



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**IMPLEMENTACIÓN DE LSPIV PARA ESTUDIAR EL
FLUJO DE UNA SUPERFICIE LIBRE**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

FÍSICO

P R E S E N T A :

JESÚS GUILLERMO BARBOLLA ORTIZ



**DIRECTOR DE TESIS:
DRA. CATALINA ELIZABETH STERN
FORGACH
CDMX
2024**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales

Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

1.Datos del alumno

Apellido paterno

Apellido materno

Nombre(s)

Teléfono

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Carrera

Número de cuenta

2. Datos del tutor

Grado

Nombre(s)

Apellido paterno

Apellido materno

3. Datos del sinodal 1

Grado

Nombre(s)

Apellido paterno

Apellido materno

4. Datos del sinodal 2

Grado

Nombre(s)

Apellido paterno

Apellido materno

5. Datos del sinodal 3

Grado

Nombre(s)

Apellido paterno

Apellido materno

6. Datos del sinodal 4

Grado

Nombre(s)

Apellido paterno

Apellido materno

7. Datos del trabajo escrito

Título

Número de páginas

Año

1.Datos del alumno

Barbolla

Ortiz

Jesús Guillermo

55 12 85 41 97

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Física

311072437

2. Datos del tutor

Dra.

Catalina Elizabeth

Stern

Forgach

3. Datos del sinodal 1

Dr.

Gabriel

Ascanio

Gasca

4. Datos del sinodal 2

Dra.

Reyna Guadalupe

Ramírez

De la Torre

5. Datos del sinodal 3

Dr.

Edgar Gerardo

Mendoza

Baldwin

6. Datos del sinodal 4

Dra.

Ana Karina

Ramos

Musalem

7. Datos del trabajo escrito

Implementación de LSPIV para estudiar el flujo en una superficie libre

100

2024

Agradecimientos.

Ha sido un largo camino para llegar a la publicación del presente trabajo, desde pandemias, temblores, movimientos estudiantiles, etc. Sin embargo, hoy me gustaría agradecer a las personas que me dieron su apoyo y su confianza para superarme para llegar hasta aquí a pesar de todo lo sucedido desde que ingrese en la carrera.

En primer lugar, quisiera agradecer a mi asesora principal la Dra. Catalina Elizabeth Stern Forgach, que desde que tome clases con ella en los primeros semestres me imprimió su pasión por la Física del deporte y la Física de fluidos, entusiasmo por la cual el presente trabajo se desarrolla en esta rama. Agradezco su paciencia y su determinación al aceptar este trabajo que en su momento parecía algo complejo y sus aportes a lo largo de este.

Así mismo, quisiera agradecer al Dr. Carlos Echeverría Arjonilla y al Dr. David Porta Zepeda que sin el apoyo e inspiración de ellos tanto en la parte teórica como experimental este trabajo no hubiera sido posible realizarlo. Agradezco todo el tiempo que invirtieron en ayudarme en el montaje experimental y el análisis de los datos. También agradezco que fueran un soporte en todo mi desarrollo profesional dándome seguridad y confianza a lo largo de la carrera, sin ellos no hubiera llegado hasta aquí.

Agradezco así mismo a la Dra. Reyna Guadalupe Ramírez de la Torre con su orientación experta y apoyo constante a lo largo del presente trabajo y de su soporte moral durante este proceso.

Quiero agradecer a mi familia, que me han brindado un apoyo incondicional en todo este proceso. Me gustaría agradecer toda la comprensión emocional, paciencia, y cariño que han brindado a través de todos estos años, no ha sido un camino corto ni sencillo, pero si no fuera por ellos no habría llegado hasta aquí, por lo cual este trabajo es dedicado a todos ustedes.

También me gustaría agradecer a todos los amigas y amigos que me han acompañado durante todo este camino universitario. Agradezco su ayuda en los buenos y en los malos momentos y por no dejarme hundirme en ellos. Así mismo también agradecer a todos los compañeros que han pasado por el Taller de Hidrodinámica y Turbulencia que he conocido, que me han aportado y acompañado algo en mi día a día.

Por último, me gustaría agradecer a mi abuela Gregoria y a mi hermana Aline que actualmente no se encuentran con nosotros, pero su recuerdo siempre quedara en este logro.

Índice

1	Motivación	2
2	Introducción	3
2.1	Antecedentes PIV	3
2.1.1	Características del PIV	3
2.1.2	Principios de la técnica PIV	4
2.2	Antecedentes LSPIV	7
2.2.1	Características del LSPIV	8
2.2.2	Preprocesamiento de las imágenes en el LSPIV	10
2.3	Chorro axisimétrico	14
3	Objetivo	17
4	Montaje experimental.....	18
4.1	Características generales del dispositivo.	18
4.2	Corte transversal vertical de la tobera.	22
4.2.1	Montaje experimental para el corte vertical	22
4.2.2	Procesamiento de las imágenes y configuración del PIV.	24
4.2.3	Procesamiento de los datos.....	25
4.3	Corte lateral horizontal	26
4.3.1	Montaje experimental para el corte horizontal	26
4.3.2	Procesamiento de imágenes y configuración del PIV.	29
4.3.3	Procesamiento de datos.	30
4.4	Toma superficial	31
4.4.1	Montaje para la toma superficial	31
4.4.2	Preprocesamiento de las imágenes.	33
4.4.3	Configuración del LSPIV	33
4.4.4	Procesamiento de datos.	34
4.5	Combinación de las tomas de PIV y LSPIV.....	35
5	Resultados y discusión	36
5.1	PIV obtenido en el corte lateral vertical (Plano XZ).....	36
5.2	PIV del corte lateral horizontal.....	44

5.3	Resultados LSPIV superficial.....	50
5.4	Comparación de los tres perfiles obtenidos.....	57
6	Conclusiones y trabajo a futuro.....	67
7	Referencias	68
8	Apéndice.....	70
8.1	Código filtro PIV-Vertical.....	70
8.2	Código filtro PIV-Horizontal	74
8.3	Código filtro LSPIV	79
8.4	Código graficador de las 3 grabaciones.....	83

Índice de figuras

Figura 1: Diagrama representativo de las áreas de interrogación y el área de búsqueda, así como del eje óptico ortogonal al plano de estudio. _____	5
Figura 2: Esquema algorítmico general del PIV, en el procesado de las imágenes. _____	7
Figura 3: Diagrama conceptual del proceso de las técnicas PIV y LSPIV _____	9
Figura 4: Diagrama de la Ortorectificación por Proyección. _____	11
Figura 5: Esquema del proceso para garantizar la ortorectificación de las imágenes. ____	12
Figura 6: Ejemplo de estructura observable en la superficie de un flujo. _____	12
Figura 7: (a) Diagrama ejemplo de la reflexión especular de la luz. (b) Diagrama ejemplo de la reflexión difusa de la luz. _____	13
Figura 8: Se muestra dos ejemplos de puntos de luz enfocada en una interfaz de agua provocada por el flujo de la interfaz. _____	14
Figura 9: Esquema secuencial del proceso a seguir para medir con LSPIV. _____	14
Figura 10: Esquema de un chorro axisimétrico con sus tres regiones. _____	15
Figura 11: Diagrama de las dimensiones de las peceras usadas en el sistema general. Se observa el sistema de referencia del montaje. _____	18
Figura 12: Diagrama lateral de las dos peceras con las dimensiones de los componentes (plano xz). _____	19
Figura 13: Diagrama de posición del piso falso dentro de las dos peceras y la vista en el plano XY de donde se colocan los soportes. _____	19
Figura 14: Diagrama del soporte para la tobera. _____	20
Figura 15: a) Diagrama del arreglo experimental general en el plano XZ con la manguera montada junto con sus distancias entre componentes. b) Diagrama del plano XY junto con las distancias a los componentes. _____	21
Figura 16: Fotografía superficial del sistema experimental general. _____	22
Figura 17: Diagrama del en el plano XY del montaje experimental, junto con las distancias tomadas para el experimento y con la posición de la cámara. _____	23
Figura 18: Diagrama del sistema experimental en el plano XZ. _____	24
Figura 19: Esquema de las líneas de estudio de datos y sus distancias respecto a la boquilla de la tobera en el corte vertical. _____	26
Figura 20: Diagrama del corte XZ del sistema experimental usado para el montaje del espejo. _____	27
Figura 21: Diagrama del soporte fabricado por la impresora 3D. _____	28
Figura 22: Diagrama de la vista del plano XY del montaje experimental y se muestra la zona de grabación. _____	29
Figura 23: Esquema de las líneas de estudio de datos y sus distancias respecto a la boquilla de la tobera en el corte horizontal. _____	30
Figura 24: Diagrama del sistema experimental en el corte XZ para obtener las imágenes de las estructuras formadas en la superficie del agua. _____	31

Figura 25: Diagrama del plano XY donde se marcan los puntos de referencia para la calibración, así como su distancia entre ellos.	32
Figura 26: (a) Fotografía de los puntos de referencia sin rectificar. (b) Fotografía de los puntos de referencia ya rectificados.	33
Figura 27 Esquema de las líneas de estudio de datos y sus distancias respecto a la boquilla de la tobera en el corte superficial.	35
Figura 28: Promedio temporal del jet de agua producido por la tobera en el plano XZ obtenido de la técnica PIV tradicional.	37
Figura 29: Gráfica del plano XZ de las velocidades U con respecto de X con su desviación estándar en la línea más cercana a la superficie del agua con la técnica PIV tradicional.	38
Figura 30: Gráfica del plano XZ con las velocidades U respecto del X en la línea que parte del centro de la tobera, junto a sus desviaciones estándar. Medidas con la técnica PIV tradicional.	39
Figura 31: Gráfica correspondiente al plano XZ con las velocidades U respecto a su posición X en la línea inferior de la boquilla de la tobera. Se obtuvo con el PIV tradicional.	40
Figura 32: Gráfica comparativa de las tres líneas de velocidades U respecto a X obtenidas con el PIV tradicional.	41
Figura 33: Gráfica comparativa de las tres líneas de velocidades U respecto a X obtenidas con el PIV tradicional a partir de los 10 diámetros de recorrido.	42
Figura 34: Gráfica de las velocidades en U respecto a tres posiciones diferentes en Z tomadas con la técnica PIV tradicional. La primera la (azul) es lo más pegada a la boquilla, la segunda (amarilla) a media distancia desde la boquilla y la tercera (roja) con el flujo se desarrolló.	43
Figura 35: Promedio temporal del jet de agua producido por la tobera en el plano XY obtenido con la PIV tradicional.	44
Figura 36: Gráfica de las velocidades U en la dirección X de la toma lateral horizontal medida con la técnica PIV tradicional. La grafica corresponde a la línea superior de la toma.	45
Figura 37: Gráfica de las velocidades U en la dirección X de la toma lateral horizontal medidas PIV tradicional. La grafica corresponde a la línea del centro de la tobera.	46
Figura 38: Gráfica de las velocidades U en la dirección X de la toma lateral horizontal medida con PIV tradicional. La grafica corresponde a la línea del inferior de la tobera.	47
Figura 39: Gráfica que muestra las velocidades promedio U en comparación de su posición en X.	48
Figura 40: Gráfica del corte lateral de las velocidades U con los límites puestos a partir de los 10 diámetros de distancia respecto a la tobera.	48
Figura 41: Gráfica de las velocidades en U respecto a tres posiciones diferentes en Y. La primera es la más pegada a la salida de la boquilla (azul), la segunda a 10 diámetros de distancia (amarilla) y a 20 diámetros de distancia (roja).	49
Figura 42: a) Fotografía con la hoja de puntos de referencia antes del procesamiento. b) Misma fotografía ortorectificada por proyección.	50

Figura 43: (a) Fotografía de las estructuras superficiales (b) Campo de velocidades promedio filtrado y medido con LSPIV en el plano XY al solo considerar el movimiento del jet. (c) Campo escalar de velocidades obtenido del LSPIV en la superficie en el plano XY. _____	50
Figura 44: Esquema de la localización de las líneas de medición de la velocidad U respecto a X en la superficie. _____	51
Figura 45: Gráfica de las velocidades U contra su posición X en el lateral izquierdo de la tobera, obtenida con LSPIV. _____	52
Figura 46: Gráfica de las velocidades U contra su posición X en el centro de la tobera, medidas con la técnica LSPIV. _____	53
Figura 47: Gráfica de las velocidades U contra su posición X en el lateral derecho de la tobera medida con la técnica LSPIV. _____	53
Figura 48: Gráfica de las velocidades U contra su posición en X de las tres líneas de estudio medido con la técnica LSPIV. _____	54
Figura 49: Gráfica de la velocidad en U respecto a su posición en X entre los 5 y 30 diámetros de recorrido medida con LSPIV. _____	55
Figura 50: Gráficas de la velocidad U respecto su posición en Y obtenidas analizando las estructuras de la superficie con LSPIV y las respectivas líneas que corresponden. _____	56
Figura 51: Comparación de los promedios temporales de los dos cortes del flujo. La imagen superior es el corte vertical y la inferior es el corte horizontal medidos con la técnica PIV tradicional. _____	57
Figura 52: Velocidades U medidas del centro corte horizontal (amarillo) y vertical (azul), medidos con PIV tradicional. _____	58
Figura 53: Promedios temporales de la velocidad en la toma horizontal medida con el PIV tradicional y la segunda la toma superficial con la técnica LSPIV. _____	59
Figura 54: Velocidades U respecto al centro de la tobera del corte horizontal (amarilla) medido con PIV tradicional y las medias con LSPIV en la superficie (rojas). _____	60
Figura 55: (a) Promedio temporal de las magnitudes medidas en el corte vertical medido con PIV tradicional, con la línea de comparación entre ambas. (b) Promedio temporal de la velocidad en la superficie medida con la técnica LSPIV sin filtrar las velocidades. (c) Promedios temporales de las velocidades superficiales filtradas. _____	61
Figura 56: Velocidades U del corte vertical medidas con el PIV tradicional (azul) y las medidas en la superficie con LSPIV (rojo). _____	62
Figura 57: Gráfica de las velocidades U en el centro de la tobera de las tres tomas, vertical (azul), horizontal (amarillo) y superficial (rojo) contra su dirección en X. _____	63
Figura 58: (a) Fotografía superficial, se muestran las áreas medidas en los diferentes experimentos realizados. (b) Área de intersección de los tres experimentos donde se pueden comparar las velocidades medidas. _____	64
Figura 59: Gráfica de las velocidades U con respecto X medido desde el centro en las tres tomas obtenidas con PIV tradicional como son la vertical (azul) horizontal (amarilla) y las medidas con LSPIV en la superficie (roja) en la zona donde se interceptan. _____	65

Figura 60: Gráfica en la región del flujo desarrollado de 15 a 22 diámetros de distancia. Se ven las velocidades U medidas con PIV tradicional en el caso vertical (azul), horizontal (amarillo) y con el LSPIV en la superficie (roja). _____ 66

Resumen

El objetivo de este trabajo es la implementación, para un caso específico, de una técnica de medición de velocidades de un flujo de agua en la que se aprovechan las deformaciones naturales de la superficie libre para medir las velocidades en la superficie de un flujo llamada Velocimetría por Imágenes de Partículas a Grandes Escalas, LSPIV por sus siglas en inglés.

Se montó en laboratorio un flujo producido por una tobera circular que desemboca al ras de una superficie libre. Con la técnica de PIV se midió el campo de velocidades en los planos vertical y horizontal que atraviesan cerca del centro del jet que pasa por el centro de la tobera. Con LSPIV se midió el campo de velocidades en la superficie. Se presenta un análisis comparativo de ambas técnicas y se concluye que la técnica es adecuada para medir la superficie libre en grandes cuerpos de agua en orden de magnitud. La técnica puede ser usada en flujos de grandes escalas como ríos y canales.

1 Motivación

Un problema abierto actualmente es medir varios perfiles de velocidades en varios puntos a la vez en flujos superficiales como lo son ríos o canales abiertos. Normalmente en este tipo de estudios se obtiene información a partir de medir en un solo punto y en una sola sección, con la cual se estima el caudal de todo el flujo.

Medir el flujo másico de un flujo, ya sea en ríos o canales nos permite determinar las cantidades de agua destinadas para la industria o el consumo humano, evaluar el impacto del agua en presas, canales o incluso predecir el comportamiento de estos en eventos extremos como inundaciones o sequías, por lo que tener mediciones en más de un solo punto es de interés.

Para medir en varios puntos simultáneamente y obtener varios perfiles de velocidad en flujos superficiales en grandes cuerpos de agua se ha utilizado la técnica de medición LSPIV, la cual ha permitido realizar monitoreos en estos para calcular el flujo másico sin tener que introducir instrumentación externa al flujo o incluso realizarlas en zonas de difícil acceso. La técnica puede funcionar sin sembrar trazadores físicos en la superficie del flujo, lo que actualmente es un problema abierto a validar.

2 Introducción

Las técnicas de medición de fluidos, tanto cualitativas como cuantitativas son parte esencial de la mecánica de fluidos desde hace años. Son herramientas experimentales esenciales dentro y fuera del laboratorio.

La técnica “Velocimetría por imágenes de partículas”, PIV por sus siglas en inglés, y su variación en grandes escalas LSPIV, se utilizan para obtener el campo de velocidades bidimensional a partir de una secuencia de imágenes al correlacionarlas entre pares. Entender los detalles y su procedencia ayudará a entender de mejor manera las técnicas.

2.1 *Antecedentes PIV*

Para entender el desarrollo y el alcance de estas técnicas se deben entender desde sus inicios hasta la actualidad. Los primeros desarrollos experimentales del PIV se dieron en 1977, en donde varios científicos con el uso de puntos de laser midieron el movimiento de flujos laminares simples y constantes. Posteriormente, se mejoró la técnica y su precisión para realizar velocimetría en una gran cantidad de imágenes, con concentraciones de partículas dispersas en un flujo, lo que concluyó con las primeras mediciones en el año de 1984 (Adrian, 1984, 1991).

Con el paso de los años, la técnica de PIV se consolidó como una de las técnicas cuantitativas más usadas en la mecánica de fluidos en el mundo. En las últimas cuatro décadas, la técnica ha servido en innumerables estudios, ha demostrado su efectividad y se nutre de los avances tecnológicos actuales como los láseres, cámaras de alta velocidad y elementos ópticos para mejorar la resolución.

Los requerimientos de la técnica PIV se dividen en dos partes. Por un lado, el montaje del sistema experimental que incluye los trazadores, la iluminación y la velocidad de grabación. Por otro, la obtención y análisis de las imágenes lo que incluye el procesamiento digital de las imágenes y la aplicación de la correlación cruzada. Desde luego, ambas partes están intrínsecamente relacionadas y se benefician mutuamente (Christensen, 2008).

2.1.1 *Características del PIV*

Para utilizar la técnica en principio se requiere tomar en cuenta las condiciones experimentales y las propiedades del análisis para obtener resultados. Una condición necesaria para utilizar el PIV, es la posición de la cámara la cual se debe colocar de manera ortogonal al plano del flujo a estudiar. Otra de ellas a tomar en cuenta es el intervalo de tiempo entre un par de imágenes en la grabación del flujo a estudiar, el cual es dependiente del tiempo de exposición y de la tasa de cuadros por segundo que la cámara ofrezca. Dichas variables en la grabación permiten discernir y plantear estrategias para determinar la velocidad de grabación adecuada a la iluminación y al flujo que se estudie.

Por lo general para el PIV la iluminación se produce por hojas de luz láser, en las que se busca iluminar una zona en la que haya una cierta densidad de partículas trazadoras

sembradas en el flujo a estudiar y que la densidad de partículas sea apreciable en la grabación sin estar sobre expuesta (Adrian, 1991).

En el análisis del PIV, la correlación cruzada es la base para obtener los campos de velocidades bidimensionales a partir de secuencias de imágenes que permiten calcular los desplazamientos, y de ahí las velocidades a partir del intervalo de tiempo entre imágenes. Como se mencionó, al cumplir la condición de perpendicularidad al área de grabación, se define una zona de búsqueda en la que se aplicará el algoritmo junto con un área de interrogación, se dividirá en pares de imágenes en secuencia y se obtendrá el campo de velocidades entre ellas (Christensen, 2008).

En resumen, en la técnica de PIV se obtienen las siguientes características, consideraciones y beneficios:

- Mediciones de los campos de velocidad de un flujo, en pequeñas escalas.
- Se siembran trazadores en el flujo, de manera que puedan seguirlo de manera coherente.
- La densidad de partículas trazadoras en las imágenes tiene que ser considerable, y no sobre expuesta para aplicar la correlación cruzada.
- La frecuencia de grabación de la cámara va en función a la resolución del fenómeno que se requiera estudiar.
- La grabación del fenómeno tiene que ser ortogonal al plano.

2.1.2 Principios de la técnica PIV

Las bases de la técnica PIV para medir los campos de velocidad bidimensional parte directamente del análisis de las secuencias de imágenes que se obtengan, ya sea para la técnica tradicional o para su adaptación en grandes escalas respecto a lo que se requiera medir.

Como se mencionó anteriormente, una de las condiciones que necesitan ambas técnicas es la condición de ortogonalidad, la cual permite simplificar los cálculos. Una consecuencia de esto es que al no considerar la componente fuera del plano de estudio, permite evitar errores de paralaje, ya que se observa solamente el plano de interés y no el volumen de la hoja de luz. (Christensen, 2008)

En la Figura 1 se ilustra la condición de ortogonalidad del sistema, así como la posición del área de estudio y de interrogación en el plano del flujo. La cámara, con un programa interno de procesamiento de imágenes, corrige la posición de los píxeles para obtener la imagen correspondiente al plano de estudio. Al cumplir con dicha condición desde la parte experimental, pasamos a definir dos conceptos importantes en el análisis: el área de búsqueda y el área de interrogación.

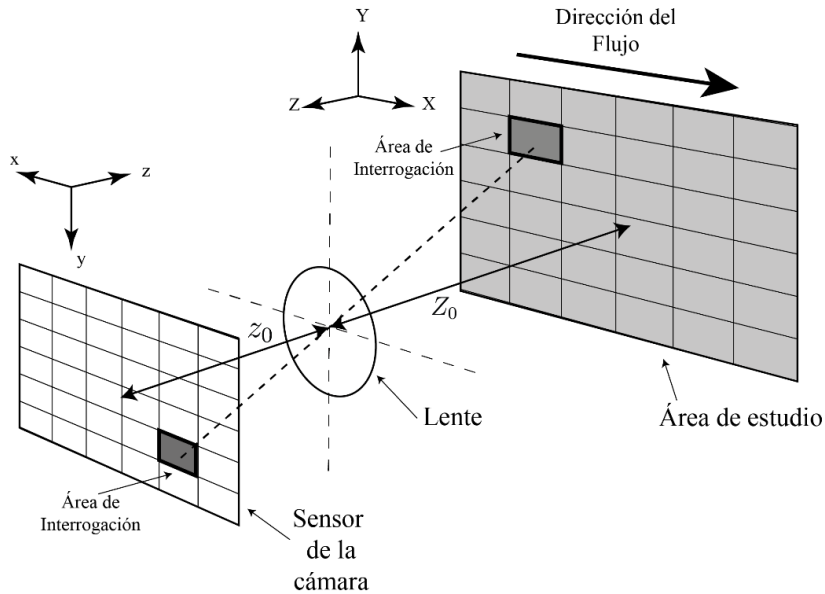


Figura 1: Diagrama representativo de las áreas de interrogación y el área de búsqueda, así como del eje óptico ortogonal al plano de estudio.

El área de búsqueda se define como la región en la que se buscarán las partículas trazadoras dentro de la secuencia de imágenes. El tamaño de esta área es crucial para determinar la resolución y la precisión de las mediciones. Un área de búsqueda pequeña con relación al tamaño de los trazadores y la densidad observable de estos conlleva a pérdida de precisión y de resolución del flujo de estudio, esto mismo ocurre en áreas de búsqueda muy grandes (Adrian, 1991). El tamaño de los trazadores y la densidad observable de estos cambia en función del experimento que se realice y del flujo que se requiera medir.

El área de interrogación es un área más pequeña que se define dentro del área de búsqueda, y se elige a partir del tamaño de los trazadores y de la densidad de partículas en la imagen. En dicha área, junto a los trazadores que se observen en ella, se les aplica el método de correlación más adecuado para medir los desplazamientos y calcular las velocidades en el plano de estudio, ya sea correlación cruzada o autocorrelación. El tamaño del área tiene que ser lo suficientemente pequeña para medir velocidades locales en ese espacio y lo suficientemente grande para incluir información de los trazadores circundantes a los que se le aplicara la correlación (Christensen, 2008).

Una vez definida la separación temporal entre un par de imágenes y las áreas de búsqueda e interrogación solo queda determinar los desplazamientos entre los trazadores. Para ello por lo general, se usan métodos estadísticos en los pares de imágenes. Los métodos usados tradicionalmente son la correlación cruzada y la autocorrelación.

La correlación cruzada es un cálculo entre un par de áreas de interrogación de dos imágenes secuenciadas. En las dos áreas de interrogación se realiza una búsqueda de partículas o cambios de intensidad, medidos digitalmente en tonalidades de grises de los píxeles, donde se selecciona el coeficiente de correlación máximo como el desplazamiento

entre el par de cuadros consecutivos. Dicha correlación es la herramienta para el desarrollo del presente trabajo (Adrian, 1991; Stevens y Coates, 1994).

El coeficiente de correlación entre pares de imágenes R_{ab} está definido como se muestra en (1) donde MX y MY son el tamaño del área de interrogación, a_{ij} y b_{ij} son los valores de distribución de los niveles de gris en las dos áreas de interrogación separadas por el tiempo entre cuadro y cuadro de las imágenes.

$$R_{ab} = \frac{\sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{MY} \{(a_{ij} - \bar{a}_{ij})(b_{ij} - \bar{b}_{ij})\}}{\left[\sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{MY} (a_{ij} - \bar{a}_{ij})^2 \sum_{i=1}^{MX} \sum_{j=1}^{MY} (b_{ij} - \bar{b}_{ij})^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

Para garantizar la precisión del algoritmo de correlación cruzada en el PIV, la cual digitalmente está limitada por la resolución de las imágenes y la cantidad de desplazamientos por el área de búsqueda e interrogación, se usa generalmente un esquema de precisión subpíxel. El esquema más utilizado es la regresión Gaussiana bidimensional, aplicándolo en la correlación en las intensidades de los píxeles, de manera que los picos máximos en el área de interrogación se ajustan con las capas de subpíxeles calculadas (Fleit y Baranya, 2019; Fujita et al., 1998).

La autocorrelación, analiza una imagen consigo misma con dos o más tiempos de exposición de manera que se calculan los desplazamientos respecto a la imagen inicial. Usualmente la autocorrelación se utiliza para calcular los desplazamientos en flujos repetitivos.

Después de obtener los desplazamientos, el siguiente paso a seguir es el postprocesado de las velocidades obtenidas, que depende de las características físicas que se midan del flujo. Al aplicar la correlación y solo depender de los cambios de intensidad en las áreas de interrogación, se puede producir vectores espurios que no son parte del flujo a medir.

El proceso usual que se sigue al realizar la técnica PIV se muestra en la Figura 2. Con los desplazamientos calculados entre dos imágenes y con el tiempo entre ellas se calcula el vector velocidad para cada área. La correlación al ser un método estadístico, muchas veces se producen vectores espurios los cuales carecen de sentido físico, por lo que se requiere realizar un postprocesado de los datos bajo las condiciones físicas del flujo.

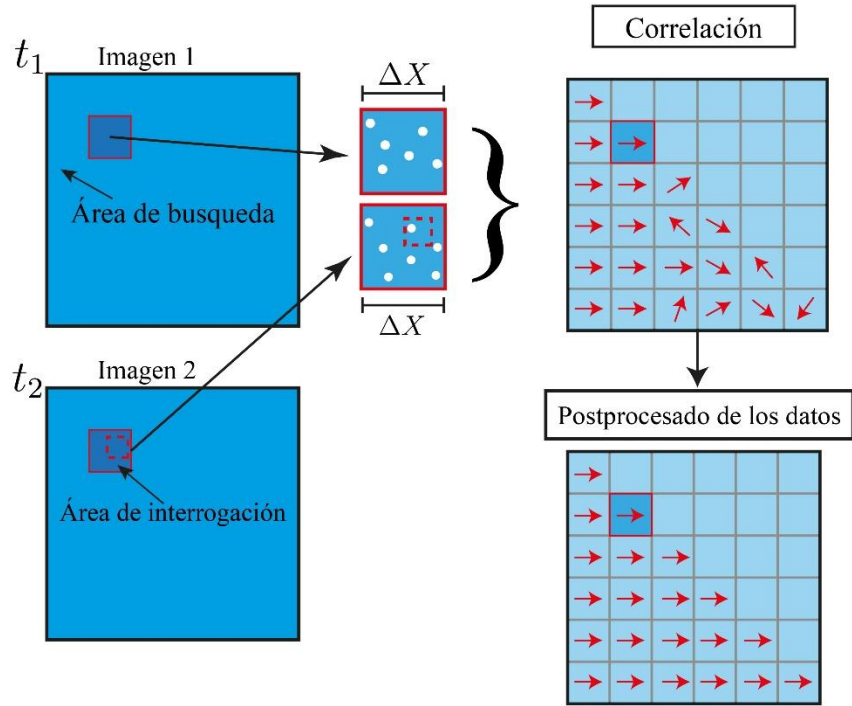


Figura 2: Esquema algoritmico general del PIV, en el procesamiento de las imágenes.

2.2 Antecedentes LSPIV

Con la metodología experimental y del análisis de la técnica tradicional, el plantear experimentos permitió desarrollar aplicaciones y adaptaciones en función del flujo a estudiar. El que corresponde al presente trabajo es el LSPIV, el cual se presentó por primera vez en 1998 (Fujita et al., 1998), en dicho trabajo se obtuvo el campo de velocidades de un río al utilizar partículas trazadoras flotantes en su superficie. Para ello se planteó el análisis de las secuencias de imágenes del río basada en la correlación cruzada, y propuso la metodología para utilizar la adaptación en grandes escalas, con sus respectivas diferencias. Algunos ejemplos de su aplicación van desde medir las velocidades superficiales secundarias de un vórtice en un canal (Ismail y Ulrich, 2007), ayudar en el desarrollo de bajo costo de técnicas de batimetría (Detert et al., 2017), hasta analizar el oleaje inducido por buques en una costa (Fleit y Baranya, 2022).

Con el paso de los años, la técnica ha sido probada, implementada, mejorada y adaptada según las necesidades para medir en flujos superficiales, por ejemplo, en canales a escala se realizaron pruebas con partículas trazadoras en la superficie e iluminación controlada para medir las corrientes secundarias en la superficie de un canal (Ismail y Ulrich, 2007). También con las mismas especificaciones, se utilizó para hacer el análisis de canales hidráulicos dentro de laboratorios a escala y en campo abierto (Kantoush et al.,

2011), para llegar a identificar patrones en la superficie del flujo para caracterizar canales abiertos (Jodeau et al., 2017; Jin y Liao, 2019).

En algunos artículos, para obtener los campos de velocidad en secciones de ríos, los autores proponen el uso de sensores infrarrojos en combinación con el sensor de la cámara (Zhang et al., 2013). En otros casos implementan el uso del dron para grabar en experimentos en campo abierto (Detert et al., 2017). Estos dos últimos casos se apoyan en la presencia de elementos que arrastra el río o de partículas trazadoras sembradas.

Si bien, tanto en el PIV como en LSPIV el uso de trazadores en el flujo es necesario, en flujos de grandes escalas la siembra de trazadores físicos puede llegar a ser complejo. En algunos artículos en los que se usa esta técnica, usan trazadores directamente en el área de estudio o realizan sistemas ópticos complejos con diferentes sensores para obtener mediciones (Fakhri et al., 2021; Jin y Liao, 2019; Osorio-Cano et al., 2013; Sutarto, 2015; Zhang et al., 2013).

Una de las propuestas actuales en el LSPIV, es el no utilizar trazadores físicos sembrados sobre la superficie libre. Esto se basa en solo colocar una cámara en una distancia y ángulo adecuado donde se observen estructuras superficiales (Jodeau et al., 2017). Existen actualmente algunos estudios con la propuesta de no sembrar trazadores, en las que solo usan las estructuras formadas en la superficie provocadas por turbulencias del mismo flujo (Jolley et al., 2021), obstáculos naturales en el flujo (Lewis y Rhoads, 2018), por ondas capilares y de gravedad o generadas artificialmente (Yeh et al., 2019). Actualmente la técnica sin el uso de trazadores se ha sujeto a varios procesos de validación, uno de ellos ha sido por validación cruzada entre otros métodos de medición usuales en canales abiertos (Fleit y Baranya, 2022).

2.2.1 Características del LSPIV

El LSPIV cuenta con las siguientes características y diferencias respecto a la técnica convencional:

- Su uso es en experimentos a grandes escalas, por ejemplo, en ríos, canales abiertos o en laboratorios con experimentos a escala.
- La grabación no es ortogonal al plano de estudio (superficie libre).
- La siembra de trazadores en la superficie es opcional.
- Utiliza la iluminación ambiente ya que por las condiciones de estos flujos no se puede colocar una hoja de luz.
- Se utilizan frecuencias de grabación bajas (30 Hz o más).

Al comparar metodología del análisis con la técnica de PIV, es necesario entender las diferencias y similitudes de ambas, las cuales se muestran en la Figura 3. Si bien ambas técnicas utilizan la misma metodología en el planteamiento experimental, el factor común entre el LSPIV y el PIV es el uso de trazadores en el flujo a estudiar, sin embargo, en el LSPIV los trazadores se limitan a la superficie del flujo. Como se mencionó, se pueden usar

de trazadores flotantes como lo son los mismos elementos que pueda arrastrar el flujo en su superficie como lo son ramas, semillas o confeti de papel (Zhang et al., 2013). También se pueden utilizar de trazadores naturales como la espuma generada en zonas de mezcla y las estructuras formadas en la superficie del flujo (Benetazzo et al., 2017). El uso de las estructuras como trazadores para medir los campos de velocidades en la superficie de un flujo, es un método no intrusivo como podrían ser los trazadores flotantes. Además, el uso de trazadores flotantes lleva implícita la hipótesis de que estos siguen perfectamente al flujo, lo cual no es siempre cierto, mientras que las estructuras de la superficie son parte del flujo mismo. Otro beneficio de utilizar a las estructuras como trazadores, es la autonomía para obtener las mediciones, al no depender de sembrar trazadores lo que en zonas de difícil acceso resulta muy complicado. Esto permite obtener mediciones de manera inmediata en zonas de difícil acceso (Jolley et al., 2021).

En el LSPIV tanto si se usan o no trazadores la iluminación es distinta al de la técnica convencional, ya que no se utiliza una hoja de luz, sino que se ilumina toda la superficie, es decir se usa la iluminación ambiente.

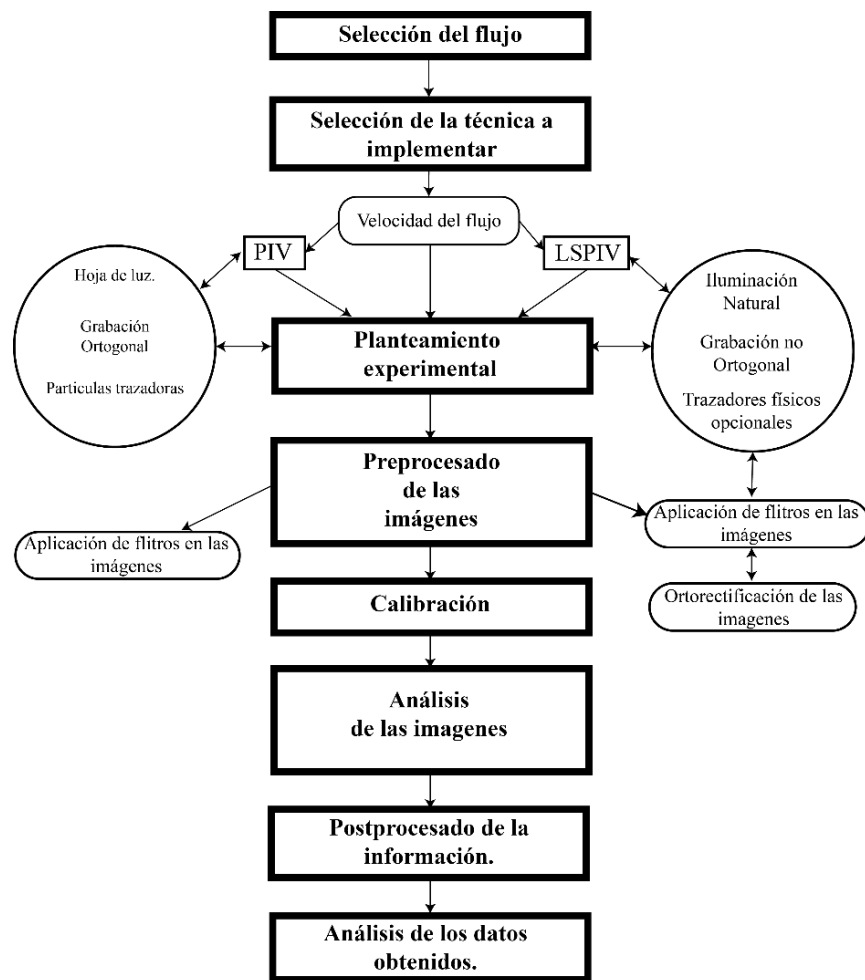


Figura 3: Diagrama conceptual del proceso de las técnicas PIV y LSPIV

Una de las diferencias entre el LSPIV y el PIV es la capacidad que se tiene para no grabar ortogonalmente al plano de estudio ya que utiliza herramientas de la fotogrametría digital para rectificar las imágenes y que pueda ser utilizadas con el análisis convencional.

