

# Material didáctico de la OMM - Mediciones de la velocidad de la superficie mediante velocimetría de imágenes.<sup>1</sup>

## 1 Descripción general.

Los métodos de velocidad superficial se basan en la medición de la velocidad del agua en la superficie, para calcular el valor de caudal de una corriente. Este proceso requiere el seguimiento (temporización) de las estructuras de la superficie, flotadores o trazadores naturales a medida que viajan a una distancia conocida. Esto permite calcular una velocidad medida que se supone que es representativa de la velocidad real de la superficie del agua en ese punto de medición. Un flujo de trabajo común para los métodos de velocidad superficial para derivar el caudal incluye:

1. Las velocidades superficiales se miden en un solo punto o en varios puntos a lo largo del ancho del canal.
2. Las velocidades superficiales medidas se transforman en un valor de velocidad media representativo de la profundidad total del flujo. Esto se logra a través de fórmulas o mediante la aplicación de coeficientes generalmente conocidos como 'alfa superficial'.
3. Se pueden aplicar múltiples velocidades medias a un área de sección transversal (de la misma manera que una medición por vadeo) y el caudal se calcula ya sea mediante el método de sección media (*mid-section*) o de sección promedio (*mean-section*).
4. Los requisitos para las mediciones de velocidad superficial se incluyen en la *norma ISO 748 Hidrometría: medición del flujo de líquido en canales abiertos utilizando correntímetros o flotadores*.

### 1.1 Ventajas y desventajas.

El resurgimiento de los métodos de velocidad superficial se basa en las ventajas prácticas que este método puede proporcionar sobre otras técnicas de medición de caudal y el avance de tecnologías como los drones. Al igual que con todas las técnicas de medición, existen criterios de uso que el usuario debe conocer para garantizar la confianza en los datos medidos.

### 1.2 Ventajas.

1. Mejora de la seguridad del personal para mediciones de alto caudal.
2. Técnica de medición no intrusiva.
3. Se puede utilizar para realizar mediciones de velocidad y/o caudal.
4. No hay restricciones de profundidad para el análisis de velocidad. Adecuado para flujos poco profundos donde las distancias de exclusión del ADCP son problemáticas.
5. Posibilidad de aplicaciones remotas en las que no se requiere personal en el sitio durante la medición.

---

<sup>1</sup> Este documento es una traducción libre, en gran medida asistida por IA, de la versión original en inglés. Se ofrecen disculpas por cualquier error de traducción que pudiese aparecer en el texto.

6. Equipos de medición económicos en forma de cámaras y drones de bajo coste.
7. Adecuado para entornos de crecida de alto caudal y escombros que presentan dificultades y peligros para las mediciones ADCP. Esto incluye flujos que cambian rápidamente, como crecidas repentinas.
8. Precisión comparable a las técnicas de medición de caudal actualmente aceptadas, cuando se aplican correctamente y se puede visualizar el movimiento del trazador.
9. Gran cantidad de videos de ciencia ciudadana provenientes de redes sociales pueden utilizarse.
10. Proporciona un registro visual de los eventos de flujo.

### 1.3 Desventajas.

1. Los trazadores superficiales utilizados para calcular la velocidad deben ser transportados con la velocidad de la superficie.
2. El fuerte viento predominante puede sesgar potencialmente el movimiento de los trazadores superficiales (se vuelven poco representativos de la velocidad de la superficie).
3. Los valores alfa superficiales pueden ser específicos del sitio y del nivel de agua.
4. Como método de velocidad de área, el área de la sección transversal debe medirse, generalmente por separado, y a menos que haya características de lecho estables, es posible que el área de la sección transversal no se conozca con confianza.
5. La falta de trazadores superficiales o la imposibilidad de realizar un seguimiento de los trazadores superficiales pueden comprometer la determinación de los datos de velocidad.

NOTA: Al igual que con cualquier medición de velocidad/caudal, es importante que el análisis y los resultados se verifiquen en busca de errores y que los datos tengan sentido hidrológico.

## 2 Métodos de medición de la velocidad superficial.

Los dos métodos más comunes que utilizan actualmente software/hardware estable y con soporte activo para calcular las velocidades superficiales y el caudal en canal abierto son:

- Velocimetría de imagen: utiliza predominantemente la velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV) y la velocimetría de imágenes espaciotemporal (STIV).
- Radar de velocidad superficial – Soluciones fijas y móviles.

### 2.1 Consideraciones importantes.

Los métodos de velocidad superficial no son adecuados para todos los sitios de medición, y es importante que los profesionales que aplican estas metodologías entiendan dónde estos métodos no proporcionarán datos precisos de velocidad/caudal.

Las condiciones importantes del sitio que se deben evitar incluyen:

1. Fuerte viento predominante en la superficie del agua.
2. Agua clara, sin trazadores superficiales visibles, texturas u ondulaciones transportadas por el flujo. El material de rastreo puede ser agregado por el usuario en el campo si está en el sitio.
3. Flujo influenciado por las mareas, efectos de remanso (en el control hidráulico o cerca de él) o cualquier otra condición del sitio que pueda impedir la cuantificación precisa de un coeficiente alfa superficial (se relaciona solo con los cálculos de caudal).

Las consideraciones importantes a la hora de grabar vídeos son:

1. Los sitios de cámaras fijas necesitan un montaje de cámara seguro con una buena vista del ancho del canal, incluidos los anchos de canal a alturas de flujo máximo.
2. Las mediciones realizadas con un dron requieren que el dron flote en una posición estable durante la recopilación de videos. Un estabilizador (cardán) de 3 vías ayuda a mantener una grabación de video estable. Los métodos de estabilización de imagen también ayudan y, a menudo, están integrados en el software de velocimetría de imagen.

### 3 Métodos de velocimetría de imágenes.

La velocimetría de imágenes es una técnica de medición de la velocidad de la superficie cada vez más popular, que utiliza un vídeo grabado de la superficie del agua y los trazadores en movimiento para calcular las velocidades de la superficie. Estas velocidades se pueden calcular en múltiples puntos a través de un canal.

La velocidad de la imagen se basa en el escalado preciso de los píxeles a metros, en relación con el sensor de la cámara, el ancho del canal y el nivel del agua. Esto se logra a través de un proceso de ortorrectificación (Sección 4).

Una vez que se calibran los píxeles, los trazadores superficiales se pueden rastrear a distancias conocidas con precisión a través de los píxeles. La duración del vídeo proporciona la referencia de tiempo necesaria para calcular la velocidad.

Actualmente hay dos métodos/algoritmos de escritorio maduros y compatibles disponibles para el procesamiento de velocimetría de imágenes:

- Velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV), que utiliza un algoritmo de correlación cruzada. *Fujita et al 1997*
- Velocimetría de imágenes espaciotemporal (STIV), que utiliza un análisis de tensor de gradiente. *Fujita et al 2004*

Se están desarrollando y aplicando métodos adicionales a las mediciones de caudal de corriente, como el caudal óptico.

Debido a que la velocimetría de imágenes es una solución de medición de velocidad y caudal basada en software, es importante que, al decidir qué software de procesamiento utilizar, los resultados del software se hayan verificado mediante mediciones simultáneas en una variedad de condiciones ambientales.

### 3.1 Velocimetría de imágenes de partículas a gran escala (LSPIV).

Desde que se desarrolló LSPIV (Fujita *et al.*, 1998), la metodología se ha modificado aún más y se puede conocer por muchas otras abreviaturas dependiendo de la aplicación de software.

1. LSPIV es la aplicación de la velocimetría de imágenes de partículas (PIV) a un entorno 3D del mundo real.
2. El algoritmo de procesamiento central para derivar velocidades es siempre un análisis de correlación cruzada del movimiento del trazador superficial.
3. Para este documento, el término genérico de LSPIV se utiliza para describir los métodos que utilizan un análisis de velocidad superficial basado en PIV de correlación cruzada.
4. LSPIV puede determinar las velocidades de la superficie en 2D (es decir, la dirección y la magnitud).

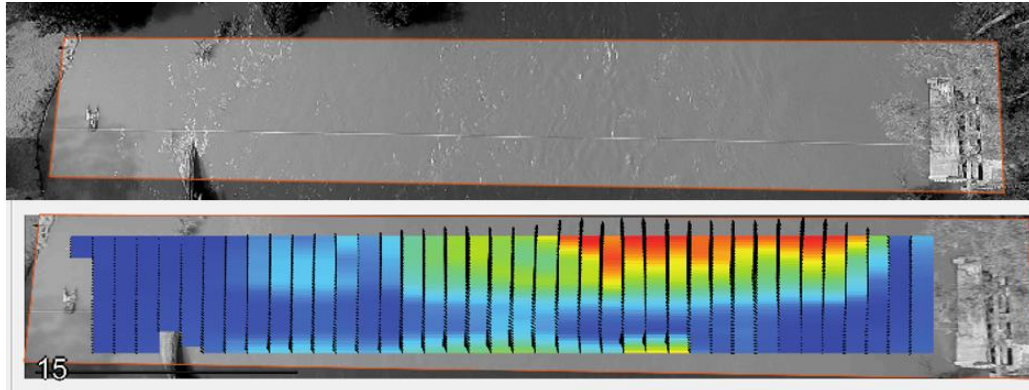
#### 3.1.1 Análisis LSPIV.

Todos los programas que utilizan análisis de correlación cruzada requieren que los fotogramas de vídeo se separen en imágenes individuales (fotogramas). Al separar cada fotograma individual, se produce una serie de imágenes de lapso de tiempo. Por lo tanto, un vídeo grabado a 30 FPS (fotogramas por segundo) puede producir 30 imágenes separadas por cada segundo de vídeo grabado. La diferencia de tiempo entre las imágenes extraídas (fotogramas) representa un intervalo de tiempo utilizado en el cálculo de la velocidad.

Cuando se utiliza un software de velocimetría de imágenes basado en LSPIV, se deben seguir las siguientes recomendaciones:

1. El intervalo de tiempo entre las imágenes sucesivas extraídas del vídeo debe ser lo suficientemente largo para permitir la visualización del movimiento de los trazadores (normalmente de más de 15 a 25 píxeles) y lo suficientemente corto para evitar la deformación del trazador (por lo tanto, una baja correlación).
2. Se recomienda extraer un mínimo de 10 pares de imágenes de un vídeo grabado y utilizarlos para los cálculos de velocidad y caudal.
3. La magnitud de la velocidad y la disponibilidad del trazador deben tenerse en cuenta a la hora de decidir el intervalo de tiempo de las imágenes extraídas y la duración del vídeo.
4. Las velocidades de fotogramas inestables, normalmente asociadas con las cámaras de protocolo de Internet (IP), pueden proporcionar marcas de tiempo incorrectas a las imágenes extraídas. Las marcas de tiempo incorrectas pueden producir velocidades incorrectas (Detert, 2021).
5. El número de imágenes extraídas seleccionadas y analizadas puede afectar al tiempo computacional necesario para llevar a cabo el análisis de correlación cruzada y el cálculo del caudal.
6. Debido a la turbulencia natural en los ríos, se necesita un tiempo de registro suficiente para obtener un promedio de tiempo estable.
7. Puede ser necesario resaltar objetos estacionarios, como árboles, contenidos dentro del campo de visión para excluir y prevenir el sesgo negativo del análisis de velocidad cercana (Figura 1).

