

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES
CÁTEDRA DE PRÁCTICA SUPERVISADA



INFORME FINAL

**“Caracterización de flujos en modelos físicos y prototipos
usando técnicas de velocimetría avanzadas (LSPIV, LSPTV y
ADV)”**

Autor: Crivello, Franco Manuel

Supervisor Externo: Patalano, Antoine

Tutor Docente: García, Carlos Marcelo

Año 2018

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a mis padres, que con gran esfuerzo me enviaron a estudiar a la Universidad Nacional de Córdoba en búsqueda de una mejor educación, nuevas experiencias y mejores oportunidades para desarrollarme, y a mis hermanos y familia que me apoyaron incondicionalmente en cada decisión que tomé.

Quiero agradecer especialmente al Dr. Carlos Marcelo García por abrirme las puertas al CETA, donde después de dos años de colaboración aún me sorprende la pasión que le pone a enseñar y la generosidad de brindarme todas las opciones a su alcance ante cada planteo que le realizaba; y a Antoine Patalano por tomarse el tiempo en mostrarme lo necesario para llevar a cabo cada tarea responsablemente y por guiarme en la realización de la Práctica Supervisada. También doy las gracias al grupo del CETA por los momentos compartidos, y en especial a Leandro Massó por ser mi compañero todo este tiempo. Además, quiero agradecer a Graciela Scacchi, Marcela Reynales de la FICH por permitirme trabajar con ellos y su grupo en Santa Fe, me dejaron una experiencia sumamente satisfactoria y me hicieron sentir uno más del grupo.

Les doy las gracias a los buenos amigos que me dejó la facultad, que sin ellos tampoco hubiera sido posible llegar hasta acá y me queda algo aprendido de cada uno. El tiempo que pasé con ellos es lo mejor que me llevo de estos casi 6 años. También le agradezco a mis compañeros de cursado y a los grandes profesores que tiene la carrera: los que hacen amenas las clases y logran que uno busque conocer un poco más de lo dado.

Por último y para tenerlo presente, agradezco a todos los argentinos que a través de sus impuestos mantienen la universidad pública y gratuita y permiten que carreras tan complejas y con tanto contenido teórico y práctico estén al alcance de todos. Espero poder retribuirles a ellos y al país la confianza depositada.

Caracterización de flujos en modelos físicos y prototipos usando técnicas de velocimetría avanzadas (LSPIV, LSPTV y ADV)

PALABRAS CLAVES

LSPIV, LSPTV, ADV, RIVeR

RESUMEN

Para el desarrollo de proyectos de obras civiles intervinientes en cursos de agua es necesario disponer de datos que permitan caracterizar el escurrimiento del flujo en presencia de esas obras, y una de las formas de obtenerlos es utilizando métodos experimentales en modelos físicos o en prototipos. Históricamente se han utilizado tecnologías intrusivas en la determinación de parámetros que caractericen el flujo en presencia de infraestructura hídrica (por ejemplo, usando equipos hidro-acústicos como el velocímetro acústico Doppler (ADV, por sus siglas en inglés) pero esta tecnología brinda información local. En este trabajo se explora la posibilidad de caracterizar el flujo utilizando nuevas técnicas de medición de velocidades superficiales por imágenes, tales como son la Velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala (LSPIV, por sus siglas en inglés) y Velocimetría por Seguimiento de Partículas a Gran Escala (LSPTV, por sus siglas en inglés), junto con el uso del equipo hidro-acústico ADV, con el objetivo de poder realizar una valoración objetiva en relación a la confiabilidad de las técnicas anteriormente nombradas y teniendo en cuenta la aplicación de estas nuevas tecnologías a la práctica ingenieril. Estas nuevas técnicas son mucho más económicas que aquellas intrusivas gracias a que no se necesita equipos o aparatos especiales, únicamente un dispositivo de captura de video y una computadora para procesamiento.

ÍNDICE

Índice de Figuras	7
Capítulo 1: Marco Referencial de la práctica	12
1.1 Introducción a las técnicas de velocimetría avanzadas	12
1.2 Técnicas de velocimetría por imágenes digitales	12
1.2.1 Descripción general.....	12
1.2.2 Procesamiento a Gran Escala.....	14
1.2.3 Procedimiento de trabajo	14
1.2.4 Proceso de correlación espacial en PIV	18
1.3 Técnicas hidro-acústicas	20
1.3.1 ADV: funcionamiento y ventajas.....	20
1.3.2 ADV: Parámetros de configuración de registro	22
1.4 Objetivo general.....	23
1.5 Objetivos específicos.....	23
1.6 Metodología de trabajo	23
Capítulo 2: Caracterización de flujo alrededor de una pila	24
2.1 Planteo del caso y procesamiento de videos.....	24
2.2 Resultados.....	27
Capítulo 3: Variaciones de flujo en canal por paso de barcazas	30
3.1 Introducción a problema.....	30
3.2 Planteo del caso y análisis de videos	32
3.3 Resultados.....	33
3.3.1 Caso sin presencia de barcazas	33
3.3.2 Desplazamiento de barcazas en sentido contrario a la dirección del flujo	35
3.3.2 Desplazamiento de barcazas en el mismo sentido que la dirección del flujo	36
Capítulo 4: Caracterización de flujo alrededor de estribo de puente en presencia de gaviones de geotextiles	39
4.1 Introducción al problema.....	39
4.2 Planteo del experimento.....	40
4.3 Definición de puntos de medición	42
4.4 Definición de parámetros del ADV y desarrollo del experimento	44
4.5 Desarrollo de los ensayos	48
4.6 Resultados.....	50
4.7 LSPTV	65

Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones	69
5.1 Conclusiones de cada caso.....	69
5.1.1 Caracterización de flujo alrededor de una pila	69
5.1.2 Variaciones de flujo en canal por paso de barcazas	69
5.1.3 Caracterización de flujo alrededor de estribo de puente en presencia de gaviones de geotextiles.....	70
5.2 Conclusión sobre la PS	70
Capítulo 6: Referencias bibliográficas	71
Anexo 1: Tutorial de uso de software PIVLab y RIVeR	72
A.1 Instalación de software	72
A.2 Extracción de imágenes.....	75
A.3 Procesamiento de las imágenes	77
A.3.1 Cargar imágenes	77
A.3.2 Configuración de análisis (Analyses Settings).....	79
A.3.2 Análisis (Analyses).....	83
A.3.2 Cálculo del campo promedio.....	84
A.4 Rectificación de los resultados por RIVeR	85
A.4.1 Rectificación de los resultados	85
A.4.2 Visualización de los resultados	91
A.4.3 Estimación de caudal en una sección	93
A.4.4 Exportación de los resultados.....	95

Índice de Figuras

Figura 1. 1: Esquema de la metodología de trabajo para PIV y PTV.....	13
Figura 1. 2: Esquema de la metodología de trabajo para LSPIV y LSPTV.....	15
Figura 1. 3: Matriz homográfica H, que relaciona los vectores reales con los rectificadas.....	16
Figura 1. 4: Interfaz del programa RIVeR. En la ventana izquierda se muestra la imagen original, y en la derecha aparecen los vectores de la imagen rectificadas.....	17
Figura 1. 5: Imágenes de la izquierda aplica LSPIV a un río en Pisco, Perú; imágenes de la derecha aplica LSPTV al modelo Suquía-La Cañada perteneciente al Laboratorio de Hidráulica. Imágenes pertenecientes a Patalano et al. 2017.	18
Figura 1. 6: Esquema de proceso de muestreo de imagen “Fotograma a Fotograma”. Práctica Supervisada de Lucero, año 2015.	19
Figura 1. 7: Modelo idealizado de procesamiento digital lineal, describiendo la relación funcional entre dos cuadros sucesivos. Práctica Supervisada de Lucero, año 2015.	19

Figura 1. 8: Formulación integral de correlación cruzada.	20
Figura 1. 9: Micro ADV YSI SonTek 16MHz..	21
Figura 2. 1: Instalaciones del Laboratorio Ven Te Chow, observándose a la derecha el canal utilizado. Imagen perteneciente a Patalano, Antoine.	25
Figura 2. 2: Imagen no rectificadas de la pila dentro del canal con las diferentes partículas sembradas.....	25
Figura 2. 3: Número de Reynolds, relaciona fuerzas inerciales y fuerzas viscosas dentro del fluido.	2526
Figura 2. 4: Localización de los puntos en donde se obtuvieron las series de tiempo de la velocidad. A su vez, se registraron perfiles transversales al escurrimiento del flujo a distancias de x/D iguales a 0.0, 0.6, 1.3, 1.9, 2.5, 3.1. Todos estos datos se extrajeron mediante el software RIVeR.	26
Figura 2. 5: Evolución de la velocidad media longitudinal a lo largo de la línea central del canal.	27
Figura 2. 6: Trayectorias rectificadas de las partículas obtenidas con LSPTV en donde se observa la longitud de la zona de estancamiento. Escala en m/s.....	28
Figura 2. 7: Velocidad media del flujo obtenida adimensionalizada aguas debajo de la pila.	28
Figura 2. 8: Velocidad media del flujo adimensionalizada aguas debajo de la pila, resultados obtenidos por Herrero (2014) mediante ADV.	29
Figura 2. 9: Fórmula para calcular el Número de Strouhal.	29
Figura 2. 10: Espectro de energía obtenido para el punto 2. Se observa claramente el pico de energía en 0.1 Hz.	30
Figura 3. 1: Ubicación de Romeoville, Illinois, EE UU. Imagen tomada de Google Earth®.	31
Figura 3. 2: Canal donde se realizaron las mediciones. Imagen perteneciente a Patalano, Antoine... 31	
Figura 3. 3: Equipo usado para la obtención de los videos. Imagen perteneciente a Patalano, Antoine.....	32
Figura 3. 4: A la izquierda: Referencias físicas (puntos 1, 2, 3 y 4) para la introducción de distancias. A la derecha: Imagen obtenida de descomposición de video.	33
Figura 3. 5: De izquierda a derecha: Posiciones de Puntos 0, 1 y 2 respectivamente.....	34
Figura 3. 6: Velocidad Longitudinal de Punto 0 de video 8752, en m/s.	34
Figura 3. 7: Velocidad Longitudinal de Puntos 1 de video 8752, en m/s.....	34
Figura 3. 8: Velocidad Longitudinal de Punto 2 de video 8752, en m/s.	35
Figura 3. 9: Velocidad Longitudinal en Punto 0 de video 8753, en m/s.	35
Figura 3. 10: Velocidad Longitudinal en Punto 1 de video 8753, en m/s.	35
Figura 3. 11: Velocidad Transversal en Punto 0 de video 8753, en m/s.....	36
Figura 3. 12: Velocidad Transversal en Punto 1 de video 8753, en m/s.....	36
Figura 3. 13: Velocidad longitudinal de Punto 0 y Velocidad Longitudinal “filtrada” del Punto 0 de video 8753, a través del cálculo de la media con datos de velocidad 2,5 segundos antes y 2,5 segundos después.....	36
Figura 3. 14: Velocidad Longitudinal de Punto 0 de video 8754, desde segundo 0 a segundo 33, en m/s.	37

Figura 3. 15: Velocidad Longitudinal de Punto 0 de video 8754, desde segundo 60 a segundo 195, en m/s.	37
Figura 3. 16: Velocidad Longitudinal de Punto 1 de video 8754, en m/s.	38
Figura 3. 17: Velocidad Longitudinal de Punto 2 de video 8754, en m/s.	38
Figura 3. 18: Velocidad longitudinal de Punto 0: original y filtrado.	39
Figura 4. 1: El Litoral (imagen izquierda) está compuesto por las provincias Entre Ríos, Santa Fe, Chaco, Formosa, Corrientes y Misiones. La ciudad de Santa Fe (imagen derecha) está rodeada por ríos con características del tipo llanura. Imagen tomada de Google Earth®	40
Figura 4. 2: Canal empleado en el testeo de configuraciones y aplicación de las técnicas de medición.	41
Figura 4. 3: Configuración adoptada con variación de 5 seditubos (G5). Imagen izquierda: vista desde aguas arriba. Imagen derecha: vista desde aguas abajo.	41
Figura 4. 4: Configuración adoptada con variación de 2 seditubos (G2).	42
Figura 4. 5: Zona de fondo rigidizado, aguas arriba de esta se mantiene el fondo móvil de arena.	42
Figura 4. 6: Secciones y posiciones de las verticales. Se indica en el gráfico las verticales donde se miden 7 puntos y en cuales 5 puntos.	44
Figura 4. 7: Posiciones aproximadas de los puntos en las verticales. Distancias desde el fondo, en cm.....	44
Figura 4. 8: Gráfica representativa de Coeficiente de Variación vs. Tiempo de medición.	45
Figura 4. 9: Vista de la interfaz en la solapa de registro de componentes de velocidad al medir.	48
Figura 4. 10: Vista de la interfaz en la solapa de registro de correlación al medir.	49
Figura 4. 11: Vista de la interfaz en la solapa de registro de SNR al medir.	49
Figura 4. 12: Vista de la interfaz del programa WinADV. En la barra de comandos (parte superior izquierda) encontramos la opción para procesar el archivo “.ADV”.	50
Figura 4. 13: Vista del cuadro de opciones de procesado del WinADV.	51
Figura 4. 14: Tabla resumen de resultados de Sección 0 Aguas Arriba con 2 geotubos: S0AA-G2.	52
Figura 4. 15: Tabla resumen de resultados de Sección 0 Aguas Arriba con 3 geotubos: S0AA-G3.	53
Figura 4. 16: Tabla resumen de resultados de Sección 0 Aguas Arriba con 5 geotubos: S0AA-G5.	55
Figura 4. 17: Ecuación de TKE (Turbulence Kinetic Energy).	51
Figura 4. 18: TKE para la variación con 2 geotubos G2 en la sección del estribo (S0) visto desde aguas arriba, graficado desde la vertical 36 hasta la vertical 120. Se identifican los puntos de medición, numerados en las tablas de 1 a 7, en las diferentes verticales, siendo el punto 1 el más cercano al pelo libre, y el punto 7 el más cercano al fondo.	58
Figura 4. 19: TKE para la variación con 3 geotubos G3 en la sección del estribo (S0) visto desde aguas arriba, graficado desde la vertical 36 hasta la vertical 120. Se identifican los puntos de medición, numerados en las tablas de 1 a 7, en las diferentes verticales, siendo el punto 1 el más cercano al pelo libre, y el punto 7 el más cercano al fondo.	58
Figura 4. 20: TKE para la variación con 5 geotubos G5 en la sección del estribo (S0) visto desde aguas arriba, graficado desde la vertical 36 hasta la vertical 120. Se identifican los puntos de medición, numerados en las tablas de 1 a 7, en las diferentes verticales, siendo el punto 1 el más cercano al pelo libre, y el punto 7 el más cercano al fondo.	59
Figura 4. 21: Perfil de Velocidad en dirección del eje x, en la Vertical 36 para la variación con 2 geotubos G2.	59

Figura 4. 22: Perfil de Velocidad en dirección del eje x, en la Vertical 40 para la variación con 2 geotubos G2.....	60
Figura 4. 23: Perfil de Velocidad en dirección del eje x, en la Vertical 45 para la variación con 2 geotubos G2.....	60
Figura 4. 24: Perfil de Velocidad en dirección del eje x, en la Vertical 36 para la variación con 3 geotubos G3.....	60
Figura 4. 25: Perfil de Velocidad en dirección del eje x, en la Vertical 40 para la variación con 3 geotubos G3.....	61
Figura 4. 26: Perfil de Velocidad en dirección del eje x, en la Vertical 45 para la variación con 3 geotubos G3.....	61
Figura 4. 27: Perfil de Velocidad en dirección del eje x, en la Vertical 36 para la variación con 5 geotubos G5.....	61
Figura 4. 28: Perfil de Velocidad en dirección del eje x, en la Vertical 40 para la variación con 5 geotubos G5.....	62
Figura 4. 29: Perfil de Velocidad en dirección del eje x, en la Vertical 45 para la variación con 5 geotubos G5.....	62
Figura 4. 30: Perfil de velocidad en dirección del eje y, en la Vertical 36 para la variación con 2 geotubos G2.....	63
Figura 4. 31: Perfil de velocidad en dirección del eje y, en la Vertical 36 para la variación con 3 geotubos G3.....	63
Figura 4. 32: Perfil de velocidad en dirección del eje y, en la Vertical 36 para la variación con 5 geotubos G5.....	64
Figura 4. 33: Tabla con Componentes promediados de Velocidad en ejes x, y, z, para las distintas variaciones G2, G3 y G5.	64
Figura 4. 34: Soporte para cámara sobre pasarela colgante.	66
Figura 4. 35: Trayectorias de partículas rectificadas de variación con 2 geotubos G2. Escala de velocidad en m/s.....	67
Figura 4. 36: Trayectorias de partículas rectificadas de variación con 3 geotubos G3. Escala de velocidad en m/s.....	67
Figura 4. 37: Trayectorias de partículas rectificadas de variación con 5 geotubos G5. Escala de velocidad en m/s.....	68
Figura A. 1: Imagen de interfaz del sitio de descarga de RIVeR.....	72
Figura A. 2: Imagen de interfaz del sitio de descarga de PIVlab.....	73
Figura A. 3: Interfaz del programa Matlab, en la pestaña “Apps”.....	74
Figura A. 4: Ventana surgida de clicar en “Install Apps”.....	74
Figura A. 5: Opciones de Apps instaladas, mostradas al clicar en la pestaña “Apps”, dentro del programa Matlab.	75
Figura A. 6: Interfaz del software RIVeR.	76
Figura A. 7: Opción a clicar para extraer imágenes de video.....	76
Figura A. 8: Cuadro donde seleccionar los FPS y el rango de tiempo donde queremos tomar las imágenes.....	76
Figura A. 9: Interfaz del software PIVlab. En la esquina derecha superior se encuentra la opción para cargar imágenes (Load Images).	77

Figura A. 10: Cuadro desde donde se importan las imágenes para analizar.....	78
Figura A. 11: Interfaz del PIVlab, con las imágenes ya importadas.	78
Figura A. 12: Interfaz de PIVlab con la opción “Analyses settings” clickeada.....	79
Figura A. 13: ROI (Region of Interest) dibujada en PIVlab.	79
Figura A. 14: Máscaras dibujadas sobre imagen. Una vez dibujada se debe clicar dos veces dentro de ella para terminar y que se muestre en color rojo, como la máscara superior de la imagen.	80
Figura A. 15: Panel desplegado al clicar “Image pre-processing”.....	81
Figura A. 16: Imagen con filtro aplicado.	82
Figura A. 17: Panel desplegado en el margen derecho al clicar la opción “PIV Settings”.....	82
Figura A. 18: Opción “Analyse!” Desplegada desde la barra superior, una vez configurados todos los requerimientos anteriores.....	83
Figura A. 19: Panel desplegado al clicar “Analyse!”, donde se encuentra la opción “Analyze current frame”.....	83
Figura A. 20: Imagen del campo de velocidad finalizado el procesamiento.....	84
Figura A. 21: Imagen del campo de velocidad luego de calcular el campo promedio de velocidades.	84
Figura A. 22: Barra desplegada al clicar en la opción “Workflow”, en el programa RIVeR.....	85
Figura A. 23: Opción “Load background image” clickeada.	86
Figura A. 24: Cuadro desplegado donde buscar la nueva imagen de fondo.	86
Figura A. 25: Barra desplegada al clicar la opción “Define CPs”.....	87
Figura A. 26: Cuadro surgido de clicar “Define UTM coordinates”; aquí importamos de Excel las coordenadas para definir las distancias.....	87
Figura A. 27: Barra desplegada al clicar la opción “Define CPs”, donde aparece la opción “Define distances”.....	88
Figura A. 28: Cuadro desplegado al haber fijado los puntos para cargar las distancias entre ellos.....	88
Figura A. 29: Cuadro donde cargar las distancias; estas se cargan en metros y con “.” en lugar de “,” si se tienen centímetros.....	89
Figura A. 30: Trazado de polígono donde lo encerrado será rectificado.....	89
Figura A. 31: Polígono terminado.	90
Figura A. 32: Interfaz del programa RIVeR con la imagen original a la izquierda y la rectificada a la derecha.	91
Figura A. 33: Vista con la opción “Velocity magnitud” del campo de velocidades rectificado.	91
Figura A. 34: Campo de velocidad mostrado con la opción “Colormap” y Figura A. 35: Modificación del tamaño de los cuadros de la opción “Colormap”.	92
Figura A. 36: Modificación del tamaño de los vectores.....	93
Figura A. 37: Campo de velocidad mostrado con la opción “Vectors”.....	93
Figura A. 38: Corrección del uso horario en el cuadro junto al texto “UTM zone”.	93
Figura A. 39: Datos mostrados en el cuadro una vez cargados, a continuación se clickea en “Apply”.....	93
Figura A. 40: Cuadro surgido de haber fijado la sección; se observa la variación de la velocidad a medida que nos movemos en la sección.	94
Figura A. 41: Batimetría y distribución de velocidad a lo largo de la sección.....	95
Figura A. 42: Ventana de comando del programa Matlab; se ubica en la parte inferior de la ventana de inicio al abrir el programa.	95
Figura A. 43: Barra de opciones desplegadas al clicar “File” y luego “Export”.....	96
Figura A. 44: Guardado del archivo.	96

Capítulo 1: Marco Referencial de la práctica

1.1 Introducción a las técnicas de velocimetría avanzadas

Dentro de las técnicas de medición de flujos a superficie libre se pueden mencionar las de tipo intrusivo (para medir deben estar sumergidas en el flujo) efectuadas con instrumentos como por ejemplo molinete, o las técnicas hidro-acústicas, entre otros; y las de tipo no intrusivo donde se destacan las técnicas de velocimetría por imágenes digitales. Estas últimas se basan en el análisis del desplazamiento de patrones de flujo en imágenes obtenidas de un dispositivo de captura (una cámara que grabe video) ubicado externamente al flujo. En cambio las técnicas hidro-acústicas se basan en el efecto Doppler (corrimiento de frecuencia de una onda acústica) que ocurre al emitir una onda de sonido y que esta sea reflejada por las partículas, sedimentos o sólidos en suspensión que arrastra el flujo. A continuación se describen algunas técnicas hidro-acústicas y técnicas de velocimetría por imágenes digitales

1.2 Técnicas de velocimetría por imágenes digitales

1.2.1 Descripción general

Las técnicas de medición por imágenes permiten obtener el campo de velocidades de flujos con alta resolución temporal y espacial mediante un análisis euleriano o lagrangiano del flujo en el sector trabajado. La velocimetría por imágenes de partículas PIV (Particle Image Velocimetry) corresponde al análisis euleriano debido a que obtiene los campos de velocidades del flujo comparando la posición de las partículas entre sectores definidos, en cambio la velocimetría de seguimiento de partículas PTV (Particle Tracking Velocimetry) corresponde al análisis lagrangiano por tomar a cada partícula en forma individual y comparar su posición en distintos momentos del tiempo. El desarrollo de estas técnicas en los últimos años ha permitido su aplicación en la caracterización de flujos complejos logrando un avance notable en el campo de la mecánica de los fluidos e hidráulica.

En la Figura 1.1 se muestra un esquema del funcionamiento de la técnica PIV/PTV. La metodología consiste en obtener un video, de entre 10 a 15 segundos al menos, de trazadores dentro del flujo, con una adecuada iluminación. Luego el video se lo descompone en imágenes y en base a dos imágenes capturadas en un intervalo de tiempo conocido y según el tipo de análisis se tendrán distintas formas de procesamiento:

- Análisis Euleriano: se toma cada imagen, se la divide en ventanas y se compara el desplazamiento PROMEDIO de los trazadores dentro de cada ventana entre pares de imágenes. De todo esto se obtiene un vector velocidad de cada ventana para cada par de imágenes. Finalmente, se promedian los vectores de velocidades de todos los distintos pares de imágenes obteniéndose un campo promedio de velocidades.

- Análisis Lagrangiano: se detecta el centroide de cada partícula y se obtiene un vector desplazamiento para cada una en cada imagen. Con dichos vectores se trazan las trayectorias a

lo largo del flujo, e, interpolando las posiciones de cada partícula en cada instante, se obtiene el campo de velocidades del flujo.

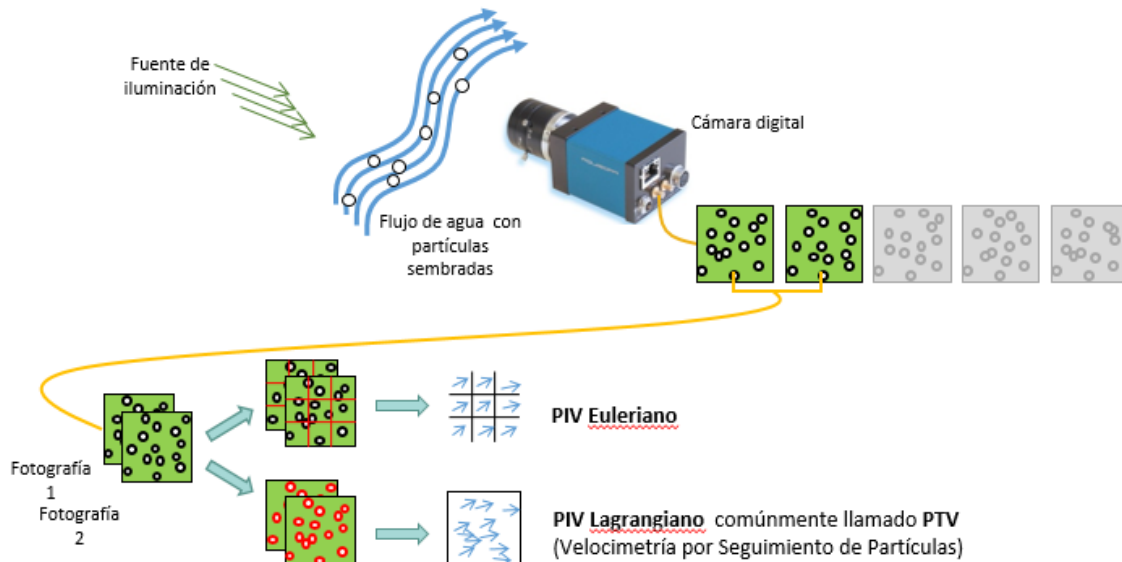


Figura 1. 1: Esquema de la metodología de trabajo para PIV y PTV.

El campo de velocidades del flujo medido es superficial, y los resultados arrojados por el programa que lleva a cabo las tareas de análisis (PIVLab de William Thielicke) son rectificadas mediante el programa RiVer. Esta rectificación se lleva a cabo debido a que la posición de la cámara no es perfectamente perpendicular al flujo.

Los trazadores arrojados al flujo varían según si el análisis es euleriano o lagrangiano. En el primer caso la densidad de partículas (definida por la proporción del trazador respecto a las partículas dentro de la ventana de interacción) buscada es grande, por lo que se emplean trazadores que nos den gran densidad, por ejemplo, aserrín. En cambio en el análisis lagrangiano se busca baja densidad, por lo que se requiere tener trazadores grandes y visibles debido a tener que identificarlos puntualmente a cada uno, y se emplea, por ejemplo, bolitas de poliestireno expandido. El análisis lagrangiano también permite obtener un campo de velocidades a lo largo del sector de trabajo gracias a que el programa PTVLab (de Antoine Patalano) realiza interpolaciones entre las distintas trayectorias trazadas.

Una suposición básica de ambas técnicas es que las partículas son capaces de seguir al flujo, para lo cual es necesario que las partículas empleadas presenten baja inercia. El éxito de las mediciones con velocimetría por imágenes depende de la experiencia del investigador, de la calidad del hardware, de las distorsiones en la cámara, de la posición de la cámara (a mucha oblicuidad de toma por más que se rectifique los resultados presentarán mayor incertidumbre), de la calidad de imagen con que se grabe (a mayor calidad más precisos son los resultados), del número de imágenes por segundo tomadas fps o frame per second (a mayor fps hay mayor cantidad de vectores de velocidad y resultados más precisos, pero conllevan un mayor volumen de datos y horas de procesamiento), la densidad de partículas y su tamaño (deben contrastar con

el color del flujo, tener el tamaño adecuado para que sean visibles y tener una densidad apenas menor a la del agua para que copie lo mejor posible la trayectoria de la corriente) y la iluminación (el área debe estar iluminada de manera uniforme para lograr una adecuada identificación de las partículas, sin contrastes o reflexiones en el agua). Cumpliendo con lo anterior las técnicas por imágenes llegan a tener entre un 5% y un 10% de error en la estimación de caudales (respecto a caudales conocidos).

1.2.2 Procesamiento a Gran Escala

Al hablar de PIV (Particle Image Velocimetry) y LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) nos referimos a la misma técnica de medición y a los mismos principios expuestos anteriormente, salvo que la técnica original (PIV) es utilizada a pequeña escala, por ejemplo, en modelos físicos, donde es posible iluminar las partículas dentro del flujo con un láser permitiendo así la obtención de velocidades superficialmente como en profundidad. Respecto a LSPIV las variantes que se plantean son la iluminación natural o artificial del flujo desde una fuente externa (el sol) y se usa a escalas mucho mayores: modelos físicos de mayores dimensiones, cursos de agua, canales, obras sanitarias, etcétera. Además, a gran escala no siempre es necesario sembrar trazadores; en caso de crecida, por ejemplo, se usan los patrones visibles en la superficie del agua para el análisis.

1.2.3 Procedimiento de trabajo

A grandes rasgos el procedimiento para aplicar la técnica LSPIV o LSPTV, donde LS (“Large Scale” en inglés) significa a gran escala, consiste en: una vez grabado, descomponer el video en imágenes; analizarlo en el programa PIVLab, determinar las zonas de exclusión de las imágenes, filtros, entre otras cosas, obtener el campo de velocidad y a este último rectificarlo mediante el programa RIVeR. Se describe esquemáticamente este procedimiento en la Figura 1.2. Se rectifica para corregir la deformación por perspectiva de la cámara, la cual distorsionaría los resultados, y para transformar los datos de desplazamiento obtenidos en datos de velocidad (m/s). Para ello, se ingresan, dentro de RIVeR, las distancias entre los distintos puntos de referencia (puntos visibles e identificables fuera del flujo supuestos en el mismo plano de la superficie del flujo). Con los campos rectificados y promediados entre todos los pares de imágenes se trazan secciones para obtener el perfil transversal de velocidades promedio. Generalmente, para estimar el caudal de una sección, se trabaja con campos de velocidad o secciones promedio (de todos los pares de imágenes), pero se puede obtener campos de velocidad en un determinado tiempo del video.



Figura 1. 2: Esquema de la metodología de trabajo para LSPIV y LSPTV.

Del video grabado, mediante el programa RIVeR se obtienen las imágenes en escala de grises (grayscale) de 8 bits, gracias a ffmpeg (free framework multimedia package) el cual es un paquete de recursos que permiten trabajar en la descomposición de imágenes. En este paso, si la cámara fue calibrada previamente se puede realizar una corrección por distorsión de lente (lens correction).

Obtenidas las imágenes se aplica PIV o PTV mediante los programas PIVLab o PTVLab respectivamente. Para obtener campos de velocidades por ejemplo para estimar caudales de descarga o visualizar estructuras coherentes es conveniente aplicar LSPIV, en cambio para conocer el comportamiento del flujo interactuando con obras hidráulicas o estructuras construidas es preferible aplicar LSPTV.

Al aplicar PIVLab, el programa nos da la posibilidad de aplicar filtros integrados que mejoran el procesamiento de la imagen a través de la función CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization). Este filtro está hecho para aumentar la posibilidad de detectar vectores válidos en las imágenes (Thielicke y Stamhuis 2014). PIVLab también nos permite elegir como calcular el desplazamiento dado por los pixeles: mediante el algoritmo Direct correlation correlation o DCC (Stamhuis 2006), ó usando Discrete Fourier Transform o DFT (Raffel et al. 2007). En particular generalmente usamos al algoritmo FFT por ser el más rápido debido a usar una cascada de ventanas de interrogación deformables. Finalizado esto, se debe dar dimensiones a las zonas de interrogación. Serán las dimensiones de las “ventanas” en donde el software evaluará y

comparará los patrones dados por la rugosidad superficial. Mejores resultados de análisis, a menudo, se presentan con múltiples pasadas, pero implican tiempos de procesamiento más largos, por lo que se suele realizar 2 pasadas, en donde la segunda de ellas presente dimensiones de la zona de interrogación iguales a la mitad de la primera.

PIVLab y PTVLab también nos permiten seleccionar el área a trabajar con la función Select ROI (Region of Interest), la cual encierra en un rectángulo sobre la imagen la zona donde se aplicarán los algoritmos (todo lo encerrado dentro del rectángulo será procesado), y este rectángulo se aplicará a todas las imágenes; y, a su vez, nos permite dibujar máscaras dentro de este rectángulo en las zonas donde no necesitamos realizar ningún análisis debido a que no se muestra la superficie del flujo. Estas máscaras deben aplicarse también a todas las imágenes y su uso logra bajar tiempo de procesamiento.

Corrido los programas PIVLab o PTVLab, Patalano et al. 2017, nos explica como el programa RIVeR rectifica los resultados. En primer lugar la matriz homográfica H (Figura 1.3) es estimada conociendo la relación en coordenadas homogéneas:

$$\begin{pmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \\ \tilde{w} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} \\ H_{31} & H_{32} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix}$$

Figura 1. 3: Matriz homográfica H , que relaciona los vectores reales con los rectificadas.

En la “pantalla partida” (Figura 1.4) de la interfaz del RIVeR, en la imagen de la izquierda está el archivo con los vectores en coordenadas “de la realidad”, y en la imagen de la derecha se muestra la proyección de esos vectores en la imagen rectificadas. La matriz H , también llamada matriz cámara, asume a todos los puntos en el mismo plano ($Z=0$) y engloba en ella todos los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara. Los parámetros intrínsecos son aquellos que dependen únicamente de la cámara, como por ejemplo la distancia focal, la escala del pixel, zoom, entre otros). Los parámetros extrínsecos son la posición de la cámara y la rotación. La matriz H queda con 8 incógnitas las cuales pueden ser resueltas conociendo las coordenadas (X,Y) de 4 puntos de control (CP’s o Control Points). Estos puntos de control deben estar en un mismo plano ($Z=0$) y a su vez a nivel de la superficie del flujo, que también se la supone en $Z=0$. Con todo esto, tanto el campo de velocidad superficial obtenido en PIVLab como las trayectorias obtenidas con PTVLab, son rectificadas.

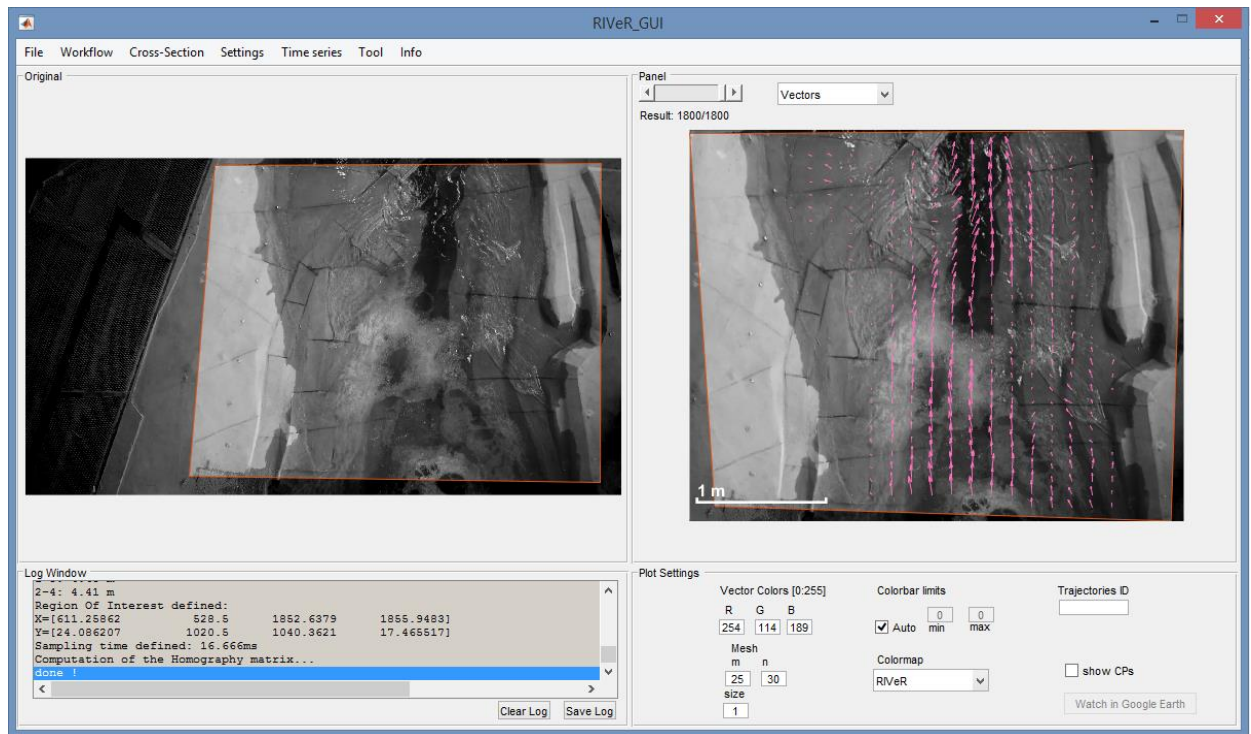


Figura 1. 4: Interfaz del programa RIVeR. En la ventana izquierda se muestra la imagen original, y en la derecha aparecen los vectores de la imagen rectificada.

