

PIV CASERO

Alumno: José Miguel Raygoza Serment

Responsables académicos: M en I David Porta Zepeda y Dr Carlos Echeverría Arjonilla

Facultad de Ciencias UNAM

11-Marzo-2021

RESUMEN:

En este trabajo, se introduce a la técnica de Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV por sus siglas en inglés) aplicada a dos experimentos caseros. Se adapta la técnica para estudiar el movimiento de agua en su superficie gracias a la tensión superficial. El primero, un flujo recirculante generado con un ventilador que mueve una superficie de agua, y el segundo después el flujo agua de un canal casero de agua somera ligeramente inclinado. Para el canal también se calculó su número de Reynolds $Re = 249$ y se determinó que el flujo era laminar. Es posible utilizar el PIV de manera casera para poder explicar los principios fundamentales de la misma a alumnos de nivel licenciatura.

Los autores agradecen el apoyo de DGAPA UNAM a través del proyecto PAPIME número PE111020.

1 INTRODUCCIÓN:

Este proyecto nace debido a la pandemia del SARS-Covid-19 que obligo el cierre de diversos lugares entre ellos escuelas, laboratorios y negocios. Lo que obligo continuar labores desde casa con el propósito de evitar la propagación del virus. En particular el trabajo en laboratorios docentes fue imposible, sin embargo existen diferentes esfuerzos para poder continuar con experimentos desde formas virtuales hasta experimentos caseros de bajo costo. Es por ello que este proyecto propone el uso de una de las técnicas más utilizadas en la mecánica de fluidos aplicada a experimentos que se pueden realizar en casa con materiales de uso cotidiano.

Uno de los problemas al que se enfrenta cualquier estudiante de física, ciencias de la tierra o física biomédica es poder realizar medidas utilizando diversas técnicas de medición, en particular en el área de mecánica de fluidos es de suma importancia. Existen diversas técnicas para medir la velocidades en flujos que por desgracia son caras y solo se encuentran en un laboratorio como por ejemplo la Anemometría de Laser Doppler (LDA por sus siglas en inglés), Anemometría de hilo caliente, Anemometría con sondas de presión, Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV por sus siglas en inglés), entre otras (Eckert, et al., 2007), por lo que enseñar a los alumnos a utilizar alguna de estas técnicas a distancia es complicado. Sin embargo la técnica PIV se puede utilizar con equipo casero y realizando algunas suposiciones físicas pertinentes, este trabajo se enfoca en introducir al alumno a la medición de campos de velocidad utilizando la técnica PIV.

Esta es una técnica que se puede implementar fácilmente, basta contar con un líquido (agua, aceite, glicerina), partículas (semillas molidas, yerbas aromáticas, polvos para cocinar, canela, etc.), un recipiente y la cámara de un dispositivo móvil. Con estos

materiales se puede diseñar un experimento fácil de construir en casa para enseñar el funcionamiento de la técnica PIV.

Esta técnica puede ser de fácil acceso y permite obtener resultados precisos, lo que promueve la creatividad e ingenio de los alumnos, además de introducir al alumno a una de las técnicas más utilizadas a nivel mundial, aún con las limitantes derivadas de esta pandemia.

Por lo que el objetivo de este trabajo es diseñar y realizar un experimento que permita mostrar los principios básicos de funcionamiento de la técnica PIV. El experimento no debe requerir equipo de laboratorio, así como ofrecer buenos resultados, tomando en cuenta las limitaciones del material. Además, el experimento debe ser repetible y demostrativo para enseñar una posible aplicación real.

Para lograr el objetivo se eligen flujos laminares que sean visibles y se consideren lentos (del orden de $10^{-3} - 10^{-2} m/s$). En este trabajo se utiliza como ventaja la tensión superficial del agua (De Gennes P, et al., 2002). Esto con el fin de tener trazadores que se muevan únicamente en su superficie y no se hundan para así poder usar la técnica PIV sin la necesidad de una hoja de luz, ya que asegura que el estudio se lleva a cabo en un único plano del movimiento.

Tomando en cuenta las limitaciones de la técnica de PIV y los recursos caseros disponibles se diseñaron dos experimentos, el primero una circulación en una superficie de agua producida por el aire proveniente de un ventilador casero y el segundo un flujo laminar de una corriente de agua somera en un canal abierto.

El principio de la técnica, así como sus características principales y desarrollo matemático de la correlación cruzada con la cual se mide la velocidad, se presentan a continuación.

1.1 Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV)

Es una técnica estadística que permite obtener el campo de velocidades bidimensionales (2D) de un flujo sembrado con partículas trazadoras que se graba con una cámara digital y es iluminado con una hoja de luz, el fluido de trabajo puede ser líquido o gas. Esto se logra utilizando la correlación cruzada en dos dimensiones, se miden los cambios en la distribución de intensidades de la luz que dispersan los trazadores en imágenes obtenidas en tiempos distintos y con ello se obtienen desplazamientos locales y al conocer el tiempo entre fotografías la velocidad instantánea. El arreglo típico de PIV se muestra en la Figura 1.

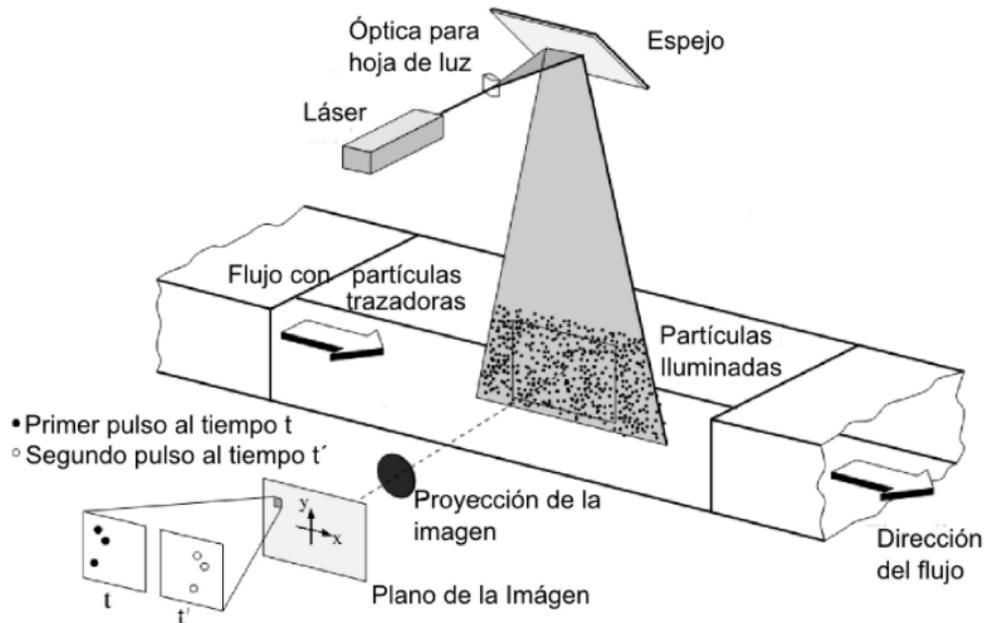


Figura 1. Arreglo Experimental para PIV en un túnel de Viento. Imagen editada a partir de Echeverría 2013.

Para poder asegurar que el estudio se lleva a cabo únicamente en un plano dentro del flujo se utiliza típicamente una hoja de luz láser pulsada. La cámara es colocada perpendicular a esta hoja de luz. Con la óptica de la misma se enfoca el plano de luz y su área de-encuadre quedara determinada por la zona que se desea estudiar, la óptica disponible y que en todo momento se alcance a ver la luz dispersada por las partículas.

En general las partículas son pequeñas ($\sim 10^{-6}$ m) por lo que se tiene dispersión Mie de la luz. Después se graba el flujo con una cierta frecuencia, y las imágenes extraídas del video son procesadas para obtener el campo de velocidades. Con ayuda de un programa se realiza la correlación cruzada en dos dimensiones, con lo cual se obtienen desplazamientos de grupos de partículas entre dos imágenes y conociendo el tiempo de separación entre imágenes se obtiene la velocidad. Los principales detalles de la técnica se describen a continuación.

1.2 Características principales de la técnica.

Una de las principales limitantes de la PIV es que solo permite obtener las componentes de velocidad que se encuentran sobre el plano de la hoja de luz, por lo que no es posible medir la componente de velocidad normal a dicho plano. Esto implica que los flujos turbulentos son más complicados de estudiar con esta técnica, aunque no imposible.

Otro problema es que la correlación cruzada demanda una alta capacidad de cómputo.

1.2.1 Partículas trazadoras

Las partículas que se introducen al flujo deben ser suficientemente grandes para dispersar suficiente luz y así ser retratadas por una cámara, por otra parte, deben ser suficientemente pequeñas para seguir al flujo fielmente.

Considerando esto la siguiente ecuación indica la velocidad de arrastre de las partículas trazadoras U_p , la cual está dada por la *Ley de Stokes* (Christensen 2008):

$$U_p = U \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_s}\right) \right] \quad (1)$$

Donde τ_s es el tiempo de relajación de las partículas en función del tamaño de la partícula d_p , su densidad ρ_p y μ la viscosidad dinámica del fluido:

$$\tau_s = d_p^2 \left(\frac{\rho_p}{18\mu} \right) \quad (2)$$

Este tiempo de relajación representa el tiempo que se tarda un trazador en alcanzar la velocidad del flujo cuando este presenta una aceleración.

Las ecuaciones de Stokes son válidas siempre que se asuma que el cuerpo sea esférico y el flujo no se acelere. En general es difícil tener partículas esféricas, a pesar de ello este tiempo si puede representar el orden de magnitud correcto, para realizar las correcciones o consideraciones pertinentes dependiendo del flujo de estudio.

En el caso particular de utilizar partículas trazadoras en líquidos, en los en general es difícil encontrar aceleraciones grandes, se busca que la densidad la densidad relativa, definida en términos de la densidad del fluido ρ_f y la de la partícula ρ_p sea lo más parecida a la unidad, para lograr una flotación neutra:

$$\rho_{relat} = \frac{\rho_p}{\rho_f} \sim 1 \quad (3)$$

, además de que deben tener el menor tamaño posible, para asegurar un tiempo de relajación pequeño. Con estas consideraciones se puede decir que la velocidad de los trazadores y del flujo es la misma.

Sin embargo, si el flujo es lento, aunque no se tenga un tiempo de relajación pequeño, la velocidad será pequeña y siempre se puede aproximar la velocidad de las partículas a la del flujo debido a que esta diferencia de velocidades es pequeña.

Otro punto importante es que la densidad de partículas debe ser lo suficientemente alta para que se pueda medir todo el campo de velocidades del mismo. De forma que, al momento de trabajar con las imágenes, éstos contrasten con el fondo y puedan ser detectados los cambios de intensidad (Figura 2.). Pero no deben ser demasiadas tal que el flujo sea diferente a un flujo sin partículas.

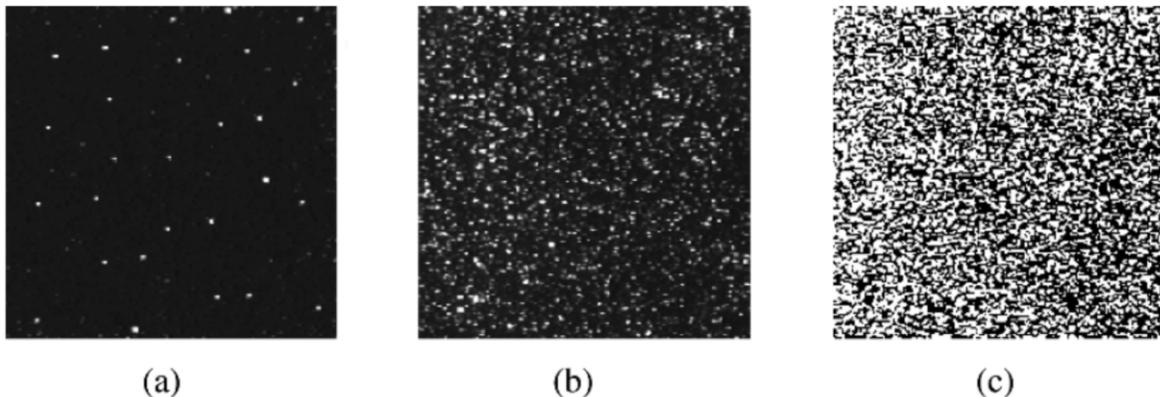


Figura 2. (a) Baja densidad, (b) Densidad media, (c) Alta densidad. Imagen editada a partir de Christensen, 2008

Es importante señalar que la densidad de trazadores tiene varios efectos, el primero y más importante es que si son demasiados (Figura 2 c)) puede alterar el comportamiento del flujo y como resultado estudiar un flujo distinto al que se deseaba estudiar originalmente. Y el segundo es que si no hay suficientes trazadores la correlación cruzada tendrá más falsos positivos (vectores espurios). Por lo que la técnica PIV requiere un esquema similar a la Figura 2 b)

1.2.2 Iluminación para la hoja de luz

El láser o la fuente de luz debe contar con la potencia necesaria para iluminar las partículas y la luz dispersada por éstas sea captada por la cámara.