El análisis LSPIV puede producir resultados variables en función de los parámetros de análisis seleccionados por el usuario. Es importante que los usuarios nuevos en LSPIV sean conscientes de los impactos de estas opciones, que pueden requerir que la configuración óptima del sitio se determine mediante la ejecución de múltiples análisis en un sitio.



**Figura 1.** Sesgo de velocidad LSPIV causado por la inclusión de objetos estacionarios en el análisis. La imagen superior muestra un eslogan fijo a través del canal. La imagen inferior muestra cómo las velocidades se han sesgado a la baja en la ubicación del eslogan. Fuente: Mark Randall, RDMW, utilizando el software RIVeR LSPIV.

### 3.1.2 Área de interrogatorios.

El área de interrogación (IA) es una pequeña área establecida en las imágenes, donde el software de análisis buscará identificar los trazadores y el desplazamiento del patrón de partículas. El análisis busca correlacionar (rastrear) el movimiento del mismo trazador entre las imágenes secuenciales.

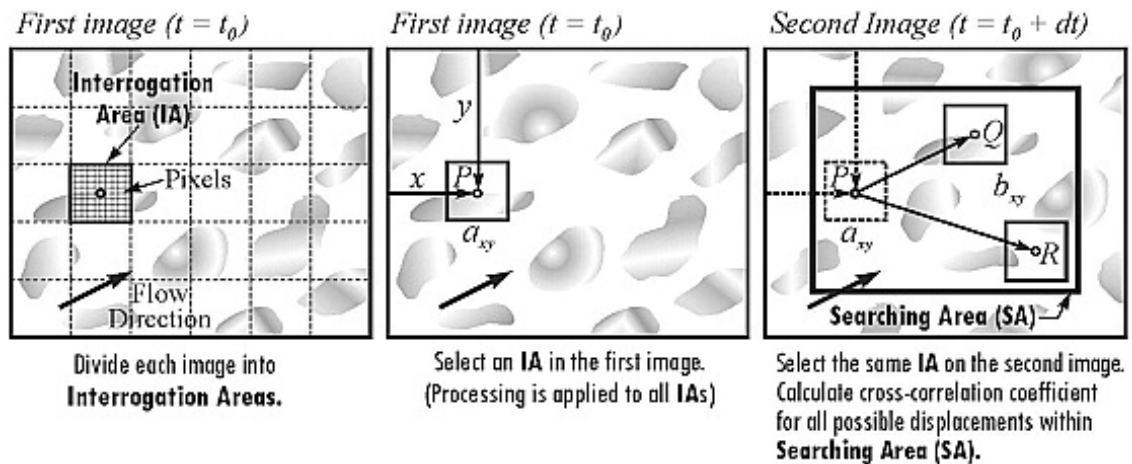
Se establecen múltiples áreas de interrogación a lo largo de la Región de Interés (ROI), formando una cuadrícula donde se requiere el análisis de velocidad.

El tamaño del AI debe ser lo suficientemente grande como para contener los patrones de movimiento del trazador/partícula, pero lo suficientemente pequeño como para ser representativo del flujo local y del movimiento del trazador. La magnitud de la velocidad y la calidad del trazador son factores determinantes a la hora de establecer el tamaño de la IA.

### 3.1.3 Área de búsqueda.

El área de búsqueda (SA) es un área definida por el usuario que contiene los centros de IA en la segunda imagen que se correlacionarán con la IA en la primera imagen, para cada nodo designado por el usuario en la cuadrícula computacional a través de la región de interés.

El tamaño de la SA debe seleccionarse en relación con la magnitud del desplazamiento del trazador entre imágenes secuenciales. Por lo tanto, la magnitud de la velocidad y la calidad del trazador son factores determinantes a la hora de establecer el tamaño del SA.



**Figura 2.** La correlación cruzada se calcula entre un área de interrogación (IA) en la primera imagen y las áreas de IA ubicadas dentro de un área de búsqueda. Fuente: Muste *et al.*, 2008.

### 3.1.4 Procesamiento de filtros.

El análisis de correlación cruzada del desplazamiento de los trazadores requiere que se apliquen filtros de posprocesamiento para minimizar los impactos de los datos erróneos. Los filtros pueden incluir:

1. Correlación: las correlaciones fuertes pueden ser el resultado de objetos fijos como bancos de canales, rocas y árboles. Se establece un umbral de correlación máxima para eliminar estos rendimientos del análisis de velocidad. Los filtros de correlación deben establecerse entre 0,4 y 0,98.
2. Velocidad: los umbrales de velocidad máxima y mínima se pueden establecer (dependiendo del software) en las direcciones x e y.
3. Los umbrales de filtro aplicados deben establecerse de acuerdo con las condiciones del sitio, la velocidad y el trazador.
4. Los diferentes tipos de eventos de flujo pueden requerir que se establezcan diferentes umbrales para evitar que los datos se excluyan incorrectamente.
5. Después de la aplicación de filtros, los resultados iniciales de la velocidad bruta se promedian en todos los pares de imágenes extraídos para proporcionar una velocidad y dirección superficiales promedio para cada área de interrogación contenida dentro de la sección del río bajo análisis.
6. Una vez que se ha completado el análisis LSPIV, la magnitud y la distribución de las velocidades deben verificarse visualmente para garantizar que parezcan realistas, precisas y correctamente distribuidas a través del canal.
7. Cualquier error significativo debe corregirse ajustando los parámetros de análisis y/o los filtros de posprocesamiento.

El software LSPIV generalmente requiere material trazador claramente identificable distribuido a lo ancho del canal. Si no hay suficientes trazadores disponibles, es posible que el software LSPIV no pueda diferenciar entre las ondulaciones/turbulencias del agua, que son representativas de las velocidades de la superficie, y el ruido de las ondas que no son representativas de las velocidades de la superficie.

Por lo tanto, un vídeo de medición que contiene pocos trazadores físicos que pasan por la ubicación de análisis puede causar un sesgo de análisis, normalmente negativo, en la velocidad y el caudal.

Estos errores no se pueden identificar o corregir fácilmente en los procedimientos de procesamiento posterior.

### 3.2 Velocimetría de imágenes espaciotemporal (STIV).

STIV combina los principios de la velocimetría de imágenes con el concepto de seguimiento del espacio-tiempo, que consiste en medir el movimiento de las partículas de fluido durante un período de tiempo a lo largo de una distancia conocida.

A diferencia de las técnicas LSPIV, que requieren una serie de imágenes extraídas a intervalos fijos, STIV utiliza todo el vídeo, lo que permite medir la velocidad del fluido durante un período de tiempo continuo. Las velocidades se calculan y promedian a lo largo de líneas de búsqueda individuales establecidas por el usuario en la dirección del flujo, Fujita *et al*, 2007.

Además, STIV:

1. Solo produce velocidades 1D a lo largo de las líneas de búsqueda definidas por el usuario, generalmente establecidas perpendicularmente a la sección transversal y en la dirección del flujo principal.
2. Las líneas de búsqueda tienen una longitud conocida y, junto con la duración conocida del vídeo, proporcionan una base para calcular la velocidad media de la superficie.
3. No es adecuado para definir el flujo circulante o inestable que varía significativamente su dirección con el tiempo, por ejemplo, vórtices.
4. Utiliza todos los fotogramas de vídeo para el análisis. No requiere que el usuario defina las tasas de extracción de imágenes.
5. No requiere filtros de procesamiento definidos por el usuario.
6. Las velocidades se pueden comprobar manualmente para detectar posibles errores de cálculo y se pueden aplicar correcciones posteriores al procesamiento si es necesario.

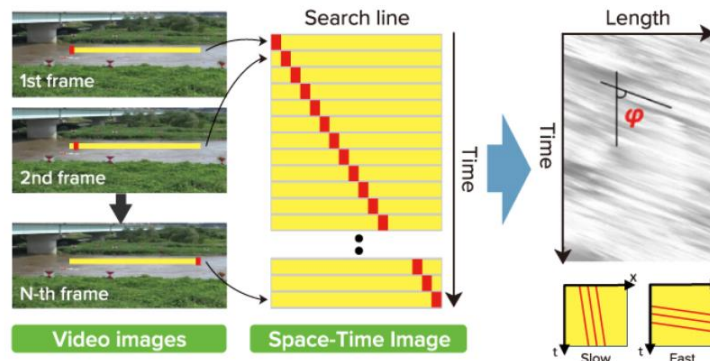
#### 3.2.1 Medición de velocidad STIV.

Para determinar la velocidad, cada píxel ubicado a lo largo de la longitud conocida de una línea de búsqueda se apila para cada fotograma del video. A medida que los trazadores/estructuras superficiales viajan a lo largo de cada línea de búsqueda, naturalmente crean una línea visible a partir de la variación en el brillo, que se inclina hacia abajo desde la parte superior izquierda hasta la parte inferior derecha, creando lo que se denomina una imagen de espacio-tiempo (STI). Se crea un STI para cada ubicación de línea según lo determine el usuario, proporcionando una velocidad superficial calculada en múltiples puntos a través del canal.

Un análisis de coherencia del STI identifica el ángulo medio y, por lo tanto, la velocidad superficial media para cada línea de búsqueda.

STIV asume que la velocidad es constante a lo largo de una línea de búsqueda de velocidad, pero se puede usar para medir la velocidad, las pulsaciones y las velocidades de las ondas si las velocidades no son constantes. Las ráfagas de viento fuertes también se pueden identificar y corregir.

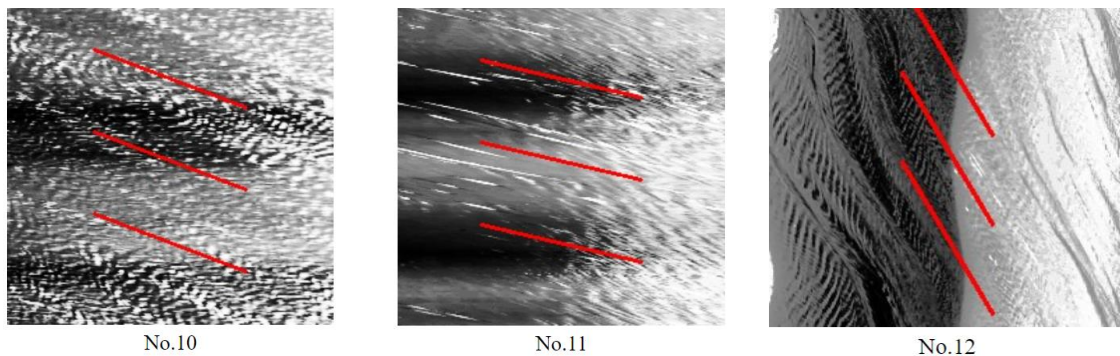
STIV proporciona un método de análisis sólido para las condiciones más desafiantes del sitio, como los entornos de trazador bajo.



**Figura 3.** En el análisis STIV, los píxeles ubicados a lo largo de una línea de búsqueda se apilan uno debajo del otro para cada fotograma. El movimiento del trazador a lo largo de la línea de búsqueda produce una línea en ángulo que representa la velocidad de la superficie.