Para lograr el análisis en el LSPIV sin el uso de trazadores flotantes, el procesamiento de imágenes es fundamental para identificar a las estructuras superficiales. El uso de filtros digitales (Fleit y Baranya, 2019), permite resaltar los detalles y los cambios de intensidad de las estructuras para obtener mediciones al usar la correlación cruzada. En muchas ocasiones, las herramientas usadas en el preprocesamiento de imágenes son suficientes para detectar zonas en las que la correlación se pueda aplicar por solo la presencia de las estructuras, en las que se define automáticamente su área de búsqueda y de interrogación por cuadrantes (Yeh et al., 2019).

En resumen, el LSPIV es una técnica que, al modificar algunas condiciones del PIV clásico como el uso de trazadores sólidos, la iluminación y la posición de la cámara, puede medir campos de velocidad bidimensionales en flujos superficiales. La mejor manera de entender las diferencias entre ambas técnicas es entender los pasos en el preprocesamiento de las imágenes que se utilizan en el LSPIV.

2.2.2 Preprocesamiento de las imágenes en el LSPIV

Como se mencionó, en el LSPIV se tienen dos condiciones experimentales para tener medidas de la superficie de un flujo. La primera condición es la ortogonalidad entre el plano de grabación del flujo, la lente de la cámara y el sensor. La segunda condición es el tipo de trazador en el flujo (Fujita et al., 1998).

Grabar en grandes escalas de forma ortogonal a la superficie libre puede resultar en una tarea algo compleja de realizar. Para facilitararlo se han utilizado las herramientas de la fotogrametría, la cual se basa en aplicar transformaciones analíticas a imágenes para rectificarlas. Existen diferentes formas para realizarlas, la más antigua es la rectificación óptica punto a punto de una imagen a partir de métodos físicos y ópticos. Actualmente con la fotografía digital se aplican transformaciones analíticas lineales píxel a píxel directamente en las imágenes (Bernecker, 2018).

Los métodos más frecuentes para ortorectificar una imagen son la Rectificación Polinómica, utilizada en imágenes de satélite, la Rectificación Proyectiva, la cual no necesita orientación geométrica interna y externa de los componentes y la Rectificación Diferencial, que requiere de toda la información disponible que se le pueda entregar, como la posición de la cámara, el relieve y el ángulo que se encuentre (Linder, 2006).

La más utilizada es la Rectificación Proyectiva, la cual es una transformación geométrica de perspectiva lineal, la cual toma 8 parámetros a partir de al menos 4 puntos conocidos dentro de una imagen. Estos puntos se proyectan como la relación a un plano rectificado para generar la imagen rectificada. La transformación lineal se muestra en la ecuación (2).

$$X = \frac{b_1x' + b_2y' + b_3}{a_3x' + b_3y' + 1}$$

$$Y = \frac{a_2x' + b_2y' + c_2}{a_3x' + b_3y' + 1}$$
(2)

En donde x' , y' son las coordenadas de los puntos de referencia que se utilizarán, los parámetros a, b y c que son los coeficientes de la transformación que se calculan resolviendo el sistema de ecuaciones por mínimos cuadrados. La rectificación por proyección se ve representada en la Figura 4 donde los puntos de referencia en la imagen ortogonal determinan los obtenidos en la imagen proyectada.

En la actualidad existen distintos programas que permiten realizar la operación a una imagen al determinar sus puntos de referencia, entre ellos se encuentra Matlab, ImageJ, Photoshop, y PTGui, entre otros.

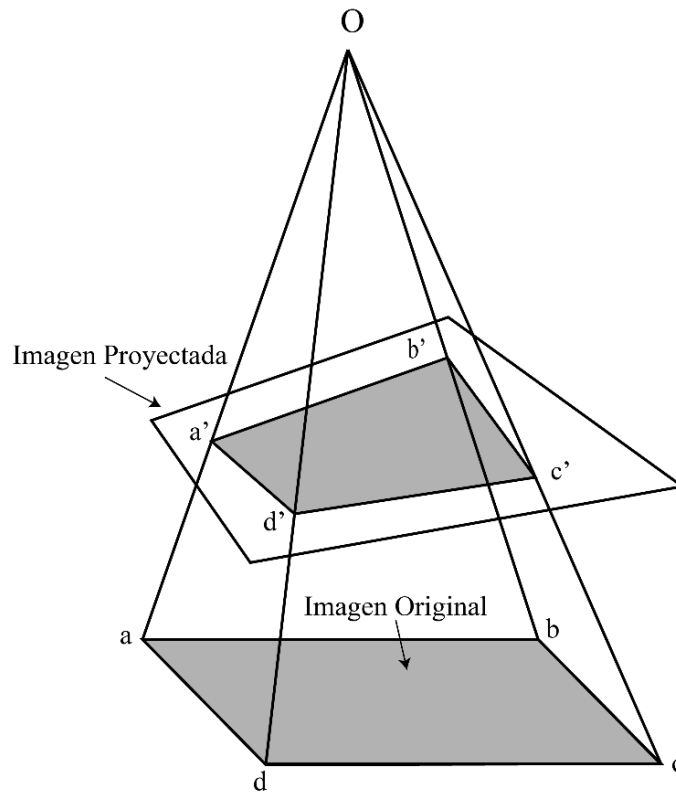


Figura 4: Diagrama de la Orto rectificación por Proyección.

Para asegurar que la transformación no distorsione la imagen y respete las distancias reales de los puntos de referencia utilizados en la ecuación, se define una malla con las distancias reales medias entre los puntos de referencia utilizados, de tal manera que al ortorectificar la imagen las distancias coincidan con las reales. Esto se ve representado en la

Figura 5. Con la imagen no distorsionada y ortorectificada se pueden procesar las imágenes con la correlación cruzada.

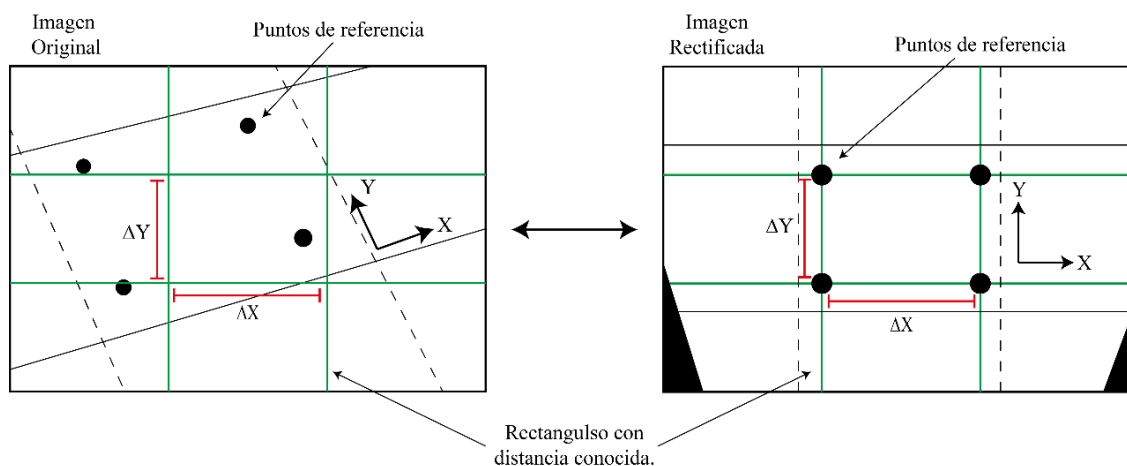


Figura 5: Esquema del proceso para garantizar la ortorectificación de las imágenes.

En estudios de la técnica, elegir los trazadores adecuados para realizar la correlación es crucial, ya que los problemas de usar trazadores físicos en algunas zonas se vuelven evidentes en cuanto se trata de aplicar en áreas en las que no se puede acceder o que incluso el flujo es sumamente turbulento como para realizar mediciones sin perder material. Para ello se parte del funcionamiento de la correlación cruzada. Se ha propuesto y probado en distintos artículos el funcionamiento de solo medir los desplazamientos al utilizar las estructuras superficiales del flujo que se observan a simple vista como se muestra en la Figura 6 (Benetazzo et al., 2017; Fleit y Baranya, 2022; Jodeau et al., 2017; Lewis y Rhoads, 2018).

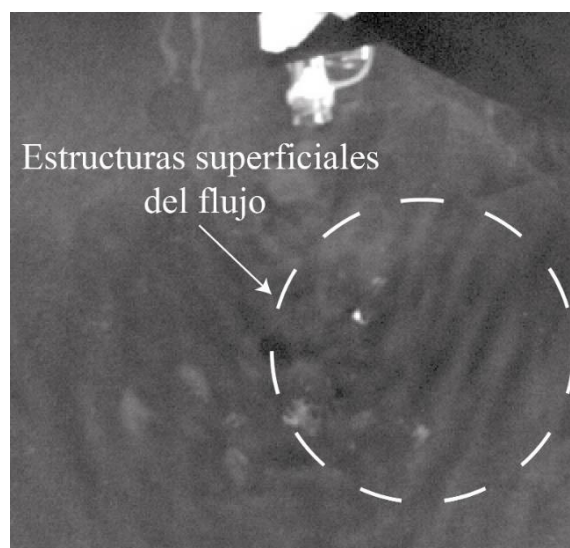


Figura 6: Ejemplo de estructura observable en la superficie de un flujo.

El primer artículo donde se realizan mediciones a partir de las estructuras hidráulicas fue en 2003 por Fujita y Hino quienes midieron la velocidad de un río en condiciones de flujo lento encima de un helicóptero (Fujita y Hino, 2003). En el mismo artículo menciona la necesidad de mejorar la grabación de las estructuras a partir de una posición fija con la cámara. Estas estructuras se logran apreciar por las reflexiones especulares en la superficie del agua de la luz ambiente. Son causadas por las deformaciones que se crean por el mismo flujo al ir a una determinada velocidad, al interactuar con los sedimentos u obstáculos en un río o incluso con ondas capilares-gravitatorias del mismo flujo. Para observar de mejor manera las estructuras y que funcionen como trazador, es necesario cuidar dos factores en la iluminación de estas áreas.

La primera es la visualización de las estructuras. Se busca que tengan un contraste con el fondo del flujo, ya que, si el flujo es completamente transparente, los cambios de intensidad no serán tan notorios al momento de realizar la correlación, para ello es de ayuda tener un fondo opaco, ya sea que se genere de manera natural por el flujo por la profundidad, por los sedimentos que tenga o sea colocado artificialmente, para que permita tomar solo la luz en la interfaz de agua y aire, con sus máximos y mínimos producidos por las estructuras. Para utilizar las reflexiones especulares en entornos donde no se tenga tanta profundidad o en laboratorios, se tiene que simular un espejo de agua para que al momento que se presenten las estructuras la luz sea difusa en esa zona. Un ejemplo de cómo se comporta la luz en estos casos se observa en la Figura 7.

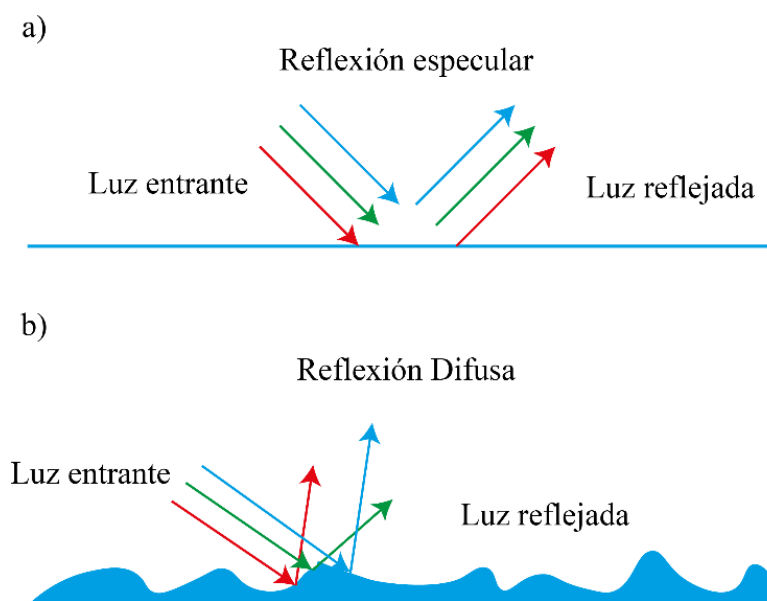


Figura 7: (a) Diagrama ejemplo de la reflexión especular de la luz. (b) Diagrama ejemplo de la reflexión difusa de la luz.

El segundo factor que se tiene que tomar en cuenta corresponde a las zonas en las que la luz se refleja completamente por la interfaz por reflexiones difusas. En las zonas donde se deforma la superficie, la luz al reflejarse, actúa en ciertas regiones como lentes que enfocan la luz en un solo lugar, lo que genera puntos de luz estáticos muy iluminados. En la

correlación se traduce a un máximo de intensidad estático que no corresponde al movimiento real del flujo, lo que genera vectores espurios. Para evitar esto, se busca una posición a una cierta distancia y un cierto ángulo para evitar que se observen estos puntos blancos de luz, o que si se presentan viajen junto a la estructura. En la Figura 8 se muestra un ejemplo de puntos de luz enfocada por las estructuras ondulatorias de la superficie.



Figura 8: Se muestra dos ejemplos de puntos de luz enfocada en una interfaz de agua provocada por el flujo de la interfaz.

Con el par de consideraciones al momento de realizar las mediciones se garantiza que se pueden usar las deformaciones de la superficie como trazador no intrusivo. Cabe mencionar que las estructuras formadas en la superficie del agua son por lo general apreciables a simple vista por lo que, para grabarlas adecuadamente, se necesita como mínimo una frecuencia de grabación de 30Hz. Si se utiliza una frecuencia mayor es necesario cuidar la cantidad de luz para realizar la grabación y que posteriormente al hacer la correlación se obtengan los campos de velocidades adecuados al movimiento del flujo.

En resumen, para realizar medidas con el LSPIV con las estructuras superficiales como trazadores, se tiene que tomar en cuenta la presencia de las reflexiones especulares, y seguir una serie de pasos con el uso de herramientas digitales de procesamiento de imágenes. El proceso que se utiliza para realizarlas se muestra en la Figura 9.

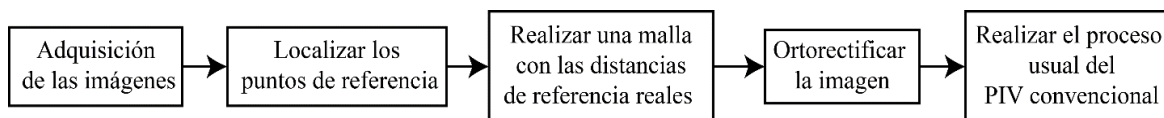


Figura 9: Esquema secuencial del proceso a seguir para medir con LSPIV.

2.3 Chorro axisimétrico

Los chorros axisimétricos, son flujos turbulentos producidos por la descarga de un fluido en otro a través de una boquilla circular. Estos flujos se ven afectados por otros parámetros como la velocidad del flujo, la temperatura, la densidad y la geometría de la

boquilla. Los chorros axisimétrico han servido para estudiar los conceptos básicos de un flujo turbulento, la evolución de estos y sus aplicaciones en diferentes áreas.

La estructura general del chorro axisimétrico se debe a la geometría de la boquilla, lo que provoca que se genere una forma cónica respecto al eje de simetría. El radio de apertura del chorro es proporcional a la distancia desde la boquilla hasta que el flujo se desarrolla.

Describir analíticamente las ecuaciones de un chorro axisimétrico requiere métodos numéricos muy específicos o incluso desarrollos muy complejos. En el libro “A first course in turbulence” (Tennekes y Lumeley, 1972), se da una deducción 2 dimensional sobre flujos de capa limite libre, donde describe el comportamiento de los chorros axisimétricos. Una descripción más amplia sobre los chorros axisimétricos se puede encontrar en el libro “The theory of turbulent jets” (Abramovich, 2003) donde junta resultados experimentales y teóricos a cerca de los chorros axisimétricos.

La manera más sencilla de entender y modelar los chorros axisimétricos es suponer que inicialmente el fluido en el que se realiza la descarga se encuentra estático. Con ello se pueden definir tres regiones en las que se desarrolla el flujo simétricamente bajo un mismo eje. Con la Figura 10 se observan las tres regiones señaladas, con D el diámetro de la boquilla y U la componente de la velocidad promedio en dirección al eje X .

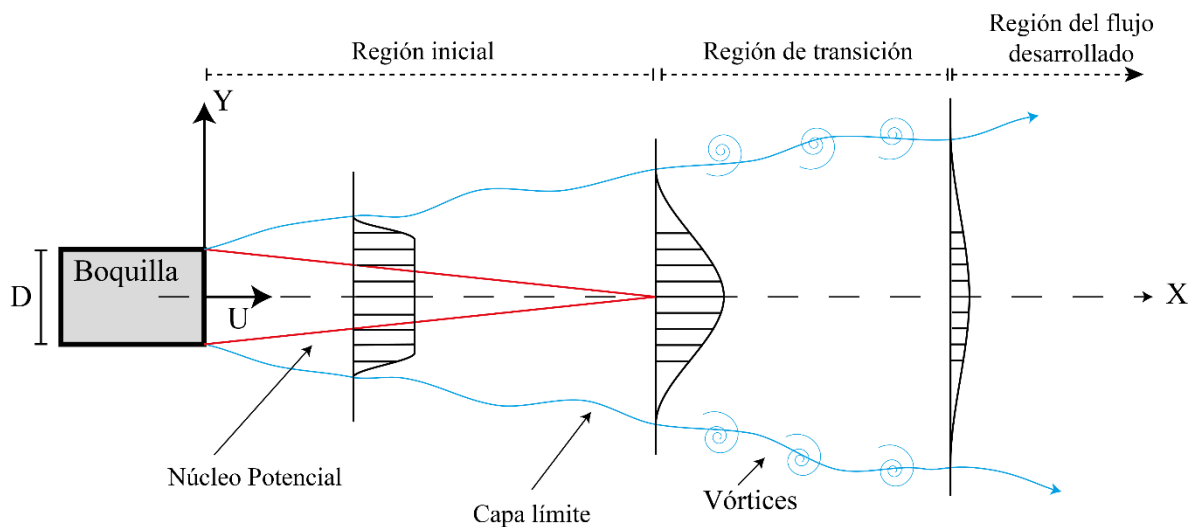


Figura 10: Esquema de un chorro axisimétrico con sus tres regiones.

La región inicial del chorro se define desde la zona en la que el flujo circundante a la boquilla es estático, lo que provoca que el espesor de la capa límite inicial del chorro sea cero antes de empezar la descarga. Conforme empieza la descarga el flujo proveniente de la boquilla se aleja y arrastra el medio circundante, lo que aumenta su velocidad en su sección transversal, de tal manera que la sección inicial del chorro, donde se encuentran las dos

capas límites se consume gradualmente. En esta zona, el perfil de velocidades transversales es comúnmente llamado como perfil de “sombbrero de copa”.

El tamaño de la región inicial se ve limitada por el núcleo potencial, como se observa en la Figura 10, la cual es un área donde la velocidad del flujo circundante es igual a la velocidad de salida de la boquilla. Normalmente en dicha región se puede considerar la zona laminar del chorro, ya que no se presentan vorticidades en la capa límite. La distancia máxima a la que se encuentra el pico del núcleo potencial depende de la geometría de la tobera y de las condiciones del flujo en movimiento (Del Rio et al., 2014).

Al pasar el núcleo Potencial se define la región de transición o región de mezcla. En ella se forma y desarrolla una capa límite axisimétrica entre el chorro y el flujo de los alrededores, lo que aumenta su tamaño de manera radial al eje de simetría. En la región las velocidades en la dirección del chorro se acoplan a las velocidades del mismo flujo, lo que provoca que la velocidad promedio U del chorro disminuya. En la capa externa o zona de mezcla, el intercambio entre el flujo estático y el chorro crean vorticidades en las cuales se disipa energía del mismo flujo. Conforme se aleja de la boquilla el flujo saliente de la capa límite se llega a desprender en forma de vórtices lo que de igual manera provoca la pérdida de velocidad del flujo. Aquí la región del flujo se considera turbulenta.

Por último, la tercera sección del chorro axisimétrico es la región del flujo desarrollado, la cual es la más alejada de la boquilla de entrada, y es la sección más estabilizada del chorro respecto al flujo estático. El perfil de velocidades del chorro y el flujo son comparables y se considera que se encuentra desarrollado (Abramovich, 2003).

Las tres regiones señaladas anteriormente se pueden definir en proporciones del diámetro de la boquilla respecto a la distancia que se alejan de ella. Sin embargo, esto cambia en cada caso particular. La construcción seccionada de los chorros axisimétricos ha ayudado a estudiarlos de manera teórica y experimental. Sin embargo, en la realidad tener un chorro axisimétrico conlleva más complejidad, ya que, con tener pequeños cambios en las condiciones iniciales o las mismas características del flujo, genera un cambio en el flujo mismo de forma que no sea completamente axisimétrico.

3 Objetivo

El objetivo del presente trabajo es medir los perfiles de velocidad de un flujo superficial con la técnica LSPIV sin sembrar partículas trazadoras en un flujo y validar las mediciones en orden de magnitud con mediciones realizadas del mismo flujo por debajo de la superficie con PIV.

Para cumplir el objetivo se planteó un sistema experimental para medir el flujo saliente de una tobera de descarga de agua producido por una bomba hidráulica y colocada al ras de la interfaz. De esta manera, el sistema experimental que se propone tiene que cumplir con la característica de ser un flujo repetible y constante en el tiempo que forme un patrón de estructuras en la superficie libre del agua y que sean observables a simple vista junto con su desplazamiento en una misma sección.

Para realizar la validación del LSPIV, se propone realizar medidas por debajo del agua con el PIV tradicional, de manera que se obtengan los perfiles de velocidades a distintas alturas dentro del agua y a diferentes posiciones, de manera vertical y horizontal.

El flujo superficial será medido con la técnica y metodología usual del LSPIV. Donde se buscará adaptar el sistema experimental para grabar el patrón de estructuras superficiales de manera no ortogonal a la superficie.

4 Montaje experimental

El sistema experimental propuesto para cumplir con el objetivo se divide en el montaje y análisis en tres diferentes arreglos experimentales, montados en un mismo sistema general. A continuación, se dará una explicación del montaje para el dispositivo principal, y posteriormente de cada una de las variaciones del montaje usadas.

4.1 Características generales del dispositivo.

El montaje general del dispositivo constó de un recipiente de acrílico con las dimensiones mostradas en la Figura 11, conectada a otro recipiente de acrílico más pequeño para asegurar que ambos cuenten con el mismo nivel de agua y exista una recirculación. Se montó sobre una mesa óptica, para evitar perturbaciones en la superficie del agua debidas a pasos en el suelo o por manipular los elementos ópticos que posteriormente se utilizaron. El sistema de referencia utilizado en todos los experimentos se observa en la misma Figura 11.

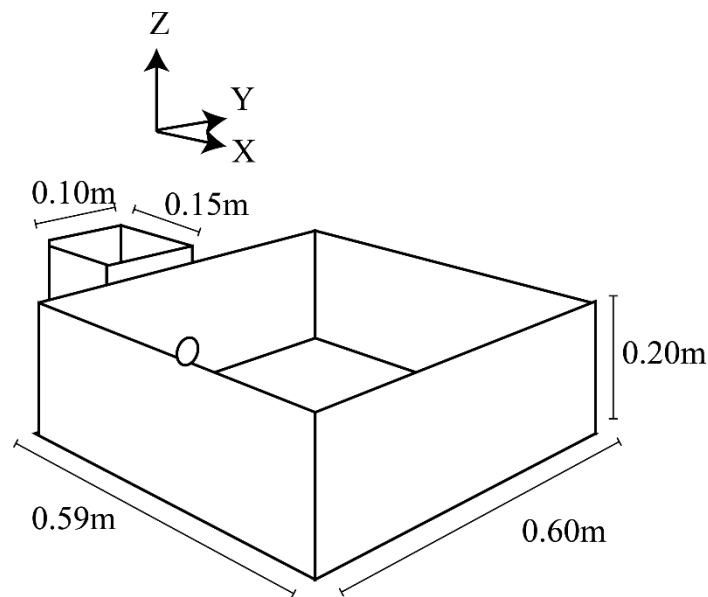


Figura 11: Diagrama de las dimensiones de las peceras usadas en el sistema general. Se observa el sistema de referencia del montaje.

Las paredes de los recipientes tienen un grosor de **0.006m** están selladas con silicón y pegamento para acrílico. La unión entre las peceras tiene un diámetro de **0.250m**. Con la unión se generó un canal de conexión entre los dos recipientes. Para tener una recirculación constante que mantenga el nivel del agua y con el piso falso para evitar recirculaciones con las paredes.

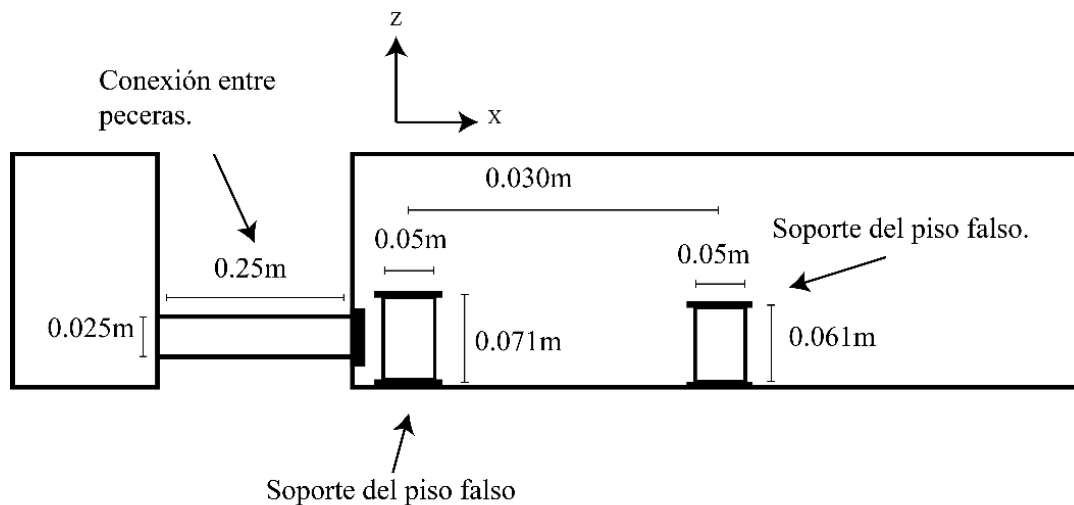


Figura 12: Diagrama lateral de las dos peceras con las dimensiones de los componentes (plano xz).

Para tener fijo el piso falso se utilizaron 3 soportes hechos de PVC con el tamaño que se muestra en la Figura 12, éstos se llenaron de agua para evitar que flotaran, y se repartieron dos de ellos en las dos esquinas pegadas a la pared de la conexión y el tercer soporte un poco apartado del centro de la pecera para sostener la placa de acrílico con las dimensiones que se muestra en la Figura 13. Tener un soporte de menor altura generó una pequeña inclinación en el piso falso, esto hizo que la profundidad cambie respecto al sistema de referencia.

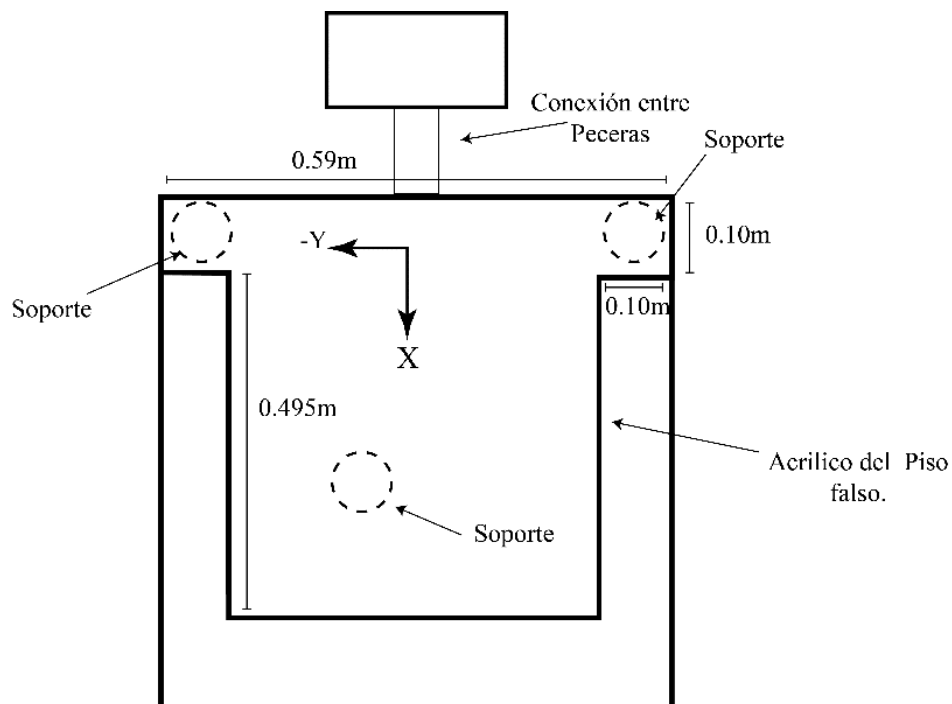


Figura 13: Diagrama de posición del piso falso dentro de las dos peceras y la vista en el plano XY de donde se colocan los soportes.

Al tener el montaje del piso falso, se empezó a llenar la pecera de agua hasta tener 0.150m de profundidad, dejando al menos 0.030m de profundidad entre la superficie del agua y la base del piso falso más cercana a la pared con la conexión de recirculación. Posterior a llenar el sistema de agua, se colocó en la pecera pequeña una bomba de agua “Aquasub 4207”, la cual tiene una capacidad de **450 L/H**, una altura máxima de presión de 0.900m, 60 Hz de frecuencia en la bomba y una potencia de 6.5W por sus especificaciones de fábrica. Se conectó a una manguera con un diámetro de **0.007m**. La bomba presentaba un control manual para la salida del agua dividida en 4 niveles, está en todos los experimentos se mantuvo al máximo de su capacidad de salida con una velocidad caudal dentro de la tobera de 0.320m/s.

La manguera de la bomba, con ayuda de un soporte universal, una nuez y una pinza, se manipuló para que quedara sumergida al ras de la superficie del agua. Esto presentó un reto, ya que para garantizar que la manguera no tuviera un ángulo preferencial debido a la presión de las pinzas o a la manipulación en si de la misma manguera al colocarla, se sostuvo con ayuda de cinchos, un tubo de metal y un par de piezas de acrílico. Con esos materiales se fabricó un soporte para mantenerla lo más recto posible como se muestra en la Figura 14.

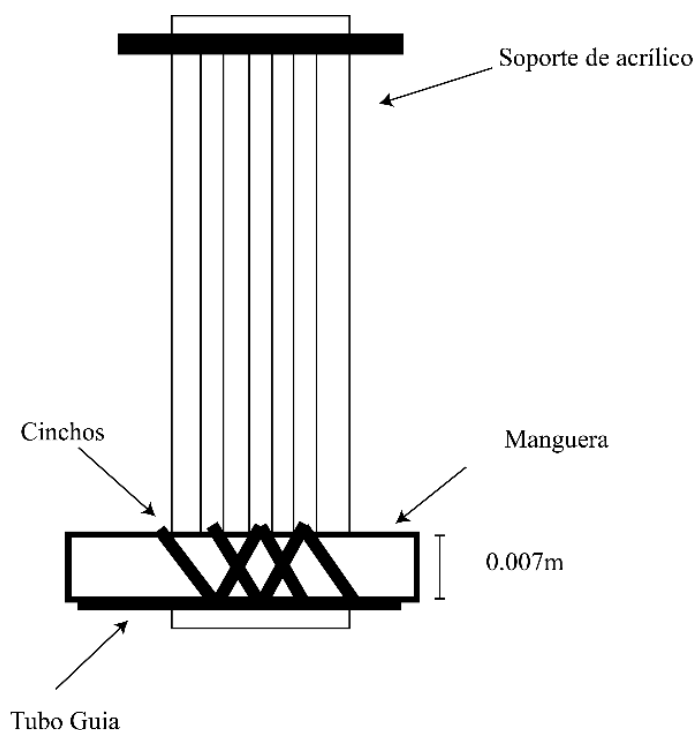


Figura 14: Diagrama del soporte para la tobera.

La manguera para tener la misma distancia en todos los experimentos, y que el flujo en los tres experimentos planteados fuera el mismo a estudiar, se situó a una distancia de 0.500m en contra de la pared contraria a la que está la conexión de recirculación como se

muestra en la Figura 15. De igual manera, como se mencionó anteriormente, se mantuvo la boquilla de la manguera completamente sumergida al ras de la superficie del agua.

Con todo montado y en funcionamiento, se tuvo el sistema experimental general ensamblado para empezar a realizar las modificaciones específicas en cada una de las grabaciones en los planos vertical, horizontal y el superficial.

Para avalar la repetibilidad del sistema experimental con el flujo en todas las tomas, se tomaron algunas consideraciones para que las perturbaciones en la interfaz de agua y aire se vieran afectadas lo menos posible. Ya montado todo el sistema experimental, se manipuló lo menos posible al modificar los componentes para poder realizar las diferentes grabaciones. Sumado a esto, el hecho de que se tenga el piso falso montado ayuda a que no se presenten recirculaciones debidas a la pared y no afecten en el desarrollo del flujo de la tobera.

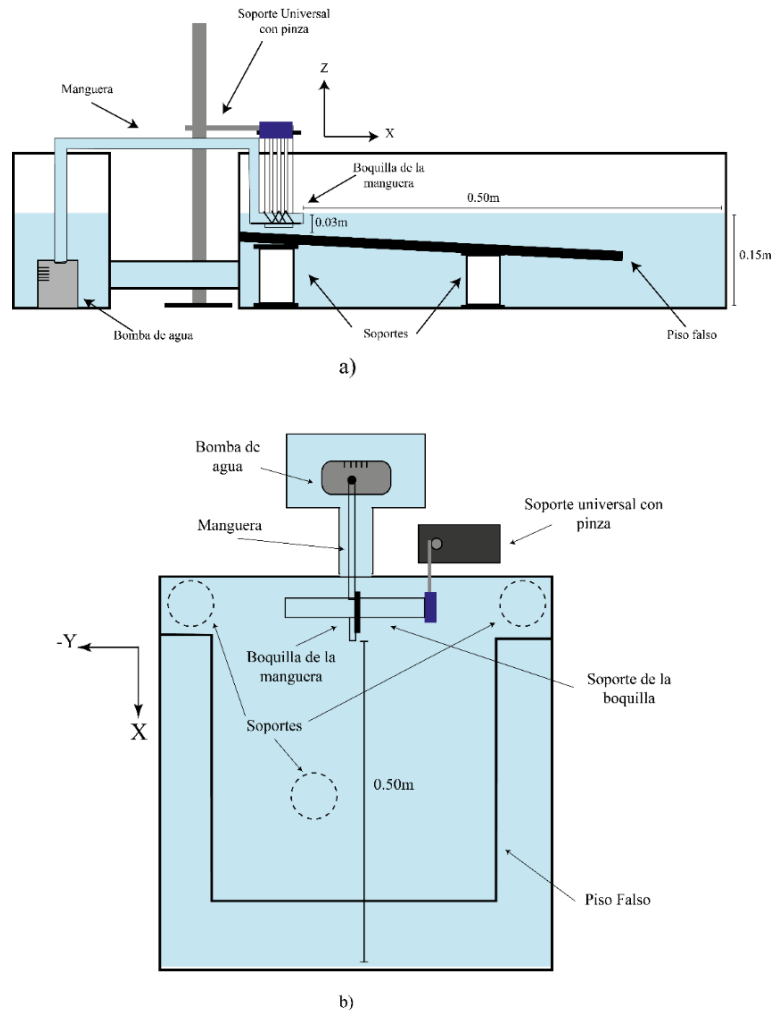


Figura 15:a) Diagrama del arreglo experimental general en el plano XZ con la manguera montada junto con sus distancias entre componentes. b) Diagrama del plano XY junto con las distancias a los componentes.

Para cumplir los objetivos, a continuación, se describirán las adaptaciones del sistema general además de cómo se realizó su análisis en las diferentes secciones transversales del flujo saliente de la tobera en el estanque. Posteriormente comparar los dos cortes transversales a los que se les aplicará PIV tradicional, con el campo de velocidades superficial obtenida con la variación a grandes escalas.

