en la figura 8, que fluye principalmente a lado izquierdo, sin embargo, fácilmente podría estar a la derecha o en el medio en la próxima temporada. Esto dificulta la configuración permanente de la infraestructura del aforo. Además, las inundaciones extremas han provocado que los sitios de observación sufrieran daños graves. Las inundaciones lavaron el pozo tranquilizador y los transductores de presión. Esto lo convierte en un lugar ideal y relevante para probar la usabilidad de la estimación de flujo basada en UAV en lugares de difícil acceso lugares.



Figura 8. Metodología LSPIV en Drones

En los últimos años, las metodologías innovadoras se han desarrollado para medir el caudal en tiempo real en alta resolución espacial. En este contexto, varios autores como (Dal Sasso, Pizarro, Samela, Mita, & Manfreda, 2018) están explorando el uso potencial de observaciones por teledetección de satélite, pero su uso todavía está limitado por resoluciones de espacio temporales. Otras herramientas, como radar, sensores de microondas y metodologías ópticas pueden proporcionar información útil. (Lewis, Lindroth, & Rhoads, 2018) mencionan que se pueden utilizar para instalaciones fijas en ríos que proporcionar observaciones continuas a lo largo del tiempo o se pueden montar en un sistema aéreo no tripulado (UAS) que permite la cobertura para todas las ubicaciones posibles a lo largo de un sistema fluvial. Entre ellos tenemos el artículo de (De Schoutheete, Carlier D'Odeigne, & Soares-Fraza, 2019) que sugieren en particular las formas de secciones transversal de la base de datos SPW que se utilizará para evaluar el uso potencial de la metodología durante las inundaciones, cuando son imposibles las mediciones directas del río.

Las mejoras simultáneas y continuas de hardware están mejorando como en las configuraciones y las capacidades operativas de LSPIV. Lo más notable son los avances con el método en el año 2017, en el artículo de (Bolognesi et al., 2017) se realizó la medición de la velocidad superficial con una técnica de sistema aeronave pilotada a distancia (RPAS) de bajo costo verificando la confiabilidad de los resultados del método LSPIV. Así, varios estudios demuestran que el método LSPIV se puede utilizar con éxito y eficiencia para flujos a gran escala en condiciones de laboratorio o de campo para medir velocidades de flujo.

CONCLUSIONES

LSPIV es sin duda una técnica de medición muy poderosa que proporciona una visión profunda de los fenómenos de flujos complejos. Siendo más simple y fácil de usar. Además, la incertidumbre de la medición puede disminuir con la experiencia del investigador.

La metodología LSPIV es muy prometedora para la observación y/o medición de corrientes de ríos y en zonas de difícil acceso en comparación de otros métodos de medición (intrusivos) que son ineficientes o sencillamente muy caros.

En el estudio de caso la vulnerabilidad por estabilidad de vehículos depende no solo de la posición del vehículo y el ángulo del ataque del flujo (paralelo o perpendicular al eje longitudinal del vehículo) sino también de los parámetros velocidad del flujo (v) y la profundidad del agua (h).

La adición de sistemas aéreos no tripulados a esta metodología ha logrado dar un paso agigantado, gracias a ello se resolvieron varios problemas que presentaba la propia metodología a la hora de hacer mediciones, incluso se reducen algunos pasos a la hora de hacer los cálculos, y se extiende claramente su uso.