Fuente: <https://hydrosoken.co.jp/en/service/hydrostiv.php> consultado el 20/06/2020

Al igual que con el LSPIV, factores como las ondas gravitatorias, el ruido ambiental o algunos trazadores físicos pueden producir potencialmente un sesgo en el análisis de velocidad STIV (generalmente un sesgo negativo) si no se corrige. Cualquier error significativo de velocidad identificado debe corregirse manualmente utilizando procedimientos de posprocesamiento, Sección 3.2.3.



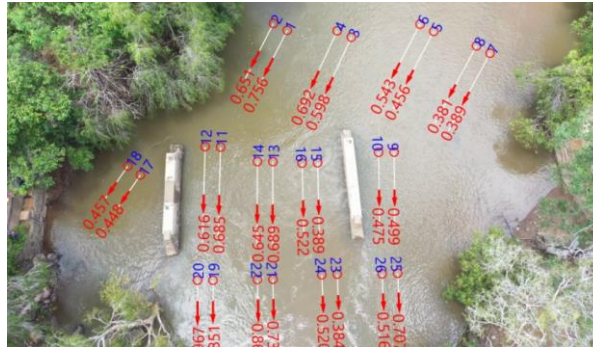
**Figura 4.** Análisis automatizado de la velocidad STIV (líneas rojas) mediante filtros de aprendizaje profundo. No.10 contiene ruido de onda gravitacional sin movimiento claro del trazador. El número 11 contiene trazadores visibles al entrar en una zona que contiene ruido de ondas gravitatorias. El n.º 12 contiene un movimiento adicional de la cámara del dron que crea líneas onduladas Fuente: Mark Randall, RDMW, utilizando el software HydroSTIV.

### 3.2.2 Longitud de las líneas de búsqueda del análisis de velocidad STIV.

El análisis STIV calcula una velocidad media única a lo largo de la distancia recorrida por la longitud de cada línea de búsqueda. La longitud y la ubicación correctas de las líneas de búsqueda mejorarán el análisis automatizado y están determinadas por la naturaleza del sitio.

1. La longitud de las líneas de búsqueda debe establecerse para evitar que se produzcan variaciones longitudinales de la velocidad causadas por la variación de la pendiente, la profundidad y la rugosidad del canal a lo largo de la línea de búsqueda.
2. La longitud puede depender del sitio del campo de visión disponible, idealmente evitando colocarlo sobre estructuras fijas como árboles, edificios, puentes.
3. La longitud de cada línea de búsqueda se puede establecer individualmente para evitar cubrir en gran medida los objetos estacionarios.

- Una longitud de 5 a 10 metros es aceptable para la mayoría de los requisitos del sitio para promediar correctamente el pulso de la velocidad de la superficie. Cuanto más larga sea la línea de búsqueda, mayor será la distancia media de las velocidades aguas abajo.
- Se pueden colocar varias líneas de búsqueda a lo largo del alcance del canal contenido en el video, Figura 5.



**Figura 5.** Múltiples líneas de búsqueda STIV que realizan análisis de velocidad a lo largo de un corto tramo de canal. Fuente: Mark Randall, RDMW, utilizando el software HydroSTIV.

### 3.2.3 Comprobaciones y validaciones posteriores al procesamiento.

Una vez que se ha completado el análisis STIV, la magnitud y la distribución de las velocidades deben verificarse visualmente para garantizar que parezcan realistas, precisas y correctamente distribuidas a través del canal.

Si se requiere el procesamiento posterior de una medición STIV, se recomienda que el usuario compruebe:

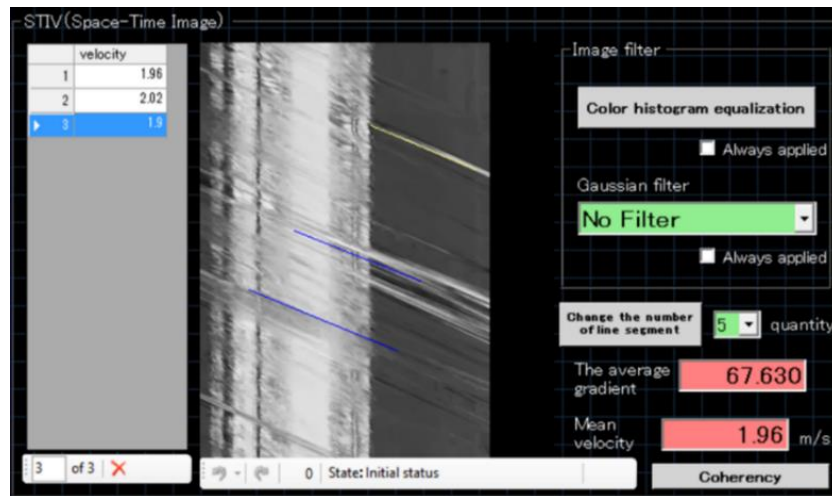
- Todos los STI generados en una medición deben examinarse para asegurarse de que se ha identificado correctamente el ángulo de orientación medio.
- El análisis STI a lo largo de cada línea de búsqueda debe corregirse manualmente si las velocidades se han identificado incorrectamente durante el procesamiento automatizado (Secciones \*\*\*\* y \*\*\*\*\*)
- Al corregir manualmente velocidades sesgadas, el usuario debe tener en cuenta la magnitud y la distribución de la velocidad a través de la sección transversal y considerar la eliminación de velocidades erróneas.
- Si una velocidad incorrecta para una línea de búsqueda no puede corregirse o interpolarse manualmente entre dos velocidades medidas, entonces la línea de búsqueda debe eliminarse de un cálculo de caudal.

#### 3.2.3.1 Análisis visual de ITS.

El usuario puede comprobar la capacidad de análisis automatizado para identificar correctamente el ángulo medio del movimiento del trazador y, por lo tanto, la velocidad. Si es incorrecto, es posible identificar visualmente el ángulo medio correcto dentro del STI, Figura 6.

En la Figura 6, la velocidad STI estaba sesgada a la baja debido al fuerte resplandor del sol en el agua, lo que crea una intensidad de señal más fuerte y dominante que los trazadores que representan las velocidades reales. Debido a que el resplandor del sol es estacionario, creó un sesgo en el análisis automatizado a 0 m/s. Mediante una comprobación visual, el usuario puede identificar el movimiento del trazador en el STI y ha definido manualmente el movimiento de tres partículas del trazador con velocidades

de 1,96, 2,02 y 1,9 m/s. Estas tres velocidades se promedian para una velocidad superficial media igual a 1,96 m/s.



**Figura 6.** El sesgo de velocidad STIV causado por el resplandor del sol en el agua proporciona una señal más dominante que los trazadores que representan las velocidades reales, sesgando incorrectamente el análisis automatizado a 0 m/s. Fuente: Mark Randall, RDMW, utilizando el software KU-STIV.

### 3.3 Selección del sitio, instalación y recopilación de videos.

Desde el punto de vista hidráulico, los criterios de selección y gestión del emplazamiento deben ser los mismos que los de cualquier otro emplazamiento utilizado para los cálculos de caudal según el método de área-velocidad.

Los puntos clave a destacar incluyen:

1. El alcance del canal debe proporcionar una profundidad y rugosidad uniformes a lo largo de la longitud de medición.
2. El alcance debe ser estable en el rango de caudales objetivo que se van a medir.
3. Las instalaciones fijas a largo plazo deben tener la sección transversal y el alcance del canal inspeccionados anualmente durante tres años a largo plazo.
4. Las secciones transversales y el alcance del canal deben inspeccionarse después de cualquier evento de flujo que pueda haber resultado en cambios en la profundidad y / o rugosidad.
5. Los cambios medidos se evaluarán para determinar su impacto en los cálculos de velocidad y caudal con respecto a los caudales medidos previstos.
6. El datum del nivel del agua es necesario en relación con el datum del punto de control del terreno en el momento de las imágenes grabadas.

La incapacidad de cumplir con estas recomendaciones puede resultar en la recopilación de datos de velocidad de menor calidad y las relaciones posteriores entre el nivel y el caudal. El usuario debe tomar medidas adicionales para validar las mediciones de caudal de velocidad superficial con mediciones de verificación independientes.

#### 3.3.1 Criterios de selección del sitio para la instalación de cámaras fijas.

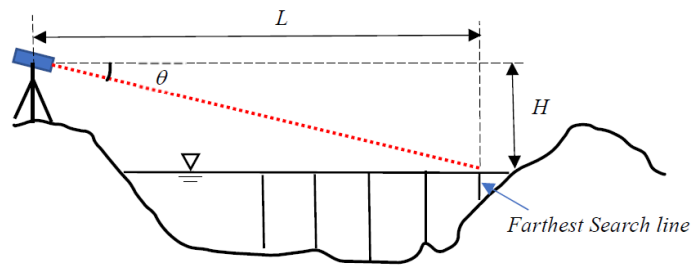
Una instalación fija de una cámara en un sitio de medición permite que los videos se graben y almacenen automáticamente para el procesamiento del caudal, lo que elimina la necesidad de que el personal esté en el sitio.

Esto proporciona una solución de monitoreo de área remota junto con la capacidad de realizar múltiples mediciones de caudal en múltiples sitios durante eventos de crecida generalizados o significativos.

Las cámaras in situ proporcionan un registro visual de los eventos de flujo.

Dependiendo del caudal objetivo que se vaya a medir, se deben aplicar las siguientes consideraciones al instalar una cámara fija para la velocidad de la imagen.

1. Un sitio que contiene movimiento superficial visible que se transporta con un flujo que ocurre para el rango de flujos objetivo que se van a medir.
2. Las mediciones de nivel necesarias para el procesamiento de vídeo deben ubicarse en el lugar de instalación de la cámara para minimizar los impactos del nivel y la pendiente de la superficie. Si las mediciones de los niveles se realizan en una ubicación separada, las pendientes de la superficie y los tiempos de tránsito de los niveles deben determinarse entre las dos ubicaciones. No deben existir fuentes adicionales de entrada de flujo entre los dos sitios.
3. Los sitios donde hay sombras excesivas y deslumbramiento solar pueden ocultar el movimiento de los trazadores superficiales en el video y, por lo tanto, deben evitarse. Esto es de particular importancia en sitios de bajo flujo que pueden no contener señales trazadoras fuertes.
4. Las aguas claras en las que se puede visualizar el lecho del río requieren un ángulo de posicionamiento más pequeño más cercano al valor crítico. Esto puede mejorar el análisis automatizado si los materiales trazadores no están presentes.
5. La cámara requiere un campo de visión (FOV) claro de la superficie del agua. Algunas obstrucciones menores se pueden acomodar en el campo de visión, pero el usuario debe tener en cuenta que podrían afectar el análisis de velocidad y pueden requerir correcciones manuales.
6. El retorno de la inversión para el análisis debe ser visible para la cámara a través de todo el rango de niveles esperado en el sitio. Los puntos de perturbación del flujo en una ubicación aguas arriba o aguas abajo también deben evitarse para el análisis automatizado.
7. La cámara debe estar sujeta a una estructura segura que elimine el movimiento de la cámara por el viento / vibraciones. El movimiento de la cámara impide la determinación precisa del movimiento del trazador.
8. Las mediciones nocturnas requerirán una cámara infrarroja adecuada o un sistema de iluminación que incluya luz blanca. Una cámara de infrarrojo lejano proporciona una opción adicional.
9. La elevación de montaje de la cámara debe estar a una altura que permita que el ángulo crítico entre la cámara y el plano de agua permanezca por encima del ángulo mínimo especificado. Este ángulo depende del ancho del canal y del nivel del agua (Figura 7).
  - Para instalaciones LSPIV, el ángulo mínimo recomendado en el punto de análisis más alejado de la cámara es de 15 grados.
  - Para aplicaciones STIV, el ángulo mínimo es de 2 grados.
  - Los ángulos por encima de estos mínimos mejorarán la determinación del trazador y la velocidad. Los ángulos más bajos pueden aumentar el potencial de sesgo de velocidad y/o resolver problemas de trazador para estos métodos de análisis.