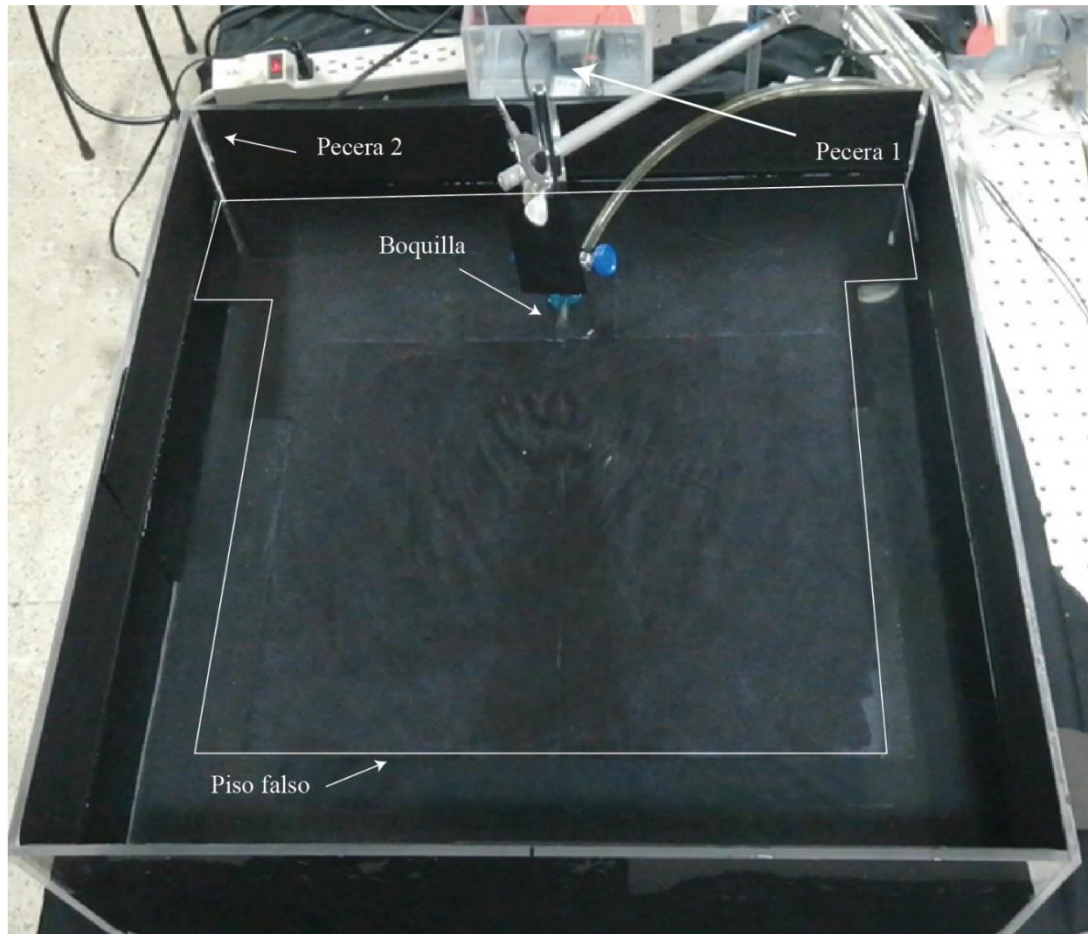


Figura 16: Fotografía superficial del sistema experimental general.

4.2 Corte transversal vertical de la tobera.

Al realizarse 3 tomas diferentes se siguieron los siguientes pasos para montar el experimento los cuales se expresarán en las siguientes subsecciones. En esta abarcaremos un corte vertical para obtener el plano XZ.

4.2.1 Montaje experimental para el corte vertical

Primeramente, se adaptó el arreglo experimental general para grabar un video del flujo saliente de la tobera en el plano XZ para analizarlo conforme a la técnica tradicional PIV en el flujo saliente de la tobera. Para ello se utilizó un láser de 450nm a 550mW y un lente Powell de 30° para generar una hoja de luz. Todo se montó sobre una mesa elevadora

para ajustar la hoja de luz a la altura de la boquilla y maximizar la iluminación. Se enfocó la hoja de luz a la mitad de la boquilla para iluminar esa zona, por ser el área de estudio de interés a grabar del flujo. Un problema que se solucionó fue que debido a la potencia del láser se tuvo cuidado que éste no quemara el acrílico. Para ello se marcó una distancia de seguridad 0.15m respecto a la boquilla del láser y la pared de la pecera con una diferencia de 0.05m entre el láser y el soporte del lente Powell. Se decidió utilizar este láser por la potencia de iluminación que el fabricante entrega, lo cual ayuda a la grabación para tener una mayor tasa de cuadros por segundo con menores tiempos de exposición y una mayor densidad de partículas en la grabación.

Por otra parte, para evitar reflejos innecesarios que lleguen a dañar el sensor de la cámara y por consecuencia afecte el análisis, se colocó en las paredes de la pecera, en la pinza que sostiene el soporte de la tobera y en el piso falso, forros negros de plástico. Se dejaron únicamente libres las zonas en las que pasaba la hoja de luz y una parte lateral para que la cámara grabe la zona de estudio. También se cubrió de plástico la parte exterior de la manguera y la pinza para evitar reflejos en la superficie del agua.

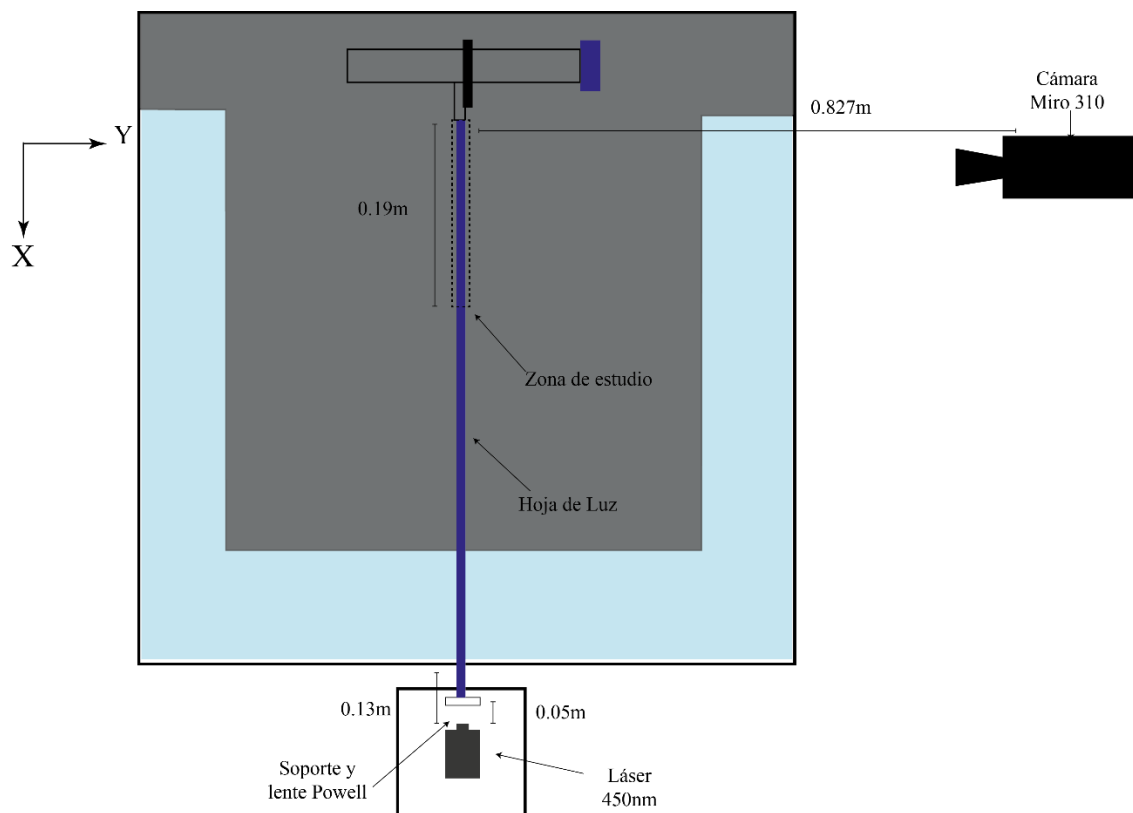


Figura 17: Diagrama del en el plano XY del montaje experimental, junto con las distancias tomadas para el experimento y con la posición de la cámara.

La cámara utilizada para grabar estos experimentos fue la Phantom Miro 310, la cual se montó sobre un trípode y se le conectó una lente de 110mm enfocando el plano del

centro de la boquilla de la manguera, acomodándola perpendicular a la hoja de luz a una distancia de 0.872m respecto al plano y el sensor de la cámara como se muestra en la Figura 17. Enfocada la zona de grabación, se ajustó la altura de la cámara para que grabara la interfaz de agua y aire y la boquilla de la tobera dejándola en un extremo de la toma.

Con la cámara enfocada al plano de grabación, se usó el software de “Cine Viewer” (software perteneciente al fabricante de la cámara), se realizó una fotografía de una regla puesta en el plano de grabación de manera muy cuidadosa para que posteriormente en el análisis se calibraran las distancias.

Para aplicar el PIV tradicional, se usaron partículas de vidrio esféricas recubiertas de plata con nula flotabilidad como trazadores con un diámetro de $10\mu\text{m}$. Esto para obtener una mayor reflexión de la luz al momento de que las partículas atraviesen la hoja de luz. Además de no tener un flujo extra debido a la flotabilidad de las partículas ya que es nula.

El flujo de agua se dejó correr unos minutos antes de empezar a grabar para que se mantuviera constante en todo momento. Tras unos minutos, se activó el láser y se empezó a grabar. Se obtuvo un video del flujo con un tiempo de exposición de $30\mu\text{s}$ y una tasa de 2000 c/s. En el video se verificó el seguimiento cuadro a cuadro una serie de partículas sin una separación grande entre ellas en al menos 5 cuadros, lo cual posteriormente en el análisis, garantizó definir un área de interrogación más pequeña para tener mediciones de las partículas salientes desde la boquilla de la tobera donde el flujo es más rápido.

La resolución de las imágenes fue de 1280×800 pixeles, se grabaron los primeros 0.19m de largo y los 0.04m de ancho, lo que definió la zona de grabación que se muestra en la Figura 18.

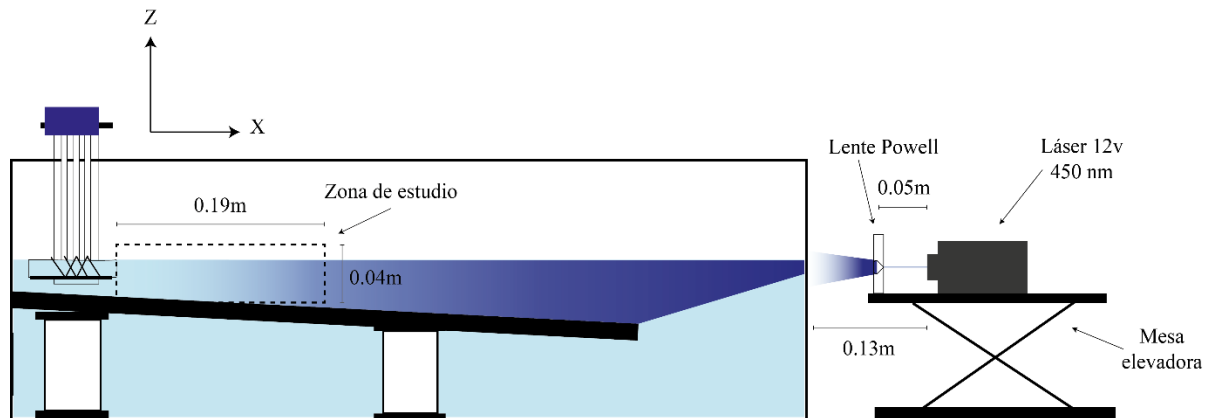


Figura 18: Diagrama del sistema experimental en el plano XZ.

4.2.2 Procesamiento de las imágenes y configuración del PIV.

El video grabado de 4.15 segundos de duración, se dividió en 8300 fotogramas con ayuda del programa *Cine Viewer*. Los fotogramas se analizaron dentro del programa Matlab con la aplicación PIVlab 2.56. En la aplicación, se realizó un preprocesamiento en las imágenes. Se eligió el área de búsqueda de 1280×242 pixeles, para hacer coincidir el

largo de la trayectoria disponible en la imagen, y de alto la interfaz entre agua y aire, hasta el piso falso.

Se aplicaron dos máscaras para que el programa al momento de hacer la correlación no las tome en cuenta. La primera de éstas es la zona donde se observa la boquilla, y la segunda, la zona del piso falso que se ve en la toma. En el preprocesamiento de la imagen se retiraron todos los filtros por defecto del programa para evitar que estos modifiquen, alteren o creen información no correspondiente a las partículas observadas en los fotogramas. Previo a realizar el análisis, se calibró el sistema con la fotografía de la regla en el plano de grabación, se tomó como referencia la distancia real en el medio de las dos líneas de la regla. Se obtuvo una escala de $1\text{px} = 0.00015\text{m}$.

Con el preprocesado y la calibración de las distancias, se ajustaron los valores del análisis, se utilizó el algoritmo de PIV de FFT que proporciona la aplicación. Se definieron tres áreas de interrogación de 64, 32 y 16 píxeles con pasos de búsqueda de 32, 16 y 8 píxeles respectivamente. Se usó el estimador de píxeles de 2D-Gauss y el nivel de correlación del PIV en extremo que ofrece el programa. Posteriormente se le indicó al programa que realizara el análisis.

Al obtener los campos bidimensionales de la velocidad del flujo, se comenzó el post procesado de las imágenes. Se validaron las velocidades en el programa para eliminar vectores espurios debidos a reflexiones que se observaban en la cámara por la deformación de la superficie, además de los vectores formados por los cambios de intensidad grandes en el área de búsqueda. Para visualizar de manera más intuitiva el flujo se obtuvo el promedio temporal de las velocidades de toda la grabación.

Toda la información obtenida del PIV tradicional se exportó al área de trabajo de Matlab para analizar y filtrar las velocidades que correspondan con el movimiento real del flujo saliente.

4.2.3 Procesamiento de los datos

En Matlab se realizó un programa para procesar los datos del PIV tradicional. Se extrajeron las columnas y renglones a analizar de las 8300 matrices donde cada una contuvo un total de 29 columnas contra 159 renglones. Se eligieron 3 columnas a lo largo del movimiento en tres secciones repartidas alrededor del diámetro de la tobera. La primera columna que se tomó fue la más cercana a la superficie del agua, la segunda en el medio de la tobera y la tercera en la parte inferior de la boquilla de la tobera. Las líneas de datos se usaron para medir las velocidades U en la dirección X . Por otro lado, se tomaron 3 renglones, uno cercano a la boquilla, otro a la mitad del recorrido y otro al casi final para obtener las velocidades U en el eje Z . Las distancias entre esas líneas se muestran en la Figura 19.

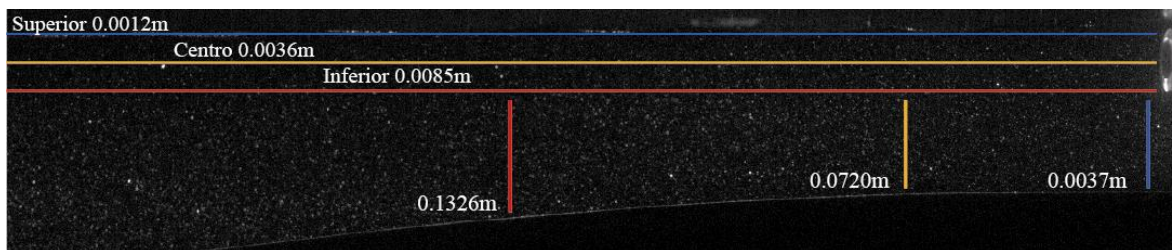


Figura 19: Esquema de las líneas de estudio de datos y sus distancias respecto a la boquilla de la tobera en el corte vertical.

Con los renglones y las columnas obtenidas, con un programa escrito en Matlab se aplicó un filtro de velocidades. Se definieron cotas en las velocidades U en el intervalo entre -2m/s a 0.75m/s y en las velocidades V a lo largo del eje Z entre -0.5 m/s y 0.5 m/s a todos los datos. Para definir las cotas, se tomó en cuenta el sentido físico del flujo y de las velocidades esperadas por la misma bomba de agua, ya que al producirse el jet de agua su mayor desplazamiento y velocidad se produce en la dirección X y no tanto en el eje Z . Además, no se consideraron en el filtrado las velocidades contrarias al movimiento del jet, esto debido a que el sistema de referencia del programa por defecto, el cual se encuentra en la esquina superior izquierda. Se aseguró que los vectores espurios que pueda arrojar el programa tras aplicar la correlación no sean tomados en cuenta al momento de hacer las mediciones lo cual provocó que bajara la fluctuación de la desviación estándar de los datos.

Posterior al filtrado de los datos, se seleccionaron los renglones y columnas de interés, se llenaron nuevas matrices para calcular los promedios y desviaciones estándar de las velocidades medidas en las líneas seleccionadas, así como sus magnitudes.

Con las velocidades calculadas, se graficó cada una de las líneas de estudio seleccionada su velocidad U contra su posición en X y U contra su posición en Z para visualizar los resultados obtenidos junto con el promedio temporal al cual se le aplicó un mapeado de color para observar las zonas promedio del jet en las que se mueve a mayor velocidad. Con las magnitudes calculadas, se obtuvo una gráfica con los promedios temporales entre ellas, de manera que con un mapeado de color jet proporcionado por Matlab se graficó el flujo promedio del flujo.

4.3 Corte lateral horizontal

Con el objetivo de observar el comportamiento del flujo en corte horizontal por debajo del agua y posteriormente compararlo con los otros cortes, se realizó la adaptación en el sistema experimental general. Para el entendimiento de la siguiente sección se dividió en tres partes.

4.3.1 Montaje experimental para el corte horizontal

Se utilizó lo montado previamente en el sistema general y el arreglo óptico de la hoja de luz, para grabar el flujo en el plano XY como se muestra en la Figura 20.

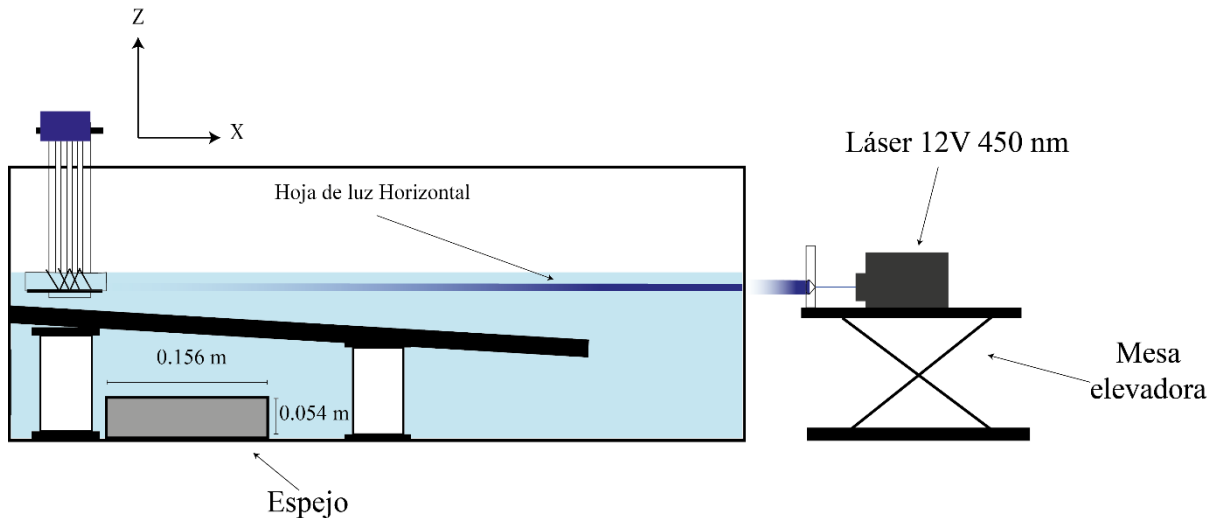


Figura 20: Diagrama del corte XZ del sistema experimental usado para el montaje del espejo.

Se rotó el lente Powell 90° para generar la hoja de luz horizontal, se mantuvo la distancia entre el láser y el lente del montaje anterior y se alineó de manera que la hoja de luz se enfocara en la parte inferior a la boquilla a 0.003m de la superficie. Se decidió usar esta distancia para tener en la grabación un corte del plano horizontal sin deformaciones, ni reflejos de la interfaz de agua y aire que se noten en la toma. Con ello se mejoró la imagen y se evitaron reflejos dañinos en la grabación. Además, se pintó la boquilla de color negro con tinta indeleble para aprovechar la iluminación en toda el área y evitar más reflejos.

Como se mencionó, se tuvo cuidado de los reflejos de la interfaz de agua y aire para evitar un segundo reflejo debido a la interfaz, donde también se observan estructuras que afectan las mediciones debidas a los cambios de intensidad en el fondo de la toma, de forma que se restringió la medición solo al plano de la hoja de luz.

Se fabricó un soporte con una impresora 3D para sostener un espejo del tamaño que muestra la Figura 21 en un ángulo de 45°. Se colocó por debajo del piso falso para que no estorbara en el flujo del chorro y se retiró el recubrimiento negro del piso falso colocado en la sección anterior. El espejo se alineó de manera que se viera la boquilla de la tobera en un extremo, y se alineó perpendicularmente con la cámara para grabarlo.

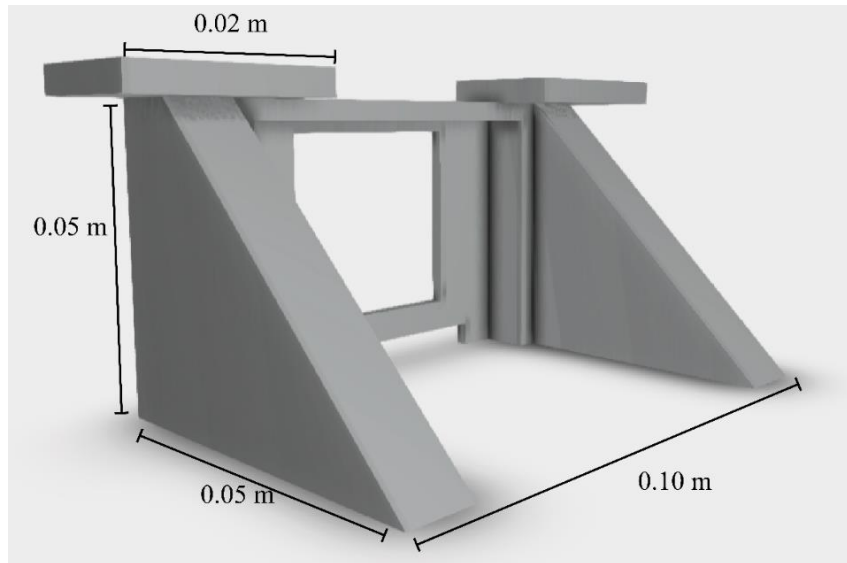


Figura 21: Diagrama del soporte fabricado por la impresora 3D.

La cámara se ajustó a la altura del espejo y se utilizó el mismo lente que la sección anterior. Se colocó la cámara en la distancia como se muestra en la Figura 22 y se enfocó directamente al espejo, de forma que se viera la boquilla de la tobera.

Se grabó a una velocidad de 2000c/s una cantidad de 8300 cuadros con el flujo ya en circulación tras haber pasado más de un minuto de activación de la bomba. Se usó un tiempo de exposición de $120\mu\text{s}$ y la grabación se tomó con el programa *Cine Viewer*.

Para la calibración se tomó una fotografía de una regla justo en el plano de grabación. La resolución de la imagen grabada fue la misma que en el caso anterior 1280x800 pixeles en escala de grises. Se utilizó dicha configuración de parámetros, puesto que si se grababa a menos cuadros se apreciaba la superficie del agua, lo que provoca cambios en las mediciones del plano de la hoja de luz, y menor resolución de las partículas en la parte de la salida de la boquilla.

Debido a la manipulación misma de la manguera al acomodarla, provocó que el flujo de la manguera llegue a su descarga de manera turbulenta. Esto es de nuestro beneficio ya que ayuda a la presencia de estructuras en la superficie.

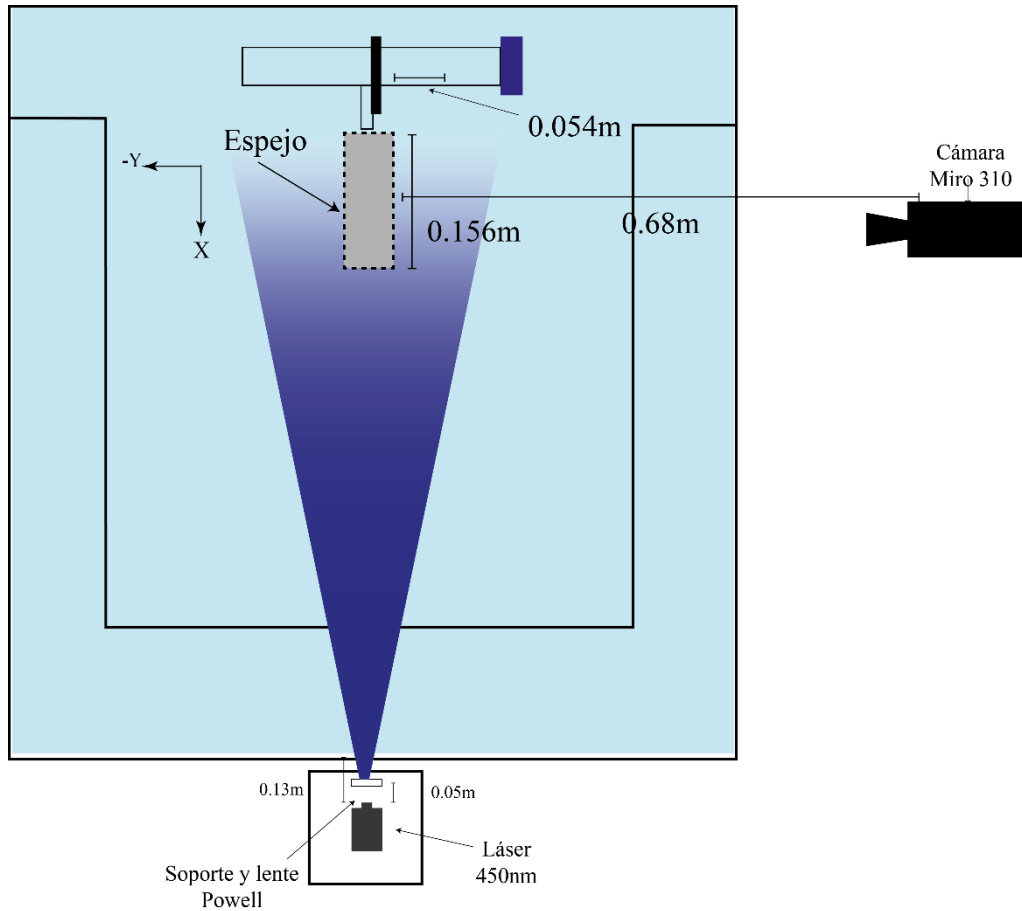


Figura 22: Diagrama de la vista del plano XY del montaje experimental y se muestra la zona de grabación.

4.3.2 Procesamiento de imágenes y configuración del PIV.

Con el mismo proceso que se siguió en el caso anterior, el video se dividió en una secuencia de imágenes con el programa *Cine Viewer*. Se obtuvo un total 8300 fotogramas del video. Los fotogramas se importaron a la aplicación PIVlab y se empezó el preprocesamiento de las imágenes, se seleccionó el área de búsqueda en toda la zona del espejo observable en la cámara, lo que definió un área de 1030x344 píxeles.

Se colocó una máscara en donde se encontraba la boquilla de la tobera para que no se tomara en cuenta al hacer el análisis. Posteriormente se aplicó un filtro para enaltecer el contraste de la imagen de manera local, para que en las imágenes se observe una mayor densidad de partículas. Esto a diferencia del caso anterior, fue necesario ya que al tener menos luz por la posición de la hoja y por grabarla indirectamente, se pierde iluminación en las partículas.

Con la fotografía en el plano de grabación de la regla, se calibró el sistema, de forma que la relación de píxel y distancia quedara como $1\text{px}=0.000016\text{m}$ con un tiempo entre fotogramas de 0.5ms.

Para el análisis de las imágenes, como en el caso anterior, se usó la función de correlación con FFT con una primera área de interrogación de 64px con pasos de búsqueda de 32px y las siguientes pasadas de 32px con 16px y 16px con 8px, con el subestimado de pixeles 2D-Gauss y el nivel de correlación extremo del programa. Se realizó el análisis para todas las imágenes y finalmente se siguió al postprocesado de los datos en Matlab.

Antes de exportar los datos, se realizó un fotograma del promedio temporal del sistema, para posteriormente analizar y visualizar el comportamiento promedio del jet.

Se adaptó el mismo programa para el filtrado de datos del caso anterior, se exportaron los datos al espacio de trabajo de Matlab, se ubicaron los renglones y filas donde se encuentra la tobera y se seleccionaron las líneas de estudio de la tobera correspondientes como se muestra en la Figura 23. Dichas líneas se tomaron según el diámetro de la tobera, con el centro como referencia y una en cada extremo de manera horizontal. De manera vertical se tomó una línea lo más pegado a la boquilla, otra a 0.083m y la última a 0.131m respecto a la boquilla.

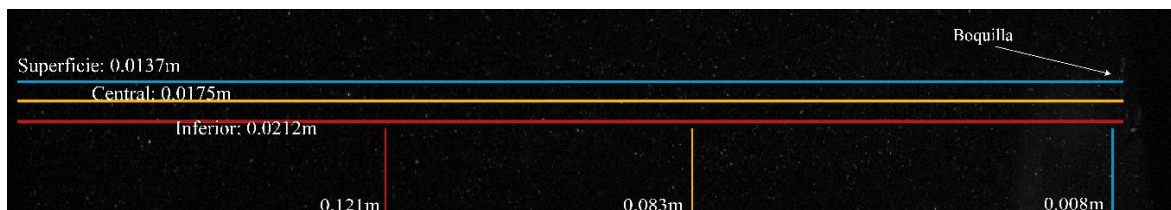


Figura 23: Esquema de las líneas de estudio de datos y sus distancias respecto a la boquilla de la tobera en el corte horizontal.

4.3.3 Procesamiento de datos.

Del PIVlab se obtuvieron matrices de 42 columnas por 127 renglones, al tener el mismo programa del filtro en Matlab del caso anterior se adaptó con los tamaños de las matrices. Se cambiaron los valores de las columnas y renglones, para que coincidan con el centro de la tobera y dos de los extremos con las tres líneas fijas en Y al recorrer la distancia en X, como se muestra en la Figura 23. Así tras calcular las magnitudes promedio de las direcciones y obtener las gráficas de la velocidad U contra su posición en X, se obtuvieron tres graficas de las tres líneas de estudio. Se repitió el proceso anterior en las tres líneas verticales. Se calcularon y se obtuvieron las magnitudes promedio de las velocidades U en el eje Y así como sus desviaciones estándar. Con estos datos se graficaron las tres líneas.

Para realizar el postprocesado de los datos en Matlab, se le aplicó el mismo programa de filtro de velocidades que en el caso anterior, se fijaron los mismos límites de velocidad en U de -2m/s a 0.75m/s y en las velocidades a V a lo largo del eje Z entre -0.5 m/s y 0.5 m/s. También se obtuvieron y filtraron las desviaciones estándar de cada línea de datos y se graficó cada caso.

Se obtuvo una gráfica del promedio temporal de las magnitudes de la velocidad del flujo saliente. Para mejorar su visualización, se le aplicó un mapeo de color de jet proporcionado por Matlab.

4.4 Toma superficial

Como en los casos anteriores para facilitar explicación del montaje experimental, se dividió la sección en tres partes.

4.4.1 Montaje para la toma superficial

Con el sistema experimental general anteriormente planteado, se retiró el láser como el espejo de las secciones anteriores, para montar el sistema para grabar la superficie libre directamente como se muestra en la Figura 24.

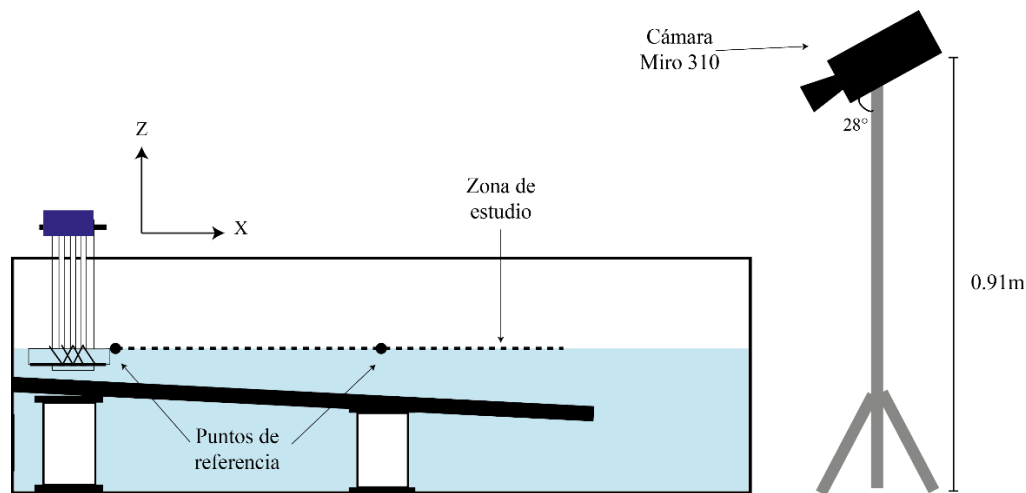


Figura 24: Diagrama del sistema experimental en el corte XZ para obtener las imágenes de las estructuras formadas en la superficie del agua.

Primero, al piso falso se colocó el recubrimiento de plástico negro al igual que en las orillas y en todas las zonas que podrían crear un reflejo en la superficie del agua como las paredes o el soporte de la manguera. Se realizó esto con el objetivo de evitar el mayor número de reflejos en la superficie del agua, ya que al generar reflexiones especulares en la superficie es muy sencillo que se produzcan y generen patrones de intensidad fijos, lo que no beneficiaría a la correlación.

El tripie de la cámara se ajustó a una altura de 1.06m desde la base de la pecera, esto con tal de que la cámara tuviera una altura por encima de la superficie del agua y se pudiera ajustar el ángulo de la cámara de forma que al activar el flujo se vean las estructuras formadas en la superficie y que las mismas no generen reflexiones difusas estáticas (puntos blancos de luz) debidas a la curvatura de la superficie, finalmente se colocó y enfocó la cámara con un ángulo de inclinación sobre la vertical de 28° directamente a la superficie del agua.

Esto se realizó para no meter información falsa en la técnica al ser sensible a los cambios de intensidades de grises, para evitar que la correlación evite zonas aparentemente estáticas y pueda calcular los desplazamientos de las estructuras. Se mantuvo la iluminación natural del laboratorio para realizar las pruebas sin necesidad de colocar más iluminación y evitar reflexiones en la superficie de otras fuentes.

Se utilizó la misma cámara que en los casos anteriores, pero con el lente Canon 18-55mm f5 0-32. Al colocar la cámara con el ángulo previamente mencionado, se realizaron 3 tomas con diferente configuración de parámetros, esto con tal de posteriormente en el preprocesado decidir cual funcionaba mejor para la correlación. Se realizó una toma de 60 c/s con un tiempo de exposición de $16000\mu s$, una de 120 c/s con un tiempo de exposición de $8300\mu s$ y uno de 240 c/s con un tiempo de exposición de $4100\mu s$. Todas las grabaciones tuvieron duraciones distintas, la primera fue de 50s, 12s en el segundo caso y 4s en el último caso. Todo se grabó con el programa *Cine Viewer*.

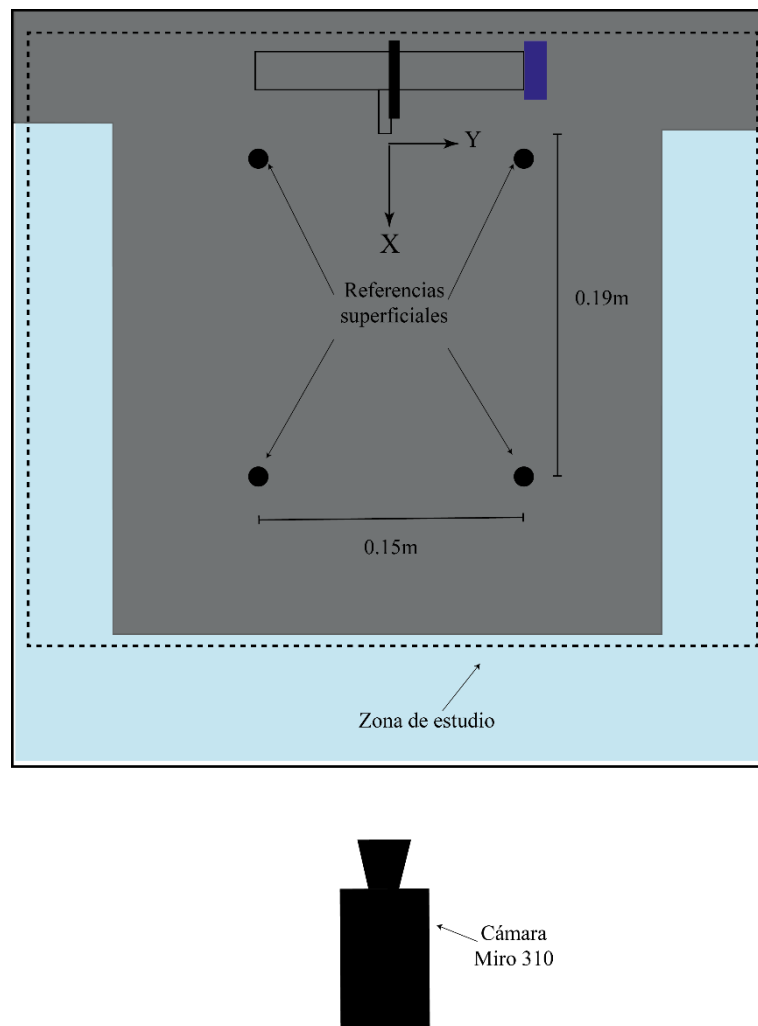


Figura 25: Diagrama del plano XY donde se marcan los puntos de referencia para la calibración, así como su distancia entre ellos.