Para flujos rápidos típicamente la fuente de luz se pulsa y sincroniza con la frecuencia de grabación de la cámara, que por lo general es de alta velocidad. Pero para flujos lentos se puede utilizar luz continua.

Una de las principales problemáticas de esta hoja de luz es que debe ser lo más delgada posible para asegurar que las partículas retratadas se encuentren sobre el mismo plano y así asegurar que efectos tridimensionales en el flujo no serán contabilizados, es decir si una partícula sale del plano de estudio no será contabilizada. Este grosor en equipos comerciales es del orden de unos cuantos milímetros.

1.2.3 Cámara

La tasa de grabación de la cámara debe ser acorde a la velocidad del flujo, si la velocidad es alta, se requerirá una frecuencia alta para que no se pierdan de vista las partículas entre cuadro y cuadro. El tiempo de exposición también debe de ser elegido para que los trazadores retratados parezcan estáticos, de lo contrario se verán alargados y aunque la correlación cruzada puede obtener un buen resultado, no podrá determinar con precisión zonas de aceleración del flujo.

Por otro lado, si la velocidad del flujo es baja, la frecuencia no debe ser tan alta ya que entre fotograma y fotograma no se apreciaría desplazamiento alguno, obteniendo un sesgo en las mediciones.

Adicionalmente todas las cámaras introducen ruido electrónico que se ve reflejado en cambios de intensidad entre imágenes lo que afecta de manera directa a la correlación cruzada.

1.3 Principio de la correlación de cruzada

La correlación cruzada es un método estadístico, el cual busca cambios de intensidad entre imágenes. Los fotogramas obtenidos son divididos en subáreas llamadas *ventanas de interrogación* o *áreas de interrogación*. La distribución de intensidad de un área del primer fotograma se busca en todas las áreas de la siguiente imagen como se ve en la Figura 3. Este proceso se realiza con todas las áreas del primer fotograma sobre el segundo.

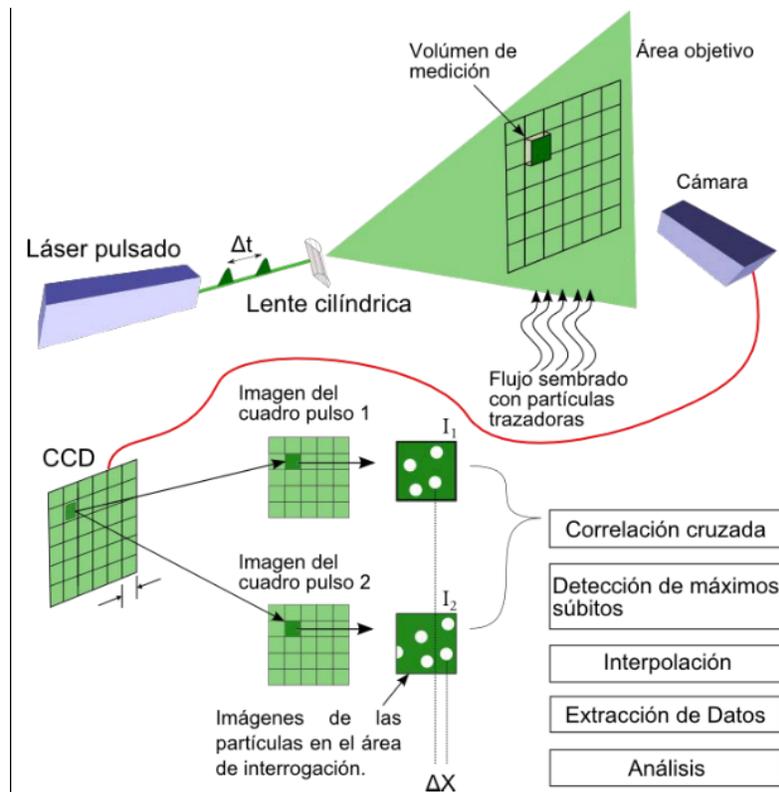


Figura 3. *Proceso completo de correlación cruzada.* Imagen modificada a partir de Echeverría 2015

La resolución espacial del PIV depende del tamaño del área de interrogación que a su vez depende del tamaño y densidad de los trazadores en el flujo. Entre más pequeña sea esta área de interrogación, mejor será la resolución espacial. A su vez el tamaño está directamente relacionado con el tiempo de procesamiento entre grande el área mayor será el tiempo de cómputo.

En la correlación cruzada se asume de entrada que todas las partículas dentro de un área de interrogación se desplazan de manera homogénea entre dos cuadros. Debido a que las partículas están distribuidas de forma aleatoria, la correlación cruzada, como su nombre indica, correlaciona una sección de la primera imagen con una sección la de la segunda

imagen, en la cual la ventana de interrogación es del mismo tamaño y está ligeramente desplazada (Christensen 2008).

Matemáticamente, la correlación cruzada toma el campo escalar de *patrón de intensidades de partículas (PIP)*, la cual depende de las posiciones de las partículas en las imágenes en el área de interrogación A_I . Y se define como: (Echeverría 2015):

$$C(\mathbf{s}, \mathbf{D}; \mathbf{x}; \mathbf{\Gamma}) = \frac{1}{A_I} \iint_{A_I} PIP(\mathbf{x}, \mathbf{\Gamma}) PIP(\mathbf{x} + \mathbf{s}, \mathbf{\Gamma} + \mathbf{D}) d^2 \mathbf{x} \quad (4)$$

Donde \mathbf{s} es el desplazamiento de la partícula en la imagen, \mathbf{D} es el desplazamiento de la partícula en el campo de visión, \mathbf{x} es el arreglo de los vectores posición en la imagen y $\mathbf{\Gamma}$ describe el estado del arreglo en un cuadro. Al ser la imagen un conjunto discreto de pixeles esta integral se debe transformar en su forma discreta, y la operación se convierte en:

$$C(m, n) = \sum_i \sum_j PIP_1(i, j) PIP_2(i - m, j - n) \quad (5)$$

Donde el subíndice indica de cual imagen se trata (Echeverría 2015).

Esta ecuación se calcula ya sea en el dominio espacial directamente, o por medio de la transformada rápida de Fourier (FFT) en el dominio de frecuencia espacial. FFT es más rápida en el cálculo y funciona bien en el caso de que las ventanas tengan el mismo tamaño.

Los errores principales que se pueden encontrar son que las mismas partículas no aparezcan en ambos cuadros, esto se puede deber a diferentes razones como movimientos tridimensionales de las partículas o una elección errónea de la frecuencia de grabación. Otro error se da al calcular la correlación cruzada y proviene de localizar el pico de intensidad (Figura 5), esto se debe a que no todos los trazadores en un área de interrogación aparecen en un área de la siguiente imagen, provocando que el coeficiente de correlación sea pequeño y por lo tanto detecte desplazamientos erróneos, lo que se traduce en vectores espurios. Este error se disminuye de manera considerable aumentando el tamaño de la ventana de interrogación, aunque puede subestimar su velocidad del debido a que si pueden haber partículas que se muevan a diferentes velocidades y por otro lado al utilizar un área más pequeña se pueden obtener vectores espurios de desplazamiento debido a la diferencia de velocidades entre las partículas. La presencia de vectores espurios también están relacionados a cambios en la intensidad de la fuente de luz (Echeverría 2015).

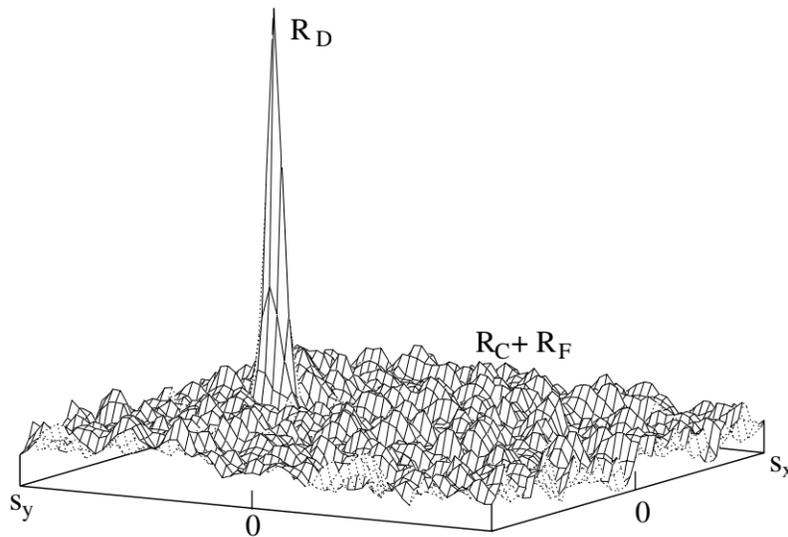


Figura 5. Pico de intensidad en la imagen de la partícula, así como el ruido de fondo asociado a la iluminación y demás partículas. Imagen modificada a partir de Christensen 2008.

Otro factor que afecta a la correlación cruzada es que la luz que capta la cámara, que traduce intensidades de luz a valores discretos de píxeles, difiere entre cuadros, debido al proceso electrónico inherente de la cámara (Figura 6). Esto produce picos de correlación bajos que dan lugar a vectores espurios. Una forma para minimizar este efecto es normalizar las imágenes a través de un post-procesado. En el cual también se busca aumentar el contraste entre las partículas y el fondo. Este paso previo produce en general mejores resultados en el proceso.

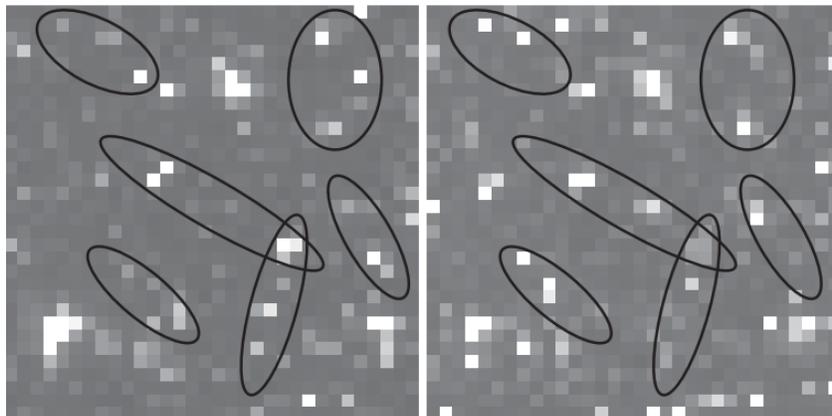


Figura 4. Cambios de intensidad individual de las partículas entre dos exposiciones en las regiones marcadas. Imagen tomada de Cavazzini 2012

Al procesar una imagen se debe de tener cuidado en no introducir artefactos que alteren la información de las partículas, es decir todo proceso, como filtrar ruido de la imagen, no se debe introducir información adicional a las imágenes que pueda alterar los resultados. Entre

los procesos que se pueden realizar a las imágenes se encuentra mejorar el contraste, reducir ruido, cambiar los niveles de intensidad, etc. Esto se puede realizar con diferentes programas de procesamiento de imágenes como GIMP(GIMP n.d.), Adobe Photoshop (Adobe Photoshop n.d.), MATLAB (MATLAB - MathWorks - MATLAB & Simulink n.d.) e Image J (ImageJ n.d.). En general, este último ofrece una documentación apropiada para saber rápidamente si el proceso va a agregar o no información extra a las imágenes. Además, es de tipo *open source*, lo que implica que existen mejoras importantes que son creadas en general por la comunidad científica a través de extensiones gratuitas.

