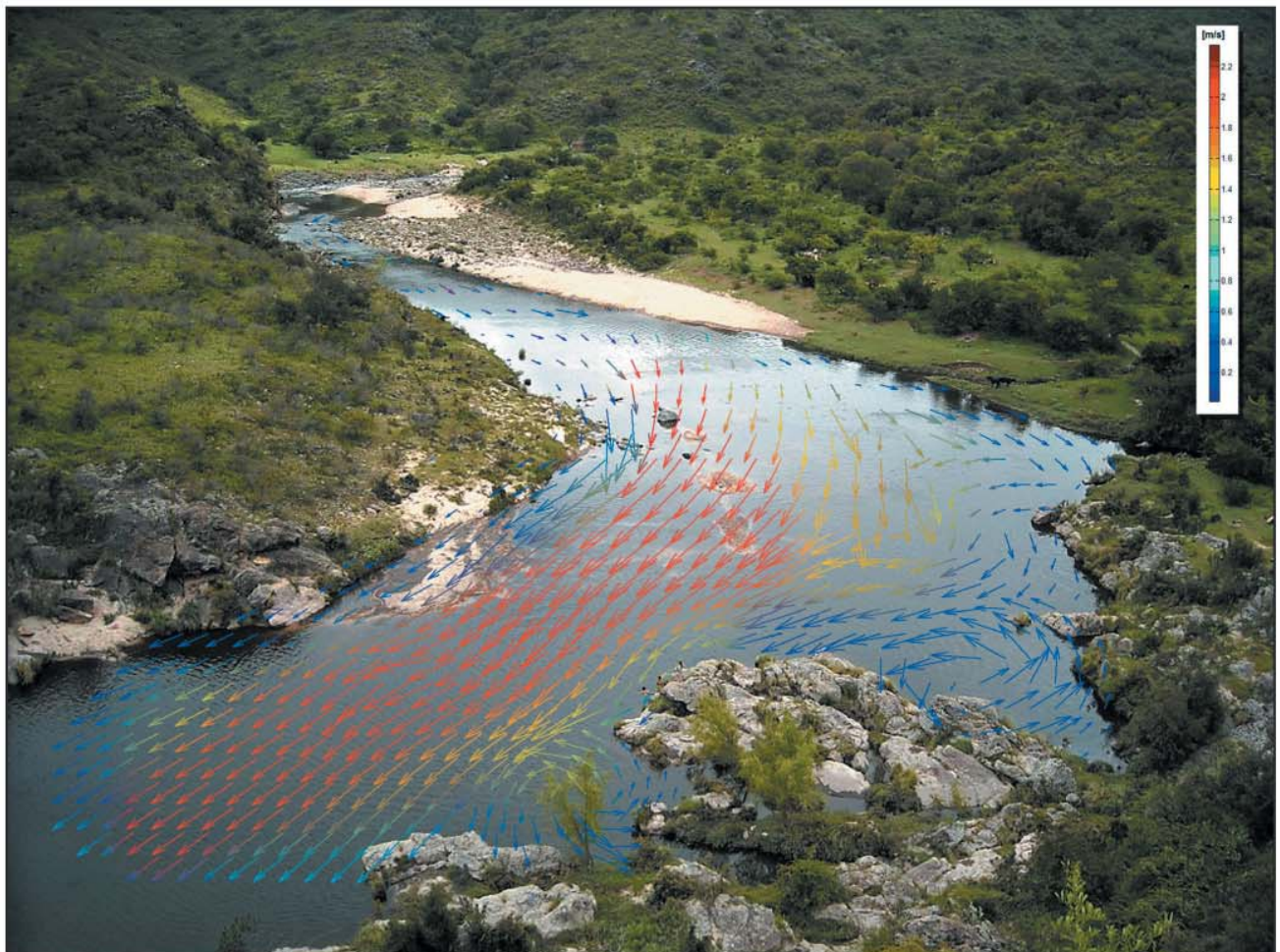


UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES
- CENTRO DE ESTUDIOS Y TECNOLOGÍA DEL AGUA -

PRÁCTICA SUPERVISADA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CUANTIFICACIÓN DE ERRORES EN LA IMPLEMENTACIÓN DE LSPIV
PARA LA DETERMINACIÓN DE CAUDALES EN CURSOS FLUVIALES



Autor: LUCERO, José María

Tutor: GARCÍA, Carlos Marcelo

Supervisores Externos: GUILLÉN, Nicolás Federico

PATALANO, Antoine

Córdoba, 2015

**CUANTIFICACIÓN DE ERRORES EN LA IMPLEMENTACIÓN DE LSPIV
PARA LA DETERMINACIÓN DE CAUDALES EN CURSOS FLUVIALES**

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Dr. Marcelo García por darme la posibilidad de realizar este trabajo en el Laboratorio de Hidráulica, a los integrantes del equipo de investigación del Centro de Estudios y Tecnología del Agua y miembros del Laboratorio de Hidráulica por haberme integrado, demostrarme su mejor predisposición y atención.

Especialmente a mis tutores: Nicolás Guillén, quien rápida y eficazmente, fiel a su personalidad de gran dinamismo, hizo posible que yo formara parte del equipo y aprendiera el uso de las herramientas informáticas involucradas, brindándome además un seguimiento continuo; Antoine Patalano, que supo explicarme pacientemente todos los aspectos teóricos involucrados en la técnica, guiándome en la elección de los posibles caminos a seguir en la investigación, y que dedicó parte de su tiempo personal fuera del Laboratorio para profundizar en aspectos que eran objeto de mi interés, sin olvidar el tiempo dedicado a la programación de las pequeñas aplicaciones desarrolladas específicamente para este trabajo.

También, mis agradecimientos para José Manuel Díaz Lozada y Tomás Vaschalde quienes siempre me brindaron su asistencia en forma inmediata y con la mejor predisposición.

Y por quienes siempre estaré agradecido, son todos y cada uno de los profesores que he tenido y que siempre me dieron su “ayuda” para que este momento sea posible, en cada trabajo práctico, en cada examen, en cada coloquio; a mis padres y demás familiares que siempre me apoyaron; a personajes ilustres de nuestra historia que son fuente de mi inspiración como el Gral. Ing. Enrique Mosconi quien tanto hizo por la patria durante el Siglo XX; y algo que muchos olvidan, mis agradecimientos para todos y cada uno de los argentinos que pagan sus impuestos, aun cuando muchos de ellos apenas tienen para comer, y que con su dinero hacen posible la educación pública y “gratuita”, porque cada universitario es una promesa de cambio, de progreso, una inversión de los honrados recursos de la nación.

Tal vez ellos no lo sepan, lo importante es que lo sepa yo.

Mis más sinceros agradecimientos.

RESUMEN

Palabras clave:

Velocidad Superficial, LSPIV, Velocimetría de Partículas, Cuantificación de Error

Resumen:

En hidráulica fluvial, la medición de caudales representa uno de los pilares fundamentales para la realización de todo tipo de estudios y modelaciones. La determinación de transformaciones lluvia-caudal, el tránsito de crecidas, delimitación de zonas inundables y muchas otras tareas, no pueden llevarse a cabo sin el soporte de una gran cantidad de mediciones de flujos naturales. Debido a la gran necesidad de mediciones experimentales en la actualidad, la obtención de estimaciones en forma rápida, sin instrumental sofisticado, y aplicando técnicas de bajo costo es algo necesario, deseable y conveniente. Una de las maneras de obtener datos de la forma descripta es a través de la aplicación de la técnica LSPIV, que se basa en la determinación de la velocidad superficial de un curso de agua a través del análisis de imágenes. Es un método que tiene sus orígenes hace varias décadas pero que últimamente se ha visto impulsado debido al rápido avance del potencial computacional de los ordenadores modernos, y al uso masivo de medios de captura digital.

Como todo procedimiento experimental de medición, este lleva asociado implícitamente una cantidad considerable de errores que involucran el propio accionar del operador, otros que están relacionados con el instrumental utilizado, etc. Es por ello que este trabajo tiene como objetivo brindar un acercamiento al estudio de dichos errores, lograr una cuantificación de los mismos, determinando las principales fuentes e intervalos óptimos de las variables humanas y tecnológicas involucradas, lograr una reducción de la variabilidad entre el valor teórico y el observado, y finalmente, proporcionar metodologías de trabajo adecuadas.

INDICE TEMÁTICO

1. MARCO DE REFERENCIA DEL TRABAJO	11
1.1. Introducción	11
1.2. Objetivo General	13
1.3. Objetivos Específicos.....	13
1.4. Metodología	13
2. DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA PIV/LSPIV.....	16
2.1. Introducción PIV y LSPIV.....	16
2.2. Clasificación PIV y LSPIV	16
2.3. Principio de funcionamiento de PIV clásico	17
2.3.1. Componentes.....	17
2.3.2. Proceso digital de Correlación Espacial en PIV.....	18
2.3.3. Análisis del plano de Correlación Cruzada en MATLAB	22
2.4. PIV a Gran Escala	23
3. ENTORNO DE MODELADO 3D	26
3.1. Introducción	26
3.2. Creación de gráficos 3D.....	26
3.2.1. Modelado	26
3.2.2. Mapeado y Materiales	29
3.2.3. Iluminación.....	30
3.2.4. Animación	30
3.2.5. Renderizado	31
3.3. Modelado del entorno de simulación	32
3.3.1. Elementos necesarios en la escena	32
3.3.2. Renderizado	34
3.3.3. Formato de almacenamiento	35
4. ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN	38
4.1. Objetivo del procesamiento.....	38
4.2. Secuencia de trabajo realizada para la medición aplicando PIV.....	38
4.3. Ponderación del Error Relativo.....	45
5. RESULTADOS DEL ANALISIS.....	48
5.1. Resultados: gráficos y valores de interés	48
5.2. Casos analizados	48
5.3. Perfil Lineal Uniforme	48
5.4. Perfil Parabólico.....	53
5.5. Perfil Parabólico – Análisis sobre la resolución y el IA	64

5.6.	Resumen de los resultados obtenidos	72
6.	CONCEPTOS PRELIMINARES	76
6.1.	Hacia una aproximación a los flujos naturales	76
6.2.	Generación de perfiles batimétricos.....	76
6.3.	Generación de perfiles de velocidad.....	77
6.4.	Generación de la simulación	77
6.5.	Secuencia de trabajo	78
6.6.	Listado de combinaciones	79
7.	RESULTADOS DEL ANÁLISIS.....	81
7.1.	Tabla resumen de caudales.....	81
7.2.	Gráfico de Dispersión por Perfil	82
7.3.	Observaciones.....	83
8.	ANÁLISIS SOBRE EL RÍO SUQUÍA	86
8.1.	Introducción	86
8.2.	Zona relevada y posiciones de cámaras	86
8.3.	Metodología de trabajo.....	87
8.4.	Definición del Perfil Base	88
8.5.	Resultados	89
8.6.	Tabla resumen.....	100
8.7.	Comparación con los resultados del perfil parabólico simulado.....	100
9.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	105
9.1.	Conclusiones sobre el entrenamiento en el uso del software PIVLAB-RIVeR.....	105
9.2.	Conclusiones sobre los ensayos de simulación de flujos.....	105
9.3.	Conclusiones sobre el trabajo con perfiles y caudales unitarios	105
9.4.	Conclusiones acerca de lo trabajado en campo.....	106
9.5.	Conclusiones generales de la aplicación de la técnica LSPIV para la cuantificación de recursos hídricos superficiales.....	106
9.6.	Recomendaciones para trabajos de investigación futuros	107
9.7.	Conclusiones personales sobre la Práctica Supervisada	107
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
	ANEXO 1	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema del conjunto de elementos involucrados en la técnica de PIV.	17
Figura 2.2 Esquema del proceso de muestreo de imagen “Fotograma a Fotograma” asociado a la técnica de PIV.	18
Figura 2.3 Modelo idealizado de procesamiento digital lineal, describiendo la relación funcional entre dos cuadros sucesivos de una filmación sobre un campo de partículas.	19
Figura 2.4 Ejemplo de la conformación de un Plano de Correlación por medio de la Correlación Cruzada Directa. En este caso un patrón de 4x4 pixeles se hace correlacionar con una muestra mayor de 8x8 pixeles, produciendo finalmente un Plano de Correlación de 5x5 pixeles.	20
Figura 2.5 La función de Correlación Cruzada R_n (a derecha) computada por medio de correlación de un patrón menor de 32x32 pixeles con otra muestra mayor de 64x64 pixeles. La posición que evidencia el mejor ajuste se encuentra aproximadamente 12 pixeles hacia la derecha.....	21
Figura 2.6.Reducción del costo computacional al aplicar el Teorema de Correlación, por medio de la Transformación Rápida de Fourier. A modo de ejemplo, para un análisis de mil posibles ubicaciones, el trabajo es 1000 veces menor, mientras que para un volumen de 1 millón de ensayos, la labor se reduce 50.000 veces.....	21
Figura 2.7 a) Imágenes del patrón de interés y de la muestra donde se desea localizar el patrón. b) Mapa de Correlación en plano 2D y en 3D obtenidos en MATLAB. c) Valores de correlación para cada una de las posibles posiciones a medida que el patrón se aproxima a la zona de máximo ajuste.....	22
Figura 2.8 a) Imágenes de dos muestras de un flujo natural (Río Suquia). b) Mapa de Correlación en plano 2D y en 3D obtenidos en MATLAB. c) Valores de CC para cada una de las posibles posiciones y el vector de desplazamiento estimado considerando la distancia en pixeles entre centroides de cada muestra, luego... de obtenido el pico de correlación.....	23
Figura 3.1 Un volante modelado por medio de Polígonos, cuya detalle luego se mejora a través de un modificador de Superficie de Subdivisión (Izquierda) y el mismo volante modelado a través de Superficies NURBS, es decir, curvas polinomiales espaciales suavizadas (Derecha).....	27
Figura 3.2 Proceso de desplazamiento de malla. A partir de una malla plana uniforme, se logra la conformación de una superficie tridimensional tras aplicar una modificador de subdivisión y una imagen (o mapa) en la que cada pixel tiene un determinado valor de elevación.	28
Figura 3.3 Cabeza humana modelada por medio del uso de Voxels.	28
Figura 3.4 Cabeza humana modelada gracias al uso de superficies de subdivisión dinámica. A medida que se agregan detalles más finos a la escultura, el grado de resolución debe aumentarse	29
Figura 3.5 Diferentes materiales de uso más extendido en todo tipo de entornos 3D.....	29
Figura 3.6 A la izquierda se observa una pieza metálica plegada con dos fuentes de luz puntual. A derecha, la misma pieza pero esta vez se ha activado la Iluminación Global y se ha calculados cada uno de los rebotes de los fotones emitidos por las fuente lumínicas.	30
Figura 3.7 Esquema de movimiento de un personaje de animación.	31
Figura 3.8 A la izquierda la malla del modelo del vehículo, con solo la iluminación puntual y global a modo de previsualización. A la derecha, el render de la escena final completa.	31
Figura 3.9 a) Textura de Ruido Fractal. b) Malla primitiva de resolución reducida a fin ilustrativo. c) Malla animada por medio del uso de un modificador de Puntos de Control. d) Textura animada con un perfil parabólico.....	32
Figura 3.10 Marco de referencia dimensional: en las esquinas, los Puntos de Control para la posterior rectificación, a lo largo de los laterales se ubican marcas de distancia unitaria, por ejemplo, un metro, y finalmente, en el centro, dos marcas para el trazado de la sección transversal de interés o Cross Section...33	33
Figura 3.11 Esquema de las cámaras necesarias para la simulación, con sus respectivos nombres y ubicaciones, junto con la fuente de iluminación global.....	33