REFERENCIAS

- Adrian, R. J. (2005). Twenty years of particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*, 39(2), 159–169. <https://doi.org/10.1007/s00348-005-0991-7>
- Antonie Patalano, C. M. G. (2017). *Desarrollo e implementación en gran escala de técnicas de velocimetría por imágenes para caracterizar flujos de agua con superficie libre* (p. 235). p. 235. Universidad Nacional de Córdoba.
- Bolognesi, M., Farina, G., Alvisi, S., Franchini, M., Pellegrinelli, A., & Russo, P. (2017). Measurement of surface velocity in open channels using a lightweight remotely piloted aircraft system. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(1), 73–86. <https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1184717>
- Bradley, A. A., Kruger, A., Meselhe, E. A., & Muste, M. V. I. (2002). Flow measurement in streams using video imagery. *Water Resources Research*, 38(12), 51-1-51–58. <https://doi.org/10.1029/2002wr001317>
- Costa, J. E., Cheng, R. T., Haeni, F. P., Melcher, N., Spicer, K. R., Hayes, E., ... Barrick, D. (2006). Use of radars to monitor stream discharge by noncontact methods. *Water Resources Research*, 42(7), 1–14. <https://doi.org/10.1029/2005WR004430>
- Creutin, J. D., Muste, M., Bradley, A. A., Kim, S. C., & Kruger, A. (2003). *River gauging using PIV techniques: a proof of concept experiment on the Iowa River*. 277, 182–194. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00081-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00081-7)
- Creutin, J. D., Muste, M., & Li, Z. (2002). Traceless quantitative imaging alternatives for free- surface measurements in natural streams. *Hydraulic Measurements and Experimental Methods*, 750–759. [https://doi.org/10.1061/40655\(2002\)38](https://doi.org/10.1061/40655(2002)38)
- Dal Sasso, S. F., Pizarro, A., Samela, C., Mita, L., & Manfreda, S. (2018). Exploring the optimal experimental setup for surface flow velocity measurements using PTV. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(8). <https://doi.org/10.1007/s10661-018->

- De Schoutheete, F., Carlier D'Odeigne, O., & Soares-Fraza, S. (2019). Drone-Driven Surface Velocity Measurements in Natural Rivers. *38th IAHR World Congress - "Water: Connecting the World,"* 38(1), 1137–1144. <https://doi.org/10.3850/38wc092019-0782>
- Eduardo, C., Gutiérrez, D., Armando, J., Ríos, S. D. L., Patricia, M., Gaffare, G., ... México, D. (2012). *Medición de caudales mediante la implementación de un vehículo acuático teleoperado.* 28(1), 73–91.
- Fluidos, E. A. P. I. M. D. E. (2002). *Análisis de aforo de la estación idrométrica Obrajillo-Periodo 2000-2001.*
- Fujita, I. (1994). *Application of Video Image Analysis for Measurements of River-Surface Flows.*
- Fujita, I. (2002). *A Novel Free-Surface Velocity Measurement Method Using Spatio-Temporal Images.*
- Fujita, I., & Aya, S. (2000). Refinement of LSPIV technique for monitoring river surface flows. *Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management 2000: Building Partnerships*, 104(1), 1–9. [https://doi.org/10.1061/40517\(2000\)312](https://doi.org/10.1061/40517(2000)312)
- Fujita, I., & Aya, S. (2004). Refinement of LSPIV technique for monitoring river surface flows. *Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management 2000: Building Partnerships*, 104(1), 1–9. [https://doi.org/10.1061/40517\(2000\)312](https://doi.org/10.1061/40517(2000)312)
- Fujita, I., Muste, M., & Kruger, A. (1998). Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications. *Journal of Hydraulic Research*, 36(3), 397–414. <https://doi.org/10.1080/00221689809498626>
- Gutiérrez, J. E. C. (2012). *Evaluación Y Aplicación De La Técnica De Lspiv Para Estimar La Velocidad Superficial En Obras Hidráulicas.*
- Houser, C., & Hamilton, S. (2009). Sensitivity of post-hurricane beach. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(March), 613–628. <https://doi.org/10.1002/esp>
- Huang, W. C., Young, C. C., & Liu, W. C. (2018). Application of an automated discharge imaging system and LSPIV during typhoon events in Taiwan. *Water (Switzerland)*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/w10030280>
- Jasek, M., Muste, M., & Ettema, R. (2001). Estimation of Yukon River discharge during an ice jam near Dawson City. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28(5), 856–864. <https://doi.org/10.1139/cjce-28-5-856>
- Jodeau, A. M., Hauet, A., & Coz, J. Le. (2018). *Manual Fudaa-LSPIV.*
- Jodeau, M., Hauet, A., Paquier, A., Le Coz, J., & Dramais, G. (2008). Application and evaluation of LS-PIV technique for the monitoring of river surface velocities in high flow conditions. *Flow Measurement and Instrumentation*, 19(2), 117–127. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2007.11.004>
- Kaiwei Chen. (2018). *Application of large-scale particle image velocimetry at the Hydraulics Laboratory of Colorado State University.* Colorado State University Fort.
- Kantoush, S. A., Schleiss, A. J., Sumi, T., & Murasaki, M. (2009). Large-Scale PIV Surface Flow Measurements in Shallow Basins with Different LSPIV implementation for environmental flow in various laboratory and field cases. *Journal of Hydro-Environment*