Existen varias opciones para poder llevar a cabo el análisis de PIV. Estos programas calculan la función de correlación cruzada discretizada (4), en un proceso que involucra todas las ventanas de interrogación en todas las imágenes. Entre ellos están PIVview (PivTec PivView Version 1.7 User Manual 2001), PIVLAB (Thielicke and Stamhuis 2014), MATLAB (MATLAB - MathWorks - MATLAB & Simulink n.d.), GPiv (Gpiv home page n.d.) , PIV Image J Plugin (PIV --- ImageJ plugin - ImageJ plugins by Qingzong TSENG n.d.), OpenPIV (Ben-Gida, Gurka, and Liberzon 2020) , entre otros.

2 DESARROLLO EXPERIMENTAL

Consideraciones generales para implementar la técnica PIV

Se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones al momento de implementar la técnica:

La superficie sobre la que se hará el experimento debe ser horizontal y el contenedor del líquido debe tener una pared lisa para despreciar efectos tridimensionales.

Para que se tenga un mejor contraste al momento de grabar, lo más recomendable es utilizar un fondo ya sea de color blanco o negro en conjunto con una iluminación homogénea y uniforme durante todo el experimento, esto para poder aplicar una técnica llamada "*Background subtraction*" (Christensen 2008). Se dan dos maneras de conseguirlo en los dos experimentos.

En relación con lo anterior, se recomienda el uso de partículas que tengan color blanco o negro, dependiendo del fondo, que cumplan las condiciones descritas en 2.1.2. La pimienta negra, cuya densidad está entre $400 - 550 \text{ Kg/m}^3$, tienen diámetros medios de $2 - 7 \text{ mm}$ (NORMA PARA PIMIENTAS NEGRA, BLANCA Y VERDE (PIMIENTAS NBV) n.d.), por lo que no rompe la tensión superficial del agua y cumple los otros requerimientos pedidos; así que se puede utilizar como trazador al ser un material que normalmente se encuentra en los hogares. Sin embargo, tiene el defecto de que es un material poroso y en consecuencia no es reciclable su uso como indicador del flujo después de cierto tiempo porque ya no flota. El sembrado se hizo una vez montado el experimento.

Es importante controlar el sembrado de los trazadores durante el experimento para discriminar tamaños y distribución. En este caso se utilizó una coladera, dispersando a un ritmo constante las partículas y se dejaron caer cerca de la superficie del agua.

Se requiere cuando menos, un cuadro del fondo para caracterizarlo al momento de compilar las imágenes y restar cualquier tipo de ruido en la imagen, traducido en un fondo que no es perfectamente blanco, y un cuadro del video con una escala de referencia o con un objeto que tenga una distancia conocida sobre el mismo plano de la superficie libre para evitar una distorsión de las medidas a causa de la profundidad.

En general la mayoría de los dispositivos móviles cuentan con una cámara que permite grabar con frecuencias de 30 y 60 fotogramas por segundo (fps), aunque modelos más caros permiten tasas de grabación de hasta 300 fps. Es por esta razón que el flujo debe ser lento (órdenes de magnitud de mm/s), en general laminar, para asegurar que mismos grupos de partículas sean retratados al menos en dos fotogramas contiguos. Además, se deben de tener tiempos de exposición tal que se tenga una buena iluminación en la imagen y se aprecie el desplazamiento de las partículas entre cuadros, además de evitar el alargamiento de las partículas, como se mencionó antes.

Uno de los factores más importantes y determinantes para obtener buenos resultados es que la cámara debe de permanecer fija durante todo el proceso, y debe estar bien enfocada en el plano de la superficie libre y que abarque lo más posible del fenómeno.

En este experimento, se colocó la cámara de un celular iPhone 8 en una superficie rígida, la cual graba puede grabar a diferentes frecuencias (30 o 60 fps, con un sensor Sony Exmor RS y una cámara de 8.29 MP para tomar video. Las demás especificaciones técnicas pueden ser consultadas en Apple iPhone 8 - Características y especificaciones n.d.

Es importante que la cámara siempre esté en la opción de grabar al momento de obtener todos los cuadros ya que los celulares utilizan diferentes cámaras y por lo tanto diferentes lentes dependiendo de la configuración de la cámara, esto es importante al momento de obtener la referencia de escala, ya que si se saca una fotografía esta puede tener una resolución diferente a el video.

Montajes Experimentales

Circulación en Superficie de Agua

Para ver la circulación en la superficie del agua, se colocó sobre una mesa un refractario y se utilizó un ventilador para aventar aire sobre la superficie.

El montaje experimental se muestra en las figuras 7,8 y 9, y se describe a continuación:

Se colocó un refractario de vidrio de medidas internas: $30 \times 17.6 \times 5.4 \text{ cm}^3$ sobre una mesa, debajo del cual se pegó goma eva, también conocida como foamy, de color blanco como fondo.

Después se colocó un flexómetro a la misma altura que el nivel del agua (4.9 cm) como referencia (Ver Figura 9). Para generar una corriente de aire se utilizó un ventilador tipo torre (3Lasko® 3726S) con una velocidad fija. Este se colocó a la altura de la superficie del agua y diera directamente en una pared lateral del recipiente.

Ventilador

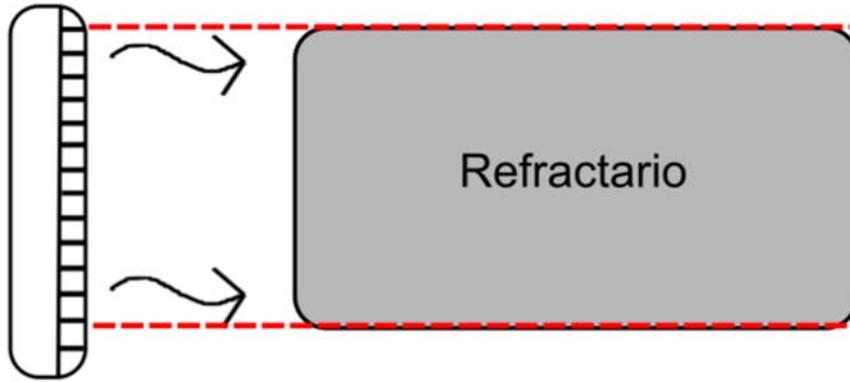


Figura 7. Esquema experimental del aire recirculante (Vista Superior).

Ventilador

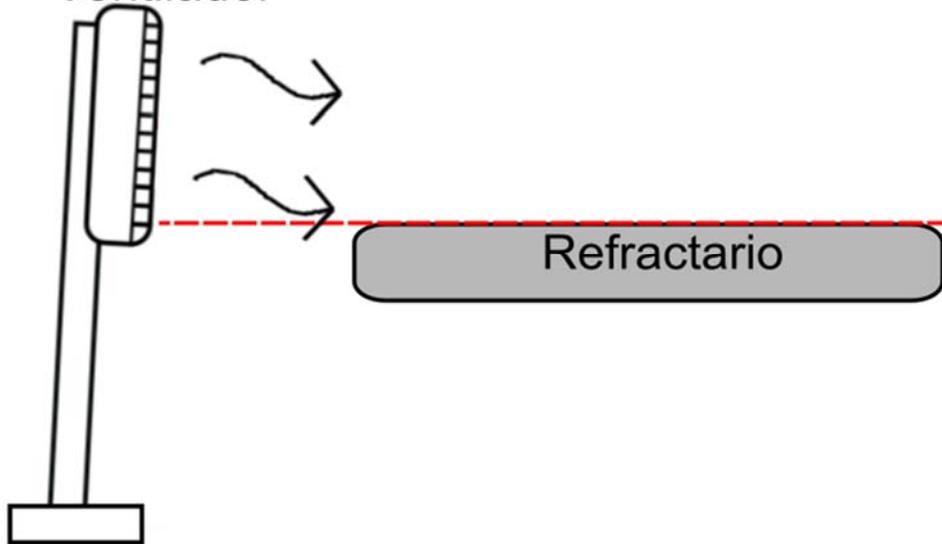


Figura 8. Esquema experimental del aire recirculante (Vista lateral).

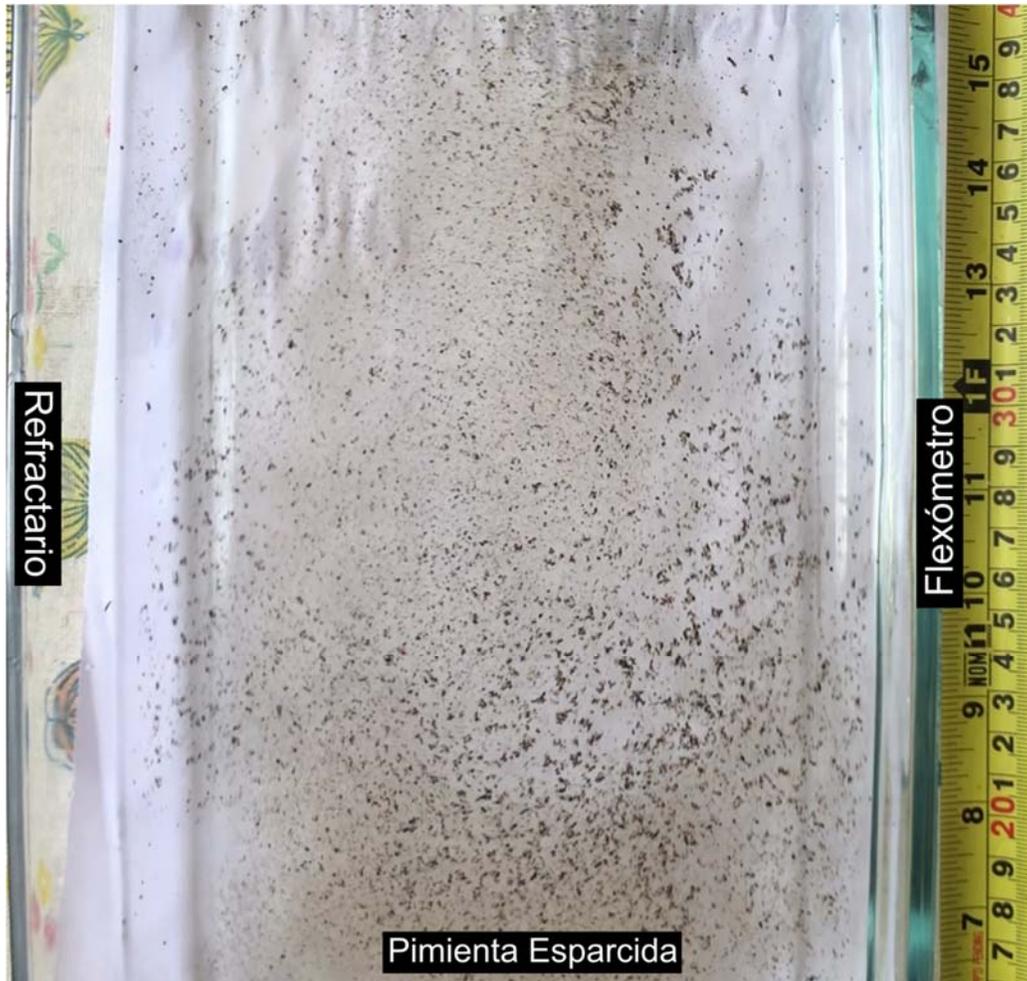


Figura 9. Arreglo experimental (Circulación del aire).