Por lo tanto, una vez cargada la sesión de PIV o PTV, los vectores son orto-rectificados. En la Figura 1.5 se muestra el proceso de PIV/PTV y RIVeR aplicado.

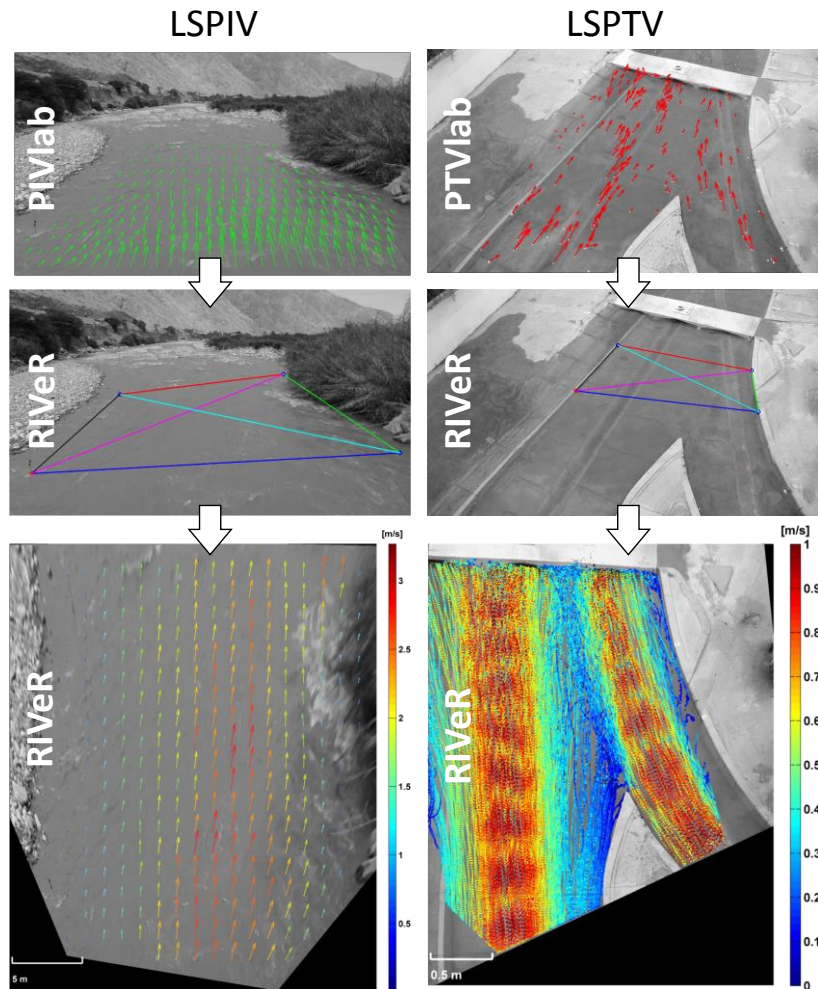


Figura 1. 5: Imágenes de la izquierda aplica LSPIV a un río en Pisco, Perú; imágenes de la derecha aplica LSPTV al modelo Suquia-La Cañada perteneciente al Laboratorio de Hidráulica. Imágenes pertenecientes a Patalano et al. 2017.

1.2.4 Proceso de correlación espacial en PIV

A continuación, se hará una breve descripción teórica del proceso llevado a cabo para obtener los vectores desplazamientos de los pares de imágenes.

Como se mencionó anteriormente, a partir del par de imágenes tomadas con un intervalo de tiempo Δt , se puede obtener un campo de vectores de desplazamiento donde cada uno queda definido por el análisis del movimiento de grupo de partículas. En la práctica esto se logra a través de la extracción de muestras (samples en inglés) de la imagen denominadas “Áreas de Interrogación”, que luego son analizadas por procesos estadísticos. Esto se muestra en la Figura 1.6.

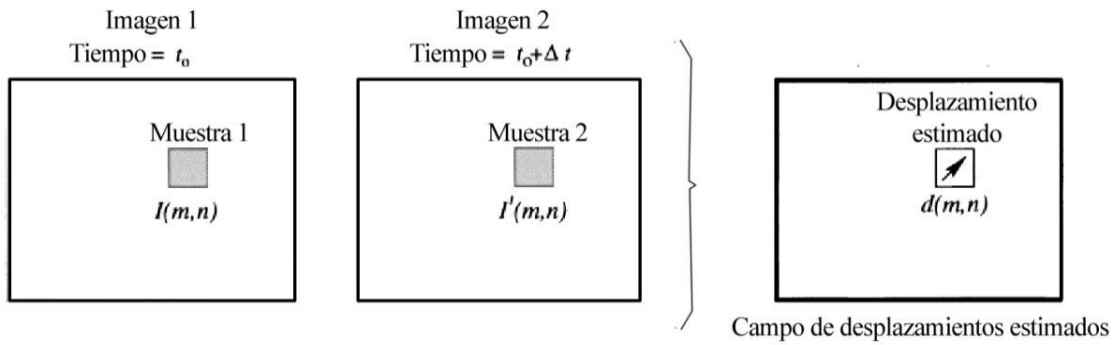


Figura 1. 6: Esquema de proceso de muestreo de imagen “Fotograma a Fotograma”. Práctica Supervisada de Lucero, año 2015.

A la figura anterior (Figura 1.6) se la puede interpretar como un sistema alimentado por la primera imagen *Imagen 1*, que da como salida la segunda imagen *Imagen 1'*. La función que transforma *Imagen 1* en *Imagen 1'* (Función de Transferencia H) estará compuesta por una función desplazamiento d sumada a una función de adición o perturbación N . Véase Figura 1.7. Ahora bien, suponiendo que se conoce la Función de Transferencia H y se posee la imagen de entrada *Imagen 1*, se debería obtener la imagen de salida *Imagen 1'*. Por lo tanto, como en realidad se conocen *Imagen 1* e *Imagen 1'*, el objetivo es determinar la función desplazamiento d , excluyendo la función perturbación N . La función perturbación N engloba el “ruido” generado en la imagen por los propios dispositivos de captura junto con las perturbaciones típicas de los flujos naturales en tres dimensiones.

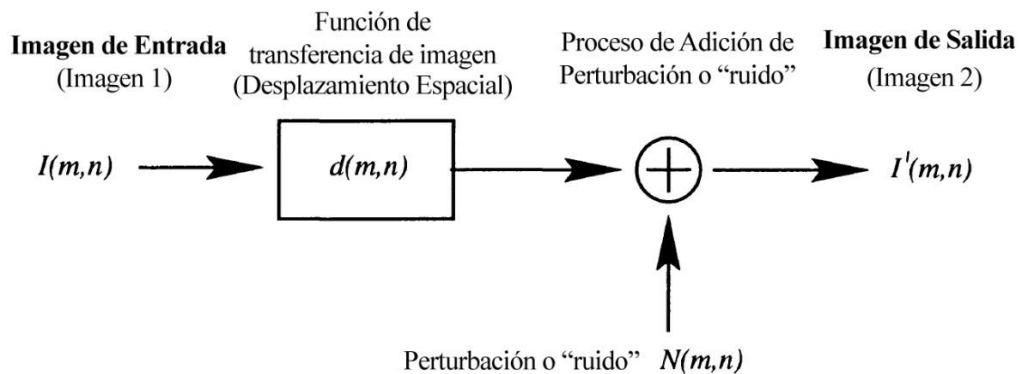


Figura 1. 7: Modelo idealizado de procesamiento digital lineal, describiendo la relación funcional entre dos cuadros sucesivos. Práctica Supervisada de Lucero, año 2015.

Como las imágenes no son continuas y el fondo de la imagen no nos proporciona información sobre el movimiento de las partículas, es necesario estimar la función de desplazamiento d a partir de un enfoque estadístico basado en la utilización de Áreas de Interrogación localizadas. Sin embargo, más que estimar la función de desplazamiento d , el problema es encontrar un método que ajuste localmente lo mejor posible los pares de imágenes en términos estadísticos. Esto se consigue empleando una función discreta de correlación cruzada, cuya formulación integral se muestra en la Figura 1.8.

$$R_{II}(x, y) = \sum_{i=-K}^K \sum_{j=-L}^L I(i, j)I'(i + x, j + y)$$

Figura 1. 8: Formulación integral de correlación cruzada.

Las variables I e I' son las muestras que se extraen del par de imágenes. Estas muestras contienen información como ser por ejemplo términos de intensidad lumínica. La muestra patrón se ira posicionando sucesivamente sobre y alrededor de la muestra I' sin extender los bordes de la misma. Por cada una de las posiciones ensayadas, con sus respectivas coordenadas (x, y) , la suma de los productos de las intensidades de todos los pares de pixeles superpuestos, se obtiene un valor de Correlación Cruzada $Rn(x, y)$. Este valor Rn será mayor que en cualquier otro lugar para aquellas posiciones en que las partículas estén bien alineadas o coincidentes, ya que la suma de los productos de intensidad de pixeles será mayor que en cualquier otro lugar.

El valor más alto en el plano de correlación puede entonces ser usado como una estimación directa del desplazamiento del patrón que contiene las partículas, lo que a su vez equivale al desplazamiento de las partículas en sí mismas.

Ahora bien, teniendo en cuenta los varios miles de vectores de desplazamiento que se pueden obtener de una simple captura de video, la correlación explicada se computa por formas más eficientes para agilizar el proceso de cálculo del programa. No se ahondará en estas otras formas.

1.3 Técnicas hidro-acústicas

Las técnicas de medición hidro-acústicas emplean el efecto Doppler para medir las velocidades de un flujo. A diferencia de las técnicas por imagen, estos permiten medir velocidades “dentro” del flujo: realizan mediciones en forma intrusiva. Los instrumentos más empleados son el ADV (Acoustic Doppler Velocimeter por sus siglas en inglés) y el ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler por sus siglas en inglés). Entre sus diferencias, se destaca principalmente que el ADCP mide un perfil mientras que el ADV mide un volumen puntual. El ADCP está constituido por un conjunto de perfiladores acústicos (transductores) ubicados en forma divergente, los cuales funcionan cada uno como emisor y receptor de pulsos de ultrasonido que viajan a lo largo de la columna de agua. El ADV, en cambio, está formado por un único emisor acústico (que envía pulsos acústicos) y un conjunto de tres receptores que registran las señales acústicas reflejadas. Luego el ADV integra la información recibida proveniente de un volumen de determinado tamaño (0,08 a 2 cm³ según el modelo de aparato) y a una cierta distancia del emisor (de 5 a 18 cm según el modelo de aparato). Los ADV y ADCP modernos pueden operar con una frecuencia acústica de hasta 200 Hz, es decir que recolectan 200 valores por segundo de medición. En el capítulo 5 me explayo más sobre el tema. A continuación, nos enfocaremos en el instrumento utilizado: el ADV.

1.3.1 ADV: funcionamiento y ventajas

El Velocímetro Acústico Doppler o ADV por sus siglas en ingles está compuesto de tres elementos básicos: la sonda, donde se encuentran los emisores y receptores de la señal acústica,

el módulo de acondicionamiento de la señal y el módulo de procesamiento de la señal. Ver Figura 1.10. La sonda va unida al módulo de acondicionamiento, y este módulo está generalmente incluido en una cubierta sumergible. La sonda y el módulo de acondicionamiento de la señal se conectan al módulo de procesamiento por medio de un cable blindado de longitud variable de acuerdo al modelo de ADV seleccionado.

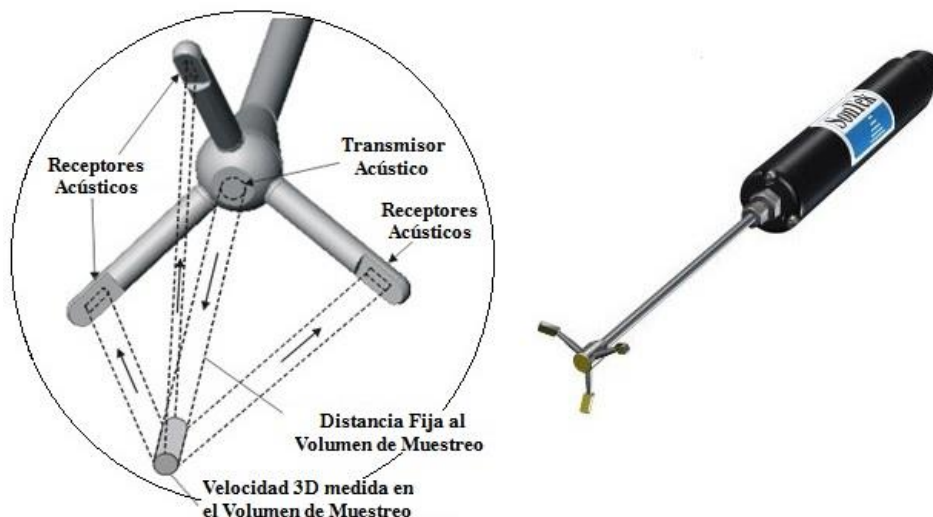


Figura 1.9: Micro ADV YSI SonTek 16MHz.

Principio de funcionamiento

Si bien nosotros podemos configurar la cantidad de datos por segundo que queremos obtener durante la medición (hasta 200 MHz), el aparato recibe mucha más información. El ADV lo que hace realmente es emitir pulsos acústicos a gran velocidad (supongamos por ejemplo 300 pulsos por segundo), abrir y cerrar las ventanas de medición de los receptores acústicos (en función del tiempo que estima que tardará llegar al receptor el eco de la partícula, contenida en el volumen de control, a partir de la temperatura del agua) tantas veces como pulsos envió, y promediar estos 300 datos por segundo obtenidos en 50, es decir que cada valor es el resultado del promedio de 6 valores medidos. Al abrirse las ventanas de medición captan tanto el eco de las partículas y ruido del ambiente. Por esto último el aparato realiza muchísimas más mediciones que las pedidas, porque al promediarlas logra reducir el ruido y arrojar un valor promedio. Ahora bien, cuanto mayor sean los valores promediados menor ruido tendrá el valor arrojado, y esto se logra disminuyendo la frecuencia del aparato, pero la desventaja de esto es que a medida que bajamos la frecuencia, el valor promedio arrojado nos reduce la resolución temporal, es decir que obtendremos menos valores por segundo. Por todo esto, uno debe evaluar la conveniencia de utilizar altas o bajas frecuencias en función de lo que busca, si alta o baja resolución temporal (y mediciones con mayor o menor ruido respectivamente), que a su vez va de la mano del tipo de flujo presente: para flujos turbulentos será preferible altas frecuencias ya que para bajas tendremos lecturas que no muestren verdaderamente las variaciones de velocidad del mismo.

Durante la medición de velocidades, deben prestarse atención a dos parámetros reportados por el instrumento: el coeficiente de correlación C y el cociente entre amplitudes de señal y ruido percibido (SNR por sus siglas en inglés). El SNR es el cociente de la energía de la señal y el nivel de ruido acústico, y sus valores se expresan en decibels (dB). Cocientes de SNR bajos son causados generalmente por una concentración baja de partículas en suspensión en el flujo (Herrero et al.

2007), mientras que valores altos de SNR están asociados a concentraciones altas de partículas en suspensión. Los valores límites inferiores están recomendados según el modelo de ADV. Por ejemplo, para un ADV Sontek 10 MHz se aconseja un valor límite de 5 dB para señales usadas para determinar valores medios de velocidad, y de 15 dB para calcular el resto de los parámetros.

Además, se computa un coeficiente de correlación C , expresada como porcentaje, para cada receptor acústico. Este coeficiente es la relación entre el eco proveniente de las partículas de dos pulsos consecutivos enviados. Supongamos que una partícula viaja a velocidad constante, entonces si en un instante t se capta el eco del primer pulso emitido (estando la partícula en una posición x), y en un instante Δt se capta el eco proveniente del segundo pulso, esos ecos tendrán la misma Amplitud y Período, pero como la partícula ya no estará en x para el segundo pulso sino que estará en una posición $x+\Delta x$, el eco leído por los receptores estarán desfasados uno a otro. Este desfasaje se traduce en el coeficiente c . La correlación perfecta de 100% indica medidas confiables de la velocidad con poco ruido presente en la señal, en cambio la correlación del 0% indica que las señales de velocidad registradas están dominadas por el ruido (ninguna porción de la señal es coherente). Valores de correlación menores al 70% indican que el ADV está funcionando en condiciones adversas (elevada turbulencia, bajo contenido de material en suspensión, presencia de burbujas, entre otros). Estas condiciones adversas afectan la estructura temporal de la señal, pero no así los valores medios, por lo que se pueden obtener velocidades medias confiables del flujo con hasta un 30% de correlación.

Es aceptable tener coeficientes de correlación bajos (<70%) a que SNR bajos (<15dB) debido a que el SNR se puede corregir agregando talco o partículas al flujo, en cambio el c es propio de las características del flujo en el punto medido.

1.3.2 ADV: Parámetros de configuración de registro

Los parámetros más importantes de configuración de registro de los instrumentos ADV son frecuencia de registro, rango de velocidades y tamaño del volumen de medición.

La frecuencia de registro mínima para caracterizar flujos turbulentos con ADV debe satisfacer que el número adimensional $F > 20$. Este número adimensional F está en función de la resolución espacial del ADV, definida por las características del flujo y las configuraciones de registro (García et al., 2005). Para valores menores, García et al. (2005) propusieron un conjunto de curvas que pueden ser utilizadas para correcciones en el cálculo de parámetros de turbulencia.

El parámetro rango de velocidades define la velocidad de flujo máxima que se puede medir con el instrumento; los rangos de velocidad que se encuentran en una configuración estándar de ADV son ± 3 , ± 10 , ± 30 , ± 100 y ± 250 cm/s. El usuario del ADV debe seleccionar el rango de velocidades más bajo que incluya la velocidad máxima instantánea esperada en un experimento dado. El ruido presente en las señales de velocidad registradas por ADV es proporcional al rango de velocidad; así las series registradas con los rangos de velocidad más altos tienen niveles de ruidos más altos. Se amplía la importancia del rango de velocidad en el capítulo 5.

El volumen de medición de ADV se asemeja, en su forma, a un cilindro. El diámetro lo fija el diámetro del transductor del sensor, y la altura es definida por el tamaño del pulso transmitido y de la ventana de recepción (intervalo de tiempo en el que el receptor “escucha” el eco del pulso). Algunos modelos de ADV permiten al usuario definir diferentes tamaños de volúmenes de

medición. Esto es ventajoso por un lado porque puede resultar útil un volumen pequeño de medición en mediciones de flujo cerca de la frontera, pero implica una mayor incertidumbre en las mediciones. La modificación del volumen de medición debe hacerse con precaución y solo entendiendo correctamente las implicaciones de las modificaciones en las lecturas obtenidas.

1.4 Objetivo general

En el presente trabajo se busca caracterizar el escurrimiento de flujos a superficie libre en presencia de distintas obras de infraestructura. Para dicha caracterización se emplean las técnicas de medición por imágenes digitales LSPIV y LSPTV; y la técnica de medición hidro-acústica ADV.

1.5 Objetivos específicos

A los fines de cumplir el objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Capacitación en medición con ADV
- Capacitación en mediciones con LSPIV y LSPTV
- Aplicación de técnicas LSPIV/LSPTV y ADV en estudios experimentales con aplicación práctica ingenieril realizado en laboratorio.
- Analizar resultados y alcanzar conclusiones sobre fenómenos medidos en los distintos casos.

1.6 Metodología de trabajo

El desarrollo del informe se puede dividir en dos partes: una primer parte referida al aprendizaje de las técnicas mencionadas anteriormente tanto teórica como práctica, y una segunda parte referida a la aplicación de dichas técnicas colaborando en investigaciones puntuales, mencionadas más adelante en el informe. Estas partes no son lineales y segmentadas en el tiempo, sino que existe una constante interacción entre una y otra debido a que las enseñanzas dejadas de cada caso aplicado contribuyen a lograr un mejor desempeño al momento de realizar las mediciones.

Primer parte:

En primer lugar se estudiaron los conceptos teóricos de PIV/LSPIV y una vez tenido en claro el uso en práctica de este, se continuó el aprendizaje con PTV/LSPTV y finalmente con ADV. Bajo la supervisión y acompañamiento de investigadores experimentados del Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA) se analizaron con dichas técnicas distintos videos provistos por los investigadores, evaluando el error en que se incurría al calcular perfiles de velocidad y caudales respecto de valores precisos medidos con otros aparatos (ADCP/ADV). A través de la prueba y error, el operador va adquiriendo la sensibilidad necesaria que le permite establecer un juicio crítico acerca del desempeño de su accionar, los resultados obtenidos, y adoptar medidas a futuro para mejorar los resultados a obtener.

Segunda parte:

Consiste en la aplicación de las técnicas de medición en distintos casos, buscando darle un enfoque ingenieril. En el capítulo 2 se analiza el flujo alrededor de una pila en un canal abierto de laboratorio (comparable a una pila de puente dentro de un río), en el capítulo 3 se analiza la variación del flujo de agua dentro de un canal ante el paso de barcazas, y en el capítulo 4 se analiza el comportamiento del flujo en un canal abierto ante la presencia de un estribo con geotubos como medida de protección ante la erosión. En cada caso se obtienen los campos superficiales de velocidades, combinándose con trayectorias de partículas y cálculo del Número de Strouhal (St) en ciertos casos. De cada capítulo se elabora una conclusión final y recomendaciones surgidas de la experiencia.

Se anexa un manual de uso de los programas PIVLab y RIVeR, necesarios para la aplicación de la técnica LSPIV, y vale mencionar que se realizó una publicación respecto a uno de los casos de aplicación (el caso dado en el capítulo 2).

Capítulo 2: Caracterización de flujo alrededor de una pila

2.1 Planteo del caso y procesamiento de videos

En este caso se analizó el flujo alrededor de una pila a partir de LSPIV y LSPTV. El objetivo fue caracterizar el flujo alrededor de la pila a través de las velocidades medias del flujo y las estructuras turbulentas que se desprenden del obstáculo; y realizar una valoración objetiva de las fortalezas de las técnicas.

El experimento se realizó en el canal de agua abierto del Laboratorio Ven Te Chow, de la Universidad de Illinois, Urbana, Champaign, EEUU, mostrado en la Figura 2.1. El canal posee por dimensiones 1,82 m de ancho y 19 m de longitud. La condición de flujo estudiada fue con un caudal de $0.17 \text{ m}^3/\text{s}$ y un tirante de 0,70 m. La pila de hormigón, de 0,457m de diámetro, se ubicó en la línea central del canal emplazándose a 12,20m de distancia desde la entrada de agua al canal. Ver Figura 2.2.

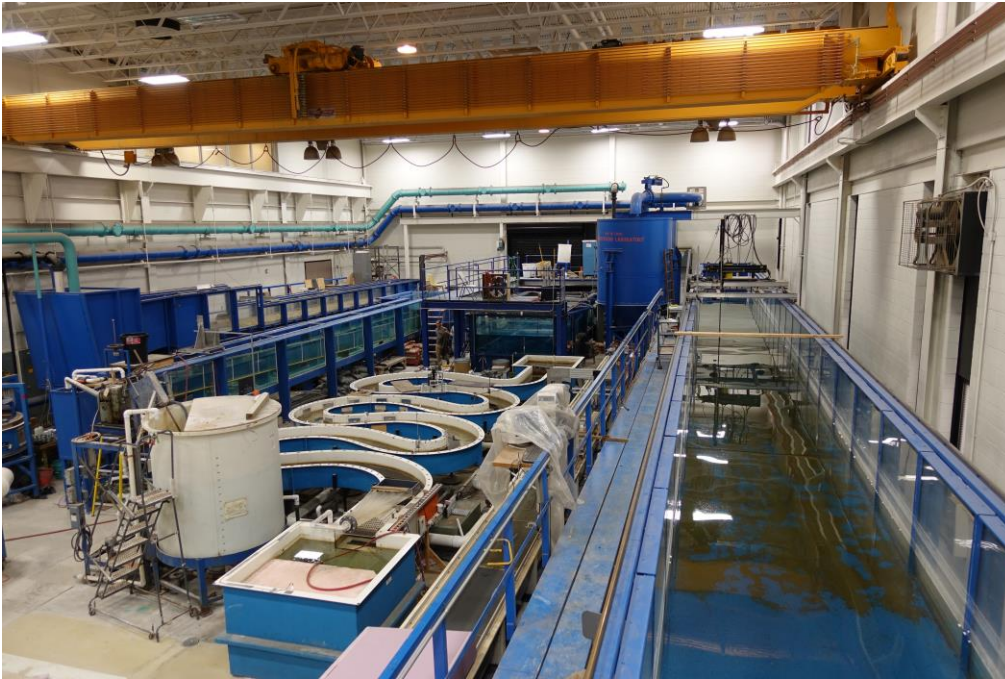


Figura 2. 1: Instalaciones del Laboratorio Ven Te Chow, observándose a la derecha el canal utilizado. Imagen perteneciente a Patalano, Antoine.



Figura 2. 2: Imagen no rectificada de la pila dentro del canal con las diferentes partículas sembradas.

El Número de Reynolds fue de 61397, y se calcula con la ecuación mostrada en la Figura 2.3: V es la Velocidad del agua, D el diámetro de la pila (longitud característica) y ν_s es la viscosidad cinemática del agua.

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu_s}$$

Figura 2. 3: Número de Reynolds, relaciona fuerzas inerciales y fuerzas viscosas dentro del fluido.

Los videos se filmaron con una cámara modelo Sony Alpha 5000, con una resolución de 1920x1080. Se utilizaron como trazadores dos tipos de partículas diferentes, esferas de poliestireno expandido de diámetro 10 mm (necesarias para poder aplicar LSPTV) y partículas de cera de diámetro 5mm (necesarias para aplicar LSPIV), las cuales fueron arrojadas en simultáneo aguas arriba de la pila.

La extracción de imágenes se realizó en escala de grises a través del software RIVeR v2.2 (Patalano et al. 2017), con una frecuencia de 15 imágenes por segundo (15 fps). Se procedió al procesamiento de las mismas con la herramienta PIVLab (Thielicke y Stamhuis 2014), determinándose los campos de velocidades superficiales en la región inmediatamente aguas debajo de la pila y el campo promedio de velocidades con las partículas de cera y la herramienta PTVlab (Patalano et al 2013).

Con LSPIV se obtuvieron los campos de velocidades superficiales promedios, en cambio con LSPTV se obtuvieron las trayectorias de las partículas.

Una vez obtenidos los campos de velocidades se registraron series de tiempos de las componentes longitudinales y transversales del vector velocidad en diez puntos aguas abajo del obstáculo tal como se muestra en la Figura 2.4, para caracterizar las grandes estructuras que se desprende aguas abajo del obstáculo a través de un análisis espectral. El tiempo de medición fue de 65 segundos con una frecuencia de 15Hz.

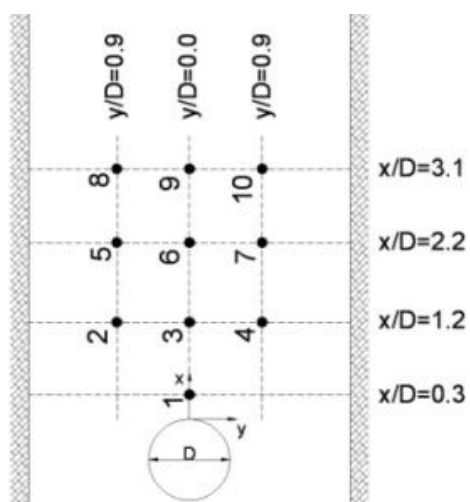


Figura 2. 4: Localización de los puntos en donde se obtuvieron las series de tiempo de la velocidad. A su vez, se registraron perfiles transversales al escurrimiento del flujo a distancias de x/D iguales a 0.0, 0.6, 1.3, 1.9, 2.5, 3.1. Todos estos datos se extrajeron mediante el software RIVeR.

2.2 Resultados

En la Figura 2.5 se observa el perfil de velocidad longitudinal de a lo largo del eje central del canal estimados con LSPIV, en donde se adimensionalizó la velocidad respecto de la velocidad media de aproximación U_m , es decir U/U_m con $U_m = Q/A$, donde Q es el caudal del canal y A la sección transversal del flujo. También se adimensionalizó la distancia x desde la pila en función del diámetro D de la pila. Se llevó a cabo esto para poder comparar con datos experimentales graficados en la Figura 2.5, obtenidos por Herrero (2014), que ha realizado las mediciones con UVP (Ultrasound Velocimetry Profiler, por sus siglas en inglés) en la zona de mezcla, y datos experimentales obtenidos por Lourenco y Shih (1993). En dicha figura se observó una zona de velocidades negativas próximas al obstáculo. Las mismas indican la presencia de una zona de estancamiento con velocidades nulas o negativas por recirculación del flujo en la zona inmediatamente aguas abajo de la pila. Esta zona se extiende aproximadamente $1.1D$ aguas abajo del obstáculo, tomando como referencia la superficie exterior del mismo.

A su vez, se realizó un procesamiento de las imágenes mediante la técnica de LSPTV y se obtuvieron las trayectorias de las partículas sembradas. En la Figura 2.6 se pueden observar lo anteriormente expuesto y corroborar que la zona de estancamiento se desarrolla aproximadamente $1.1D$ ($0,5$ m) aguas debajo de la pila.

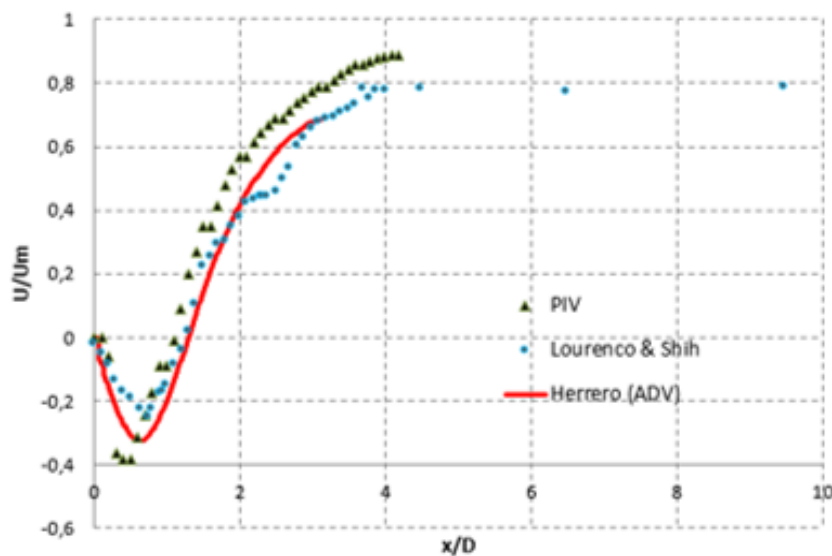


Figura 2. 5: Evolución de la velocidad media longitudinal a lo largo de la línea central del canal.

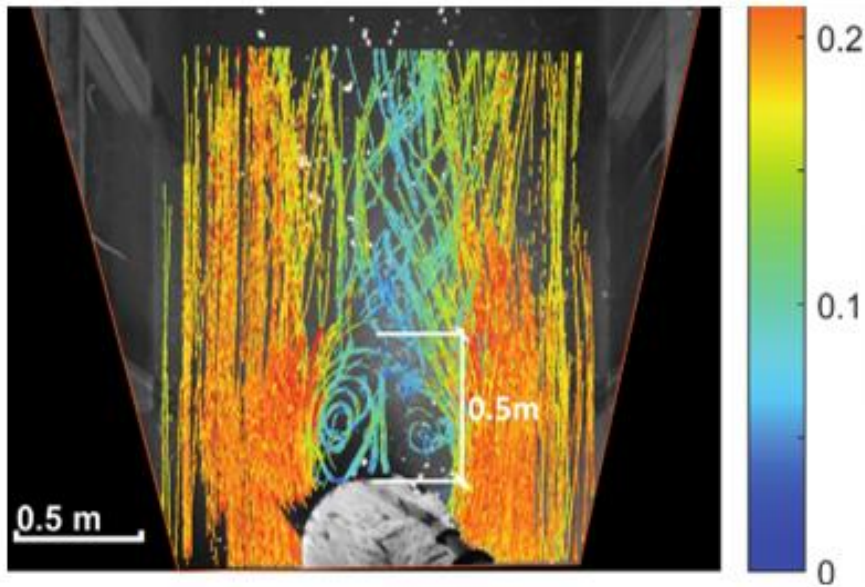


Figura 2. 6: Trayectorias rectificadas de las partículas obtenidas con LSPTV en donde se observa la longitud de la zona de estancamiento. Escala en m/s.

En la Figura 2.7 se muestran los valores de velocidad media longitudinal adimensional en distintas secciones transversales aguas abajo del obstáculo. En la Figura 2.8 se observan los perfiles obtenidos por Herrero (2014) quien realizó la medición mediante Perfilador Acústico Doppler (ADV). Se observa en dichos perfiles el déficit de la velocidad media en las diferentes secciones tal como se obtuvo por ADV

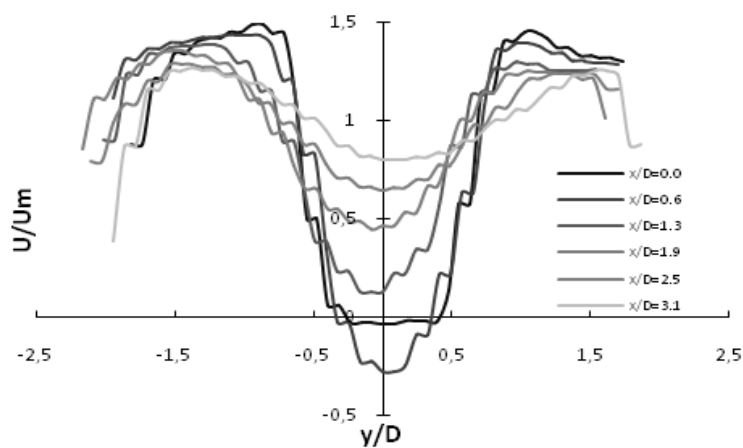


Figura 2. 7: Velocidad media del flujo obtenida adimensionalizada aguas debajo de la pila.

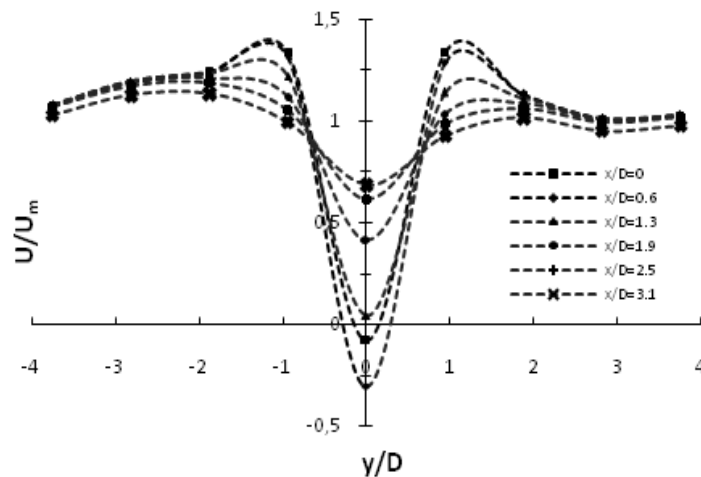


Figura 2. 8: Velocidad media del flujo adimensionalizada aguas debajo de la pila, resultados obtenidos por Herrero (2014) mediante ADV.

El análisis espectral de series temporales de velocidad determinados con LSPIV permitió estimar el Número de Strouhal (St), el cual está relacionado con la frecuencia de desprendimiento de vórtices y se calcula aplicando la fórmula mostrada en la Figura 2.9.

$$St = f \frac{D}{U_m}$$

Figura 2. 9: Fórmula para calcular el Número de Strouhal.

En la Figura 2.9, f es la frecuencia de desprendimiento de vórtice, D es la longitud característica y U_m es la velocidad media del flujo. Como no se tenía a disposición la velocidad media U_m , la misma se calculó a partir de las mismas mediciones efectuadas con LSPIV. Se utilizó el diámetro de la pila como longitud para el cálculo del número de Strouhal y la frecuencia de desprendimiento se obtuvo haciendo un análisis espectral para los distintos puntos del flujo a través de la función Tude_U_Sindisipacion, C. M. García 2017. Las diferentes señales de velocidad relevadas en los puntos de la Figura 2.4 muestran una frecuencia de desprendimiento de alrededor de 0.1 Hz para los distintos puntos tomados, con espectros de energía muy similares entre sí y similares al mostrado en la Figura 2.10. Finalmente, el Número de Strouhal calculado ronda el valor de 0.34.