Figura 4.1 Interface PIVLab.	38
Figura 4.2 Definición de región de interés.	38
Figura 4.3 Seteos previos al análisis.	39
Figura 4.4 Vectores interpretados por PIVLab.	39
Figura 4.5 Ploteo de dispersión de vectores.	40
Figura 4.6 Interface de RIVER.	40
Figura 4.7 Definición de los puntos de referencia para rectificación.....	41
Figura 4.8 Definición de las secciones transversales.....	41
Figura 4.9 Secciones transversales obtenidas.....	42
Figura 4.10 Vectores por secciones sobre imagen rectificadas.....	42
Figura 4.11 Esquema de archivos generados.	42
Figura 4.12 Comparación de perfiles Obtenidos Vs. Teórico.	43
Figura 4.13 Cuantificación del Error Relativo en la sección intermedia.....	44
Figura 4.14 Cuantificación del Error Relativo Ponderado en la sección intermedia.....	45
Figura 4.15 Determinación de la función de ponderación.....	45
Figura 4.16 Ajuste de la función de ponderación por mínimos cuadrados.	46
Figura 5.1 Resultados Perfil Lineal Uniforme – Vista Superior.....	49
Figura 5.2 Resultados Perfil Lineal Uniforme – Vista Lateral 30º.....	50
Figura 5.3 Resultados Perfil Lineal Uniforme – Vista Lateral 15º.....	51
Figura 5.4 Resultados Perfil Lineal Uniforme – Vista Lateral 7.5º.....	52
Figura 5.5 Resultados Perfil Parabólico – Vista Superior.	54
Figura 5.6 Resultados Perfil Parabólico – Vista Lateral 30º.	55
Figura 5.7 Resultados Perfil Parabólico – Vista Lateral 15º.	56
Figura 5.8 Resultados Perfil Parabólico – Vista Lateral 7.5º.	57
Figura 5.9 Resultados Perfil Parabólico – Vista Esquina 30º.....	58
Figura 5.10 Resultados Perfil Parabólico – Vista Esquina 15º.....	59
Figura 5.11 Resultados Perfil Parabólico – Vista Esquina 7.5º.....	60
Figura 5.12 Resultados Perfil Parabólico – Vista Frontal 30º.....	61
Figura 5.13 Resultados Perfil Parabólico – Vista Frontal 15º.....	62
Figura 5.14 Resultados Perfil Parabólico – Vista Frontal 7.5º.....	63
Figura 5.15 Resultados Perfil Parabólico – Vista Frontal 30º - Resolución Completa- 1960 x 1080 px.	65
Figura 5.16 Resultados Perfil Parabólico – Vista Frontal 30º - Resolución al 50% - 980 x 540 px.	66
Figura 5.17 Resultados Perfil Parabólico – Vista Frontal 30º - Resolución al 33.3% - 653 x 360 px.	67
Figura 5.18 Resultados Perfil Parabólico – Vista Frontal 30º - Resolución al 25% - 490 x 270 px.	68
Figura 5.19 Resultados Perfil Parabólico – Vista Frontal 30º - Resolución al 25% - 490 x 270 px – IA 32 px...69	69
Figura 5.20 Resultados Perfil Parabólico – Vista Frontal 30º - Resolución al 25% - 490 x 270 px – IA 16 px...70	70
Figura 5.21 Tabla resumen de resultados obtenidos sobre velocidades.	72
Figura 5.22 Esquema tridimensional del entorno de simulación mostrando las cámaras involucradas y los errores correspondientes.....	73
Figura 6.1 Perfiles batimétricos generados por el interpolador paramétrico.	76
Figura 6.2 a) Gráfico de Progresiva-Profundidad-Velocidad de Flujo generado por el método de Entropía. b) Perfil de velocidad superficial resultante.....	77
Figura 6.3 a) Textura base b) Textura distorsionada por efecto del modificador paramétrico. c) Textura animada sin distorsión, obtenida por medio del método de subdivisión en fajas.	78
Figura 6.4 Esquema de ubicación de cámaras.	79
Figura 7.1 Tabla Resumen	81
Figura 7.2 Error relativo sobre caudales para cada perfil.	82
Figura 8.1 Ubicación de la zona de relevamiento sobre el río Suquía.	86

Figura 8.2 Maqueta con el detalle de las ubicaciones de cámara en el relevamiento del Suquía.....	87
Figura 8.3 Sección relevada en trabajos de topografía vinculados al desarrollo del modelo físico del Río Suquía.	88
Figura 8.4 Resultados Río Suquía – Vista Frontal 13º – TOMA 1.	90
Figura 8.5 Resultados Río Suquía – Vista Frontal 13º – TOMA 2.	91
Figura 8.6 Resultados Río Suquía – Vista Lateral Sur 11º.....	92
Figura 8.7 Resultados Río Suquía – Vista Lateral Sur 5º.....	93
Figura 8.8 Resultados Río Suquía – Vista Esquina Sur 8º.	94
Figura 8.9 Resultados Río Suquía – Vista Esquina Sur 4º.	95
Figura 8.10 Resultados Río Suquía – Vista Lateral Norte 7º.....	96
Figura 8.11 Resultados Río Suquía – Vista Lateral Norte 4º.....	97
Figura 8.12 Resultados Río Suquía – Vista Esquina Norte 8º.	98
Figura 8.13 Resultados Río Suquía – Vista Esquina Norte 4º.	99
Figura 8.14 Resumen de los resultados obtenidos en el análisis del Río Suquía.	100
Figura 8.15 Resumen de los resultados del Río Suquía y del perfil parabólico simulado	100
Figura 8.16 Comparación de las vistas ensayados en campo, sobre el perfil parabólico simulado.....	101
Figura 8.17 Comparación de los resultados obtenidos del análisis del Río Suquía y los correspondientes ..	102
al perfil parabólico simulado.	102

CAPITULO 1: MARCO DE REFERENCIA DEL TRABAJO

1. MARCO DE REFERENCIA DEL TRABAJO

1.1. Introducción

La medición de caudales reviste una importancia fundamental en la hidráulica, siendo la cuantificación del flujo a través de la determinación de perfiles velocidades el punto de partida para la gran mayoría de estudios involucrados en esta rama de la ingeniería. Por ello, antes de abordar el estudio de la técnica particular tratada en este trabajo, se hará una breve descripción de las formas de medición de velocidades más ampliamente difundidas:

Micro Molinetes

Empleado fundamentalmente para medir velocidades medias en canales abiertos. Es de uso general en mediciones de campo. Es empleado fundamentalmente para medir velocidades medias en ríos y canales abiertos. Consta de una hélice, un dispositivo mecánico que capta las revoluciones de la hélice, un eje sobre el que está montado y un contador digital de tiempos y revoluciones.

Tubo de Pitot

El tubo de Pitot permite determinar las velocidades de flujo a partir de la medición de presión estática y total, lo que permite determinar la presión dinámica y de esa forma calcular la velocidad de circulación de un fluido. Consiste en un pequeño tubo con la entrada orientada en contra del sentido de la corriente del fluido

Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)

El ADCP es un instrumento que calcula las componentes de la velocidad del agua a diferentes profundidades de la columna de la misma, en las 3 direcciones. Para su determinación, se basa en el efecto Doppler, transmitiendo sonidos a una frecuencia fija y escuchando los ecos retornados por los reflectores en el agua. Estos reflectores son pequeñas partículas microscópicas de sedimentos o plancton presentes naturalmente en el agua, que se mueven a una velocidad igual que la misma, y que reflejan el sonido hacia el ADCP.

Acoustic Doppler Velocimeter (ADV)

El ADV es un instrumento de alta precisión utilizado para medir las tres componentes del vector de velocidad, en una variedad de condiciones de flujo como ser instalaciones de laboratorios, ríos, estuarios, y océanos. Utiliza la tecnología Doppler para medir velocidades de flujos en un pequeño volumen de medición localizado entre 5 y 10 cm del instrumento.

Velocimetría por seguimiento de Partículas (PTV)

Es una técnica de medición no intrusiva (no perturba el flujo) que permite obtener el campo de velocidades del flujo de manera instantánea y con alta resolución espacial por medio partículas trazadoras sembradas en el flujo. Este sistema es empleado cuando se realizan mediciones del patrón y velocidades del flujo superficial, para lo cual se emplean partículas trazadoras de mayor tamaño que en la técnica PIV. En esta técnica se rastrea cada partícula individual, a diferencia de la técnica PIV que rastrea el movimiento de un grupo de partículas.

Velocimetría por imágenes de Partículas (PIV)

El sistema de velocimetría por análisis de imágenes de partículas (PIV por sus siglas en inglés) es una técnica de medición no intrusiva que permite obtener el campo de velocidades de flujos en manera instantánea y con alta resolución espacial. La técnica se basa en determinar sobre la base de dos imágenes capturadas en un intervalo de tiempo conocido, el desplazamiento de las partículas que son sembradas en el flujo.

Velocimetría por Análisis de Imágenes de Partículas a Gran Escala - LSPIV

La técnica de LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) es una técnica que surge de la propia técnica de PIV aplicada a grandes cursos de agua y que involucra nuevas variables que afectan, con una sensibilidad sustancialmente diferente, los resultados obtenidos. Similarmente se analiza el desplazamiento de las partículas que son sembradas en el flujo, o determinados patrones sobre la superficie del agua, generados por la turbulencia o la elevación de la masa de agua por obstáculos sobre el fondo del cauce. El desarrollo de esta técnica 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.

Si bien el método tiene como desventaja una alta demanda computacional de los algoritmos de correlación cruzada que suelen emplearse para calcular los vectores de velocidad, hecho que va perdiendo cada vez más importancia gracias a los avances en materia de procesadores, se puede decir que es una técnica relativamente sencilla de aprender y fácil de aplicar en forma repetitiva.

Los problemas asociados al uso de esta técnica en particular de LSPIV están relacionados con:

- Fenómenos propios de la masa de agua en movimiento, grado de turbulencia, fenómenos locales derivados de condiciones de borde y el efecto del viento.

- Aspectos ambientales tales como luminosidad, reflexiones sobre la superficie del agua, lo accidentado del entorno y estado del tiempo para obtener capturas de imágenes satisfactorias.

- Topografía, accesibilidad al terreno, posibilidad de relevar detalles naturales particulares y distancias entre estos para luego usarlos como puntos de referencia en la etapa de obtención de velocidades.