Corriente Somera

Para generar la corriente somera y lenta de agua, se montó un experimento como se muestra en las figuras 10, 11 y 12. Se colocó sobre un vidrio con una cara pintada en blanco puesta boca abajo y una inclinación de $\theta \approx 1$, y se hizo un canal con paredes hechas de plastilina. Se limitó la altura del agua a la profundidad de una moneda que es de 1mm utilizando una esclusa a dicha altura. Luego se hizo pasar la misma de la forma más suave posible sobre el canal con ayuda de un depósito con ancho mayor al del canal desde el cual se derrama.

Para el análisis se utilizó como referencia el ancho de canal que fue de 7.6 cm (Ver figura 11.)

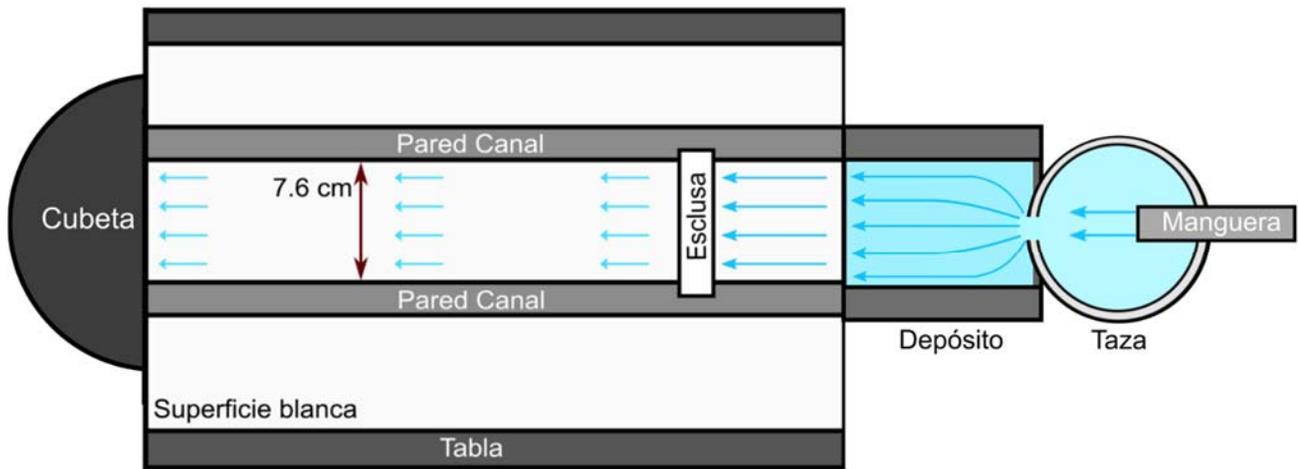


Figura 10. Esquema experimental Canal (Vista Superior).

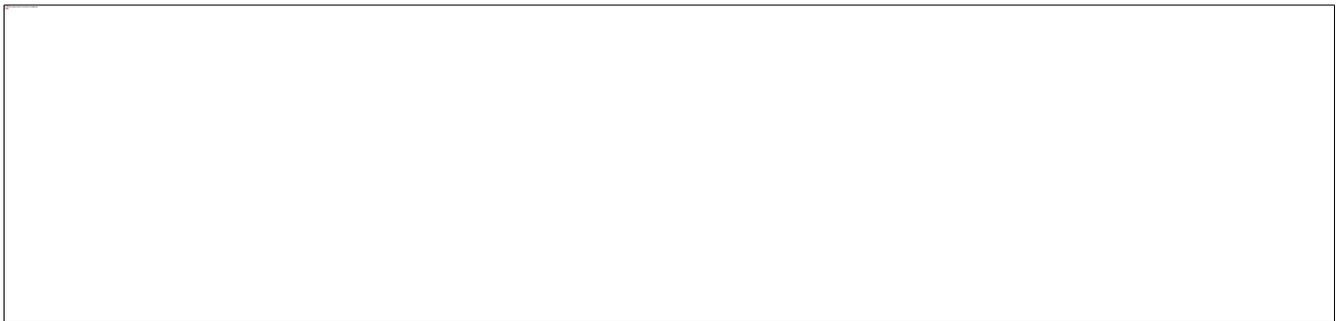


Figura 11. Esquema experimental Canal (Vista lateral).

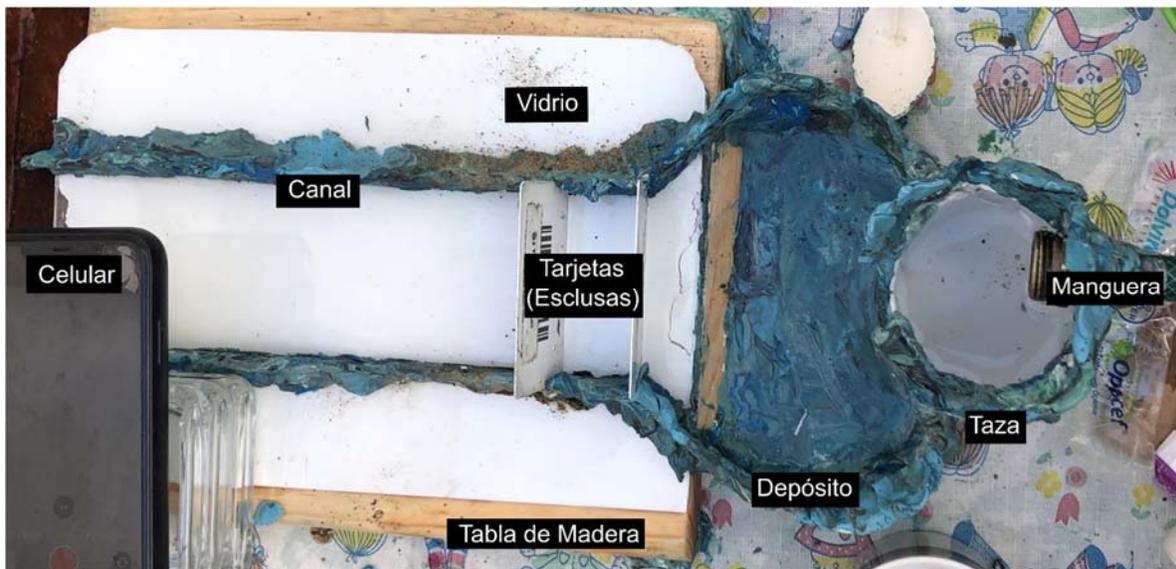


Figura 12. Arreglo Experimental.

En este experimento se utilizó agua a la temperatura ambiente (21°C) (este valor se toma de Weather Spark n.d.) por lo que sus propiedades físicas se pueden aproximar utilizando una tabla de valores como la recopilada por Crittenden et al. 2012, a 20°C por: Densidad $\rho_{\text{H}_2\text{O}}(20^{\circ}\text{C}) = 998.2 \text{ Kg/m}^3$ y viscosidad dinámica $\mu_{\text{H}_2\text{O}}(20^{\circ}\text{C}) = 1.002 \times 10^{-3} \text{ Kg/(m} \cdot \text{s)}$. Estos valores se utilizarán posteriormente para calcular el número de Reynolds del canal.

3 RESULTADOS

Dos fotogramas contiguos del video obtenido para el experimento sobre la circulación del aire son mostrados en la Figura 13, en a) se muestra el primer fotograma, y en b) el segundo.

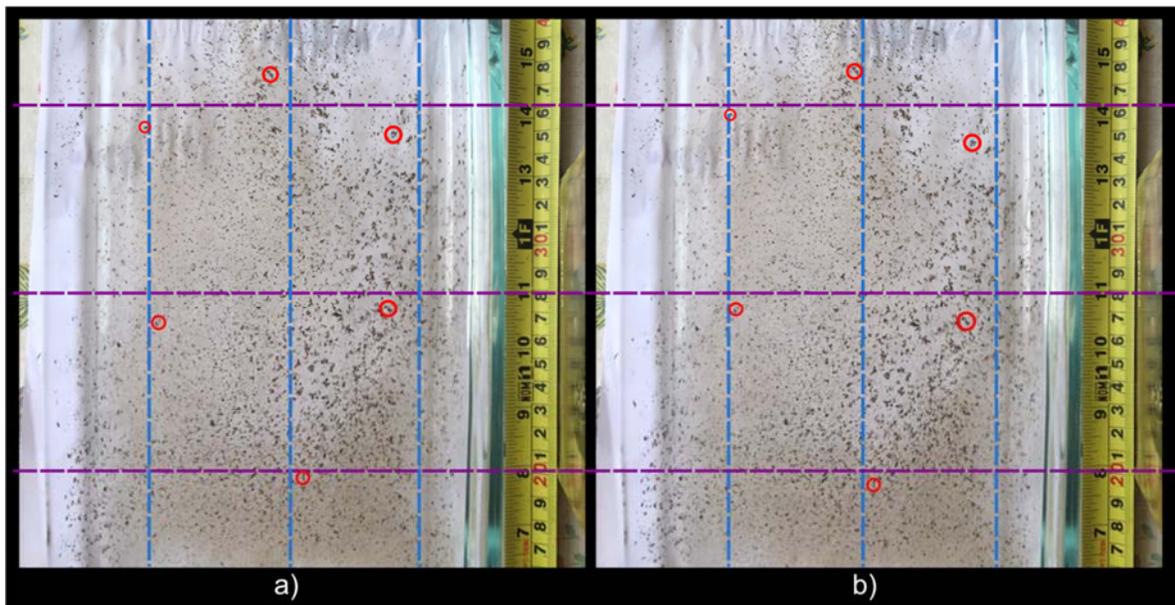


Figura 13. Dos cuadros contiguos, con una separación de 0.16 s obtenidos para del aire recirculante. Con los círculos se siguen las trayectorias de 5 partículas, en referencia al conjunto de líneas verticales y horizontales.

Se pudo observar una rotación con sentido horario en el agua causada por la circulación de aire que mueve su superficie, en donde se ha indicado mediante círculos el movimiento de 6 granos de pimienta. Como las partículas no cambian en este caso, no existe pérdida alguna entre dos cuadros, lo que se traduce en un error pequeño en la correlación.

Mientras que en la figura 14 se muestran dos fotogramas contiguos para el canal construido. En la figura 14 a) se exhibe el primer fotograma, y en b) el segundo.

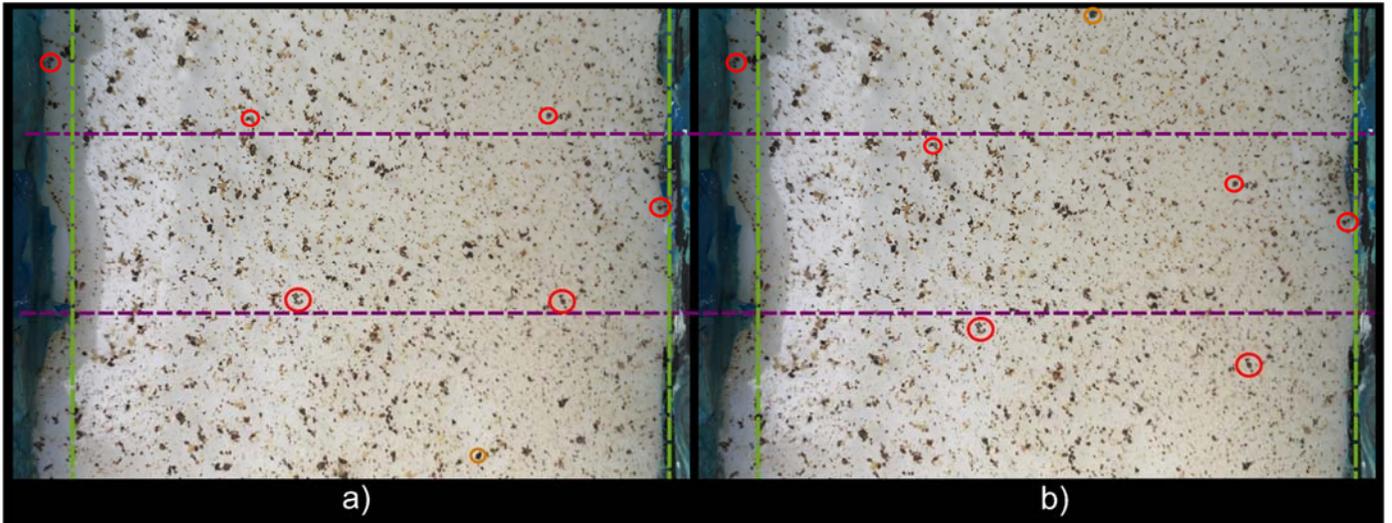


Figura 14. Dos fotogramas contiguos, con una separación de 0.16 s, obtenidos del canal. Con círculos rojos se muestra el movimiento de 6 partículas que aparecen en ambos cuadros, mientras que con los círculos cafés se muestran granos que solo aparecen en uno solo.