- Research*, (December). <https://doi.org/10.1016/j.jher.2011.07.002>
- Kim, Y., Muste, M., Hauet, A., Krajewski, W. F., Kruger, A., & Bradley, A. (2008). Stream discharge using mobile large-scale particle image velocimetry: A proof of concept. *Water Resources Research*, *44*(9), 1–6. <https://doi.org/10.1029/2006WR005441>
- Lewis, Q. W., Lindroth, E. M., & Rhoads, B. L. (2018). Integrating unmanned aerial systems and LSPIV for rapid, cost-effective stream gauging. *Journal of Hydrology*, *560*, 230–246. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.03.008>
- Mag, A., Nicolás, I., & Guillén, F. (2019). *Optimización del diseño hidrológico e hidráulico utilizando LSPIV Optimización del diseño hidrológico e hidráulico utilizando LSPIV*.
- Muste, M., Fujita, I., & Hauet, A. (2008). Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments. *Water Resources Research*, *46*(4), 1–14. <https://doi.org/10.1029/2008WR006950>
- Muste, M., Ho, H. C., & Kim, D. (2011). Considerations on direct stream flow measurements using video imagery: Outlook and research needs. *Journal of Hydro-Environment Research*, *5*(4), 289–300. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2010.11.002>
- Nomqophu, W. (2018). Potential Remote Sensing Technologies To Enhance the Monitoring and Reporting of Water Flows. *Water Research Commission, WRC Report No. 486/1/95*.
- Raffel, M., Willert, C. E., Wereley, S. T., & Kompenhans, J. (2005). *Particle Image Velocimetry*.
- Samboko, H. T., Abas, I., Luxemburg, W. M. J., Savenije, H. H. G., Makurira, H., Banda, K., & Winsemius, H. C. (2020). Evaluation and improvement of remote sensing-based methods for river flow management. *Physics and Chemistry of the Earth*, *117*, 102839. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102839>
- Schuth, M., & Buerakov, W. (2017). Handbuch Optische Messtechnik. In *Handbuch Optische Messtechnik*. <https://doi.org/10.3139/9783446436619>
- Tauro, F. (2016). Particle tracers and image analysis for surface flow observations. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, *3*(1), 25–39. <https://doi.org/10.1002/wat2.1116>
- Tauro, F., Piscopia, R., & Grimaldi, S. (2019). PTV-Stream: A simplified particle tracking velocimetry framework for stream surface flow monitoring. *Catena*, *172*(September 2018), 378–386. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.09.009>
- 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>
- Vogt, A., Reichel, F., & Kompenhans, J. (1996). A Compact And Simple all Optical Evaluation Method for PIV Recordings. *Developments in Laser Techniques and Applications to Fluid Mechanics*, 423–437. https://doi.org/10.1007/978-3-642-79965-5_28
- Weitbrecht, V., Muste, M., Creutin, J.-D., & Jirka, G. H. (2007). Geschwindigkeitsmessungen mit Particle-Image-Velocimetry: Labor- und Feldmessungen. *Mitteilungsblatt Der Bundesanstalt Für Wasserbau*, *90*(90), 79–90.
- Xia, J., Teo, F. Y., Lin, B., & Falconer, R. A. (2011). Formula of incipient velocity for flooded vehicles. *Natural Hazards*, *58*(1), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9639-x>