- Instrumentales, relacionados con los dispositivos de captura de imágenes, resolución, estabilidad frente al movimiento accidental, distorsiones ópticas por efecto de las lentes, distancias focales y aspectos relacionados con los soportes digitales de almacenamiento y reproducción.

- Procesamiento, experiencia del laboratorista para ajustar los parámetros óptimos de trabajo computacional, interpretar el análisis preliminar, trabajar con los datos ejecutando un filtrado adecuado y obtener la información necesaria contrastando con casos de estudio similares u otras fuentes de información.

1.2. Objetivo General

El objetivo general de esta práctica supervisada es la cuantificación de errores en la implementación de la técnica de Velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escalas (LSPIV) para la determinación de caudales en cursos fluviales, simulando por medio de software de entornos 3D, diferentes perfiles de velocidades superficiales, así como también perfiles batimétricos para, en un primer momento, determinar errores asociados directamente con la determinación de las velocidades y luego cuantificar los asociados a la medición de caudales. Finalmente, para aproximarnos hacia una aplicación práctica de estos estudios, se tratará de relacionar lo observado en las simulaciones computacionales con mediciones de flujos en campo,

1.3. Objetivos Específicos

Para cumplir el objetivo general, se plantean diferentes objetivos específicos.

1. Aprender el uso del software relacionado con la técnica de PIV específicamente desarrollado para el análisis de cursos fluviales. Adquirir experiencia en el procesamiento del material filmico, estudiando distintos casos de flujos reales, en distintas condiciones de turbulencia, para familiarizarse con todas las posibles fuentes de error involucradas.

2. Reproducir a través del uso de herramientas 3D distintas condiciones de flujo y posibles posiciones de los dispositivos de captura digital, de manera tal de poder trabajar con velocidades conocidas y aislar cada una de las posibles variables involucradas.

3. Ensayar patrones de movimiento superficial, que permitan explicar falencias en el desempeño de los algoritmos de correlación y determinar errores sobre velocidades.

4. Analizar errores involucrados en la determinación de caudales.

5. Estudiar material relevado en campo de manera de poder ofrecer modos de explicar, predecir, disminuir o compensar los posibles errores.

1.4. Metodología

A los fines de cumplir con los objetivos generales y específicos se propone la siguiente metodología:

- En primer lugar se estudiarán los conceptos teóricos que son la base de la técnica de PIV. Bajo la supervisión de investigadores experimentados en el uso de la técnica, se hará un primer acercamiento al uso del software de aplicación, analizando casos de flujos reales ya procesados, de manera tal de poder corroborar la evolución del aprendizaje. Esto tiene además otra finalidad, pues a medida que un procedimiento se repite reiteradamente, surge naturalmente la interrogante de si acaso no es posible optimizar la secuencia de tareas, lo que conlleva a un enfoque exploratorio de las posibilidades ofrecidas por las herramientas incluidas en el software de PIV. A través de la prueba y error, el operador va

adquiriendo la sensibilidad necesaria que le permite no solo establecer un juicio crítico acerca del desempeño de su accionar y los resultados obtenidos, sino también ensayar situaciones que evidencien las vulnerabilidades, ya sea del material, del método en sí mismo, del software o de prácticas erróneas.

- Luego, y habiendo realizando ensayos previos para verificar la factibilidad del uso del entorno 3D para simular un flujo teórico (al menos en términos de velocidades superficiales), nos abocaremos a la construcción del modelo digital tridimensional de simulación, se definirán las posiciones de las cámaras a ensayar, se comprobará la utilidad, en términos del análisis de PIV, de la secuencia de imágenes producidas a través de la animación de la textura patrón. Se colocarán elementos que servirán de referencia para calibrar y rectificar, y por último pero no menos importante, se definirá el mecanismo de animación de la textura, es decir la imagen que presenta una distribución aleatoria de puntos, de manera tal de poder luego simular perfiles de velocidades de manera precisa y automatizada, sin que la variación de los mismos implique un alto costo de tiempo.

- Seguidamente, se realizarán estudios sobre velocidades y caudales, analizando la dispersión de los valores obtenidos luego del procesamiento, el comportamiento general de la secuencia de operaciones, el desempeño del método frente a distintos condicionantes que afectan el material filmico y que repercuten sensiblemente en la efectividad de los algoritmos involucrados, e incluso se comprobará el error involucrado no solo en la determinación de los valores de interés hidráulico sino también el derivado de prácticas establecidas por los operadores investigadores para lidiar con diferencias de valores de extremos o condiciones de contorno, filtrado de datos dudosos y extrapolaciones.

- Finalmente, se estudiará un caso de flujo natural, emulando las mismas condiciones planteadas originalmente para el entorno de simulación, de manera tal de establecer relaciones causales que nos permitan formular algunos lineamientos de trabajo que faciliten la implementación de la técnica, permitiendo por un lado mejorar la instrucción y el aprendizaje de aquellos que realizan sus primeras aproximaciones al uso de la técnica de PIV, y por otro, contribuir a una mejor comprensión por parte del personal entrenado de fenómenos que pueden ser generadores de error y que sin embargo no son plenamente tenidos en cuenta o analizados debido a que, a priori, se considera la técnica sustancialmente alejada del grado de precisión que pueden ofrecer otros métodos.

CAPITULO 2: DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA PIV/LSPIV

2. DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA PIV/LSPIV

2.1. Introducción PIV y LSPIV

La Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV - Particle Image Velocimetry) puede entenderse como la medición cuantitativa de un campo de velocidades en una serie de puntos distribuidos en el espacio. Los orígenes de la técnica se hallan en el estudio de la mecánica de sólidos, cuando se medían campos de velocidades por la técnica de Laser Speckle (LSV), que en 1977 fue adoptada con resultados muy satisfactorios para la medición de velocidades con un patrón parabólico en flujo laminar en un tubo. En 1984, aparecía como un avance igualmente innovador el concepto de "sembrado de partículas", es decir, la adición de elementos puntuales que al ser iluminados permitiesen su rastreo a través de la captura de imágenes, dando origen a la denominación de la técnica como PIV. Cuando esta técnica se aplica a estudios de flujos naturales en campo se habla entonces de LSPIV. Dado que en la implementación se cubren grandes áreas obtenidas a través de imágenes oblicuas del flujo en superficie, es necesario un paso adicional: la orto-rectificación de la imagen. Otros procedimientos necesarios marcan la diferencia entre ambas técnicas, por ejemplo, determinar la posición o las posiciones en las cuales se hará la grabación de las imágenes de manera que se logre mitigar dos problemas típicos que ocurren cuando se quiere hacer medición en campo. El primero corresponde al efecto generado por la luz sobre ciertas zonas del área visible de las cámaras sobre todo cuando se trabaja únicamente con luz natural, zonas de sombra o reflejos que degradan la calidad de la imagen (Hauet et al.) El segundo problema es la insuficiencia de trazadores sobre el flujo o cualquier otro elemento sobre la superficie cuyas posiciones sucesivas puedan ser determinadas en forma efectiva.

2.2. Clasificación PIV y LSPIV

Como una caracterización de los métodos de medición de campos de velocidades, K. D. Hinsch [1], propone que estos pueden clasificarse según la terna (k, l, m) , donde $k=1, 2, 3$ indica el número de componentes de velocidad que se miden, $l=0, 1, 2, 3$ señala la cantidad de dimensiones espaciales del dominio de medición, y $m=0,1$ indica si el registro temporal de la medición es instantáneo o continuo. En estos términos, un sistema de medición puntual puede llegar a la categoría $(3, 0, 1)$ en el mejor de los casos. Por otra parte, el sistema PIV más difundido alcanza la clasificación $(2, 2, 0)$ por brindar medidas de dos componentes de velocidad en un plano aunque en tiempos discretos, que también se define como PIV 2D-2C. Es la forma original de PIV en laboratorio y la más simple, el "sistema" está comprendido por un láser y una cámara. Hoy en laboratorio es muy común usar PIV $(3, 2, 0)$ que implica la utilización de dos cámaras. La máxima clasificación alcanzada es $(3, 3, 0)$, y corresponde a una técnica de correlación 3D denominada "holographic PIV". Cuando se trata de la técnica de PIV llevada al análisis de grandes cursos naturales, es decir LSPIV, las condiciones no permiten tener otra clasificación que no sea 2D-2C.

. La mayoría de los sistemas PIV actuales pertenecen a esta categoría. Además, indicaremos que el objeto de nuestro estudio será la técnica aplicada a flujos naturales en Gran Escala con análisis diferido en el tiempo (NRT, "non real time").

2.3. Principio de funcionamiento de PIV clásico

2.3.1. Componentes

Implementar la técnica de PIV demanda básicamente cuatro componentes:

1) Una región que contenga al fluido con las partículas a evaluar. En algunos casos el fluido deberá ser ópticamente de baja opacidad, mientras que en otras ocasiones se analizarán perturbaciones sobre la superficie o también partículas sembradas sobre ella que no requieren de un fluido transparente o traslúcido.

2) Una fuente de luz (*laser*) para iluminar la zona de interés (un plano o un volumen).

3) Sistema de adquisición, transmisión y/o almacenamiento basado en una cámara CCD/CMOS, o filmadora, o placas holográficas;

4) Sistema de procesamiento de datos para extraer la información de velocidades.

Las variantes de cómo implementar PIV se analizan evaluando estos ítems, según necesidades o posibilidades. Por ejemplo, en nuestro estudio analizaremos una superficie, y solo un dispositivo de captura digital será necesario. Otra variante es que el láser puede ser pulsado o continuo. Respecto de los sistemas de adquisición, la resolución del dispositivo es de suma importancia si consideramos los elementos que deben ser encuadrados (para luego tener referencias de distancias conocidas) y el tamaño de las propias partículas cuya posición luego deberá ser determinada sucesivamente.

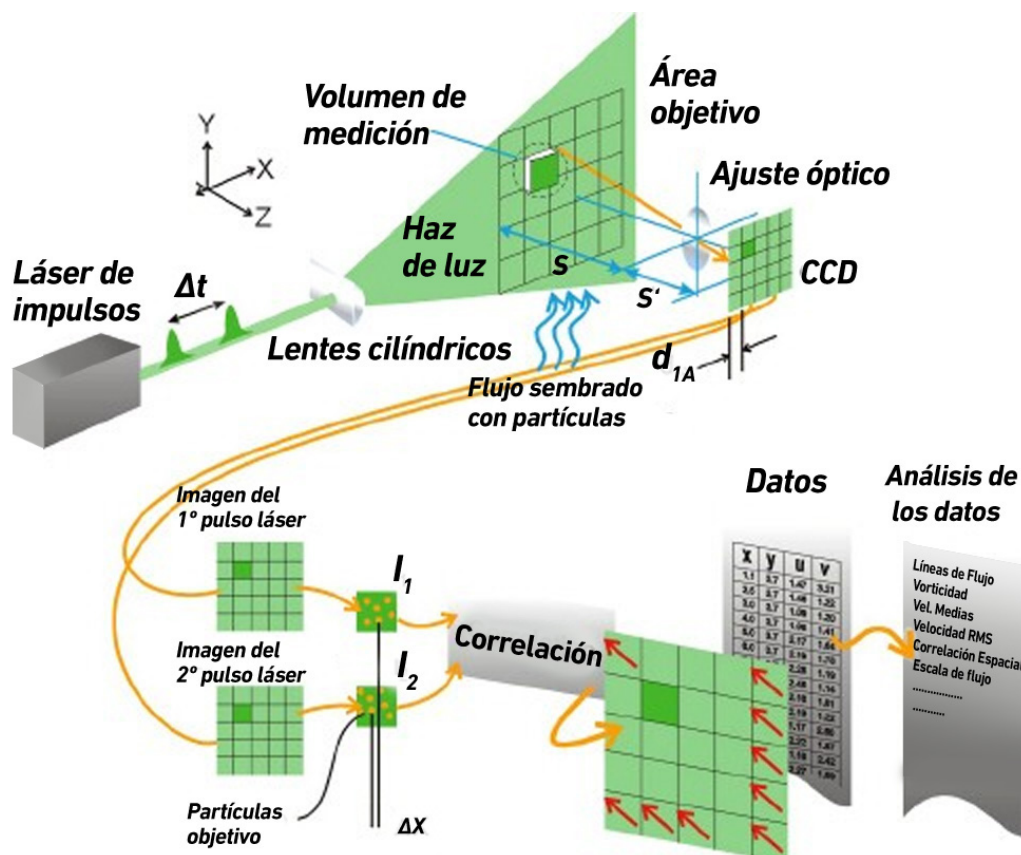


Figura 2.1 Esquema del conjunto de elementos involucrados en la técnica de PIV.

2.3.2. Proceso digital de Correlación Espacial en PIV

Antes de entrar en la descripción del método de Correlación Cruzada, debemos empezar por definir los elementos básicos que nos serán de utilidad para comprender el fenómeno. Tenemos entonces un par de imágenes, tomadas sobre una fuente de puntos, generalmente iluminados con un emisor adecuado, con un intervalo de tiempo entre ellas. En principio, con este par de imágenes solo podemos obtener el desplazamiento en línea recta de determinadas partículas (o grupo de ellas, dependiendo de la densidad del “sembrado” sobre el fluido de estudio), no podemos obtener por ejemplo variables que podríamos llamar “de curvatura”, como la aceleración.