Se observa un flujo de arriba hacia abajo en todo el ancho del canal, donde se han marcado con círculos de color rojo 6 granos de pimienta que aparecen en ambos, así como dos granos que solo aparecen en uno de los dos fotogramas con círculos de color café. A diferencia del experimento del aire recirculante, en este sí existe pérdida de partículas entre dos cuadros contiguos, traducido en una mayor cantidad de vectores espurios,

4 ANÁLISIS PIV

Para realizar el análisis se extrajeron los fotogramas de los videos. Este proceso se puede realizar con programas como Adobe Premier Pro (ADOBE® PREMIERE® PRO n.d.), VLC Media Player (VLC - Features - VideoLAN n.d.), Free Video to JPG Converter (Free Video to JPG Converter n.d.), FFmpeg (FFmpeg n.d.), entre otros. En este trabajo se utilizó el reproductor gratuito VLC Media Player para realizar la extracción de fotogramas.

El análisis de PIV se realizó con el programa PIVlab en Matlab 2020^a. Para el análisis de ambos experimentos se utilizaron áreas de interés (ROI por sus siglas en Inglés) cuyo tamaño fue de acuerdo con la escala del experimento, se utilizó el algoritmo de la “Deformación de ventanas por la transformada rápida de Fourier” (“*FFT window deformation*” por su nombre en inglés), comenzando con áreas de interrogación grandes, y tomando 2 pases consecutivos, llegando al 50% del tamaño original.

Después los campos de velocidad de todas las imágenes son filtrados utilizando una gráfica de velocidad horizontal (u) contra velocidad vertical (v) de todos los valores obtenidos. El criterio para eliminar vectores espurios depende del fenómeno físico, por ejemplo si se sabe

que el movimiento es en una sola dirección, todo vector que tenga una dirección opuesta a esta es eliminado o si la magnitud de la velocidad no corresponde con el fenómeno, también es eliminado (Figura 15)

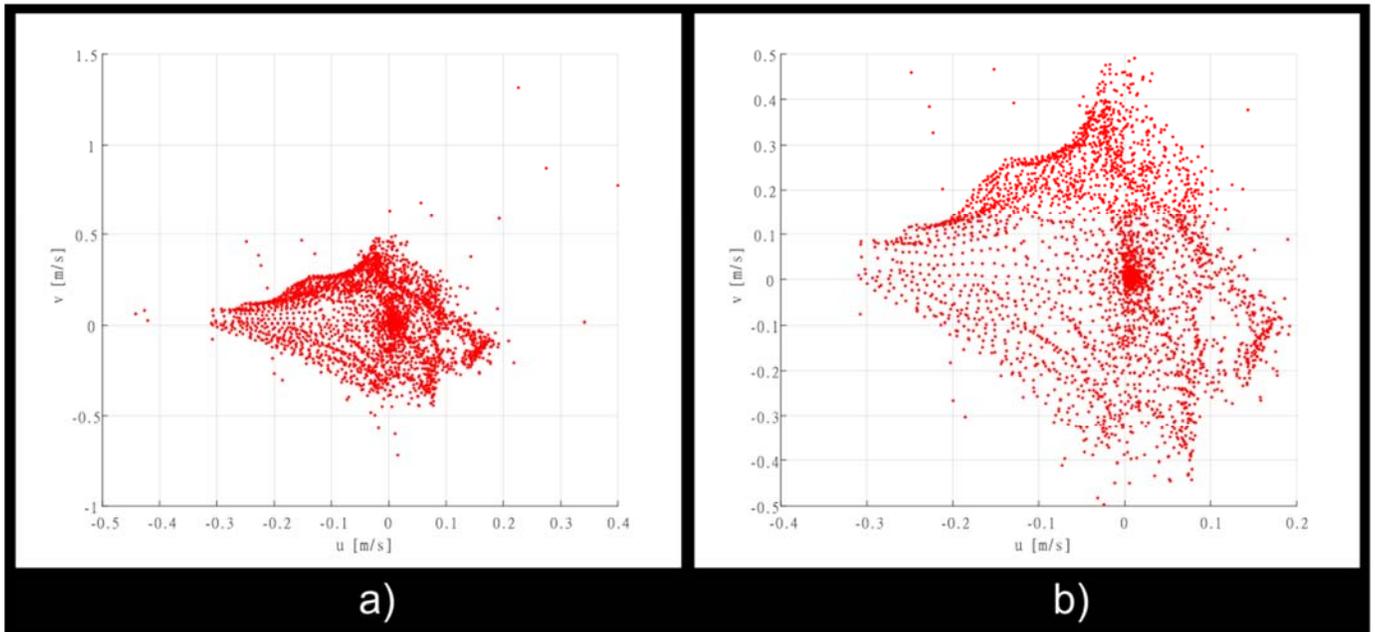


Figura 15: Proceso de filtrado de los vectores espurios. En a) se muestra una gráfica de dispersión de la velocidad horizontal (u) vs la velocidad vertical (v) del fotograma en cuestión sin filtrar. En b) la misma gráfica una vez ejecutado el filtro.

En la Figura 15 a), se observa un intervalo de velocidades llega a ser de 0.5 hasta 0.4 m/s en la componente horizontal (u), y de 0.7 hasta 1.3 m/s en la componente vertical (v). Se eliminaron las velocidades fuera del intervalo -0.5 a 0.5 m/s en la dirección horizontal y en el intervalo -0.4 a 0.2 m/s en la dirección vertical, esto debido a que cualquier valor fuera de esos intervalos no tiene sentido físico de lo que se está observando en las imágenes.

Con este procedimiento se obtuvo un campo de velocidades filtrado para todos los fotogramas. Partiendo del anterior, se calcularon los campos de velocidades promedios de todos los fotogramas, junto con su desviación estándar.

4.1 Análisis del Flujo recirculante

En la Figura 16 se muestra el resultado de un par de fotogramas contiguos del video analizado, en a) se muestra el campo de velocidades sin filtrar vectores espurios y en b) filtrando vectores espurios. La ROI tuvo un área de $814 \times 1084 \text{ pix}$, que se recalca con un rectángulo azul en la Figura mencionada. Se consideró un área de interrogación con tamaño inicial de $64 \times 64 \text{ pix}$ y un solapamiento del 50%. Los vectores interpolados en dicha área los muestra el programa en color naranja.

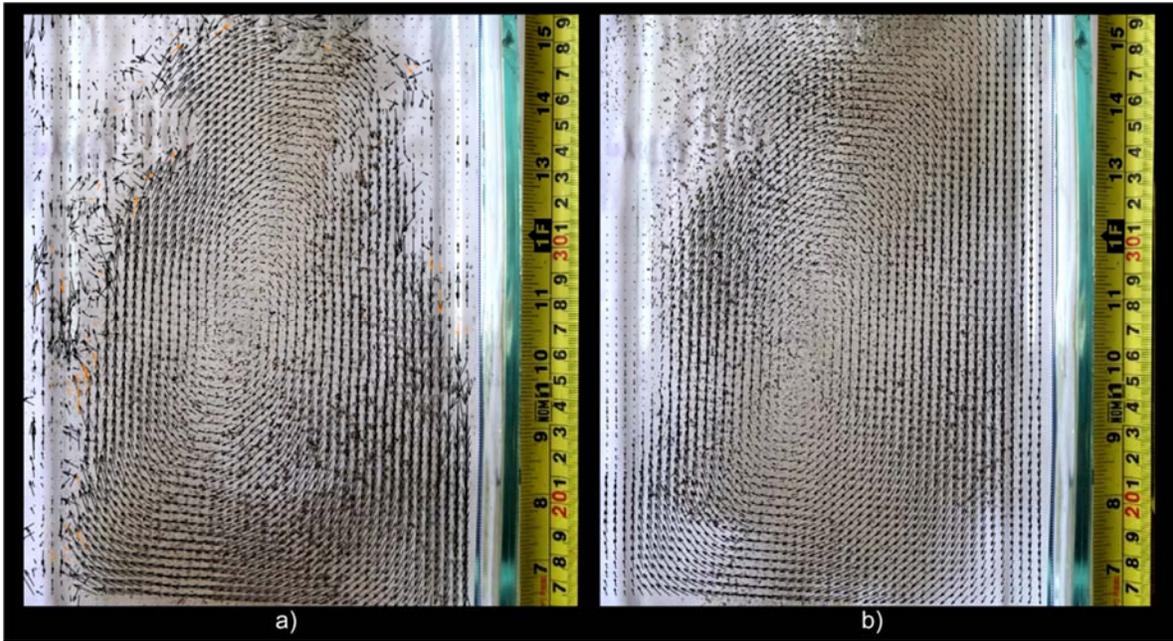


Figura 16. Campo de velocidades del fluido calculado por el programa del fotograma 59, a) sin filtrado, b) con filtrado. Se observa un campo de velocidades del orden de mm/s en un movimiento circulatorio con sentido horario.

En la Figura 16 se tienen vectores que son del orden de $10^{-3} m/s$ que forman un campo vectorial que indica un movimiento circulatorio del fluido en sentido horario, lo cual coincide con lo observado cualitativamente en la Figura 13. Por lo que vectores con tamaños de distintos ordenes de magnitud, así como aquellos que indican una rotación en la dirección contraria fueron descartados con el procedimiento descrito a principios de la sección, para posteriormente obtener el campo de velocidades promedio de todos los fotogramas, así como su desviación estándar. El resultado se muestra en la Figura 17, donde en a) se grafica el campo de velocidades promedio de todos los fotogramas, y en b) la desviación estándar de las mismas.

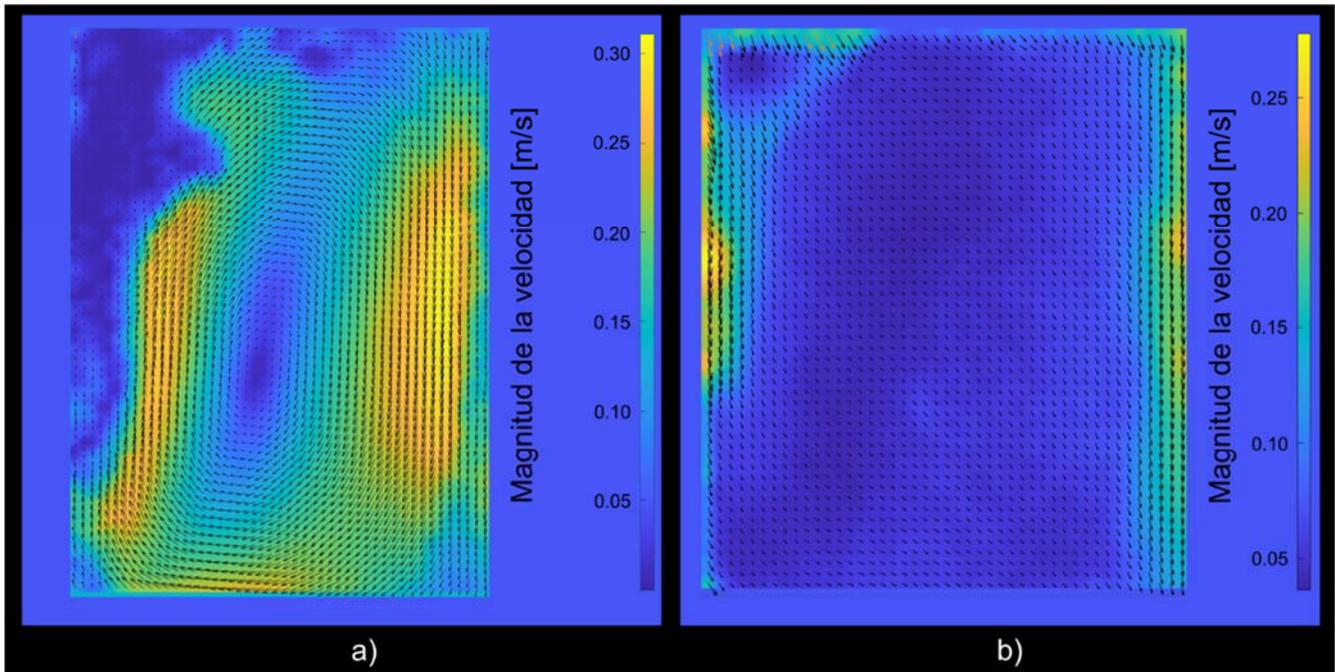


Figura 17. a) Campo de velocidades promedio. b) Desviación estándar. Ambos correspondientes al flujo recirculante.