Para realizar el proceso de calibración y ajuste en la rectificación de las imágenes, se colocó una hoja con 4 puntos de referencia pintados con tinta indeleble y se colocó en la superficie del agua. Estos puntos se marcaron con las distancias que se muestran en la Figura 25 en forma de rectángulo para ajustarlos posteriormente con el mallado digital. Como se mencionó, la hoja se colocó en la superficie del agua y se le tomó una fotografía para realizar la rectificación por proyección. Estos trechos se usaron también para calibrar las distancias, para ello se tomó el centro de cada uno de los puntos como referencia en el programa.

4.4.2 Preprocesamiento de las imágenes.

Con los videos grabados con el programa *Cine Viewer*, se dividieron en fotogramas correspondientes a cada video. Al tener ya en paquetes de imágenes formados y tener la imagen de calibración, se ajustaron en el software *Fiji*, para obtener las imágenes ortonormalizadas al seguir los pasos mencionados anteriormente.

En el programa se marcaron los 4 puntos con las referencias de la imagen de calibración en su centro de cada uno de los puntos. Se colocó una malla cuadriculada con las medidas reales mostradas en la Figura 25. Se utilizó la herramienta del software de “perspectiva interactiva” que contiene el programa para rectificar las imágenes según el mallado. La herramienta aplica la rectificación por proyección de manera interactiva por lo que se ajustaron los 4 puntos de referencia en las intersecciones de la red para que coincidieran las distancias reales con las de la imagen y no se distorsionara excesivamente. Posteriormente de ajustar la imagen de calibración y al tener todas las imágenes agrupadas se le aplicó la transformación a todo el grupo de fotogramas. El ejemplo de cómo quedó la imagen al ser rectificada se observa en la Figura 26.

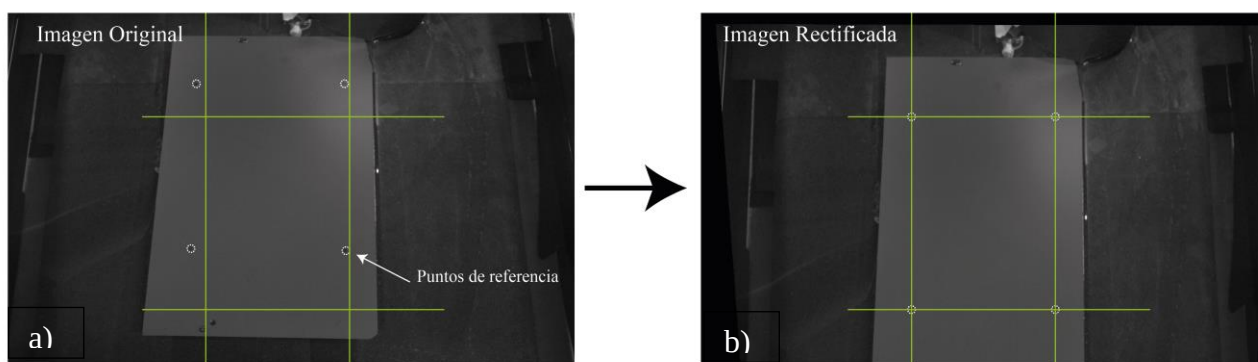


Figura 26: (a) Fotografía de los puntos de referencia sin rectificar. (b) Fotografía de los puntos de referencia ya rectificados.

4.4.3 Configuración del LSPIV

Con las imágenes ya rectificadas en todos los casos, se realizó la configuración de preprocesado de las imágenes dentro de la aplicación PIVlab. En ésta se seleccionó el área

de búsqueda de 1142x730 píxeles, con una máscara en la boquilla de la tobera para que la correlación no se aplique en esa zona. A las imágenes se les aplicó el filtro de contraste local con un área 64 píxeles, para que la correlación detecte mejor los cambios de intensidad en escala de grises generados por las estructuras.

Para calibrarlo se utilizó la misma imagen que se usó para ortorectificar, se tomó en cuenta la distancia existente entre las marcas desde su centro, de la misma manera que se hizo en la rectificación. La calibración de distancia en las imágenes quedó como la relación de $1\text{px}=0.00046\text{m}$ en todas ellas.

Para el análisis se utilizó en el PIV la función FFT, con áreas de interrogación de 64 píxeles con pasos de 32 píxeles, con tres pasadas del algoritmo con áreas de 32 píxeles con 16 píxeles y 18 píxeles por 8 píxeles. Por último, en la configuración el estimador de subpíxeles se utilizó un Gauss 2D y con un nivel de robustes de correlación extrema.

De los tres videos obtenidos se seleccionó el video de 120 cuadros por segundo, con el que presentaba menor cantidad de vectores espurios de los tres al hacer la correlación. Al obtener el análisis correspondiente y tener los campos de velocidades, se obtuvo un fotograma con el campo de velocidades en promedio temporal del flujo, así como el de su desviación estándar. Todos los datos fueron exportados al área de trabajo de Matlab para su postprocesado y su análisis.

4.4.4 Procesamiento de datos.

Se siguió el mismo procedimiento que en los casos anteriores para obtener las velocidades promedio U en el plano XY, en la superficie. Al tener matrices de datos de 90 renglones por 142 columnas, se eligieron tres columnas dejándolas fijas, ubicadas en el centro de la tobera y dos a los lados de la tobera sin alejarse tanto de ella de forma simétrica al centro. Se tomaron tres puntos en el eje X los cuales se dejaron fijos, el primero cerca de la boquilla de la tobera donde se puedan apreciar las estructuras, el segundo en medio de donde la mayor cantidad de estructuras se formaban y el último al doble de la distancia anterior. La ubicación de las líneas se observa en la Figura 27.

Se adaptó el programa realizado en Matlab para aplicar el filtro, se recalibró con los límites de las componentes de las velocidades, estos intervalos se eligieron entre -0.06 m/s y 0.06 m/s con la componente en el eje X de las y de -1 m/s a 1 m/s en las componentes del eje Y de las velocidades U. Esto con el objetivo de limitar solo las velocidades que lleva el flujo en su debido al desplazamiento del agua por el jet y su interacción en la superficie. Para seleccionar estos límites se tomó en cuenta el comportamiento físico de las estructuras, así como la dirección de ellas, para enfocar las estructuras del jet y no las de su alrededor.

En las tres líneas que se tomaron de manera horizontal y vertical se realizaron sus gráficas correspondientes de velocidades U con respecto a los dos ejes de desplazamiento, junto a sus desviaciones estándar. Se obtuvo el promedio temporal de las velocidades medidas en dicha zona con filtro y sin filtrar para realizar una comparación al momento de cotejar la información entre los demás cortes.

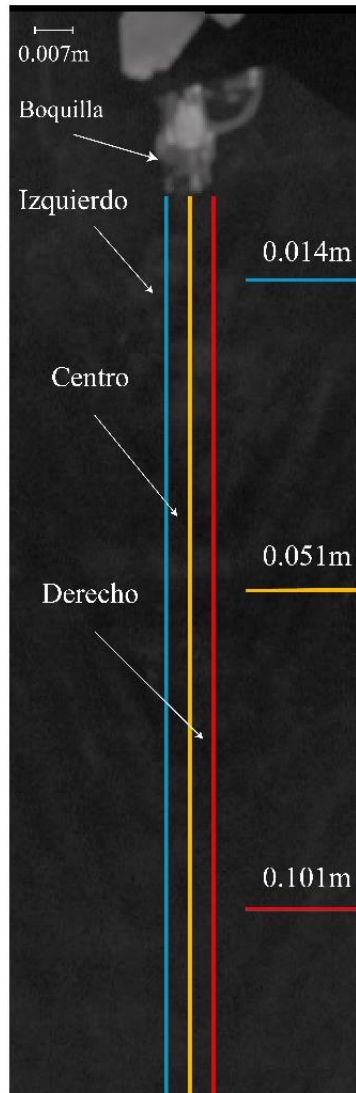


Figura 27 Esquema de las líneas de estudio de datos y sus distancias respecto a la boquilla de la tobera en el corte superficial.

4.5 Combinación de las tomas de PIV y LSPIV.

Al tener los datos de los tres casos, se compararon los flujos medidos con el PIV tradicional con los del LSPIV. Se realizaron gráficas de las velocidades medidas U contra su posición en el eje X con el origen en la boquilla de la tobera, tal y como se ha manejado en las secciones anteriores. Con ello se calcularon los errores relativos de las velocidades, al inicio del movimiento, en los 5 y 20 diámetros de distancia respecto al origen y se obtuvo el máximo y mínimo entre los errores relativos. En ambos casos las gráficas del promedio temporal se les ajustó el mapeado de color en un intervalo de velocidades de 0m/s a 0.8m/s para normalizar la visualización de las velocidades. Este intervalo de velocidades se mantuvo para el resto de las comparaciones.

Para cumplir uno de los objetivos del presente trabajo, se compararon por separado las líneas de velocidades medidas por la línea central de los dos casos, en el corte horizontal medido con PIV tradicional como se observa en la Figura 19, y el medido superficial con el LSPIV mostrado en la Figura 27. De manera que se normalizaron sus promedios temporales de velocidad con el intervalo previamente mencionado, y se comparó la resolución del movimiento captada por los dos casos. Se tomó la distancia respecto a la boquilla en la zona en que ambos datos se intersecan para graficar sus velocidades U contra su posición en X . Se calculó el error relativo entre ambas partes antes de los 5 diámetros de recorrido, y se obtuvo el máximo y el mínimo de los errores entre ambas distancias. Para calcular el error relativo se tomaron en cuenta los valores medidos que se asemejaban en distancia los unos a los otros.

Debido a que, en los dos casos el vertical (medido PIV tradicional) y el superficial (medido con LSPIV), se midieran las velocidades en la interfaz de agua aire, se decidió hacer la comparación de las líneas medidas en la superficie del caso vertical con el del centro de la toma superficial. Se repitieron los mismos pasos que en las comparaciones anteriores, se ajustaron los valores filtrados y medidos en los promedios temporales y se graficaron las velocidades U contra su posición en X . De igual manera se calcularon sus errores relativos máximos y mínimos.

Por último, se compararon las tres líneas céntricas de la velocidad U respecto a su desplazamiento en X de manera que se delimito el área en la que se pueden comparar las velocidades y existe presencia de estructuras en la superficie del agua producidas por el jet. Tras definir esa área se compararon las velocidades entre ellas para calcular el error relativo respecto a la línea de datos medida en la superficie del agua.

Todo el análisis anterior se realizó con un programa creado en Matlab lo que facilitó el cumplir el objetivo del presente trabajo. Se obtuvieron gráficas que se mostrarán más detenidamente en la siguiente sección.

5 Resultados y discusión

Para facilitar la explicación de los datos procesados de cada uno de los videos obtenidos de las secciones anteriores, se mostrarán los resultados individualmente en el orden que se mostraron en la sección anterior.

5.1 *PIV obtenido en el corte lateral vertical (Plano XZ)*

De la primera sección en el corte lateral, es decir en el plano XZ del sistema experimental, se obtuvo el promedio temporal de las velocidades del corte como se muestra en la Figura 28. Con él se logra apreciar visualmente el campo escalar de velocidades del flujo.

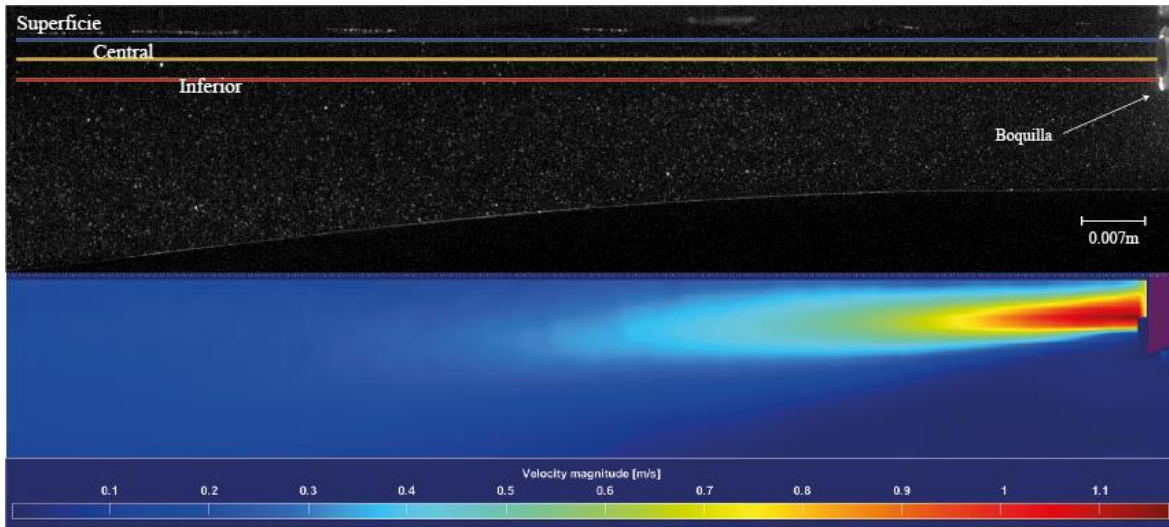


Figura 28: Promedio temporal del jet de agua producido por la tobera en el plano XZ obtenido de la técnica PIV tradicional.

la tobera y como pierda velocidad conforme se aleja de la boquilla debido a la interacción con el agua de la pecera, la superficie libre y el piso falso. En la primera imagen podemos ver el núcleo potencial del chorro.

Como se indicó en el apartado del procesamiento de datos, se seleccionaron líneas de datos correspondientes a las medidas en las cuales se indicarán como PIV-Ver-S como la correspondiente a la superficie, PIV-Ver-C como la del centro y PIV-Ver-B como la inferior de la boquilla. Se tomó la boquilla de la tobera como el origen del flujo. Con los datos filtrados y ajustados, se graficaron las velocidades U respecto a la dirección X , lo cual se muestra a continuación.

En la primera gráfica mostrada en la Figura 29, que corresponde a la línea PIV-Ver-S la cual va un poco por debajo de donde se observa la zona de las ondulaciones de la superficie, lo que provoca que se observe una gran cantidad de fluctuaciones de la desviación estándar. Si se piensa a este flujo como un chorro axisimétrico se definen las regiones características, la región inicial se definirá de 0 a los 5 diámetros, la región de transición de los 6 a los 15 y de los 16 en adelante la región del flujo desarrollado.

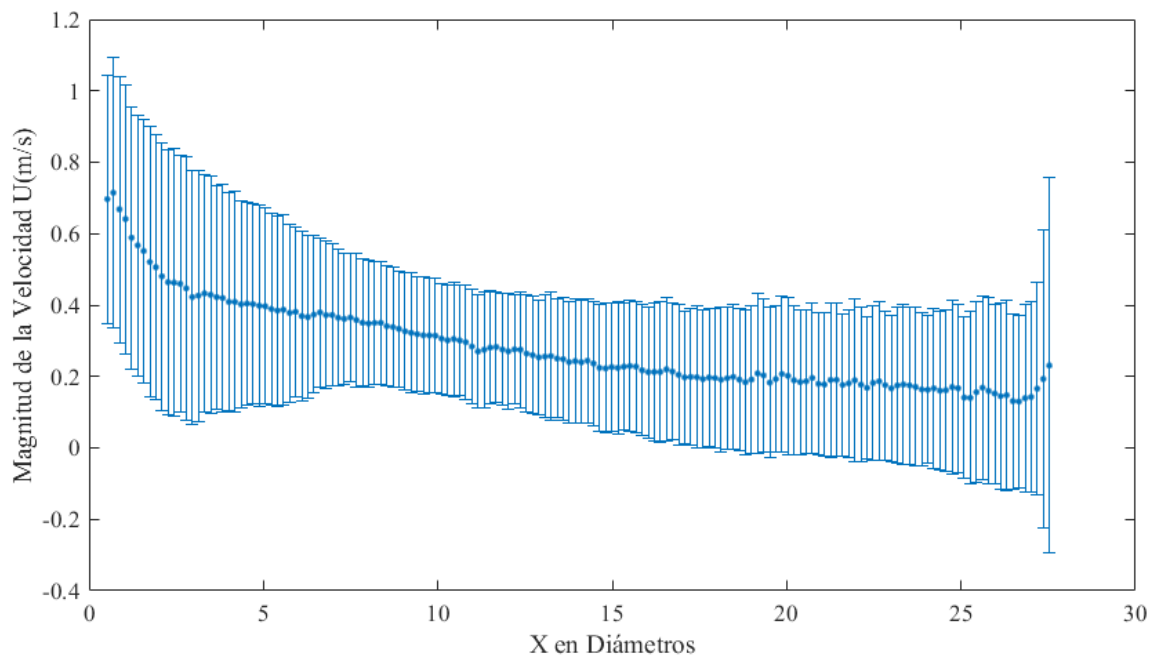


Figura 29: Gráfica del plano XZ de las velocidades U con respecto de X con su desviación estándar en la línea más cercana a la superficie del agua con la técnica PIV tradicional.

En la región inicial se puede apreciar que la velocidad decrece conforme el flujo se aleja de la tobera, las fluctuaciones de su velocidad son altas, ya que al ser la línea más pegada a la superficie al realizarle el PIV tradicional se observan reflejos de mucha intensidad debidas a las deformaciones del agua producidas por los cambios tan bruscos en la superficie libre.

En la región de transición conjunto a región con el flujo desarrollado, se observa como la desviación estándar fluctúa debido a lo anteriormente aludido, sin embargo, la velocidad decrece conforme se aleja de la tobera, lo que es lógico a esperar al desarrollarse de manera turbulenta dentro del recipiente y dejar poco a poco de presentarse estructuras en la superficie. Las estructuras son generadas por vórtices en la región de transición.

El problema de la línea de información medida es la fluctuación de la desviación estándar. El hecho de que en la toma de la superficie se ondule y se observen las estructuras, interfieren tanto con la luz que llega de la hoja láser, como los reflejos especulares formados en ella. Lo que provoca que la correlación al momento de calcular los desplazamientos con las demás áreas de interrogación genere vectores espurios por los cambios de intensidad repentinos o por la pérdida de partículas trazadoras en el video debidas al comportamiento turbulento de la superficie libre. Si bien el filtro ayuda a corregir la mayoría de estos vectores espurios, la fluctuación de la desviación estándar es notoria en comparación a las otras dos líneas de estudio, como se observa a continuación. La fluctuación tan grande en el final del movimiento se debe al corte de la toma del área de búsqueda.

La siguiente línea de estudio PIV-Ver-C mostrada en la gráfica de la Figura 30, se observa una fluctuación de la desviación estándar menor en las velocidades en la región inicial. Esto se debe a que en la zona se presentan la mayor densidad de partículas por la salida de agua de la tobera, lo que provoca un mejor seguimiento del flujo en la correlación. En la región de transición y posterior, la velocidad se mantiene en decaimiento, según lo esperado del flujo como en el caso anterior. Sus desviaciones estándar se mantienen similares conforme avanza la corriente de la salida de la tobera hasta llegar al final de la toma donde crece debido al corte de la toma.

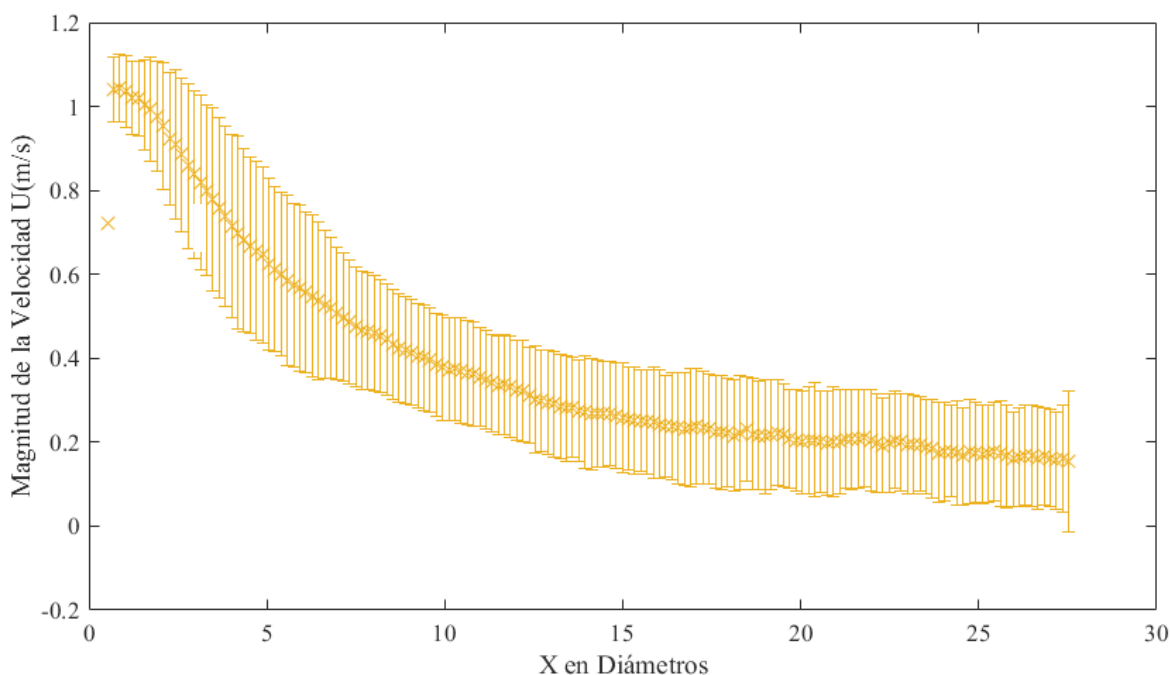


Figura 30: Gráfica del plano XZ con las velocidades U respecto del X en la línea que parte del centro de la tobera, junto a sus desviaciones estándar. Medidas con la técnica PIV tradicional.

Para la gráfica de la línea PIV-Ver-B, como se muestra en la Figura 31, en la región del flujo desarrollado, las magnitudes de la velocidad crecen conforme se alejan de la boquilla. Esto es debido al arrastre producido por la misma agua saliente de la boquilla al formarse el chorro. Como se mencionó, la región del flujo se ve afectada por la parte estacionaria del agua que va por detrás de la salida de la boquilla al interactuar con la descarga de agua se ve arrastrada a la corriente. Las fluctuaciones son menores debido a la velocidad que se mueven las partículas y a la densidad observable.

Pasados los 5 diámetros de distancia al entrar en la sección de transición se observa el máximo alcanzado por el flujo en dicha zona y posteriormente la disminución de la velocidad. Esto coincide con el arrastre ya provocado por la descarga de agua de la tobera.

Tras entrar en la región de transición del recorrido el flujo se comporta como en los casos anteriores decreciendo su velocidad hasta que el flujo se desarrolla.

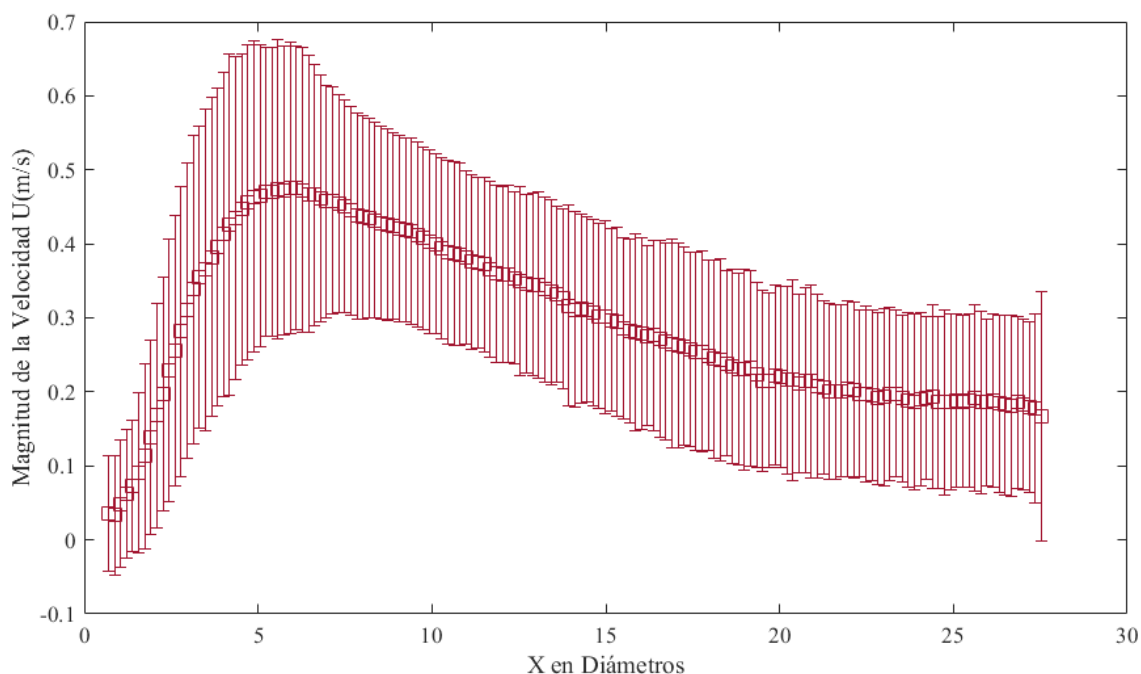


Figura 31: Gráfica correspondiente al plano XZ con las velocidades U respecto a su posición X en la línea inferior de la boquilla de la tobera. Se obtuvo con el PIV tradicional.

Al comparar los resultados de las gráficas anteriores y contrastándolas entre ellas se obtuvo la Figura 32 donde se observan sobrepuestas las tres líneas de datos. En la región del flujo desarrollado se aprecia la diferencia de comportamiento en las tres secciones, en la PIV-Ver-S empieza con menor velocidad que la del centro, caso contrario que sucede con la PIV-Ver-B donde se observa como flujo estático se incorpora poco a poco tras la primera distancia recorrida. La diferencia del recorrido se genera por el comportamiento general de la corriente en la salida de la tobera, por las condiciones de frontera que tiene en la superficie del agua y el agua en el recipiente, lo cual se ve reflejado en la fluctuación de la desviación estándar en la línea PIV-Ver-C y PIV-Ver-B en comparación a la PIV-Ver-S. Las diferencias mayores de las velocidades medidas están al inicio respecto a la línea medida en el centro de la tobera, son principalmente debidas a la altura en la que se mide cada caso.

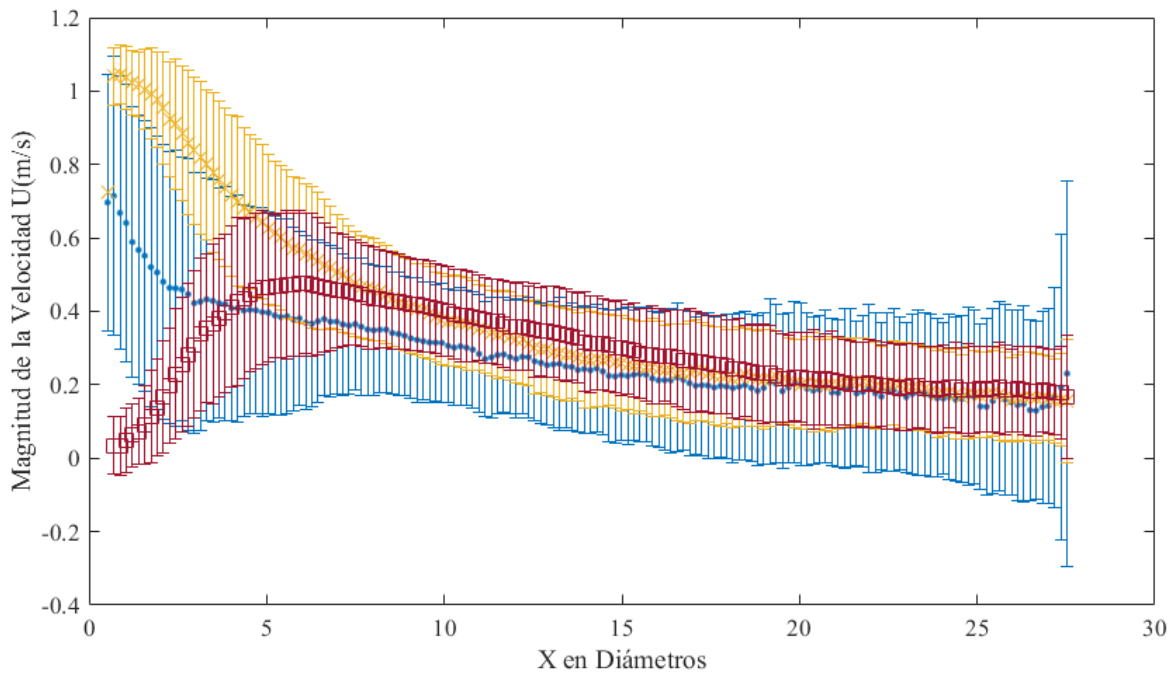


Figura 32: Gráfica comparativa de las tres líneas de velocidades U respecto a X obtenidas con el PIV tradicional.

Posteriormente en la región de transición se observa el inicio del acoplamiento de las velocidades y su disminución conforme se alejan de la boquilla e incluso en el caso de la línea inferior aumenta al cruzarse con la dirección del chorro como se compara con la Figura 28. Las velocidades en la PIV-Ver-S se mantienen con una menor velocidad a la PIV-Ver-C, debido a que se presentan las estructuras en la superficie.

En las tres líneas de medición, en la región de transición, se aprecia el decaimiento de la velocidad de 0.373 m/s a los 0.154 m/s, esto debido a que el flujo en esas zonas ya empieza a desarrollarse de forma progresiva entrando a la región del flujo desarrollado. Para observar con mejor detalle las velocidades en las dos regiones, se obtuvo la gráfica mostrada en la Figura 33. Con la gráfica se observa el cambio entre la región de transición y la región del flujo desarrollado a partir de los 15 diámetros, las tres velocidades medidas se acoplan poco a poco hasta llegar al final donde se juntan las tres líneas de velocidades que corresponden con la región del flujo desarrollado. En dicha zona se presenta la diferencia mínima respecto a la línea medida del centro en ambos casos la cual es de 0.020 m/s. Sumado a ello, como se mencionó anteriormente, en la gráfica se observa la fluctuación de los tres casos en sus desviaciones estándar la cual la diferencia es debida a la densidad de partículas que se observan en los tres casos, donde la PIV-Ver-S se ve afectada por la presencia de las estructuras superficiales como se mencionó anteriormente.

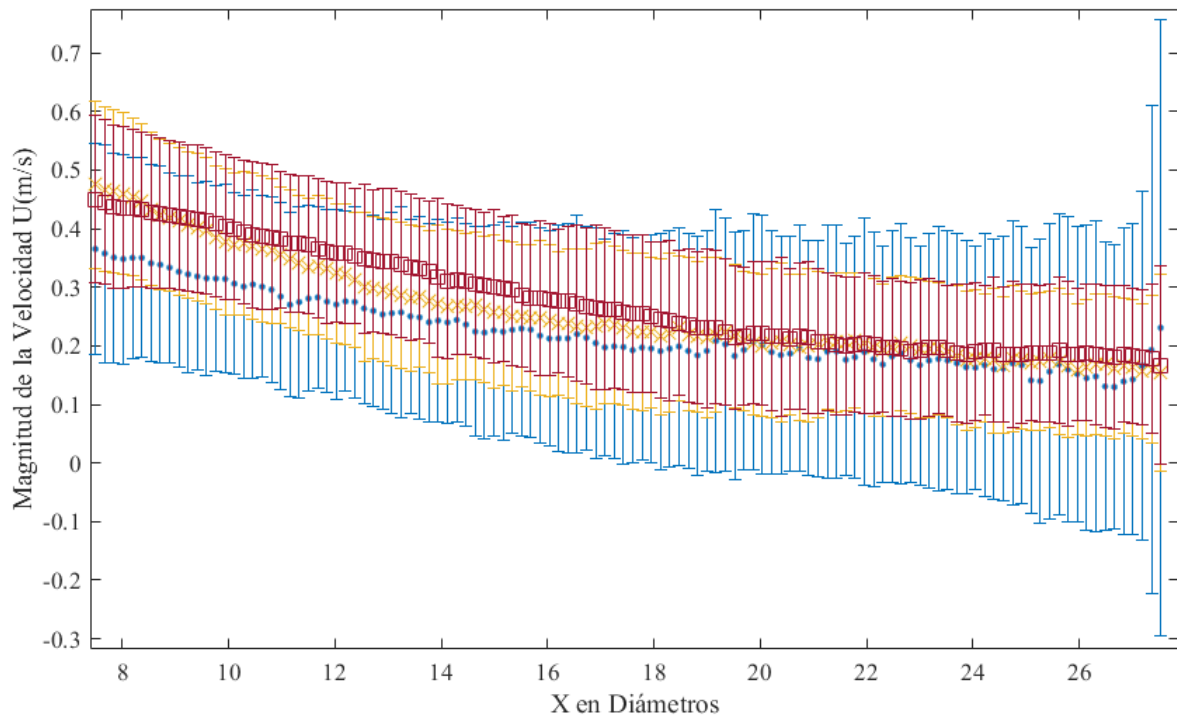


Figura 33: Gráfica comparativa de las tres líneas de velocidades U respecto a X obtenidas con el PIV tradicional a partir de los 10 diámetros de recorrido.

Para analizar el comportamiento del flujo de manera transversal se obtuvieron las gráficas mostradas en la Figura 34. Al comparar la Figura 28 con la Figura 34 se aprecian dos factores importantes, el primero son los perfiles de velocidades según la profundidad en el tanque. Entre más cerca de la boquilla se tiene un perfil cuadrado, en otras palabras, como el sombrero de copa de un chorro axisimétrico, lo que corresponde a la región inicial, y entre más se aleja el perfil del chorro desaparece por la pérdida de velocidad debido a la región de transición y posteriormente a la región del flujo desarrollado respectivamente. En estos perfiles se aprecia que la velocidad en la superficie es ligeramente menor a la inferior.

Al comparar la Figura 33 y Figura 34 la incertidumbre marcada por la desviación estándar fluctúa respecto a lo turbulento que es el flujo en sí y las recirculaciones que se producen por las distintas interacciones entre el chorro y el agua de la pecera y por las estructuras formadas por el flujo en la superficie libre.

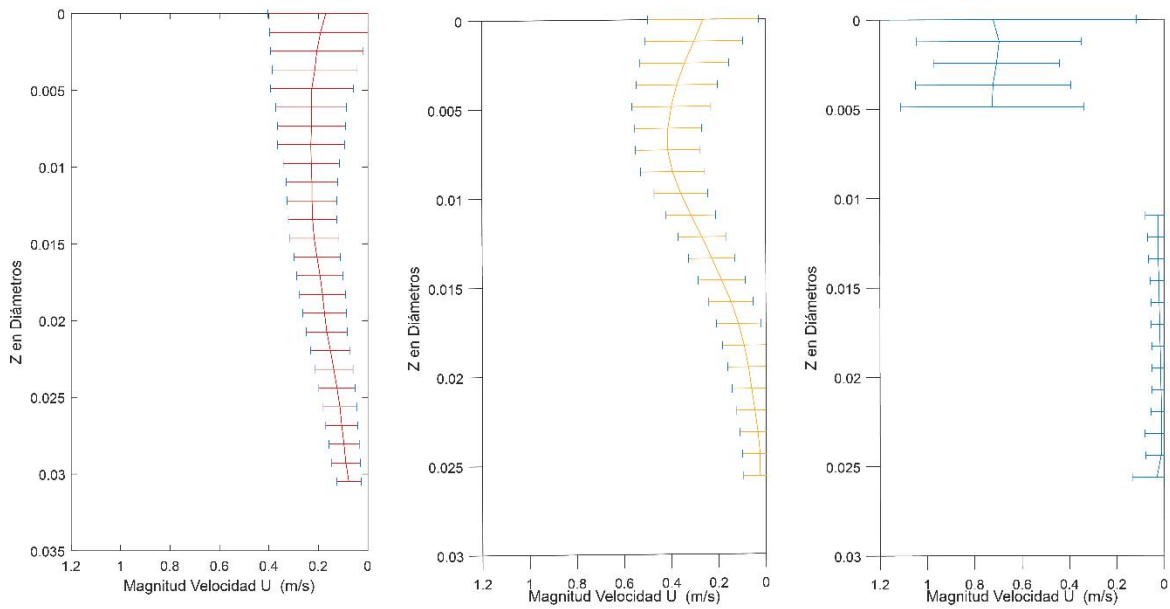
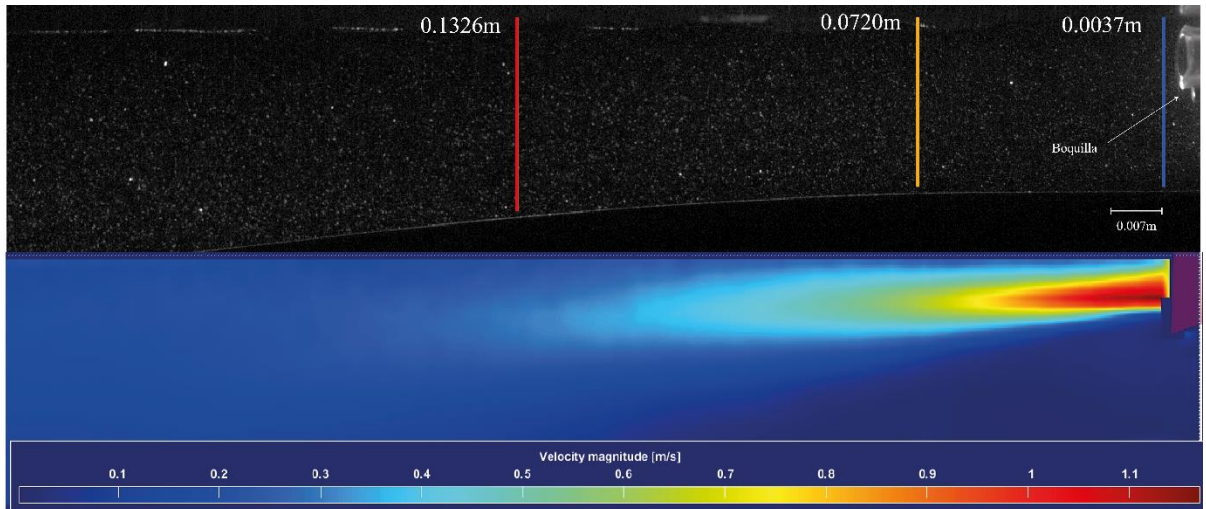


Figura 34: Gráfica de las velocidades en U respecto a tres posiciones diferentes en Z tomadas con la técnica PIV tradicional. La primera la (azul) es lo más pegada a la boquilla, la segunda (amarilla) a media distancia desde la boquilla y la tercera (roja) con el flujo se desarrolló.