Este par de imágenes puede producir un campo de vectores de desplazamiento lineal donde cada vector se define al analizar el movimiento de los grupos de partículas. En la práctica este se logra a través de la extracción de muestras o, como se las suele denominar, Áreas de Interrogación, para luego analizarlas por medio de procesos estadísticos. (Figure 2.1).

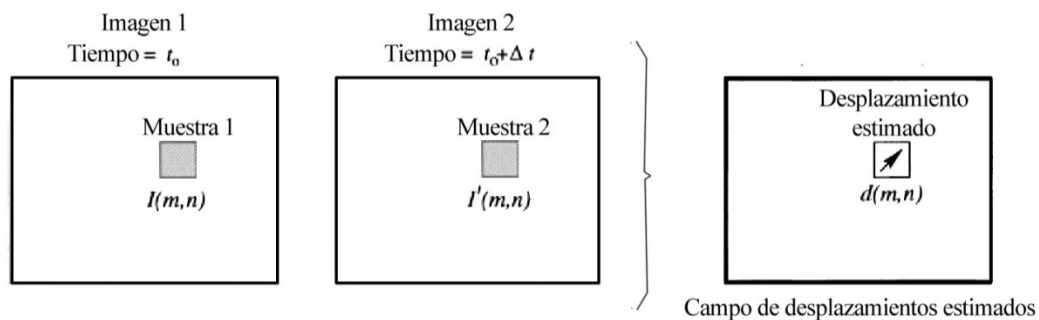


Figura 2.2 Esquema del proceso de muestreo de imagen “Fotograma a Fotograma” asociado a la técnica de PIV.

Desde un punto de vista del procesamiento de imágenes, se puede considerar a la primer imagen como el material de entrada que alimenta un sistema que da como salida una segunda imagen, la segunda del par (Figura 2.2). La Función de Transferencia H del sistema convierte la imagen de entrada I en la imagen de salida I' la que ha sido compuesta por medio de una Función de Desplazamiento d y otra de Adición de Perturbación, N . La función objeto de nuestro estudio es la que está estrechamente relacionada con el vector d , y que es la responsable del desplazamiento del grupo de partículas de una imagen a la otra. Esta función se puede describir, por ejemplo, por medio de una convolución con $\delta = (x - d)$.

El proceso de adición de perturbación, N , en la Figura 2.2, modela el efecto debido al ruido (“noise”) propio del funcionamiento de los medios de captura digital/analógica, y las perturbaciones típicas de los flujos naturales en tres dimensiones, entre otras cosas. Si ambos d y N son conocidos, debería ser posible usarlos como funciones de transferencia, para aplicarlos sobre la imagen de entrada I y producir así la imagen de salida I' . Ya con ambas imágenes I e I' conocidas el objetivo es estimar el campo de desplazamientos d pero excluyendo los efectos del proceso de adición de perturbación N . Como de hecho las imágenes no son continuas, es decir, el fondo negro no puede proveer ningún tipo de información de movimiento, es necesario estimar la función de desplazamiento d usando un enfoque estadístico basado en la utilización de Áreas de Interrogación localizadas (o muestras, “samples”). Una posible estrategia para obtener una función de desplazamiento local podría ser la de aplicar algún método de “deconvolución” del par de imágenes. En principio, lograr esto sería posible dividiendo las

respectivas Transformadas de Fourier entre ellas. Este método funciona satisfactoriamente cuando el “ruido” en las imágenes es insignificante, sin embargo el ruido asociado al material filmico está siempre presente y aún más, tiende a degradar rápidamente la producción de los datos de interés. No obstante, sin que lo anterior anule la utilidad de esta aproximación teórica, el contraste de las partículas objetivo por sobre el ruido omnipresente, suele ser lo suficientemente acusado como para hacer viable lo que más adelante se define como “estimación sub-píxel” del desplazamiento.

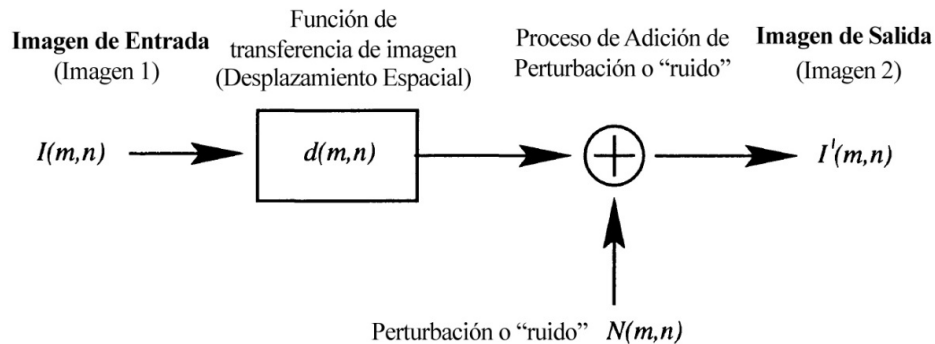


Figura 2.3 Modelo idealizado de procesamiento digital lineal, describiendo la relación funcional entre dos cuadros sucesivos de una filmación sobre un campo de partículas.

Pero más que estimar una función de desplazamiento d en forma analítica, el problema reside en la elección de un método que permita determinar el mejor ajuste local entre dos imágenes en términos estadísticos. Esto se logra a través del uso de una función discreta de Correlación Cruzada, cuya formulación integral es:

$$R_{II}(x, y) = \sum_{i=-K}^K \sum_{j=-L}^L I(i, j)I'(i + x, j + y) \quad \text{Ec. 2.1}$$

Las variables I e I' son las muestras (conteniendo información, por ejemplo, en términos de intensidad lumínica) que se extraen de las imágenes que conforman el par, siendo I' mayor que la ahora llamada muestra patrón I . Esto es así pues 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 píxeles superpuestos, se obtiene un valor de Correlación Cruzada $Rn(x, y)$. A través de la sucesiva aplicación de esta operación para un rango de posiciones distintas $(-M \leq x \leq +M, -N \leq y \leq +N)$ se puede conformar un plano de correlación de tamaño $(2M + 1) \times (2N + 1)$.

Esto se muestra gráficamente en la Figura 2.3. Para aquellas posiciones en las cuales las muestras de las imágenes de partículas se encuentran bien alineadas o coincidentes, la suma de los productos de intensidades de píxeles será mayor que en cualquier otro lugar, resultando en un alto valor Rn Correlación Cruzada en esa posición (ver Figura 2.4). Esencialmente, la función de Correlación Cruzada mide en términos estadísticos el grado de coincidencia entre dos muestras para una posición dada. 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.

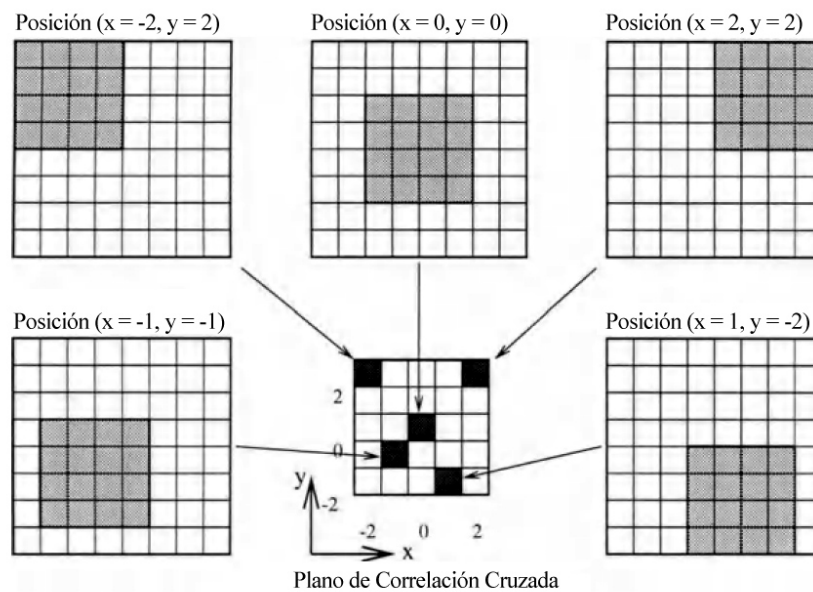


Figura 2.4 Ejemplo de la conformación de un Plano de Correlación por medio de la Correlación Cruzada Directa. En este caso un patrón de 4x4 píxeles se hace correlacionar con una muestra mayor de 8x8 píxeles, produciendo finalmente un Plano de Correlación de 5x5 píxeles.

Examinando esta implementación directa de la función de Correlación Cruzada, dos cosas resultan evidentes:

- 1) El número de multiplicaciones por cada valor de correlación se incrementa proporcionalmente al tamaño de la ventana de interrogación o muestra.
- 2) El método de Correlación Cruzada implica necesariamente que los análisis se hacen sobre variaciones lineales de posición, es decir, no se tienen en cuenta rotaciones ni deformaciones, que son transformaciones que exceden las posibilidades de este método de primer orden.

Por ello, la Correlación Cruzada entre dos muestras de imágenes de partículas solo brindará información acerca de vectores de desplazamiento de primer orden, esto es, la variación lineal media de la posición de las partículas dentro de la ventana de interrogación. Esto significa que el tamaño de la ventana de interrogación se deberá elegir en forma conveniente, lo suficientemente pequeña como para que puedan resultar despreciables efectos de segundo orden como, por ejemplo, gradientes de desplazamiento.

La primera observación que podemos hacer involucra el carácter cuadrático que tiene el incremento en la cantidad de multiplicaciones que se hacen necesarias al aumentar el tamaño de la muestra, lo que lleva a un crecimiento considerable del esfuerzo computacional. En una típica área de interrogación de la técnica de PIV, se trabaja con valores del orden de varios miles de píxeles, siendo el rango dinámico en el desplazamiento de una variabilidad que puede ser tan grande como ± 10 y hasta ± 20 píxeles, lo que requiere generalmente de hasta un millón de multiplicaciones y sumatorias para conformar un solo plano de correlación.

Claramente, teniendo en cuenta los varios miles de vectores de desplazamiento que se pueden obtener de una simple captura de video para PIV, se hace evidente la necesidad de formas más eficientes de computar la correlación.

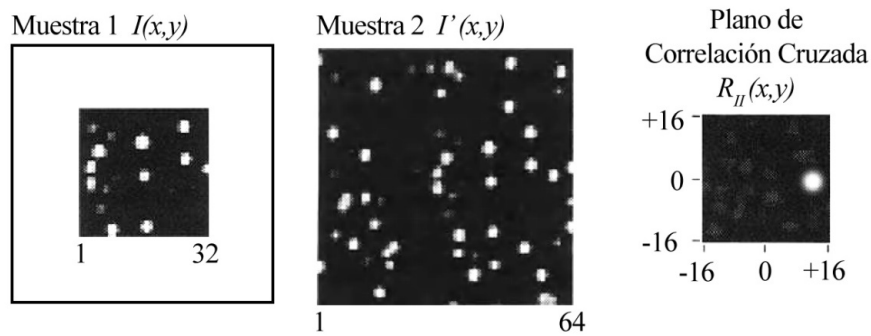


Figura 2.5 La función de Correlación Cruzada R_n (a derecha) computada por medio de correlación de un patrón menor de 32×32 píxeles con otra muestra mayor de 64×64 píxeles. La posición que evidencia el mejor ajuste se encuentra aproximadamente 12 píxeles hacia la derecha.