Se observa, que el promedio de los fotogramas da un campo de velocidades, que al igual que como ocurrió con el fotograma de la Figura 16, es uno con sentido horario. Se observa además que hay zonas dentro del campo (Figura 17 a)) en donde la rapidez es, cuando menos, un orden de magnitud menor al del resto. Esto ocurre en la esquina superior izquierda, así como en una región ovalada en el centro. Y al alejarse esta rapidez aumenta de forma prácticamente simétrica.

En la Figura 17 b) se observa una desviación estándar del orden de $\sim 0.05 \text{ m/s}$ en toda la imagen, debido a que el error de cálculo en la correlación fue pequeño. Sin embargo, crece hasta ser unas 5 veces mayor en los bordes debido a que habían menos trazadores en dichas áreas. Por lo cual, en la parte superior izquierda en la Figura 17 a), el hecho que se tenga una rapidez prácticamente nula es debido a la baja densidad trazadores en varios cuadros.

Es importante señalar que la desviación estándar en este caso se esta asociando como la incertidumbre de las mediciones. Esto se debe a que el análisis completo de incertidumbre es más complejo y sale de los propósitos de este trabajo.

4.2 Análisis del canal de agua somera.

En este caso se tomó una ROI, de $1348 \times 1086 \text{ pix}$. El área de interrogación tuvo un tamaño inicial de $328 \times 328 \text{ pix}$, con un solapamiento del 82% para ejecutar el cálculo.

En la Figura 18 a) se muestra el campo de velocidades obtenidos para un par de fotogramas sin filtrar, donde los vectores espurios se han marcado con regiones rectangulares rojas.

Mientras que en la Figura 19 b) se muestra la misma imagen sin los vectores antes mencionados.

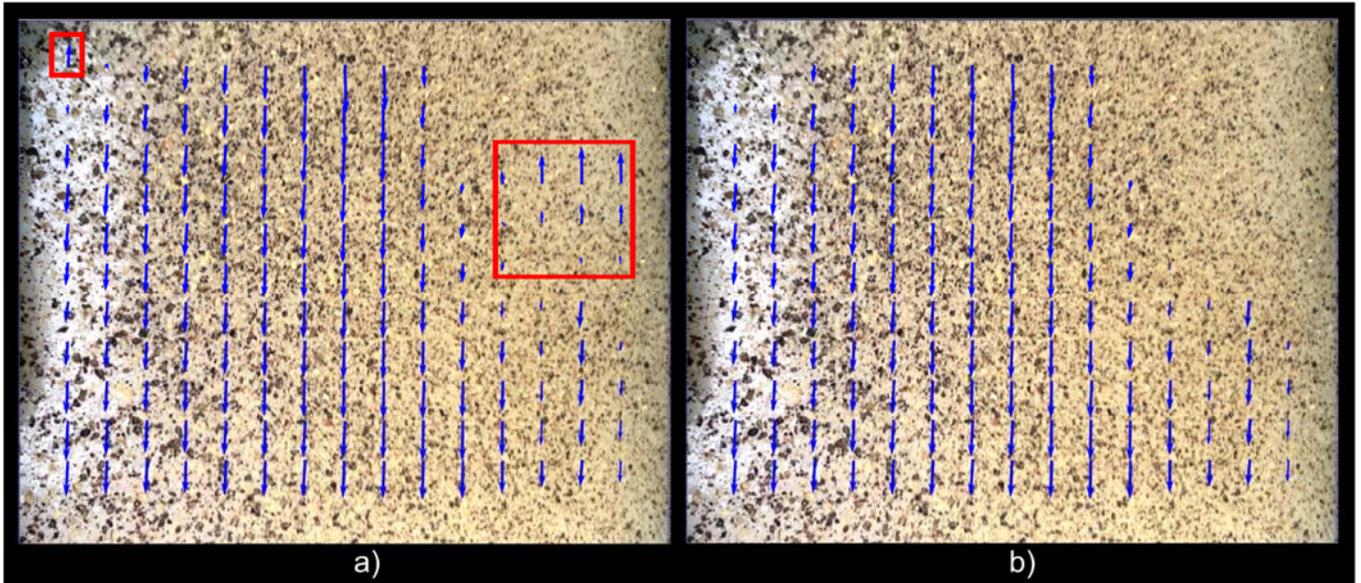


Figura 18. Campo velocidades Fotograma 85 (Video 1).

En la Figura 19 a) se muestra el campo de velocidades y su magnitud promedio de todos los fotogramas. Mientras que en b) se muestra su desviación estándar.

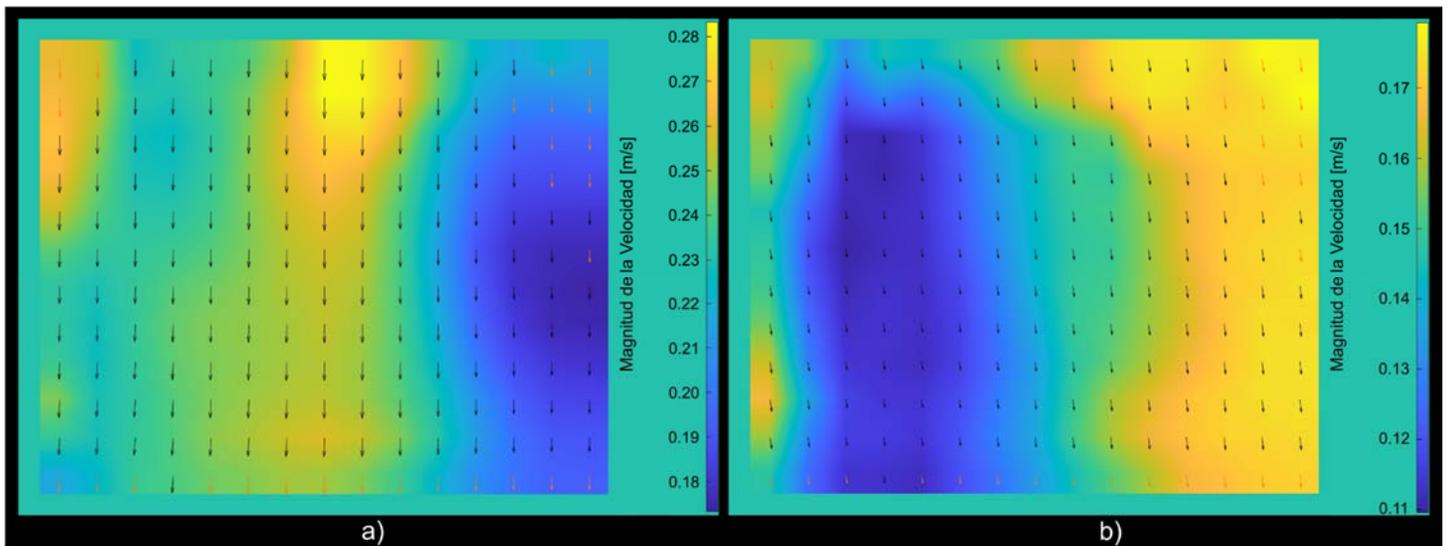


Figura 19. a) Campo de velocidades promedio. b) Desviación estándar. Ambas correspondientes a la primera grabación.

De manera cualitativa en la Figura 18, se observa un campo de velocidades que siguen una trayectoria de arriba hacia abajo y que es un 30% más lento en la parte izquierda. Debido a la condición de adherencia, la rapidez cae de manera abrupta en las paredes. Sin

embargo, debido a la poca presencia de trazadores cerca de las mismas, se tiene una desviación estándar más grande en esas regiones que llega a ser hasta del 80%. Por otro lado, se observan velocidades ligeramente desviadas hacia la izquierda, debido a imperfecciones en las paredes del canal y a que la superficie no estuvo perfectamente horizontal.

Además se analizó una segunda grabación del mismo experimento, pero después de montar y desmontar el experimento. Para la cual la ROI fue de $1367 \times 1087 \text{ pix}$, y se tomó un área de interrogación idéntica al del primer video. El resultado se muestra en la Figura 20, donde nuevamente se grafica en a) el campo de velocidades promedio y en b) la desviación estándar junto con su magnitud.

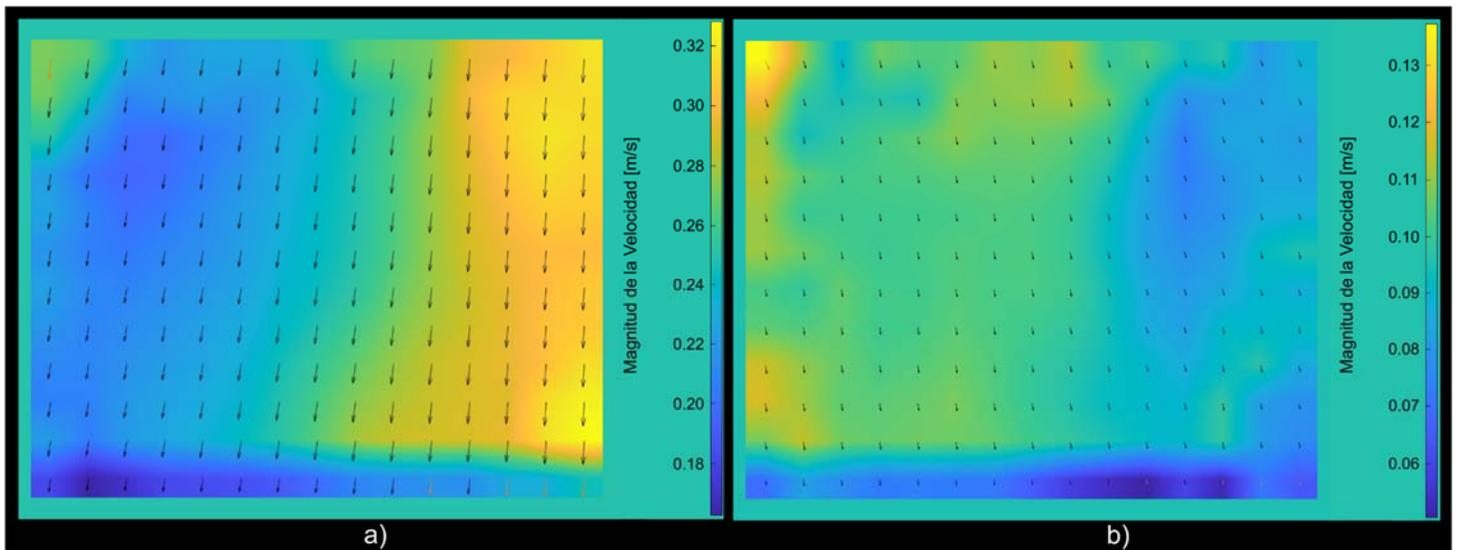


Figura 20. a) Campo de velocidades promedio. b) Desviación estándar. Ambas correspondientes a la segunda grabación.

En la Figura 20 a) se observa un campo de velocidades distinto al de la Figura 19 a). Esto fue debido a que, durante esta grabación, el canal se inclinó más hacia la parte derecha, lo que causó que los trazadores se movieran con una rapidez mayor y con una componente horizontal hacia la izquierda. Esto también se aprecia en la Figura 20 b), con una desviación estándar que tiene un tamaño medio del 40% de la medición, la cual es menor en la parte derecha en la imagen que en la izquierda, a diferencia de la Figura 19 b).