**Figura 7.** Una instalación de cámara fija para STIV que muestra la medición del ángulo crítico mínimo  $\theta$ . La distancia al punto de análisis más lejano se representa mediante  $L$  y la altura de la cámara sobre el plano del nivel del agua es igual a  $H$ . A medida que cambia el nivel del agua, también lo hará el valor de  $\theta$ . Este valor no debe ser inferior al valor crítico mínimo en función del análisis LSPIV o STIV. (Fuente: Profesor Ichiro Fujita, correspondencia por correo electrónico de julio de 2020).

### 3.3.2 Se corrigieron las pautas de configuración de la cámara y grabación de video.

Se deben tener en cuenta los siguientes criterios para la configuración de una cámara fija y los ajustes de grabación al establecer un sitio de velocimetría de imagen de cámara fija:

1. La imagen de la cámara no debe incluir la distorsión de la lente. Cualquier distorsión de lente identificada tendría que corregirse con un proceso de corrección de lente antes del análisis.
2. La resolución de la imagen en la dirección de la corriente debe establecerse en relación con el punto de análisis más alejado de la ubicación de la cámara (nivel del agua) y el tamaño del ROI donde se está llevando a cabo el análisis de velocidad o la longitud de la línea de medición STIV que se está utilizando.
3. La resolución del vídeo debe seleccionarse en función del ancho del canal. En la mayoría de los casos, una resolución de alta definición (1920x1080) es adecuada.
4. El muestreo de la velocidad de fotogramas de la cámara IP debe ser estable. El software LSPIV, debido al submuestreo de fotogramas utilizado, es incapaz de acomodar la variabilidad e inestabilidad del intervalo de fotogramas, lo que da lugar a errores de velocidad (Detert, 2021).
5. Se recomienda utilizar una velocidad de fotogramas mínima de 24 fotogramas por segundo.

A la hora de decidirse por un modelo de cámara para un sitio fijo, es importante tener en cuenta sus capacidades de programación de vídeo y su disponibilidad de almacenamiento de datos.

### 3.4 Velocimetría de imágenes mediante sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS).

El uso de RPAS, comúnmente conocidos como drones (el término dron se utilizará para el propósito de este documento), proporciona una solución móvil para las mediciones de velocimetría de imágenes y solo requiere escalado de píxeles para calibrar el tamaño de píxel cuando la cámara está en una posición de nadir.

Los drones se pueden utilizar para medir de forma rápida y segura el caudal en condiciones de flujo inadecuadas o demasiado peligrosas para el despliegue de un perfilador de corriente Doppler acústico (ADCP) en una embarcación tripulada.

### 3.4.1 Pautas de grabación de video con drones.

Cuando se utiliza un dron para recopilar videos para el análisis de velocimetría de imágenes y cálculos de caudal, se requieren los siguientes procedimientos de recopilación para garantizar que el análisis de velocimetría de imágenes se pueda aplicar correctamente:

1. Se requiere que la cámara esté en un punto de vista nadir cuando se utiliza el escalado de píxeles. Si se filma desde un punto de vista oblicuo, se requerirá un proceso de ortorrectificación alternativo que involucre las propiedades de la cámara y el ángulo del estabilizador (cardán).
2. Todo el ancho del canal debe estar contenido dentro de la imagen si se procesa para calcular caudal (Figura 8)
3. Se requiere que el dron esté flotando y estable para reducir cualquier movimiento de la cámara. Cualquier movimiento significativo del dron podría afectar los resultados de los análisis de velocidad. La estabilización de la imagen se puede realizar antes del análisis si el movimiento de la cámara es evidente.
4. Debe haber al menos una característica fácilmente identificable dentro del video grabado que tenga una distancia medida conocida para escalar los píxeles.
5. Se requiere una sección transversal en la ubicación del video para los cálculos de caudal. Si es necesario, se puede inspeccionar una sección transversal después de la recopilación de videos.
6. Tenga en cuenta los elementos ambientales como el resplandor del sol, las sombras y el efecto del viento. Esto puede afectar la capacidad del dron para visualizar el movimiento de la superficie con precisión, especialmente en entornos de menor flujo.



**Figura 8.** Imagen de un video de una crecida captado por un dron en Noruega. Las partículas trazadoras transportadas por el flujo son claramente visibles en la mayor parte del ancho del canal. Este video es muy bueno para el análisis de velocimetría de imágenes. Fuente: Kristoffer Florag-Dybvik, Dirección de Recursos Hídricos y Energía de Noruega (NVE).

## 4 Ororrectificación de imágenes y corrección geométrica.

Todos los métodos de velocimetría de imágenes requieren que se lleve a cabo una ortorrectificación y, por lo general, se realiza durante la instalación de una cámara.

La ortorrectificación de imágenes y la corrección geométrica se relacionan con el proceso de transformación utilizado para proyectar características del suelo del "mundo real" en 3D en un plano de imagen 2D. La ortorrectificación corrige la distorsión creada por la topografía del sitio, el ángulo del sensor de la cámara, la lente y la elevación, creando una imagen 2D que es una imagen mapeada medible (Figura 10).

Es importante implementar correctamente este proceso, ya que constituye la fuente de datos base para los cálculos de velocidad y la ubicación de la sección transversal.

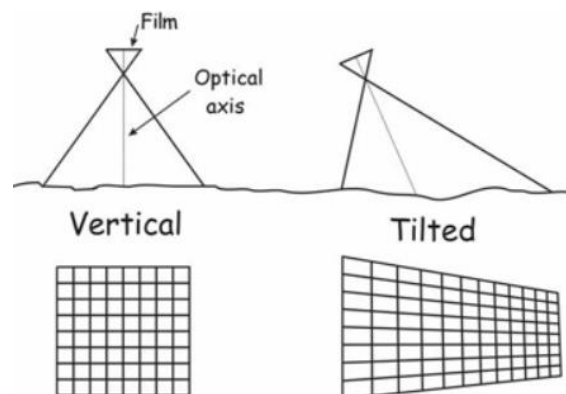
La ortorrectificación es necesaria para tener en cuenta la reducción del desplazamiento con una distancia cada vez mayor al centro óptico de la imagen, la distorsión de la lente (Figura 9) puede ser un factor importante, particularmente en lentes con un campo de visión amplio. Las imágenes distorsionadas de la lente deben tratarse con una corrección de la lente antes del análisis.



**Figura 9.** Distorsión de barril no corregida que crea curvatura en lo que en realidad son líneas rectas. Por lo general, ocurre en lentes de gran angular (Fuente: Sophie Pearce, Universidad de Newcastle, Reino Unido).

La ortorrectificación se logra predominantemente utilizando formas de la relación matemática descrita por el modelo de cámara estenopeica,

La elección del proceso de ortorrectificación a aplicar está determinada por la relación del ángulo del sensor de la cámara con el plano del nivel del agua. Un sensor de cámara que mira verticalmente (nadir) al plano de agua solo requiere un factor de escala/distancia, mientras que una cámara montada en un ángulo oblicuo requiere una ortorrectificación 3D o 2D debido a la distorsión de la forma del píxel a medida que aumenta la distancia desde el sensor.



**Figura 10.** Muestra cómo el ángulo de la cámara crea distorsión en los píxeles (derecha). La imagen de la izquierda muestra una cámara colocada verticalmente (nadir) desde un dron. Fuente: <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/arcgis-pro/imagery/ortho-mapping-workspace/> <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/arcgis-pro/imagery/ortho-mapping-workspace/> consultado el 20/05/2020.

La ortorrectificación requiere una cantidad de GCP ubicados dentro del campo de visión (FOV). Cada GCP requiere coordenadas del mundo real específicas para su ubicación y en relación con la posición de la cámara.

Una ortorrectificación 3D o 2D requiere GCP con datos de coordenadas conocidas en formato XYZ o XY.

1. Se debe verificar la precisión relativa de los datos de la encuesta de GCP antes de intentar la ortorrectificación. Los errores topográficos complicarán el proceso de ortorrectificación. Los errores grandes harán que el proceso falle. Se recomienda el uso de un RTK.
2. Una vez completada, la calibración de la cámara solo es válida para la posición de montaje de la cámara, la resolución de la imagen, el zoom y la distancia focal. Cualquier cambio en estos requerirá que se desarrolle una nueva calibración en el software de procesamiento/medición. De lo contrario, los datos de velocidad y caudal serán inexactos.
3. Dependiendo del proceso de ortorrectificación y del software utilizado, puede ser necesario utilizar información conocida sobre los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara para mejorar la precisión de la ortorrectificación. Esta información puede incluir:
  - Posición y elevación de montaje de la cámara (XYZ).
  - Distancia focal.
  - Inclinación, balanceo y guiñada.

Si no se conocen los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara, estos se estiman a partir de los datos de GCP. Por lo general, esto se hace dentro del software.

Este proceso es necesario para proporcionar una distancia a la superficie del suelo (GSD), es decir, un tamaño de píxel en metros. El valor GSD se utiliza en la velocimetría de imágenes para escalar la distancia recorrida por los trazadores superficiales utilizados en el cálculo de la velocidad superficial.

#### **4.1.1 Ortorrectificación 3D.**

Necesario si una sola instalación de cámara va a grabar varios vídeos para el análisis de la velocimetría de imágenes en un hidrograma completo, es decir, si se van a cambiar los valores del nivel del agua.

1. Requiere coordenadas del mundo real en el plano XYZ con Z que representa la elevación. Normalmente, consta de coordenadas Este (X), Norte (Y) y elevación (Z)
2. Se llevará a cabo si un sistema de cámaras se monta oblicuamente y se utiliza para recopilar videos en múltiples niveles de agua cambiantes.
3. Los puntos de GCP deben cubrir el rango de niveles de agua que se espera registrar y medir con velocimetría de imagen.
4. Se requiere un mínimo de 6 GCP para completar el proceso de ortorrectificación.
  - Es una buena práctica que se ubiquen y se inspeccionen un mínimo de 8 GCP dentro del campo de visión de la cámara (colocados en forma de zigzag, tanto horizontal como verticalmente). La recopilación de un mínimo de 8 GCP permite la redundancia de 2 GCP si se han producido errores de encuesta.
  - Los GCP deben distribuirse en ambos bancos de canales.
5. Los GCP se pueden colocar y examinar después de que se haya producido un evento de crecida, siempre y cuando no se haya cambiado la imagen de la cámara, el zoom y la distancia focal. Esto permite desplegar rápidamente una cámara antes de grandes crecidas.