5.2 PIV del corte lateral horizontal

En el corte horizontal con el espejo al aplicar el PIV tradicional, se obtuvo la gráfica mostrada en la Figura 35, la cual muestra el campo escalar de velocidades en el plano XY por debajo de la superficie del agua. El chorro formado por la tobera tiene una dirección de velocidades preferencial hacia un lateral, esto se debe a que el flujo en la tobera al descargar es turbulento por los giros de la manguera al ser acomodada en la posición final con el soporte. Esto genera que el chorro tenga una dirección preferencial.

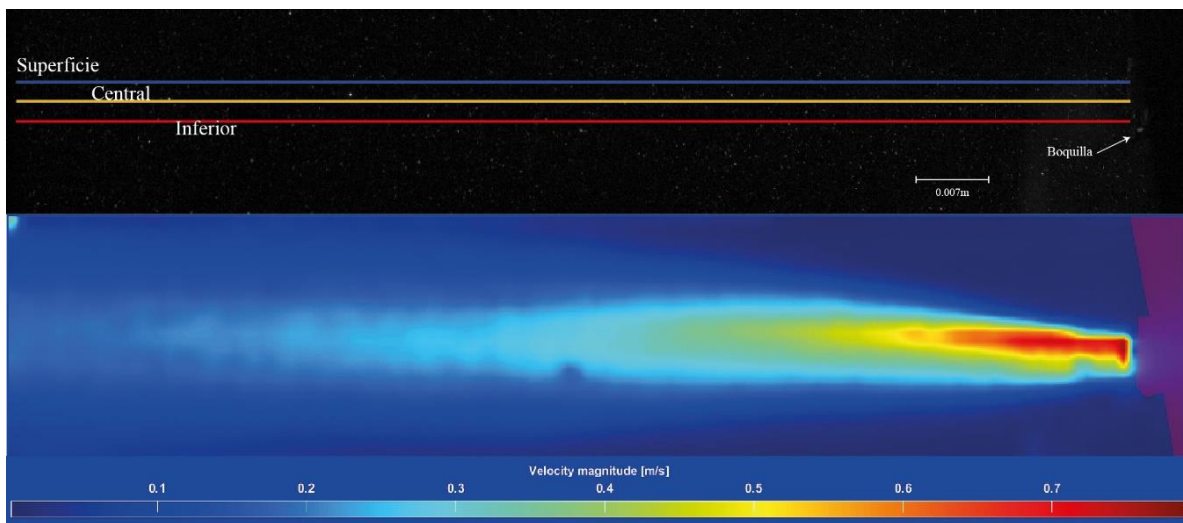


Figura 35: Promedio temporal del jet de agua producido por la tobera en el plano XY obtenido con la PIV tradicional.

De las líneas de datos seleccionadas a las cuales nos referiremos como, PIV-Hor-S como la superior, PIV-Hor-C la centro y PIV-Hor-I la inferior de las velocidades medidas con el PIV tradicional y se graficaron respecto a la distancia en X desde la boquilla de la tobera. De igual manera que en la sección anterior, las velocidades se estudiarán a partir de las regiones de un chorro axisimétrico, la región inicial entre 0 a 5 diámetros de recorrido y la región de transición de los 6 a los 15 diámetros y del flujo desarrollado de los 16 diámetros en adelante.

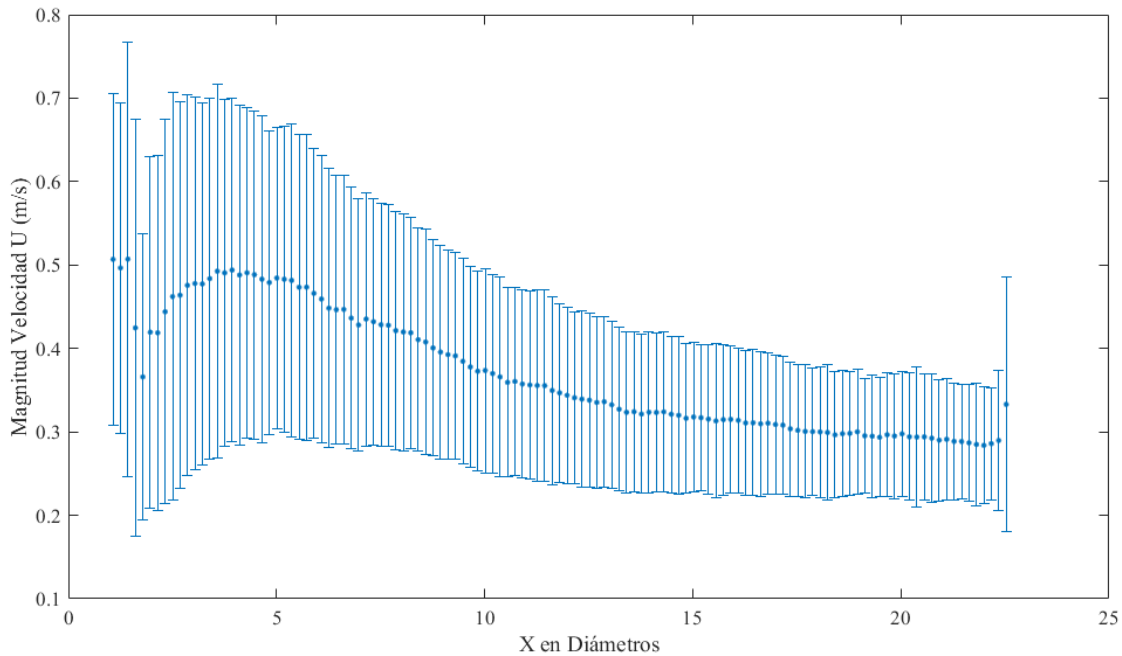


Figura 36: Gráfica de las velocidades U en la dirección X de la toma lateral horizontal medida con la técnica PIV tradicional. La grafica corresponde a la línea superior de la toma.

En la gráfica de la línea PIV-Hor-S se observa como en la región inicial del flujo se hace presente el mismo fenómeno de crecimiento en la velocidad U conforme se incorpora al movimiento del chorro. Al llegar a los 5 diámetros llega a un máximo de velocidad y después decrece en cuanto se aleja de la boquilla, el mismo comportamiento lo tiene la fluctuación de la desviación estándar.

La fluctuación de los datos al principio se observa que es alta la cual corresponde a una zona donde el agua se incorpora de estar estática y se mezcla con el chorro lo que corresponde a una zona donde la densidad de partículas no es alta como lo es en el centro de la tobera. Al entrar en la región de transición el recorrido la velocidad del flujo disminuye mientras más se aleja de la tobera, como se observa de igual manera en el PIV-Ver. La fluctuación de la desviación estándar en el punto final crece tanto pues corresponde a la zona en la que se acaba el espejo.

Para las velocidades U tomadas en la línea PIV-Hor-C mostradas en la Figura 37, al tener una mejor densidad de partículas en el inicio de la tobera, se observa cómo la fluctuación de la desviación estándar es menor y se mantiene a lo largo del movimiento.

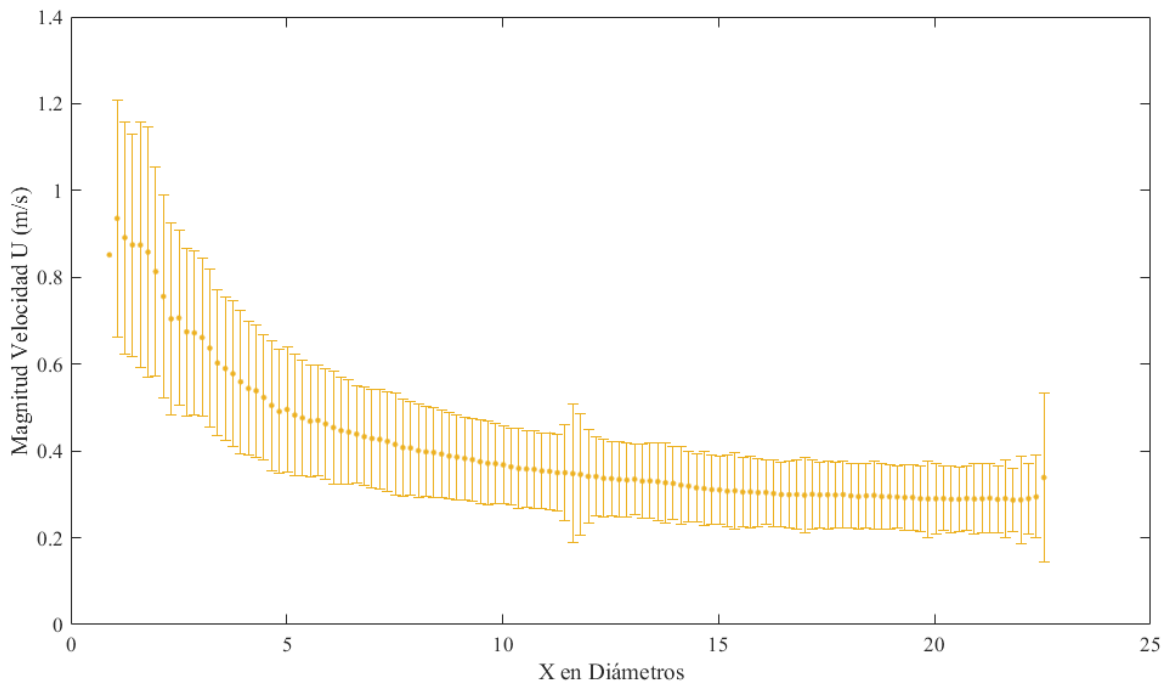


Figura 37: Gráfica de las velocidades U en la dirección X de la toma lateral horizontal medidas PIV tradicional. La grafica corresponde a la línea del centro de la tobera.

En la región inicial se observa que la velocidad crece abruptamente, al encontrarse dentro del núcleo potencial del flujo y posterior a ello decrecer para entrar a la región de transición como se observa en la Figura 35. Cabe mencionar que las mediciones son por debajo del centro geométrico de la boquilla, y al no ser un chorro axisimétrico, la velocidad máxima alcanzada no es la máxima del chorro en su región inicial.

Específicamente en la zona donde se observa una fluctuación en la desviación estándar en la mitad del recorrido justo en la región de transición entre los 12 y 13 diámetros recorridos puede deberse a cambios de intensidad por la presencia de las estructuras superficiales en fondo de la toma, lo que produce ruido en el plano de grabación que no puede ser evitado del todo. El comportamiento de las velocidades en la región de transición se acopla con lo observado en los demás casos, donde al desarrollarse el flujo la velocidad decrece gradualmente. Así mismo la desviación estándar del punto final fluctúa más que las demás ya que corresponde a la zona en la que se acaba el espejo.

En los datos medidos en la PIV-Hor-I mostrados en la Figura 38, se observa el decaimiento de la velocidad desde la salida de la tobera en la región inicial del recorrido, con una alta fluctuación de su desviación estándar. El comportamiento del flujo de la línea refleja de igual forma lo explicado en los anteriores casos, con la velocidad del agua que decrece constantemente en la región de transición y posteriormente con el flujo ya desarrollado.

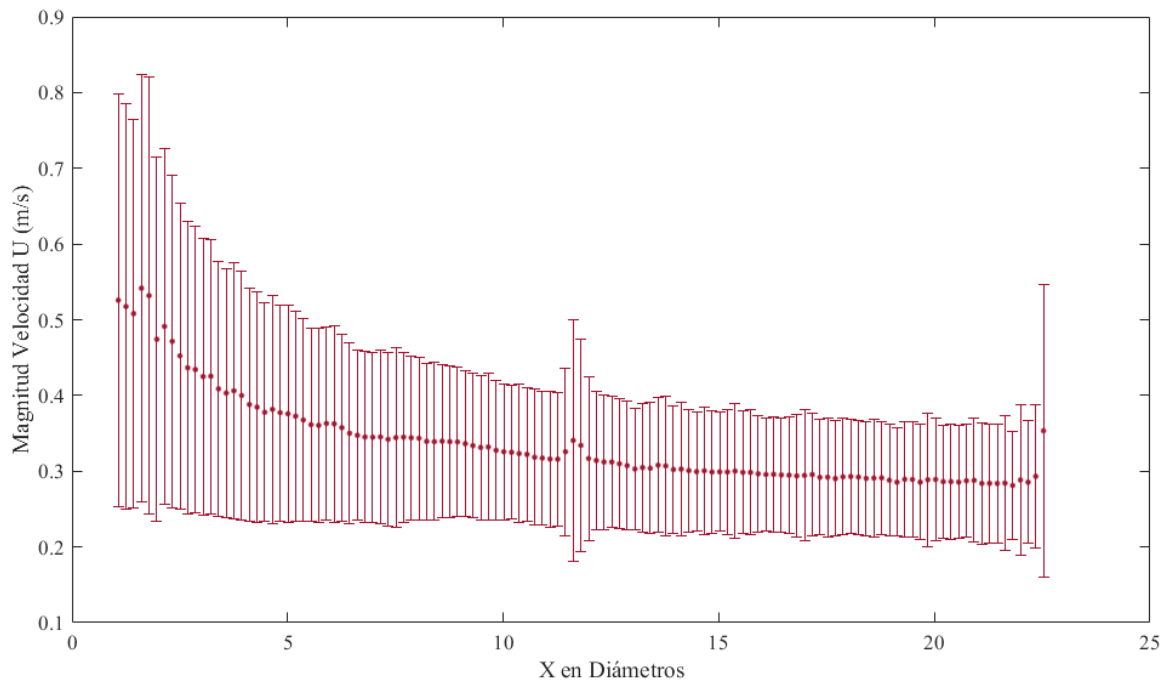


Figura 38: Gráfica de las velocidades U en la dirección X de la toma lateral horizontal medida con PIV tradicional. La grafica corresponde a la línea del inferior de la tobera.

Para observar con más detalle las velocidades medidas, se juntaron las tres gráficas en una, la cual se muestra en la Figura 39. Como se observó en cada caso, el flujo tiene una dirección preferencial a uno de los laterales, la cual es provocada por la misma instalación de la manguera ya que el flujo del chorro desde su recorrido por la manguera llega con turbulencias. Al comparar el campo escalar de velocidades de la Figura 35 y las velocidades medidas de la Figura 39, se aprecia como el flujo del chorro en promedio tiene una dirección preferencial por el lado superior de la toma. Esto se observa con la diferencia de velocidades medidas en la línea PIV-Hor-S e PIV- Hor-B respecto a la central, donde se observa que las velocidades de la línea inferior son menores a la PIV-Hor-C y PIV-Hor-S. En dicha región la diferencia de velocidades respecto a la velocidad PIV-Hor-C es de 0.860 m/s, de 0.366 m/s en PIV-Hor-S y de 0.531 m/s en PIV-Hor-I a una distancia de 1 diámetro de recorrido.

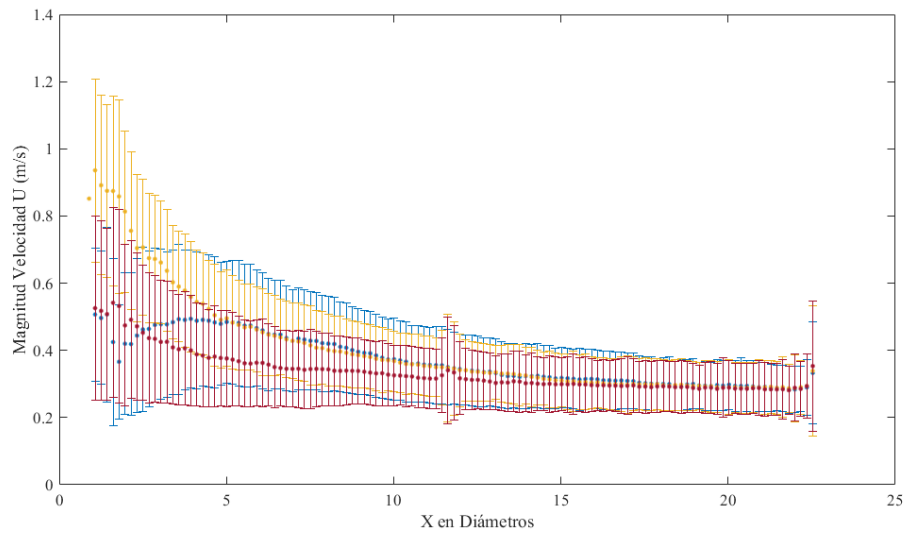


Figura 39: Gráfica que muestra las velocidades promedio U en comparación de su posición en X .

Con las velocidades medidas en la región de transición y del flujo desarrollado, en los tres casos se nota una tendencia de agruparse al desarrollarse el flujo, como se mencionó anteriormente. Se aprecia la disminución de la desviación estándar en los tres casos, debido a que el flujo se vuelve más uniforme. A los 19 diámetros de recorrido, respecto a la línea PIV-Hor-C las velocidades rondan entre los 0.294m/s, en la PIV-Hor-S de 0.295m/s y en la PIV-Hor-I de 0.285m/s. Al ajustar los límites de la Figura 39 se obtuvo la Figura 40 para visualizar de mejor manera la separación entre la región de transición y región del flujo desarrollado.

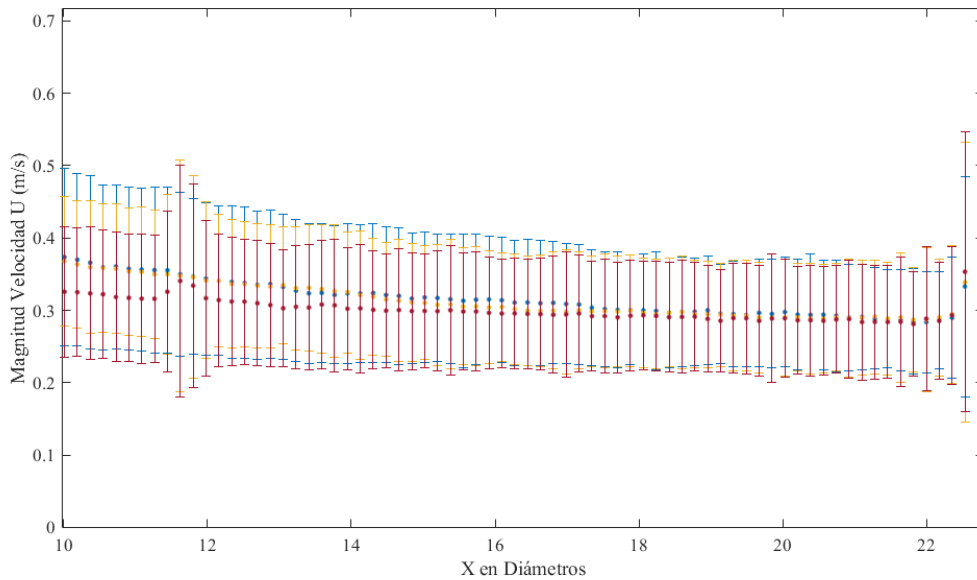


Figura 40: Gráfica del corte lateral de las velocidades U con los límites puestos a partir de los 10 diámetros de distancia respecto a la tobera.

Al igual que en el caso anterior, para obtener los perfiles de las velocidades U (en la dirección X) respecto al eje Y se obtuvo la gráfica mostrada en la Figura 41. Se observa como el flujo no tiene un perfil de velocidades axisimétrico. En las otras dos líneas, tanto la amarilla como la roja, se observa el perfil de velocidades más uniforme y acoplado al flujo desarrollado. La fluctuación de la desviación estándar de estos cortes puede ser debida a que, en esas secciones, se pueden presentar varios movimientos turbulentos debidos al contacto que hay con la superficie libre y el piso falso. En las orillas de cada una de las gráficas también se aprecian ciertos crecimientos de las desviaciones estándar, sin embargo, coinciden con los bordes del espejo.

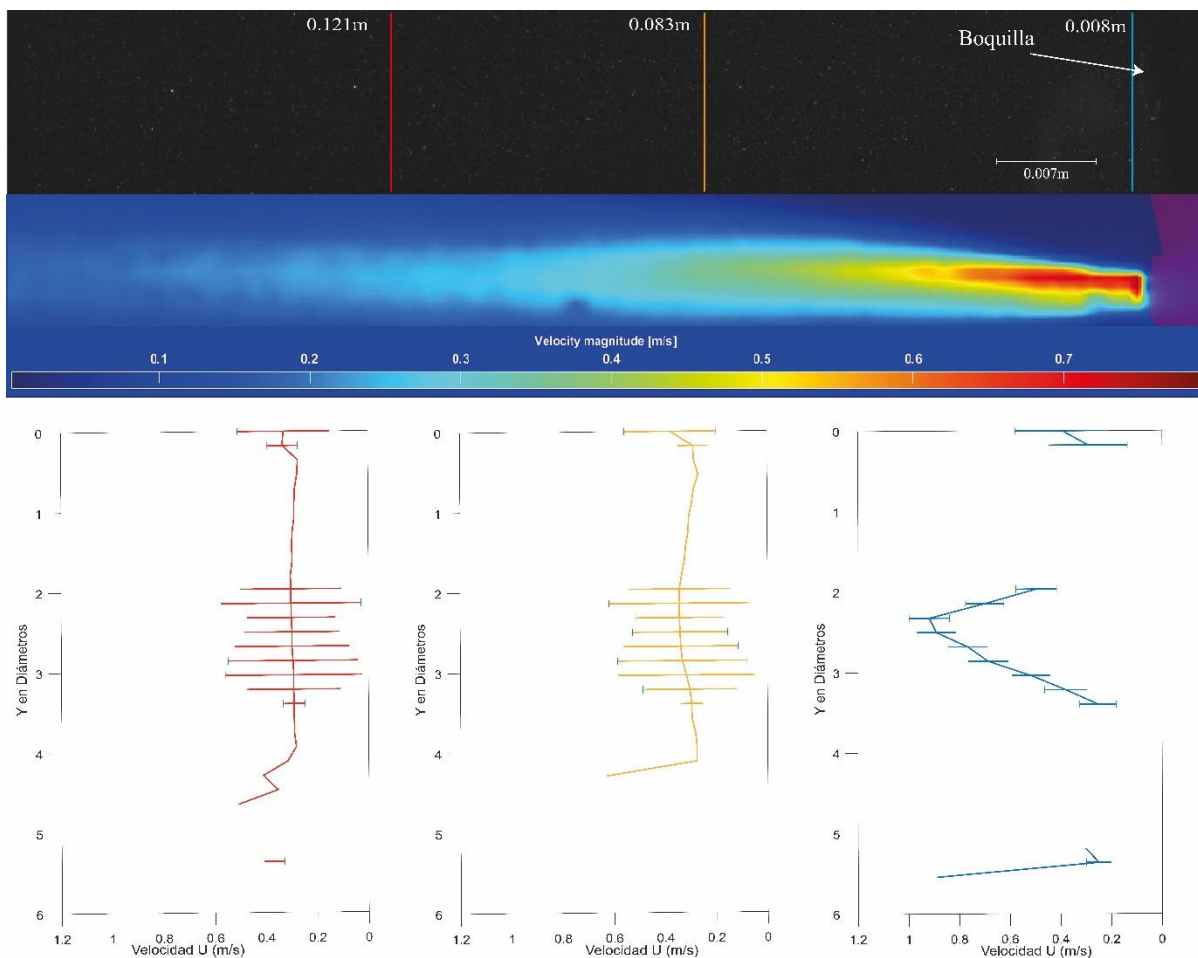


Figura 41: Gráfica de las velocidades en U respecto a tres posiciones diferentes en Y . La primera es la más pegada a la salida de la boquilla (azul), la segunda a 10 diámetros de distancia (amarilla) y a 20 diámetros de distancia (roja).

5.3 Resultados LSPIV superficial.

Tras el preprocesado las imágenes, como se muestra en la Figura 42, se observaron las estructuras del flujo como se muestra en la Figura 43 (a) y del PIVlab se graficó el campo de velocidades de la superficie como se muestra en la Figura 43 (b) y se obtuvo el campo escalar de velocidades (c) como en los casos anteriores.

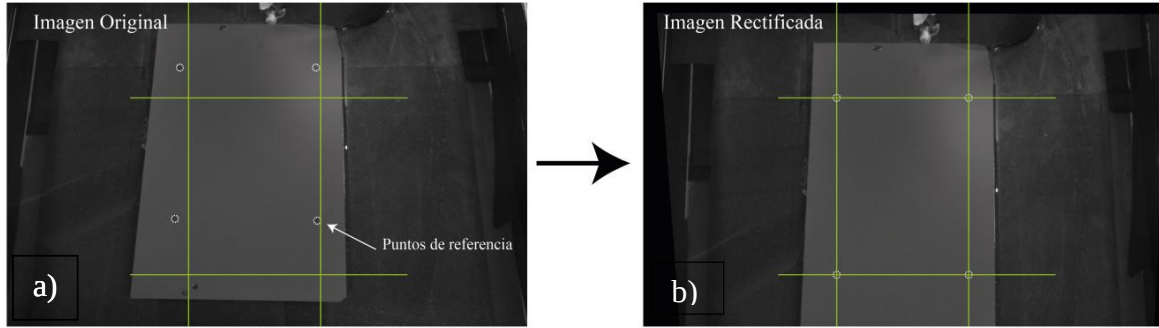


Figura 42: a) Fotografía con la hoja de puntos de referencia antes del procesamiento. b) Misma fotografía ortorectificada por proyección.

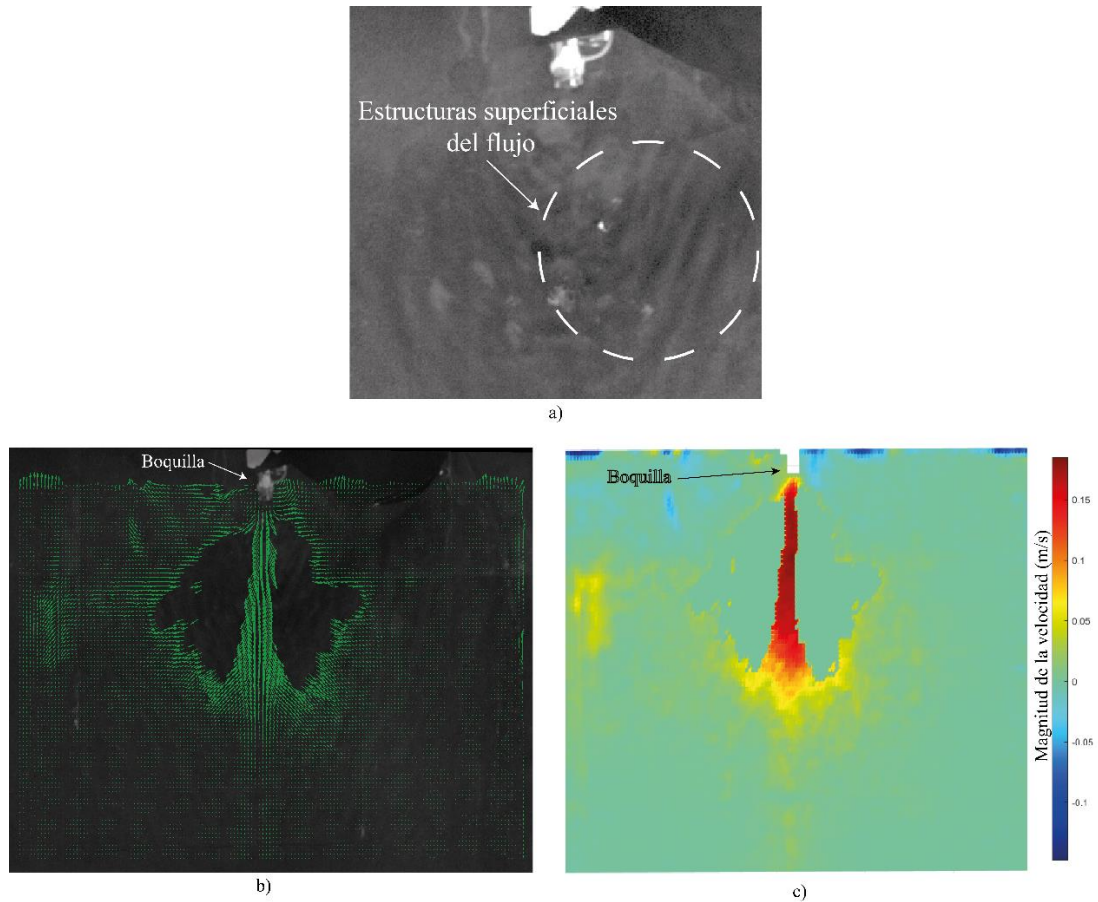


Figura 43: (a) Fotografía de las estructuras superficiales (b) Campo de velocidades promedio filtrado y medido con LSPIV en el plano XY al solo considerar el movimiento del jet. (c) Campo escalar de velocidades obtenido del LSPIV en la superficie en el plano XY.

Al observar el campo escalar de velocidades de la superficie libre en la Figura 43 (c), se observa que en la región cercana a la boquilla no hay presencia de estructuras, sin embargo, posteriormente si hay presencia de ellas lo que logra medir las velocidades. Al hacer coincidir las distancias recorridas de las estructuras con lo que se observa a simple vista y las velocidades del chorro se define un recorrido de presencia de estructuras con una distancia de 0.19m. En la gráfica, se aparecía que después de una cierta distancia desde la boquilla en el flujo no se presentan estructuras medibles, lo que corresponde a la región del flujo desarrollado.

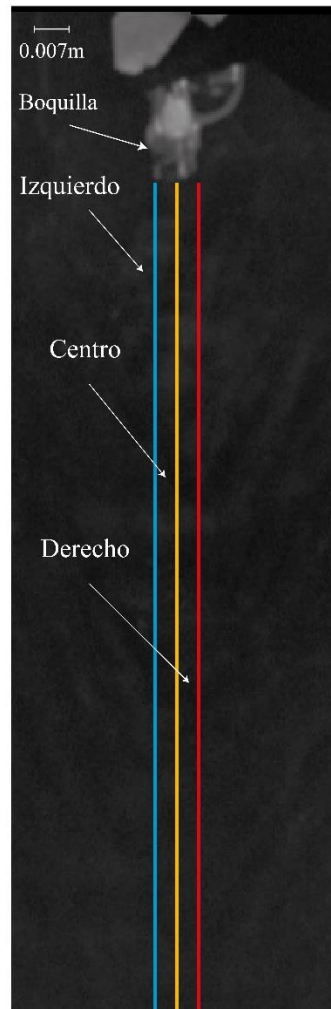


Figura 44: Esquema de la localización de las líneas de medición de la velocidad U respecto a X en la superficie.

Para el análisis de las líneas de datos mostradas en la Figura 44, se realizaron las gráficas mostradas en la Figura 45, Figura 46 y Figura 47 correspondientes a las líneas que indicaremos como LSPIV-I la izquierda, LSPIV-C la del centro y LSPIV-D la derecha respecto al diámetro de la tobera. Como en los casos anteriores se dividirá el flujo en región inicial de los 0 a los 5 diámetros de recorrido, la región de transición de 6 a los 15 diámetros y la región del flujo desarrollado de los 16 diámetros en adelante.

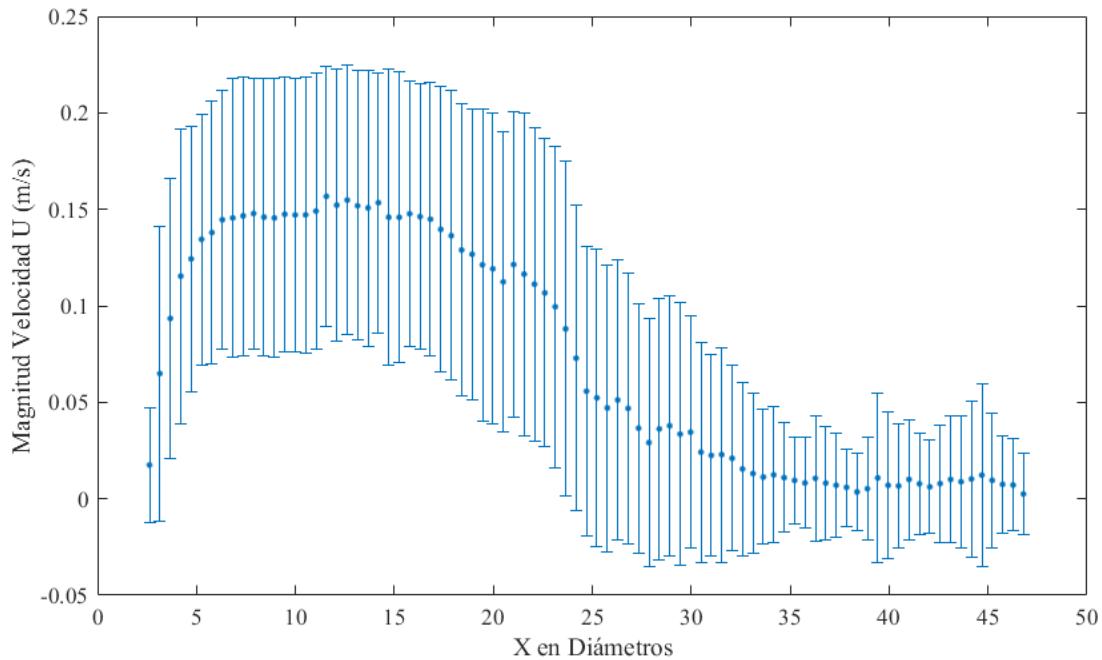


Figura 45: Gráfica de las velocidades U contra su posición X en el lateral izquierdo de la tobera, obtenida con LSPIV.

En la línea del lado izquierdo, en la región inicial, las velocidades U mostradas en la Figura 45, aumenta mientras se aleja de la tobera. Al comparar la región con lo que se observa a simple vista en la superficie, coincide con una nula presencia de estructuras. En la región de transición, donde en la grabación se presentan las estructuras en la superficie, se observa el crecimiento de las velocidades medidas y que posteriormente se mantienen constantes. En el flujo desarrollado, se observa el comportamiento y decaimiento de la velocidad del flujo, esto a su vez coincide con la presencia y posterior desaparición de las estructuras en la superficie. Las fluctuaciones de la desviación estándar son debidas a los cambios periódicos de las estructuras.

Con la línea de velocidades medidas desde el centro de la tobera como lo muestra la Figura 46 y al compararlo con lo que se observa en las grabaciones, al no tener estructuras en la región inicial no se logran medir velocidades. En la región de transición, se mantiene una velocidad constante hasta los 15 diámetros. Consecutivamente la velocidad empieza a decrecer al tener el flujo desarrollado y no presentar estructuras en la superficie. En las grabaciones se observa como las estructuras se disipan en la superficie, lo que no permite que el algoritmo detecte cambios de intensidad.

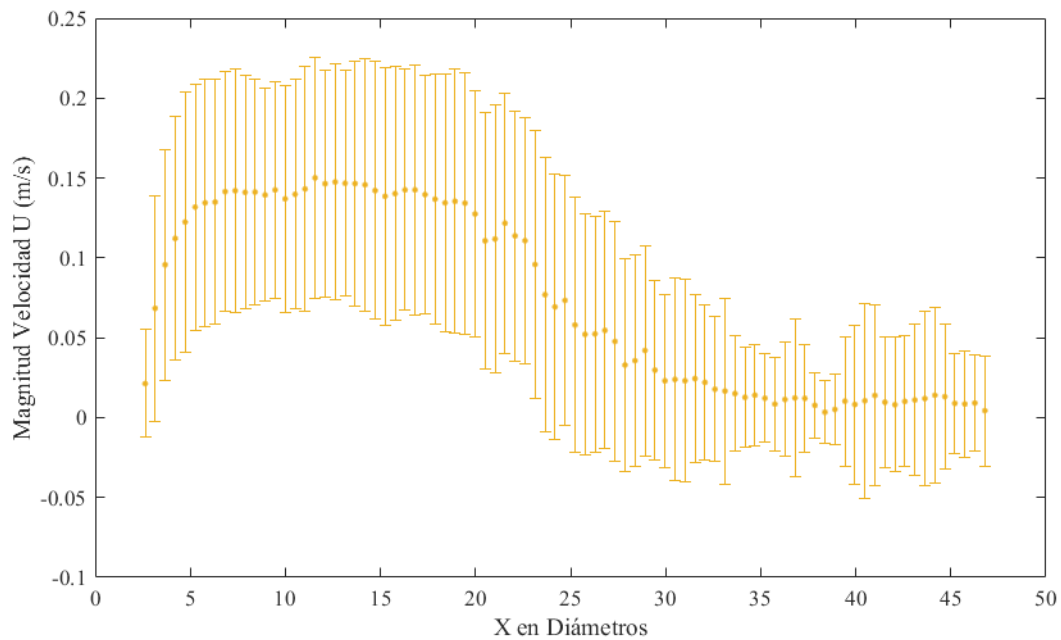


Figura 46: Gráfica de las velocidades U contra su posición X en el centro de la tobera, medidas con la técnica LSPIV.