La alternativa a calcular la Correlación Cruzada directamente utilizando la Ecuación 2.1, es teniendo en cuenta la ventaja que ofrece el Teorema de la Correlación que establece que la Correlación Cruzada de dos funciones es equivalente a una multiplicación de complejos conjugados de sus respectivas Transformadas de Fourier:

$$R_{II} \iff \hat{I} \cdot \hat{I}'^* \tag{Ec. 2.2}$$

Donde \hat{I} e \hat{I}' son las Transformadas de Fourier I e I' , respectivamente. En la práctica, la Transformada de Fourier es implementada de forma eficiente para datos discretos (variable no continua) usando la Transformación Rápida de Fourier o FFT (Fast Fourier Transform), que reduce el costo computacional de un número de operaciones que crece proporcionalmente a N^2 , a un número menor, mucho más eficiente, que crece según $N \log_2 N$, como se observa en la Figura 2.6

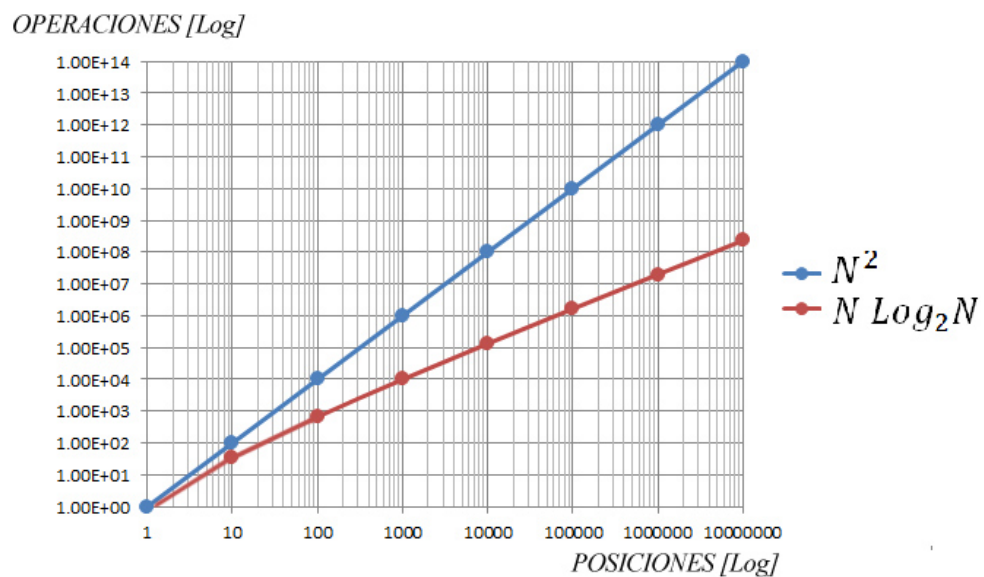


Figura 2.6.Reducción del costo computacional al aplicar el Teorema de Correlación, por medio de la Transformación Rápida de Fourier. A modo de ejemplo, para un análisis de mil posibles ubicaciones, el trabajo es 1000 veces menor, mientras que para un volumen de 1 millón de ensayos, la labor se reduce 50.000 veces.

2.3.3. Análisis del plano de Correlación Cruzada en MATLAB

Para ejemplificar gran parte de lo explicado en este capítulo, y mediante el uso de unas pocas líneas de código en MATLAB, el algoritmo incluido en la función **normxcorr2 (pattern, sample)** nos da el resultado de correlación para las diferentes superposiciones posibles.

Podemos observar:

- Las dimensiones de la matriz del mapa de correlación resultan de ensayar todas las combinaciones, incluidas las de borde donde siempre hay al menos un pixel superpuesto:

Muestra $a = 10 \text{ px}$ $b = 10 \text{ px}$

Patrón $m = 3 \text{ px}$ $n = 3 \text{ px}$

Mapa de CC Resultante $u = (a + m - 1) = 22 \text{ px}$ $v = (b + n - 1) = 22 \text{ px}$

-Efectos de borde, acusados por un valor negativo de correlación. Ver Figura 2.8 b

-Zonas de Correlación No Nula, donde los valores varían alternadamente entre positivos y negativos debido a que, o aumenta el área de superposición pero hay poca variabilidad de intensidad, o el área de solape es menor, pero se trata de pixeles de alto contraste. Ver Figura 2.8 c

-Zona de máximo ajuste – Pico de Alta Correlación: El valor de CC es de +1, y se corresponde con un solape total de todos los pixeles del patrón, sobre la zona buscada en la muestra, con exactamente las mismas intensidades.

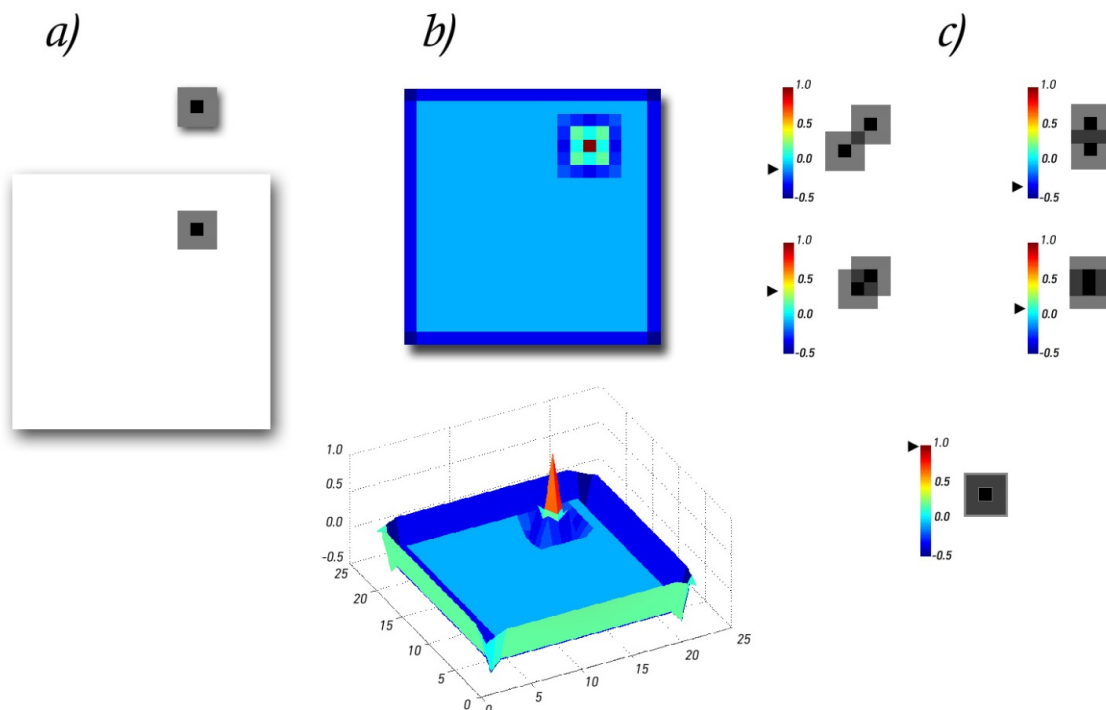


Figura 2.7 a) Imágenes del patrón de interés y de la muestra donde se desea localizar el patrón. b) Mapa de Correlación en plano 2D y en 3D obtenidos en MATLAB. c) Valores de correlación para cada una de las posibles posiciones a medida que el patrón se aproxima a la zona de máximo ajuste.

El mismo algoritmo se aplicó para ejemplificar como resultaría el mapa de correlación aplicado a una ventana de interrogación de tamaño arbitrario, aplicado a un par de muestras, tomadas de una secuencia de dos imágenes de un flujo natural.

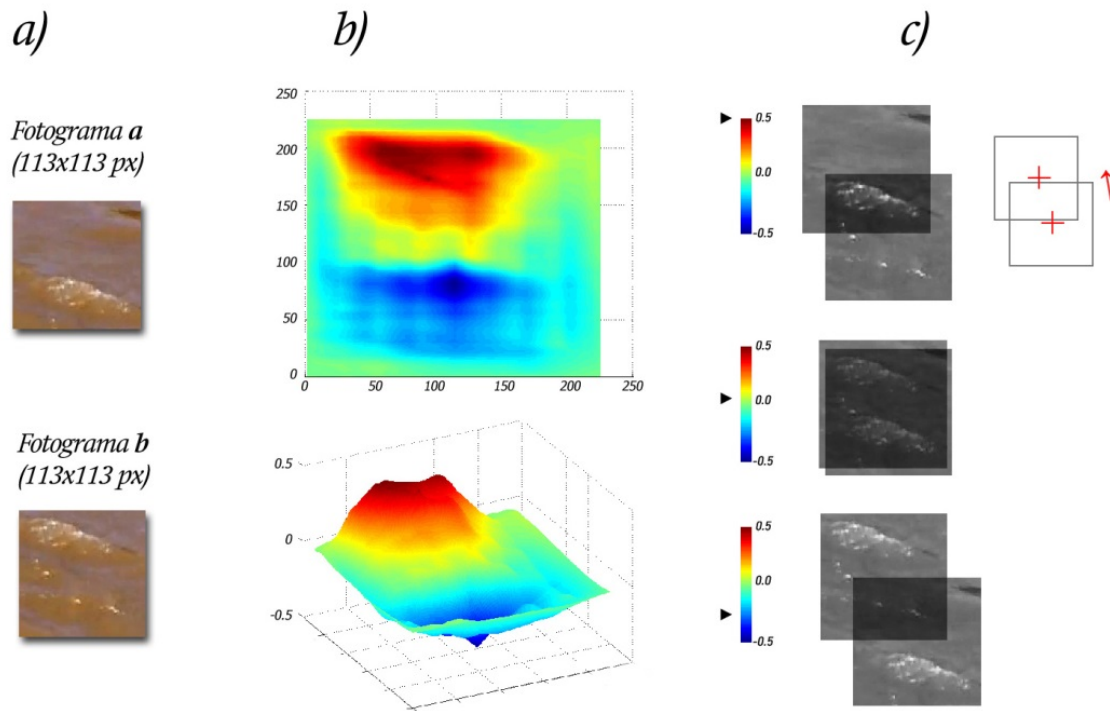


Figura 2.8 a) Imágenes de dos muestras de un flujo natural (Río Suquía). b) Mapa de Correlación en plano 2D y en 3D obtenidos en MATLAB. c) Valores de CC para cada una de las posibles posiciones y el vector de desplazamiento estimado considerando la distancia en píxeles entre centroides de cada muestra, luego de obtenido el pico de correlación.

2.4. PIV a Gran Escala

En la mayoría de los casos, donde se implementan en instalaciones experimentales de pequeña escala las técnicas de medición de velocidad de flujo por imágenes, donde la cámara se coloca perpendicular a la dirección del flujo, se necesita una corrección de las imágenes durante la fase de adquisición debido a la distorsión provocada por la forma de la lente de la cámara usada. En mediciones de velocidades superficiales del flujo a gran escala (en el campo, por ejemplo), se presenta una problemática adicional que es la rectificación de las coordenadas del Mundo Real a una proyección ortogonal. Dicha rectificación es necesaria por la oblicuidad de la cámara al momento de la adquisición de las imágenes ya que no es posible colocar la cámara perpendicular a la dirección del flujo. Dos alternativas metodológicas existen actualmente para realizar dicha corrección: la rectificación de las imágenes durante la fase de adquisición o la rectificación de los resultados en la etapa de post-procesamiento de los resultados. El Post-Procesamiento que consiste a rectificar los resultados a una vista ortogonal y calibrarlos para transformar las velocidades en [pixel/intervalo de imagen] a [m/s]. Para ello se requieren al menos cuatro puntos no alineados, con distancias conocidas entre ellos, para transformar la imagen obtenida en perspectiva en una imagen de proyección orto-normal.

La principal diferencia con el PIV tradicional de laboratorio es la escala del área de estudio: es pasar de las superficies del orden de 10-2 m² en laboratorio a la escala del río, del orden de 5000 m², de ahí surgió el nombre de PIV a Gran Escala (o LSPIV de sus siglas en inglés Large Scale Particle Image Velocimetry) utilizado para esta aplicación.

Diferencias con el PIV clásico

Como lo hemos visto anteriormente, la principal diferencia entre el PIV tradicional en laboratorio y el LSPIV es el la escala del área de estudio. Esto genera dos problemas principales:

- Par enmarcar toda la zona de estudio, lo más probable es que la serie de imágenes se saca con una cámara digital ubicada oblicuamente al río. Las imágenes resultantes son distorsionadas por efectos de perspectiva, por lo tanto lo son también los resultados de desplazamiento después el procesamiento. Eso implica la rectificación digital de los resultados en post-procesamiento. A partir de 4 Puntos de Controles relavados y no alineados se aplica el proceso de homografía (Patalano et al. 2013) para rectificar los resultados procesados y calibrar estos últimos.

- Una pobre resolución asociada a un gran ángulo causa una gran diferencia de áreas integradas en los píxeles. Cuanto más cerca de la cámara habrá áreas mucho más detalladas que las zonas más lejanas, donde el detalle del trazador se pierde, suavizado por el gran área que representan los píxeles.

Otra diferencia importante es la aplicación de la técnica a un entorno no natural que no sea controlable. En el laboratorio, podemos regular el tipo de iluminación y la siembra de los trazadores de forma óptima. En la naturaleza, la iluminación es la del sol, y depende de las condiciones meteorológicas y de la hora del ensayo. La superficie de los ríos suele se marcada por sombras o reflejos.

La siembra natural del río suele ser baja. En crecida, escombros transportados a la superficie son buenos trazadores. La siembra es una cuestión importante, ya que sin trazador, ninguna medida es posible.

CAPITULO 3: ENTORNO DE MODELADO 3D

3. ENTORNO DE MODELADO 3D

3.1. Introducción

Los entornos de modelado 3D por computadora son un conjunto de herramientas informáticas, destinadas a producir imágenes, nucleadas en una interfase 2D que trata de simular en pantalla la complejidad propia de un ambiente natural. Esto incluye, objetos planos y espaciales, luces, texturas, partículas, cámaras e incluso interacciones cinemáticas y dinámicas entre ellos. Además, el tiempo, en su carácter de cuarta dimensión, juega un papel importante ya que es posible animar todos los elementos presentes en la escena.

Este tipo de gráficos se originan mediante un proceso de cálculos matemáticos sobre las entidades geométricas tridimensionales, y cuyo propósito es conseguir una proyección visual en dos dimensiones para ser mostrada en una pantalla o impresa en papel.