Para tener una mejor comparación de ambos experimentos, se vuelven a graficar las Figuras 19 y 20 en la Figura 21.

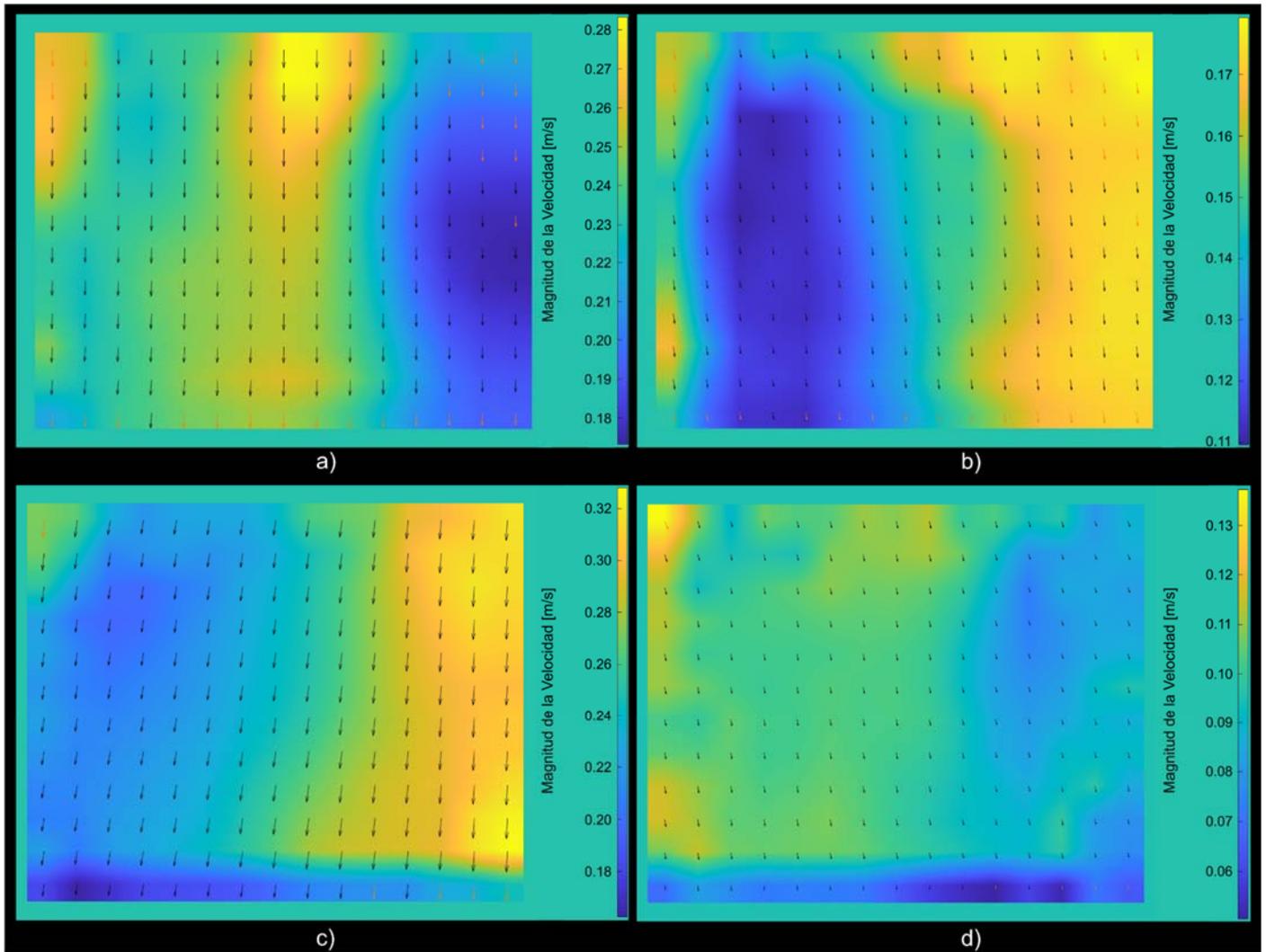


Figura 21. a) Campo promedio del primer video, c) Desviación estándar del primer video.
 b) Campo promedio del segundo video, d) Desviación estándar del segundo video.

A pesar de que los experimentos arrojaron resultados ligeramente distintos, se observa que la dirección de la velocidad es prácticamente la misma en ambos experimentos y que la magnitud de las velocidades es similar en ambos videos. Esto mismo ocurre con la desviación estándar.

Para visualizar mejor lo anterior, se tomó una línea que cruza el ancho del canal, donde en la Figura 22 se indica con una línea segmentada de color morado que cruza en la mitad del fotograma:

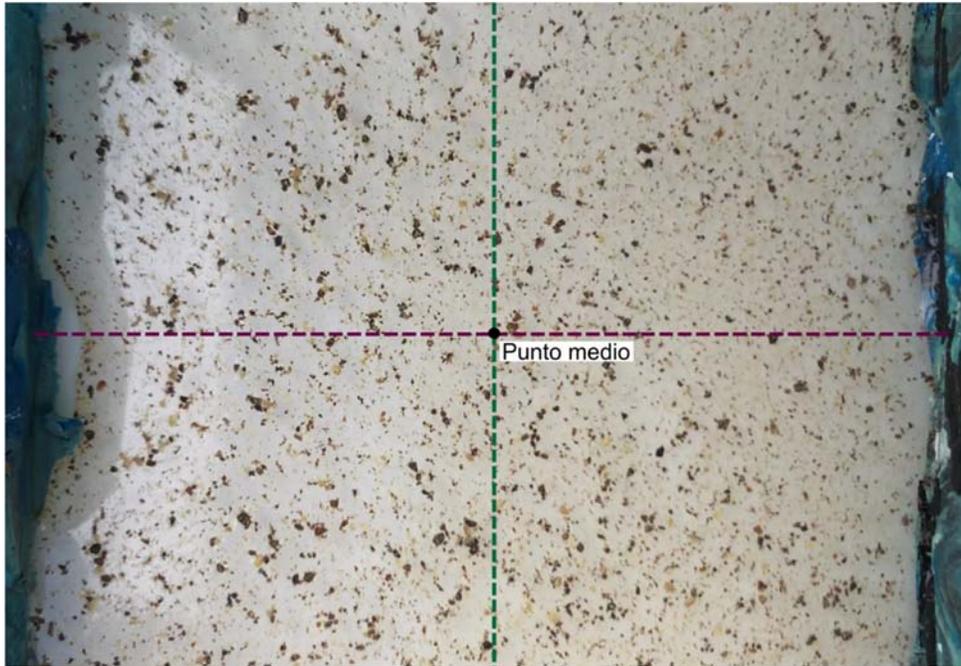


Figura 22. Línea que cruza el ancho del canal (morada), con una longitud de 7.6 cm. Se ha dividido con una línea vertical verde el mismo, marcando con un círculo negro, el punto medio del fotograma.

Con esto en mente, se midió sobre dicha línea la rapidez del flujo a lo largo del canal. En la Figura 23 se muestra en un conjunto de 4 gráficas, donde en a) y c) la rapidez contra la distancia sobre el ancho del canal, para el primer y segundo video respectivamente, mientras que en las figuras b) y d) se grafican la desviación estándar en la rapidez contra la distancia de estos dos videos.

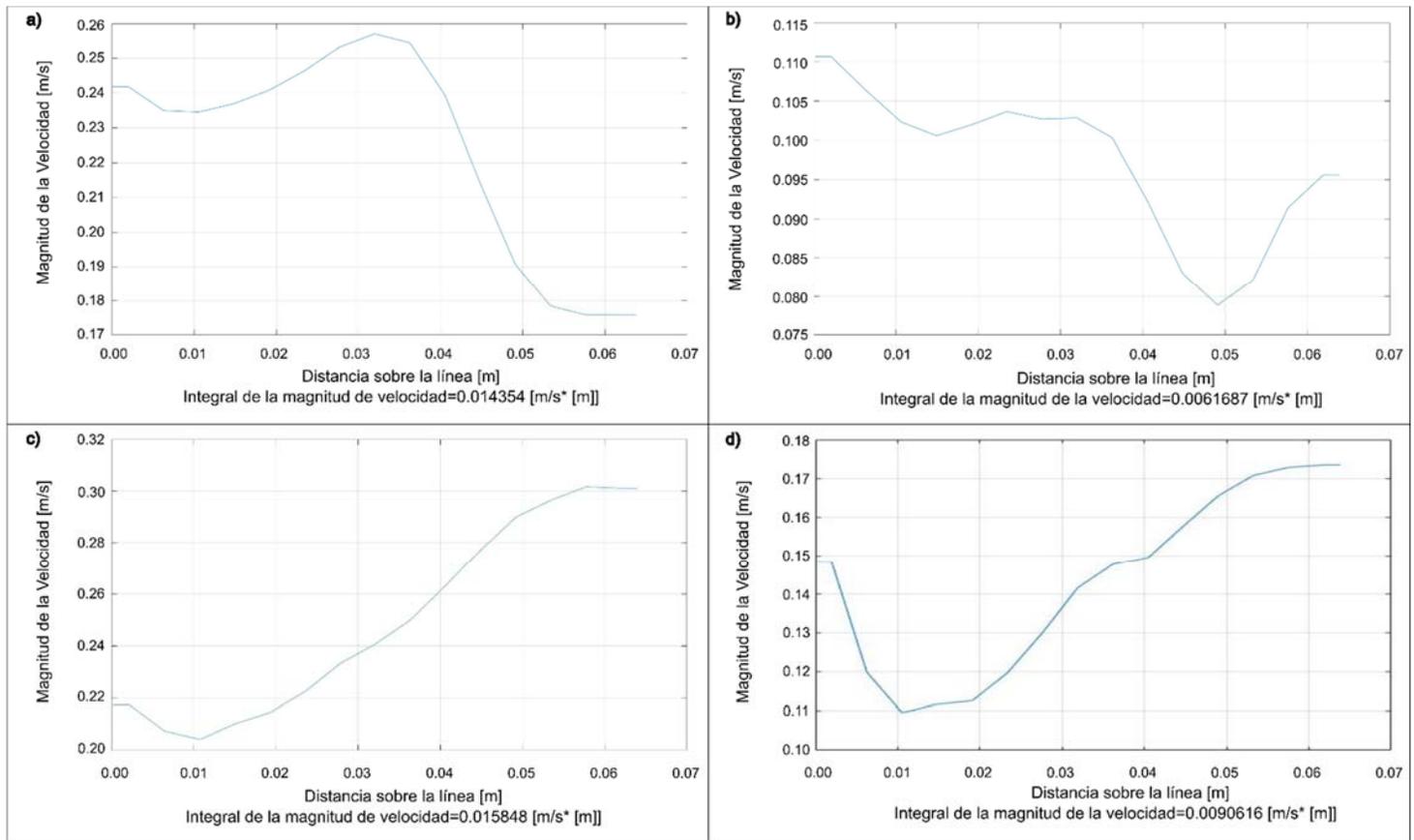


Figura 23. a) y c) Magnitud de la Velocidad vs la distancia sobre el ancho del canal en una línea del primer y segundo video respectivamente. b) y d) Desviación estándar en la Magnitud de la Velocidad vs la distancia sobre el ancho del canal en una línea para dichos videos.

En la Figura 21, en la Figura 23 a) se observa una rapidez que decae en la parte derecha, mientras que en c) se observa de manera contraria, que esta decae en la parte izquierda. La integral en ambas curvas permite comparar la rapidez media en ambos videos, y se observa que, en efecto, la rapidez en el segundo video fue globalmente mayor. Sin embargo, se observa que la rapidez en el punto medio (ver Figura 22), que corresponde al punto 3.3 m en la Figura 23, que la velocidad en dicho punto es prácticamente la misma. Por otro lado, en d) que corresponde al segundo video se observa que la desviación es mayor sobre la línea ya que está en un orden de magnitud mayor al de b) que corresponde al del primer video. Esto debido a los errores discutidos anteriormente. Se puede decir que el experimento es sensible a cambios pequeños en la inclinación de la superficie de vidrio, con lo que se concluye que en este caso no se tiene reproducibilidad.