Mismamente las fluctuaciones de las desviaciones estándar medidas de las velocidades varían en las zonas en las que se tienen o no presencia de ellas, ya que al realizar la correlación y no tener estructuras solo se depende de los cambios de intensidad detectados por el sensor de la cámara. En la Figura 47, se observa el mismo comportamiento del flujo a lo largo del recorrido desde la punta de la tobera que en los casos anteriores.

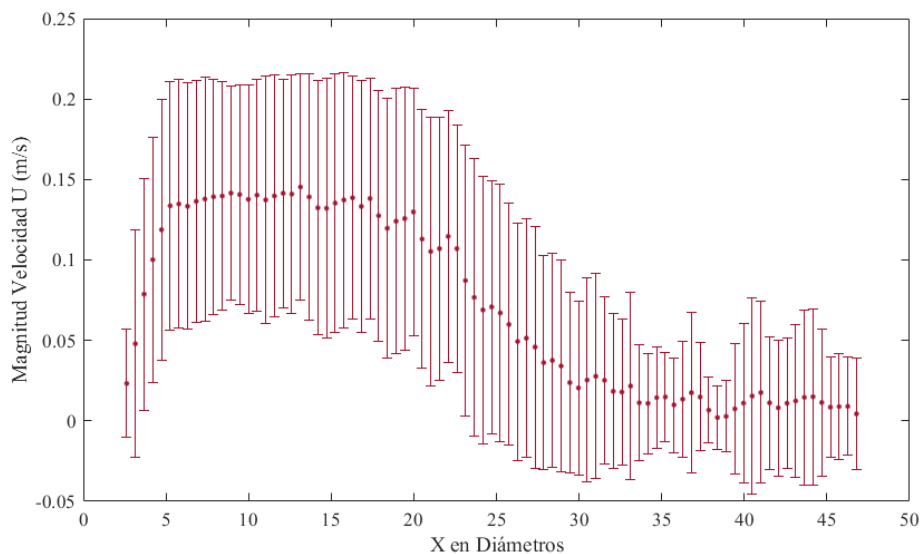


Figura 47: Gráfica de las velocidades U contra su posición X en el lateral derecho de la tobera medida con la técnica LSPIV.

El comportamiento en conjunto de las tres secciones se observa en la Figura 48 al comparar líneas de datos de las velocidades. En las tres se observa un comportamiento similar en las medidas. En lo que correspondería a la región inicial y en una sección del flujo desarrollado, no se observan estructuras en la superficie libre, sin embargo, en la región de transición y parte inicial del flujo desarrollado, en las que hay presencia de las estructuras, se observa que las velocidades se mantienen constantes. Se mide que las velocidades del LSPIV-I predominan sobre las demás. Esto se debe al mismo flujo que va directamente con una dirección preferencial por la manipulación misma de la tobera, como se explicó en el PIV-Hor.

La máxima diferencia entre las velocidades entre el LSPIV-C y las demás se da a los 40 diámetros de recorrido. La diferencia se presenta en las distancias en las que no se presentan estructuras y no están relacionadas con lo que se requiere medir del chorro. La diferencia mínima de las velocidades respecto al LSPIV-C medida de 0.077m/s respecto a la LSPIV-D a los 23 diámetros de recorrido fue de 0.076m/s, y respecto a la LSPIV-I a los 17 diámetros de 0.0136m/s contra 0.137m/s de la línea céntrica. En ambas zonas aún hay presencia de estructuras.

Al analizar más de cerca la gráfica de la Figura 48 en el intervalo entre los 5 y 30 diámetros como se muestra en la Figura 49, observamos el comportamiento conjunto y constante que tiene la velocidad en las zonas donde más se presentan las estructuras. La desaparición de las estructuras se ve reflejada por la pérdida de velocidad del flujo al desarrollarse.

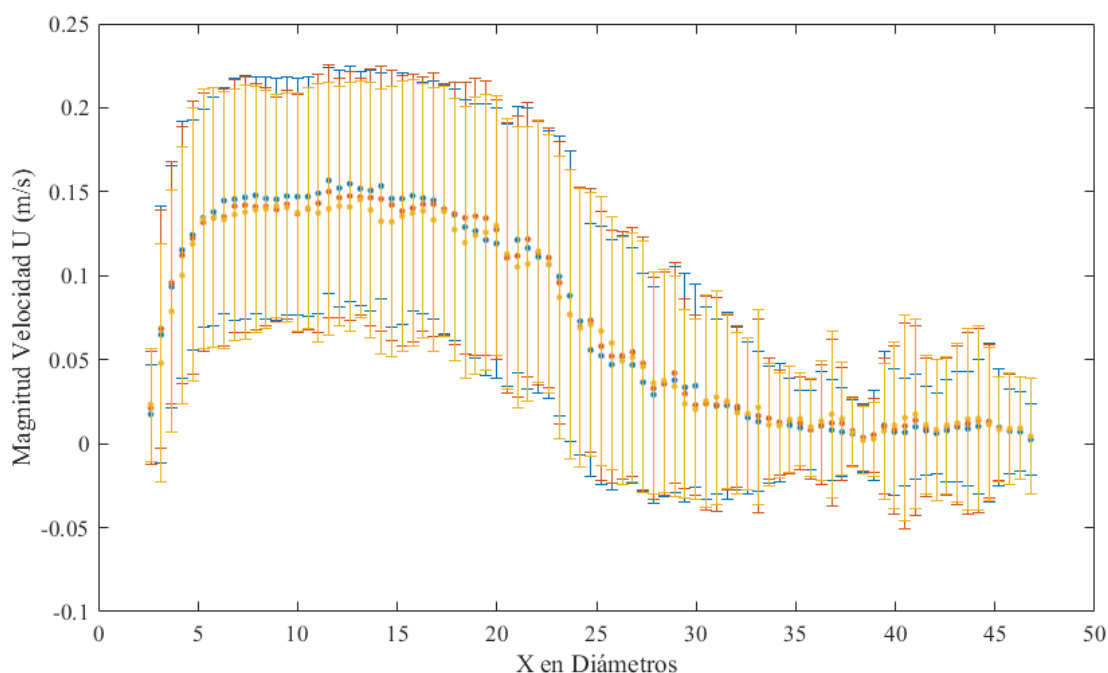


Figura 48: Gráfica de las velocidades U contra su posición en X de las tres líneas de estudio medido con la técnica LSPIV.

La fluctuación en la desviación estándar de los tres casos en la zona donde más se presentan estructuras es evidencia de cómo la correlación mide los desplazamientos con los cambios de intensidad. Algo a notar es que las velocidades laterales medidas se presentan mayores a las velocidades que las medidas en el LSPIV-C de la tobera. Esto se debe a que el flujo en la superficie y en las estructuras se disipaban a lo largo y ancho de ella sin restricción alguna. Lo que provoca que por lo menos en el LSPIV-C de datos, donde se observa la mayor cantidad de estructuras superficiales, sean las que se midan. También, debido al filtrado de datos, no se consideraron las velocidades de las estructuras laterales provenientes del arrastre del flujo, las cuales se dispersaban a los lados de la tobera, las cuales son visibles en la grabación, pero no se tomaron en cuenta para el análisis al ser consecuencia del chorro y no en la dirección en la que se puede comparar gracias al filtrado de datos como se indicó.

Observar en conjunto las tres líneas de datos y definir un intervalo de distancias en la cual se pueden realizar mediciones, presenta una región en la que se puede realizar el seguimiento de ellas, lo que coincide con la región de transición y en parte del flujo desarrollado.

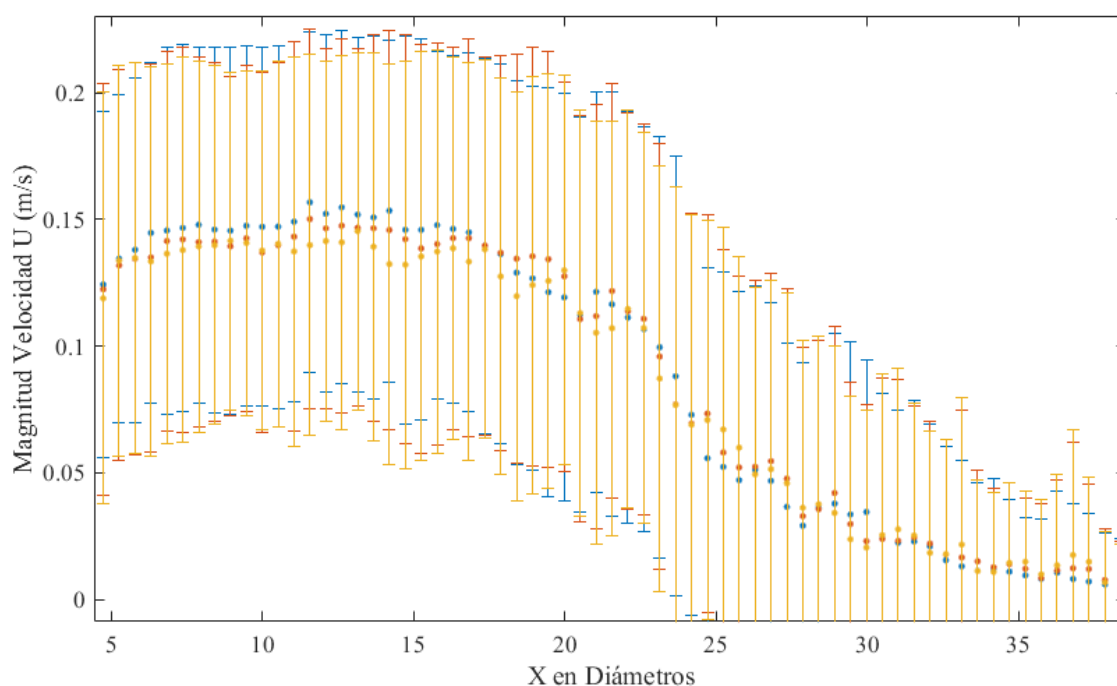


Figura 49: Gráfica de la velocidad en U respecto a su posición en X entre los 5 y 30 diámetros de recorrido medida con LSPIV.

Por último, se analizaron tres cortes horizontales a tres distintas longitudes respecto a la boquilla, para obtener los perfiles de las velocidades U respecto al eje Y . Se muestran en la Figura 50 y se aprecian en sus tres distancias los perfiles del chorro con las

velocidades U de algunas de las estructuras que se forman. Además, estos perfiles se graficaron con las velocidades filtradas solo con el movimiento del centro del flujo y no de las estructuras que se dispersan a los lados. Por lo que se logra apreciar el comportamiento de las estructuras provocadas por el chorro.

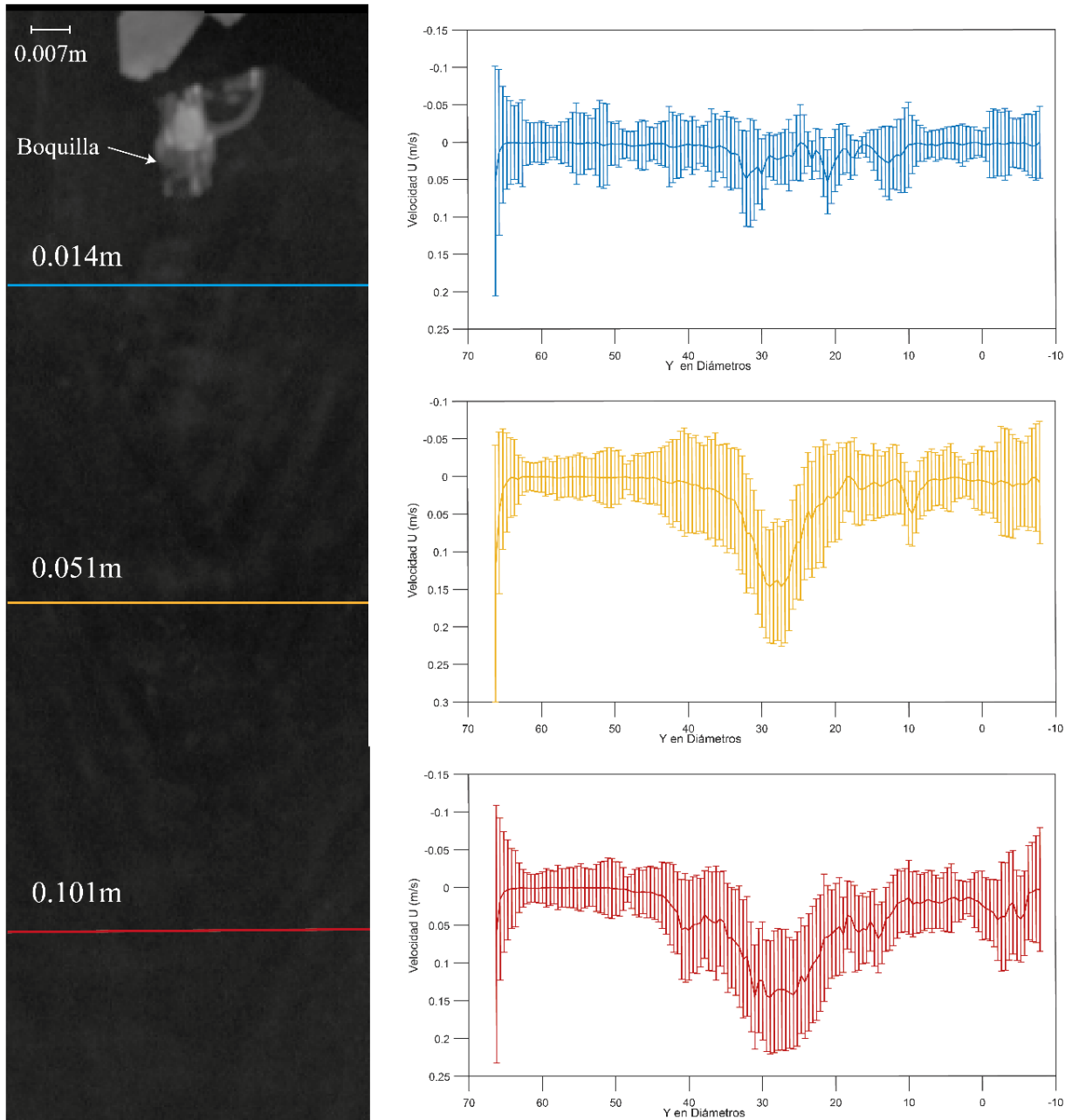


Figura 50: Gráficas de la velocidad U respecto su posición en Y obtenidas analizando las estructuras de la superficie con LSPIV y las respectivas líneas que corresponden.

5.4 Comparación de los tres perfiles obtenidos.

Para cumplir el objetivo, se compararon las velocidades promedio del flujo en los tres casos. Primeramente, se compararon los campos escalares de velocidad de los flujos medidos con la técnica PIV tradicional mostrado en la Figura 51. En ella con lo visto en cada uno de los casos por separado, las velocidades disminuyen conforme se alejan de la boquilla. En la primera región se presentan las zonas del núcleo potencial y posteriormente el flujo se desarrolla.

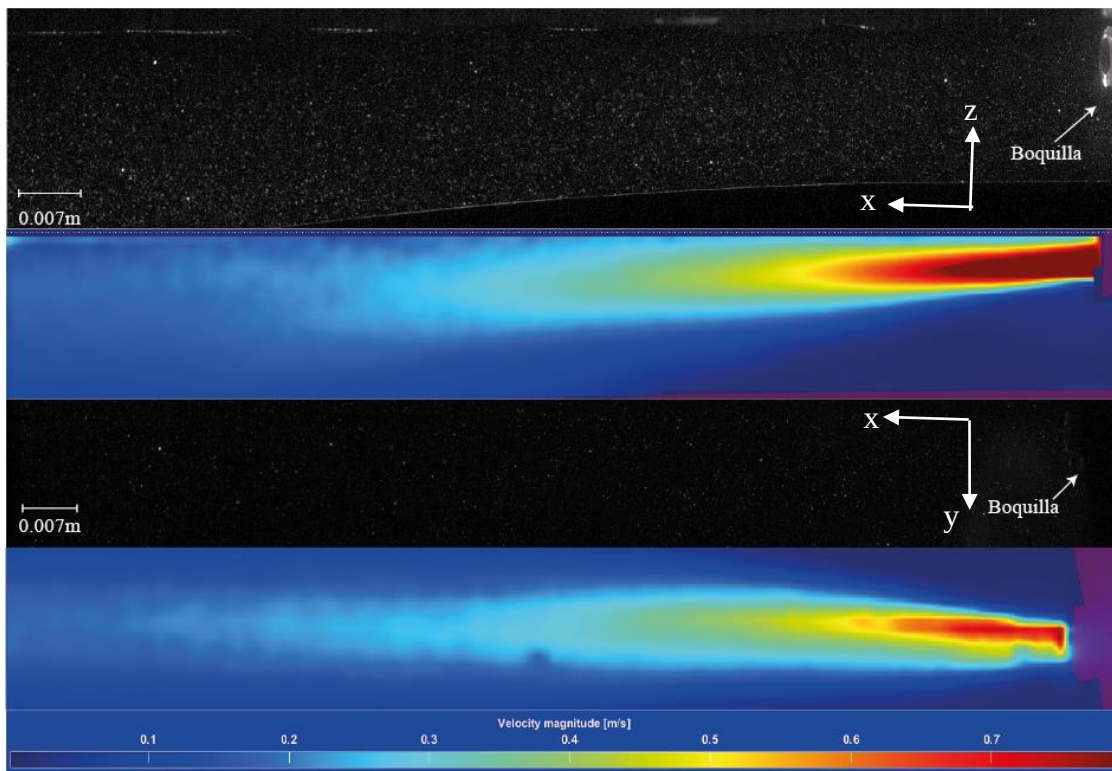


Figura 51: Comparación de los promedios temporales de los dos cortes del flujo. La imagen superior es el corte vertical y la inferior es el corte horizontal medidos con la técnica PIV tradicional.

En los dos primeros casos obtenidos con el PIV tradicional, nos podemos dar cuenta de la necesidad que recae en la iluminación para medir las velocidades de acuerdo con las características físicas del flujo, como se indicó en el filtrado de datos. Lo que limitó la resolución de cada movimiento por los tiempos de exposición de la cámara y el seguimiento cuadro a cuadro entre las densidades de las partículas trazadoras.

Al comparar las velocidades en la dirección del flujo con las líneas del centro de ambos videos, observamos que antes de los 11 diámetros de recorrido respecto al inicio de la tobera la velocidad es ligeramente mayor que en el PIV-Hor. Sin embargo, después de esa distancia las velocidades del flujo del PIV-Hor son mayores a las medidas en el PIV-Ver. En las dos tomas la diferencia más grande en velocidades corresponde a la zona en la que emerge el chorro y la velocidad medida del flujo en PIV-Ver es mayor, ya que se mide en el centro geométrico de la boquilla, mientras que en el corte horizontal es unos

milímetros por debajo. El mínimo de diferencia entre las velocidades coincide a los 11 diámetros de recorrido en el punto donde se interceptan las velocidades medidas. En consecuencia, tras este punto, la velocidad en el corte horizontal crece mientras que la medida con el corte vertical decrece. Toda la información se aprecia en la gráfica de la Figura 52.

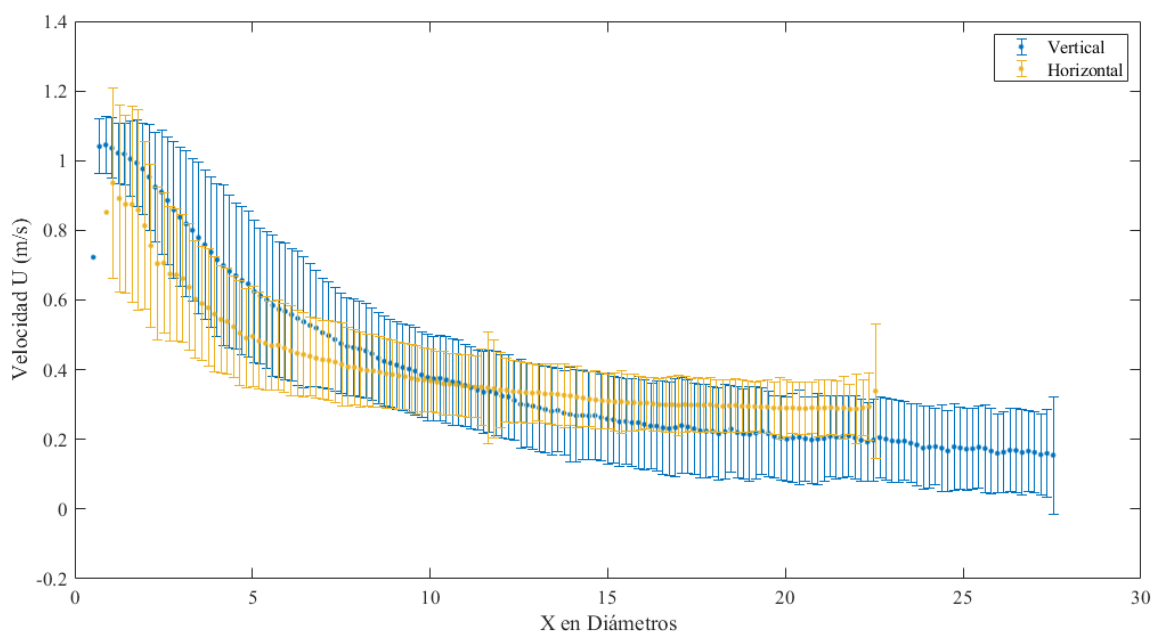


Figura 52: Velocidades U medidas del centro corte horizontal (amarillo) y vertical (azul), medidos con PIV tradicional.

Este plano de grabación, como se indicó anteriormente, quedó por debajo del centro de la boquilla, y como se observa en el campo escalar de la Figura 51 y al compararlo con la Figura 52, el flujo se desarrolla más rápido por abajo del agua hasta que se disipe su energía en el recipiente. En la interfaz de agua y aire se generan las estructuras turbulentas ondulatorias, lo que produce que las mismas disminuyan la velocidad del chorro al disipar energía del flujo. Al considerar la trayectoria del chorro de agua al descargar en el recipiente es normal que se pueda medir una velocidad mayor en una capa por debajo del centro de la tobera después de una cierta distancia.

Al comparar los promedios temporales del PIV-Hor y del LSPIV se obtuvo lo mostrado en la Figura 53. Se tomó en consideración la limitante experimental de ambas tomas, puesto que el video con el espejo está restringido a la distancia visible por el mismo en comparación a toda el área observable en el video superficial. Se delimitó la zona de comparación a los 22 diámetros de recorrido respecto a la boquilla de la tobera.

Con la Figura 53, se cotejaron ambos movimientos desde la boquilla, en la región inicial, donde en el LSPIV no se miden velocidades ya que no hay presencia de estructuras, como se explicó en su sección, al comparar con el PIV-Hor se puede completar las mediciones de la velocidad cercana a la boquilla. En esta región la misma velocidad medida

en esta región no logra producir una estructura identificable para la correlación en la superficie lo que presenta una diferencia de resolución espacial en ambos casos. Esto se debe a que en esa región el flujo se considera laminar. Posteriormente tras alejarse de la boquilla en la región de transición, se observa como mantienen la misma velocidad promedio en toda su trayectoria, sin embargo, en el caso PIV-Hor vemos el desarrollo del chorro junto al decaimiento de la velocidad conforme el flujo se incorpora en la pecera. La velocidad en la zona superficial, en la que se presentan las estructuras se mantiene constante hasta que posteriormente desaparecen y por ende se pierde la información con la cual se pueda correlacionar.

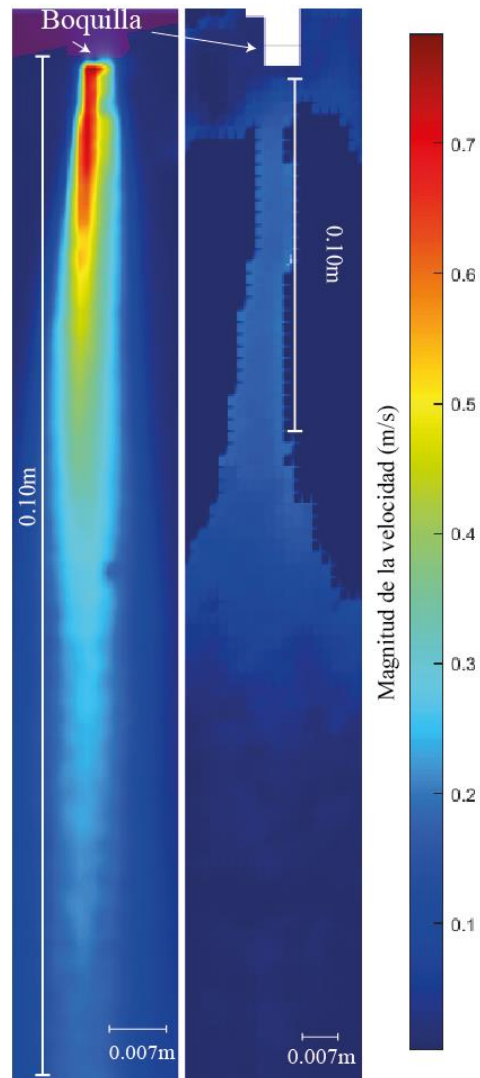


Figura 53: Promedios temporales de la velocidad en la toma horizontal medida con el PIV tradicional y la segunda la toma superficial con la técnica LSPIV.

Algo apreciable en la Figura 53 es la predisposición del chorro de ir en una dirección al no ser un flujo axisimétrico. Se observa que las velocidades tienden a la izquierda de la tobera, lo que coincide con lo que se observa en el PIV-Hor por debajo del agua con sus velocidades medidas al inicio del chorro y con las estructuras superficiales.

Al extraer de ambas escenas la línea central de ambas grabaciones, se obtuvo la gráfica de la Figura 54. Se observa la diferencia entre las velocidades LSPIV-C(roja) y la PIV-Hor-C(amarilla). La discrepancia es causada por la diferencia de resoluciones espaciales de los dos casos, ya que en el caso del espejo se tiene resolución del flujo saliente directamente de la tobera (región inicial) y depende directamente de la densidad de partículas que hay en esa zona junto con la velocidad de grabación, cosa que en el caso superficial no se puede apreciar ni medir por la ausencia de estructuras en dicha área. En la región de transición en la presencia de estructuras la velocidad medida permanece constante, mientras que en la medida con el PIV-Hor-C decrece conforme se aleja.

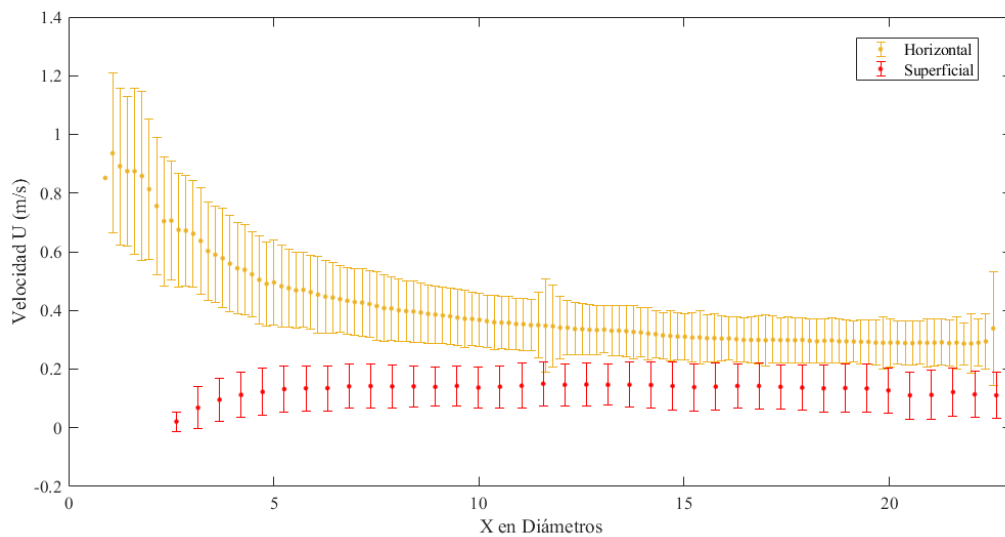


Figura 54: Velocidades U respecto al centro de la tobera del corte horizontal (amarilla) medido con PIV tradicional y las medias con LSPIV en la superficie (rojas).

La diferencia inicial de velocidades entre las dos tomas en la región inicial delimitó la zona de comparación a la región de transición donde las estructuras se observan en la superficie. La diferencia tan grande de las velocidades medidas es provocada por la diferencia de alturas en las que se mide el flujo, ya que en la superficie es más lenta por la interacción agua aire que en el PIV-Hor-C que se mide por debajo del agua.

Se comparó lo medido en la superficie del agua con el LSPIV y la línea de datos más cercana a la superficie medida con el PIV tradicional de manera que lo que se obtuvo de sus promedios temporales se observa en la Figura 55. Se analizaron las distancias en las que se pueden comparar, las cuales están delimitadas por el PIV-Ver, ya que se graba solo ese plano céntrico del flujo. Al comparar la imagen (b) donde las estructuras están más presentes y fáciles de seguir al moverse a los lados de la salida de la tobera con la (a), se percibe que el movimiento de ellas es similar a lo que se puede observar en la superficie del PIV-Ver, sin embargo, con el filtro se delimitó el área de medición perteneciente solo al chorro para comparar ambas tomas como se muestra en la imagen (c).

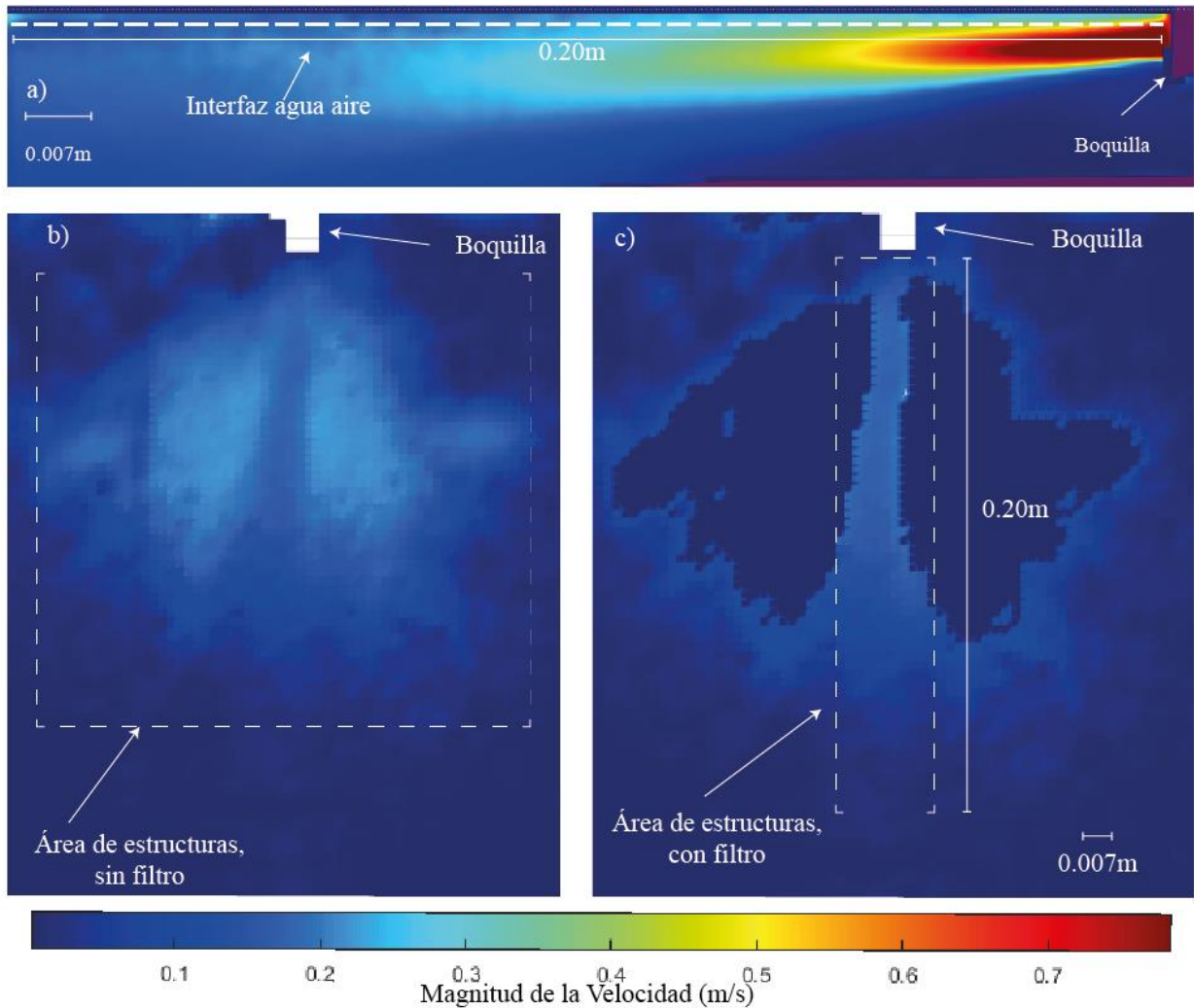


Figura 55: (a) Promedio temporal de las magnitudes medidas en el corte vertical medido con PIV tradicional, con la línea de comparación entre ambas. (b) Promedio temporal de la velocidad en la superficie medida con la técnica LSPIV sin filtrar las velocidades. (c) Promedios temporales de las velocidades superficiales filtradas.

Al extraer las velocidades U medidas y filtradas en el LSPIV-C y PIV-Ver-S, contra su posición en X , se obtuvo la gráfica mostrada en la Figura 56. En la comparación de las medidas en ambos casos, primero se obtuvo la diferencia de la región inicial en el LSPIV-C en la que no se observan estructuras que se puedan medir, pero en el PIV-Ver-S si se logran distinguir, como en el caso anterior. En la región de transición observamos como las velocidades medidas en el LSPIV-C se empiezan a mantener constantes, y las velocidades del PIV-Ver-S decrecen al alejarse de la salida. Al entrar en la región del flujo desarrollado, se observa el comportamiento de las velocidades en ambos casos se acercan. Además, las distancias de las zonas donde fluctúa las desviaciones estándar en los dos casos se traslapan. La diferencia entre las dos desviaciones estándar es debida a lo mencionado en su sección del PIV-Ver-S ya que esta fluctuación aumenta al ser línea más cerca de la superficie y menos homogénea en la iluminación y densidad de partículas.

Como en el caso anterior la diferencia máxima de velocidades se presenta al inicio del movimiento. Sin embargo, la diferencia de velocidad mínima entre las dos líneas fue localizado a los 19 diámetros respecto a la boquilla de la tobera. Esto delimita una cierta zona en la que se obtienen mediciones por parte de las estructuras en comparación a las velocidades laterales que están delimitadas por el plano de grabación, y en el caso superficial, por la zona en la que se pueden o no presentar las estructuras debidas al flujo que se genera en la superficie.

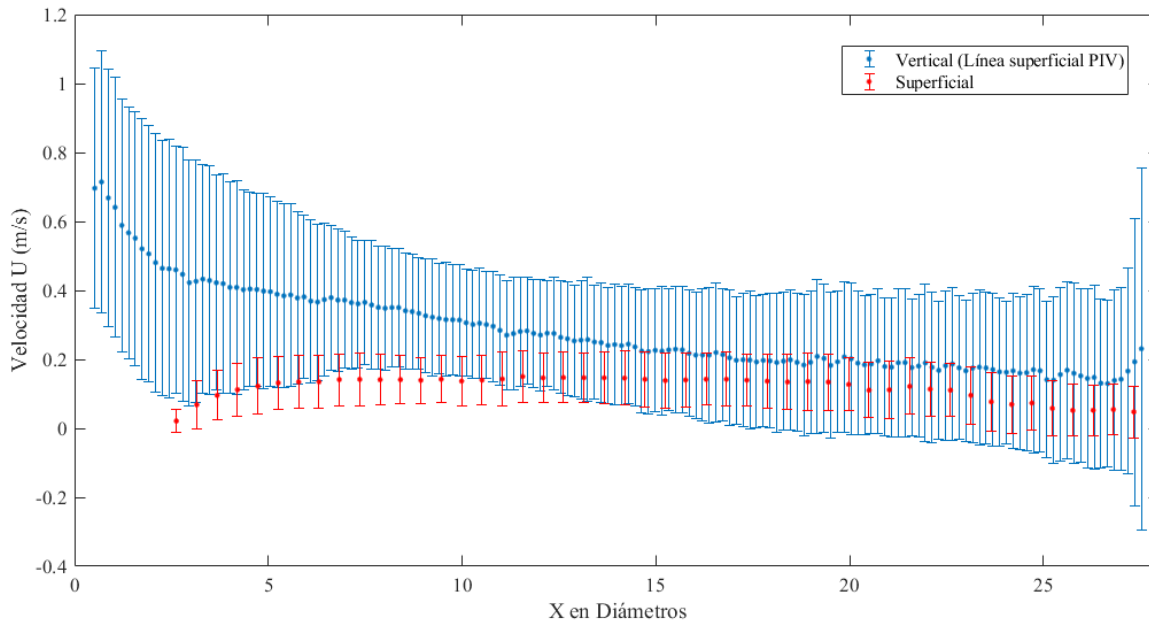


Figura 56: Velocidades U del corte vertical medidas con el PIV tradicional (azul) y las medidas en la superficie con LSPIV (rojo).

Se compararon las velocidades U contra su posición en X respecto al centro de la tobera. Sin embargo, como se observó anteriormente, solo se puede comparar las velocidades en ciertas secciones del flujo, ya sea por la presencia de estructuras en la superficie o las limitantes experimentales, como la longitud del espejo, y el máximo de visión por la cámara en el PIV-Hor y en el PIV-Ver respectivamente. Por lo que se obtuvo la gráfica de la Figura 57. En los tres casos de la Figura 57 se observa que, en la región inicial, las velocidades de los casos medidos en el PIV tradicional son comparables al tener la resolución de lo que sucede con el flujo cerca de la boquilla. Sin embargo, con los obtenidos en el LSPIV al no tener presencia de estructuras en esa zona no se pueden comparar las velocidades del flujo. El área de datos medidos posteriormente se ve delimitada por la distancia de observación de cada caso específico, por lo que la intersección de los tres casos está delimitada por la máxima distancia que se puede observar con el corte horizontal.