En general, el arte de los gráficos tridimensionales es similar a la escultura o la fotografía, mientras que el arte de los gráficos 2D es análogo a la pintura. En los programas de gráficos por computadora esta distinción es a veces difusa: algunas aplicaciones 2D utilizan técnicas 3D para alcanzar ciertos efectos como iluminación, mientras que algunas aplicaciones 3D primarias hacen uso de técnicas 2D.

3.2. Creación de gráficos 3D

La secuencia de trabajo en todo entorno 3D por ordenador incluye las siguientes etapas:

3.2.1. Modelado

Como se ha dicho, el material básico de estos entornos son los objetos o entidades 3D. Se trata de superficies espaciales sobre las cuales luego se calculan el resto de los comportamientos físicos.

La etapa de modelado consiste en ir dando forma a objetos individuales que luego serán usados en la escena creada, usando una colección de puntos en el espacio dentro de un espacio tridimensional, conectados por varias entidades geométricas tales como triángulos, líneas, superficies curvas, etc. Existen diversos tipos de geometría para modelador, dependiendo del trabajo y la precisión deseada, NURBS y modelado poligonal o subdivisión de superficies son los más extendidos. Además, aunque menos usado, existe otro tipo llamado "modelado basado en imágenes" o en inglés *image based modeling* (IBM). Consiste en convertir una fotografía a 3D mediante el uso de diversas técnicas, de las cuales, la más conocida es la fotogrametría cuyo principal impulsor es Paul Debevec.

Las tres formas de representar un modelo son:

Modelado Poligonal: Son puntos en un espacio 3D, llamados vértices, están conectados para formar una “polygonal mesh”. La gran mayoría de los modelos 3D hoy en día están contruidos como modelos de textura poligonal, ya que su estructura depende de una matriz de puntos y los cálculos que luego se realizan sobre cada polígono implican, como único paso previo, una interpolación lineal entre las coordenadas que definen ese plano. Sin embargo, el nivel de detalle requerido según la proximidad del objeto con la cámara, hace que el volumen de polígonos sea elevado, aun para superficies muy simples, por lo que se hace evidente la necesidad de un modelo cuya superficie sea una función continua y no una serie de puntos discretos.

Modelado de curvas: Las superficies están definidas por curvas, las cuales son influenciadas por la ponderación del control de puntos. La curva sigue (pero no necesariamente interpola) los puntos. Incrementar el peso de un punto va a enviar la curva más cercana a ese punto. Los tipos de curva incluyen Non-Uniform Rational B-Spline (NURBS), Splines, Patches y Geometric Primitives. Las bondades de estos modelos se hacen evidentes cuando se trabaja con amplias superficies de para producción industrial, como el conformado del metal para carrocerías de autos y el fresado CNC de elementos mecánicos de alta precisión.

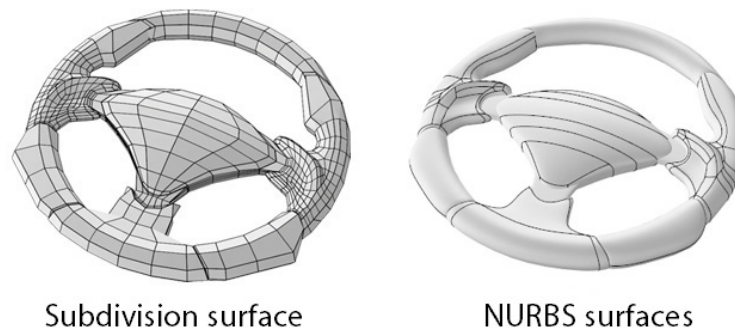


Figura 3.1 Un volante modelado por medio de Polígonos, cuya detalle luego se mejora a través de un modificador de Superficie de Subdivisión (Izquierda) y el mismo volante modelado a través de Superficies NURBS, es decir, curvas polinomiales espaciales suavizadas (Derecha).

Escultura digital - Sigue siendo por lejos un nuevo método de modelado, esculpir en 3D se ha vuelto muy popular en los últimos años. Tipos de esculpido digitales

-Desplazamiento, el cual es el más usado entre aplicaciones en este momento. Usa un modelo denso (a veces generado por medio de Superficies de Subdivisión o Subdivision Surfaces, que tienen como material base una malla poligonal simple de menor resolución) y almacena las posiciones modificadas de los vértices en un mapa de 32 bit que permite visualizar y trabajar en forma plana, lo que luego se traduce en desplazamientos espaciales.

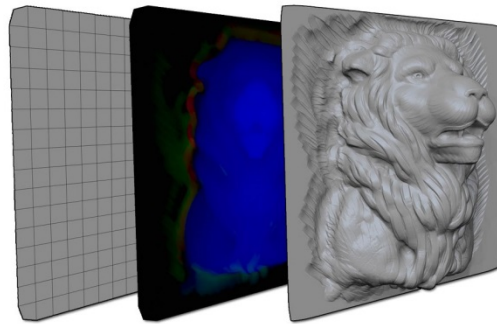


Figura 3.2 Proceso de desplazamiento de malla. A partir de una malla plana uniforme, se logra la conformación de una superficie tridimensional tras aplicar un modificador de subdivisión y una imagen (o mapa) en la que cada pixel tiene un determinado valor de elevación.

-Volumétrica, que se basa libremente en Voxel's, es decir, Volumetrical Pixels, como si cada modelo fuese una construcción de pequeños bloques cúbicos. Tiene capacidades similares como la técnica de desplazamiento, pero no sufre de polígonos forzados cuando no hay suficientes polígonos en una región para lograr una deformación.

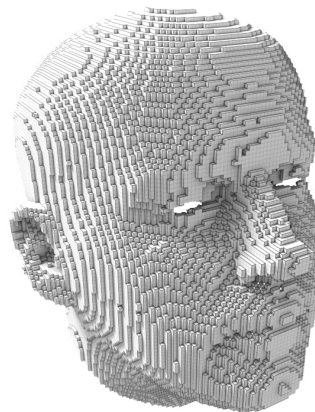


Figura 3.3 Cabeza humana modelada por medio del uso de Voxels.

-Teselación dinámica, es similar a Voxel pero divide la superficie usando la triangulación para mantener una superficie lisa y permitir detalles más finos. Estos métodos permiten una exploración más artística, ya que siempre se regenera la tipología a medida que se agregan detalles. Se trata de pasar de un modelo de cantidad de polígonos fijos a uno que tiene resolución fija. Es decir, si en el proceso de esculpido un polígono se distorsiona demasiado o sus dimensiones son mucho mayores que la del resto, este se subdividirá, al igual que su entorno, con el fin de obtener una malla homogénea. La nueva malla por lo general tiene la información original de alta resolución, y se puede transferir los datos de desplazamiento o datos de los mapas normales para aplicarlos luego sobre otros objetos de diferente resolución.

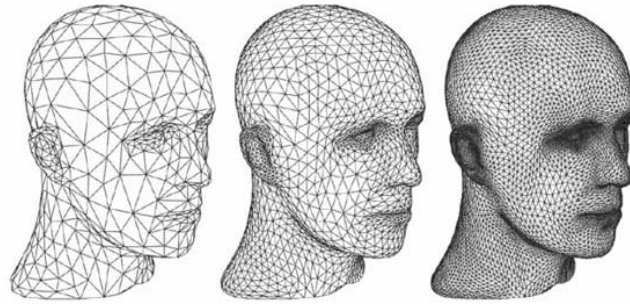


Figura 3.4 Cabeza humana modelada gracias al uso de superficies de subdivisión dinámica. A medida que se agregan detalles más finos a la escultura, el grado de resolución debe aumentarse.

3.2.2. Mapeado y Materiales

Todos los modelos 3D incrementan considerablemente su similitud con la realidad cuando poseen texturas bien elaboradas y correctamente posicionadas sobre su superficie. Estas texturas con conocidas como “mapas” y pasan a formar parte de un “material” cuando se las incluye dentro de algún tipo especial de conjunto de algoritmos que controlarán como la luz incide sobre la superficie y la imagen aplicada en ella. Esto incluye el brillo, rugosidad, transparencia y translucidez, reflexión y refracción, filtrado de luz, capacidad de generar emisión luminosa, entre muchos más.

El “mapeado” incluye no solo el trabajo con las imágenes en sí mismas sino también como se aplican sobre la superficie en términos de posición, escala y rotación. Cada objeto en 3D tiene, para cada uno de sus vértices, determinadas coordenadas al igual que cualquier imagen. Definir como se corresponden estas coordenadas para lograr un objeto altamente realista es de crucial importancia.

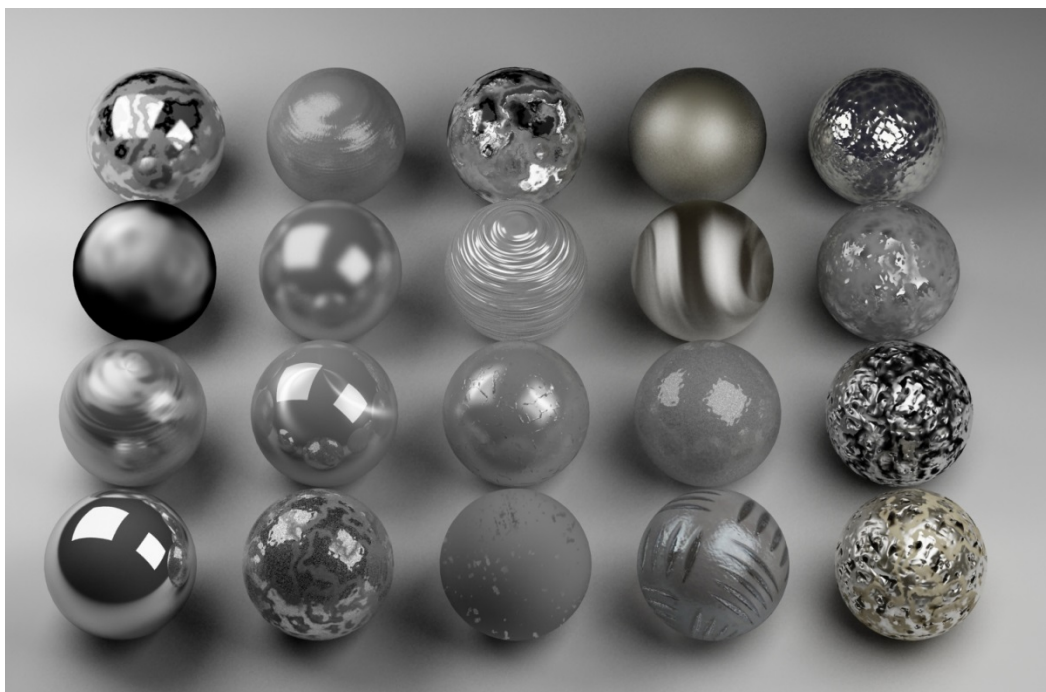


Figura 3.5 Diferentes materiales de uso más extendido en todo tipo de entornos 3D.

3.2.3. Iluminación

Creación de luces de diversos tipos: puntuales, direccionales en área o volumen, con distinto color o propiedades. Esto es la clave de una animación. Gran parte de la iluminación en 3D requiere del entendimiento físico de la luz en la realidad, este entendimiento puede ir desde lo más básico en el tema como por ejemplo el concepto de iluminación global hasta comportamientos complejos y extraños de la luz como la dispersión en superficies y sub-superficies.

Iluminación global

En Gráficos por computadora, la Iluminación Global, Iluminación indirecta, o GI (Global Illumination), se conoce a un conjunto de algoritmos que tratan de simular o aproximar, la forma en que la luz emitida por alguna fuente, rebota en cada superficie de la escena iluminando espacios que la luz directa producida por la fuente no alcanzaría a iluminar. Los primeros algoritmos de iluminación indirecta buscaban simular la luz como fotones, de ahí uno de los algoritmos más implementados es el llamado Photon Map.

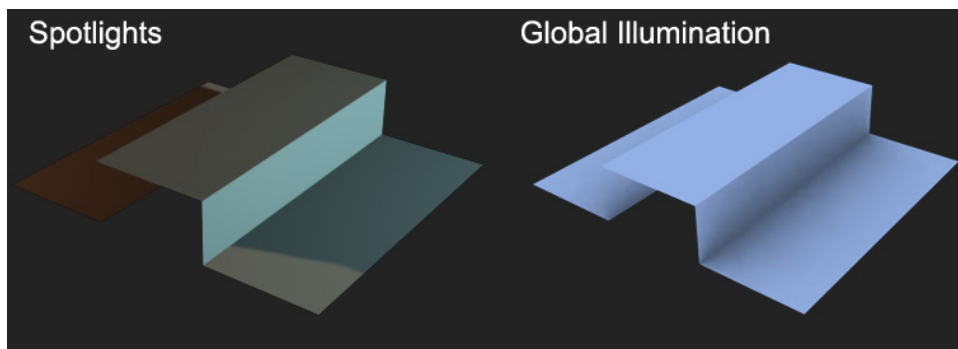


Figura 3.6 A la izquierda se observa una pieza metálica plegada con dos fuentes de luz puntual. A derecha, la misma pieza pero esta vez se ha activado la Iluminación Global y se ha calculado cada uno de los rebotes de los fotones emitidos por las fuentes lumínicas.