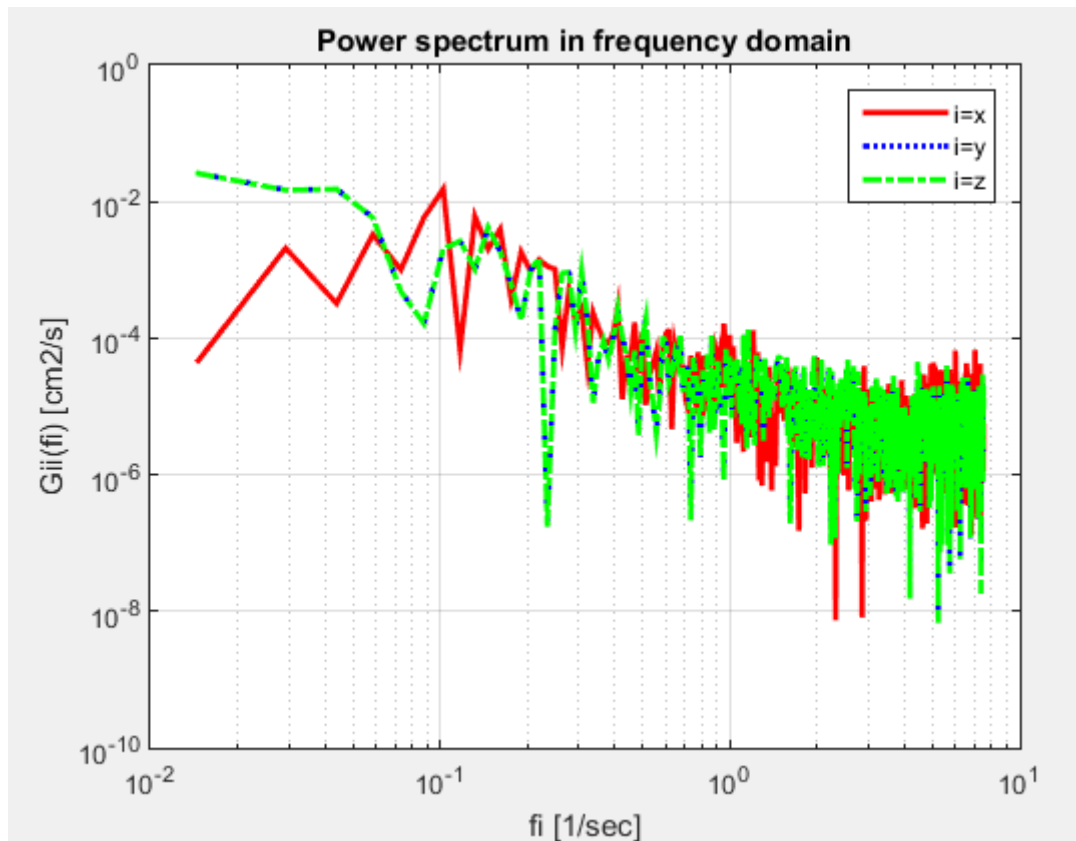


Figura 2. 10: Espectro de energía obtenido para el punto 2. Se observa claramente el pico de energía en 0.1 Hz.

Capítulo 3: Variaciones de flujo en canal por paso de barcazas

3.1 Introducción a problema

En el presente capítulo se analiza el flujo de un canal mediante la obtención de velocidades transversales y longitudinales mediante LSPIV. El canal se ubica en Romeoville, Estado de Illinois, Estados Unidos de América (Figura 3.1), escurre al Lago Michigan y el mismo se ve sometido a un tráfico constante de barcos remolcadores y barcazas debido a conectar al lago (y los puertos de la ciudad homónima) con otras ciudades y centros de producción de Illinois (ver Figura 3.2). El paso de las barcazas al desplazar grandes volúmenes de agua genera un cambio puntual del sentido de escurrimiento del agua, es decir en el fluido circundante a la barcaza, debido a que el canal no es lo suficientemente ancho como para absorber estos volúmenes de agua desplazados.

El cambio en el sentido de escurrimiento, al menos superficial, del agua genera un verdadero problema ambiental: vuelve inefectivas las defensas instaladas contra el avance de carpas asiáticas. La carpa asiática es un pez introducido en ríos de EEUU décadas atrás cuyo objetivo era comer las algas, sin embargo este pez desplazó a muchas especies nativas y es considerada actualmente una plaga. Por esto, las defensas instaladas (redes eléctricas que electrocutan peces) en los canales buscan

evitar el paso del pez al lago, y por ende al sistema de los grandes lagos, y que se vea afectado al ecosistema acuático como ya lo hizo con cursos de agua del sur de Estados Unidos. Los videos se obtuvieron gracias a una campaña de medición realizada por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés) para evaluar el flujo en este canal ante el paso de las barcazas.

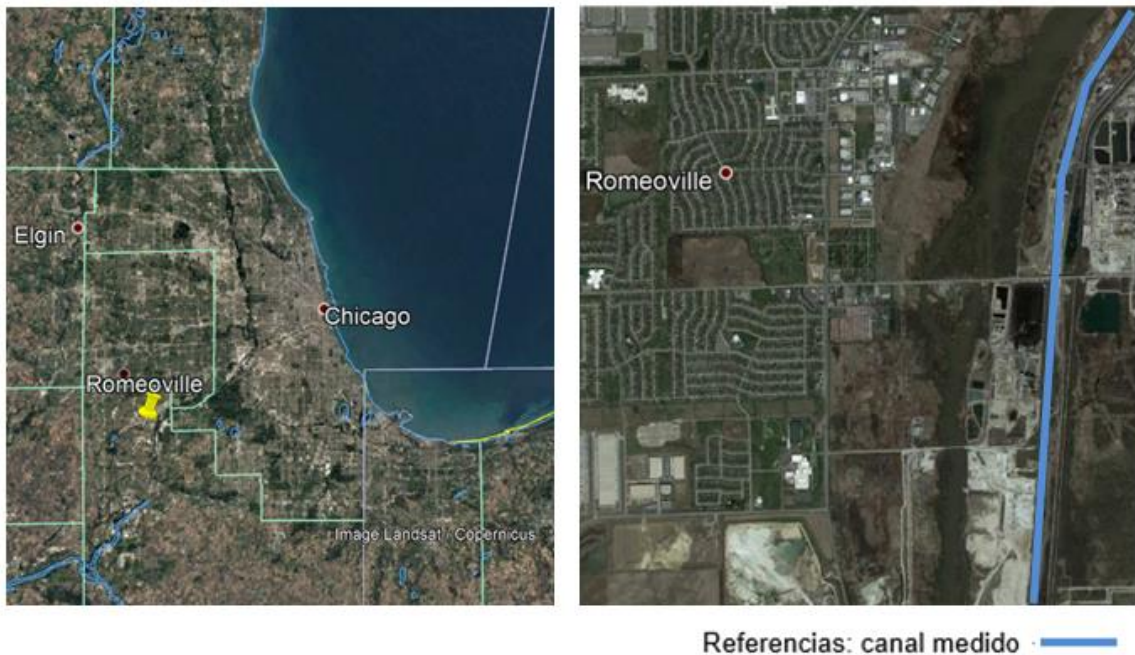


Figura 3. 1: Ubicación de Romeoville, Illinois, EE UU. Imagen tomada de Google Earth®.



Figura 3. 2: Canal donde se realizaron las mediciones, que también es el sitio donde electrocutan los peces. Imagen perteneciente a Patalano, Antoine.

A partir de los videos del fenómeno, el objetivo fue obtener las velocidades del agua y su variación en el tiempo a fin de conocer la duración del fenómeno, magnitudes de velocidades, entre otros.

3.2 Planteo del caso y análisis de videos

La serie de videos fueron filmados desde una margen del canal. El canal presenta un ancho de aproximadamente 50 metros, y las barcazas alrededor de 11 metros. Debido a que el fenómeno se daba en las márgenes del canal, el gran ancho del canal no influyo en el procesamiento de las imágenes, refiriéndose a la oblicuidad de la imagen (se analizó la zona contigua a las paredes del canal, donde se ubicaban las partículas sembradas).

Al aplicarse únicamente LSPIV no se necesitaban partículas puntuales de considerable tamaño, sino una gran cantidad lo mejor distribuidas posibles, por ello se realizó un sembrado usando por trazadores a partículas de maíz mediante una sopladora de hojas (Figura 3.3). Se filmaron 22 videos, de los cuales se tomaron los más adecuados para tratamiento, resultando 3 videos analizados en total (denominados videos 8752, 8753 y 8754). La cámara utilizada era una Cannon PowerShot SX 260 HS, con una resolución de 1920:1080.

De cada video se obtuvo la variación de la velocidad transversal y longitudinal respecto al tiempo, y se aplicó a uno de ellos un filtro a través del programa Matlab mediante la función Tude_U_Sindisipacion, García C. M. 2017, que permitió definir la frecuencia máxima f_{max} para cada caso.

Para los puntos de referencia (para cargar las distancias en la rectificación) se tomaron detalles de la pared del canal y en una grúa puesta para este fin. Esto se muestra en la Figura 3.4.



Figura 3. 3: Equipo usado para la obtención de los videos. Imagen perteneciente a Patalano, Antoine.

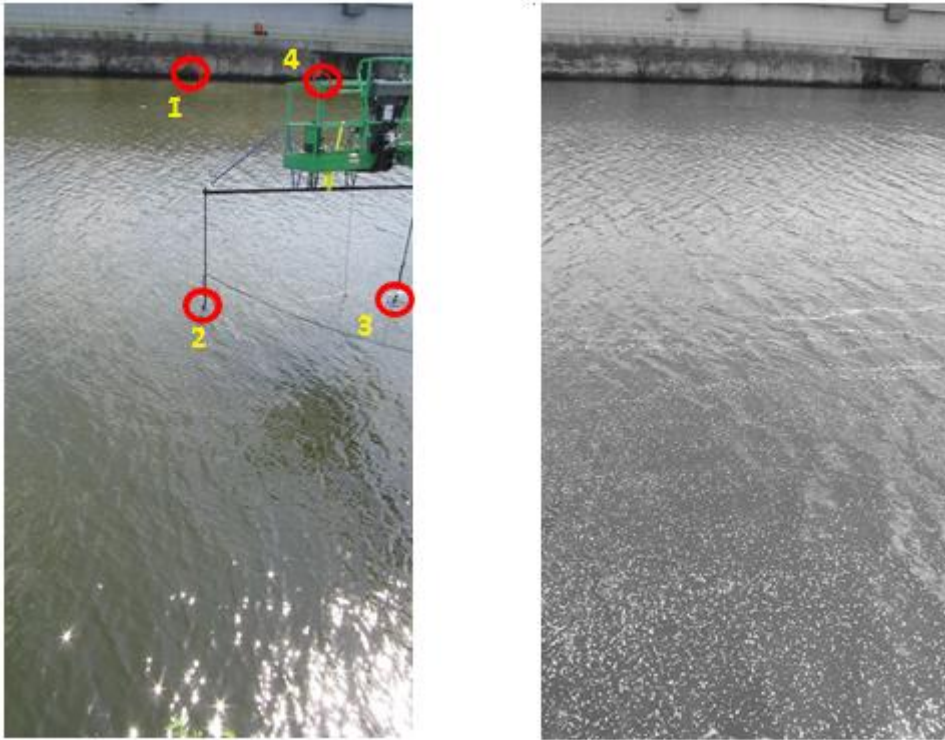


Figura 3. 4: A la izquierda: Referencias físicas (puntos 1, 2, 3 y 4) para la introducción de distancias. A la derecha: Imagen extraída del video.

La extracción de imágenes se realizó en escala de grises a través del software RIVeR v2.2 (Patalano et al, 2017), con una frecuencia de 24 imágenes por segundo (24 fps). Se procedió al procesamiento de las mismas con la herramienta PIVlab 1.41 (Thielicke y Stamhuis 2014), determinándose los campos de velocidades superficiales en la región sembrada, que es también la más cercana al margen del canal, y el campo promedio de velocidades.

3.3 Resultados

Se detallan los resultados arrojados por los videos analizados. Los tramos de tiempo no analizados se deben a que en dichos intervalos entre análisis no se tenían trazadores sembrados, por lo que no hay información.

3.3.1 Caso sin presencia de barcazas

El video 8752 tiene una duración de 6 minutos, pero se analizaron del minuto 2:20 (segundo 160) al minuto 4:40 (segundo 280), es decir 180 segundos en total. En este video no hay paso de barcazas por lo que sirve para ver las condiciones normales del canal. En la Figura 3.5 vemos la ubicación de los puntos 0, 1 y 2 (usados para todos los videos); en la Figura 3.6 la variación de velocidad longitudinal del Punto 0; en la Figura 3.7 la del Punto 1; y en la Figura 3.8, la del Punto 2, respecto al tiempo medido de cada uno.

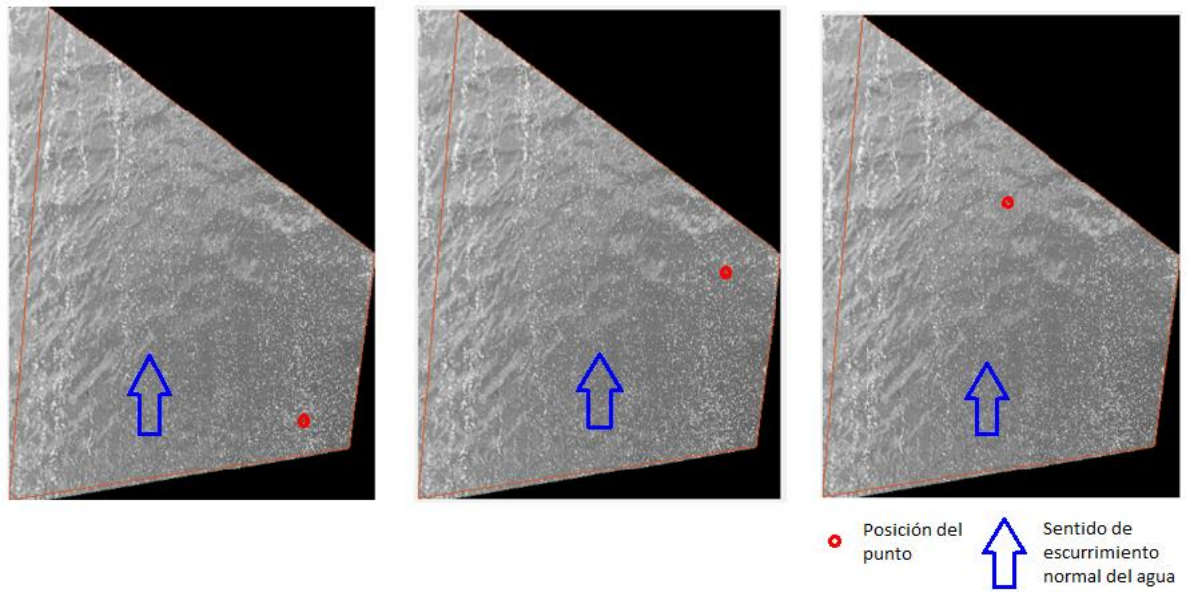


Figura 3. 5: De izquierda a derecha: Posiciones de Puntos 0, 1 y 2 respectivamente sobre las imágenes rectificadas del área de interés.

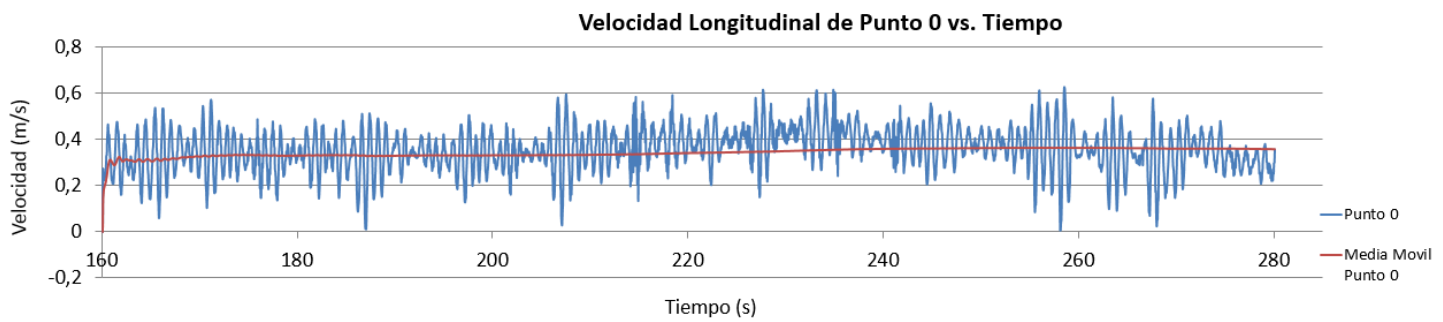


Figura 3. 6: Velocidad Longitudinal de Punto 0 de video 8752 (señal y media móvil) en m/s.

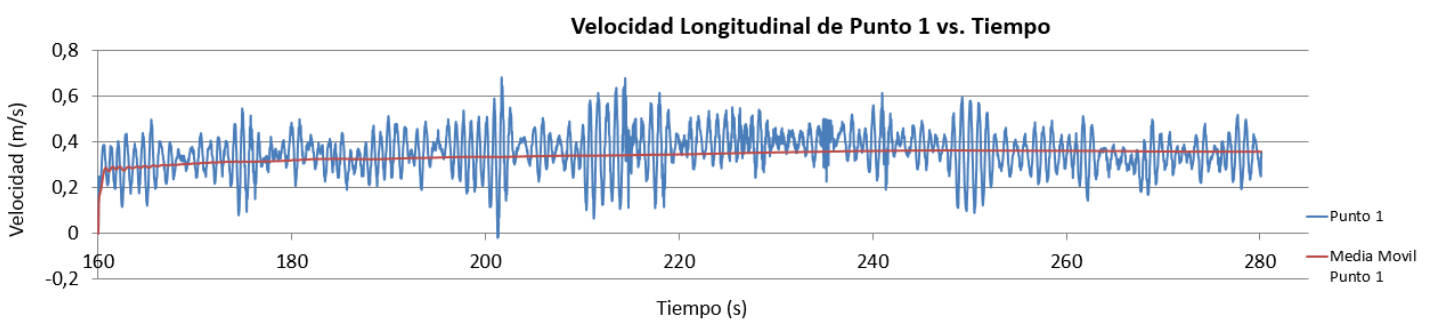


Figura 3. 7: Velocidad Longitudinal de Puntos 1 de video 8752 (señal y media móvil) en m/s.

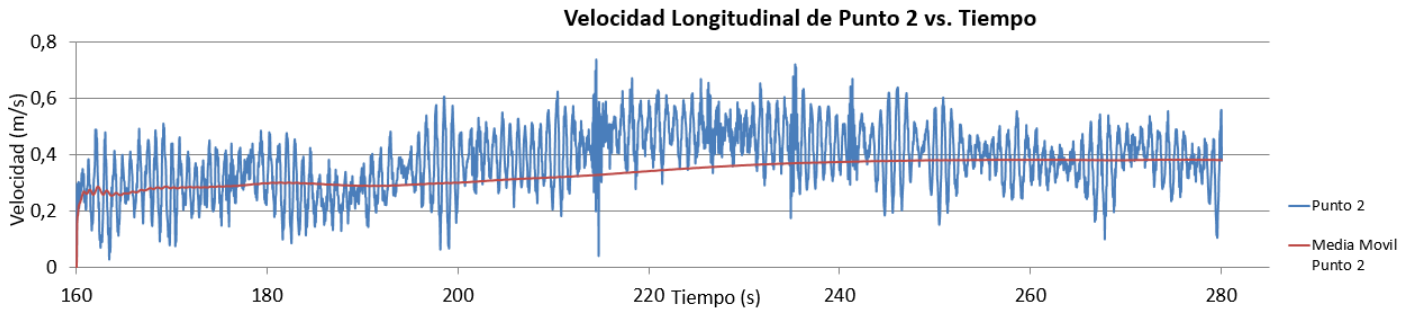


Figura 3. 8: Velocidad Longitudinal de Punto 2 de video 8752 (señal y media móvil) en m/s.

Se observa en las Figura 3.6 y Figura 3.7 que la velocidad en sentido de la corriente (Velocidad Longitudinal; positiva si es en sentido de la corriente) varía entre 0,3 y 0,4 m/s, y la existencia de fluctuaciones (picos) en la velocidad es debido al efecto de las olas del agua dentro del canal en los trazadores sembrados. También se observa que en el Punto 2, Figura 3.8, entre los segundos 200 y 260 hay tendencia a velocidades mayores en comparación con los Puntos 0 y 1, lo que es coherente por estar más alejado de la pared del canal.

3.3.2 Desplazamiento de barcazas en sentido contrario a la dirección del flujo

El video 8753 se analizó del minuto 1:35 al minuto 3:30 las posiciones de los Puntos 0 y 1; y se visualizan dos etapas respecto a la velocidad: antes del paso del convoy de barcazas y durante el paso del convoy de barcazas. El convoy de barcazas circula contra la corriente e inicia su paso dentro de la zona filmada en el minuto 2:10. Se muestran los resultados en las siguientes Figuras: Figura 3.9 Velocidad Longitudinal de Punto 0; Figura 3.10 Velocidad Longitudinal de Punto 1; Figura 3.11 Velocidad Transversal de Punto 0; y Figura 3.12 Velocidad Transversal de Punto 1.



Figura 3. 9: Velocidad Longitudinal en Punto 0 de video 8753, en m/s.

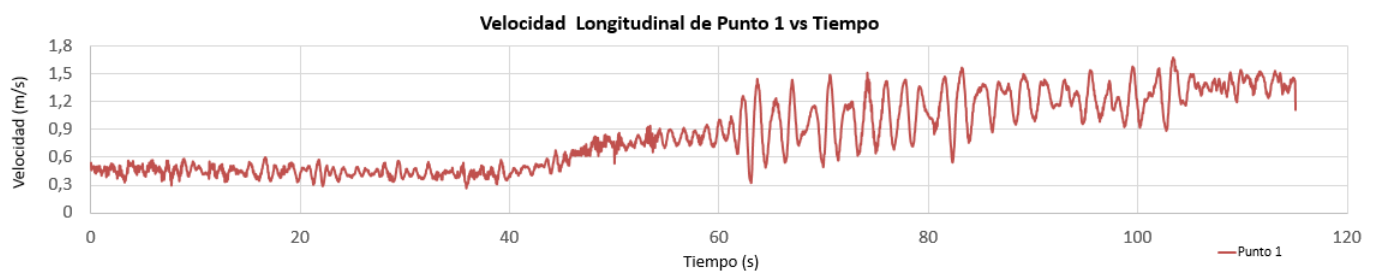


Figura 3. 10: Velocidad Longitudinal en Punto 1 de video 8753, en m/s.



Figura 3. 11: Velocidad Transversal en Punto 0 de video 8753, en m/s.

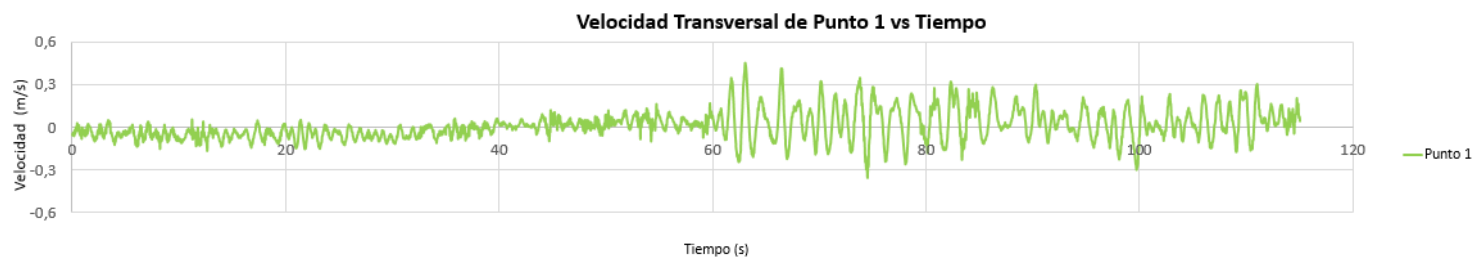


Figura 3. 12: Velocidad Transversal en Punto 1 de video 8753, en m/s.

En todas las Figuras anteriores, hasta el minuto 2:10 (segundo 35) que es donde empieza a aparecer en imagen el convoy de barcazas, se muestran velocidades similares al video 8752, “uniformes” en el tiempo. A partir que empieza a empujar agua las barcazas, se muestra un aumento de la velocidad en ambos puntos, que tiende al valor de 1,2 m/s. Por otro lado, se destaca en las Figuras 3.11 y 3.12, las velocidades transversales oscilan en el tiempo alrededor de los 0 m/s, y con el paso de la barcaza únicamente aumentan los picos de velocidad a causa de las olas. Los valores de los picos son muy similares, casi mostrando un desfase entre los dos puntos (0 y 1). Se señala que estos efectos no son inmediatos al momento en que aparece la barcaza en imagen, sino que demora unos segundos en reflejarse en los trazadores por cuestiones físicas. Por último, para este video se calculó la media móvil del Punto 0 pero tomando valores 2,5 segundos antes y 2,5 segundos después del instante a calcular (en lugar de calcular la media móvil “común”, como se había hecho anteriormente para este trabajo). Se decidió realizarlo de esta forma como una alternativa para filtrar las oscilaciones, ya que la media móvil indica solo un valor promedio hasta el punto calculado. Esto se muestra en la Figura 3.13.

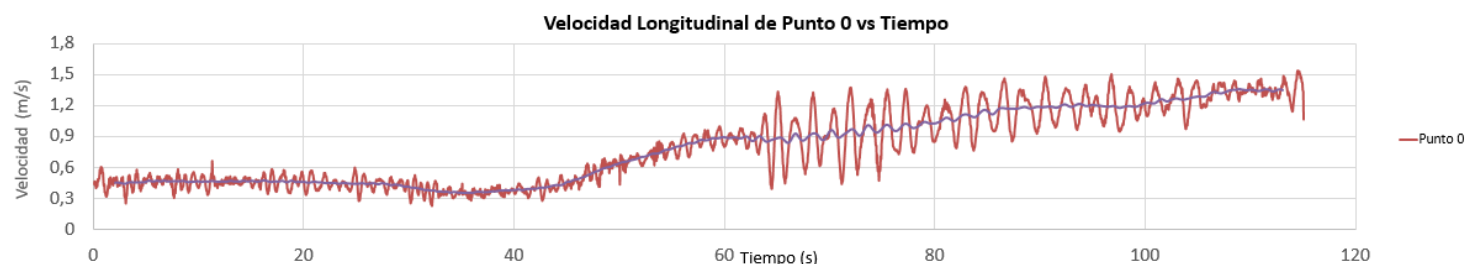


Figura 3. 13: Velocidad longitudinal de Punto 0 y Velocidad Longitudinal “filtrada” del Punto 0 de video 8753, a través del cálculo de la media con datos de velocidad 2,5 segundos antes y 2,5 segundos después.

3.3.2 Desplazamiento de barcazas en el mismo sentido que la dirección del flujo

El siguiente video analizado es el 8754, en el cual circula un convoy de barcazas pero en sentido contrario a la corriente del canal. El análisis se realiza desde el minuto 0 al minuto 0:33 y se continua desde el minuto 1:00 al minuto 3:15. Se analizaron en forma completa el Punto 0, y los Puntos 1 y 2 desde el minuto 1:00 hasta el final. En la Figura 3.14 y Figura 3.15 se muestra la Velocidad Longitudinal del Punto 0, y en las Figuras 3.16 y 3.17, la de los Puntos 1 y 2.



Figura 3. 14: Velocidad Longitudinal de Punto 0 de video 8754, desde segundo 0 a segundo 33, en m/s.

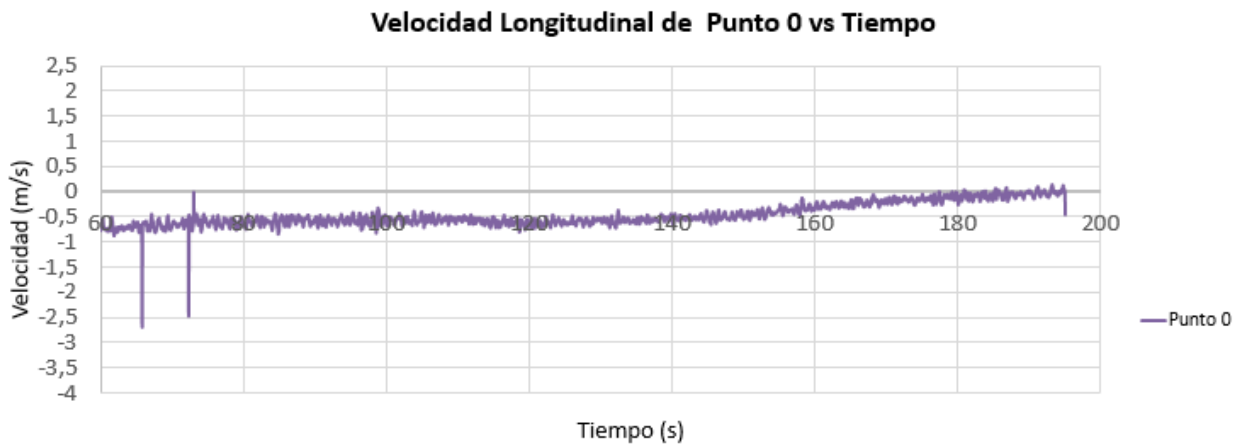


Figura 3. 15: Velocidad Longitudinal de Punto 0 de video 8754, desde segundo 60 a segundo 195, en m/s.



Figura 3. 16: Velocidad Longitudinal de Punto 1 de video 8754, en m/s.



Figura 3. 17: Velocidad Longitudinal de Punto 2 de video 8754, en m/s.

En este video, a partir del segundo 24 aproximadamente aparece en imagen el convoy de barcazas, y su paso marca el cambio de sentido de escurrimiento del agua como se muestra en la Figura 3.14. Se alcanza una velocidad de hasta $-0,7$ m/s, y los picos mostrados al llegar al segundo 30 pueden responder al inicio del intervalo de tiempo sin trazadores en el agua. A partir del minuto 2:40 en el video queda solo pasando el barco remolcador, por lo que se empuja menos agua al haber un frente mucho menor, y esto se refleja en el inicio de disminución de velocidad mostrado en todos los Puntos. A partir del minuto 3:10 finaliza el paso del convoy en el video, sin embargo, el agua no toma su sentido natural, sino que se “estanca” y no se alcanza a apreciar el cambio de velocidad para alcanzar los $0,4$ m/s normales. Se concluye que los efectos del paso de la barcaza no finalizan en forma inmediata y parte de esto se debe a la baja velocidad con que circula el agua en el canal.

Se aplicó al Punto 0 (del video analizado, 8754) la función “Tude_U_Sindisipacion”, definiéndose previamente la frecuencia de filtrado máxima $ff1$ y $ff2$ con los valores $0,001$ y $0,05$ respectivamente, mostrándose los resultados en la Figura 3.18.

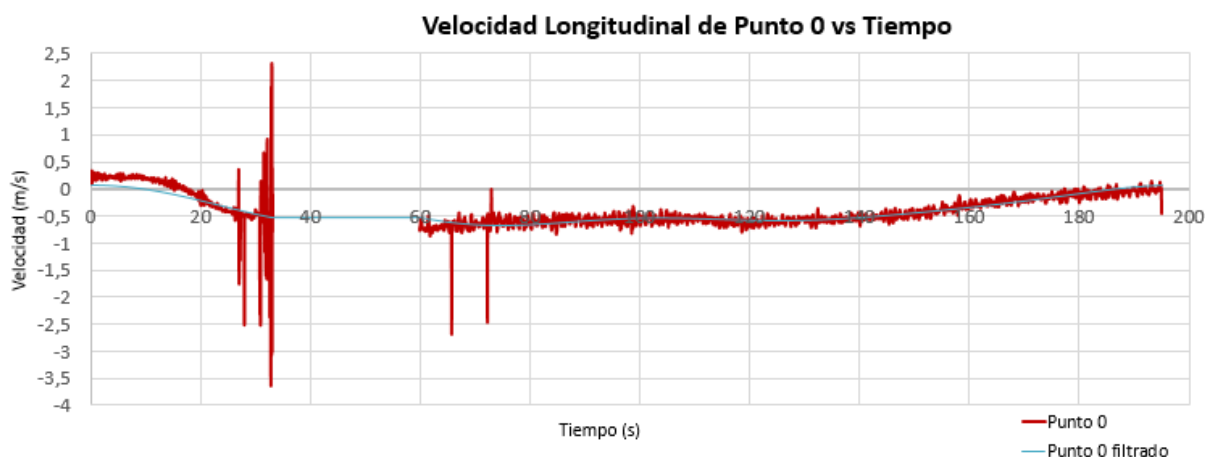


Figura 3. 18: Velocidad longitudinal de Punto 0 de video 8754: original y filtrado.

La función nos muestra la tendencia de la velocidad del agua eliminando los picos causados por las olas, resultando una herramienta útil en estas situaciones. Las velocidades en la Figura 3.18 fueron filtradas tomando a todos los datos como un mismo conjunto, es decir que no se diferenció en tramos de análisis, y por ende del segundo 30 pasa al segundo 60. Para corroborar que en el resultado del filtrado tomar a todo como un mismo conjunto no influyese, se realizó el filtrado al mismo Punto 0 suponiendo una velocidad constante entre el segundo 30 al 60, es decir para los segundos 31, 32, etc., darles el mismo valor de velocidad (se les dio el último valor registrado del primer tramo de análisis). La curva arrojada al graficar la velocidad filtrada de esta forma es idéntica a la de la Figura 3.18, por lo que las velocidades del primer filtrado son aceptables.

Se señala que los picos de velocidades mostrados en el Punto 2, Figura 3.17, alrededor del segundo 80 coinciden con una pérdida en cantidad de trazadores en el video en esa posición, no así en uniformidad.

Capítulo 4: Caracterización de flujo alrededor de estribo de puente en presencia de gaviones de geotextiles

4.1 Introducción al problema

Una de las formas de afectar al terreno y la topografía de un lugar que tienen los cursos de agua es a través del fenómeno de erosión. Este fenómeno ocurre debido a la facilidad que tiene la corriente de agua de arrastrar partículas, y la resistencia de la partícula a ser arrastrada está definida por el tamaño del grano de material que compone el lecho y una rugosidad debido a las formas de fondo (rizos, dunas, antidunas, etcétera) producido en cursos de partículas finas (hasta el tamaño de arenas, con gravas y mayores tamaños las formas de fondo se dan en forma limitada o no se dan). Una medida para evitar erosión en lugares que pueden afectar construcciones como puentes, muelles u obras

costeras es utilizando defensas constituidas por gaviones, enrocados, revestimientos tipo Betonflex (mantas de bloques de concreto adheridos a geotextil) o muros macizos de hormigón. Si bien son formas efectivas de evitar el daño por erosión a las obras, para su construcción es necesario en general rocas, bloques o áridos de gran tamaño, los cuales encarecen el costo de las defensas si no están disponibles cerca de la zona. Este caso se da en la provincia de Santa Fe y en todo el Litoral Argentino (Figura 4.1) a excepción de Misiones. Es una región constituida por depósitos aluviales del río Paraná y por lo tanto con suelos finos y ausente de macizos rocosos, por lo que para traer material rocoso o áridos para elaboración de las defensas implica transportarlos cientos de kilómetros.

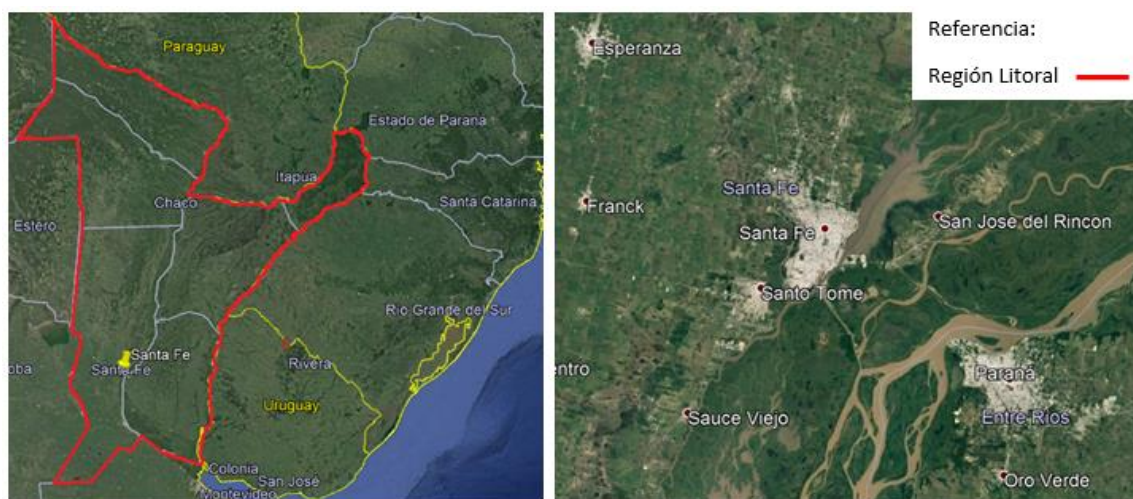


Figura 4. 1: El Litoral (imagen izquierda) está compuesto por las provincias Entre Ríos, Santa Fe, Chaco, Formosa, Corrientes y Misiones. La ciudad de Santa Fe (imagen derecha) está rodeada por ríos con características del tipo llanura. Imagen tomada de Google Earth®.