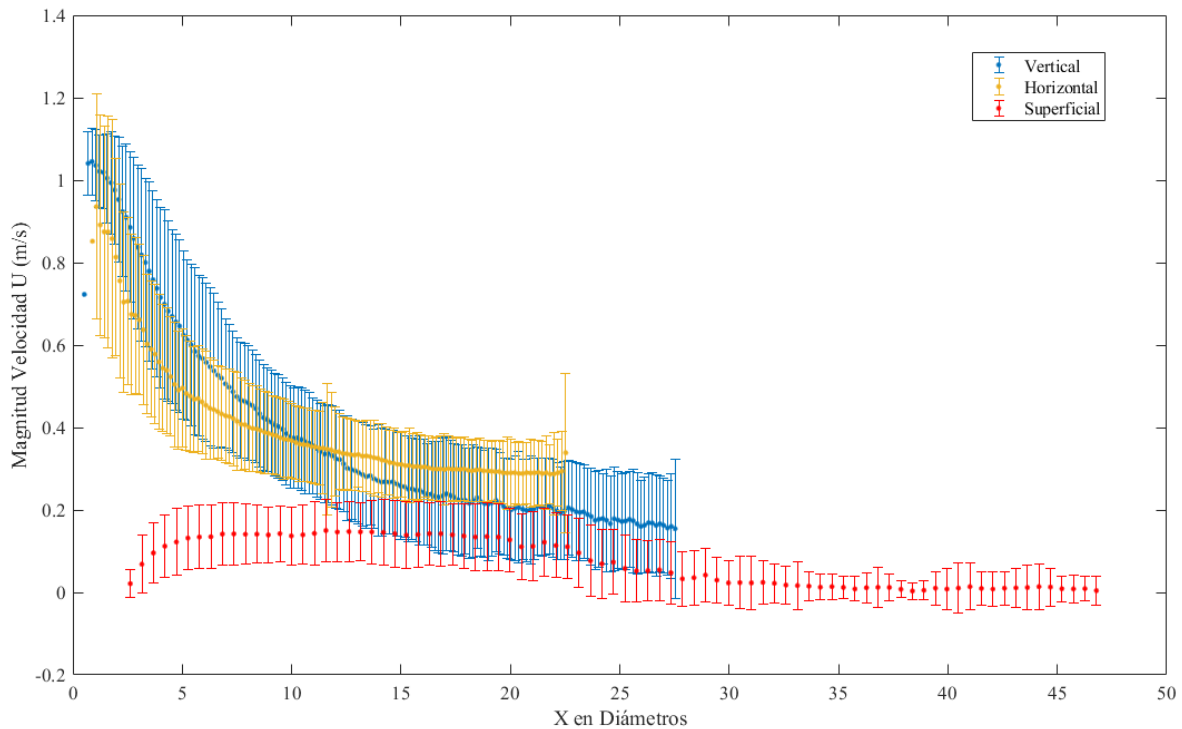


Figura 57: Gráfica de las velocidades U en el centro de la tobera de las tres tomas, vertical (azul), horizontal (amarillo) y superficial (rojo) contra su dirección en X .

De manera que el área de comparación de las tres zonas está delimitada desde en la región de transición hasta la región del flujo desarrollado a los 23 diámetros. En otras palabras, la distancia neta en la que se pueden comparar las tres zonas es de 0.126m. Dicha zona se ve reflejada en la Figura 58, en la cual se marca en la superficie las zonas en las que coinciden las tres mediciones en los diferentes planos y las distancias que recorren junto con la presencia de las estructuras de la superficie.

Al tomar directamente las velocidades U de los datos en el centro de los tres casos y las regiones en las que se puede comparar, se obtuvo la gráfica mostrada en la Figura 59. Se utilizó lo previamente analizado, con respecto a los cortes medidos con PIV tradicional.

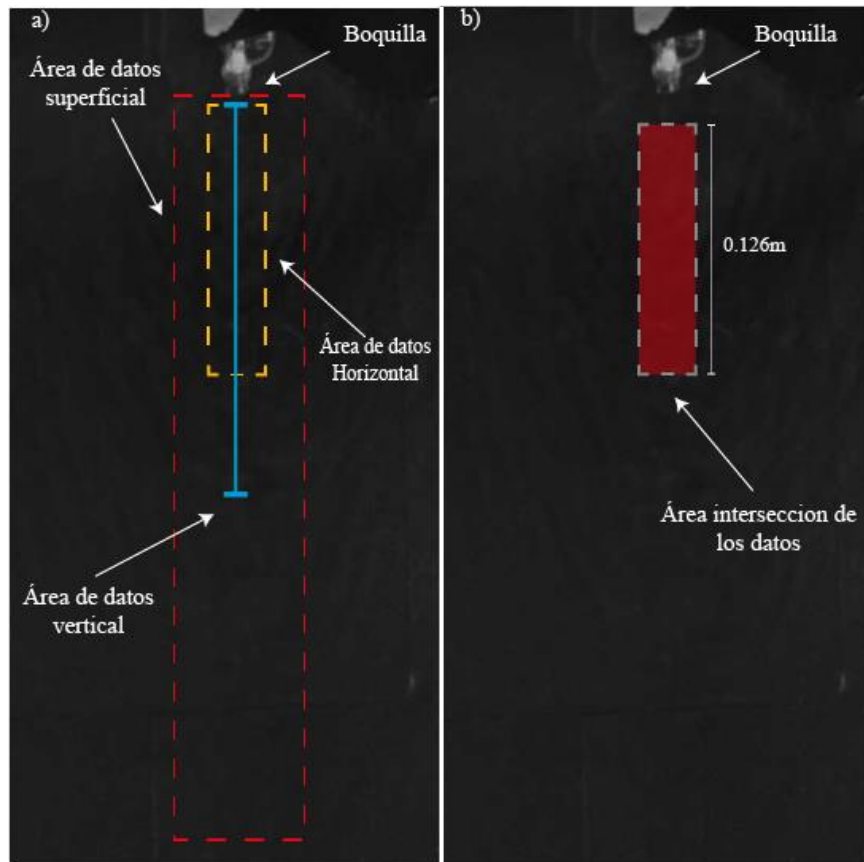


Figura 58: (a) Fotografía superficial, se muestran las áreas medidas en los diferentes experimentos realizados. (b) Área de intersección de los tres experimentos donde se pueden comparar las velocidades medidas.

Al comparar en dicha zona las velocidades con el PIV tradicional respecto al obtenido con el LSPIV se obtuvo una diferencia de velocidades alta a los 11 diámetros respecto la velocidad medida en LSPIV-C la cual es de 0.143m/s, 0.355m/s en PIV-Hor-C y 0.350m/s en PIV-Ver-C. Las diferencias son similares a lo que sucede a los 5 diámetros de recorrido en ambos casos, en el cual es ligeramente mayor el caso vertical y horizontal al tener una medición directa del flujo al salir de la tobera como se explicó anteriormente, por medir abajo del agua. El mínimo de diferencia entre los dos casos se presenta a los 16 diámetros del recorrido respecto a la PIV-Hor-C y a los 19 diámetros respecto al PIV-Ver-C, de manera que ambas velocidades se acercan en la zona. Esto sugiere que, al desarrollarse el flujo de agua en la región de transición y del flujo desarrollado, hasta la zona donde más estructuras desaparecen, se pueden comparar las velocidades superficiales como las medidas directamente del chorro.

Como se observó al comparar las velocidades del PIV-Ver-C, contra las velocidades LSPIV-C, al alejarse de la tobera y decrecer en ellas, se acercan a las que se miden superficialmente sin llegar a cruzarse, lo que se ve limitado por la presencia o no de estructuras en la superficie como por la distancia total en la que se puede grabar el movimiento por debajo del agua.

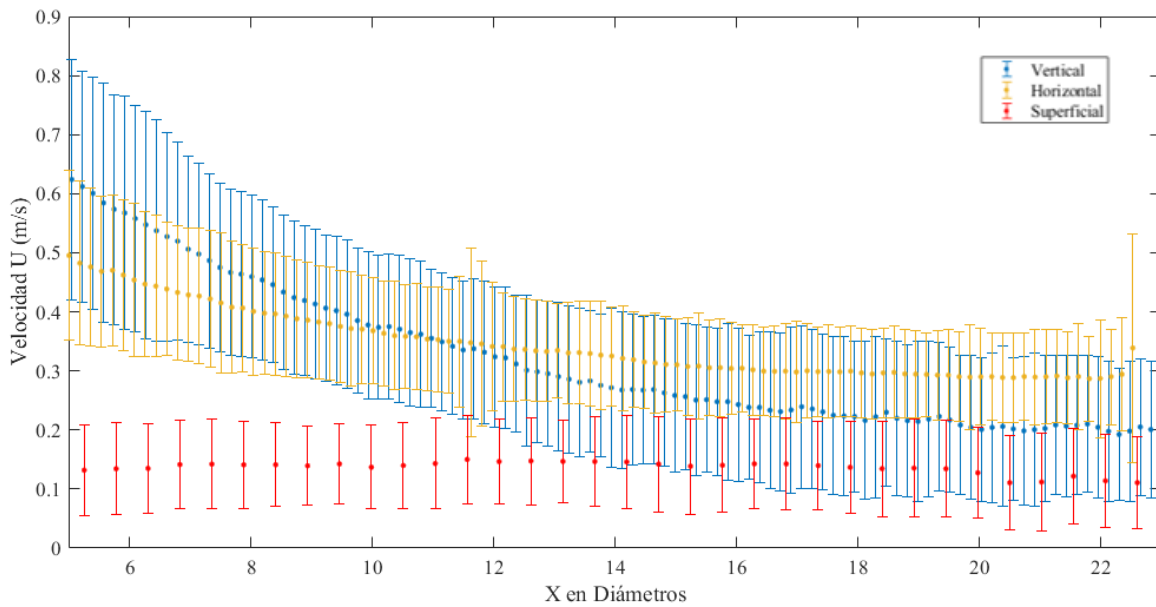


Figura 59: Gráfica de las velocidades U con respecto X medido desde el centro en las tres tomas obtenidas con PIV tradicional como son la vertical (azul) horizontal (amarilla) y las medidas con LSPIV en la superficie (roja) en la zona donde se interceptan.

Por los resultados anteriores, las diferencias entre las velocidades respecto a las medidas en la superficie con la técnica LSPIV es debido a la profundidad con la que se mide en cada caso. Con lo medido en las líneas PIV-Ver-C y PIV-Hor-C y al considerar el comportamiento del chorro, donde la velocidad mayor se encuentra por debajo de la PIV-Hor-C de la tobera, genera la diferencia entre las velocidades del LSPIV-C y del PIV-Ver-C sean menores después del punto de intersección a los 11 diámetros. Posteriormente para observar detenidamente la región del flujo desarrollado de los tres casos, en la cual se presentan los mínimos de velocidad entre los tres diferentes experimentos, se acoto de nueva cuenta la gráfica en esa región, la cual se muestra en la Figura 60.

Las diferencias de velocidades en aquella región coinciden con las ultimas secciones de los datos obtenidos con el PIV tradicional a los 20 diámetros después de la tobera (sección del flujo desarrollado). Puesto que es el momento donde las velocidades en U medidas en la superficie decrecen por no detectar estructuras. El mínimo de diferencia es de 0.299m/s respecto al PIV-Hor-C contra 0.142m/s en el LSPIV-C a los 16 diámetros y respecto al PIV-Ver-C de 0.215 m/s contra 0.135m/s del LSPIV-C a los 19 diámetros, lo que presenta las zonas en las que las velocidades son más cercanas. La gráfica representa la región del flujo desarrollado de los tres experimentos y en la zona en la que por orden de magnitud las velocidades son comparables a pesar de estar medidas en diferentes profundidades del flujo.

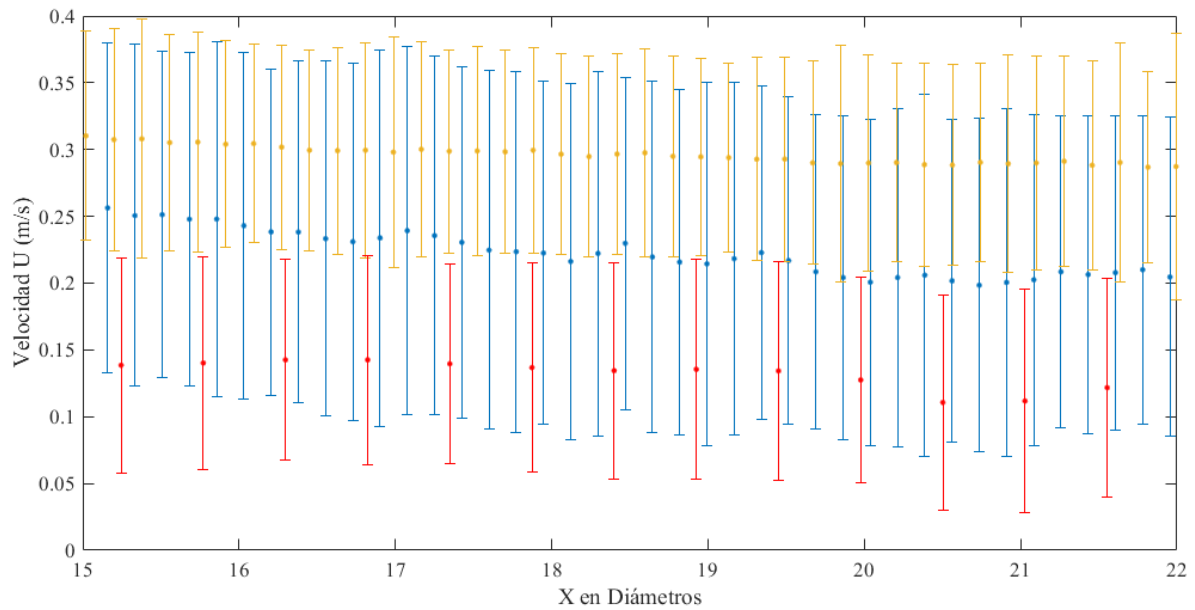


Figura 60: Gráfica en la región del flujo desarrollado de 15 a 22 diámetros de distancia. Se ven las velocidades U medidas con PIV tradicional en el caso vertical (azul), horizontal (amarillo) y con el LSPIV en la superficie (roja).

En resumen, al tomar en cuenta solo el orden de magnitud de las velocidades medidas en el LSPIV y en los dos cortes obtenidos con el PIV tradicional, tenemos que son comparables entre sí en el flujo desarrollado. Si tomamos en cuenta las velocidades U mencionadas anteriormente nos damos cuenta de que la diferencia que hay entre las tres secciones es la profundidad en la que se miden sin embargo cumplen con lo esperado de un chorro en estas condiciones. En estudios de grandes escalas usualmente al tener el orden de magnitud superficial es más que necesario para realizar cálculos como el caudal de un canal o río. En la Tabla 1 podemos ver las velocidades mencionadas anteriormente en comparación.

Posición (Diámetros)	PIV-Ver-C (m/s)	PIV-Hor-C (m/s)	LSPIV-C
16	0.2383	0.238	0.142
19	0.215	0.292	0.135

Tabla 1: Velocidades mínimas respecto a las medidas con el LSPIV contra las obtenidas con el PIV tradicional.

6 Conclusiones y trabajo a futuro

Se pudo producir un flujo repetible que permitió hacer mediciones en diferentes planos con PIV en dos cortes distintos y con LSPIV en la superficie. La ortorectificación por proyección funciona para sustituir la condición de ortogonalidad de la técnica convencional, y simplificó el procedimiento para medir y no utilizar una hoja de luz para obtener resultados. Se mostró que el uso de las estructuras superficiales como trazadores del flujo y la aplicación del procesamiento de las imágenes propuesto, es una técnica adecuada para medir los campos de velocidades en flujos abiertos, que cumplan con las características necesarias vistas a lo largo del presente trabajo.

Al comparar las mediciones del LSPIV con las obtenidas del PIV se observa la diferencia de detalles que se pueden medir con ambas técnicas. El flujo de agua por debajo de la interfaz presenta un comportamiento usual de un chorro en su descarga, lo cual se observa a detalle con el PIV. Sin embargo, en la toma superficial no se obtienen detalles tan finos del flujo en ciertas regiones por la resolución espacial, la velocidad de grabación de la cámara, y por la nula presencia de estructuras en la superficie al inicio del flujo o al final. En donde más se nota esto es en la región inicial del flujo.

La comparación obtiene más sentido entre las velocidades medidas en la superficie y el corte vertical en la sección del flujo desarrollado. Se observa que las estructuras en la línea superficial desde el centro de la tobera se mantienen a una velocidad constante y del mismo orden de magnitud respecto al flujo medido por debajo del agua en sus velocidades en la dirección del movimiento, por lo que en dicha sección las velocidades medias en la superficie son comparables con las del flujo desarrollado.

Al comprar los tres experimentos en el flujo desarrollado, a pesar de medir a diferentes alturas cercanas entre sí en el chorro, en orden de magnitud las velocidades son similares. Para estudios en grandes escalas, solo con tener el orden de magnitud del flujo es suficiente para estudiarlos porque con ese valor se hace una estimación del flujo másico total a partir de la profundidad que estos tengan.

El realizar la comparación entre las medidas de ambas técnicas de un flujo tan particular como lo es el chorro estudiado de agua de descarga en agua, da validez exitosa al procedimiento del procesamiento de imágenes al ortorectificarlas, al usar las estructuras como trazadores gracias a los cambios de intensidad en las imágenes y la repetibilidad del sistema experimental en los tres casos al no ser grabados simultáneamente, donde se define una zona efectiva para las mediciones cuando el flujo es desarrollado.

La capacidad de medir las velocidades a partir de las estructuras superficiales como se realizó en el presente trabajo permitirá a futuro implementar la técnica directamente en ríos o canales que presenten las características señaladas anteriormente o incluso en laboratorios para complementar los estudios de diferentes sistemas experimentales como se mostró en el presente trabajo.

7 Referencias

- Adrian, R. J. (1991). *Particle-Imaging techniques for experimental fluid mechanics*. 261–304.
- Benetazzo, A., Gamba, M., & Barbariol, F. (2017). Unseeded Large Scale PIV measurements accounting for capillary - gravity waves phase speed. *Rendiconti Lincei*, 2, 393–404.
- Bernecker, D. (2018). Image Processing. En *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*: Vol. 11111 LNCS (pp. 37–55). Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96520-8_3
- Christensen, K. T. (2008). Review of Particle Image Velocimetry: A Practical Guide, Second Edition. En *AIAA Journal* (Vol. 46, Número 11). <https://doi.org/10.2514/1.37533>
- Del Rio, E. R. V., Woiski, E. R., Gasche, J. J., Mansur, S. S., & Vieira, E. D. R. (2014). Vortex Formation in Incompressible Axisymmetric Free Jets. *Revista de Engenharia Térmica*, 13(2), 74. <https://doi.org/10.5380/reterm.v13i2.62100>
- Detert, M., Johnson, E. D., & Weitbrecht, V. (2017). Proof-of-concept for low-cost and non-contact synoptic airborne river flow measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8–10), 2780–2807. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1294782>
- Fakhri, A., Ettema, R., Aliyari, F., & Nowroozpour, A. (2021). Large-scale particle image velocimetry for estimating vena-contracta width for flow in contracted open channels. *Water (Switzerland)*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/w13010031>
- Fleit, G., & Baranya, S. (2019). An improved particle image velocimetry method for efficient flow analyses. *Flow Measurement and Instrumentation*, 69(June), 101619. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2019.101619>
- Fleit, G., & Baranya, S. (2022). LSPIV analysis of ship-induced wave wash. *Experiments in Fluids*, 63(10), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s00348-022-03508-4>
- Fujita, I., & Hino, T. (2003). Unseeded and Seeded PIV Measurements of River Flows Videotaped from a Helicopter. *Journal of Visualization*, 6(3), 245–252. <https://doi.org/10.1007/BF03181465>
- Fujita, I., Muste, M., & Kruger, A. (1998). Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications. *Journal of Hydraulic Research*, 36(3), 397–414. <https://doi.org/10.1080/00221689809498626>
- Ismail, A., & Ulrich, L. (2007). Large scale PIV-measurements on the water surface of turbulent open-channel flow. *18th Congres Francais do Mecanique*, 1998, 6 pp.

- Jin, T., & Liao, Q. (2019). Application of large scale PIV in river surface turbulence measurements and water depth estimation. *Flow Measurement and Instrumentation*, 67(February), 142–152. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2019.03.001>
- Jodeau, M., Hauet, A., Coz, J. L. E., Bercovitz, Y., Lebert, F., Edf, D. T. G., & Hhly, U. R. (2017). Laboratory and field lspiv measurements of flow velocities using fudaa-lspiv, a free user-friendly software. *Proceedings of the 1st International Symposium and Exhibition on Hydro-Environment Sensors and Software - HydroSenSoft 2017, March*, 86-82
https://www.researchgate.net/publication/315684488_Laboratory_and_field_lspiv_measurements_of_flow_velocities_using_Fudaa-LSPIV_a_free_user-friendly_software
- Jolley, M. J., Russell, A. J., Quinn, P. F., & Perks, M. T. (2021). Considerations When Applying Large-Scale PIV and PTV for Determining River Flow Velocity. *Frontiers in Water*, 3(December), 1–21. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.709269>
- Kantoush, S. A., Schleiss, A. J., Sumi, T., & Murasaki, M. (2011). LSPIV implementation for environmental flow in various laboratory and field cases. *Journal of Hydro-Environment Research*, 5(4), 263–276. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2011.07.002>
- Lewis, Q. W., & Rhoads, B. L. (2018). LSPIV Measurements of Two-Dimensional Flow Structure in Streams Using Small Unmanned Aerial Systems: 1. Accuracy Assessment Based on Comparison With Stationary Camera Platforms and In-Stream Velocity Measurements. *Water Resources Research*, 54(10), 8000–8018. <https://doi.org/10.1029/2018WR022550>
- Linder, W. (2006). *Digital photogrammetry: a practical course*. Springer. <https://doi.org/10.1007/3-540-29153-9>
- Osorio-Cano, J. D., Osorio, A. F., & Medina, R. (2013). A method for extracting surface flow velocities and discharge volumes from video images in laboratory. *Flow Measurement and Instrumentation*, 33, 188–196. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2013.07.009>
- Stevens, C., & Coates, M. (1994). Applications de la technique des corrélations croisées à des champs de vitesses mesurés en laboratoire. *Journal of Hydraulic Research*, 32(2), 195–212. <https://doi.org/10.1080/00221686.1994.10750035>
- Sutarto, T. E. (2015). Application of large scale particle image velocimetry (LSPIV) to identify flow pattern in a channel. *Procedia Engineering*, 125, 213–219. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.031>
- Yeh, M. T., Chung, Y. N., Huang, Y. X., Lai, C. W., & Juang, D. J. (2019). Applying adaptive LS-PIV with dynamically adjusting detection region approach on the surface velocity measurement of river flow. *Computers and Electrical Engineering*, 74, 466–482. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2017.12.013>

Zhang, Z., Wang, X., Fan, T., & Xu, L. (2013). River surface target enhancement and background suppression for unseeded LSPIV. *Flow Measurement and Instrumentation*, 30, 99–111. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2012.12.002>

8 Apéndice

En esta sección se incluyen los códigos de Matlab del live editor con los que se filtraron los resultados de los tres experimentos y el código con el que se obtuvieron las gráficas mostradas anteriormente. Los primeros tres códigos son para filtrar los resultados obtenidos mediante PIVlab de los tres videos.

8.1 Código filtro PIV-Vertical

%Obtención de las variables de las líneas seleccionadas

```
VelocidadesU=u_filtered(:,:);  
VelocidadesV=v_filtered(:,:);  
Tx=x;  
Ty=y;  
PosCol1=2;  
PosRen1=156;
```

```
PosCol2=4;  
PosRen2=100;
```

```
PosCol3=8;  
PosRen3=50;
```

```
s= 8300;  
f=29;  
o=159;  
ts=0.5;
```

%Filtro de los datos con las cotas de velocidad seleccionado

```
for i=1:s  
    for j=1:f  
        for k=1:o  
            c=u_original{i,1}(j,k);  
            r=v_original{i,1}(j,k);  
            if c<=-2 || c>=0.75  
                UFiltrado{i,1}(j,k)=NaN;  
                VFiltrado{i,1}(j,k)=NaN;  
            else  
                UFiltrado{i,1}(j,k)=u_original{i,1}(j,k);  
                VFiltrado{i,1}(j,k)=v_original{i,1}(j,k);  
            end  
        end  
    end  
end
```



```

        if r<=-0.5 || r>=0.5
            UFiltrado{i,1}(j,k)=NaN;
            VFiltrado{i,1}(j,k)=NaN;
        else
            UFiltrado{i,1}(j,k)=UFiltrado{i,1}(j,k);
            VFiltrado{i,1}(j,k)=VFiltrado{i,1}(j,k);
        end
    end
end
end
%Relleno de la matriz PT para las posiciones respecto al tiempo
for i=1:s
    PT_Fil(i,1)=UFiltrado{i,1}(PosCol1,PosRen1);
    PT_Fil(i,2)=VFiltrado{i,1}(PosCol1,PosRen1);
    PT_Fil(i,3)=sqrt((PT_Fil(i,1).^2)+(PT_Fil(i,2).^2));
    PT_Fil(i,4)=i-i*ts;
    PT_Fil(i,5)=UFiltrado{i,1}(PosCol2,PosRen2);
    PT_Fil(i,6)=VFiltrado{i,1}(PosCol2,PosRen2);
    PT_Fil(i,7)=UFiltrado{i,1}(PosCol3,PosRen3);
    PT_Fil(i,8)=VFiltrado{i,1}(PosCol3,PosRen3);
End

%Llena las matrices para hacer las graficas de velocidad segun la
posición.

for i=1:s
    Vtobera_u_H_Fil(:,i)=UFiltrado{i,1}(PosCol1,:).';
    Vtobera_v_H_Fil(:,i)=VFiltrado{i,1}(PosCol1,:).';
    Vtobera_u_V_Fil(:,i)=UFiltrado{i,1}(:,PosRen1);
    Vtobera_v_V_Fil(:,i)=VFiltrado{i,1}(:,PosRen1);

    Vtobera_u_H_Fil_2(:,i)=UFiltrado{i,1}(PosCol2,:).';
    Vtobera_v_H_Fil_2(:,i)=VFiltrado{i,1}(PosCol2,:).';
    Vtobera_u_V_Fil_2(:,i)=UFiltrado{i,1}(:,PosRen2);
    Vtobera_v_V_Fil_2(:,i)=VFiltrado{i,1}(:,PosRen2);

    Vtobera_u_H_Fil_3(:,i)=UFiltrado{i,1}(PosCol3,:).';
    Vtobera_v_H_Fil_3(:,i)=VFiltrado{i,1}(PosCol3,:).';
    Vtobera_u_V_Fil_3(:,i)=UFiltrado{i,1}(:,PosRen3);
    Vtobera_v_V_Fil_3(:,i)=VFiltrado{i,1}(:,PosRen3);

end

%Calculo de los promedios y sus desviaciones en las posiciones
elegidas

```

```

Vtobera_u_H_mean_Fil=mean(Vtobera_u_H_Fil,2,"omitnan");
Vtobera_v_H_mean_Fil=mean(Vtobera_v_H_Fil,2,"omitnan");
Vtobera_u_V_mean_Fil=mean(Vtobera_u_V_Fil,2,"omitnan");
Vtobera_v_V_mean_Fil=mean(Vtobera_v_V_Fil,2,"omitnan");

Vtobera_u_H_mean_Fil_2=mean(Vtobera_u_H_Fil_2,2,"omitnan");
Vtobera_v_H_mean_Fil_2=mean(Vtobera_v_H_Fil_2,2,"omitnan");
Vtobera_u_V_mean_Fil_2=mean(Vtobera_u_V_Fil_2,2,"omitnan");
Vtobera_v_V_mean_Fil_2=mean(Vtobera_v_V_Fil_2,2,"omitnan");

Vtobera_u_H_mean_Fil_3=mean(Vtobera_u_H_Fil_3,2,"omitnan");
Vtobera_v_H_mean_Fil_3=mean(Vtobera_v_H_Fil_3,2,"omitnan");
Vtobera_u_V_mean_Fil_3=mean(Vtobera_u_V_Fil_3,2,"omitnan");
Vtobera_v_V_mean_Fil_3=mean(Vtobera_v_V_Fil_3,2,"omitnan");

Vtobera_u_H_S_Fil=std(Vtobera_u_H_Fil,0,2,"omitnan");
Vtobera_v_H_S_Fil=std(Vtobera_v_H_Fil,0,2,"omitnan");
Vtobera_u_V_S_Fil=std(Vtobera_u_V_Fil,0,2,"omitnan");
Vtobera_v_V_S_Fil=std(Vtobera_v_V_Fil,0,2,"omitnan");

Vtobera_u_H_S_Fil_2=std(Vtobera_u_H_Fil_3,0,2,"omitnan");
Vtobera_v_H_S_Fil_2=std(Vtobera_v_H_Fil_3,0,2,"omitnan");
Vtobera_u_V_S_Fil_2=std(Vtobera_u_V_Fil_3,0,2,"omitnan");
Vtobera_v_V_S_Fil_2=std(Vtobera_v_V_Fil_3,0,2,"omitnan");

Vtobera_u_H_S_Fil_3=std(Vtobera_u_H_Fil_3,0,2,"omitnan");
Vtobera_v_H_S_Fil_3=std(Vtobera_v_H_Fil_3,0,2,"omitnan");
Vtobera_u_V_S_Fil_3=std(Vtobera_u_V_Fil_3,0,2,"omitnan");
Vtobera_v_V_S_Fil_3=std(Vtobera_v_V_Fil_3,0,2,"omitnan");

%Calculo de magnitudes y sus desviaciones estandar
Vtobera_Mag_H_Fil=sqrt((Vtobera_u_H_mean_Fil).^2+(Vtobera_v_H_mean_Fil).^2);
Vtobera_Mag_H_STD_Fil=sqrt((Vtobera_u_H_S_Fil).^2+(Vtobera_v_H_S_Fil).^2);

Vtobera_Mag_H_Fil_2=sqrt((Vtobera_u_H_mean_Fil_2).^2+(Vtobera_v_H_mean_Fil_2).^2);
Vtobera_Mag_H_STD_Fil_2=sqrt((Vtobera_u_H_S_Fil_2).^2+(Vtobera_v_H_S_Fil_2).^2);

Vtobera_Mag_H_Fil_3=sqrt((Vtobera_u_H_mean_Fil_3).^2+(Vtobera_v_H_mean_Fil_3).^2);

```

```

Vtobera_Mag_H_STD_Fil_3=sqrt((Vtobera_u_H_S_Fil_3).^2+(Vtobera_v_H_
_S_Fil_3).^2);

Vtobera_Mag_V_Fil=sqrt((Vtobera_u_V_mean_Fil).^2+(Vtobera_v_V_mean
_Fil).^2);
Vtobera_Mag_V_STD_Fil=sqrt((Vtobera_u_V_S_Fil).^2+(Vtobera_v_V_S_F
il).^2);

Vtobera_Mag_V_Fil_2=sqrt((Vtobera_u_V_mean_Fil_2).^2+(Vtobera_v_V_
mean_Fil_2).^2);
Vtobera_Mag_V_STD_Fil_2=sqrt((Vtobera_u_V_S_Fil_2).^2+(Vtobera_v_V
_S_Fil_2).^2);

Vtobera_Mag_V_Fil_3=sqrt((Vtobera_u_V_mean_Fil_3).^2+(Vtobera_v_V_
mean_Fil_3).^2);
Vtobera_Mag_V_STD_Fil_3=sqrt((Vtobera_u_V_S_Fil_3).^2+(Vtobera_v_V
_S_Fil_3).^2);

%Ajuste de la orientación de las gráficas

PX_H_1=Tx{1,1}(PosCol1,:).';
PY_H_1=Ty{1,1}(PosCol1,:).';

PX_V_1=Tx{1,1}(:,PosRen1);
PY_V_1=Ty{1,1}(:,PosRen1);

PX_H_1=-(PX_H_1-PX_H_1(159,1));

PY_V_1=PY_V_1-PY_V_1(1,1);

%Gráficas filtradas de velocidad
errorbar(PX_H_1,Vtobera_Mag_H_Fil,Vtobera_Mag_H_STD_Fil, ".", "Marke
rSize",10)
hold on

errorbar(PX_H_1,Vtobera_Mag_H_Fil_2,Vtobera_Mag_H_STD_Fil_2, ".", "M
arkerSize",10)

errorbar(PX_H_1,Vtobera_Mag_H_Fil_3,Vtobera_Mag_H_STD_Fil_3, ".", "M
arkerSize",10)
hold off

title('Magnitud de Velocidad Corte Horizontal Fil')
xlabel("Posicion x (m)")
ylabel("Magnitud Velocidad(m/s)")

```

```

%Guardado de las variables para su posterior graficador
Ufiltrado_Lateral=Ufiltrado;
VFiltrado_lateral=VFiltrado;
PT_Fil_Lateral=PT_Fil;

PX_H_1_lateral=PX_H_1;
PY_V_1_lateral=PY_V_1;

Vtobera_Mag_H_Fil_lateral=Vtobera_Mag_H_Fil;
Vtobera_Mag_H_STD_Fil_lateral=Vtobera_Mag_H_STD_Fil;

Vtobera_Mag_H_Fil_2_lateral=Vtobera_Mag_H_Fil_2;
Vtobera_Mag_H_STD_Fil_2_lateral=Vtobera_Mag_H_STD_Fil_2;

Vtobera_Mag_H_Fil_3_lateral=Vtobera_Mag_H_Fil_3;
Vtobera_Mag_H_STD_Fil_3_lateral=Vtobera_Mag_H_STD_Fil_3;

Vtobera_Mag_V_Fil_lateral=Vtobera_Mag_V_Fil;
Vtobera_Mag_V_STD_Fil_lateral=Vtobera_Mag_V_STD_Fil;

Vtobera_Mag_V_Fil_2_lateral=Vtobera_Mag_V_Fil_2;
Vtobera_Mag_V_STD_Fil_2_lateral=Vtobera_Mag_V_STD_Fil_2;

Vtobera_Mag_V_Fil_3_lateral=Vtobera_Mag_V_Fil_3;
Vtobera_Mag_V_STD_Fil_3_lateral=Vtobera_Mag_V_STD_Fil_3;

save('WorkspaceLateralFiltrado.mat','Ufiltrado_Lateral','VFiltrado
_lateral','PT_Fil_Lateral','PX_H_1_lateral','PY_V_1_lateral','Vtob
era_Mag_H_Fil_lateral','Vtobera_Mag_H_STD_Fil_lateral','Vtobera_Ma
g_H_Fil_2_lateral','Vtobera_Mag_H_STD_Fil_2_lateral','Vtobera_Mag_
H_Fil_3_lateral','Vtobera_Mag_H_STD_Fil_3_lateral','Vtobera_Mag_V_
Fil_lateral','Vtobera_Mag_V_STD_Fil_lateral','Vtobera_Mag_V_Fil_2_
lateral','Vtobera_Mag_V_STD_Fil_2_lateral','Vtobera_Mag_V_Fil_3_la
teral','Vtobera_Mag_V_STD_Fil_3_lateral')

```

8.2 Código filtro PIV-Horizontal

% Obtención de las variables de las líneas seleccionadas

```

VelocidadesU=u_filtered(:,:);
VelocidadesV=v_filtered(:,:);
Tx=x;
Ty=y;
PosCol1=12;
PosRen1=30;

PosCol2=15;

```

```

PosRen2=60;

PosCol3=18;
PosRen3=120;

s= 8310;
q=42;
o=127;
ts=0.5;

%Filtrado de los datos en las velocidades seleccionadas
for i=1:s
    for j=1:f
        for k=1:o
            c=u_original{i,1}(j,k);
            r=v_original{i,1}(j,k);
            if c<=-2 || c>=0.75
                UFiltrado{i,1}(j,k)=NaN;
                VFiltrado{i,1}(j,k)=NaN;
            else
                UFiltrado{i,1}(j,k)=u_original{i,1}(j,k);
                VFiltrado{i,1}(j,k)=v_original{i,1}(j,k);
            end
            if r<=-0.5 || r>=0.5
                UFiltrado{i,1}(j,k)=NaN;
                VFiltrado{i,1}(j,k)=NaN;
            else
                UFiltrado{i,1}(j,k)=UFiltrado{i,1}(j,k);
                VFiltrado{i,1}(j,k)=VFiltrado{i,1}(j,k);
            end
        end
    end
end

%Llena la matriz PT en las posiciones respecto al tiempo
for i=1:s
    PT_Fil(i,1)=UFiltrado{i,1}(PosCol1,PosRen1);
    PT_Fil(i,2)=VFiltrado{i,1}(PosCol1,PosRen1);
    PT_Fil(i,3)=sqrt((PT_Fil(i,1).^2)+(PT_Fil(i,2).^2));
    PT_Fil(i,4)=i-i*ts;
    PT_Fil(i,5)=UFiltrado{i,1}(PosCol2,PosRen2);
    PT_Fil(i,6)=VFiltrado{i,1}(PosCol2,PosRen2);
    PT_Fil(i,7)=UFiltrado{i,1}(PosCol3,PosRen3);
    PT_Fil(i,8)=VFiltrado{i,1}(PosCol3,PosRen3);
end