3.2.4. Animación

Los objetos se pueden animar en cuanto a:

- Transformaciones básicas en los tres ejes (XYZ), rotación, escala y traslación.
- Forma:
 - Mediante esqueletos: a los objetos se les puede asignar un esqueleto, una estructura central con la capacidad de afectar la forma y movimientos de ese objeto. Esto ayuda al proceso de animación, en el cual el movimiento del esqueleto automáticamente afectará las porciones correspondientes del modelo.
 - Mediante deformadores: ya sean cajas de deformación (*lattices*) o cualquier deformador que produzca, por ejemplo, una deformación sinusoidal.
 - Dinámicas: para simulaciones de pelo, dinámicas rígidas de objeto.



Figura 3.7 Esquema de movimiento de un personaje de animación.

3.2.5. Renderizado

Se llama renderización al proceso final de generar la imagen 2D o animación a partir de la escena creada. Esto puede ser comparado a tomar una foto o en el caso de la animación, a filmar una escena de la vida real. Generalmente se buscan imágenes de calidad fotorrealista, y para este fin se han desarrollado muchos métodos especiales. Las técnicas van desde las más sencillas, como el render de alambre (*wireframe rendering*), pasando por el render basado en polígonos, hasta las técnicas más modernas como el *scanline rendering*, el trazado de rayos, la radiosidad o el mapeado de fotones.

El software de render puede simular efectos cinematográficos como el *lens flare*, la profundidad de campo, o el *motion blur* (desenfoque de movimiento). Estos artefactos son, en realidad, un producto de las imperfecciones mecánicas de la fotografía física, pero como el ojo humano está acostumbrado a su presencia, la simulación de dichos efectos aportan un elemento de realismo a la escena. Se han desarrollado técnicas con el propósito de simular otros efectos de origen natural, como la interacción de la luz con la atmósfera o el humo. Ejemplos de estas técnicas incluyen los sistemas de partículas que pueden simular lluvia, humo o fuego, el muestreo volumétrico para simular niebla, polvo y otros efectos atmosféricos, y las cáusticas para simular el efecto de la luz al atravesar superficies refractantes.

El proceso de render necesita una gran capacidad de cálculo, pues requiere simular gran cantidad de procesos físicos complejos. Los estudios de cine que producen animaciones generadas por ordenador hacen uso, en general, de lo que se conoce como *render farm* (“granja de render”) para acelerar la producción de fotografías.



Figura 3.8 A la izquierda la malla del modelo del vehículo, con solo la iluminación puntual y global a modo de previsualización. A la derecha, el render de la escena final completa.

3.3. Modelado del entorno de simulación

Por medio del uso del software generaremos una condición de flujo cuyo perfil de velocidad será conocido, junto con todos los demás elementos que necesitan como entrada los programas de Velocimetría de Partículas y Rectificación de Imágenes, y que serán indispensables para establecer las condiciones de contorno, es decir, traducir la información obtenida del análisis de pixels-frames a metros-segundo.

3.3.1. Elementos necesarios en la escena

La simulación requiere estos elementos indispensables:

-Flujo superficial: Se materializa a través de una malla de alta resolución a la cual se le ha aplicado un mapa de ruido fractal en escala de grises (Grayscale Fractal Noise). Esta malla es animada por medio del uso de un modificador paramétrico, es decir, se define un volumen de pocos puntos de control, estos se desplazan en el tiempo y todos los vértices ubicados bajo el rango de dominio del punto de control se moverán en igual dirección y sentido pero con una magnitud que dependerá del valor de influencia en función de la distancia a dicho punto. Por ende, la textura aplicada, cuyas coordenadas guardan una relación con las de la malla, presentará un movimiento similar. El perfil de velocidad aplicado es parabólico.

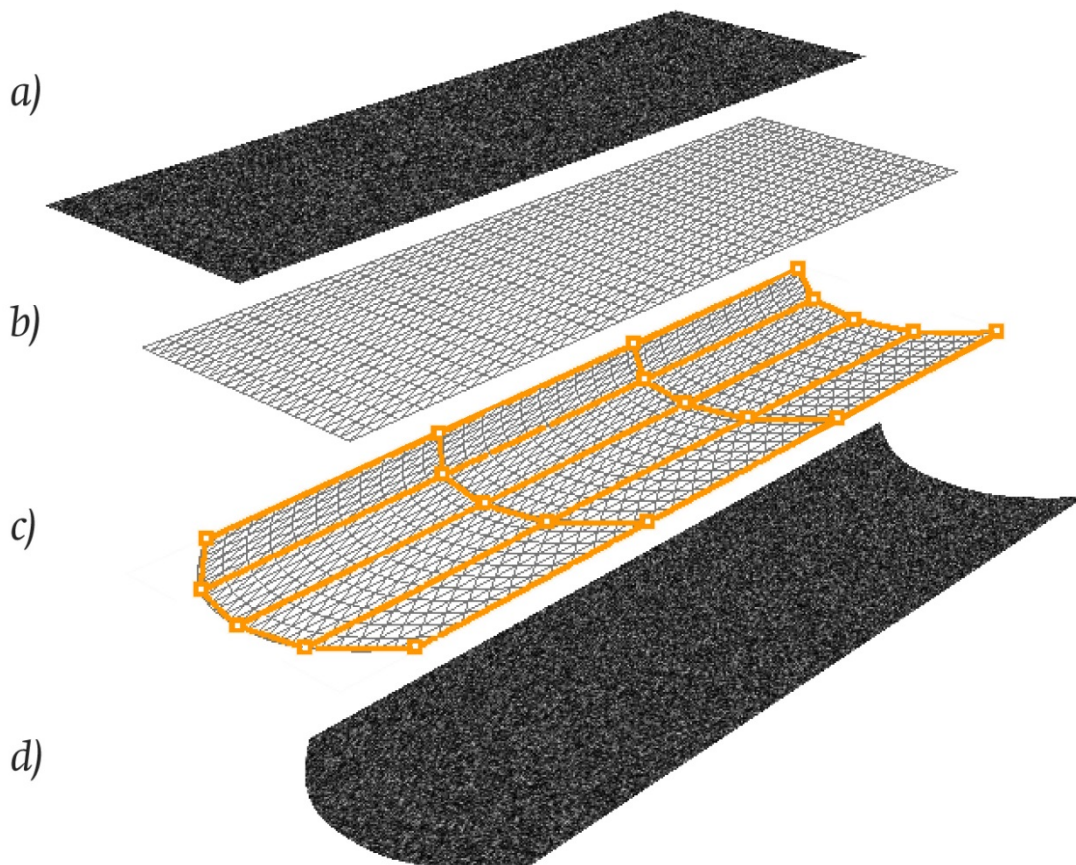


Figura 3.9 a) Textura de Ruido Fractal. b) Malla primitiva de resolución reducida a fin ilustrativo. c) Malla animada por medio del uso de un modificador de Puntos de Control. d) Textura animada con un perfil parabólico.

- Marco de referencia: Se dispone además un grupo de 4 puntos de referencia de distancias conocidas y de contraste adecuado, para realizar la posterior rectificación-calibración según lo explicado en Sección 2.4. Se colocan también marcas de menor jerarquía, separadas a una unidad de distancia, que podemos arbitrariamente decir que representan un metro. Por último, dos marcas centrales que servirán de guía para luego definir una de las secciones de interés a la hora de obtener el perfil de vectores de velocidad.

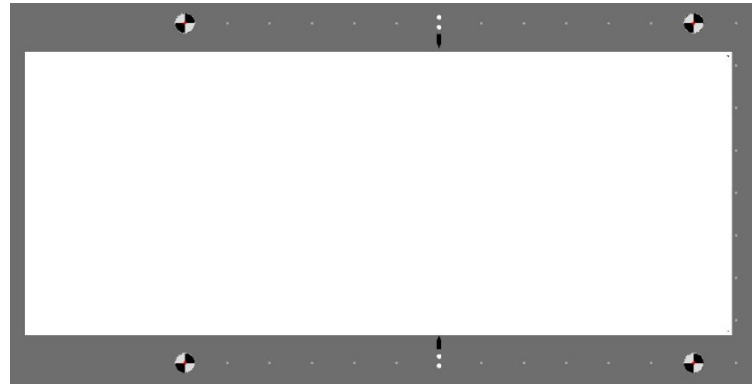


Figura 3.10 Marco de referencia dimensional: en las esquinas, los Puntos de Control para la posterior rectificación, a lo largo de los laterales se ubican marcas de distancia unitaria, por ejemplo, un metro, y finalmente, en el centro, dos marcas para el trazado de la sección transversal de interés o Cross Section.

-Luces y cámaras: Se colocan 10 cámaras representando las posiciones más probables en un relevamiento de campo, considerando la ubicación en las márgenes del curso de agua, sobre un puente o una posible toma aérea por medio de algún medio no tripulado, tal es el caso de los modernos drones.

Además se coloca una fuente de luz, reemplazando la iluminación por defecto del software, a los fines de tener un mayor control y optimizar la producción de imágenes.

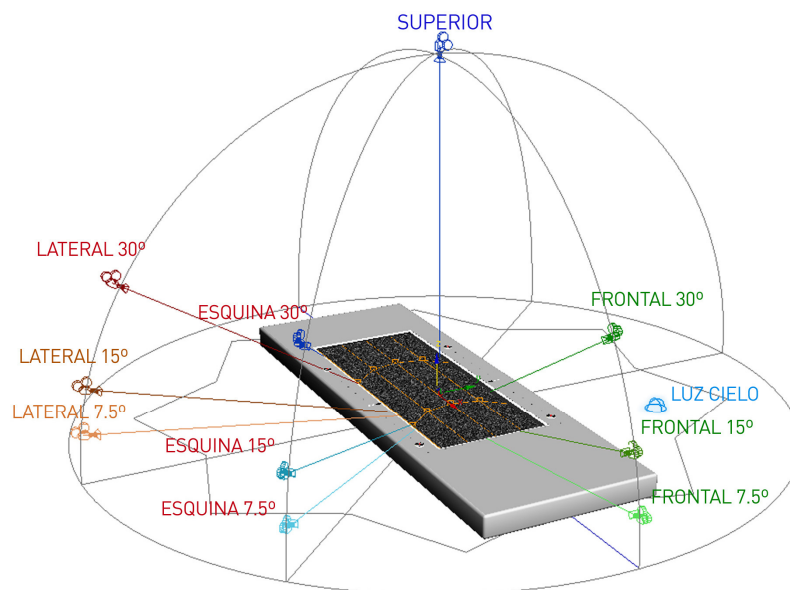


Figura 3.11 Esquema de las cámaras necesarias para la simulación, con sus respectivos nombres y ubicaciones, junto con la fuente de iluminación global.

3.3.2. Renderizado

El fin último del empleo de software 3D es siempre obtener una secuencia de imágenes, que pueden estar opcionalmente incorporadas en un formato de video digital, pero el producto final siempre es uno o varios fotogramas (frames). Por ende, el último paso antes de iniciar la producción del lote de imágenes, es decir el renderizado, es ajustar los parámetros tales como la cantidad de frames por segundo (FPS, frames per second), la resolución, e indicar un aspecto de suma importancia que denominaremos “filtrado”.

La **FPS** se estableció en 30 cuadros por segundo, que se corresponde con la frecuencia utilizada en los formatos denominados de “alta definición”, esto implica que el tiempo entre dos frames consecutivos será de 33.33 milisegundos.

La **resolución** se estableció en 1960 de ancho por 1080 de alto, emulando un formato digital de alta definición (HD, High Definition). Para formatos de menor resolución, en pruebas preliminares, se determinó que para los ángulos más extremos (7.5° respecto de la horizontal) la cantidad de pixeles en movimiento resultaba ser menor que las necesarias para trabajar con una ventana de interrogación estándar de 64px por 64px, que ha demostrado ser optima en términos de resultados y tiempo de procesamiento, para el material filmico que a diario es relevado. Se busca mantener esta variable fija en todo el proceso, por lo que la distancia focal del resto de las cámaras quedo determinada en función del acercamiento necesario para este ángulo crítico.

El **filtrado** es la forma en que los algoritmos determinan como cada cámara interpreta los detalles de la escena. No es un tema menor, de hecho, existe una vasta variedad de opciones, algunas de ellas incluso evocan en sus nombres a conocidas eminencias de la ciencia (Gauss, Mitchell, Lanczos entre otros). El filtrado determina como se interpreta una determinada textura del modelo, en función de la resolución de la cámara. En vistas con puntos de fuga pronunciados, la elección de un tipo en particular de filtrado determinará la definición de los pixeles de la textura animada que se encuentran más lejos del “lente virtual” de la cámara. El filtrado por defecto es de 1 pixel, y para la resolución de trabajo, se asemeja bastante bien a la pérdida de enfoque de acuerdo al ancho supuesto del “cauce”.