Investigadores de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) de la Universidad Nacional del Litoral plantearon como alternativa a la clásica ejecución de defensas costeras, la construcción de defensas denominadas geotubos, las cuales están constituida por una suerte de silobolsa (mangas de geotextil cerradas en sus extremos) pero que en su interior están rellenas de material sedimentario del propio río. La principal ventaja de esto es la reducción de la distancias de transporte, y con ello el abaratamiento de la obra, debido a que se aprovecharía el propio material que trae el río. Para evaluar el comportamiento de la alternativa planteada, se modeló como afecta una de estas mangas a la erosión local de un estribo de puente y en el ensayo, se caracteriza el flujo circundante a un estribo de puente a través de ADV y LSPTV. A continuación, se detalla cómo se planteó el experimento en forma global y luego, en qué se participó.

4.2 Planteo del experimento

A partir del testeo de diferentes configuraciones de ubicación de la manga en la zona del estribo, se decidió por la que daba mejores resultados (menor pozo de erosión cerca de la pila) y se empleó esta configuración para aplicar ADV y LSPTV. El testeo de configuraciones y el ensayo “final” se llevó a cabo en el Laboratorio de Experimentación y Modelación Hidráulica de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) de la Universidad Nacional del Litoral, ubicado en la ciudad de Santa Fe. Se utilizó el canal sedimentológico que se encuentra en la Nave N° 2 “Prof. Luis Zanardi”, el cual mide 67 metros de largo, 1,5 metros de ancho y posee una capacidad de bombeo de hasta 400 l/s (Figura 4.2).



Figura 4. 2: Canal empleado en el testeo de configuraciones y aplicación de las técnicas de medición.

Seleccionada la configuración final de la defensa (Figura 4.3), las mediciones se realizan con tres condiciones distintas: con 5 seditubos (G5, el conjunto sobresale al pelo de agua), con 3 seditubos (G3, el conjunto se encuentra bajo el pelo de agua) y con 2 seditubos (G2), mostrado en la Figura 4.4. Para el ensayo con la configuración final se usó un caudal de 80l/s.



Figura 4. 3: Configuración adoptada con condición de 5 seditubos (G5). Imagen izquierda: vista desde aguas arriba. Imagen derecha: vista desde aguas abajo.



Figura 4. 4: Configuración adoptada con condición de 2 seditubos (G2).

Se empleó un fondo rigidizado para realizar los ensayos debido a que el peso de los seditubos junto con la corriente del agua y sus cambios de dirección en la zona del estribo iniciaban procesos de erosión, los cuales modificarían en cada ensayo la sección transversal y no permitiría tener condiciones iniciales idénticas para cada ensayo. La rigidización se llevó a cabo espolvoreando cemento y humedeciéndolo sobre la superficie alisada de arena. Se hicieron dos capas con este procedimiento, y se finalizó parchando algunas grietas surgidas del curado del cemento. No se rigidizó todo el fondo sino únicamente la zona afectada por el estribo (Figura 4.5).



Figura 4. 5: Zona de fondo rigidizado, aguas arriba de esta se mantiene el fondo móvil de arena.

4.3 Definición de puntos de medición

Como se mencionaba anteriormente, el ADV obtiene información de un determinado punto en el espacio, por lo que hay que definir los puntos a medir en el canal. Por ello, se definieron 6 secciones transversales a lo largo del canal. Tomando como Punto 0 a la pared aguas arriba del estribo, las

secciones se ubicaron en las posiciones +0; +20, +60 y +100 aguas arriba del estribo; y -40 y -80 aguas abajo del estribo.

Cada sección contaba entre 8 y 10 verticales según la ubicación de la misma: en la zona donde la protección con geotubos empieza a achicar la sección libre del canal, las verticales que caían en el espacio entre estos y la pared del canal no se medían por ser zona de agua muerta o con pequeñas recirculaciones. Tomando como inicio del eje y (punto 0) a la pared izquierda del canal (visto al canal desde aguas arriba), se plantearon las verticales en las posiciones indicadas en la Figura 4.6. En el caso de la sección 0 y +20 se iniciaron las mediciones a partir de la vertical +36 debido a que las anteriores caían dentro del área encerrada por los seditubos. Además, en la sección 0, se aumentó la cantidad de verticales y disminuyó la distancia entre las mismas, emplazándose las mismas en las posiciones +36, +40, +45, +50, +60 (para luego continuar con el paso de separación normal) para tener mayor densidad de información en la zona anexa al estribo y seditubos. Para definir las posiciones de las verticales cercanas a los márgenes del canal o de los seditubos, se realiza en la posición propuesta, a través de la función ADVCheck del Vectrino, un chequeo de lectura de los valores de velocidad, relación de señal acústica y ruido ambiente SNR y coeficiente de correlación C. Se hace esto ya que a una cierta distancia las superficies de objetos laterales al aparato empiezan a influir en las lecturas arrojando valores erróneos o anomalías; y esta distancia varía según el tipo de superficie que se trate. Por ende, las posiciones de las verticales no están “pegadas” a los márgenes del canal o los seditubos, sino que están designadas teniendo en cuenta ésta distancia. Cabe señalar que el número correspondiente a la designación de la vertical, por ejemplo V36 o Vertical 36, coincide con la posición de esta sobre el eje y. Es decir, la Vertical 36 se ubica a 36 cm desde el punto 0 perteneciente al eje y, fijado para coincidir con el margen izquierdo del canal visto desde aguas arriba.

Dentro de cada vertical se medían 5 puntos en general y 7 puntos en las verticales cercanas a los seditubos. Se muestra en la Figura 4.7 las distancias aproximadas de los puntos medidos (es decir desde el volumen de control) al fondo del canal. Se aclara que para posicionar el ADV, se usaba de guía una escala fijada a este desde donde uno hacía coincidir una marca en el aparato con la posición buscada, por lo que la posición de los puntos está fijada respecto a un sistema inmóvil invariable y no al fondo, que no es perfectamente plano, sino que varía en $\pm 0,1$ cm. En total, el experimento completo debe medir 328 puntos y se le asigna a cada punto, por ejemplo, el nombre S20AAV45-5: S y el número a continuación indican la sección (Sección 20); AA si la sección se encuentra aguas arriba del estribo (AB si se encuentra aguas abajo); V y el número a continuación indican que vertical es (vertical en posición +45); y el último número indica que punto es dentro de la vertical.

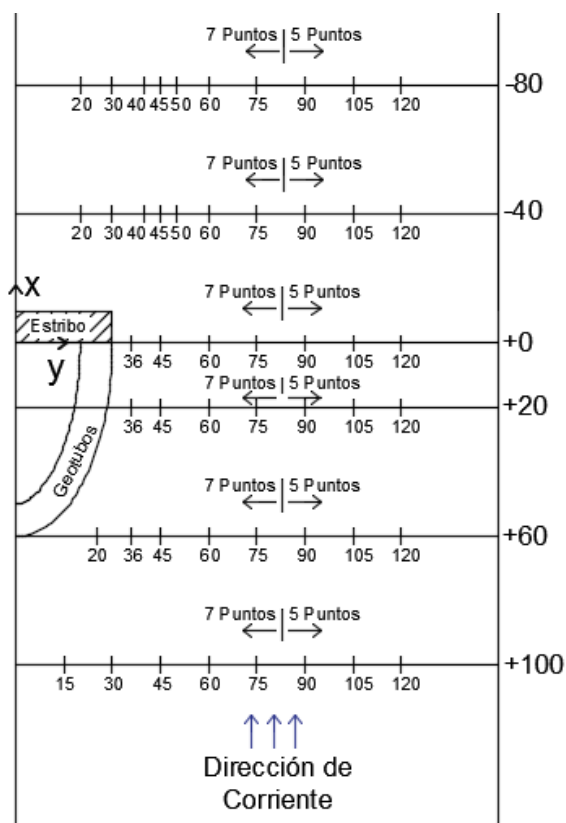


Figura 4. 6: Secciones y posiciones de las verticales. Se indica en el gráfico las verticales donde se miden 7 puntos y en cuales 5 puntos en la columna de agua.

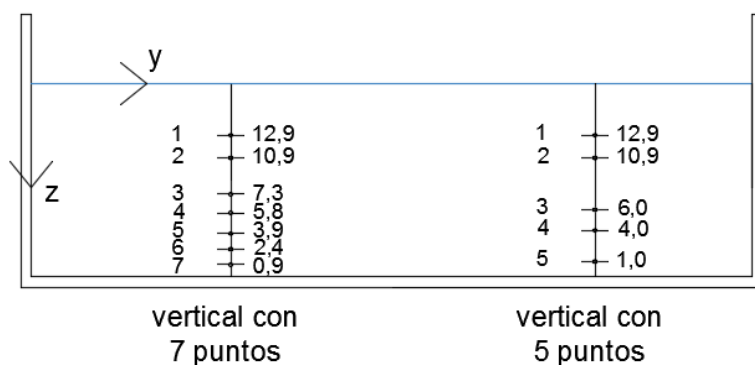


Figura 4. 7: Posiciones aproximadas de los puntos en las verticales. Distancias desde el fondo, en cm.

4.4 Definición de parámetros del ADV y desarrollo del experimento

Para el presente capítulo, se comparará la situación en la sección del estribo S0AA en las tres condiciones mencionadas: con 5 geotubos, con 3 geotubos y con 2 geotubos. Para las mediciones correspondientes se utilizó el Velocímetro Vectrino de Nortek SA, y se aclara que las condiciones con 5 y con 2 geotubos fueron medidas en persona, la condición con 3 fue proporcionada por el grupo de investigación de la FICH. Las configuraciones del Vectrino para el experimento son:

- Frecuencia de muestreo (Sample rate): 50 Hz

- Volumen de control de 7mm
- Intervalo de medición: 5 minutos
- Rango de medición de velocidad: $\pm 0,3$ m/s

El uso de la frecuencia de 50 Hz se desprende del análisis de las ventajas de tener gran cantidad de datos con mucho ruido o de pocos datos con poco ruido (explicado en el Capítulo 1). Es un valor acorde debido a que el flujo presenta en determinados puntos cierta turbulencia la cual si se midiese con frecuencias menores, se perdería resolución temporal. A mayores frecuencias las mediciones tendrían mucho ruido y no se justifica mayor toma de valores por segundo.

El hecho de que el intervalo de medición sea de 5 minutos se debe a que se tomó el mismo intervalo de medición de estudios anteriores (en el mismo canal) donde se comparaba la variación del Coeficiente de Variación, ahora en más CV, vs. El tiempo de medición. Dicho estudio lo realizó Graciela Scacchi y comprobó que a partir de cierto tiempo de medición, el coeficiente (que es la relación entre la desviación típica de una muestra respecto a su media) no disminuye lo suficiente como para justificar el aumento del tiempo de medición (Figura 4.8).

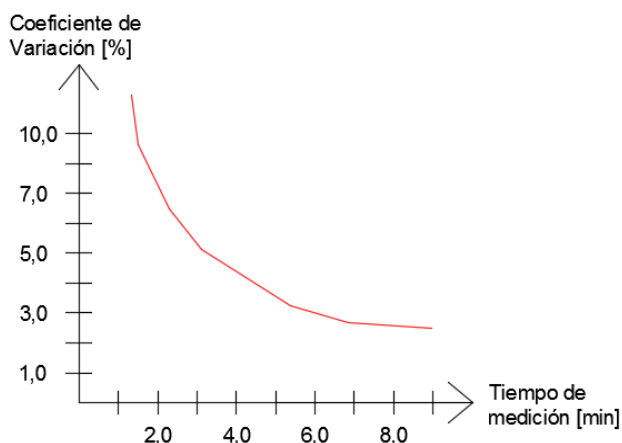


Figura 4. 8: Gráfica representativa de Coeficiente de Variación vs. Tiempo de medición.

Dicho gráfico se realizó midiendo un determinado intervalo de tiempo y con los datos obtenidos de ese intervalo de tiempo se calculaba el CV, repitiéndose así para cada valor del gráfico. En la actualidad para determinar la longitud de registro óptima lo que se hace es medir por un largo período de tiempo (mínimo 15 minutos) y se aplica la técnica de remuestreo MBB (Moving Block Bootstrap). Con ella se logra dividir la serie de datos de 15 minutos en subseries de distinta duración, y a cada subserie se calcula el CV. Estas subseries son todas de la misma medición, salvo que, supongamos, la primer subserie tomará valores de medición desde el segundo 0 hasta el segundo 60, la segunda subserie tomará desde el segundo 0 hasta el segundo 120, y así sucesivamente.

El uso del rango de medición $\pm 0,3$ m/s se debe a que se estima que dentro de ese rango se encuentran la velocidad máxima instantánea esperada. Al momento de medir en ciertos puntos se tuvo que aumentar o disminuir dicho rango. Más adelante se detalla el por qué y qué significa esta configuración.

Respecto al tamaño del Volumen de Medición, a partir de las fórmulas y conclusiones planteadas por Gil Montero et al. (2014) y García, Scacchi et al. (2016) se comprobó que se disminuye el efecto de sesgo negativo que existe en la medición de parámetros turbulentos, causada por los promedios

espaciales y temporales que realiza el instrumento al medir, en la medida que la distancia adimensional F_{st} aumenta; donde:

$$F_{st} = z / L_{ADV}$$

z : distancia desde el centro del volumen de medición al fondo.

L_{ADV} : escala de longitud característica de la medición con ADV, que es la estructura más pequeña que puede ser muestreada por el instrumento, y valdrá el máximo entre L , ϕ y h_v .

L : escala de longitud advectiva, que está en función de la frecuencia de registro de datos (a mayor frecuencia menor longitud advectiva).

ϕ : diámetro del volumen de medición.

h_v : altura del volumen de medición.

Según García, Scacchi et al. (2016), cuando el valor de F_{st} es mayor a 5, se puede considerar superado este efecto de sesgado, por lo que fijando este valor para el caso de mediciones a realizarse con ADV Vectrino, uno puede determinar la altura del volumen de medición h_v , o la frecuencia de adquisición de datos f_r óptimos. En principio se podría plantear operar el instrumento con la altura de volumen más pequeña y un valor alto de f_r , de modo tal de lograr valores de F_{st} lo más grandes posibles. Sin embargo, volúmenes de medición pequeños y frecuencias de registro elevadas conllevan niveles significativos de ruido Doppler, por lo que al establecer h_v y f_r debe tratarse de optimizar F_{st} , tratando de mantener los niveles de ruidos Doppler tan bajos como sean posibles. Por otra parte, como L_{ADV} se define como el máximo valor entre $[L; \phi; h_v]$ disminuir h_v o incrementar f_r de modo tal que L y h_v sean menores que 6 mm no tiene sentido, ya que de ser así estaría dominando la promediación espacial fijada por el diámetro del ADV. En función de este análisis surge el volumen de medición de 7 mm, considerado óptimo para la caracterización del flujo y teniendo en cuenta la frecuencia de registro de 50 Hz.

Antes de dar inicio a las mediciones el ADV se debe garantizar la horizontalidad y verticalidad del mismo. Según García et al. (2016), el incorrecto posicionamiento genera que las velocidades del flujo registradas no sean representativas de los procesos turbulentos presentes. El primer inconveniente está relacionado a la referencia incorrecta de las coordenadas cartesianas del instrumento respecto a las direcciones longitudinales, transversales y verticales del flujo en los casos que el velocímetro acústico Doppler no disponga de un compás interno. En los casos en que exista una dirección preferencial del flujo los errores por una incorrecta alineación son muy importantes al caracterizar las otras componentes de velocidad. Otro inconveniente relacionado al incorrecto posicionamiento del instrumento fue analizado por Rusello et al. (2006), quien observó que la falta de perpendicularidad con la dirección principal del flujo genera importantes efectos de estela del instrumento perturbando el flujo sobre el volumen de medición afectando, en gran medida, la incertidumbre de las mediciones de las velocidades de flujo. Las compañías fabricantes de velocímetros acústicos Doppler mejoraron el diseño de los instrumentos de última generación para minimizar el efecto intrusivo sobre el flujo, pero los efectos están aún presentes aunque las magnitudes son menores. Por todo esto y debido al tiempo que toma posicionar el instrumento, se lo posicionó por única vez antes de dar inicio a las mediciones y se lo fijó a la estructura que permite desplazarlo a lo largo y a lo ancho del canal. Esta estructura debe ser lo suficientemente rígida como para no sufrir vibraciones debidas a la interacción del fluido con el aparato, ya que las mismas afectarían a los datos obtenidos.

Para posicionar el instrumento correctamente respecto al eje X, se lo ubicó manualmente (dejando al receptor de color apuntando hacia aguas abajo) y se procedió a tomar lectura y corrigiendo su posición hasta tener lecturas muy bajas (casi nulas) de componentes Y y Z (V_y y V_z). Las lecturas fueron

tomadas en una sección aguas arriba muy alejada del estribo para no tener influencia del mismo, de esta forma se medía en el flujo más uniforme posible del canal y la componente en x (V_x) era máxima y en Y y Z (V_y y V_z) mínimas.

Para posicionar el instrumento correctamente respecto al eje Y, se lo ubicó manualmente en el soporte, se lo hizo descender de tal forma que las 4 antenas receptoras no toquen la superficie del agua, y se ajustó la posición hasta encontrar la mayor horizontalidad posible entre las antenas y el agua. Posicionado correctamente el instrumento, se lo termina de fijar a la estructura.

Para dar inicio al ensayo, fue necesario arrojar talco industrial por estar el agua del canal libre de sedimentos, partículas en suspensión o restos orgánicos. Es necesario tener material en suspensión para poder tener efecto Doppler y lecturas correctas, si no hubieran partículas no habría rebote de los pulsos acústicos producidas por el aparato y por ende las lecturas serían erráticas y poco fiables. La verificación de si se tiene material en suspensión se realiza monitoreando, en una medición preliminar con el velocímetro acústico Doppler, el parámetro que relaciona la amplitud de la señal acústica recibida y el ruido ambiente (SNR). Valores de SNR bajos (menores a 15db) indicarían poca presencia de partículas que reflejan la señal acústica. En nuestro caso, por la presencia de un cuarto receptor requiere un nivel suficientemente alto de dispersión acústica del fluido, y por ello requieren un nivel alto de partículas que reflejen el pulso acústico.

A medida que se realizan las mediciones se fue controlando el caudal del canal a través de un limnómetro cada dos a tres de horas. Si bien se pudo haber controlado de una forma más exhaustiva, por ejemplo cada hora, las variaciones entre lecturas de limnómetro (y por ende de caudales) arrojaban pocos litros de diferencia (4 a 5 litros como máximo), por lo que se considera aceptable el período de tiempo usado para control.

Al realizar las mediciones de una vertical en particular, se debe obtener el tirante en dicha vertical para luego poder calcular el caudal que aporta esa parte de la sección. Para ello lo que se hace es enrasar el aparato de tal forma que el transductor quede en contacto con el agua y pueda enviar el pulso acústico a la misma, entonces aparecerá en pantalla la lectura de la distancia entre el transductor y el fondo. El valor de la distancia al fondo es correcto en comparación con otras formas de medir esa distancia, pero se verá influenciado por dos razones. La primera es la estela y turbulencia generada por el aparato que afecta a los receptores, ésta estela es importante debido a la velocidad que trae el agua, y es mayor aún en el área donde se busca la mayor cantidad de datos, la zona entre estribos, debido al aumento de velocidad del flujo. La segunda es que uno puede incurrir en errores al enrasar el transductor debido a la dificultad dada por la distancia a la que uno ve el enrasado (uno no está junto al aparato sino que a unos metros), sumado a que la velocidad que trae el agua que comba la superficie de agua al pasar por debajo del transductor, entre otros. Todos estos errores no están cuantificados por el momento para el experimento.

Para finalizar cabe mencionar a los “Weakspot” como se define en inglés, que se estiman se encuentran entre 7,2 y 5,8 cm del fondo, y entre 15,9 y 12,3 cm del fondo. Los Weakspot son localizaciones conflictivas por interferencia acústica causada por contaminación del pulso acústico reflejado en las partículas por pulsos reflejados en las fronteras sólidas. En estos lugares, se solapan los rebotes acústicos del fondo del canal o de la superficie del agua con el rebote de las partículas, y según la capacidad de reflexión de la onda del fondo, puede haber más de dos Weakspot. A mayor capacidad de reflejo (por ejemplo un paño de vidrio) y en función del tirante pueden existir 3 o más Weakspot, en cambio si el fondo absorbe mucho más que reflejar al pulso acústico (y en función del tirante) pueden hasta no existir Weakspots. Su presencia tiene razón geométrica. Se recomienda relevar experimentalmente (evaluando los parámetros de calidad de la señal registrada: correlación C

y relación señal – ruido SNR) antes de definir la posición de los puntos en las verticales. Cabe aclarar que un Weakspot no es un punto “ciego” del ADV: el volumen de control sigue estando dentro del fluido por lo que los sensores captan el eco de los pulsos acústicos.

4.5 Desarrollo de los ensayos

Ubicado el ADV en la sección a medir, se baja el aparato gracias a un motor eléctrico hasta la posición buscada usando una escala anexa al ADV. El procedimiento luego consiste en realizar mediciones durante 5 minutos, detener las mediciones, generar un nuevo archivo, descender el aparato hasta una nueva posición y medir durante 5 minutos nuevamente, y así hasta cambiar de vertical y luego de sección una vez completa. En cada vertical se medirá el tirante como se explicó anteriormente.

Al momento de medir se estuvo atento a 3 factores: la relación señal-ruido SNR, el coeficiente de correlación C y la cantidad de “Spykes” (lecturas anómalas representadas en picos de velocidad) arrojados por componente de velocidad. Cuanto más superen los requerimientos mínimos se tiene mayor certeza de que los datos medidos son correctos. En el caso de que alguno de estos factores no cumpla los requerimientos mínimos (SNR>20, C >70 y muy poca o nula cantidad de Spykes) se puede modificar las condiciones de medición añadiendo más talco al canal o modificando el Rango de medición (por ejemplo llevándolo a ± 1 m/s). Puede pasar también que aun modificando las condiciones de medición, los factores no mejoren. Por ejemplo, ocurrió que en un punto en la primer sección aguas abajo del estribo, se medían valores de SNR>20 y un C<70. Este C<70 junto con las lecturas de las componentes de velocidad nos indicaba que estábamos en una zona turbulenta del flujo, y por más que se modifiquen las condiciones iniciales de medición, no se pudo mejorar el C. En la Figura 4.9, Figura 4.10 y Figura 4.11 se observa la interfaz del programa usado por el Vectrino para la medición de las componentes de velocidad, registro de SNR y registro de factor de correlación C.

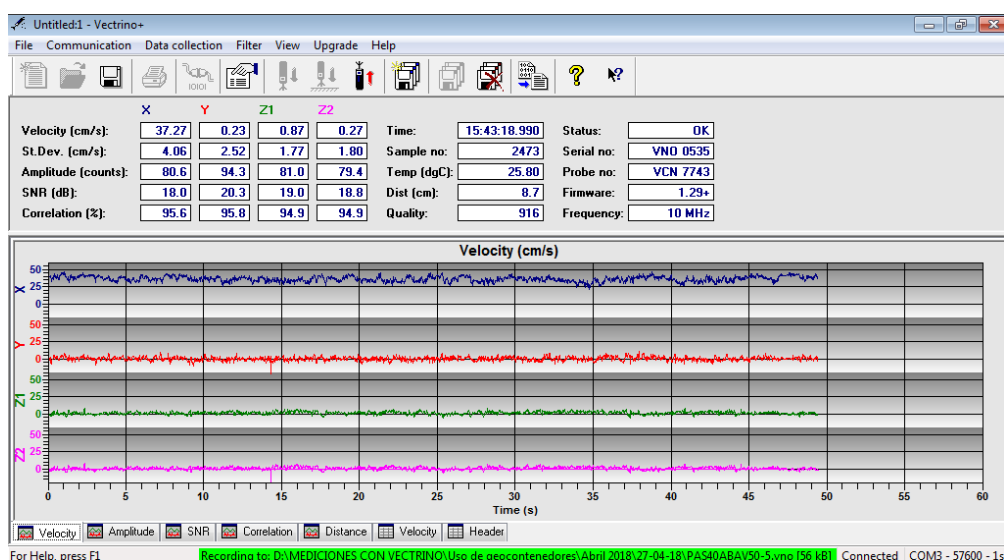


Figura 4. 9: Vista de la interfaz en la solapa de registro de componentes de velocidad al medir.

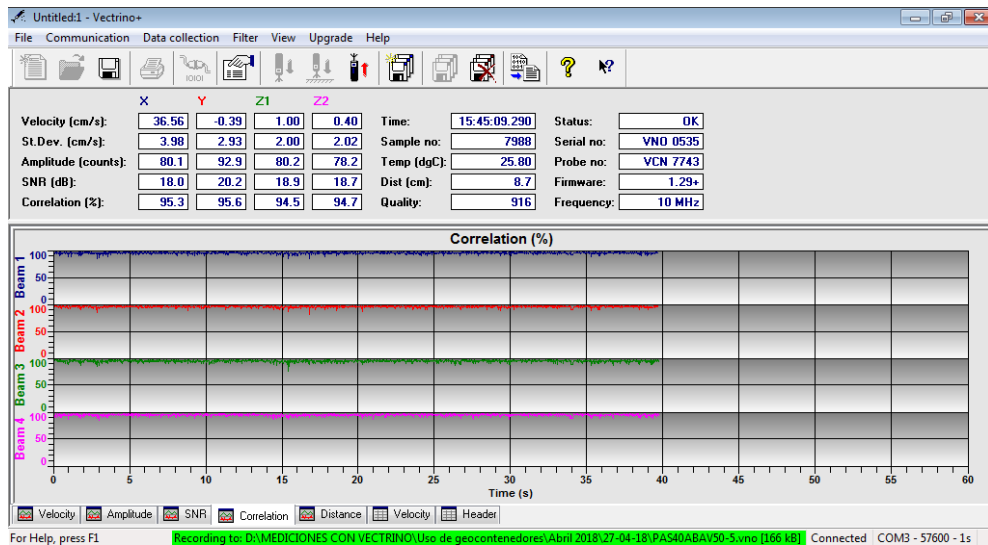


Figura 4. 10: Vista de la interfaz en la solapa de registro de correlación al medir.

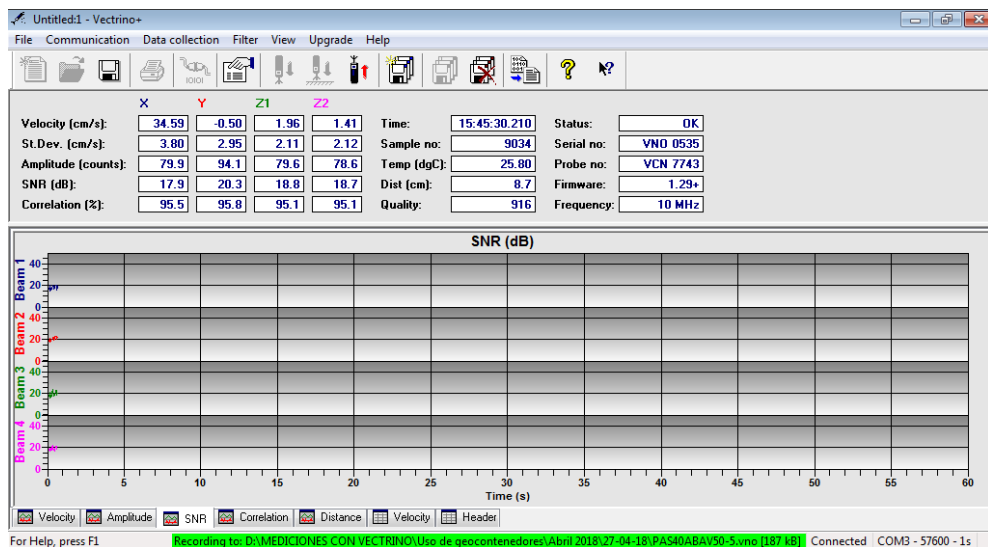


Figura 4. 11: Vista de la interfaz en la solapa de registro de SNR al medir.

Al momento de medir y para mejorar el valor de correlación c , en puntos aguas abajo justo detrás del estribo se disminuyó el Rango de medición a ± 10 cm/s, precisamente en la zona de recirculación del flujo. Por otro lado, en puntos aguas abajo a un lado del estribo se aumentó el Rango a ± 1 m/s, donde se daba el aumento de velocidad de flujo y fenómenos turbulentos por la reducción de la sección de paso. Ahora bien, por qué al modificar el rango de medición mejora el coeficiente de correlación C ? Porque al modificar los límites en los que uno estima que estarán los picos de velocidades, el ADV modifica el intervalo de tiempo con el que emite los dos pulsos de sonido consecutivos con los que calcula dicho coeficiente (se explicó este mecanismo en el capítulo 1). Si no se hiciese esto puede ocurrir que, para un intervalo de tiempo entre pulsos que dé valores altos de correlación para cierta velocidad de flujo (y de partícula), en velocidades mayores de flujo, el eco obtenido en el segundo pulso no sea de la misma partícula del primer pulso (esta ya no estará dentro del volumen de control); en cambio si la partícula se mueve a mucha menor velocidad que la fijada por el rango, al ser los intervalos de tiempo entre pulsos más cortos de lo necesario las lecturas obtenidas tendrán mucho ruido (mayor error), y el ruido arroja ecos de distintas amplitudes y

longitudes por lo que la relación entre los ecos de la partículas del primer pulso y el segundo disminuye, y con ello disminuye el coeficiente c .

4.6 Resultados

A partir de las mediciones se obtiene de cada punto un archivo con extensión “.VNO”. Dicho archivo se lo convierte a un formato binario “.ADV”, utilizando el programa “Vectrino Plus” de Nortek AS, clickeando en la opción *Data Collection* y luego en *Data Conversion*. Este programa, que también usamos para medir con el ADV, transforma los datos en binario a formato ASCII. Luego, ese archivo “.ADV” es el que procesamos utilizando el programa WinADV (Figura 4.12): clickeamos en *Process*, *Process or view multiple ADV files* y seleccionamos los archivos “.ADV” a procesar. Cargados los archivos, definimos, como se muestra en la Figura 4.13, si queremos un filtrado de los datos (elimina spikes) o si no queremos filtrado de datos, y obtenemos un archivo del conjunto de puntos de todas las verticales de la sección con extensión .txt que facilita el manejo de la información y donde aparece todos los valores relevantes de la medición: V_x , V_y , V_z , C_x , C_y , C_z , SNR_x , SNR_y , SNR_z , temperatura del agua, etc). En nuestro caso, aplicamos el filtrado.

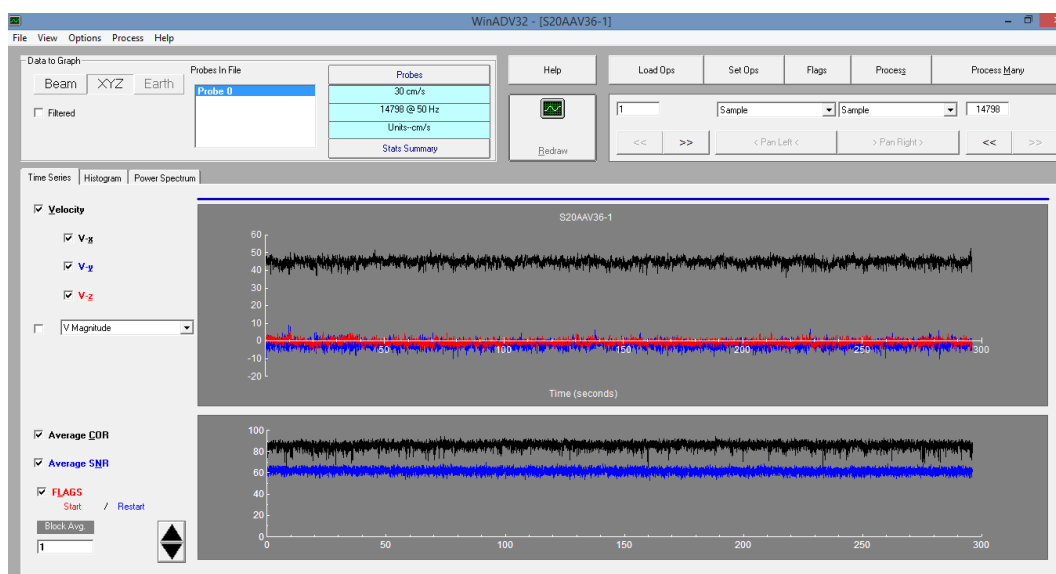


Figura 4. 12: Vista de la interfaz del programa WinADV. En la barra de comandos (parte superior izquierda) encontramos la opción para procesar el archivo “.ADV”.

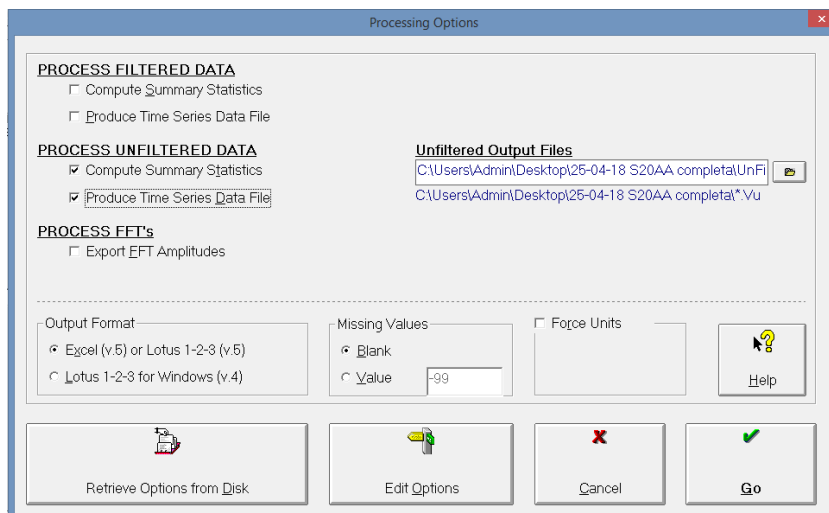


Figura 4. 13: Vista del cuadro de opciones de procesado del WinADV.

Debido a ser el experimento de gran duración, aún se encuentran en etapa de medición los investigadores de la FICH; finalizada esta etapa, analizarán la información recolectada.

Para el presente capítulo y como se mencionó antes, se trabajó con las secciones S0 en las 3 condiciones descritas, de las cuales se analizarán velocidades obtenidas, perfiles de velocidades, calculará el TKE y aplicará LSPTV. El TKE (Turbulence Kinetic Energy, por sus siglas en inglés) es la energía cinética por unidad de masa asociada a la turbulencia del flujo, y es caracterizado a través de la variación de las velocidades respecto a la media. Por lo tanto, a mayor TKE más turbulencia presenta la zona del flujo. La ecuación usada para su cálculo se muestra en la Figura 4.14.

$$k = \frac{1}{2} \left(\overline{(u')^2} + \overline{(v')^2} + \overline{(w')^2} \right)$$

Figura 4. 14: Ecuación de TKE (Turbulence Kinetic Energy).

Donde $u' = u_i - U$, con u_i el valor de velocidad en dirección x en el tiempo i, U es velocidad media en x.

$v' = v_i - V$, con v_i el valor de velocidad en dirección y en el tiempo i, V es velocidad media en y.

$w' = w_i - W$, con w_i el valor de velocidad en dirección z en el tiempo i, W es velocidad media en z.

Definido el TKE, en la Figura 4.15 se muestra el resumen de medición de S0AA-G2 (condición de 2 geotubos), en la Figura 4.16 se muestra el resumen de medición de S0AA-G3 (condición de 3 geotubos) y en la Figura 4.17 se muestra el resumen de medición de S0AA-G5 (condición de 5 geotubos).

Figura 4. 15: Tabla resumen de resultados de Sección 0 Aguas Arriba con 2 geotubos: S0AA-G2.