```

```
%Llena las matrices para hacer las graficas de velocidad segun la
posición
%dada
```

```
for i=1:s
    Vtobera_u_H_Fil(:,i)=UFiltrado{i,1}(PosCol1,:).';
    Vtobera_v_H_Fil(:,i)=VFiltrado{i,1}(PosCol1,:).';
    Vtobera_u_V_Fil(:,i)=UFiltrado{i,1}(:,PosRen1);
    Vtobera_v_V_Fil(:,i)=VFiltrado{i,1}(:,PosRen1);

    Vtobera_u_H_Fil_2(:,i)=UFiltrado{i,1}(PosCol2,:).';
    Vtobera_v_H_Fil_2(:,i)=VFiltrado{i,1}(PosCol2,:).';
    Vtobera_u_V_Fil_2(:,i)=UFiltrado{i,1}(:,PosRen2);
    Vtobera_v_V_Fil_2(:,i)=VFiltrado{i,1}(:,PosRen2);

    Vtobera_u_H_Fil_3(:,i)=UFiltrado{i,1}(PosCol3,:).';
    Vtobera_v_H_Fil_3(:,i)=VFiltrado{i,1}(PosCol3,:).';
    Vtobera_u_V_Fil_3(:,i)=UFiltrado{i,1}(:,PosRen3);
    Vtobera_v_V_Fil_3(:,i)=VFiltrado{i,1}(:,PosRen3);

end
```

```
%Calculo de los promedios y sus desviaciones en las posiciones
elegidas
```

```
Vtobera_u_H_mean_Fil=mean(Vtobera_u_H_Fil,2,"omitnan");
Vtobera_v_H_mean_Fil=mean(Vtobera_v_H_Fil,2,"omitnan");
Vtobera_u_V_mean_Fil=mean(Vtobera_u_V_Fil,2,"omitnan");
Vtobera_v_V_mean_Fil=mean(Vtobera_v_V_Fil,2,"omitnan");

Vtobera_u_H_mean_Fil_2=mean(Vtobera_u_H_Fil_2,2,"omitnan");
Vtobera_v_H_mean_Fil_2=mean(Vtobera_v_H_Fil_2,2,"omitnan");
Vtobera_u_V_mean_Fil_2=mean(Vtobera_u_V_Fil_2,2,"omitnan");
Vtobera_v_V_mean_Fil_2=mean(Vtobera_v_V_Fil_2,2,"omitnan");

Vtobera_u_H_mean_Fil_3=mean(Vtobera_u_H_Fil_3,2,"omitnan");
Vtobera_v_H_mean_Fil_3=mean(Vtobera_v_H_Fil_3,2,"omitnan");
Vtobera_u_V_mean_Fil_3=mean(Vtobera_u_V_Fil_3,2,"omitnan");
Vtobera_v_V_mean_Fil_3=mean(Vtobera_v_V_Fil_3,2,"omitnan");

Vtobera_u_H_S_Fil=std(Vtobera_u_H_Fil,0,2,"omitnan");
Vtobera_v_H_S_Fil=std(Vtobera_v_H_Fil,0,2,"omitnan");
Vtobera_u_V_S_Fil=std(Vtobera_u_V_Fil,0,2,"omitnan");
Vtobera_v_V_S_Fil=std(Vtobera_v_V_Fil,0,2,"omitnan");
```

```
Vtobera_u_H_S_Fil_2=std(Vtobera_u_H_Fil_3,0,2,"omitnan");
Vtobera_v_H_S_Fil_2=std(Vtobera_v_H_Fil_3,0,2,"omitnan");
Vtobera_u_V_S_Fil_2=std(Vtobera_u_V_Fil_3,0,2,"omitnan");
Vtobera_v_V_S_Fil_2=std(Vtobera_v_V_Fil_3,0,2,"omitnan");
```

```
Vtobera_u_H_S_Fil_3=std(Vtobera_u_H_Fil_3,0,2,"omitnan");
Vtobera_v_H_S_Fil_3=std(Vtobera_v_H_Fil_3,0,2,"omitnan");
Vtobera_u_V_S_Fil_3=std(Vtobera_u_V_Fil_3,0,2,"omitnan");
Vtobera_v_V_S_Fil_3=std(Vtobera_v_V_Fil_3,0,2,"omitnan");
```

```
%Calculo de magnitudes y sus desviaciones de ambos casos
```

```
Vtobera_Mag_H_Fil=sqrt((Vtobera_u_H_mean_Fil).^2+(Vtobera_v_H_mean_Fil).^2);
```

```
Vtobera_Mag_H_STD_Fil=sqrt((Vtobera_u_H_S_Fil).^2+(Vtobera_v_H_S_Fil).^2);
```

```
Vtobera_Mag_H_Fil_2=sqrt((Vtobera_u_H_mean_Fil_2).^2+(Vtobera_v_H_mean_Fil_2).^2);
```

```
Vtobera_Mag_H_STD_Fil_2=sqrt((Vtobera_u_H_S_Fil_2).^2+(Vtobera_v_H_S_Fil_2).^2);
```

```
Vtobera_Mag_H_Fil_3=sqrt((Vtobera_u_H_mean_Fil_3).^2+(Vtobera_v_H_mean_Fil_3).^2);
```

```
Vtobera_Mag_H_STD_Fil_3=sqrt((Vtobera_u_H_S_Fil_3).^2+(Vtobera_v_H_S_Fil_3).^2);
```

```
Vtobera_Mag_V_Fil=sqrt((Vtobera_u_V_mean_Fil).^2+(Vtobera_v_V_mean_Fil).^2);
```

```
Vtobera_Mag_V_STD_Fil=sqrt((Vtobera_u_V_S_Fil).^2+(Vtobera_v_V_S_Fil).^2);
```

```
Vtobera_Mag_V_Fil_2=sqrt((Vtobera_u_V_mean_Fil_2).^2+(Vtobera_v_V_mean_Fil_2).^2);
```

```
Vtobera_Mag_V_STD_Fil_2=sqrt((Vtobera_u_V_S_Fil_2).^2+(Vtobera_v_V_S_Fil_2).^2);
```

```
Vtobera_Mag_V_Fil_3=sqrt((Vtobera_u_V_mean_Fil_3).^2+(Vtobera_v_V_mean_Fil_3).^2);
```

```
Vtobera_Mag_V_STD_Fil_3=sqrt((Vtobera_u_V_S_Fil_3).^2+(Vtobera_v_V_S_Fil_3).^2);
```

```
%Ajuste de la orientación de las gráficas
```

```
PX_H_1=Tx{1,1}(PosCol1,:).';
```

```

PY_H_1=Ty{1,1}(PosCol1,:).';

PX_V_1=Tx{1,1}(:,PosRen1);
PY_V_1=Ty{1,1}(:,PosRen1);

PX_H_1=-(PX_H_1-PX_H_1(127,1));

PY_V_1=PY_V_1-PY_V_1(1,1);

%Guardado de datos

Ufiltrado_espejo=Ufiltrado;
Vfiltrado_espejo=Vfiltrado;
PT_Fil_espejo=PT_Fil;

PX_H_1_espejo=PX_H_1;
PY_V_1_espejo=PY_V_1;

Vtobera_Mag_H_Fil_espejo=Vtobera_Mag_H_Fil;
Vtobera_Mag_H_STD_Fil_espejo=Vtobera_Mag_H_STD_Fil;

Vtobera_Mag_H_Fil_2_espejo=Vtobera_Mag_H_Fil_2;
Vtobera_Mag_H_STD_Fil_2_espejo=Vtobera_Mag_H_STD_Fil_2;

Vtobera_Mag_H_Fil_3_espejo=Vtobera_Mag_H_Fil_3;
Vtobera_Mag_H_STD_Fil_3_espejo=Vtobera_Mag_H_STD_Fil_3;

Vtobera_Mag_V_Fil_espejo=Vtobera_Mag_V_Fil;
Vtobera_Mag_V_STD_Fil_espejo=Vtobera_Mag_V_STD_Fil;

Vtobera_Mag_V_Fil_2_espejo=Vtobera_Mag_V_Fil_2;
Vtobera_Mag_V_STD_Fil_2_espejo=Vtobera_Mag_V_STD_Fil_2;

Vtobera_Mag_V_Fil_3_espejo=Vtobera_Mag_V_Fil_3;
Vtobera_Mag_V_STD_Fil_3_espejo=Vtobera_Mag_V_STD_Fil_3;

save('Workspaceespejo.mat','Ufiltrado_espejo','Vfiltrado_espejo','
PT_Fil_espejo','PX_H_1_espejo','Vtobera_Mag_H_Fil_espejo','Vtobera
_Mag_H_STD_Fil_espejo','Vtobera_Mag_H_Fil_2_espejo','Vtobera_Mag_H
_STD_Fil_2_espejo','Vtobera_Mag_H_Fil_3_espejo','Vtobera_Mag_H_STD
_Fil_3_espejo','Vtobera_Mag_V_Fil_espejo','Vtobera_Mag_V_STD_Fil_e
spejo','Vtobera_Mag_V_Fil_2_espejo','Vtobera_Mag_V_STD_Fil_2_espej
o','Vtobera_Mag_V_Fil_3_espejo','Vtobera_Mag_V_STD_Fil_3_espejo','
PY_V_1_espejo')

```


8.3 Código filtro LSPIV

%Obtención de las variables de las líneas seleccionadas

```
VelocidadesU=u_filtered(:,:);  
VelocidadesV=v_filtered(:,:);  
Tx=x;  
Ty=y;  
PosCol1=6;  
PosRen1=72;
```

```
PosCol2=15;  
PosRen2=73;
```

```
PosCol3=30;  
PosRen3=74;
```

```
s= 1501;  
f=90;  
o=142;  
ts=0.5;
```

%Filtrado los datos en las cotas seleccionadas

```
for i=1:s  
    for j=1:f  
        for k=1:o  
            c=u_original{i,1}(j,k);  
            r=v_original{i,1}(j,k);  
            if c<=-0.1 || c>=0.1  
                UFiltrado{i,1}(j,k)=0;  
                VFiltrado{i,1}(j,k)=0;  
            else  
                UFiltrado{i,1}(j,k)=u_original{i,1}(j,k);  
                VFiltrado{i,1}(j,k)=v_original{i,1}(j,k);  
            end  
            if r<=-0.8 || r>=0.2  
                UFiltrado{i,1}(j,k)=0;  
                VFiltrado{i,1}(j,k)=0;  
            else  
                UFiltrado{i,1}(j,k)=UFiltrado{i,1}(j,k);  
                VFiltrado{i,1}(j,k)=VFiltrado{i,1}(j,k);  
            end  
        end  
    end  
end
```

```

        end
    end
end

```

%Llenado de la matriz PT para las posiciones respecto al tiempo

```

for i=1:s
    PT_Fil(i,1)=UFiltrado{i,1}(PosCol1,PosRen1);
    PT_Fil(i,2)=VFiltrado{i,1}(PosCol1,PosRen1);
    PT_Fil(i,3)=sqrt((PT_Fil(i,1).^2)+(PT_Fil(i,2).^2));
    PT_Fil(i,4)=i-i*ts;
    PT_Fil(i,5)=UFiltrado{i,1}(PosCol2,PosRen2);
    PT_Fil(i,6)=VFiltrado{i,1}(PosCol2,PosRen2);
    PT_Fil(i,7)=UFiltrado{i,1}(PosCol3,PosRen3);
    PT_Fil(i,8)=VFiltrado{i,1}(PosCol3,PosRen3);
end

```

%Llenado las matrices para hacer las graficas de velocidad segun la posición seleccionada

```

for i=1:s
    Vtobera_u_H_Fil(:,i)=UFiltrado{i,1}(PosCol1,:).';
    Vtobera_v_H_Fil(:,i)=VFiltrado{i,1}(PosCol1,:).';
    Vtobera_u_V_Fil(:,i)=UFiltrado{i,1}(:,PosRen1);
    Vtobera_v_V_Fil(:,i)=VFiltrado{i,1}(:,PosRen1);

    Vtobera_u_H_Fil_2(:,i)=UFiltrado{i,1}(PosCol2,:).';
    Vtobera_v_H_Fil_2(:,i)=VFiltrado{i,1}(PosCol2,:).';
    Vtobera_u_V_Fil_2(:,i)=UFiltrado{i,1}(:,PosRen2);
    Vtobera_v_V_Fil_2(:,i)=VFiltrado{i,1}(:,PosRen2);

    Vtobera_u_H_Fil_3(:,i)=UFiltrado{i,1}(PosCol3,:).';
    Vtobera_v_H_Fil_3(:,i)=VFiltrado{i,1}(PosCol3,:).';
    Vtobera_u_V_Fil_3(:,i)=UFiltrado{i,1}(:,PosRen3);
    Vtobera_v_V_Fil_3(:,i)=VFiltrado{i,1}(:,PosRen3);

end

```

%Calculo de los promedios y sus desviaciones estandar de las posiciones %elegidas

```

Vtobera_u_H_mean_Fil=mean(Vtobera_u_H_Fil,2,"omitnan");
Vtobera_v_H_mean_Fil=mean(Vtobera_v_H_Fil,2,"omitnan");
Vtobera_u_V_mean_Fil=mean(Vtobera_u_V_Fil,2,"omitnan");
Vtobera_v_V_mean_Fil=mean(Vtobera_v_V_Fil,2,"omitnan");

```

```

Vtobera_u_H_mean_Fil_2=mean(Vtobera_u_H_Fil_2,2,"omitnan");
Vtobera_v_H_mean_Fil_2=mean(Vtobera_v_H_Fil_2,2,"omitnan");
Vtobera_u_V_mean_Fil_2=mean(Vtobera_u_V_Fil_2,2,"omitnan");
Vtobera_v_V_mean_Fil_2=mean(Vtobera_v_V_Fil_2,2,"omitnan");

Vtobera_u_H_mean_Fil_3=mean(Vtobera_u_H_Fil_3,2,"omitnan");
Vtobera_v_H_mean_Fil_3=mean(Vtobera_v_H_Fil_3,2,"omitnan");
Vtobera_u_V_mean_Fil_3=mean(Vtobera_u_V_Fil_3,2,"omitnan");
Vtobera_v_V_mean_Fil_3=mean(Vtobera_v_V_Fil_3,2,"omitnan");

Vtobera_u_H_S_Fil=std(Vtobera_u_H_Fil,0,2,"omitnan");
Vtobera_v_H_S_Fil=std(Vtobera_v_H_Fil,0,2,"omitnan");
Vtobera_u_V_S_Fil=std(Vtobera_u_V_Fil,0,2,"omitnan");
Vtobera_v_V_S_Fil=std(Vtobera_v_V_Fil,0,2,"omitnan");

Vtobera_u_H_S_Fil_2=std(Vtobera_u_H_Fil_3,0,2,"omitnan");
Vtobera_v_H_S_Fil_2=std(Vtobera_v_H_Fil_3,0,2,"omitnan");
Vtobera_u_V_S_Fil_2=std(Vtobera_u_V_Fil_3,0,2,"omitnan");
Vtobera_v_V_S_Fil_2=std(Vtobera_v_V_Fil_3,0,2,"omitnan");

Vtobera_u_H_S_Fil_3=std(Vtobera_u_H_Fil_3,0,2,"omitnan");
Vtobera_v_H_S_Fil_3=std(Vtobera_v_H_Fil_3,0,2,"omitnan");
Vtobera_u_V_S_Fil_3=std(Vtobera_u_V_Fil_3,0,2,"omitnan");
Vtobera_v_V_S_Fil_3=std(Vtobera_v_V_Fil_3,0,2,"omitnan");

%Calculo de magnitudes y sus desviaciones de ambos casos

Vtobera_Mag_H_Fil=sqrt((Vtobera_u_H_mean_Fil).^2+(Vtobera_v_H_mean_Fil).^2);
Vtobera_Mag_H_STD_Fil=sqrt((Vtobera_u_H_S_Fil).^2+(Vtobera_v_H_S_Fil).^2);

Vtobera_Mag_H_Fil_2=sqrt((Vtobera_u_H_mean_Fil_2).^2+(Vtobera_v_H_mean_Fil_2).^2);
Vtobera_Mag_H_STD_Fil_2=sqrt((Vtobera_u_H_S_Fil_2).^2+(Vtobera_v_H_S_Fil_2).^2);

Vtobera_Mag_H_Fil_3=sqrt((Vtobera_u_H_mean_Fil_3).^2+(Vtobera_v_H_mean_Fil_3).^2);
Vtobera_Mag_H_STD_Fil_3=sqrt((Vtobera_u_H_S_Fil_3).^2+(Vtobera_v_H_S_Fil_3).^2);

Vtobera_Mag_V_Fil=sqrt((Vtobera_u_V_mean_Fil).^2+(Vtobera_v_V_mean_Fil).^2);

```

```
Vtobera_Mag_V_STD_Fil=sqrt((Vtobera_u_V_S_Fil).^2+(Vtobera_v_V_S_Fil).^2);
```

```
Vtobera_Mag_V_Fil_2=sqrt((Vtobera_u_V_mean_Fil_2).^2+(Vtobera_v_V_mean_Fil_2).^2);
```

```
Vtobera_Mag_V_STD_Fil_2=sqrt((Vtobera_u_V_S_Fil_2).^2+(Vtobera_v_V_S_Fil_2).^2);
```

```
Vtobera_Mag_V_Fil_3=sqrt((Vtobera_u_V_mean_Fil_3).^2+(Vtobera_v_V_mean_Fil_3).^2);
```

```
Vtobera_Mag_V_STD_Fil_3=sqrt((Vtobera_u_V_S_Fil_3).^2+(Vtobera_v_V_S_Fil_3).^2);
```

```
%Ajuste de la orientación de las gráficas
```

```
PX_H_1=Tx{1,1}(PosCol1,:).';
```

```
PY_H_1=Ty{1,1}(PosCol1,:).';
```

```
PX_V_1=Tx{1,1}(:,PosRen1);
```

```
PY_V_1=Ty{1,1}(:,PosRen1);
```

```
PX_H_1=-(PX_H_1-PX_H_1(127,1));
```

```
PY_V_1=PY_V_1-PY_V_1(1,1);
```

```
%Guardado de variables
```

```
Ufiltrado_sup120=Ufiltrado;
```

```
Vfiltrado_sup120=Vfiltrado;
```

```
PT_Fil_sup120=PT_Fil;
```

```
PX_H_1_sup120=PX_H_1;
```

```
PY_V_1_sup120=PY_V_1;
```

```
Vtobera_Mag_H_Fil_sup120=Vtobera_Mag_H_Fil;
```

```
Vtobera_Mag_H_STD_Fil_sup120=Vtobera_Mag_H_STD_Fil;
```

```
Vtobera_Mag_H_Fil_2_sup120=Vtobera_Mag_H_Fil_2;
```

```
Vtobera_Mag_H_STD_Fil_2_sup120=Vtobera_Mag_H_STD_Fil_2;
```

```
Vtobera_Mag_H_Fil_3_sup120=Vtobera_Mag_H_Fil_3;
```

```
Vtobera_Mag_H_STD_Fil_3_sup120=Vtobera_Mag_H_STD_Fil_3;
```

```
Vtobera_Mag_V_Fil_sup120=Vtobera_Mag_V_Fil;
```

```
Vtobera_Mag_V_STD_Fil_sup120=Vtobera_Mag_V_STD_Fil;
```

```

Vtobera_Mag_V_Fil_2_sup120=Vtobera_Mag_V_Fil_2;
Vtobera_Mag_V_STD_Fil_2_sup120=Vtobera_Mag_V_STD_Fil_2;

Vtobera_Mag_V_Fil_3_sup120=Vtobera_Mag_V_Fil_3;
Vtobera_Mag_V_STD_Fil_3_sup120=Vtobera_Mag_V_STD_Fil_3;

save('WorkspaceSuperficial120.mat','Ufiltrado_sup120','Vfiltrado_s
up120','PT_Fil_sup120','PX_H_1_sup120','Vtobera_Mag_H_Fil_sup120',
'Vtobera_Mag_H_STD_Fil_sup120','Vtobera_Mag_H_Fil_2_sup120','Vtobera_Mag_H_STD_Fil_2_sup120','Vtobera_Mag_H_Fil_3_sup120','Vtobera_Mag_H_STD_Fil_3_sup120','Vtobera_Mag_V_Fil_sup120','Vtobera_Mag_V_STD_Fil_sup120','Vtobera_Mag_V_Fil_2_sup120','Vtobera_Mag_V_STD_Fil_2_sup120','Vtobera_Mag_V_Fil_3_sup120','Vtobera_Mag_V_STD_Fil_3_sup120','PY_V_1_sup120')

```

8.4 Código graficador de las 3 grabaciones

```

load("Workspaceespejo.mat","WorkspaceLateralFiltrado.mat","Workspa
ceSuperficial120.mat")
load('WorkspaceSuperficial120.mat')
load('WorkspaceLateralFiltrado.mat')
load('Workspaceespejo.mat')

%Modificador de la distancia en diámetros
PX_H_1_lateral=(PX_H_1_lateral)/(0.007);
PY_V_1_lateral=(PY_V_1_lateral)/(0.007);

PX_H_1_espejo=(PX_H_1_espejo)/(0.007);
PY_V_1_espejo=(PY_V_1_espejo)/(0.007);

PX_H_1_sup120=(PX_H_1_sup120)/(0.007);
PY_V_1_sup120=(PY_V_1_sup120)/(0.007);

%Graficas filtradas de velocidad Lateral
errorbar(PX_H_1_lateral,Vtobera_Mag_H_Fil_lateral,Vtobera_Mag_H_ST
D_Fil_lateral, ".", "MarkerSize",10)
%MagnitudLateralUvsX=figure;
xlabel("X en Diámetros")
ylabel("Magnitud de la Velocidad U(m/s)")

errorbar(PX_H_1_lateral,Vtobera_Mag_H_Fil_2_lateral,Vtobera_Mag_H_
STD_Fil_2_lateral,"x","MarkerSize",10,'Color','[0.9290      0.6940
0.1250]')
%MagnitudLateralUvsX=figure;
xlabel("X en Diámetros")

```

```

ylabel("Magnitud de la Velocidad U(m/s)")

errorbar(PX_H_1_lateral,Vtobera_Mag_H_Fil_3_lateral,Vtobera_Mag_H_
STD_Fil_3_lateral,"s","MarkerSize",10,'Color',[0.6350      0.0780
0.1840])')
%MagnitudLateralUvsX=figure;
xlabel("X en Diámetros")
ylabel("Magnitud de la Velocidad U(m/s)")

errorbar(PX_H_1_lateral,Vtobera_Mag_H_Fil_lateral,Vtobera_Mag_H_ST
D_Fil_lateral,".", "MarkerSize",10)
hold on

errorbar(PX_H_1_lateral,Vtobera_Mag_H_Fil_2_lateral,Vtobera_Mag_H_
STD_Fil_2_lateral,"x","MarkerSize",10,'Color',[0.9290      0.6940
0.1250])')

errorbar(PX_H_1_lateral,Vtobera_Mag_H_Fil_3_lateral,Vtobera_Mag_H_
STD_Fil_3_lateral,"s","MarkerSize",10,'Color',[0.6350      0.0780
0.1840])')
hold off

%MagnitudLateralUvsX=figure;
xlabel("X en Diámetros")
ylabel("Magnitud de la Velocidad U(m/s)")

plot(PX_H_1,Vtobera_Mag_H_STD_Fil,".")

xlim([0.02 0.14])
title('Desviacion estandar de la mag de velocidad Vertical Fil ')
xlabel("Posicion x (m)")
ylabel("Magnitud Velocidad(m/s)")

errorbar(Vtobera_Mag_V_Fil_lateral,PY_V_1_lateral,Vtobera_Mag_V_ST
D_Fil_lateral,"horizontal","-")
xlabel("Magnitud Velocidad U (m/s)")
ylabel("Posicion Z en diametros")
xlim([0,1.2])

errorbar(Vtobera_Mag_V_Fil_2_lateral,PY_V_1_lateral,Vtobera_Mag_V_
STD_Fil_2_lateral,"horizontal","-")
%MagnitudLateralWvsZ=figure;
xlabel("Magnitud Velocidad U (m/s)")
ylabel("Posicion Z en diametros")
xlim([0,1.2])

```

```

errorbar(Vtobera_Mag_V_Fil_3_lateral,PY_V_1_lateral,Vtobera_Mag_V_
STD_Fil_3_lateral,"horizontal","-")
%MagnitudLateralWvsZ=figure;
xlabel("Magnitud Velocidad U (m/s)")
ylabel("Posicion Z en diametros")
xlim([0,1.2])

errorbar(Vtobera_Mag_V_Fil_lateral,PY_V_1_lateral,Vtobera_Mag_V_ST
D_Fil_lateral,"horizontal","-")
hold on

errorbar(Vtobera_Mag_V_Fil_2_lateral,PY_V_1_lateral,Vtobera_Mag_V_
STD_Fil_2_lateral,"horizontal","-")

errorbar(Vtobera_Mag_V_Fil_3_lateral,PY_V_1_lateral,Vtobera_Mag_V_
STD_Fil_3_lateral,"horizontal","-")
hold off
%MagnitudLateralWvsZ=figure;
xlabel("Magnitud Velocidad U (m/s)")
ylabel("Posicion Z en diametros")

plot(PY_V_1,Vtobera_Mag_V_STD_Fil,"-")

title('Desviacion estandar de la mag de velocidad Vertical Fil')
xlabel("Posicion y (m)")
ylabel("Magnitud Velocidad(m/s)")

%Graficas filtradas de velocidad Corte Horizontal

errorbar(PX_H_1_espejo,Vtobera_Mag_H_Fil_espejo,Vtobera_Mag_H_STD_
Fil_espejo,".", "MarkerSize",10)
%MagnitudEspejoUvsX=figure;
xlabel("X en Diámetros")
ylabel("Magnitud Velocidad U (m/s)")

errorbar(PX_H_1_espejo,Vtobera_Mag_H_Fil_2_espejo,Vtobera_Mag_H_ST
D_Fil_2_espejo,".", "MarkerSize",10,"MarkerSize",10, 'Color', '[0.929
0 0.6940 0.1250]')
%MagnitudEspejoUvsX=figure;
xlabel("X en Diámetros")
ylabel("Magnitud Velocidad U (m/s)")

```

```

errorbar(PX_H_1_espejo,Vtobera_Mag_H_Fil_3_espejo,Vtobera_Mag_H_STD_
D_Fil_3_espejo, ".", "MarkerSize",10,'Color',[0.6350      0.0780
0.1840]')
%MagnitudEspejoUvsX=figure;
xlabel("X en Diámetros")
ylabel("Magnitud Velocidad U (m/s)")

errorbar(PX_H_1_espejo,Vtobera_Mag_H_Fil_espejo,Vtobera_Mag_H_STD_
Fil_espejo, ".", "MarkerSize",10)
hold on

errorbar(PX_H_1_espejo,Vtobera_Mag_H_Fil_2_espejo,Vtobera_Mag_H_STD_
D_Fil_2_espejo, ".", "MarkerSize",10,'Color',[0.9290      0.6940
0.1250]')

errorbar(PX_H_1_espejo,Vtobera_Mag_H_Fil_3_espejo,Vtobera_Mag_H_STD_
D_Fil_3_espejo, ".", "MarkerSize",10,'Color',[0.6350      0.0780
0.1840]')
hold off

%MagnitudEspejoUvsX=figure;
xlabel("X en Diámetros")
ylabel("Magnitud Velocidad U (m/s)")

plot(PX_H_1,Vtobera_Mag_H_STD_Fil, ".")

xlim([0.02 0.14])
title('Desviacion estandar de la mag de velocidad Vertical Fil ')
xlabel("Posicion x (m)")
ylabel("Magnitud Velocidad(m/s)")

errorbar(Vtobera_Mag_V_Fil_3_espejo,PY_V_1_espejo,Vtobera_Mag_V_STD_
D_Fil_espejo,"horizontal","-")
xlabel("Velocidad U (m/s)")
ylabel("Posición y (m)")
xlim([0,1.2])
errorbar(Vtobera_Mag_V_Fil_2_espejo,PY_V_1_espejo,Vtobera_Mag_V_STD_
D_Fil_2_espejo,"horizontal","-")
xlabel("Velocidad U (m/s)")
ylabel("Posición y (m)")
xlim([0,1.2])
errorbar(Vtobera_Mag_V_Fil_espejo,PY_V_1_espejo,Vtobera_Mag_V_STD_
Fil_3_espejo,"horizontal","-")

```



```

xlabel("Velocidad U (m/s)")
ylabel("Posición y (m)")
xlim([0,1.2])
%MagnitudespejoUvsY=figure;

xlabel("Magnitud Velocidad U (m/s)")
ylabel("Posicion y (m)")
xlim([0,1.2])
plot(PY_V_1,Vtobera_Mag_V_STD_Fil,"-")

title('Desviacion estandar de la mag de velocidad Vertical Fil')
xlabel("Posicion y (m)")
ylabel("Magnitud Velocidad(m/s)")

%Graficas filtradas de velocidadparte superior

errorbar(PX_H_1_sup120,Vtobera_Mag_H_Fil_sup120,Vtobera_Mag_H_STD_
Fil_sup120,"-")
%MagnitudSuperficialUvsY=figure;
xlabel("Posicion Y (m)")
ylabel("Magnitud Velocidad U (m/s)")

errorbar(PX_H_1_sup120,Vtobera_Mag_H_Fil_2_sup120,Vtobera_Mag_H_ST
D_Fil_2_sup120,"-")
%MagnitudSuperficialUvsY=figure;
xlabel("Posicion Y (m)")
ylabel("Magnitud Velocidad U (m/s)")

errorbar(PX_H_1_sup120,Vtobera_Mag_H_Fil_3_sup120,Vtobera_Mag_H_ST
D_Fil_3_sup120,"-")
%MagnitudSuperficialUvsY=figure;
xlabel("Posicion Y (m)")
ylabel("Magnitud Velocidad U (m/s)")

errorbar(PX_H_1_sup120,Vtobera_Mag_H_Fil_sup120,Vtobera_Mag_H_STD_
Fil_sup120,"-")
hold on

errorbar(PX_H_1_sup120,Vtobera_Mag_H_Fil_2_sup120,Vtobera_Mag_H_ST
D_Fil_2_sup120,"-")

errorbar(PX_H_1_sup120,Vtobera_Mag_H_Fil_3_sup120,Vtobera_Mag_H_ST
D_Fil_3_sup120,"-")
hold off

```

```

%MagnitudSuperficialUvsY=figure;
xlabel("Posicion Y (m)")
ylabel("Magnitud Velocidad U (m/s)")

plot(PX_H_1,Vtobera_Mag_H_STD_Fil,".")
xlim([0.02 0.14])
title('Desviacion estandar de la mag de velocidad Vertical Fil ')
xlabel("Posicion x (m)")
ylabel("Magnitud Velocidad(m/s)")

errorbar(PY_V_1_sup120,Vtobera_Mag_V_Fil_sup120,Vtobera_Mag_V_STD_Fil_sup120,".", "MarkerSize",10)
xlabel("X en Diámetros")
ylabel("Magnitud Velocidad U (m/s)")

errorbar(PY_V_1_sup120,Vtobera_Mag_V_Fil_2_sup120,Vtobera_Mag_V_STD_Fil_2_sup120,".", "MarkerSize",10,"Color",[0.9290 0.6940 0.1250]')
xlabel("X en Diámetros")
ylabel("Magnitud Velocidad U (m/s)")

errorbar(PY_V_1_sup120,Vtobera_Mag_V_Fil_3_sup120,Vtobera_Mag_V_STD_Fil_3_sup120,".", "MarkerSize",10,'Color',[0.6350 0.0780 0.1840]')
xlabel("X en Diámetros")
ylabel("Magnitud Velocidad U (m/s)")

errorbar(PY_V_1_sup120,Vtobera_Mag_V_Fil_sup120,Vtobera_Mag_V_STD_Fil_sup120,".", "MarkerSize",10)
hold on
errorbar(PY_V_1_sup120,Vtobera_Mag_V_Fil_2_sup120,Vtobera_Mag_V_STD_Fil_2_sup120,".", "MarkerSize",10)
errorbar(PY_V_1_sup120,Vtobera_Mag_V_Fil_3_sup120,Vtobera_Mag_V_STD_Fil_3_sup120,".", "MarkerSize",10)
hold off

%MagnitudSuperficialUvsX=figure;
xlabel("X en Diámetros")
ylabel("Magnitud Velocidad U (m/s)")

plot(PY_V_1,Vtobera_Mag_V_STD_Fil,"-")
title('Desviacion estandar de la mag de velocidad Vertical Fil')
xlabel("Posicion y (m)")
ylabel("Magnitud Velocidad(m/s)")

```

```

errorbar(PX_H_1_lateral,Vtobera_Mag_H_Fil_2_lateral,Vtobera_Mag_H_
STD_Fil_2_lateral, ".", "MarkerSize",10)
hold on
errorbar(PX_H_1_espejo,Vtobera_Mag_H_Fil_2_espejo,Vtobera_Mag_H_ST
D_Fil_2_espejo, ".", "MarkerSize",10)
errorbar(PY_V_1_sup120,Vtobera_Mag_V_Fil_2_sup120,Vtobera_Mag_V_ST
D_Fil_2_sup120, ".", "MarkerSize",10)
hold off

```

```

%UvsXtrescasos=figure;

```

```

xlabel("X en Diámetros")
ylabel("Magnitud Velocidad U (m/s)")

```

```

errorbar(PX_H_1_lateral,Vtobera_Mag_H_Fil_2_lateral,Vtobera_Mag_H_
STD_Fil_2_lateral, ".", "MarkerSize",10)
hold on
errorbar(PX_H_1_espejo,Vtobera_Mag_H_Fil_2_espejo,Vtobera_Mag_H_ST
D_Fil_2_espejo, ".", "MarkerSize",10)
errorbar(PY_V_1_sup120,Vtobera_Mag_V_Fil_2_sup120,Vtobera_Mag_V_ST
D_Fil_2_sup120, ".", "MarkerSize",10)
hold off

```

```

%UvsXtrescasos=figure;
xlim([5,23])
xlabel("X en Diámetros")
ylabel("Velocidad U (m/s)")

```

```

errorbar(PX_H_1_lateral,Vtobera_Mag_H_Fil_2_lateral,Vtobera_Mag_H_
STD_Fil_2_lateral, ".", "MarkerSize",10)
hold on
errorbar(PX_H_1_espejo,Vtobera_Mag_H_Fil_2_espejo,Vtobera_Mag_H_ST
D_Fil_2_espejo, ".", "MarkerSize",10)
errorbar(PY_V_1_sup120,Vtobera_Mag_V_Fil_2_sup120,Vtobera_Mag_V_ST
D_Fil_2_sup120, ".", "MarkerSize",10)
hold off

```

```

%UvsXtrescasos=figure;
xlabel("X en Diámetros")
ylabel("Magnitud Velocidad U (m/s)")

```

```

errorbar(PX_H_1_lateral,Vtobera_Mag_H_Fil_lateral,Vtobera_Mag_H_ST
D_Fil_lateral, ".", "MarkerSize",10)
hold on

```

```

errorbar(PY_V_1_sup120,Vtobera_Mag_V_Fil_2_sup120,Vtobera_Mag_V_STD_Fil_2_sup120,".", "MarkerSize",10)
hold off

```

```

xlim([0,28])
xlabel("X en Diámetros")
ylabel("Velocidad U (m/s)")

```

```

errorbar(PX_H_1_lateral,Vtobera_Mag_H_Fil_lateral,Vtobera_Mag_H_STD_Fil_lateral,".", "MarkerSize",10)
hold on
errorbar(PY_V_1_sup120,Vtobera_Mag_V_Fil_2_sup120,Vtobera_Mag_V_STD_Fil_2_sup120,".", "MarkerSize",10)
hold off

```

```

%UvsXtrescasos=figure;
xlim([13,28])
xlabel("X en Diámetros")
ylabel("Velocidad U (m/s)")

```

```

errorbar(PX_H_1_lateral,Vtobera_Mag_H_Fil_2_lateral,Vtobera_Mag_H_STD_Fil_2_lateral,".", "MarkerSize",10)
hold on
errorbar(PX_H_1_espejo,Vtobera_Mag_H_Fil_2_espejo,Vtobera_Mag_H_STD_Fil_2_espejo,".", "MarkerSize",10)
hold off
xlabel("X en Diámetros")
ylabel("Velocidad U (m/s)")

```

```

errorbar(PX_H_1_espejo,Vtobera_Mag_H_Fil_2_espejo,Vtobera_Mag_H_STD_Fil_2_espejo,".", "MarkerSize",10)
hold on
errorbar(PY_V_1_sup120,Vtobera_Mag_V_Fil_2_sup120,Vtobera_Mag_V_STD_Fil_2_sup120,".", "MarkerSize",10)
hold off
xlim([0,23])
xlabel("X en Diámetros")
ylabel("Velocidad U (m/s)")

```

```

errorbar(PX_H_1_lateral,Vtobera_Mag_H_Fil_2_lateral,Vtobera_Mag_H_STD_Fil_2_lateral,".", "MarkerSize",10)
hold on
errorbar(PX_H_1_espejo,Vtobera_Mag_H_Fil_2_espejo,Vtobera_Mag_H_STD_Fil_2_espejo,".", "MarkerSize",10)

```

```
errorbar(PY_V_1_sup120,Vtobera_Mag_V_Fil_2_sup120,Vtobera_Mag_V_ST  
D_Fil_2_sup120,".", "MarkerSize",10)  
hold off  
%UvsXtrescasos=figure;  
xlim([15,22])  
xlabel("X en Diámetros")  
ylabel("Velocidad U (m/s)")
```