- Los GCP no tienen que permanecer visibles en todos los videos recopilados, siempre y cuando los GCP utilizados cubran el rango de niveles de agua esperados.
- Los GCP se utilizan para calibrar las imágenes de la cámara que se aplican a todos los videos recopilados durante esa instalación en particular. Si se cambia la vista de la cámara, será necesario realizar una nueva calibración de GCP dentro del software de análisis.



**Figura 11.** Una imagen ortorrectificada (izquierda) basada en las coordenadas del mundo real de cada punto de control terrestre y la imagen original de la cámara (derecha). Fuente: Mark Randall, RDMW, utilizando el software HydroSTIV.

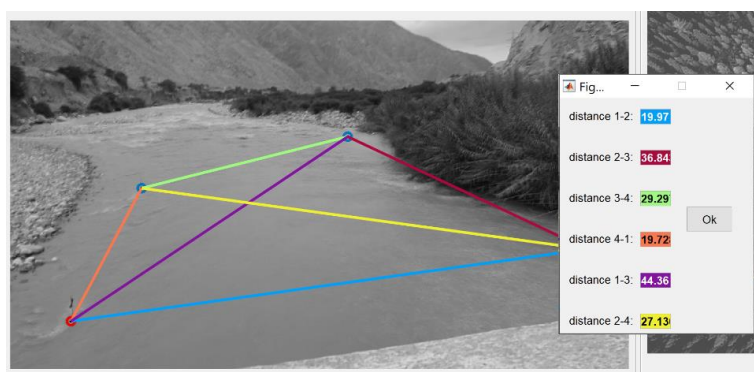
#### 4.1.2 Ortorrectificación 2D.

Una ortorrectificación 2D (conversión de homografía) utiliza solo coordenadas del mundo real en el plano XY. Estas coordenadas se proyectan directamente en el plano del sensor de la cámara, es decir, hay una homografía entre el mundo real y los planos del sensor de la cámara. La altura del nivel del agua en el momento de la medición constituye el único dato de elevación (Z) requerido.

Este método es el más adecuado para mediciones de flujo único en las que el nivel del agua no cambia. Este método no se puede utilizar para realizar múltiples mediciones de flujo a través de un hidrograma

Si se emplea la ortorrectificación 2D:

- Solo se requieren cuatro GCP al nivel del agua y no deben alinearse.
- Los GCP deben establecerse en el mismo plano horizontal que el nivel del agua.
- Las coordenadas de cuadrícula XY o las distancias entre cada GCP son necesarias para completar el proceso de ortorrectificación. Algunos programas requieren distancias entre GCP en lugar de datos XY.



**Figura 12** Un proceso de ortorrectificación 2D. En este software LSPIV se introducen las distancias entre cada uno de los cuatro GCP. Las seis líneas de colores representan las seis distancias requeridas. Los cuatro GCP están al nivel del agua. Fuente: Manual del software RIVeR LSPIV.

### 4.1.3 Escalada.

El escalado se puede utilizar cuando una cámara está montada verticalmente (vista del nadir) en la superficie del agua de modo que el sensor de la cámara y la superficie del agua sean paralelos entre sí. Este suele ser el caso de los vídeos recopilados por drones. Para escalar los píxeles directamente, se debe ver una distancia conocida entre dos puntos cercanos al nivel del agua dentro del video. Por ejemplo, el usuario podría colocar dos conos de tráfico dentro de la imagen de vídeo a una distancia separada determinada por el usuario. El ancho del canal también proporciona una referencia de distancia útil que se puede utilizar. El escalado de píxeles de esta manera reduce los posibles errores introducidos por la ortorrectificación 3D y 2D.

### 4.1.4 Errores de ortorrectificación.

Los errores en la ortorrectificación de las imágenes de vídeo deben tenerse en cuenta y cuantificarse, ya que se traducirán en errores con la escala de píxeles utilizada en el cálculo de la velocidad y, por lo tanto, en última instancia, en el cálculo del caudal.

Enable	Point Name	X(m)	Y(m)	Height(m)	X(pixel)	Y(pixel)	Error:dX(m)	Error:dY(m)
<input checked="" type="checkbox"/>	WQ pit top U/s corner	50.197	60.859	7.293	262.830	941.896	-0.012	-0.031
<input checked="" type="checkbox"/>	Top 5-6m board	53.447	57.522	7.009	762.862	771.131	0.045	0.033
<input checked="" type="checkbox"/>	HADCP high	55.948	55.920	5.570	942.288	772.447	-0.028	0.002
<input checked="" type="checkbox"/>	HADCP low	60.056	57.397	3.636	844.399	713.188	0.014	-0.027
<input checked="" type="checkbox"/>	Cone 1	105.224	72.172	7.073	618.521	82.574	-0.068	-0.017
<input checked="" type="checkbox"/>	Cone 2	104.459	68.046	5.994	706.321	110.413	0.298	0.073
<input checked="" type="checkbox"/>	Cone 3	109.218	67.964	7.876	727.833	55.565	-0.203	-0.040
<input checked="" type="checkbox"/>	Cone 4	108.234	63.147	6.811	828.915	83.044	-0.025	-0.009
<input checked="" type="checkbox"/>	Cone 5	113.863	53.069	7.463	1055.072	57.234	-0.071	0.000
<input checked="" type="checkbox"/>	7m Board	51.216	59.603	8.012	455.878	800.959	-0.017	0.013

**Figura 13.** Puntos de control del terreno utilizados en una ortorrectificación. Los errores de ortorrectificación se relacionan con la capacidad del software para mapear las coordenadas de los píxeles con las coordenadas del mundo real. En este ejemplo, el error más grande es de 0,298 m. Fuente: Mark Randall, RDMW, utilizando el software HydroSTIV.

Los errores de ortorrectificación representan la capacidad del software para mapear las coordenadas de los píxeles con las coordenadas del mundo real de los GCP (errores de reproyección). Estos errores no son una evaluación de la exactitud de los datos reales de la encuesta. Sin embargo, los errores erróneos de la encuesta afectarán negativamente la precisión de la ortorrectificación.

Los errores de ortorrectificación/reproyección deben cuantificarse para cada GCP (Figura 13)

Para evaluar la magnitud del error de GCP en el escalado de píxeles y, en última instancia, el caudal, se recomienda llevar a cabo el siguiente proceso de evaluación. El proceso es el mismo que se utiliza en fotogrametría y otras formas de mapeo de imágenes.

### 4.1.5 Evaluación y cuantificación de la precisión horizontal de los puntos de control terrestre.

Los estándares geoespaciales reconocidos para evaluar la precisión horizontal del GCP recomiendan que se lleve a cabo el siguiente proceso:

1. La precisión horizontal se evaluará calculando el error cuadrático medio (RMSE<sub>r</sub>) del GCP en las direcciones X e Y.

2. A continuación, los valores de  $RMSE_r$  se evalúan en función del tamaño de píxel (GSD) calculado a partir del proceso de ortorrectificación realizado.
3. La precisión espacial no debe exceder +/- tres píxeles o tres veces el GSD reportado con una confianza del 68% (1 Sigma). En la Figura 14 se destacan las recomendaciones internacionales actuales.
4. Los GCP que se utilizan en el proceso de ortorrectificación deben seleccionarse para proporcionar la incertidumbre posicional más baja a fin de evitar errores en los valores de píxel escalados. (Ver Figuras 16, 18 y 19).
5. Cualquier GCP con errores grandes debe excluirse del proceso (Figura 15).

El  $RMSE_r$  representa un error horizontal (XY) promediado en las imágenes rectificadas entre las coordenadas de píxeles y las coordenadas de GCP (mundo real).

Se supone que se han eliminado los errores sistemáticos, y que el error se distribuye normalmente.

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{\sum_i (x_{imagen,i} - x_{GCP,i})^2}{n}} \quad (1)$$

$$RMSE_y = \sqrt{\frac{\sum_i (y_{imagen,i} - y_{GCP,i})^2}{n}} \quad (2)$$

$$RMSE_r = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2} \quad (3)$$

Donde:  $x_{imagen,i}$ ,  $y_{imagen,i}$  son las coordenadas en la imagen rectificada para el  $i^{\text{ésimo}}$  GCP

$y_{GCP,i}$ ,  $x_{GCP,i}$  son las coordenadas topográficas del  $i^{\text{ésimo}}$  GCP.

$i$  es un número entero comprendido entre 1 y  $n$ .

$n$  es el número de GCP utilizados en la ortorrectificación.

Los errores RMSE se notifican en las mismas unidades introducidas para las coordenadas GCP. La incertidumbre posicional representada por  $RMSE_r$  es un error radial alrededor del GCP.

Common Orthoimagery Pixel Sizes	Recommended Horizontal Accuracy Class $RMSE_x$ and $RMSE_y$ (cm)	Orthoimage $RMSE_x$ and $RMSE_y$ in terms of pixels	Recommended use <sup>7</sup>
1.25 cm	$\leq 1.3$	$\leq 1$ -pixel	Highest accuracy work
	2.5	2-pixels	Standard Mapping and GIS work
	$\geq 3.8$	$\geq 3$ -pixels	Visualization and less accurate work
2.5 cm	$\leq 2.5$	$\leq 1$ -pixel	Highest accuracy work
	5.0	2-pixels	Standard Mapping and GIS work
	$\geq 7.5$	$\geq 3$ -pixels	Visualization and less accurate work
5 cm	$\leq 5.0$	$\leq 1$ -pixel	Highest accuracy work
	10.0	2-pixels	Standard Mapping and GIS work
	$\geq 15.0$	$\geq 3$ -pixels	Visualization and less accurate work

**Figura 14.** Evaluación de la precisión posicional. Fuente: Estándares de precisión posicional ASPRS para datos geoespaciales digitales (2014).