Punto	Vertical	Vx promedio	Vy promedio	Vz promedio	Dist. Sensor	Dist. Vol de medición a Fondo	Velocidad x dist. entre puntos	Vel media
		cm/s	cm/s	cm/s				
PA	36	40,447	-18,014			18,80		
G2S0AAV36-1	36	40,447	-18,014	-5,456	18,30	13,30	222,46	
G2S0AAV36-2	36	40,797	-16,861	-6,560	16,40	11,40	77,18	
G2S0AAV36-3	36	39,307	-16,494	-9,452	12,40	7,40	160,21	
G2S0AAV36-4	36	34,316	-17,797	-8,772	11,30	6,30	40,49	
G2S0AAV36-5	36	32,522	-18,842	-9,049	10,10	5,10	40,10	
G2S0AAV36-6	36	25,456	-21,319	-10,773	7,80	2,80	66,67	
G2S0AAV36-7	36	27,114	-15,723	-7,533	6,30	1,30	39,43	
		0,000			0,00	0,00	17,62	35,33
PA	40	42,431				18,80		
G2S0AAV40-1	40	42,431	-14,176	-3,976	18,20	13,20	237,61	
G2S0AAV40-2	40	42,738	-13,359	-3,842	16,20	11,20	85,17	
G2S0AAV40-3	40	41,972	-12,926	-3,474	12,80	7,80	144,01	
G2S0AAV40-4	40	40,721	-13,247	-2,716	11,20	6,20	66,15	
G2S0AAV40-5	40	38,104	-14,142	-1,962	9,20	4,20	78,82	
G2S0AAV40-6	40	36,081	-15,053	-1,710	7,80	2,80	51,93	
G2S0AAV40-7	40	34,821	-16,115	-1,185	6,20	1,20	56,72	
		0,000				0,00	20,89	39,43
PA	45	43,791				18,90		
G2S0AAV45-1	45	43,791	-11,853	-2,486	18,20	13,20	249,61	
G2S0AAV45-2	45	43,780	-11,313	-2,322	16,20	11,20	87,57	
G2S0AAV45-3	45	42,220	-11,422	-1,947	12,70	7,70	150,50	
G2S0AAV45-4	45	41,239	-11,879	-1,677	11,10	6,10	66,77	
G2S0AAV45-5	45	39,273	-12,839	-1,354	9,10	4,10	80,51	
G2S0AAV45-6	45	37,212	-14,008	-1,356	7,60	2,60	57,36	
G2S0AAV45-7	45	35,540	-16,431	-0,566	6,10	1,10	54,56	
		0,000			0,00	0,00	19,55	40,55
PA	50	44,456				18,90		
G2S0AAV50-1	50	44,456	-10,354	-1,561	18,00	13,00	262,29	
G2S0AAV50-2	50	44,300	-9,770	-1,381	16,00	11,00	88,76	
G2S0AAV50-3	50	42,566	-9,924	-1,123	12,50	7,50	152,02	
G2S0AAV50-4	50	41,081	-10,219	-0,814	11,00	6,00	62,74	
G2S0AAV50-5	50	38,533	-11,200	-0,484	9,00	4,00	79,61	
G2S0AAV50-6	50	35,987	-12,209	-0,292	7,50	2,50	55,89	
G2S0AAV50-7	50	34,097	-15,013	-0,053	6,00	1,00	52,56	
		0,000				0,00	17,05	40,79
PA	60	45,270				18,90		
G2S0AAV60-1	60	45,270	-7,707	-0,900	18,10	13,10	262,57	
G2S0AAV60-2	60	44,474	-7,640	-0,763	16,00	11,00	94,23	
G2S0AAV60-3	60	43,070	-8,215	-0,585	12,60	7,60	148,83	
G2S0AAV60-4	60	41,729	-8,703	-0,398	11,00	6,00	67,84	

G2S0AAV60-5	60	40,111	-9,624	-0,143	9,00	4,00	81,84	
G2S0AAV60-6	60	37,499	-10,119	-0,105	7,60	2,60	54,33	
G2S0AAV60-7	60	34,192	-10,660	-0,017	6,10	1,10	53,77	
		0,000			0,00	0,00	18,81	41,39
PA	75	43,321					18,90	
G2S0AAV75-1	75	43,321	-4,801	-0,247	17,60	12,60	272,92	
G2S0AAV75-2	75	42,697	-5,364	-0,184	15,60	10,60	86,02	
G2S0AAV75-3	75	41,063	-6,001	-0,094	12,10	7,10	146,58	
G2S0AAV75-4	75	40,310	-6,370	0,037	10,70	5,70	56,96	
G2S0AAV75-5	75	39,203	-7,293	0,091	8,60	3,60	83,49	
G2S0AAV75-6	75	37,538	-8,108	0,246	7,20	2,20	53,72	
G2S0AAV75-7	75	33,467	-7,731	0,458	5,60	0,60	56,80	
		0,000			0,00	0,00	70,57	43,76
PA	90	43,306					18,40	
G2S0AAV90-1	90	43,306	-3,540	-0,185	17,60	12,60	251,17	
G2S0AAV90-2	90	42,576	-3,518	-0,128	15,60	10,60	85,88	
G2S0AAV90-3	90	40,108	-4,200	0,147	10,60	5,60	206,71	
G2S0AAV90-4	90	38,202	-4,756	0,304	8,60	3,60	78,31	
G2S0AAV90-5	90	32,129	-4,813	0,129	5,50	0,50	109,01	
		0,000				0,00	8,03	40,17
PA	105	44,618					18,40	
G2S0AAV105-1	105	44,618	-2,282	-0,355	18,00	13,00	240,94	
G2S0AAV105-2	105	43,674	-2,470	-0,249	15,90	10,90	92,71	
G2S0AAV105-3	105	40,950	-2,996	0,128	11,00	6,00	207,33	
G2S0AAV105-4	105	39,316	-3,254	0,290	9,00	4,00	80,27	
G2S0AAV105-5	105	32,962	-3,561	0,180	5,90	0,90	112,03	
		0,000				0,00	14,83	40,66
PA	120	44,537					18,80	
G2S0AAV120-1	120	44,537	-1,335	-0,343	17,90	12,90	262,77	
G2S0AAV120-2	120	44,359	-1,589	-0,334	16,00	11,00	84,45	
G2S0AAV120-3	120	41,785	-2,018	-0,019	10,90	5,90	219,67	
G2S0AAV120-4	120	40,379	-2,400	0,060	9,00	4,00	78,06	
G2S0AAV120-5	120	34,157	-2,678	0,490	5,90	0,90	115,53	
		0,000				0,00	15,37	41,27
PA	135	39,623					18,80	
G2S0AAV135-1	135	39,623	-0,534	0,108	12,60	7,60	441,76	39,62

Figura 4. 16: Tabla resumen de resultados de Sección 0 Aguas Arriba con 3 geotubos: S0AA-G3.

Punto	Vertical	Vx promedio	Vy promedio	Vz promedio	Dist. Sensor	Dist. Vol de medición a Fondo	Velocidad x dist. entre puntos	Vel media
		cm/s	cm/s	cm/s				
PA	36	32,118					18,60	
G3S0AAV36-1	36	32,118	-20,234	-4,610	18,40	13,40	167,01	
G3S0AAV36-2	36	32,888	-18,573	-7,684	16,30	11,30	68,26	
G3S0AAV36-3	36	33,786	-15,542	-12,623	12,40	7,40	130,01	

PRÁCTICA SUPERVISADA – INFORME FINAL

G3S0AAV36-4	36	30,985	-14,010	-14,357	11,30	6,30	35,62	
G3S0AAV36-5	36	33,506	-9,795	-13,429	10,10	5,10	38,69	
G3S0AAV36-6	36	39,546	-7,201	-7,387	7,80	2,80	84,01	
G3S0AAV36-7	36	38,235	-6,030	-3,973	6,30	1,30	58,34	
		0,000				0,00	24,85	32,62
PA	40	40,233					18,60	
G3S0AAV40-1	40	40,233	-13,769	-4,749	18,30	13,30	213,23	
G3S0AAV40-2	40	41,550	-12,610	-5,739	16,40	11,40	77,69	
G3S0AAV40-3	40	42,353	-11,120	-6,340	12,80	7,80	151,02	
G3S0AAV40-4	40	42,017	-10,767	-6,141	11,30	6,30	63,28	
G3S0AAV40-5	40	40,778	-10,224	-5,259	9,30	4,30	82,79	
G3S0AAV40-6	40	39,653	-9,620	-4,355	7,90	2,90	56,30	
G3S0AAV40-7	40	38,425	-9,060	-2,476	6,30	1,30	62,46	
		0,000				0,00	24,98	39,34
PA	45	42,661					18,90	
G3S0AAV45-1	45	42,661	-11,214	-4,207	18,10	13,10	247,44	
G3S0AAV45-2	45	43,451	-9,833	-4,277	16,20	11,20	81,81	
G3S0AAV45-3	45	42,692	-9,193	-3,809	12,70	7,70	150,75	
G3S0AAV45-4	45	41,861	-8,878	-3,604	11,20	6,20	63,41	
G3S0AAV45-5	45	40,186	-9,271	-3,083	9,20	4,20	82,05	
G3S0AAV45-6	45	38,031	-9,733	-2,474	7,60	2,60	62,57	
G3S0AAV45-7	45	36,654	-10,935	-1,619	6,20	1,20	52,28	
		0,000				0,00	21,99	40,33
PA	50	44,083					18,90	
G3S0AAV50-1	50	44,083	-9,129	-2,317	18,10	13,10	255,68	
G3S0AAV50-2	50	44,336	-8,458	-2,519	16,10	11,10	88,42	
G3S0AAV50-3	50	42,959	-7,990	-2,122	12,60	7,60	152,77	
G3S0AAV50-4	50	41,527	-7,989	-1,892	11,20	6,20	59,14	
G3S0AAV50-5	50	38,676	-8,263	-1,165	9,00	4,00	88,22	
G3S0AAV50-6	50	36,160	-9,531	-0,679	7,50	2,50	56,13	
G3S0AAV50-7	50	34,464	-11,951	-0,126	6,10	1,10	49,44	
		0,000				0,00	18,96	40,67
PA	60	45,194					18,70	
G3S0AAV60-1	60	45,194	-6,605	-1,125	18,20	13,20	248,57	
G3S0AAV60-2	60	44,919	-6,557	-1,184	16,20	11,20	90,11	
G3S0AAV60-3	60	43,410	-6,751	-0,836	12,80	7,80	150,16	
G3S0AAV60-4	60	42,077	-7,117	-0,642	11,30	6,30	64,12	
G3S0AAV60-5	60	40,111	-7,861	-0,371	9,10	4,10	90,41	
G3S0AAV60-6	60	37,591	-8,476	-0,204	7,50	2,50	62,16	
G3S0AAV60-7	60	34,351	-8,555	-0,251	6,10	1,10	50,36	
		0,000				0,00	18,89	41,43
PA	75	43,050					18,70	
G3S0AAV75-1	75	43,050	-3,840	-0,027	17,60	12,60	262,61	
G3S0AAV75-2	75	42,678	-4,387	-0,245	15,90	10,90	72,87	
G3S0AAV75-3	75	41,591	-5,143	-0,100	12,30	7,30	151,69	
G3S0AAV75-4	75	40,860	-5,431	-0,007	10,80	5,80	61,84	
G3S0AAV75-5	75	39,590	-6,173	0,093	8,80	3,80	80,45	

G3S0AAV75-6	75	37,741	-6,765	0,296	7,40	2,40	54,13	
G3S0AAV75-7	75	33,526	-6,557	0,214	5,60	0,60	64,14	
		0,000			0,00	0,00	75,22	44,01
PA	90	42,658				18,60		
G3S0AAV90-1	90	42,658	-2,508	0,114	17,70	12,70	251,68	
G3S0AAV90-2	90	42,080	-3,078	0,000	15,70	10,70	84,74	
G3S0AAV90-3	90	39,900	-3,753	0,224	10,60	5,60	209,05	
G3S0AAV90-4	90	37,551	-3,960	0,260	8,60	3,60	77,45	
G3S0AAV90-5	90	31,521	-4,239	0,316	5,50	0,50	107,06	
		0,000				0,00	7,88	39,67
PA	105	43,842				18,60		
G3S0AAV105-1	105	43,842	-1,964	-0,147	17,90	12,90	249,90	
G3S0AAV105-2	105	43,597	-2,233	-0,294	15,90	10,90	87,44	
G3S0AAV105-3	105	40,679	-2,561	0,111	11,00	6,00	206,48	
G3S0AAV105-4	105	38,945	-2,946	0,336	8,80	3,80	87,59	
G3S0AAV105-5	105	31,640	-3,294	0,209	5,70	0,70	109,41	
		0,000				0,00	11,07	40,42
PA	120	44,423				18,70		
G3S0AAV120-1	120	44,423	-1,020	-0,257	18,00	13,00	253,21	
G3S0AAV120-2	120	44,060	-1,375	-0,367	15,90	10,90	92,91	
G3S0AAV120-3	120	42,026	-1,945	-0,235	10,90	5,90	215,21	
G3S0AAV120-4	120	39,951	-2,166	-0,022	8,90	3,90	81,98	
G3S0AAV120-5	120	34,198	-2,317	0,430	5,90	0,90	111,22	
		0,000				0,00	15,39	41,17
PA	135	40,203				18,70		
G3S0AAV135-1	135	40,203	-0,615	-0,034	12,80	7,80	438,21	40,20

Figura 4. 17: Tabla resumen de resultados de Sección 0 Aguas Arriba con 5 geotubos: S0AA-G5.

Punto	Vertical	Vx promedio	Vy promedio	Vz promedio	Dist. Sensor	Dist. Vol de medición a Fondo	Velocidad x dist. entre puntos	Vel media
		cm/s	cm/s	cm/s				
PA	36	44,524				18,70		
S20AAV36-1	36	44,524	0,229	0,242	18,40	13,40	235,98	
S20AAV36-2	36	44,721	0,537	-0,315	16,30	11,30	93,71	
S20AAV36-3	36	43,649	-0,381	-0,962	12,80	7,80	154,65	
S20AAV36-4	36	42,823	-0,806	-1,147	11,30	6,30	64,85	
S20AAV36-5	36	42,278	-1,974	-1,425	9,30	4,30	85,10	
S20AAV36-6	36	41,212	-3,254	-1,523	7,80	2,80	62,62	
S20AAV36-7	36	40,849	-4,374	-1,173	6,30	1,30	61,55	
		0,000			0,00	0,00	26,55	41,98
PA	40	44,953				18,70		
S20AAV40-1	40	44,953	0,410	-0,459	18,40	13,40	238,25	
S20AAV40-2	40	44,910	0,642	-0,659	16,40	11,40	89,86	
S20AAV40-3	40	43,074	0,310	-0,857	12,90	7,90	153,97	
S20AAV40-4	40	41,901	-0,073	-0,970	11,40	6,40	63,73	

PRÁCTICA SUPERVISADA – INFORME FINAL

S20AAV40-5	40	40,742	-1,329	-1,424	9,40	4,40	82,64	
S20AAV40-6	40	39,587	-3,381	-1,610	7,90	2,90	60,25	
S20AAV40-7	40	39,132	-5,345	-0,988	6,30	1,30	62,98	
		0,000				0,00	25,44	41,56
PA	45	45,969				18,80		
S20AAV45-1	45	45,969	-0,014	-0,298	18,20	13,20	257,43	
S20AAV45-2	45	45,079	0,413	-0,401	16,20	11,20	91,05	
S20AAV45-3	45	42,332	0,381	-0,186	12,60	7,60	157,34	
S20AAV45-4	45	40,125	0,222	0,161	11,20	6,20	57,72	
S20AAV45-5	45	37,657	-1,553	0,702	9,20	4,20	77,78	
S20AAV45-6	45	36,170	-4,272	1,094	7,70	2,70	55,37	
S20AAV45-7	45	33,755	-4,649	0,843	6,10	1,10	55,94	
		0,000			0,00	0,00	18,57	41,02
PA	50	45,960				18,80		
S20AAV50-1	50	45,960	-0,262	-0,170	18,10	13,10	261,97	
S20AAV50-2	50	45,198	-0,151	-0,307	16,20	11,20	86,60	
S20AAV50-3	50	42,979	-0,396	0,054	12,60	7,60	158,72	
S20AAV50-4	50	41,414	-0,822	0,223	11,20	6,20	59,08	
S20AAV50-5	50	38,615	-1,934	0,419	9,10	4,10	84,03	
S20AAV50-6	50	36,881	-3,006	0,133	7,50	2,50	60,40	
S20AAV50-7	50	33,823	-2,100	-0,136	6,00	1,00	53,03	
		0,000				0,00	16,91	41,53
PA	60	45,541				18,80		
S20AAV60-1	60	45,541	-0,325	-0,315	18,20	13,20	255,03	
S20AAV60-2	60	44,781	-0,420	-0,459	16,20	11,20	90,32	
S20AAV60-3	60	42,947	-0,823	-0,264	12,80	7,80	149,14	
S20AAV60-4	60	42,144	-1,161	-0,153	11,20	6,20	68,07	
S20AAV60-5	60	40,561	-1,894	0,035	9,20	4,20	82,70	
S20AAV60-6	60	38,264	-2,394	0,051	7,70	2,70	59,12	
S20AAV60-7	60	34,935	-1,803	0,144	6,20	1,20	54,90	
		0,000			0,00	0,00	20,96	41,50
PA	75	43,199				18,80		
S20AAV75-1	75	43,199	0,130	0,270	17,80	12,80	259,19	
S20AAV75-2	75	42,454	-0,514	-0,074	15,90	10,90	81,37	
S20AAV75-3	75	40,710	-0,916	-0,032	12,30	7,30	149,70	
S20AAV75-4	75	39,721	-1,225	0,185	10,80	5,80	60,32	
S20AAV75-5	75	38,305	-1,608	0,080	8,80	3,80	78,03	
S20AAV75-6	75	36,709	-1,988	0,123	7,40	2,40	52,51	
S20AAV75-7	75	32,496	-1,242	0,104	5,90	0,90	51,90	
		0,000				0,00	14,62	39,77
PA	90	42,677				18,40		
S20AAV90-1	90	42,677	0,707	0,123	17,80	12,80	238,99	
S20AAV90-2	90	42,334	-0,460	-0,169	15,80	10,80	85,01	
S20AAV90-3	90	39,126	-0,717	0,250	10,80	5,80	203,65	
S20AAV90-4	90	37,999	-0,927	0,263	8,80	3,80	77,13	
S20AAV90-5	90	29,914	-0,075	-0,060	5,90	0,90	98,47	
		0,000				0,00	13,46	38,95

PA	105	43,088				18,40			
S20AAV105-1	105	43,088	0,095	-0,515	17,90	12,90	236,99		
S20AAV105-2	105	42,357	-0,091	-0,222	16,10	11,10	76,90		
S20AAV105-3	105	39,800	-0,446	0,138	11,00	6,00	209,50		
S20AAV105-4	105	37,746	-0,722	0,287	9,00	4,00	77,55		
S20AAV105-5	105	31,216	-0,506	0,495	6,00	1,00	103,44		
		0,000				0,00	15,61	39,13	
PA	120	43,739				18,80			
S20AAV120-1	120	43,739	0,892	-0,052	17,90	12,90	258,06		
S20AAV120-2	120	42,542	0,071	-0,295	15,90	10,90	86,28		
S20AAV120-3	120	40,009	-0,382	-0,119	11,00	6,00	202,25		
S20AAV120-4	120	38,346	-0,613	0,062	8,90	3,90	82,27		
S20AAV120-5	120	31,820	-0,537	0,404	5,80	0,80	108,76		
		0,000				0,00	12,73	39,91	
PA	135					18,80			
S20AAV135-1	135	41,372	-0,338	12,40	7,40	153,08	41,37	41,37	

Luego, a partir de las componentes de velocidad se calculó el TKE para cada punto medido en cada condición, y estos fueron graficados en las Figuras 4.18, 4.19 y 4.20 identificándose dichos puntos según la referencia anexa a cada imagen. Se empleó para ello el programa Surfer 15 (perteneciente a Golden Software, LCC), el cual grafica conjunto de valores con posiciones en X e Y, y los interpola aplicando Kriging. Kriging es un procedimiento de la geoestadística que genera una superficie estimada a partir de un conjunto de datos dispersados con valores z y presupone que la distancia o la dirección entre los puntos de muestra reflejan una correlación espacial que puede utilizarse para explicar la variación en la superficie. Se ajusta una función matemática a un número específico de puntos o a todos los puntos dentro de un radio especificado para determinar el valor de salida para cada ubicación, y la estimación entre puntos es de tipo lineal. El kriging utilizado para este caso es del tipo ordinario: se asume que las medias locales no son necesariamente próximas a la media de la población, por lo que se usan solo los puntos más cercanos para la interpolación. Al tenerse valores de velocidad a partir de la Vertical 36 hasta la Vertical 120, y no desde el filo del estribo (el cual sería la Vertical 30), se grafica únicamente entre esas verticales, por lo que queda una franja de 6cm junto al estribo sin TKE, y otra más entre la Vertical 120 y el margen derecho del canal, de 30cm. Ocurre algo similar en las verticales: se grafica desde el valor medido más cercano al fondo del canal (que está a 1cm de este aproximadamente) hasta el valor medido más cercano al pelo de agua (13,5 cm aproximadamente), por lo que existe una franja de 5cm aproximadamente entre el ultimo valor medido y la superficie.

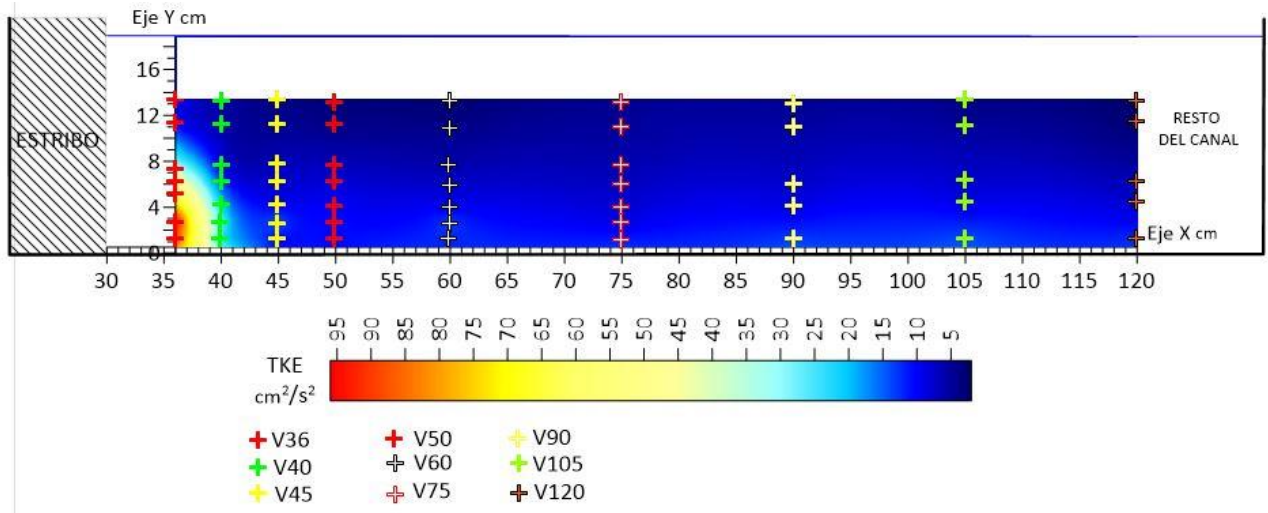


Figura 4. 18: TKE para la condición de 2 geotubos G2 en la sección del estribo (S0) visto desde aguas arriba, graficado desde la vertical 36 hasta la vertical 120. Se identifican los puntos de medición, numerados en las tablas de 1 a 7, en las diferentes verticales, siendo el punto 1 el más cercano al pelo libre, y el punto 7 el más cercano al fondo.

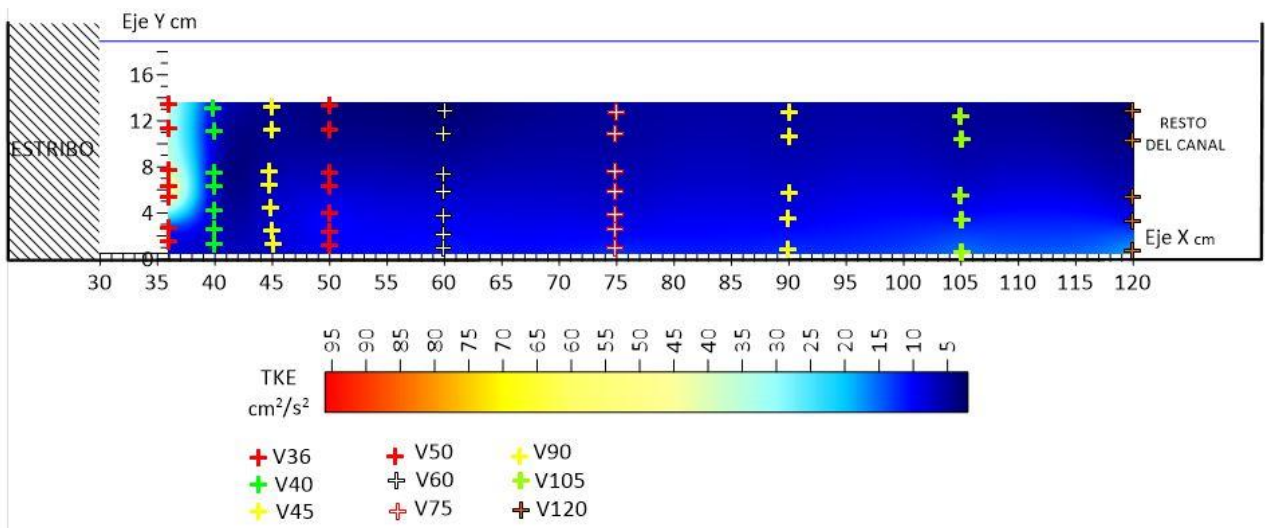


Figura 4. 19: TKE para la condición de 3 geotubos G3 en la sección del estribo (S0) visto desde aguas arriba, graficado desde la vertical 36 hasta la vertical 120. Se identifican los puntos de medición, numerados en las tablas de 1 a 7, en las diferentes verticales, siendo el punto 1 el más cercano al pelo libre, y el punto 7 el más cercano al fondo.

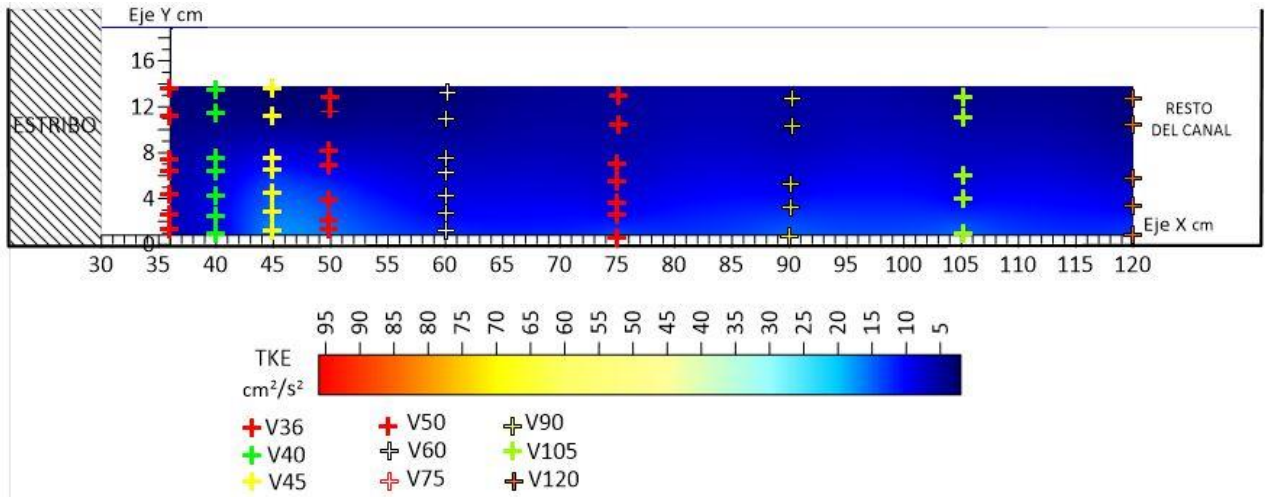


Figura 4. 20: TKE para la condición de 5 geotubos G5 en la sección del estribo (S0) visto desde aguas arriba, graficado desde la vertical 36 hasta la vertical 120. Se identifican los puntos de medición, numerados en las tablas de 1 a 7, en las diferentes verticales, siendo el punto 1 el más cercano al pelo libre, y el punto 7 el más cercano al fondo.

Se observa que la distribución de flujo más uniforme de los tres casos se da en la condición de 5 geotubos (supera al pelo de agua), aquí el TKE en sus picos máximos no supera los $35 \text{ cm}^2/\text{s}^2$. La condición de 2 geotubos también presenta una distribución uniforme de bajos valores de TKE, y un pico de $90 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ en la esquina inferior con el estribo, lo que indica gran turbulencia en ese punto. La condición de 3 geotubos muestra un comportamiento similar al de 2 geotubos con la diferencia que en vez de tener una zona puntual con un pico, presenta toda una franja junto al estribo con valores alrededor de $40 \text{ cm}^2/\text{s}^2$.

Para continuar con el análisis, en las Figuras 4.21, Figura 4.22 y Figura 4.23 se graficaron los perfiles de velocidad V_x de las primeras verticales V36, V40 y V45 respectivamente para la condición con 2 geotubos G2; en las Figuras 4.24, Figura 4.25 y Figura 4.26 se graficaron los perfiles de velocidad V_x de las primeras verticales V36, V40 y V45 respectivamente para la condición con 3 geotubos G3; y en las Figuras 4.27, Figura 4.28 y Figura 4.29 se graficaron los perfiles de velocidad V_x de las primeras verticales V36, V40 y V45 respectivamente para la condición con 5 geotubos G5.

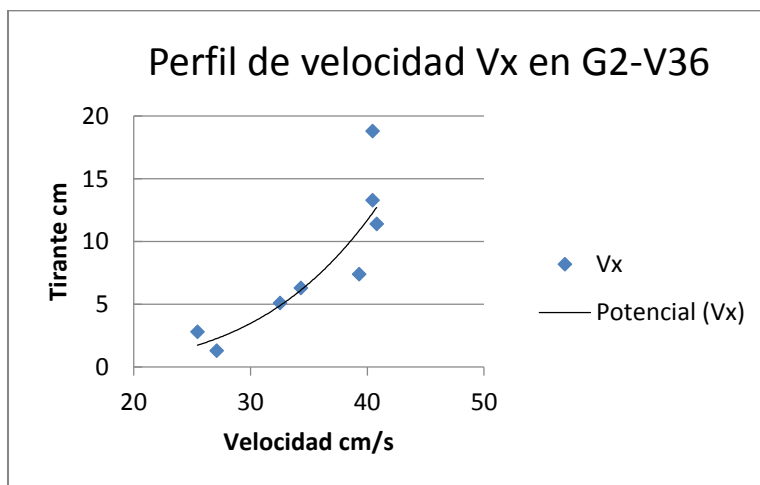


Figura 4. 21: Perfil de Velocidad en dirección del eje x, en la Vertical 36 para la condición con 2 geotubos G2.

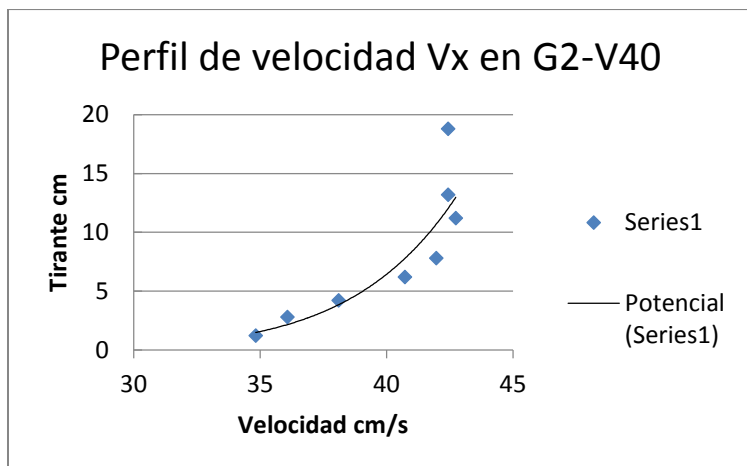


Figura 4. 22: Perfil de Velocidad en dirección del eje x, en la Vertical 40 para la condición con 2 geotubos G2.

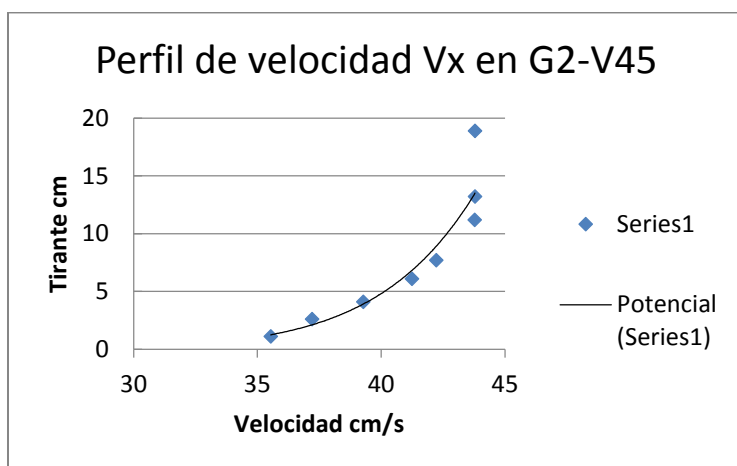


Figura 4. 23: Perfil de Velocidad en dirección del eje x, en la Vertical 45 para la condición con 2 geotubos G2.

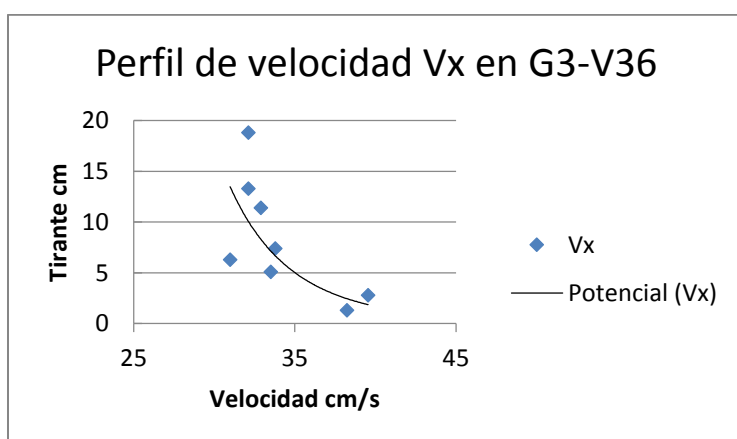


Figura 4. 24: Perfil de Velocidad en dirección del eje x, en la Vertical 36 para la condición con 3 geotubos G3.

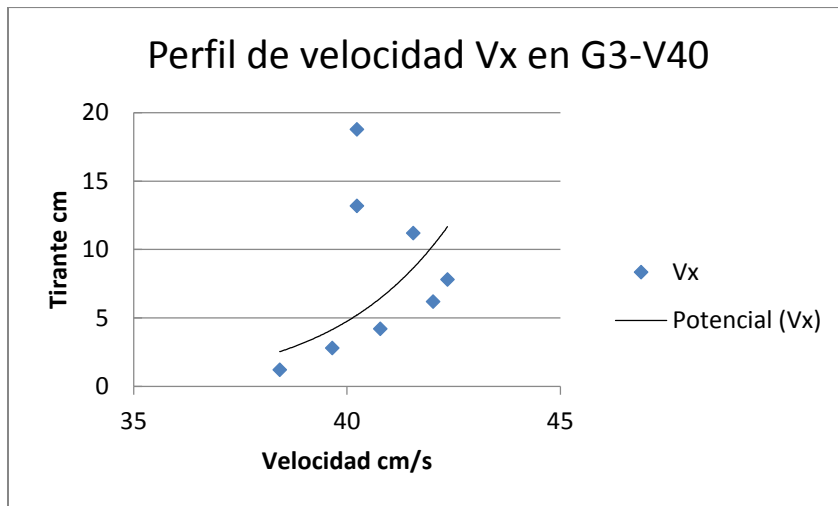


Figura 4. 25: Perfil de Velocidad en dirección del eje x, en la Vertical 40 para la condición con 3 geotubos G3.

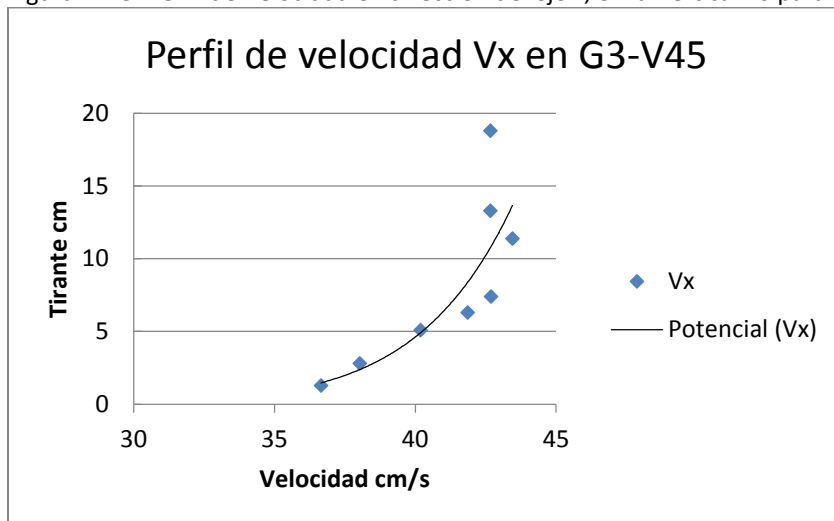


Figura 4. 26: Perfil de Velocidad en dirección del eje x, en la Vertical 45 para la condición con 3 geotubos G3.

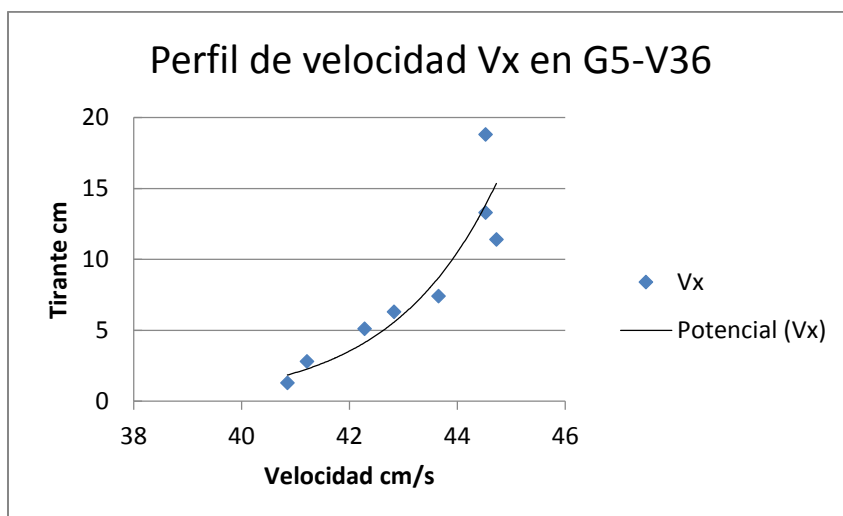


Figura 4. 27: Perfil de Velocidad en dirección del eje x, en la Vertical 36 para la condición con 5 geotubos G5.