Se calculó el número de Reynolds para el canal, para así caracterizar analíticamente el tipo de flujo obtenido:

El número de Reynolds se define como (Crittenden et al. 2012b):

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (6)$$

Para un canal abierto de paredes recta, la longitud característica D se define en términos del ancho b y la altura hidráulica h de acuerdo a (Crittenden et al. 2012b):

$$D = \frac{bh}{b + 2h} \quad (7)$$

Y el flujo será laminar si $Re \leq 500$, transicional si $500 < Re < 1000$, y turbulento si $1000 \leq Re$. Para un canal somero, donde $h \ll b$, se puede tomar la aproximación $D = h$. Es decir, la longitud característica es independiente del ancho del canal.

Considerando los valores de ρ, μ dados para el agua, y la profundidad del agua h se tiene el número de Reynolds en función de la rapidez:

$$Re(v) = 996.208v \quad (8)$$

Por lo tanto, para que el flujo sea laminar de acuerdo con la teoría, se requiere $v \leq 0.502 \text{ m/s}$. Para el canal se observó un flujo laminar de forma cualitativa, y de la gráfica, se observa que la rapidez en el punto medio del canal es 0.25 m/s . Por lo cual el flujo tiene un número de Reynolds:

$$Re_{canal} = 249$$

Este valor es menor a 500, que comprueba analíticamente que el canal tuvo un flujo laminar, que fue el observado durante el experimento (Figuras 14, 20 y 21).

5 DISCUSIÓN

En ambos experimentos se pueden probar distintos trazadores para así observar que tan fiel es su comportamiento y así proporcionar intuición a cerca de las implicación que acarrea una mala selección de trazadores.. También se puede introducir un objeto como obstáculo dentro del flujo para ver cómo afecta su comportamiento en los dos arreglos experimentales y así poder tener nuevos fenómenos de estudio.

Para el flujo recirculante se puede considerar un recipiente con forma cilíndrica o utilizar diferentes dispositivos para generar una corriente de aire como puede ser una secadora para el cabello, un abanico, soplando aire con un popote o cualquier otro medio que genere una corriente de aire.

Para el canal, se puede utilizar como alternativa al montaje mostrado en la Figura 12, uno como el que se muestra en la Figura 23, en la cual la taza se coloca dentro del depósito y éste puede estar hecho de otro material, como por ejemplo un recipiente de cocina, para que de esta forma se eviten fugas. Además, para evitar imperfecciones del canal se puede utilizar un material que sea recto y sirva como paredes.

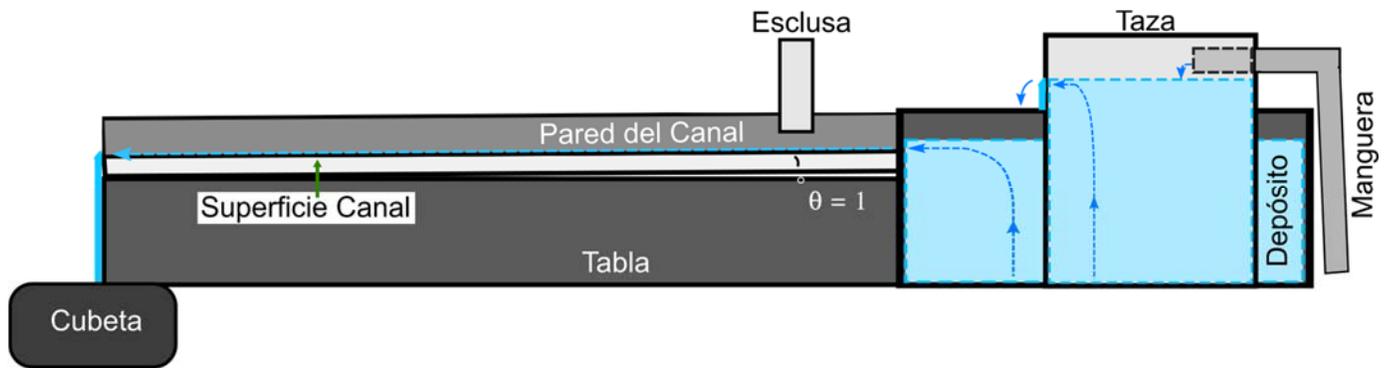


Figura 23: Esquema experimental alternativo para el canal.

Una vez que se haya caracterizado el canal, al medir la velocidad a la mitad de este para así obtener su número de Reynolds, se puede torcer con ayuda de plastilina para formar un río que tenga paredes irregulares y un paso que ya no sea recto y/o con obstáculos, para así ver circulaciones, estancamientos, efectos de bordes, entre otros fenómenos y así entender cómo afecta el paso del agua somera. Esto permite estudiar los ríos someros sobre una superficie regular, así como mejorar el diseño de canales de esta naturaleza.

5.1 Ventajas y aplicaciones de la técnica:

Se observa que la técnica presenta varias ventajas.

1. La primera ventaja es que permite medir el campo de velocidades (magnitud y dirección) en un área de interés simultáneamente, a diferencia de otras técnicas como LDA, la técnica de hilo caliente o con sondas de presión ya que estas solo pueden medir de manera local.
2. Cuenta con una alta resolución temporal gracias al avance tecnológico en cuanto a láseres y cámaras con frecuencias de grabación cada vez más alta y que cada vez son más accesibles para el público en general.
3. También se puede contar con una alta resolución espacial para así tener una cantidad mayor de detalles en el comportamiento del flujo.
4. La técnica se puede extender a estudio de volúmenes y actualmente se pueden obtener las 3 componentes de la velocidad (Cavazzini 2012, Christensen 2008 o Dabiri 2006).

Debido a estas ventajas, la técnica se puede aplicar para estudiar un gran conjunto de fenómenos físicos.

- Flujos líquidos o gaseosos que sean no estacionarios, que ocurren en la mayoría de los fenómenos reales.
- Flujos turbulentos, como es el escape de un gas en una chimenea, ríos, tuberías, la respiración de una persona, etc.
- Conocer a detalle el desplazamiento en el agua por peces, medusas, pulpos, submarinos, barcos, entre otros.
- Conocer el desplazamiento en el aire llevado a cabo por aves, insectos, aviones, helicópteros, globos, etc.

6 CONCLUSIONES

Se logró implementar de manera casera la técnica PIV con materiales caseros, que son fáciles de conseguir, se introduce al lector a los principios básicos de la técnica y se dan ejemplos de aplicación.

Además se proponen dos experimentos que pueden servir para ejemplificar otro tipo de fenómenos, la dificultad de estos dependerá del estudio que se quiera realizar.

Este trabajo puede servir como puente introductorio al PIV.

Se recomiendan los siguientes textos para profundizar en el tema: (Christensen 2008), (Cavazzini 2012) y (Dabiri 2006).

Los resultados obtenidos parecen tener una incertidumbre grande, sin embargo esto se debe a la forma de realizar los experimentos y se puede corregir fácilmente teniendo cuidado en los arreglos experimentales.

Como un trabajo a futuro, se replicarán ambos experimentos mejorando el montaje para conseguir resultados con una desviación estándar más pequeña. Además de utilizar la técnica con el propósito de medir otros tipos de flujos.

7 REFERENCIAS

ADOBE® PREMIERE® PRO.

“Apple iPhone 8 - Características y Especificaciones.”
<https://www.devicespecifications.com/es/model/d85c45ac> (February 19, 2021).

Arjonilla, Carlos Echeverría. 2013. “Velocimetría Por Imágenes de Partículas de Un Flujo Supersónico.Pdf.” Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
http://oreon.dgbiblio.unam.mx/F/KMI84SSC1C4ABHENK46SABUFAYETHRL9Q36PYIEDPE2E1TL67A-44475?func=full-set-set&set_number=007735&set_entry=000003&format=999.

Arjonilla, Carlos Echeverría. 2015. “IMPLEMENTACIÓN DE LA TÉCNICA VELOCIMETRÍA POR SOMBRAS DE PARTÍCULAS (PSV) PARA EL ESTUDIO DE LAS INTERFACES DE UN FLUJO SUPERSÓNICO.” : 51.
http://oreon.dgbiblio.unam.mx/F/KMI84SSC1C4ABHENK46SABUFAYETHRL9Q36PYIEDPE2E1TL67A-51995?func=full-set-set&set_number=008019&set_entry=000002&format=999.

Ben-Gida, Hadar, Roi Gurka, and Alex Liberzon. 2020. “OpenPIV-MATLAB — An Open-Source Software for Particle Image Velocimetry; Test Case: Birds’ Aerodynamics.” *SoftwareX* 12. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100585> (February 21, 2021).

Cavazzini, Giovanna. 2012. The Particle Image Velocimetry - Characteristics, Limits and Possible Applications *The Particle Image Velocimetry - Characteristics, Limits and Possible Applications*.

Christensen, Kenneth T. 2008. 46 *AIAA Journal Review of Particle Image Velocimetry: A Practical Guide, Second Edition*.

Crittenden, John C. et al. 2012a. “Appendix C: Physical Properties of Water.” In *MWH’s Water Treatment*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1861–62. <http://doi.wiley.com/10.1002/9781118131473.app3> (February 19, 2021).

- . 2012b. *MWH's Water Treatment: Principles and Design: Third Edition MWH's Water Treatment: Principles and Design: Third Edition*. John Wiley and Sons.
- Dabiri, Dana. 2006. "Cross-Correlation Digital Particle Image Velocimetry-A Review." *Department of Aeronautics & Astronautics Box 352400 University of Washington*: 1–54.
- Eckert, Sven, Andreas Cramer, and Gunter Gerbeth. 2007. "Velocity Measurement Techniques for Liquid Metal Flows." *Fluid Mechanics and its Applications* 80: 275–94.
- "FFmpeg." <https://ffmpeg.org/> (February 21, 2021).
- "Free Video to JPG Converter 5.0.92.607 Para Windows - Descargar." <https://free-video-to-jpg-converter.uptodown.com/windows> (February 21, 2021).
- de Gennes P, Brochard-Wyart F, Quéré D. 2002. *Capillarity and Wetting Phenomena*. First. Paris: Springer.
- "GIMP Descargas, Tutoriales y Foros. Alternativa a Photoshop Gratis y Libre." <http://www.gimp.org.es/> (February 16, 2021).
- "Gpiv Home Page." <http://gpiv.sourceforge.net/> (February 19, 2021).
- "ImageJ." <https://imagej.nih.gov/ij/> (February 19, 2021).
- "MATLAB - MathWorks - MATLAB & Simulink." <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (February 19, 2021).
- NORMA PARA PIMIENTAS NEGRA, BLANCA Y VERDE (PIMIENTAS NBV)*.
- "PIV (Particle Image Velocimetry) --- ImageJ Plugin - ImageJ Plugins by Qingzong TSENG." <https://sites.google.com/site/qingzongtseng/piv#publications> (February 21, 2021).
- PivTec PivView Version 1.7 User Manual*. 2001. <http://home.wxs.nl/~flvdberg> (February 21, 2021).
- "Software de Edición de Fotos, Imágenes y Diseño | Comprar Adobe Photoshop." <https://www.adobe.com/mx/products/photoshop.html> (February 19, 2021).
- Thielicke, William, and Eize J. Stamhuis. 2014. "PIVlab – Towards User-Friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB." *Journal of Open Research Software* 2(1). <http://openresearchsoftware.metajnl.com/articles/10.5334/jors.bl/> (February 21, 2021).
- "Tiempo Promedio En Enero En Ciudad de México, México - Weather Spark." <https://es.weatherspark.com/m/5674/1/Tiempo-promedio-en-enero-en-Ciudad-de-México-México#Sections-Temperature> (February 19, 2021).
- "VLC - Features - VideoLAN." <https://www.videolan.org/vlc/features.html> (February 21, 2021).