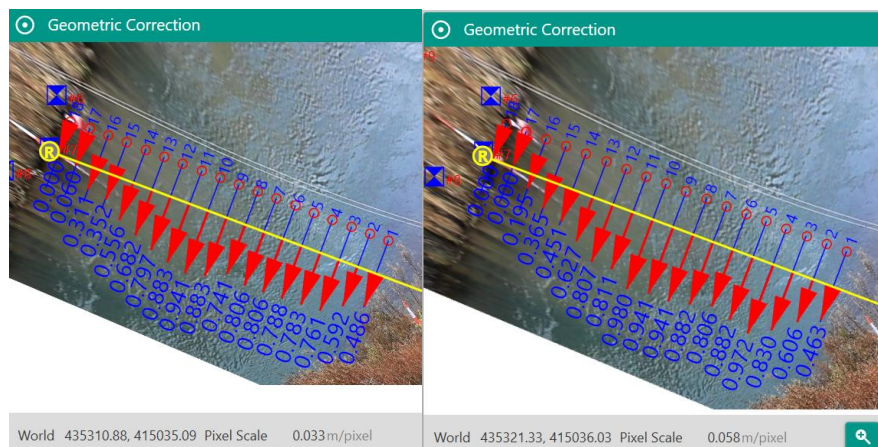
Ground Control Points								
Enable	Point Name	X(m)	Y(m)	Height(m)	X(pixel)	Y(pixel)	Error:dX(m)	Error:dY(m)
<input checked="" type="checkbox"/>	#1	435340.569	415042.038	138.930	1771.456	692.102	0.000	0.001
<input type="checkbox"/>	#2	435335.399	415038.089	138.920	1563.315	734.313	4.043	2.144
<input checked="" type="checkbox"/>	#3	435338.962	415033.534	140.550	1027.682	862.399	0.001	-0.002
<input type="checkbox"/>	#4	435341.209	415034.145	141.490	992.749	709.569	-2.183	-0.981
<input checked="" type="checkbox"/>	#5	435308.596	415066.634	141.300	845.682	149.630	0.133	-0.134
<input checked="" type="checkbox"/>	#6	435308.945	415055.396	139.210	568.848	259.309	-0.201	0.167
<input checked="" type="checkbox"/>	#7	435308.462	415051.734	138.190	439.949	319.040	0.065	-0.072
<input checked="" type="checkbox"/>	#8	435305.198	415050.076	139.960	298.176	247.032	0.095	-0.025
<input checked="" type="checkbox"/>	#9	435303.512	415058.216	142.730	513.377	114.700	-0.124	0.073

**Figura 15.** Los resultados de la ortorrectificación de GCP muestran errores mayores de  $\pm 2$  m para GCP #2 y #4. Fuente: Mark Randall, RDMW, utilizando el software HydroSTIV.

La Figura 16 (abajo) destaca la importancia de identificar y eliminar los errores de GCP en el proceso de ortorrectificación. La imagen de la izquierda tiene errores de GCP de la Figura 15 excluidos de la ortorrectificación final, el escalado de píxeles es igual a 0,033 m/píxel y un caudal de 38,951 m<sup>3</sup>/s. La imagen de la derecha tiene los errores de GCP incluidos, y la escala de píxeles ahora es de 0,058 m/píxel.

Aunque la distribución de velocidades es idéntica entre cada análisis, debido al mayor tamaño de píxel las velocidades ahora son más rápidas, lo que aumenta el resultado de caudal a 40.714 m<sup>3</sup>/s. La diferencia de 2,5 cm en la escala equivale a una diferencia del 4,5% en los caudales calculados.

La medición de referencia de ADCP realizada al mismo tiempo fue de 38.578 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 16.** Los impactos de los errores de ortorrectificación en el escalado de píxeles, la velocidad y el caudal. La imagen de la izquierda tiene los errores de GCP de la figura 18 excluidos de la ortorrectificación final. La imagen de la derecha incluye los errores de GCP que se transfieren al análisis de velocidad. Fuente: Mark Randall, RDMW, utilizando el software HydroSTIV.

#### 4.1.6 Corrección geométrica.

Después del proceso de ortorrectificación, se aplica una corrección geométrica a las imágenes que se utiliza en la determinación de la velocidad de la superficie.

La corrección geométrica compensa las distorsiones de la imagen, produciendo una imagen corregida con un alto nivel de integridad geométrica. Una imagen que no se corrija por distorsión geométrica en la dirección XY contendrá píxeles que se ubicarán geográficamente incorrectamente. En el caso de las imágenes oblicuas, la imagen

corregida geométricamente parece ampliarse a medida que aumenta la distancia desde la ubicación de la cámara (Figura 17).

Esta apariencia se debe a que los tamaños de píxeles se corrigen geométricamente a medida que aumenta la distancia geográfica de la cámara. Por lo tanto, un píxel corregido geométricamente contendrá un tamaño de fondo mayor en el fondo que un píxel corregido geométricamente en el primer plano de la imagen oblicua.

El número de píxeles contenidos en la imagen sigue siendo el mismo, solo cambia el tamaño del suelo para cada píxel.



**Figura 17.** Imagen oblicua de la cámara (izquierda) y la imagen rectificada ajustada para aumentar el tamaño del fondo de píxeles a medida que aumenta la distancia desde la cámara. Fuente: Mark Randall, RDMW, utilizando el software HydroSTIV.

## 5 Cálculo del caudal por velocimetría de imagen.

La velocimetría de imágenes utiliza un método de cálculo velocidad-área (generalmente métodos de media o sección media), por lo tanto, gran parte de la orientación recomendada para realizar cálculos de velocidad superficial y caudal se describe en ISO748: 2007 y es la misma que se aplica a las mediciones por vadeo y ADCP.

El término tiempo de exposición se utiliza en un sentido hidrométrico y se refiere al tiempo real utilizado para calcular una velocidad superficial representativa con una incertidumbre mínima. No es una referencia a la velocidad de obturación de la cámara. Por lo tanto, el tiempo de exposición es la duración real del vídeo analizada en segundos para calcular las velocidades de la superficie y el caudal.

### 5.1.1 Tiempo de exposición.

1. El tiempo de exposición mínimo recomendado para la velocidad superficial utilizado en los cálculos de caudal (ISO748:2007 Sección 7.2.2 sobre velocidades superficiales) es de 20 segundos con una recomendación de 30 segundos.

NOTA: algunos métodos de análisis utilizan longitudes de medición (vídeo) más cortas para mejorar los tiempos de cálculo. Si se utilizan tiempos de medición más cortos, es importante verificar que estos tiempos más cortos sean adecuados para el sitio.

2. El aumento del tiempo de exposición mejorará el promedio espaciotemporal del análisis de velocidad y puede ayudar a reducir la incertidumbre de medición causada por las condiciones ambientales, de flujo y del sitio local.
3. Cuando no se pueden cumplir los criterios de tiempo de exposición mínimo debido a que la duración de un solo video grabado es demasiado corta o debido a las condiciones del sitio, se pueden realizar mediciones repetidas y promediar los resultados para proporcionar una sola medición que cumpla o supere el tiempo de exposición mínimo recomendado.

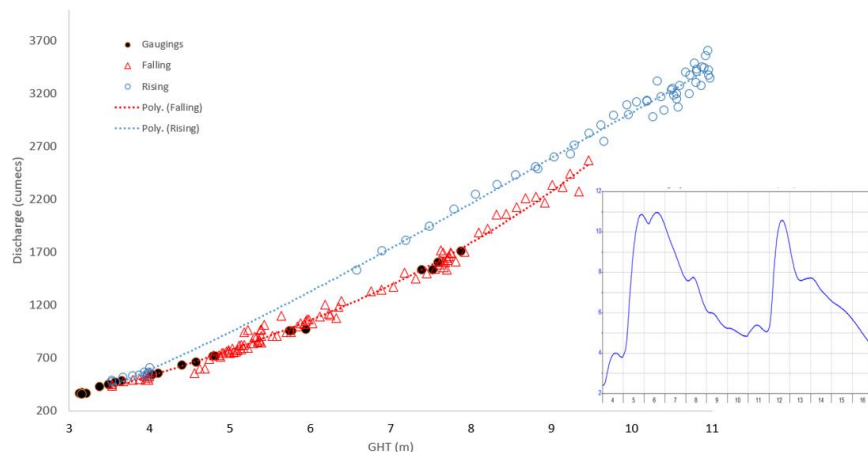
4. Las mediciones de velocimetría de imagen realizadas utilizando un método de correlación cruzada para los cálculos de velocidad y caudal también deben considerar el uso de un mínimo de 10 pares de imágenes extraídas para todos los cálculos de velocidad y caudal. (Le Boursicaud *et al.* 2016).

### 5.1.2 Intervalo de muestreo.

El intervalo de muestreo es el tiempo de separación entre las mediciones de velocidad/caudal (excluyendo las mediciones de submuestras).

Los intervalos de muestreo dependen de los cambios de etapa esperados durante la medición y, por lo tanto, el intervalo apropiado depende de factores basados en la forma de la cuenca, la longitud del tramo, la pendiente del alcance, el uso del suelo, el tipo de suelo, la vegetación y la precipitación.

Todos estos factores pueden afectar significativamente la forma del hidrograma de flujo y, por esta razón, es importante ajustar el intervalo de muestreo de las mediciones de velocimetría de la imagen para garantizar una representación precisa del hidrograma (Figura 18).



**Figura 18.** Clasificación de bucle identificada por mediciones automatizadas de caudal STIV en el sitio a partir de videos de cámaras fijas realizadas cada 1 hora durante el día durante dos eventos de crecida a lo largo de 12 días de inundación. Los círculos negros indican todas las mediciones de ADCP realizadas durante los 10 años anteriores. Fuente: Mark Randall, RDMW, utilizando el software HydroSTIV.

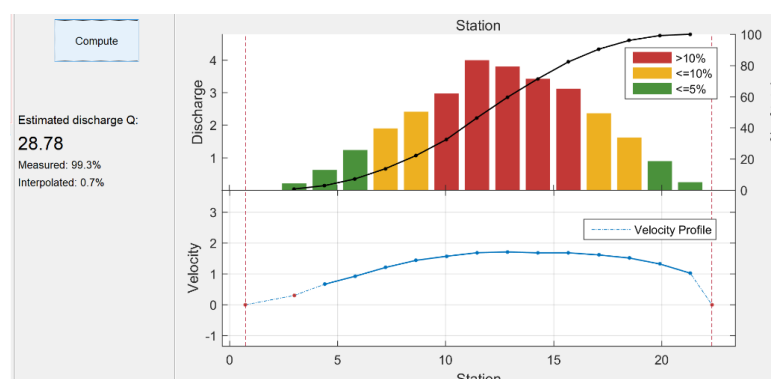
Si es posible, se deben revisar los hidrogramas del sitio al determinar el intervalo de muestreo de una cámara fija.

### 5.1.3 Número de verticales.

El caudal se calcula predominantemente a través del método de velocidad-área utilizando el método de sección media o media. La norma ISO748 contiene orientación sobre el número mínimo recomendado de verticales (puntos de cálculo de caudal por velocidad superficial) necesarios y el porcentaje máximo de flujo que debe contener cada vertical (normalmente el 10%), Figura 19. Una vez más, estas recomendaciones son las mismas que cuando se realiza una medición por vadeo de medidor de corriente o una medición estacionaria ADCP.

Al igual que con todas las técnicas y tecnologías de medición, es importante que las velocidades utilizadas en el cálculo del caudal se midan en todo el ancho del canal, en lugar de interpolarse o extrapolarse a grandes áreas del canal, ya que esto aumenta la incertidumbre de los datos de caudal.

Al considerar la calidad de una medición de velocidad superficial, se aplican las mismas consideraciones a las mediciones por vadeo y/o caudal ADCP cuando tampoco se miden secciones del ancho del canal.



**Figura 19.** Informe de medición de caudal LSPIV que muestra información sobre la velocidad y el caudal, incluidos los valores porcentuales para los datos de caudal interpolados (0,7%). Fuente: Manual del software RIVeR LSPIV publicado el 12/08/2020.