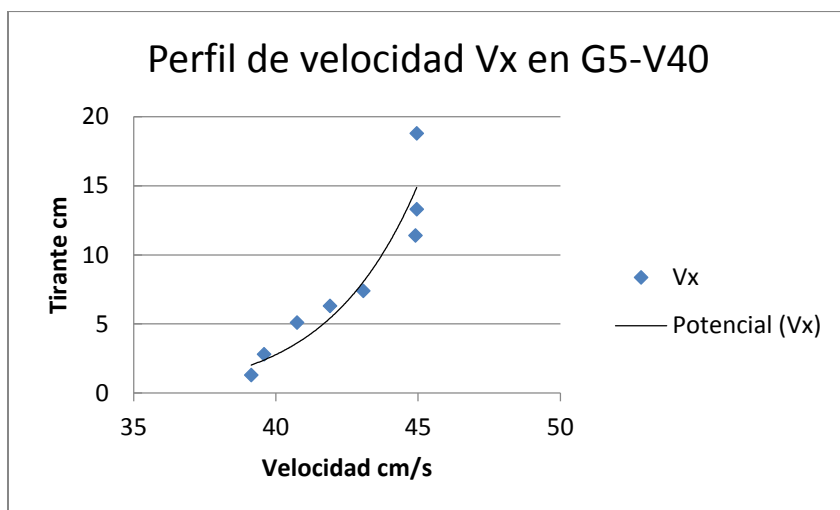


Figura 4. 28: Perfil de Velocidad en dirección del eje x, en la Vertical 40 para la condición con 5 geotubos G5.

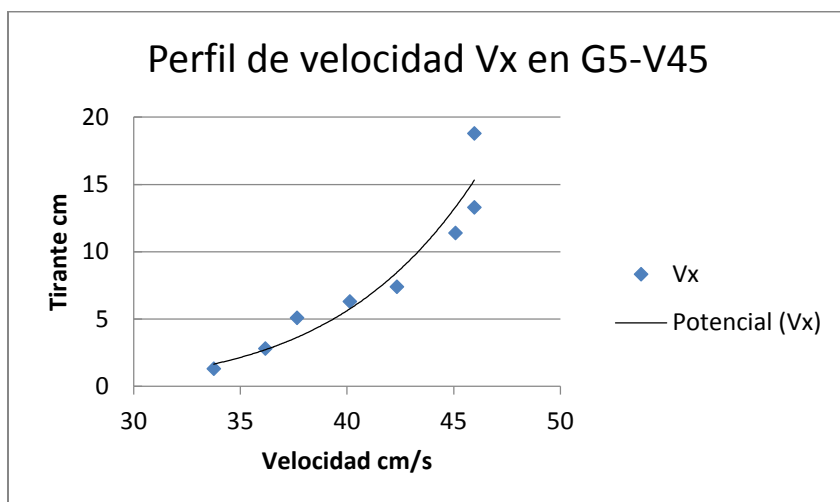


Figura 4. 29: Perfil de Velocidad en dirección del eje x, en la Vertical 45 para la condición con 5 geotubos G5.

Observando los gráficos se tiene que el canal con condición de geotubos G2 y G5 (Figuras 4.21, 4.22, 4.23, 4.27, 4.28 y 4.29 respectivamente), sus perfiles se adaptan mejor al perfil teórico: bajas velocidades en el fondo, y crecientes a medida que se acerca al pelo de agua libre, En cambio la condición G3 muestra en V36 algo totalmente opuesto (Figura 4.24), con valores mayores de velocidad cerca del fondo y en disminución a medida que se sube a pelo libre. Los perfiles de las verticales V40 y V45 (de la condición con 3 geotubos) ya se asemejan más al perfil teórico (Figuras 4.25 y 4.26).

Se compara a continuación la variación de la componente Y de la Velocidad contra el estribo (Vertical 36):

Perfil de Velocidad transversal V_y en V36
Variación 2 Geotubos

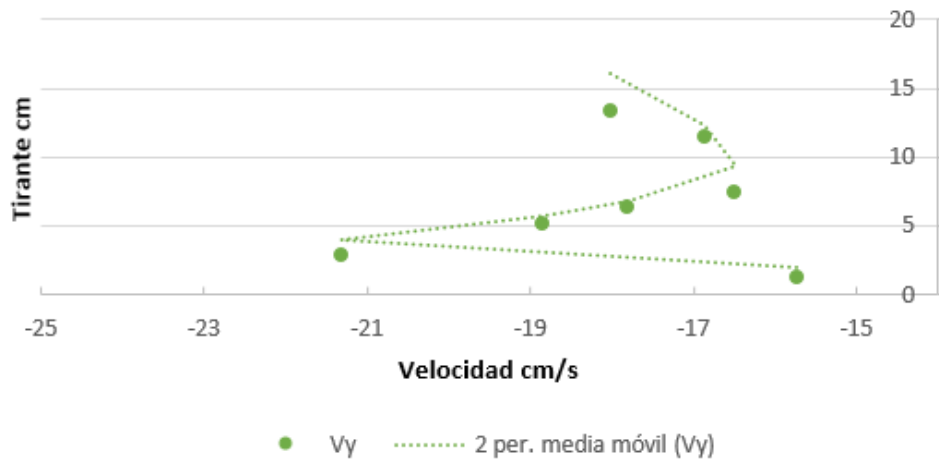


Figura 4. 30: Perfil de velocidad en dirección del eje y , en la Vertical 36 para la condición con 2 geotubos G2.

Perfil de Velocidad transversal V_y en V36
Variación 3 Geotubos

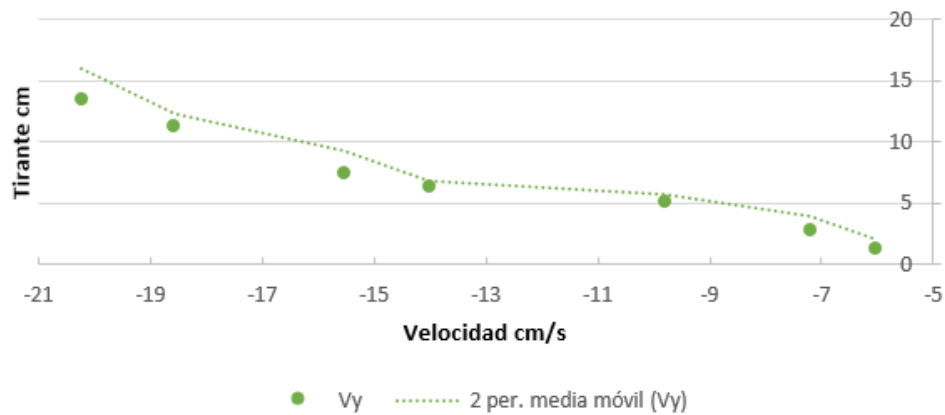


Figura 4. 31: Perfil de velocidad en dirección del eje y , en la Vertical 36 para la condición con 3 geotubos G3.

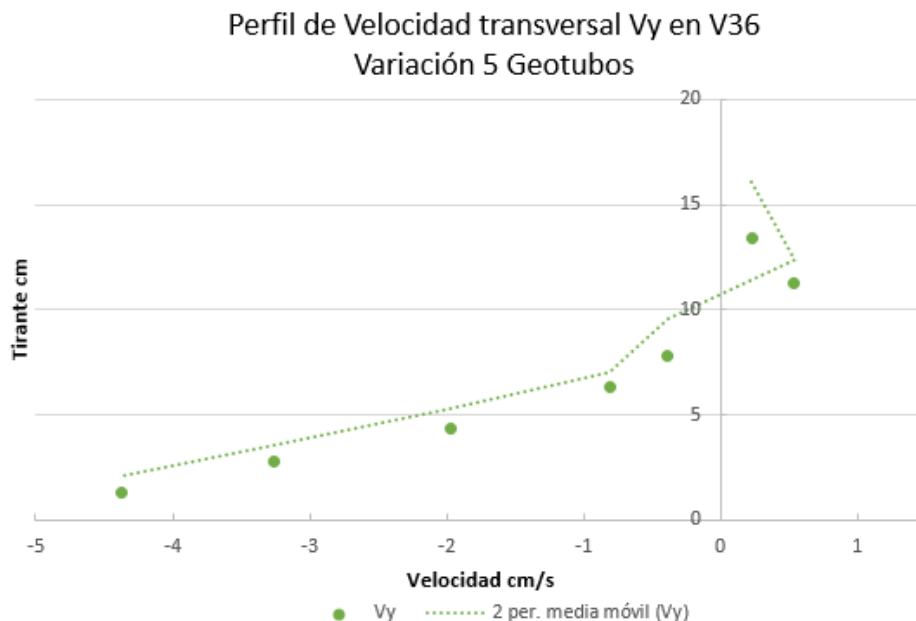


Figura 4. 32: Perfil de velocidad en dirección del eje y, en la Vertical 36 para la condición con 5 geotubos G5.

Se muestra claramente como en la condición G5, Figura 4.32, las componentes transversales del flujo junto al estribo son las menores (concordando por ser el caso con flujo más uniforme), de valores máximos muy bajos como 4 cm/s. Para la condición G2, Figura 4.30, se dan mayores velocidades, de hasta 20 cm/s y una distribución errática, con un gran pico a 5 cm de distancia del fondo, y luego un crecimiento de la velocidad desde una distancia similar a la altura de la protección de geotubos hasta el pelo de agua libre, con valores de velocidad entre 15 y 19 cm/s. Para la condición G3, Figura 4.31, se muestra un constante crecimiento de la componente transversal desde el fondo del canal hasta el pelo de agua libre, alcanzando una velocidad algo menor a 20 cm/s. Las componentes transversales son las principales causantes de procesos de erosión en las defensas por lo que al evaluar estas variaciones (G5, G3 y G2) lo primordial es encontrar aquella que me de valores en Y y Z mas bajos en la zona junto al estribo. La existencia de esas componentes son causantes de la turbulencia en determinada zona.

Continuando con el análisis, se calcularon los valores medios de las distintas componentes en las verticales más cercanas a los geotubos (V36, V40 y V45), promediando los valores de cada punto de la misma vertical, resaltándose los valores mas altos:

Figura 4. 33: Tabla con Componentes promediados de Velocidad en ejes x, y, z, para las distintas variaciones G2, G3 y G5.

Vertical	Vx promedio [cm/s]	Vy promedio [cm/s]	Vz promedio [cm/s]
G2			
36	-0,931	7,414	6,543
40	-0,363	7,371	6,500
45	-0,130	7,329	6,457
G3			
36	34,437	-13,055	-9,152
40	40,715	-11,024	-5,009

45	40,791	-9,865	-3,296
G5			
36	42,865	-1,432	-0,900
40	42,043	-1,252	-0,995
45	40,155	-1,353	0,274

Se observa en la tabla anterior que los valores medios mayores de la componente V_y se da en la condición G3, en concordancia con el mayor valor medio de la componente vertical del flujo V_z . Para la condición con 2 geotubos G2 también existen valores elevados de las componentes promediadas; y se indica que los componentes promedio de la condición G5 son muy bajos, debido a que el flujo entra de forma uniforme a la sección disminuida por el estribo al estar guiado por el conjunto de geotubos, ya que estos superan el pelo de agua.

4.7 LSPTV

Además, a partir de los videos provistos por el grupo de investigación de la FICH, se aplicó LSPTV en las tres variaciones vistas de geotubos (G5, G3 y G2) en la zona del estribo para determinar las trayectorias que toma el flujo. Se usó como partícula trazadora a bolitas de poliestireno expandido de diámetro 10mm, y la cámara empleada fue una Nikon Coolpix P100, con resolución de 640x480.

Con el LSPTV se puede conocer el campo de velocidad superficial, cosa que el ADV no puede medir debido a que debe estar sumergido, por lo que al medir “se pierde” el campo superficial de velocidades.

La extracción de imágenes se realizó en escala de grises a través del software RIVeR v2.2 (Patalano et al, 2017), con una frecuencia de 30 imágenes por segundo (30 fps). Se procedió al procesamiento de las mismas con la herramienta PTVlab v1.1 (Patalano et al 2013). La cámara se montó sobre un soporte especial fijado a una pasarela colgante a 3 metros de altura del nivel del canal, como se muestra en la Figura 4.34. De esta forma, la misma quedaba perfectamente perpendicular al flujo, sin embargo obliga a hacer zoom en la zona a medir, lo que nos quita resolución del video, y por ende de la imagen.



Figura 4. 34: Soporte para cámara sobre pasarela colgante.

Procesados los videos, se rectificaron a través del programa RIVeR v2.2 (Patalano et al, 2016) las trayectorias obtenidas. En la Figura 4.35 se muestran las trayectorias rectificadas con sus magnitudes de velocidad para la condición con 2 geotubos G2, en la Figura 4.36 la condición con 3 geotubos G3, y en la Figura 4.37 para 5 geotubos G5.

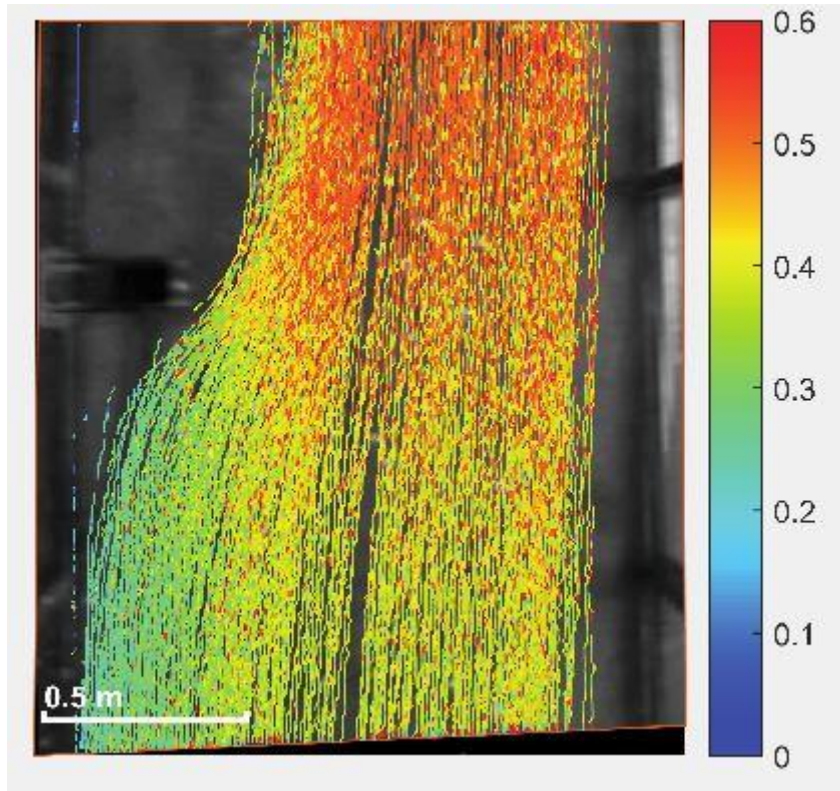


Figura 4. 35: Trayectorias de partículas rectificadas de condición con 2 geotubos G2. Escala de velocidad en m/s.

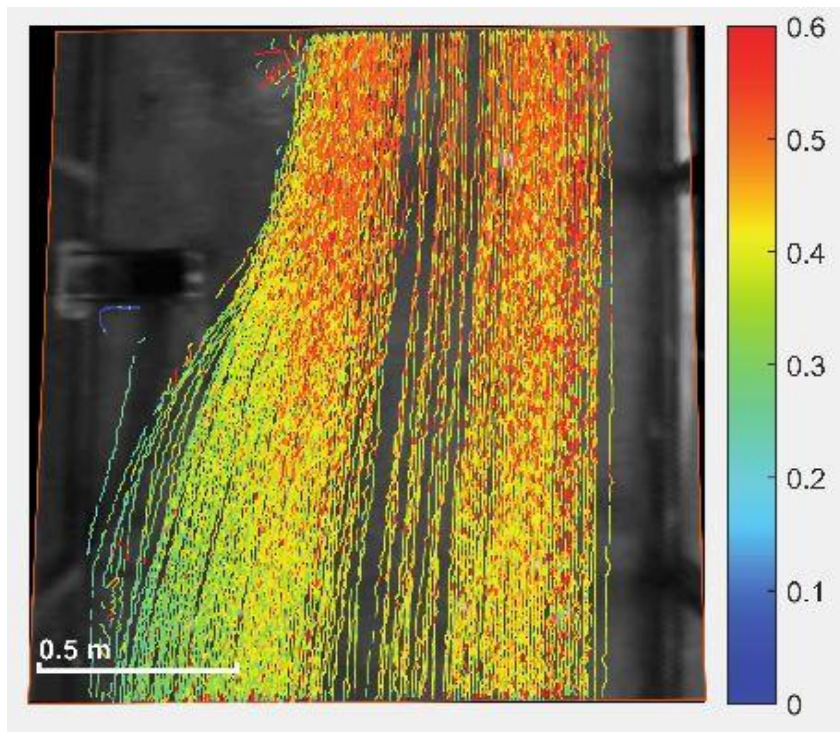


Figura 4. 36: Trayectorias de partículas rectificadas de condición con 3 geotubos G3. Escala de velocidad en m/s.

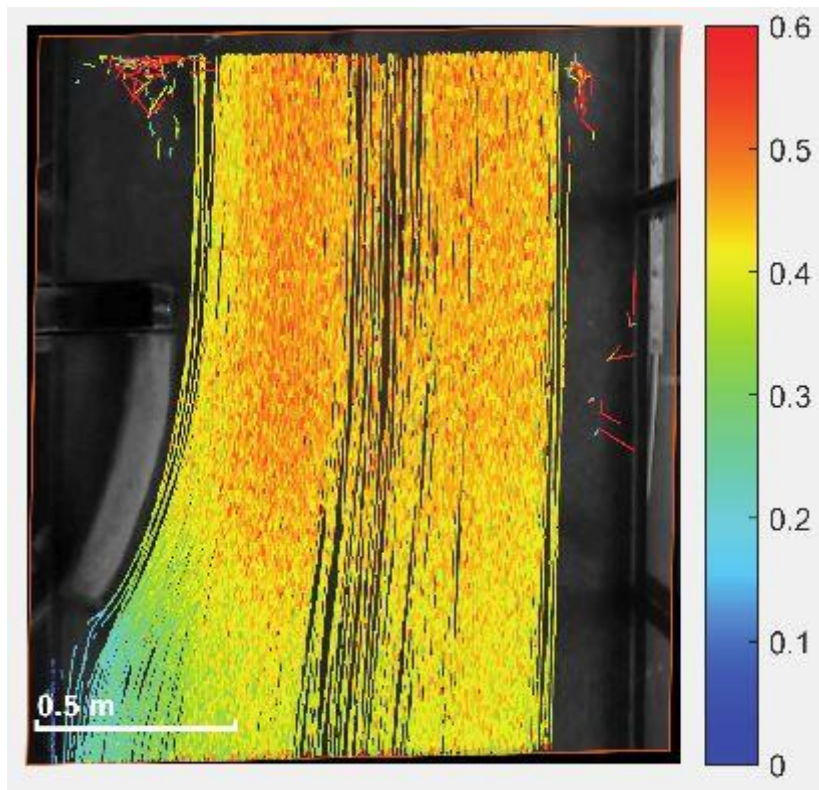


Figura 4. 37: Trayectorias de partículas rectificadas de condición con 5 geotubos G5. Escala de velocidad en m/s.

En común, las 3 Figuras anteriores muestran que en cercanías y una vez superada la sección del estribo, las velocidades aumentan hasta alcanzar los 0,6 m/s, y aguas arriba del estribo se tienen velocidades que rondan los 0,4 m/s. En la Figura 4.35 y 4.36 se observan pequeñas zonas de recirculación aguas arriba del estribo, y se aprecia como las partículas que avanzan por el margen izquierdo del canal (visto desde aguas arriba hacia aguas abajo) adquieren una trayectoria más cercana a la zona central del canal inmediatamente superada la sección del estribo, en comparación con la condición con 5 geotubos G5, Figura 4.37, donde se identifica una distribución uniforme de las trayectorias de las partículas.

Se muestra también lo dicho anteriormente: que con las condiciones con 2 y 3 geotubos, G2 y G3, el agua escurre por encima de los geotubos debido a que la altura total de estos no supera el pelo de agua. Es más, algunas partículas detectadas por el programa realizan el cambio de trayectoria para pasar por la sección estrechada por el estribo sobre el geotubo o inclusive apenas superado este (en la zona residual entre geotubos, borde aguas arriba de estribo y margen izquierdo de canal).

Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones de cada caso

5.1.1 Caracterización de flujo alrededor de una pila

Los resultados obtenidos con técnicas de velocimetría por imágenes muestran características similares a los registrados por métodos acústicos. Se pudo observar la zona de velocidades nulas y negativas aguas abajo del obstáculo en la región cercana al eje longitudinal del canal y el crecimiento de estas hacia las márgenes.

Se muestra en los resultados por LSPIV un marcado descenso de las velocidades del agua a medida que nos acercamos a las paredes del canal (y/D igual a ± 2), a diferencia de las mediciones por ADV, donde no es tan fuerte el descenso. Esto se debe a que la relación ancho de canal respecto a diámetro de pila es cercana a 4 en el presente caso, mientras que las mediciones con ADV por Herrero son en un canal con una relación cercana a 8, lo que indica que las paredes del canal están mucho más cerca de la pila en el caso analizado y pueden ser causa de estas caídas de velocidades.

También se destaca que el número de Strouhal (St) calculado arroja un valor de 0,34 cuando teóricamente debería dar un valor entre 0,2 y 0,3 por considerarse un flujo en 2D. Esta no concordancia se cree es causada también por la cercanía de las paredes del canal con la pila. Para determinar el verdadero causante se propone comparar en proyectos futuros el valor del Número de Strouhal obtenido con el valor arrojado utilizando tirantes menores y de esa forma ver si la dimensión del tirante es condicionante; y con el valor arrojado empleando diámetros de pilas menores para evitar condiciones de borde por las paredes del canal

5.1.2 Variaciones de flujo en canal por paso de barcazas

Del análisis de los distintos videos se desprenden las magnitudes de velocidad que alcanza el agua según el caso y aporta la información pretendida para afrontar el problema de los peces planteado anteriormente. En condiciones normales el canal escurre entre 0,3 m/s y 0,4 m/s; con las barcazas circulando en sentido a favor de la corriente el agua alcanza velocidades de hasta 1,2 m/s positivas, es decir en favor de la corriente; y si las barcazas circulan en sentido contra la corriente, el agua alcanza velocidades negativas de hasta 0,7 m/s, o sea que empieza a escurrir hacia aguas arriba del canal durante el paso de las barcazas. Se destaca que finalizado el paso de las barcazas circulando contra la corriente, el canal no adquiere su sentido normal de escurrimiento al instante, sino que le toma varios segundos estabilizarse (se “estanca” porque adquiere velocidades alrededor de 0 m/s) para luego retomar sus condiciones normales.

Respecto a la técnica LSPIV se comprueba la sensibilidad de la técnica ante la disminución o falta de trazadores en el agua y la uniformidad según la posición analizada si se busca velocidades en determinados instantes del tiempo. Sin embargo, si se trabajase con la velocidad promediada vemos que los picos mostrados en los gráficos no influyen en gran medida ya que se anulan sus

efectos unos con otros, lo que permite obtener un valor de velocidad aceptable aún si el estado de los trazadores en un video no son las mejores.

Por último, se rescata la importancia de esta técnica como la mejor alternativa para medir en este caso: se dificulta el uso de un ADCP debido a que generalmente estos son desplazados a lo largo de la sección utilizando una cuerda guía (la cual sería arrastrada por las barcas), y se dificulta el uso de un ADV debido a la profundidad del canal y a que para usarlo uno debería estar embarcado (y, tal vez, correr peligro por el paso de las barcas) o debería instalar alguna pasarela que encarecería la medición.

5.1.3 Caracterización de flujo alrededor de estribo de puente en presencia de gaviones de geotextiles

Del conjunto de ensayos con las tres configuraciones de geotubos se desprende la condición G5 es la que mejor funciona contra los procesos erosivos debido a que las componentes transversales de velocidad son las menores de los tres casos y la representación de la sección con los TKE de cada punto medido arroja los menores valores y menores picos. Sin embargo al ir el conjunto de geotubos hasta por encima del pelo libre, es la opción más costosa. La opción con 2 geotubos G2 presenta componentes transversales de velocidad en el margen junto al estribo, en promedio, de 15 cm/s aproximadamente, y con picos de hasta 21 cm/s, pero en forma errática, y logra en cierta forma direccionar el flujo a la sección disminuida sin generar mucha turbulencia. El gráfico del TKE respalda esto al tener valores bajos y un único pico importante de $95 \text{ cm}^2/\text{s}^2$. Además al emplear solo 2 geotubos es la opción más económica de las vistas. La que dio peor resultados fue la condición con 3 geotubos G3, ésta mostró los mayores valores promedios de componentes transversales de la velocidad en la vertical más cercana al estribo y en las sucesivas a ésta, y la gráfica del TKE muestra toda una franja junto al estribo con valores alrededor de $45 \text{ cm}^2/\text{s}^2$.

Con el LSPTV se observa el estancamiento aguas abajo del estribo, las trayectorias que describe el flujo en la zona de constricción, y cómo la condición con 5 geotubos G5 va guiando al flujo en su totalidad, a diferencia de los otros 2 casos donde algunas trayectorias aparecen por encima de los geotubos (el agua termina de “doblar” encima de los geotubos). Como se marcó previamente, el LSPTV nos permite obtener el campo de velocidad superficial que el ADV no nos lo puede dar, por lo que ambas técnicas de medición se complementan y permiten alcanzar mediciones más acabadas y con información en casi cualquier punto del flujo.

5.2 Conclusión sobre la PS

Como conclusión final sobre el trabajo rescato la experiencia obtenida durante estos 2 años que fui ayudante de investigación en el CETA, donde siempre tuvieron la mejor predisposición ante el planteo de dudas, me permitieron conocer el ámbito del área de la investigación y sobre todo compartir con el gran grupo humano que tiene. También agradezco la oportunidad de haber podido trabajar con el grupo de investigación de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) en Santa Fe, donde me

enseñaron mayor parte de lo que se sobre técnicas hidro-acústicas y estuvieron a disposición en todo momento durante la medición y al analizar la información obtenida. Sin dudas fue una experiencia enriquecedora y me mostró la forma de trabajar de otros grupos de investigación. Para finalizar, la realización del trabajo fue una tarea amena y laboriosa, y estoy satisfecho con el resultado alcanzado y con mi participación en el CETA en este tiempo.

Capítulo 6: Referencias bibliográficas

[1] García C. M., Scacchi G., Herrero H. S., Diaz Lozada J. M., Pedocchi F y Yarko N.; Guía práctica para realizar mediciones de velocidad en flujos turbulentos con ADV; 2016.

[2] Guillén N. F.; Caracterización de flujos turbulentos; 2013.

[3] Herrero H. S.; Evolución espacial y temporal de la hidrodinámica en confluencias fluviales; 2014.

[4] Patalano, Antoine y García, Marcelo; Towards affordable, practical and user-friendly toolbox for Large Scale PIV and PTV techniques; 2016.[2] Lucero, Jose María; Cuantificación de errores en la implementación de LSPIV para la determinación de caudales en cursos fluviales; 2015.

[5] Patalano A., Lobo A. P., García C. M., Moreno L. y Girardi G.; Implementación de Técnicas experimentales de Velocimetría por imágenes de partículas (PTV y PIV) a gran escala para cuantificar el recurso hídrico superficial en cursos fluviales de la provincia de Catamarca; 2016.

[6] Patalano A., García C. M., Scacchi G.; Implementación de la técnica de PTV a gran escala (LSPTV) para caracterizar flujos a superficie libre en modelos físicos; 2016.

[7] Lucero J. M.; Cuantificación de errores en la implementación de LSPIV para la determinación de caudales en cursos fluviales; 2015.

[8] <http://pivlab.blogspot.com>

Anexo 1: Tutorial de uso de software PIVLab y RIVeR

A continuación se anexa el tutorial, que abarca desde la instalación del programa hasta el exportar resultados a formato compatible con Excell. El tutorial sigue las siguientes etapas, y en cada etapa se detallan los pasos a seguir:

- 1-Instalación de software.
- 2-Extracción de las imágenes.
- 3-Procesamiento de las Imágenes (PIVlab).
 - 3.1- Cargar imágenes
 - 3.2- Configuración de análisis.
 - 3.3- Análisis.
 - 3.4- Cálculo del campo promedio.
- 4-Rectificación de los resultados (RIVeR).
 - 4.1- Rectificación de los resultados.
 - 4.2- Visualización de los resultados.
 - 4.3- Estimación del caudal en una sección.
 - 4.4- Exportación de los resultados.

A.1 Instalación de software

- a) Para descargar el programa RIVeR vaya a la dirección <http://riverdischarge.blogspot.com.ar>; haga click en la pestaña “Download” y luego descargue e instale los dos archivos disponibles (Figura A.1):
- Matlab Runtime version #R2015a (64-bit)
 - RIVeR v2.0

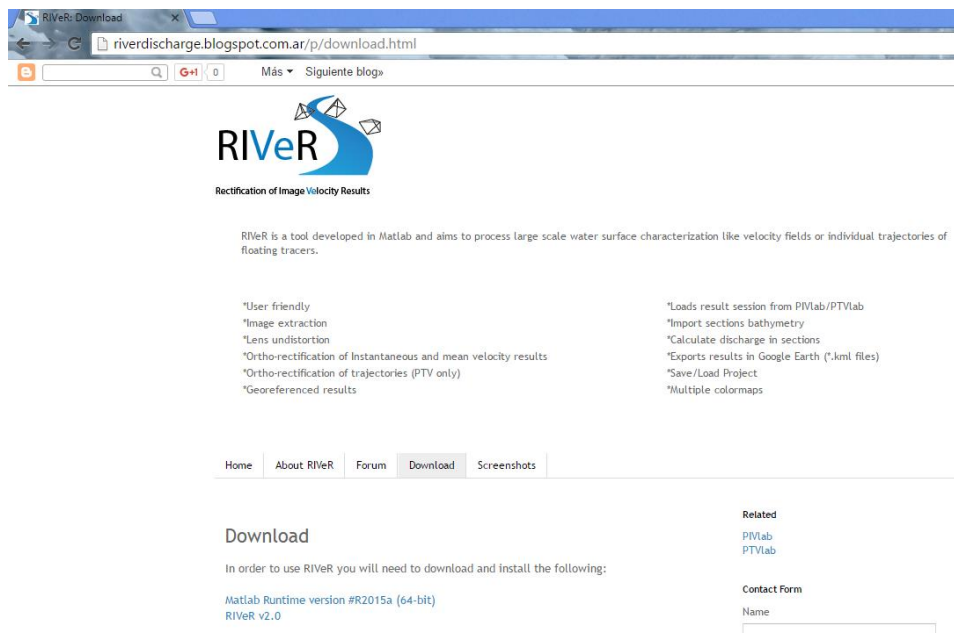


Figura A. 1: Imagen de interfaz del sitio de descarga de RIVeR.

b) Para descargar el software PIVlab vaya a la dirección <http://pivlab.blogspot.com.ar/>; y descargue la versión 1.41 (Figura A.2).

The image shows the PIVlab website interface. At the top, it reads "PIVlab - Time-Resolved Digital Particle Image Velocimetry Tool for MATLAB" developed by Dr. William Thielicke and Prof. Dr. Elize J. Stamhuis. It mentions it was programmed with MATLAB Version 7.10 (R2010a), first released March 09, 2010, and published under the BSD license. A navigation bar includes links for Blog, Forum, PIVlab tutorial, How to cite PIVlab, Screenshots, PIVlab documentation, Examples, and PIVlab users. Below this, a "Main Features" section lists various capabilities like user-friendly GUI, multi-pass processing, and data smoothing. The main content area features a blog post from Saturday, February 13, 2016, titled "PIVlab 1.41 - now 10x faster processing!". The post describes a performance improvement by Sergey, a Junior Researcher at the ISSP RAS, who rewrote the PIV_FFTmulti.m file to avoid 'for loops', resulting in a 10x speedup. A download link is provided: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/27659-pivlab-time-resolved-particle-image-velocimetry-piv-tool>. To the right of the post is a "download (version 1.41): PIVlab @ Matlab FEX" section with an "Information:" box containing links for getting started, help, citation, and documentation. Below the post is another entry from Wednesday, March 18, 2015, titled "PIVlab 1.4", which provides a download link for the 1.4 release. A "Screenshots" section at the bottom right shows a small image of the PIVlab software interface.

Figura A. 2: Imagen de interfaz del sitio de descarga de PIVlab.

c) Una vez instalado Matlab y descargado PIVLab se procederá a instalar este último como una aplicación de Matlab.

Para ello primero abrir el software Matlab (Figura A.3). Luego ir a la pestaña “Aps” (Aplicaciones) y hacer click en “Install App”.

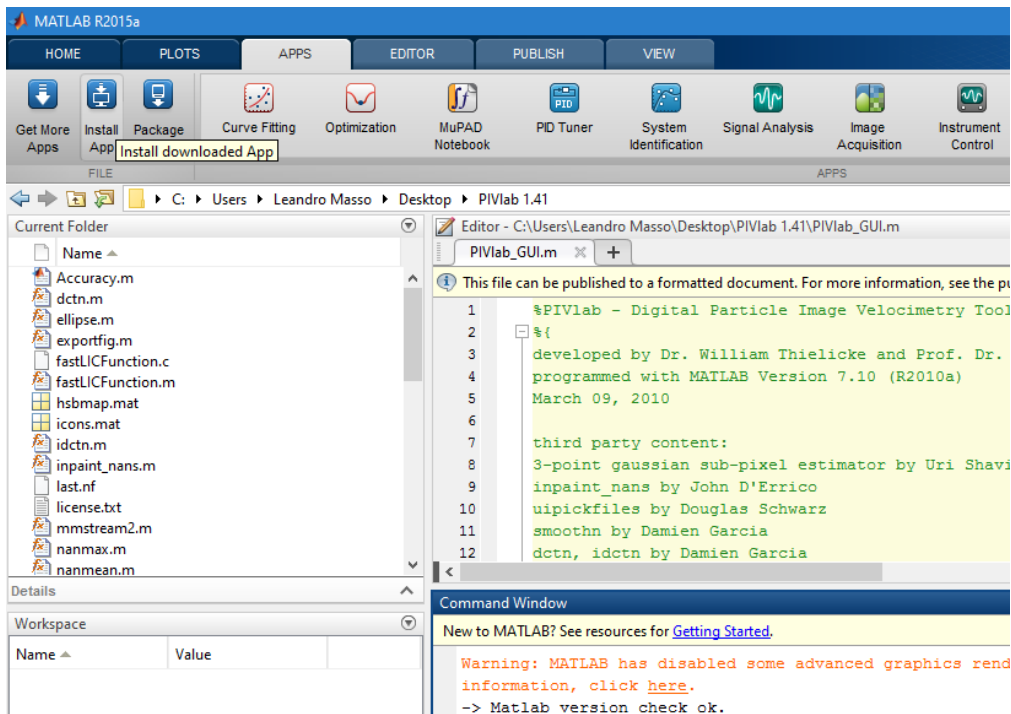


Figura A. 3: Interfaz del programa Matlab, en la pestaña “Apps”.

Allí debe buscar la ubicación de la carpeta descargada de PIVlab (PIVlab 1.41) y seleccionar el archivo “PIVlab.mlappinstall”. Luego hacer click en “Abrir” (Figura A.4).

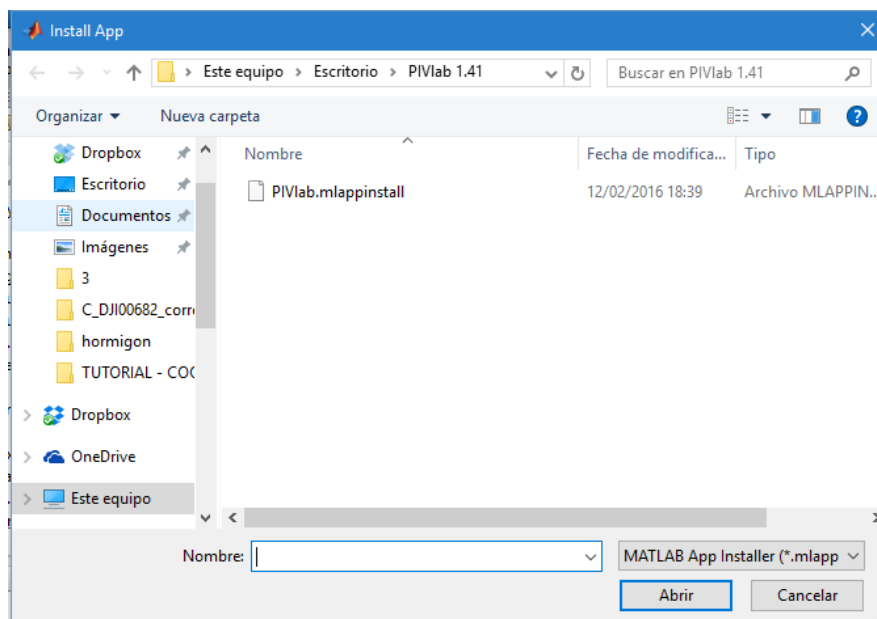


Figura A. 4: Ventana surgida de clicar en “Install Apps”.

Luego de esto quedará instalado PIVlab como una aplicación. Para poder abrir el software se debe buscar dentro de la pestaña “Apps” y hacer click sobre el ícono del programa (Figura A.5).

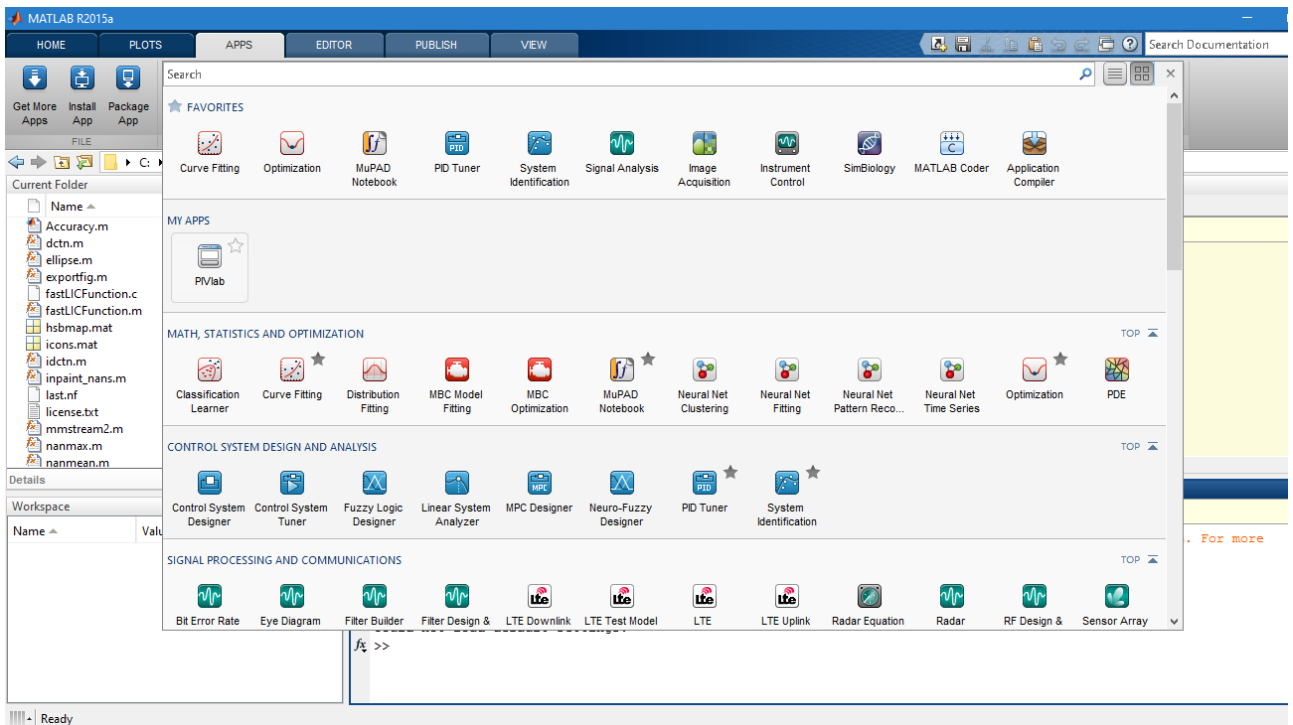


Figura A. 5: Opciones de Apps instaladas, mostradas al clicar en la pestaña “Apps”, dentro del programa Matlab.

A.2 Extracción de imágenes

- Descargar el video desde la cámara al ordenador.
- Guardar el video de forma tal que el directorio no contenga espacios.
- Abrir el software RIVER y luego ir a Archivo --> Extraer imágenes del video (Figuras A.6 y A.7).

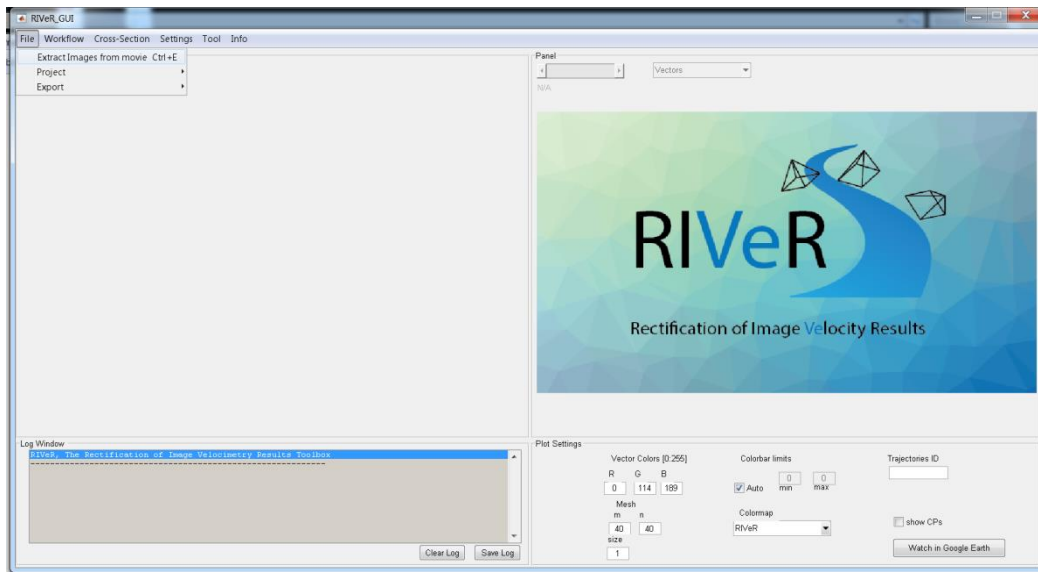


Figura A. 6: Interfaz del software RIVeR.

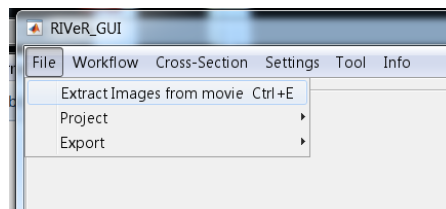


Figura A. 7: Opción a clicar para extraer imágenes de video.

- d) Abrir el video.
- e) Elegir el número de fotogramas por segundo y la hora de inicio y final del video que se quiera analizar (Figura A.8). A su vez, elegir la resolución de las imágenes (se recomienda utilizar la mayor resolución posible) y haga click en la opción “Grayscale” (escala de grises) para extraer todas las imágenes en este formato.

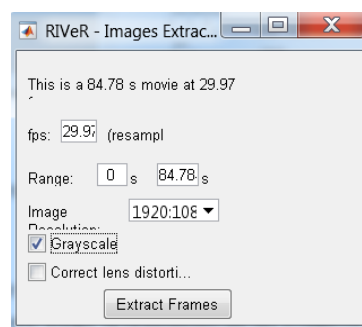


Figura A. 8: Cuadro donde seleccionar los FPS y el rango de tiempo donde queremos tomar las imágenes.

- f) Al hacer click en “ExtractFrames” (extraer imágenes) se extraerán las imágenes al directorio de entrada (Figura A.8).

A.3 Procesamiento de las imágenes

A.3.1 Cargar imágenes

- a) Abrir el software PIVlab y cargar las imágenes haciendo click en “Load Images” (Figura A.9)

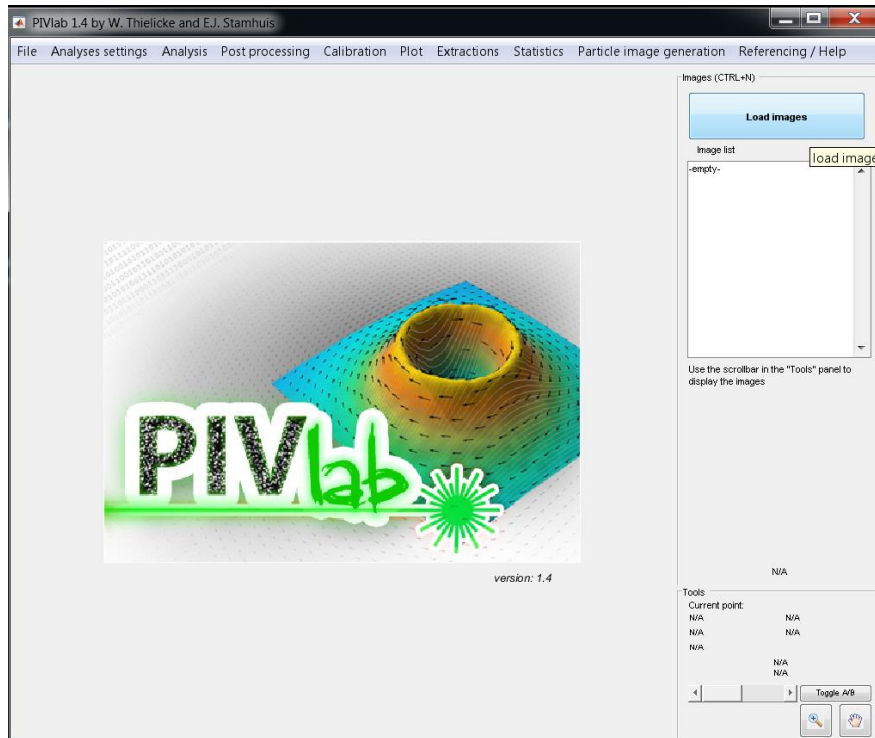


Figura A. 9: Interfaz del software PIVlab. En la esquina derecha superior se encuentra la opción para cargar imágenes (Load Images).

- b) Al hacer click en “...” busque el directorio donde están guardadas las imágenes a analizar. Seleccione todas las imágenes que desea procesar y haga click en “Add” (añadir) y luego en “Import” (importar) (Figura A.10).

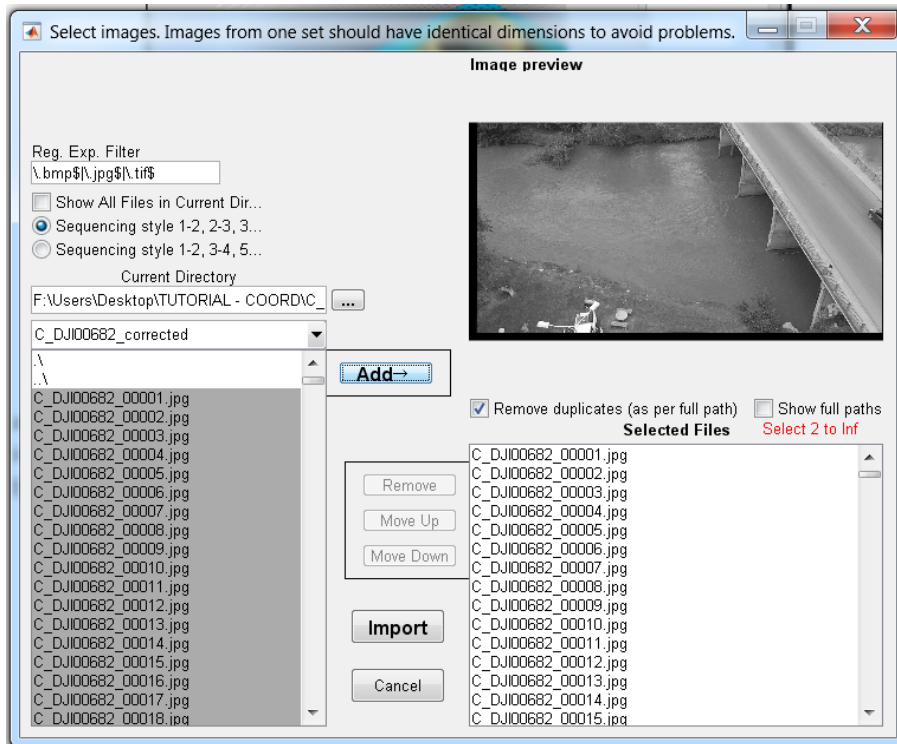


Figura A. 10: Cuadro desde donde se importan las imágenes para analizar.

c) Luego de importar las imágenes deberá verlas a todas en PIVLab (Figura A.11).

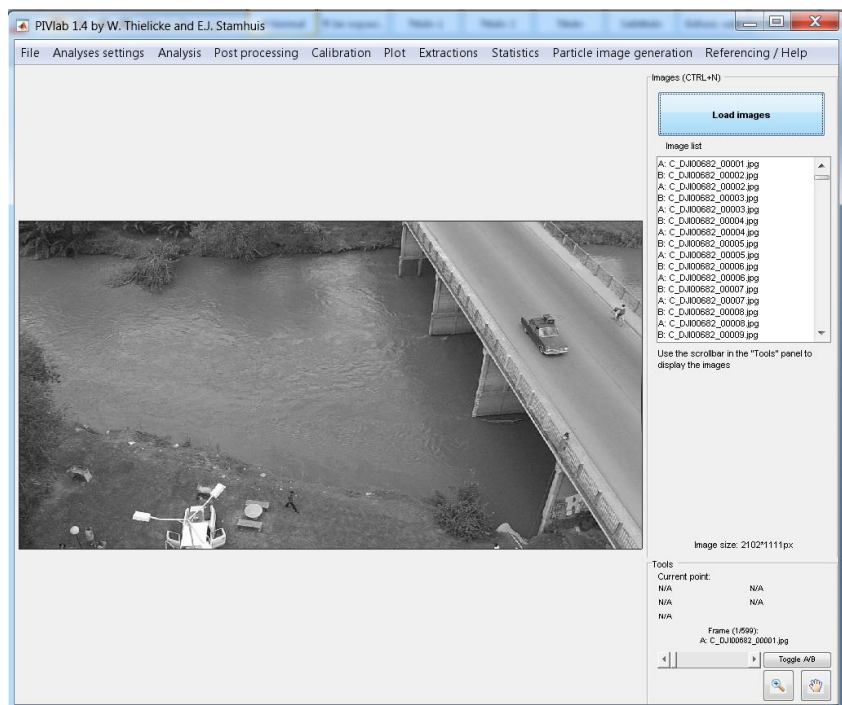


Figura A. 11: Interfaz del PIVLab, con las imágenes ya importadas.

A.3.2 Configuración de análisis (Analyses Settings)

a) Ir a la pestaña “Analyses Settings” (Análisis) y luego a la opción “Exclusions (ROI, Mask)” (Exclusiones) (Figura A.12).

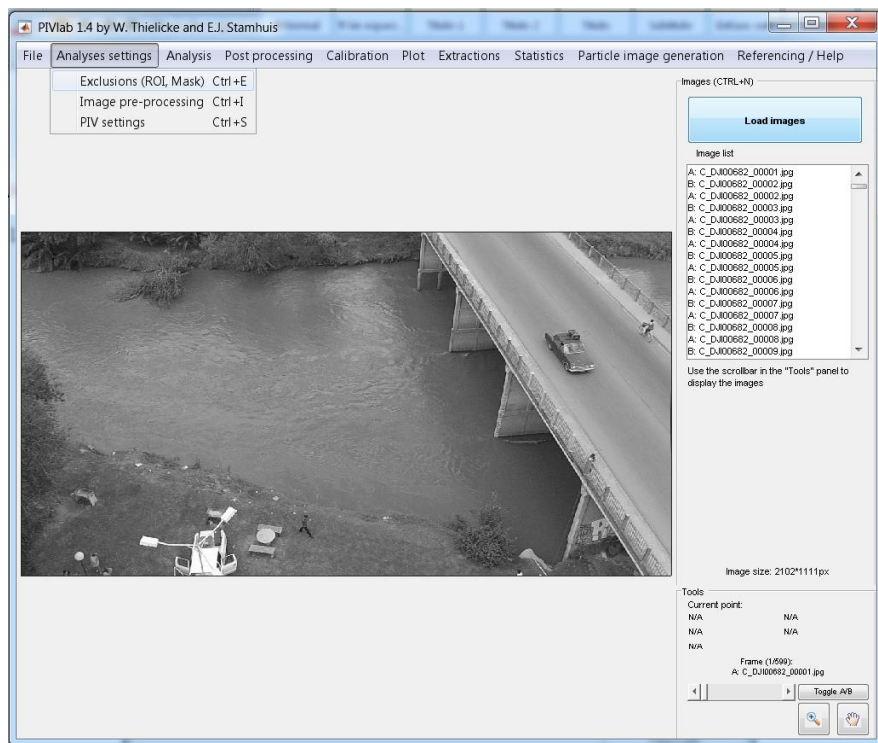


Figura A. 12: Interfaz de PIVlab con la opción “Analyses settings” clickeada.

b) Seleccione “Select ROI” y haga click sobre la imagen y, manteniendo el mismo, deslícese de forma tal que la región de interés (a analizar) quede dentro del rectángulo (Figura A.13). Esta región de interés se aplicara a todas las imágenes en igual forma.

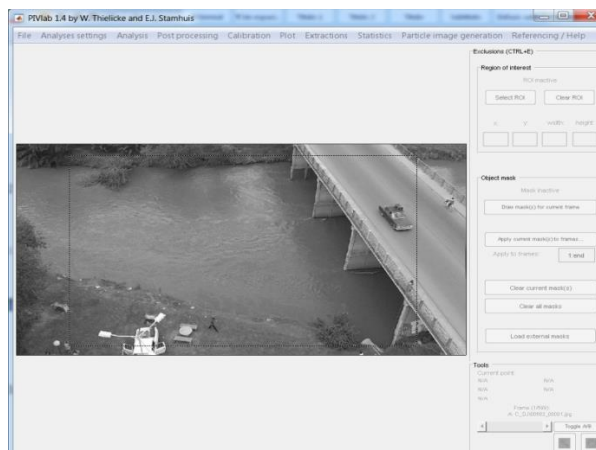


Figura A. 13: ROI (Region of Interest) dibujada en PIVlab.

c) Al hacer click en “Draw mask(s) for current frame” (Dibujar mascara/s) se puede especificar una o varias mascararas personalizadas dibujando un polígono sobre la imagen que encierre las zonas sobre las que no se desean realizar cálculos (Figura A.14). Luego se

pueden aplicar estas mismas máscaras a las demás imágenes haciendo click en “Apply current mask(s) to all frames” (Figura A.15).

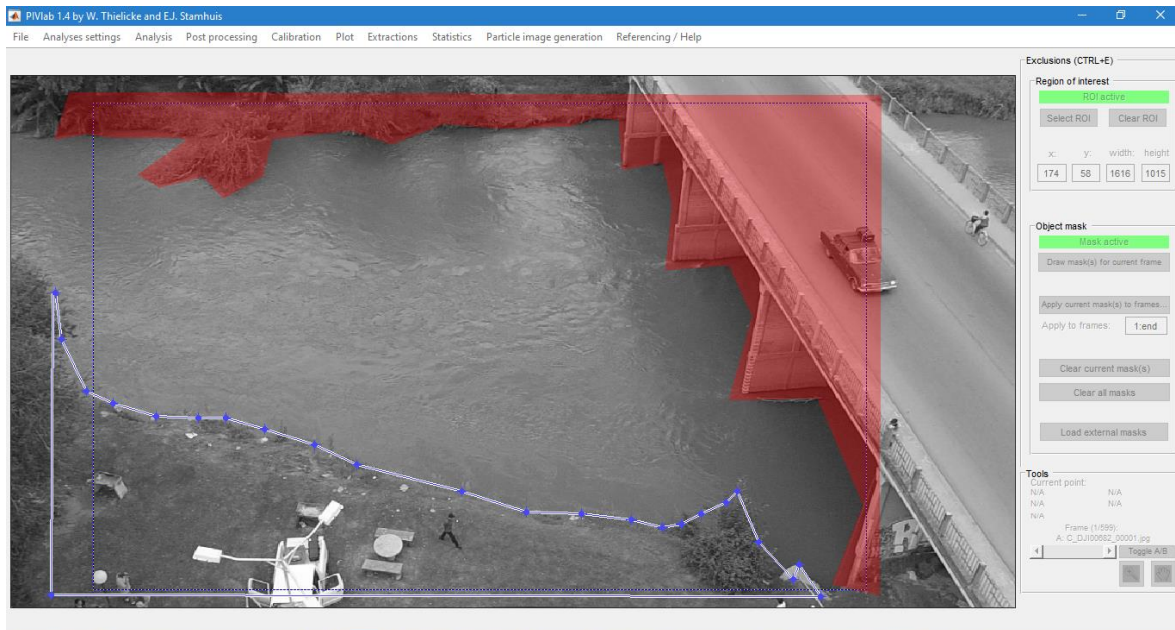


Figura A. 14: Máscaras dibujadas sobre imagen. Una vez dibujada se debe clicar dos veces dentro de ella para terminar y que se muestre en color rojo, como la máscara superior de la imagen.



Figura A. 15: Máscaras terminadas.

d) Ir a “Analyses Settings”--> “Image pre-processing”.

e) En esta ventana se pueden aplicar y ajustar filtros (Figura A.16). El filtro sirve para mejorar el contraste de la imagen, de esta forma se optimiza el histograma de la imagen y los patrones de flujo observados en la superficie del agua.

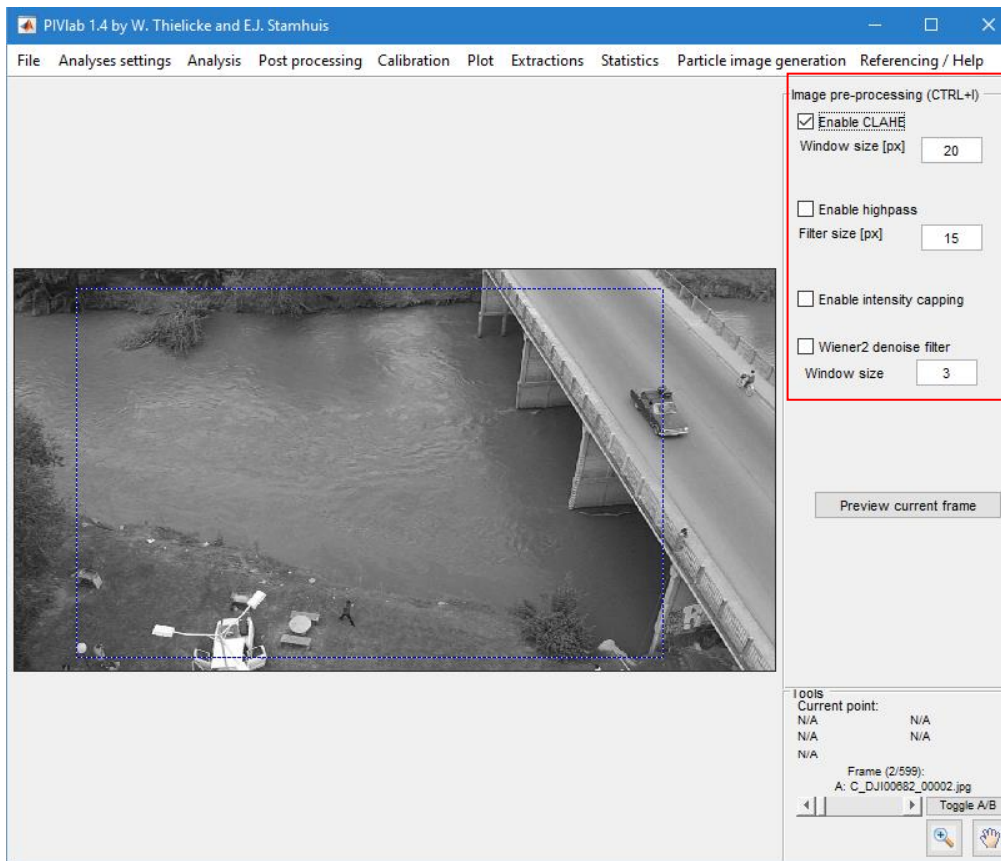


Figura A. 15: Panel desplegado al clicar “Image pre-processing”.

f) Haga clic en “Preview Current Frame” para aplicar el filtrado a la imagen. En la Figura A.15 se puede ver una imagen sin ningún tipo de filtro y, a continuación, la misma imagen después de la aplicación de filtros (Figura A.16):

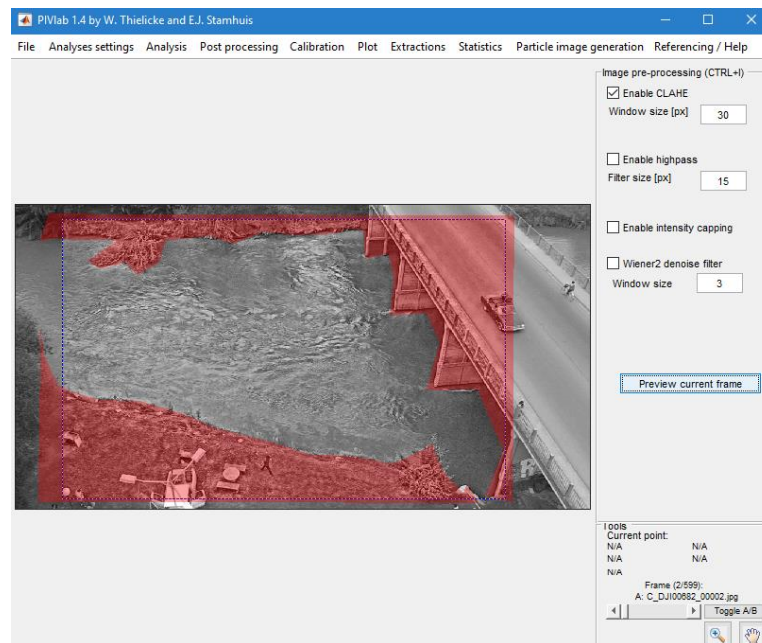


Figura A. 16: Imagen con filtro aplicado.

g) Ir a “PIV Settings”. En esta ventana (Figura A.17) se elige el tamaño de la zona de interrogación en ambas dimensiones. Serán las dimensiones de la “ventana” en donde el software realizará los cálculos evaluando y comparando los patrones dados por la rugosidad superficial. Dentro de esta área el software seguirá las pautas para calcular las velocidades de flujo superficial. Mejores resultados de análisis, a menudo, se presentan con múltiples pasadas, pero implican tiempos de procesamiento más largos. Se recomienda realizar 2 pasadas, en donde la segunda de ellas, presente dimensiones de la zona de interrogación iguales a la mitad de la primera.

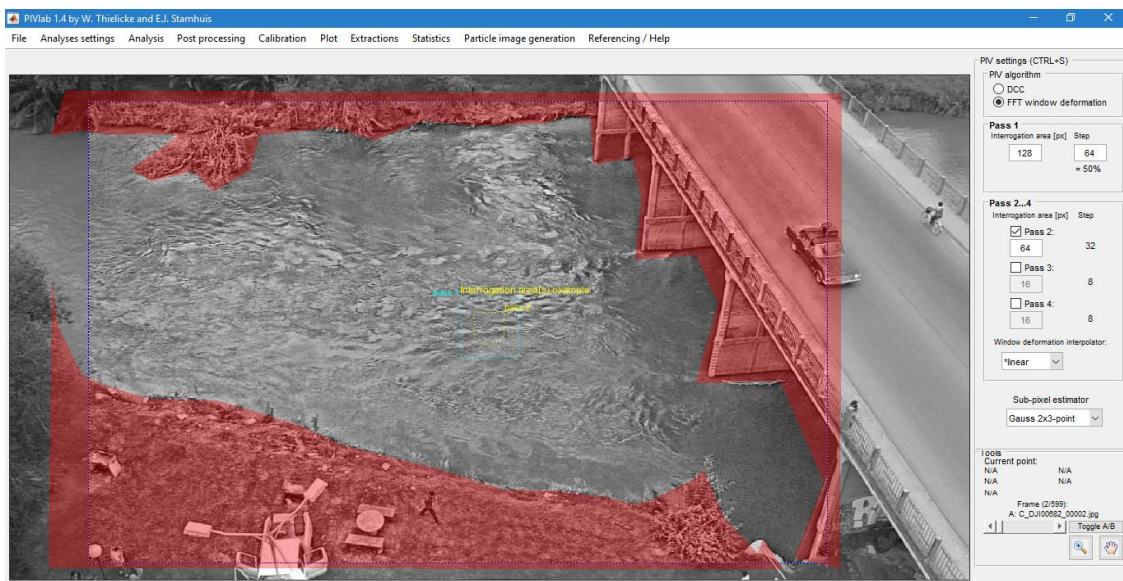


Figura A. 17: Panel desplegado en el margen derecho al clickear la opción “PIV Settings”.

A.3.2 Análisis (Analyses)

a) Ir a “Analysis” --> “Analyse!” (Figura A.18).

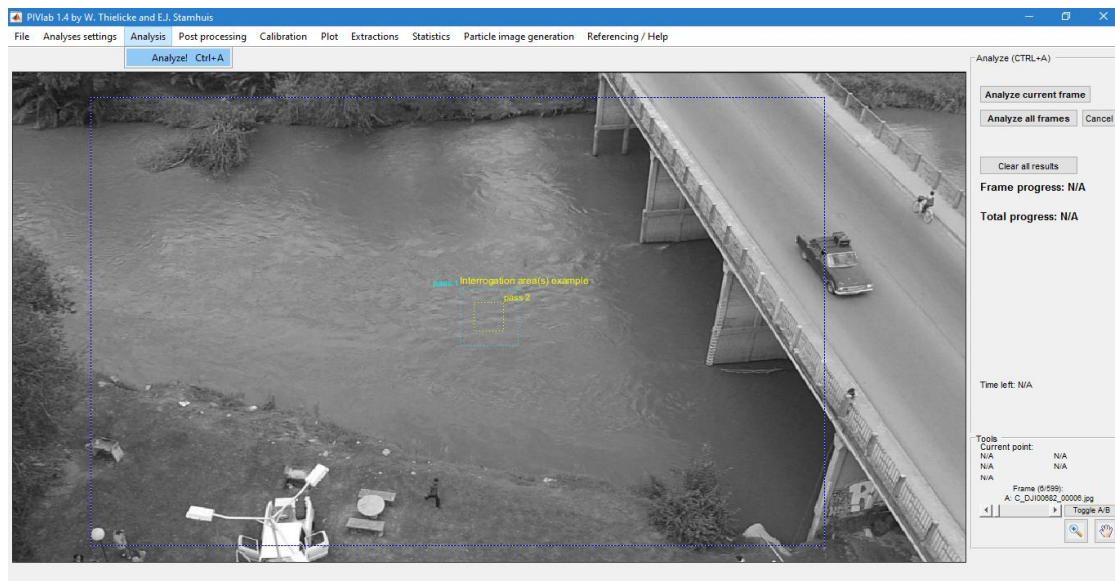


Figura A. 18: Opción “Analyse!” Desplegada desde la barra superior, una vez configurados todos los requerimientos anteriores.

b) Ahora puede verificar si los parámetros que definió antes (en “Image Pre-processing” y “PIV Settings”) detectan correctamente los patrones superficiales.

c) Si se elige la opción “Analyze current frame” (Analizar cuadro actual), el software calcula el campo vectorial de superficie entre esta imagen de fondo y la siguiente (un par de imágenes) (Figura A.19).



Figura A. 19: Panel desplegado al clicar “Analyse!”, donde se encuentra la opción “Analyze current frame”.

d) Si los patrones de vectores no están bien detectados, puede cambiar los parámetros anteriores. Esto puede ser un proceso iterativo.

e) Una vez que crea que el campo vectorial está bien definido, se puede elegir la opción “Analyze all frames” para comenzar a procesar todas las imágenes cargadas actualmente en PIVlab.

A.3.2 Cálculo del campo promedio

a) Vaya a “Plot” y haga clic en “Derive Parameters/modify data”. En el panel derecho, seleccione “Calculate mean vectors” (Calcular los vectores medios) En la Figura A.20 se observa la situación al finalizar el procesamiento de las imágenes; luego de calcular el campo promedio, el mismo se mostrará en la pantalla tal como se observa en la Figura A.21.



Figura A. 20: Imagen del campo de velocidad finalizado el procesamiento.



Figura A. 21: Imagen del campo de velocidad luego de calcular el campo promedio de velocidades.

b) Guardar la sesión. Vaya a “File”--> “Save”--> “PIVLabSession” y seleccione a dirección en donde desea guardar la sesión.

A.4 Rectificación de los resultados por RIVeR

A.4.1 Rectificación de los resultados

a) Abra el programa RIVeR y haga click en “Workflow”--> “Load PIV/PTV analysis”--> “Load PIVlab/PTVlab session” (Figura A.22). Hecho esto, busque el archivo “PIV labsession” y carguelo.

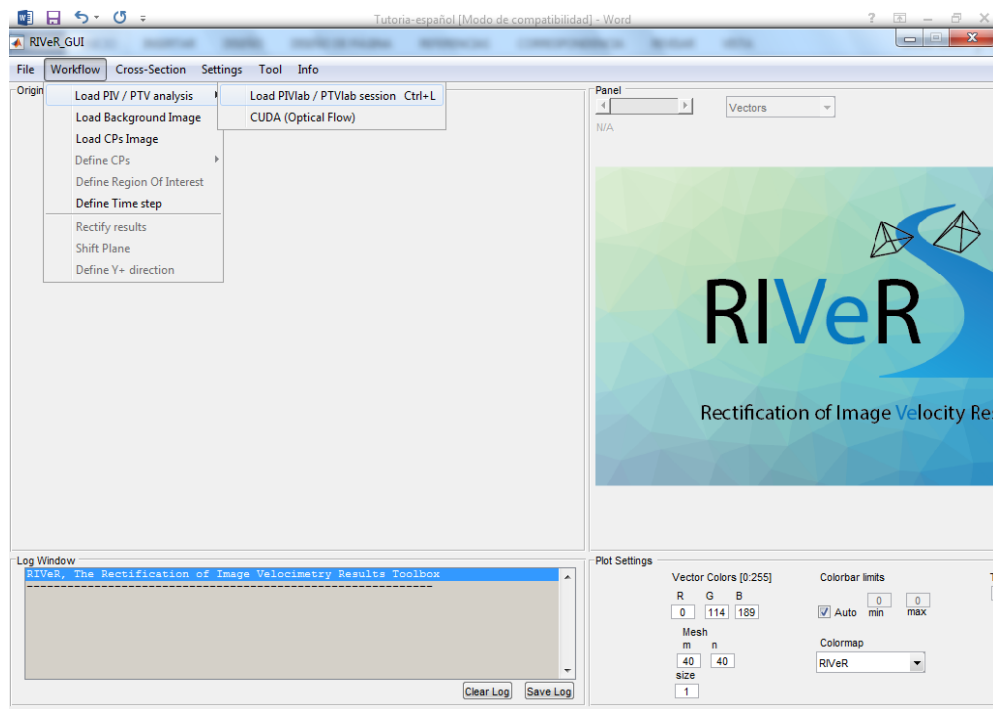


Figura A. 22: Barra desplegada al clicar en la opción “Workflow”, en el programa RIVeR.

b) Haga click en “Workflow”--> “Load Backgroundimage” (Figura A.23), y en la ventana que surge clickee en “select”. A continuación busque una imagen de fondo del video (puede ser cualquier imagen) (Figura A.24).

c) Clickee en “Workflow”--> “Load CPsImage” y seleccione una nueva imagen de fondo sobre la cual se seleccionarán los puntos de control.

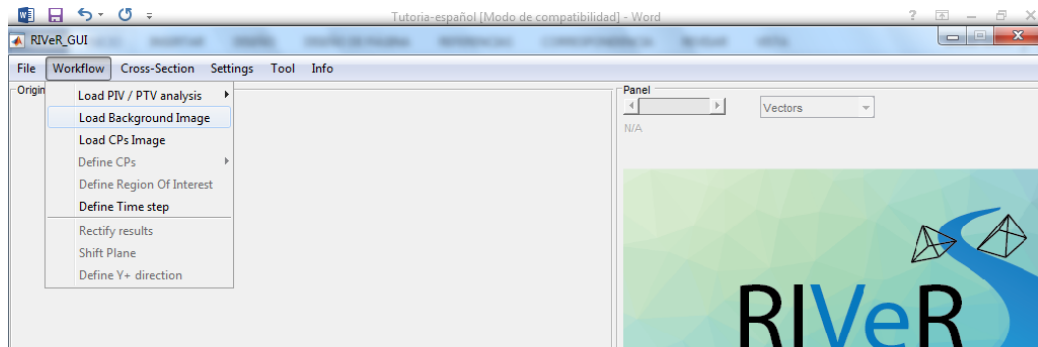


Figura A. 23: Opción “Load background image” clickeada.