Una vez que se han calculado las velocidades superficiales, el usuario debe identificar la naturaleza de las velocidades superficiales y considerar las siguientes opciones al calcular el caudal:

1. Cuando se pueden medir varias secciones transversales, o cuando la posición de una sola sección transversal es incierta en relación con las variaciones de velocidad de la superficie observadas. El caudal debe calcularse a través de varias secciones transversales y se debe tener en cuenta el promedio y la dispersión de los resultados (Figura 20).
2. Si la pendiente del agua a través de las secciones transversales es significativa, se debe disponer de una estimación precisa del nivel en cada sección transversal.
3. La selección de una sola ubicación de sección transversal en el software debe coincidir con la ubicación donde se obtuvieron los datos de la sección transversal, a menos que se disponga de información secundaria que indique que el alcance es de naturaleza uniforme.
4. Para todos los métodos de velocimetría superficial, la resolución del perfil de velocidad superficial debe permitir la captura de las variaciones de la corriente, con un espaciamiento uniforme o no uniforme de los puntos de medición/verticales.
5. También se deben considerar las variaciones de profundidad, asegurando la coherencia entre la discretización batimétrica y del perfil de velocidad.

#	Total discharge (m³/s)	Gap (%)	Wetted area (m²)	Gap (%)	Mean velocity (m/s)	Gap (%)	Measured discharge (m³/s)	Meas. disch. / Tot. disch. (%)
1	762.186	-9.2	968.378	+0.0	0.787	-9.2	756.567	+99.3
2	854.659	+1.8	968.375	-0.0	0.883	+1.8	848.275	+99.3
3	901.799	+7.4	968.375	-0.0	0.931	+7.4	897.534	+99.5
Average	839.548	+0.0	968.376	+0.0	0.867	+0.0	834.125	+99.4

**Figura 20.** Análisis LSPIV que muestra el análisis de velocidad. Se han utilizado tres ubicaciones de sección transversal para capturar la varianza y proporcionar un resultado de caudal promedio. Fuente: Jerome Le Coz, IRSTEA, Fudaa LSPIV software.

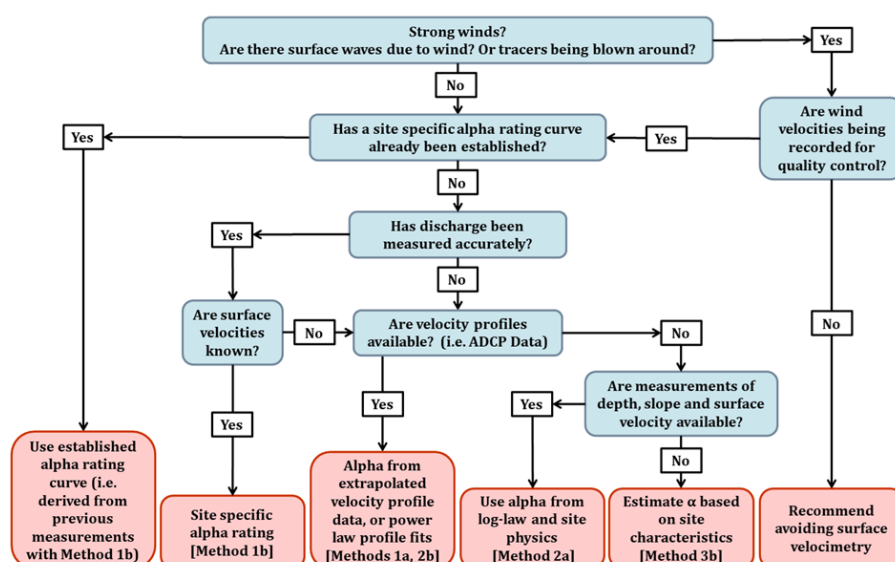
## 6 Coeficientes de velocidad superficial.

Los métodos que miden las velocidades de la superficie con el fin de calcular el caudal, aunque floten, la velocimetría de la imagen o el radar de velocidad de la superficie requieren el uso de lo que se denomina un coeficiente / factor de velocidad, comúnmente conocido como el "alfa de la superficie". Cada velocidad superficial medida se multiplica por el valor alfa de la superficie para proporcionar una velocidad promediada en profundidad utilizada en el cálculo del caudal por el método de velocidad-área. Los valores alfa superficiales pueden representar una fuente significativa de incertidumbre y, siempre que sea posible, se debe determinar un valor alfa específico del sitio utilizando todos los datos disponibles del sitio, incluidos los datos ADCP que puedan estar disponibles. Debe tenerse en cuenta que la mayoría de los programas de análisis permiten que un valor alfa superficial simplemente se modifique más adelante si se ha determinado un valor alfa específico del sitio.

Se considera que el valor predeterminado para el alfa superficial es 0,857, lo que representa un perfil de velocidad típico de la ley de potencia de 1/6, Rantz 1982. Los valores alfa de la superficie están asociados con la rugosidad del canal y, por lo tanto, pueden variar considerablemente según la rugosidad y la profundidad del agua. La sección 7.1.5 de la norma ISO 748:2007 proporciona algunas orientaciones sobre los valores alfa de la superficie asociados con la rugosidad.

	normal	smooth	rough	very rough	extreme cases
m	6~7	10	4	2~3	
$\alpha$	0.86 ~ 0.87	0.91	0.80	0.67 ~ 0.75	0.60 ~ 1.2

Una explicación completa sobre los métodos de cálculo del alfa superficial se encuentra en Biggs et al 2023, incluida la guía de campo a continuación.



Método 1a: Alfa del sitio a partir de datos de velocidad de ADCP extrapolados.

Método 1b: Alfa del sitio a partir del caudal de ADCP y caudal a partir de velocimetría superficial.

Método 2a: Alfa a partir de perfiles de ley logarítmica
Método 2b: Alfa a partir de perfiles de ley de potencia.
Método 3a: Valor alfa predeterminado.
Método 3b: Estimación alfa a partir de las características del sitio.

Fuente: Biggs *et al.*, 2021 Caudal del río a partir de mediciones de velocidad superficial: una guía de campo para seleccionar alfa

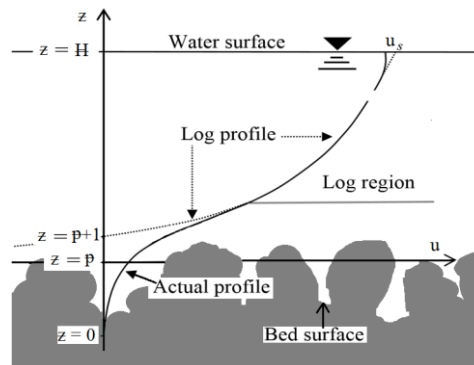
El cálculo de los coeficientes alfa de la velocidad superficial sigue las teorías establecidas del perfil de velocidad.

### 6.1 Perfil de velocidad de ley logarítmica.

Sin aceleración del flujo, flujo secundario o arrastre del viento en la superficie, se puede suponer que un perfil de velocidad logarítmico (Keulegan, 1938) se extiende a la superficie. La velocidad promediada en profundidad se relaciona entonces con la velocidad media de la superficie ( $\bar{u}_s$  ecuación 1):

$$\alpha = \frac{U}{\bar{u}_s} = 1 - \frac{\sqrt{gHS}}{k\bar{u}_s} \quad (1)$$

$U$  es la velocidad media de la profundidad,  $k$  es la constante de Von Kármán,  $H$  es la profundidad del flujo por encima del origen de la ley logarítmica,  $g$  es la aceleración gravitatoria,  $S$  es la pendiente y  $\alpha$  es el coeficiente de velocidad de la superficie.



**Figura 21.** Perfil vertical típico de la velocidad aguas abajo sobre un lecho de grava que demuestra un perfil logarítmico aumentado. Fuente: Smart y Biggs, 2020.

### 6.2 Perfil de velocidad de la ley de potencia.

El coeficiente de velocidad también se puede estimar a partir del perfil de velocidad de la ley de potencia de la siguiente manera:

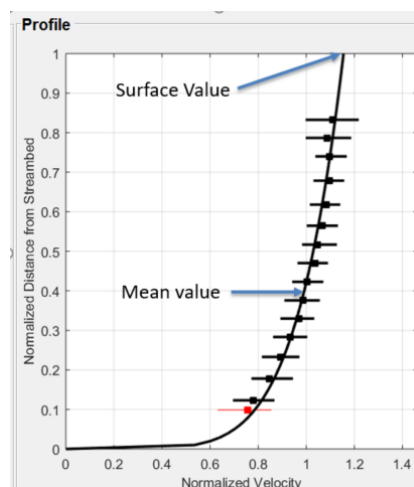
$$\alpha = \frac{U}{\bar{u}_s} = \left( \frac{1}{m+1} \right) \quad (2)$$

Donde  $m$  es el exponente de la ley de potencia que describe la rugosidad del canal.

- Por lo tanto, una ley de potencia de  $1/6 = 6/7 = 0,857$  valor alfa superficial.

### 6.3 Utilizando una velocidad superficial medida y/o datos de perfil de velocidad.

Los coeficientes alfa de la superficie pueden determinarse a partir de las mediciones del ADCP que contienen datos de perfil de velocidad y/o mediciones del correntímetro/FlowTracker que miden las velocidades reales o cercanas de la superficie y los perfiles de velocidad media. Los datos de velocidad y profundidad deben normalizarse. El valor alfa de la superficie es la relación entre los valores de la superficie y la media en el perfil de velocidad, como se muestra en la Figura 22.



**Figura 22.** Perfil de velocidad normalizado a partir de datos ADCP que muestran las ubicaciones de los perfiles de velocidad media y superficial. Fuente: Mark Randall, RDMW, utilizando el software Qrev ADCP.

El alfa de la superficie se calcula dividiendo el valor de la velocidad normalizada para la media (Valor = 1), por el valor extrapolado para la ubicación de la velocidad de la superficie.

En la Figura 32, este valor es aproximadamente 1,15, por lo tanto, 1 dividido por 1,15 proporciona un valor alfa superficial calculado de 0,87, que es esencialmente el valor para un perfil de Ley de Potencia de  $1/6$ .

### 6.4 Método del concepto de probabilidad para el cálculo del alfa superficial.

Si el perfil de velocidad no es estándar, por ejemplo, cuando la velocidad máxima se produce por debajo de la superficie del agua, se puede utilizar un método alternativo para calcular el alfa de la superficie. El método del concepto de probabilidad (Chiu 1989; Chiu y Tung, 2002) es un ejemplo de ello, centrándose en la definición del perfil de velocidad en un único lugar en el que la velocidad máxima se encuentra dentro de la sección transversal y no cambia de ubicación a lo largo de la gama de niveles de agua medidos. Se supone que esta ubicación es constante en todos los regímenes de flujo. Para más información, véanse los siguientes documentos, Chiu *et al.*, 2001; Fulton y Ostrowski, 2008.

Una ventaja adicional de utilizar el concepto de probabilidad es que el factor de coeficiente superficial utilizado (valor de entropía) permanece constante en todo el rango de flujos encontrados en el sitio.

### 6.5 Etapa a Alfa Curvas de calificación, índice de velocidad, desarrollo de calificación.

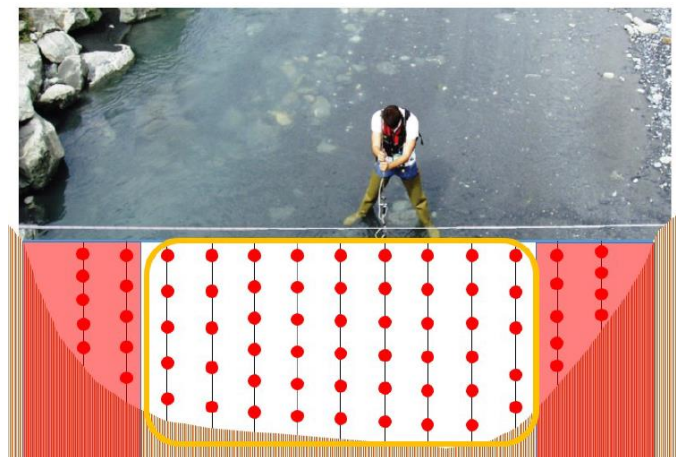
Para definir cómo pueden cambiar los valores de alfa de la superficie a medida que cambian las interacciones entre la rugosidad del lecho y los niveles de agua, puede ser beneficioso desarrollar una curva de calificación de alfa a etapa específica del sitio. Al igual que con una curva de gasto de caudal por niveles, esto permitirá determinar los valores alfa.

Los valores de  $\alpha$  del sitio se pueden registrar en múltiples flujos y trazarse en función del nivel (Figura 5) para generar una "curva de calificación de etapa alfa" específica del sitio (el primer uso conocido de curvas de calificación de etapa alfa fue en los informes de hidrometría franceses de principios de 1900). A continuación, se puede utilizar una extrapolación de esta curva para estimar los valores de  $\alpha$  específicos del sitio para condiciones de flujo extremas, incluidas las crecidas. Las curvas de calificación de etapa-alfa también se pueden utilizar para la interpolación para estimar el alfa en los niveles de agua entre aquellos en los que se realizaron las mediciones.

Las expresiones teóricas de alfa superficial frente a profundidad/rugosidad del flujo se pueden utilizar para extrapolar el alfa superficial a flujos más altos o más bajos, como lo discutieron Le Coz *et al.*, 2010 y Smart y Biggs, 2020.

### 6.6 Análisis del perfil de velocidad específico del sitio.

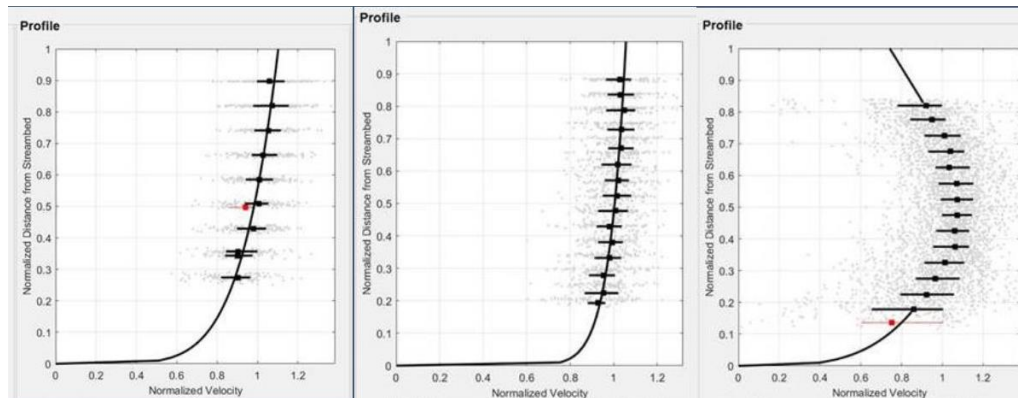
Siempre que sea posible, se debe calcular un alfa superficial específico del sitio utilizando los métodos descritos. El análisis de los datos antiguos del ADCP o del medidor de corriente puede ayudar.



**Figura 23.** Medición de perfiles de velocidad en múltiples verticales a través de un canal. Las verticales cerca de los taludes se eliminan para evitar incorporar perfiles de velocidad que no sean representativos del flujo principal. Fuente: Hauet *et al.*, 2018.

Cuando se lleva a cabo un análisis del perfil de velocidad del sitio, debe determinarse si un solo alfa superficial es representativo o si diferentes secciones del canal requieren su propio

valor de alfa superficial. Las grandes llanuras aluviales pueden tener una superficie alfa muy diferente a la del canal principal, como se muestra en la Figura 24.



**Figura 24.** Medición de perfiles de velocidad en tres verticales a través de un canal. El perfil de la izquierda es el canal principal, el perfil central está a mitad de camino entre el canal y la llanura de inundación, el perfil de la derecha está en la llanura de inundación. Fuente: Mark Randall, RDMW, utilizando el software Qrev ADCP.

En la Figura 24, la llanura de inundación consistía en muchos árboles pequeños cuya vegetación de dosel desaceleró las velocidades de la superficie, mientras que las velocidades debajo de la superficie, en las bases de los árboles, no han causado la misma resistencia al flujo, lo que resulta en un perfil de velocidad muy diferente al del canal principal. Los valores de alfa superficial calculados a partir de los datos de ADCP en la Figura 34 equivalieron a 0,86, 0,91 y 1,4 respectivamente.

## 6.7 Las características del canal influyen en el alfa.

Las características del canal y las condiciones hidráulicas en un sitio de monitoreo pueden tener un impacto en el alfa.

1. Relación de aspecto del canal ( $\frac{\text{ancho}}{\text{profundidad}}$ )
2. Cambios en la profundidad del agua.
3. Rugosidad del lecho del canal.
4. Flujo inestable o condiciones de remanso.
5. Estructuras hidráulicas.
6. Vegetación.
7. Impactos del viento.
8. Cualquier sospecha de impacto característico del sitio en los coeficientes de la superficie debe investigarse y documentarse al determinar el perfil de velocidad.

Varias observaciones publicadas por Huet *et al.*, 2018, basadas en el análisis del coeficiente alfa superficial de 3611 calibres de 176 estaciones hidrométricas francesas sugieren que:

1. Los coeficientes alfa superficiales aumentan con la profundidad del agua (D).

2. Para aguas poco profundas (menos de 1 metro) alfa fue cercano a 0,8
3. Alfa aumentado hasta 0,9 para D de 9 metros en canales individuales.
4. Los canales compuestos pueden tener un alfa más bajo.
5. Los pozos de agua profundos podrían causar un alfa más alto en comparación con los lechos más planos.
6. La relación entre el alfa y la rugosidad relativa no es tan clara en el análisis de calibre.
7. Se produjo un valor alfa medio de 0,8 para los ríos naturales relativamente accidentados (ríos arenosos, de guijarros, de rocas)
8. Se obtuvo un valor alfa medio de 0,9 para los canales de hormigón artificial.

**Esta guía hace referencia a los siguientes documentos:**

ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data (2014)

Bazin, H. (1865). Recherches Expérimentales sur l'Ecoulement de l'Eau dans les Canaux Découverts. Mémoires présentés par divers savants à l'Académie des Sciences, Paris, Vol. 19, 1-494

Biggs, H.; Smart, G.; Doyle, M.; Eickelberg, N.; Aberle, J.; Randall, M.; Detert, M. Surface Velocity to Depth-Averaged Velocity—A Review of Methods to Estimate Alpha and Remaining Challenges. *Water* 2023, 15, 3711. <https://doi.org/10.3390/w1521371>

Biggs, H., Smart G., Holwerda, H., Doyle, M., McDonald, M. and Ede, M. (2021). River discharge from surface velocity measurements – A field guide for selecting alpha. *EnviroLink Advice Report*, Christchurch, New Zealand.

Bradley, A. A., A. Kruger, E. A. Meselhe, and M. V. I. Muste, Flow measurement in streams using video imagery, *Water Resour. Res.*, 38(12), 1315, doi:10.1029/2002WR001317, 2002.

Chiu, C.-L., 1989, Velocity distribution in open channel flow, *Journal of Hydraulic Engineering*, 115 (5), 576-594

Chiu, C.-L., and Tung, N.C., 2002. Velocity and regularities in open-channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128 (94), 390-398.

Chiu, C.-L., Tung, N.C., Hsu, S.M., and Fulton, J.W., 2001, Comparison and assessment of methods of measuring discharge in rivers and streams, Research Report No. CEEWR-4, Dept. of Civil & Environmental Engineering, University of Pittsburgh, Pittsburgh, PA.

Detert, M. (2021). How to avoid and correct biased riverine surface image velocimetry. *Water Resources Research*, 57, e2020WR027833. <https://doi.org/10.1029/2020WR027833>

Fujita Ichiro, Principles of Surface Velocity gaugings, Presentation, The 4th IAHR-WMO-IAHS Training Course on Stream Gaugings, 2018

Fujita I, Muste M, Kruger A (1998) Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications. *J Hydraul Res* 36(3):397–414

Fujita I, Watanabe H, Tsubaki R (2007) Development of a non-intrusive and efficient flow monitoring technique: the space time image velocimetry (STIV). *Int J River Basin Man* 5(2):105–114

Fulton, J.W. and Ostrowski, J., 2008, Measuring real-time streamflow using emerging technologies: Radar, hydroacoustics, and the probability concept, *Journal of Hydrology* 357, 1–10.

Haoyuan Zhao, Hua Chen, Bingyi Liu, Weigao Liu, Chong-Yu Xu, Shenglian Guo, Jun Wang, An improvement of the Space-Time Image Velocimetry combined with a new denoising method for estimating river discharge, *Flow Measurement and Instrumentation*, Volume 77, 2021,101864, ISSN 0955-5986

Hauet, Alexandre & Morlot, Thomas & Daubagnan, Léa. (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. 06015. 10.1051/e3sconf/20184006015.

ISO 748:2007 Hydrometry – Measurement of liquid flow in open channels using current meters or floats.

ISO 15769:2010 Hydrometry — Guidelines for the application of acoustic velocity meters using the Doppler and echo correlation methods

Keulegan, G. H. (1938). Laws of Turbulent Flow in Open Channels. *J. Research, National Bureau of Standards*, Vol. 21, 707-741.

Le Boursicaud, R., Pénard, L., Hauet, A., Thollet, F., Le Coz, J., 2016. Gauging extreme floods 378 on YouTube: Application of LSPIV to home movies for the post-event determination of 379 stream discharges. *Hydrol. Process.* 30, 90–105. doi:10.1002/hyp.10532

Muste, M., Fujita, I., and Hauet, A. (2008), Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments, *Water Resour. Res.*, 44, W00D19, doi:[10.1029/2008WR006950](https://doi.org/10.1029/2008WR006950).

Rantz, S. Measurement and computation of stream-flow: Measurement of stage and discharge. In U.S. Geological Survey Water Supply Paper 2175; United States Government Printing Office: Washington, DC, USA, 1982

Rosbjerg, Dan & Rodda, John. (2019). IAHS: A brief history of hydrology. *History of Geo- and Space Sciences*. 10. 109-118. 10.5194/hgss-10-109-2019.

Smart, G. & Biggs, H. (2020). Remote gauging of open channel flow: Estimation of depth averaged velocity from surface velocity and turbulence. *Proceedings of River Flow 2020*, Delft, Netherlands.

Tauro, F., Piscopia, R., & Grimaldi, S. (2017). Streamflow observations from cameras: large-scale particle image velocimetry or particle tracking velocimetry? *Water Resources Research*, 53, 10,374–10,394. <https://doi.org/10.1002/2017WR020848>