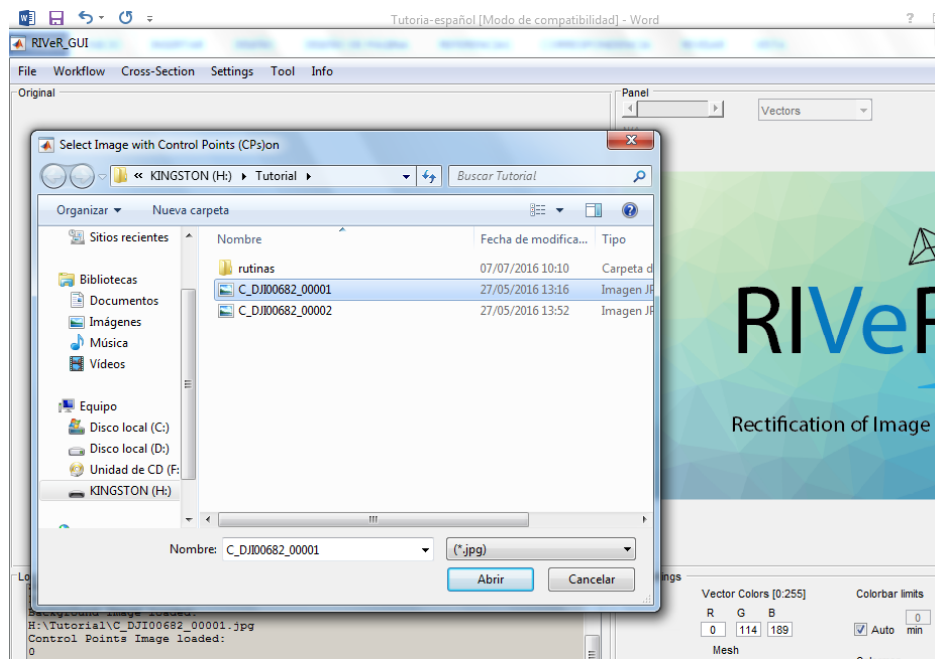


Figura A. 24: Cuadro desplegado donde buscar la nueva imagen de fondo.

d) Definir Puntos de Control (Control Points - CPs):

Haga click en “Workflow”--> “Define CPs”--> “Define UTM coordinates” (Figura A.25). Al hacer esto surge una ventana nueva con nombre “RIVeR – AddCPs” (Figura A.26; en esta cambie el UTM zone por el del lugar de donde se tomó el video (en este ejemplo, utilizamos la zona horaria de Argentina: 20 K). Clickee dentro de esta ventana “import from excell” y cargue el archivo que contenga las coordenadas. Cargados los datos, haga click en “Apply” y seleccione (sobre la imagen que surge) los puntos de control respetando el orden en el que están las coordenadas.

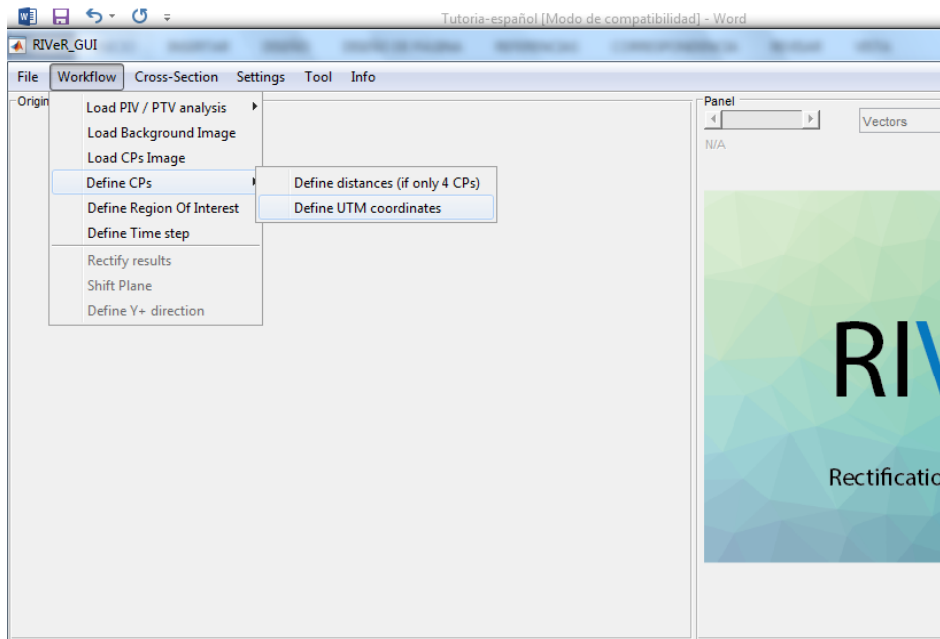


Figura A. 25: Barra desplegada al clicar la opción “Define CPs”.

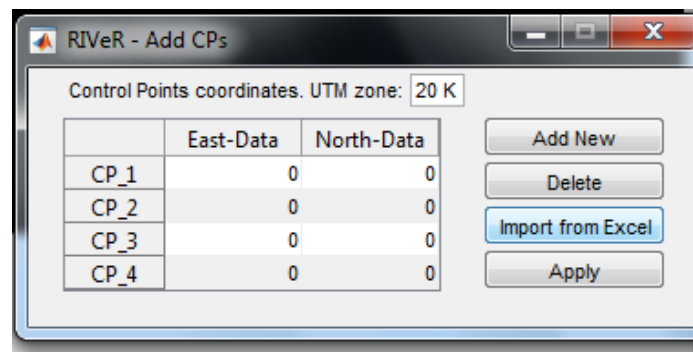


Figura A. 26: Cuadro surgido de clicar “Define UTM coordinates”; aquí importamos de Excel las coordenadas para definir las distancias.

Otra forma para introducir las coordenadas es de forma manual cargando las distancias entre los puntos. Para realizar esto clickee en “Workflow” --> “Define CPs” --> “Define distances (if only 4 CPs)” (Figura A.27).

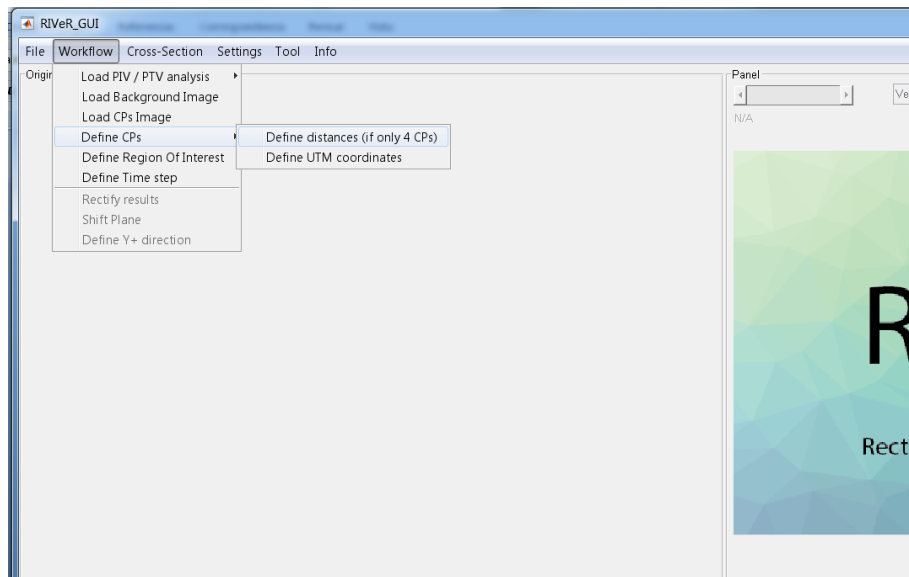


Figura A. 27: Barra desplegada al clicar la opción “Define CPs”, donde aparece la opción “Define distances”.

Se mostrará la imagen que ha seleccionado como fondo y sobre ella aparecerá un cursor, pudiendo realizar las siguientes acciones:

- Haciendo click izquierdo se podrá hacer zoom sobre la imagen.
- Doble click izquierdo se quita el zoom
- Para seleccionar el punto hacer click derecho.

Se deben seleccionar los 4 puntos de control, se recomienda que siempre se siga un mismo orden, por ejemplo: comenzar en la margen izquierda por el punto aguas arriba y continuar en sentido anti horario. De esta forma se repetirá siempre el mismo orden al cargar las longitudes entre los tramos.

Una vez que se hayan seleccionado los 4 puntos se mostrarán los mismos tal como se indica en la Figura A.28.

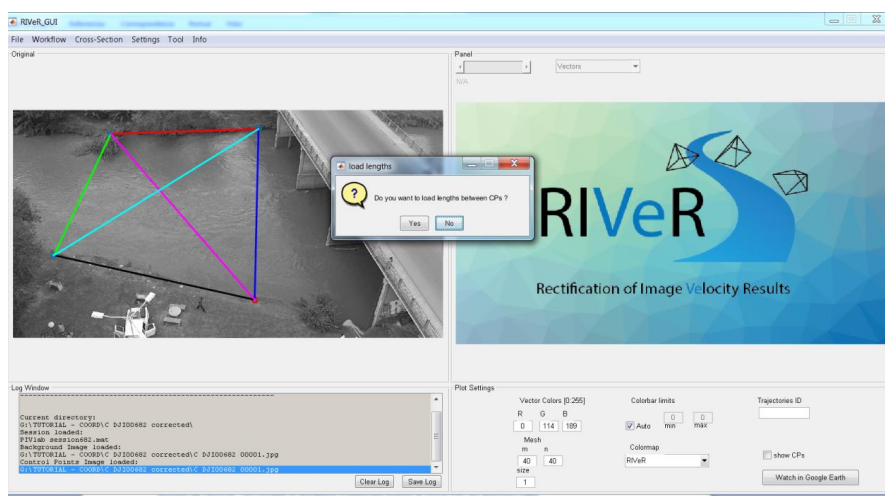


Figura A. 28: Cuadro desplegado al haber fijado los puntos para cargar las distancias entre ellos.

Se abrirá una nueva ventana con la frase: “Do you want to load lengths between CPs?”, debe hacer click en “No”. Luego aparecerá una nueva ventana (Figura A.29) en donde se deben cargar las longitudes entre los puntos respetando los colores de las líneas. Luego haga click en “OK”.

A dialog box titled 'le...' with a standard Windows window border. It contains six input fields, each labeled with a color and 'length: (in m)'. The labels are: 'blue length: (in m)', 'red length: (in m)', 'green length: (in m)', 'back length: (in m)', 'magenta length: (in m)', and 'cyan length: (in m)'. Each input field contains the number '1'. At the bottom of the dialog are two buttons: 'OK' and 'Cancel'.

Figura A. 29: Cuadro donde cargar las distancias; estas se cargan en metros y con “.” en lugar de “,” si se tienen centímetros.

e) Haga click en “Workflow” --> “Define Region of Interest” y seleccione el área que quiera rectificar trazando un polígono (Figura A.30). El polígono final debe incluir a los puntos de control. Terminado el polígono (habiendo vuelto al inicio con los puntos) haga doble click dentro de este. Este se verá como el de la Figura A.31.

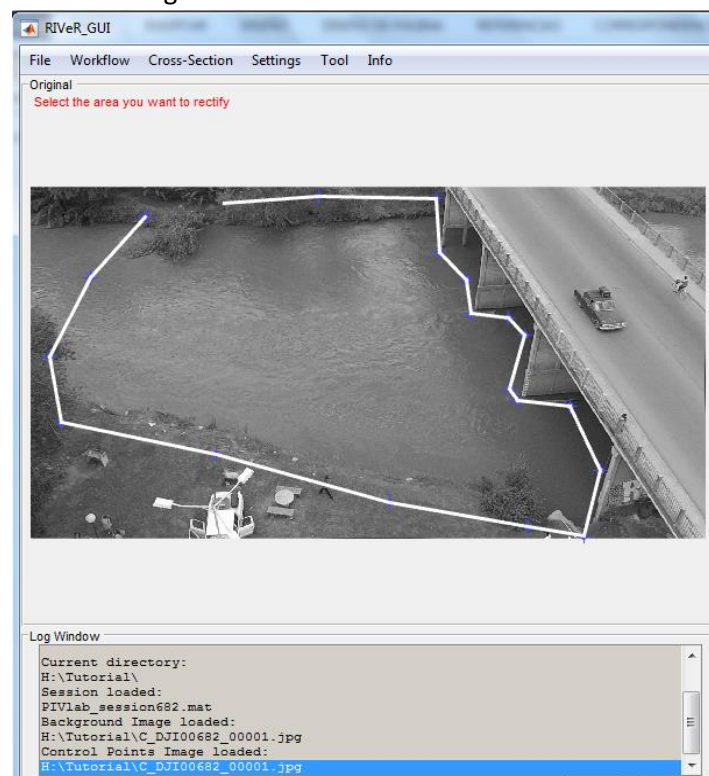


Figura A. 30: Trazado de polígono donde lo encerrado será rectificado.

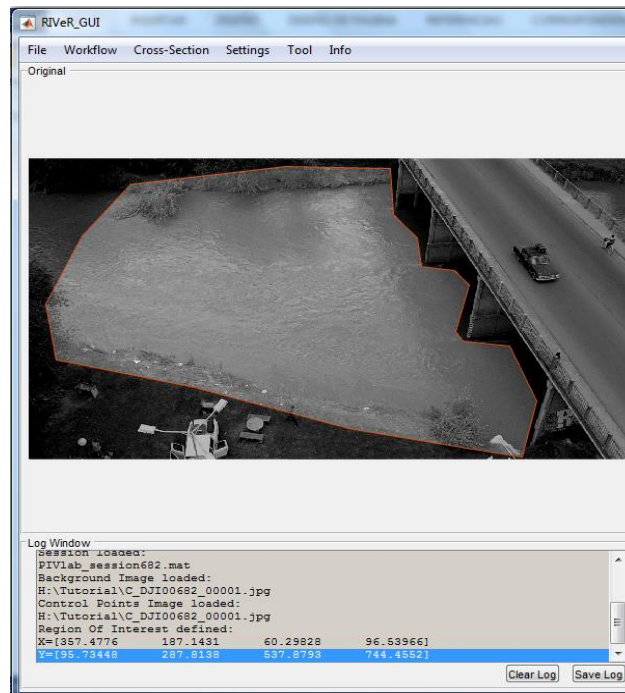


Figura A. 31: Polígono terminado.

f) Haga click en “Workflow”--> “Define Time Step” (Definir paso de tiempo). En este paso se define el intervalo de tiempo entre las 2 imágenes en milisegundos

En este ejemplo, si las grabaciones de vídeo tienen una resolución temporal de 30 fotogramas por segundo (fps) el paso de tiempo es de $1/30 = 0,0333$ segundos = 33.333 milisegundos.

g) Nuevamente clickee “Workflow”--> “Rectify results” y vea que en el cuadro derecho del programa aparece la imagen rectificada con sus vectores de velocidad. En la esquina superior izquierda de este cuadro se puede escoger cual de todas las imágenes se quiere observar, siendo la última la imagen promedio de todas (Figura A.32).

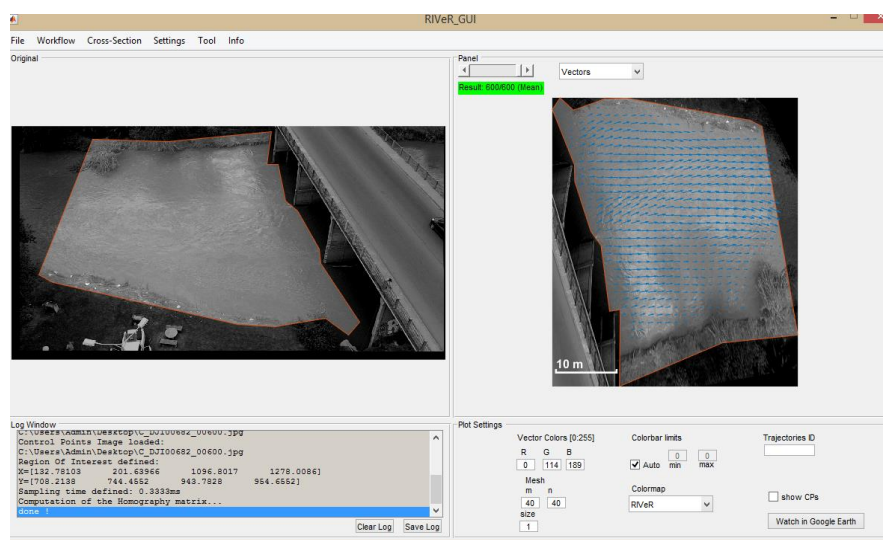


Figura A. 32: Interfaz del programa RIVER con la imagen original a la izquierda y la rectificada a la derecha.

A.4.2 Visualización de los resultados

Una vez rectificada la imagen se puede ver representada la velocidad por vectores “Vectors” (está preconfigurado esta visualización) o por campo de velocidades “Velocity magnitude”. Para ver en formato “Velocity magnitude” clickee a la derecha del Panel y seleccione “Velocity magnitude” (Figura A.33)

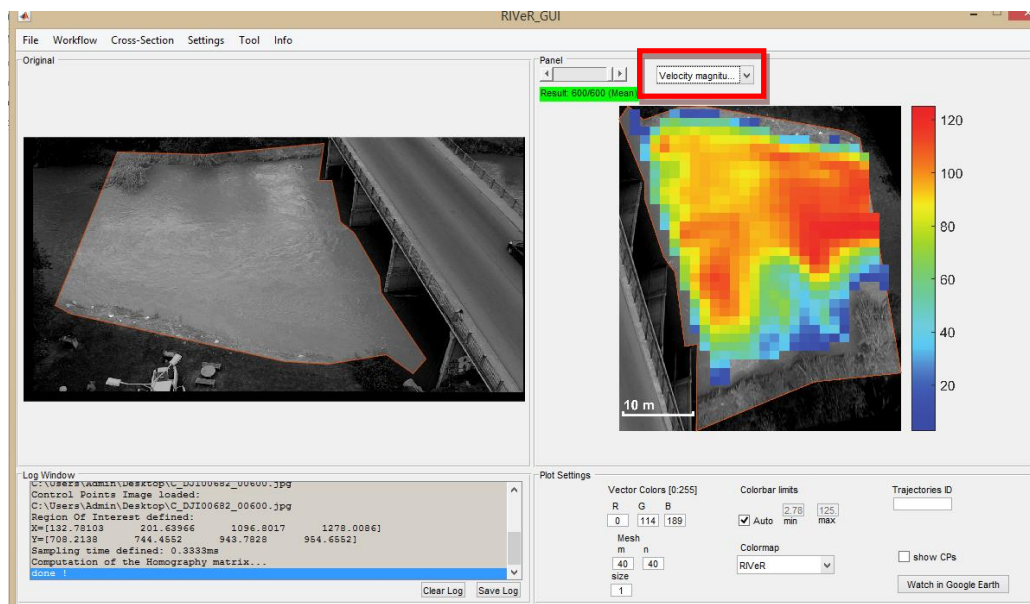


Figura A. 33: Vista con la opción “Velocity magnitud” del campo de velocidades rectificado.

En el cuadro inferior a la ventana de salida se puede configurar la visualización de la imagen. Se detallan a continuación diferentes funciones:

- **Colormap:** modifica la paleta de colores de “velocity magnitude”, dando a elegir diferentes opciones de combinaciones de colores (Figura A.34).
- **Size:** modifica el tamaño de los vectores mostrados en la función predeterminada “vectors” (Figura A.37).
- **Vector colors [0:255]:** modifica el color de los vectores de la imagen a partir de la combinación de valores de R (rojo), B (azul) y G (verde)(Figura A.36).
- **Show CPs:** opción que al darle click muestra en la imagen la ubicación de los puntos de control (CPs).
- **Mesh:** modifica el tamaño de la malla sobre la región de interés, donde cada cuadrado definido representa un valor de velocidad de la opción “velocity magnitude”; a mayor m y n, más pequeños los cuadrados y por lo tanto, más uniforme la graduación entre colores y toma más tiempo el procesamiento (Figura A.35).
- **Watch in Google Earth:** clickeando en dicha opción se abre el programa Google Earth con la imagen superpuesta. Se recomienda usar con la opción “Velocity magnitude”.

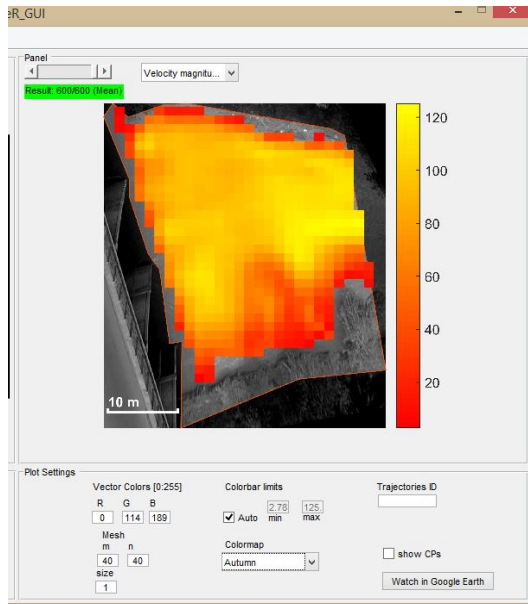


Figura A. 34: Campo de velocidad mostrado con la opción “Colormap” de los cuadros de la opción “Colormap”.

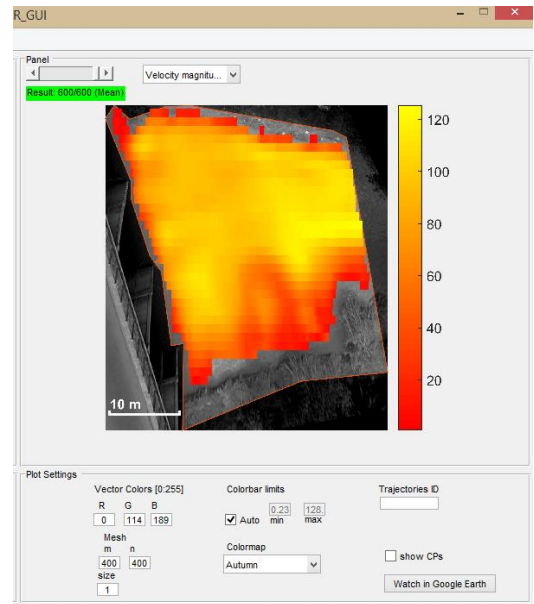


Figura A. 35: Modificación del tamaño de los cuadros de la opción “Colormap”.

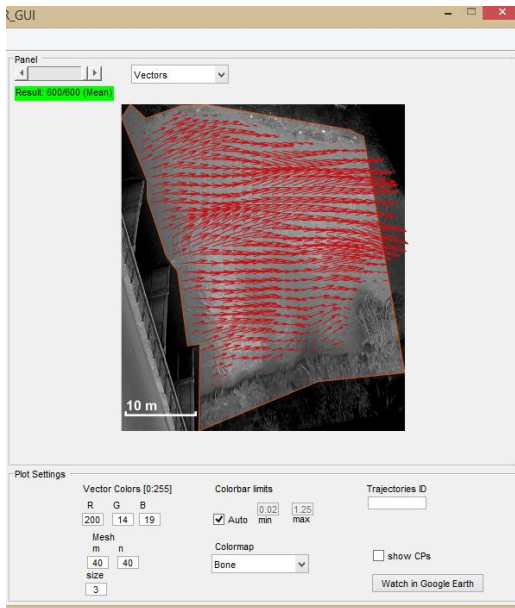


Figura A. 37: Campo de velocidad mostrado con la opción “Vectors”.

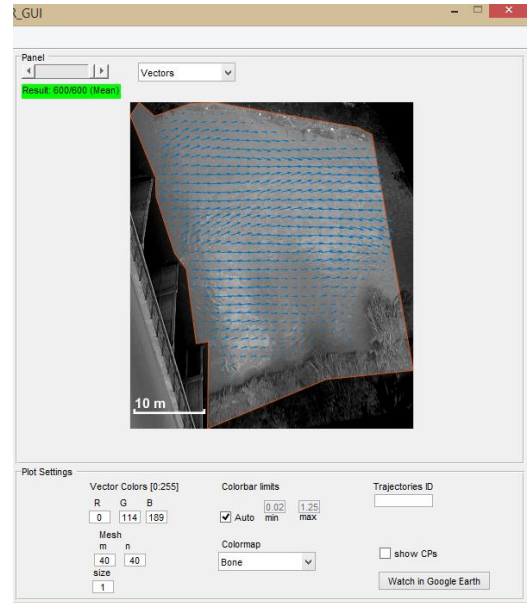


Figura A. 36: Modificación del tamaño de los vectores.

A.4.3 Estimación de caudal en una sección

- a) Para definir una sección existen dos posibilidades: a través de coordenadas geográficas conocidas o bien determinarla sobre la imagen de fondo elegida.

Coordenadas Geográficas: haga click en “Cross-Section”--> “Add new”--> “Define coordinates”. Nuevamente surge el cuadro “RIVeR – Add section” (Figura A.38). Corrija el uso horario y clickee en “import from excell”.

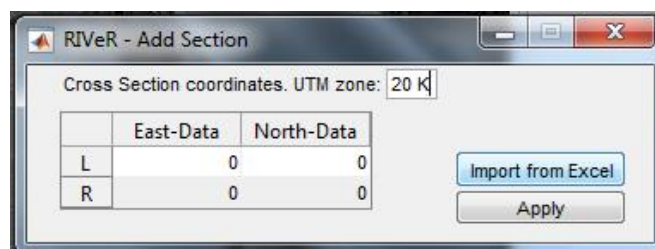


Figura A. 38: Corrección del uso horario en el cuadro junto al texto “UTM zone”.

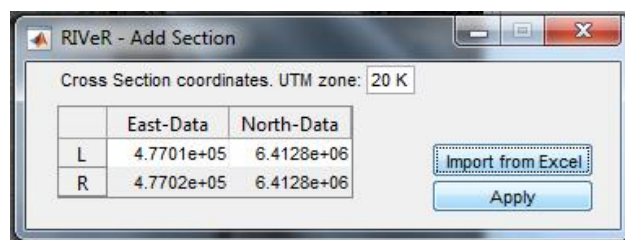


Figura A. 39: Datos mostrados en el cuadro una vez cargados, a continuación se clickea en “Apply”.

Cargados los datos (Figura A.39) haga click “Apply” y defina el nombre de la sección.

Sobre la imagen: vaya a “Cross Section”--->”Add new”--->”On original image” ó “On rectified image”. Luego, en la ventana derecho o izquierda (según que opción que ha escogido) debe seleccionar el primer punto de la sección y luego desplazarse manteniendo click izquierdo hasta el otro punto que defina la sección. Al hacer esto se creará la sección.

- b) Una vez definida la sección se abrirá una nueva ventana tal como se muestra en la Figura A.40. Para poder realizar una estimación del caudal se deberá cargar la batimetría. Para ello vaya a “Import Bathymetry” y seleccione el archivo de Excel que la contenga. Aclaración: Dicho archivo deberá contener en la primer columna las progresivas y en la segunda la profundidad.

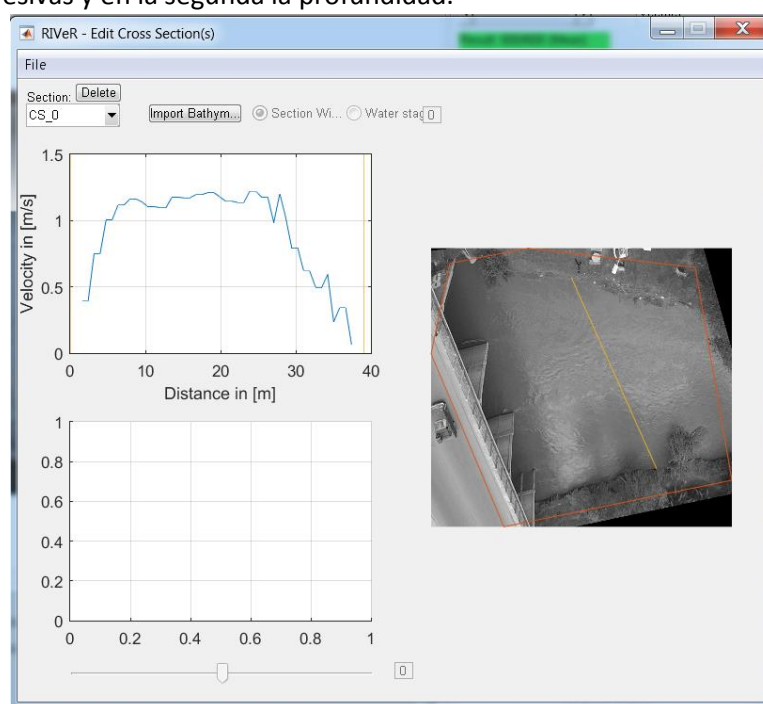


Figura A. 40: Cuadro surgido de haber fijado la sección; se observa la variación de la velocidad a medida que nos movemos en la sección.

- c) Luego aparecerá el valor de la descarga en la esquina superior izquierda de la ventana. Aquí se podrá optar por utilizar el nivel de agua por defecto (une los dos puntos extremos de la sección) seleccionando “Seccion Width” o bien definir el nivel de la superficie del agua utilizando “Water Stage” y en el casillero a la derecha colocando el nivel correspondiente. (Figura A.41).

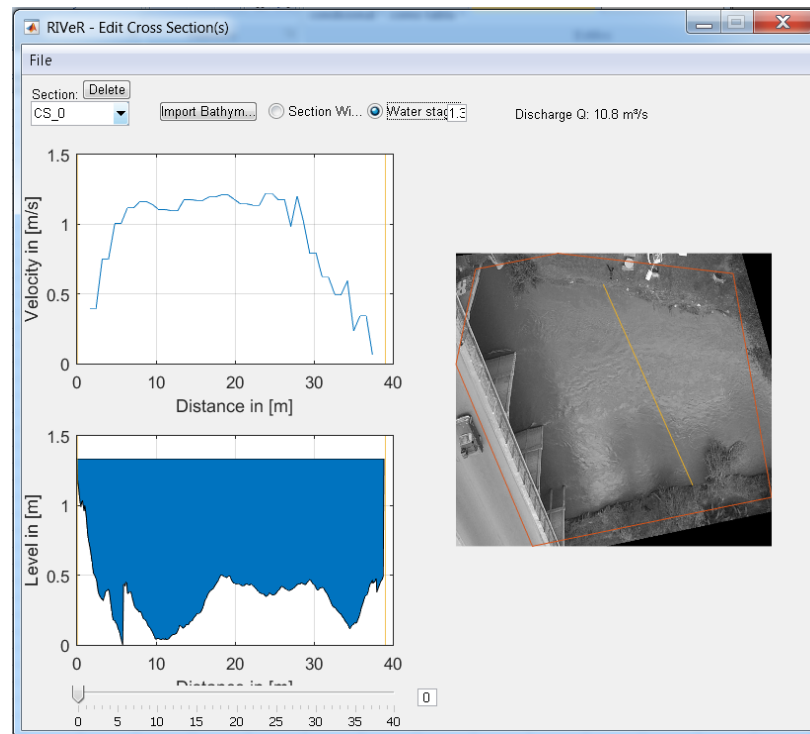


Figura A. 41: Batimetría y distribución de velocidad a lo largo de la sección.

A.4.4 Exportación de los resultados

- a) Para exportar el perfil de velocidades en una sección deberá: dentro de la ventana correspondiente a la sección en cuestión vaya a “File” ---> “copy to clipboard”. Luego, abra el Matlab y siga los siguientes pasos:
- Escriba en el cuadro inferior: `datos=(“ctrl+v”)` y apriete Enter.
 - Escriba en el cuadro `xlswrite(‘dirección donde quiero guardar el archivo\nombre del archivo.xls’,datos)` y apriete enter (Figura A.42).

```

Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.
>> xlswrite('H:\Tutorial\ejemplotutorial.xls')
Error using xlswrite (line 163)
Not enough input arguments.

>> xlswrite('H:\Tutorial\ejemplotutorial.xls',datos)
fx >> |

```

Figura A. 42: Ventana de comando del programa Matlab; se ubica en la parte inferior de la ventana de inicio al abrir el programa.

- b) Si desea exportar una determinada imagen deberá ir a “File” --> “Export” y allí seleccionar si desea obtener la imagen de la izquierda (Left) o la derecha (Right). La misma se

guardará en la dirección de la sesión de PIVlab sobre la que se está trabajando. (Figura A.43).

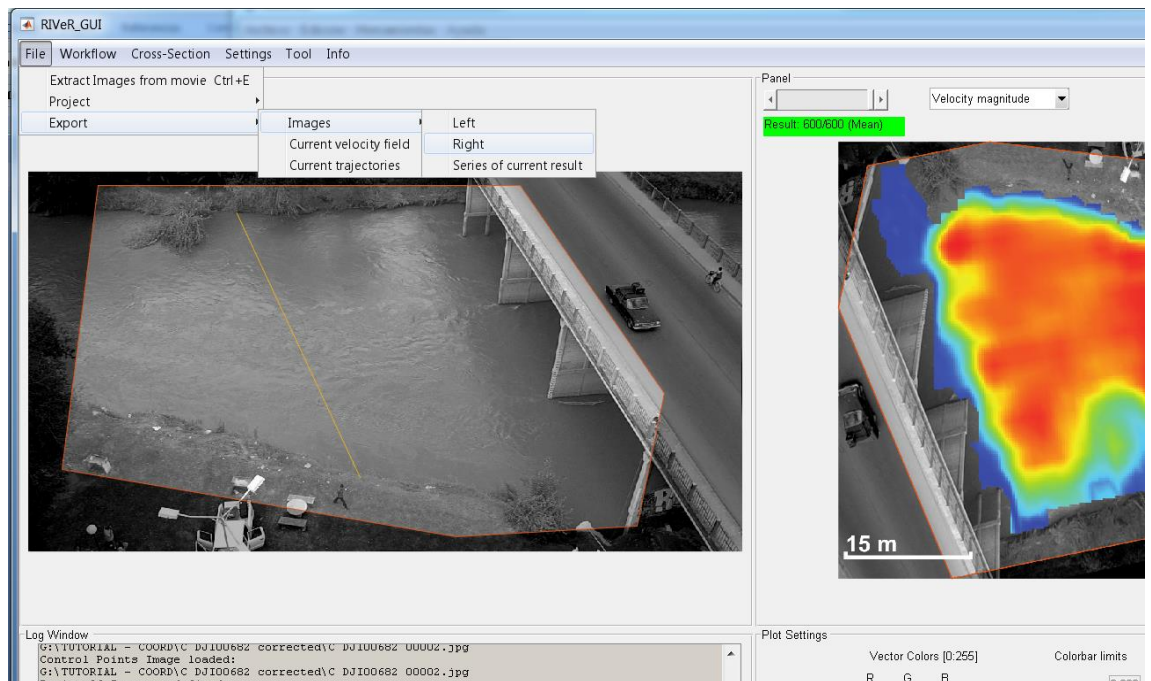


Figura A. 43: Barra de opciones desplegadas al clicar “File” y luego “Export”.

c) Abra nuevamente el RIVeR y haga click en “File”--> “Project”--> “Save project” (Figura A.44) y de un nombre al archivo para guardar la sesión.

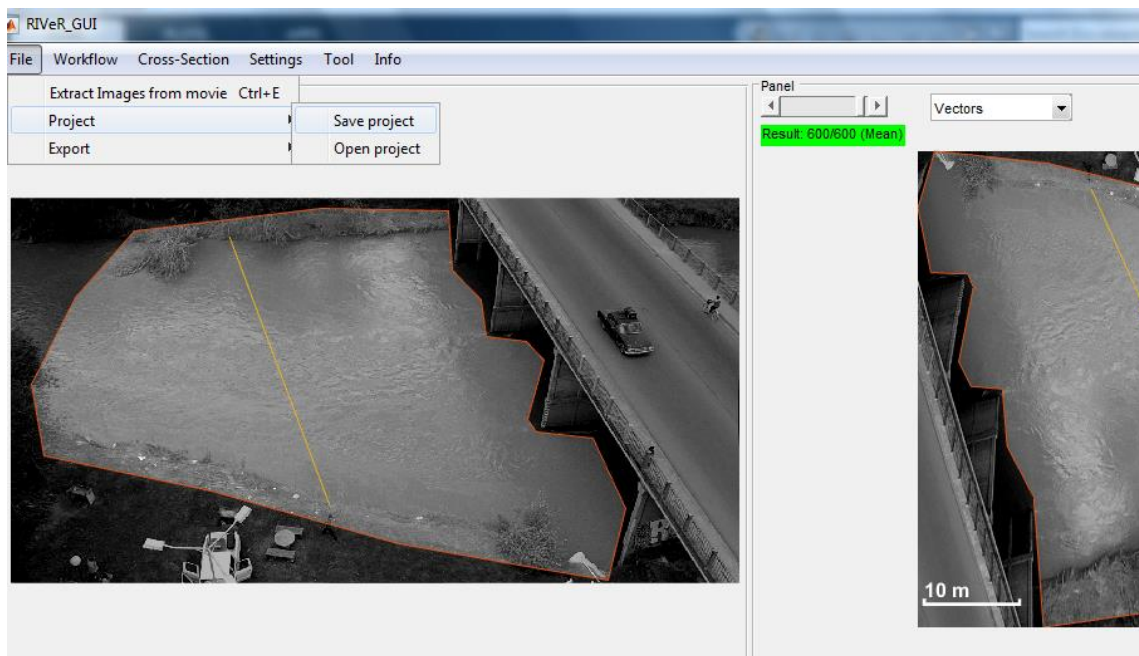


Figura A. 44: Guardado del archivo.