Naturalmente, surge la pregunta ¿Por qué no deshabilitar el filtrado y evitar el desenfoque? Pues bien, supongamos que en un determinado pixel dentro de la rejilla de la cámara, entre frame y frame, se trata de representar el movimiento de una línea de objetos, de intensidad alternada, pero cuyo tamaño se asemeja al del pixel, para esa distancia desde la cámara. El algoritmo de renderizado tomará la intensidad del objeto que predomine en dicha área elemental de captura, independientemente del sentido de movimiento, con lo cual, se podría llegar a generar tanto un efecto de inmovilidad como de inversión de desplazamiento, en forma similar a cuando se realizan experimentos de cuerpos vibrantes dejando fija frecuencia de oscilación del objeto y variando la frecuencia de captura o de la luz estroboscópica. El filtrado ayuda a mitigar ese efecto, y en nuestro caso, el algoritmo de correlación cruzada trabajará mejor sobre esas zonas de menor intensidad o definición (en relación a la textura original de ruido fractal) pero que de alguna manera representan mejor el movimiento, evitando la generación de vectores de desplazamiento invertidos.

3.3.3. Formato de almacenamiento

El **formato de salida** elegido es “Secuencia de Imágenes en JPEG”, en alta calidad. Si bien todo formato con compresión evidencia un patrón característico de su algoritmo, en nuestro caso, la textura de ruido fractal tiene una impronta tan pronunciada que la incidencia el efecto mencionado es despreciable. Otros formatos posibles son PNG y TIFF, pero el requerimiento de espacio en disco es mayor y sus bondades, como la posibilidad de incluir canales Alfa o incluso información vectorial, no nos resultan de interés en este trabajo. De todas maneras, todos los formatos de captura de video, de las cuales se obtienen las secuencias de imágenes, poseen algún tipo de compresión similar al JPEG, sea en el fotograma mismo o a través de fotogramas, por lo que la elección de este formato no implica la aparición de ningún tipo de error adicional que no esté asociado a cualquier otro medio de material relevado.

PRIMERA PARTE

ESTUDIOS SOBRE VELOCIDADES

CAPITULO 4: ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN

4. ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN

4.1. Objetivo del procesamiento

El procesamiento a través del software de PIV, las herramientas de rectificación de imagen y el manejo de datos por medio de planillas de cálculo tienen como objetivo final contrastar los perfiles de velocidad obtenidos con el teórico inicialmente generado en el entorno 3D, cuantificando el error relativo a lo largo de las progresivas sobre las secciones transversales propuestas.

4.2. Secuencia de trabajo realizada para la medición aplicando PIV

Cuando se desea estimar el error sobre variables cuya sensibilidad a priori no conocemos, es fundamental respetar una secuencia de trabajo que asegure que cada lote de imágenes sea analizado con la menor influencia posible de toda subjetividad del operador. Para ello se establece el siguiente procedimiento, cada paso y los parámetros asociados que deben mantenerse fijos:

PIVLab

1. **LOAD IMAGES:** Se importan las imágenes de la secuencia y se define como serán analizadas. Se opta por análisis de pares alternados “1-2, 3-4, 5-6 ...”

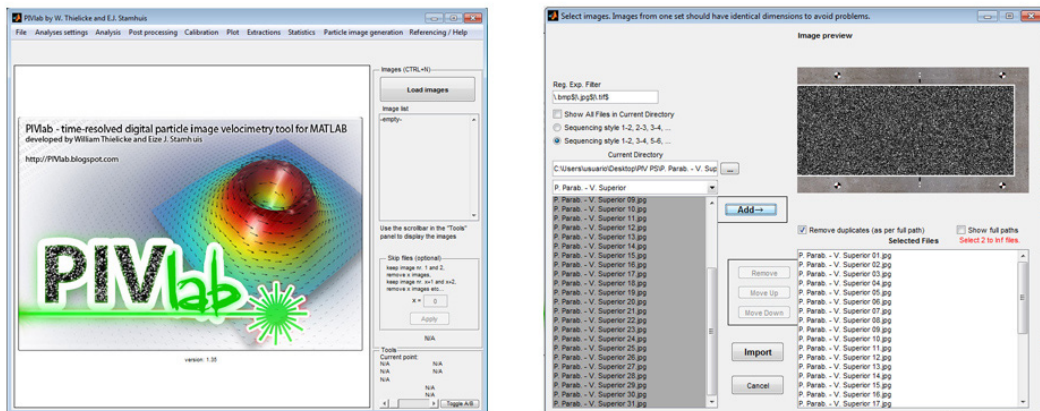


Figura 4.1 Interface PIVLab.

2. **ANALYSES SETTINGS:** Definición del área de análisis, se establece la Región de Interés (ROI, Region of Interest) y de ser necesario, se dibujan las máscaras necesarias, aplicándolas a todos los fotogramas.

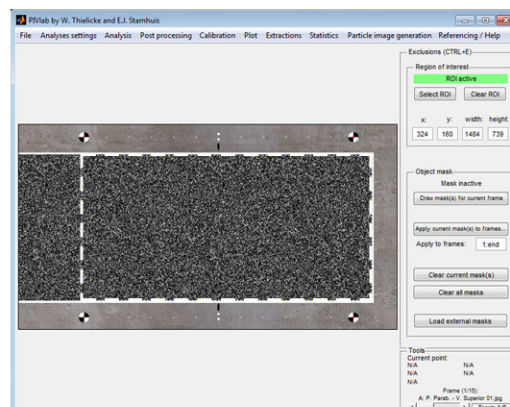


Figura 4.2 Definición de región de interés.

3. ANALYSES SETTINGS: Pre-procesamiento de Imagen, se deja activado el modo CLAHE (Contrast-Limited Adaptive Histogram Equalization) con un tamaño de ventana de 20 px. Este ajuste permite definir áreas discretas dentro de las cuales se mejorará el contraste tratando de lograr un histograma lo más extendido posible. Esto permite obtener más detalle en zonas subexpuestas y sobreexpuestas por separado.

ANALYSES SETTINGS, PIV Settings: El modo de análisis por defecto es FFT (Fast Fourier Transform). El tamaño de la ventana de interrogación es de 64px, y el segundo pase, por defecto, habilitado, se deja en 32px. Recordemos que estos tamaños responden a la regla de potencias de base 2 comentada en el Capítulo 2.

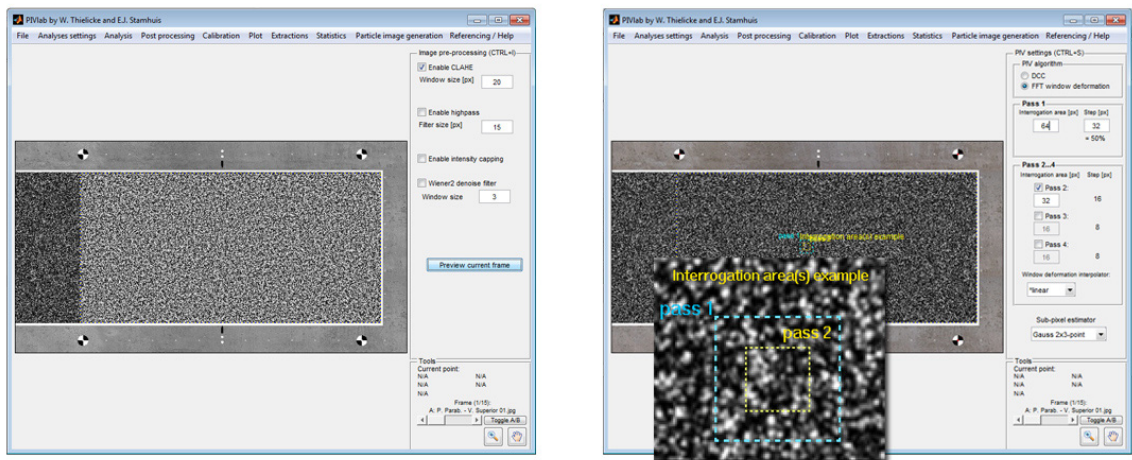


Figura 4.3 Seteos previos al análisis.

4. ANALYSIS, ANALYZE ALL FRAMES: Ejecutar el Análisis.

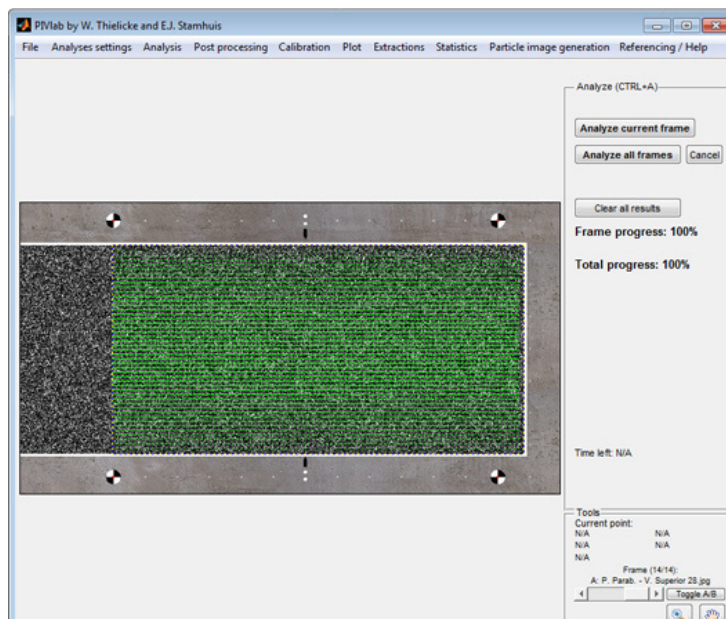


Figura 4.4 Vectores interpretados por PIVLab.

5. POST-PROCESSING, VECTOR VALIDATION: Se indica que se deben mostrar todos los vectores en un solo gráfico (Scatter Plot) por medio de la opción Display All Frames in Scatterplot. Luego se procede al filtrado, Refine Velocity Limits. Se define una caja que debe excluir aquellos puntos que presentan una mayor dispersión que la del grupo principal. Luego aplicamos el filtrado a todos los fotogramas, Apply to All Frames.

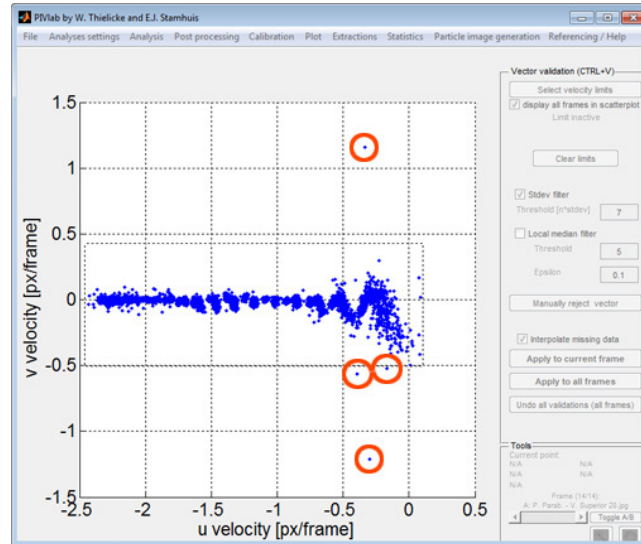


Figura 4.5 Ploteo de dispersión de vectores.

6. PLOT, DERIVE PARAMETERS, CALCULATE MEAN VECTORS: Se genera una matriz adicional con el promedio de los vectores por cada punto definido en la grilla de campo de velocidad.
7. FILE, SAVE, PIVLab SESSION. Se guarda la sesión para el trabajo con el módulo RIVeR.

RIVeR

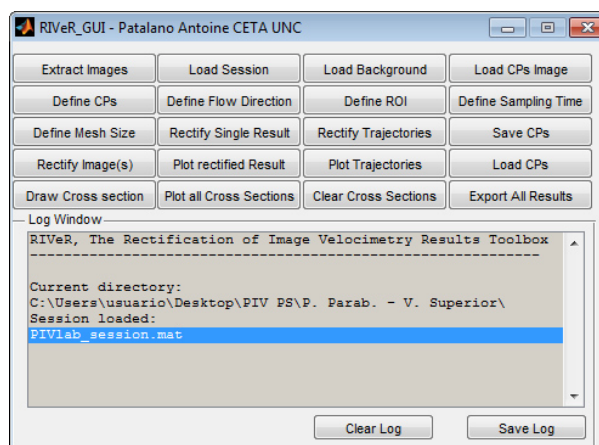


Figura 4.6 Interface de RIVeR.

8. LOAD SESSION: Se carga la sesión de trabajo de PIVLab
9. LOAD BACKGROUND Y LOAD CPs IMAGE: Se carga arbitrariamente alguna imagen de la secuencia

10. DEFINE CPs: Introducimos las medidas relevadas en campo, o en nuestro caso, las unidades de distancia que arbitrariamente definimos como metros. Teniendo en cuenta que se debe dibujar una poligonal cerrada, los puntos se eligen de tal manera que la primer línea generada, tenga su normal interna en la misma dirección y sentido que el flujo.

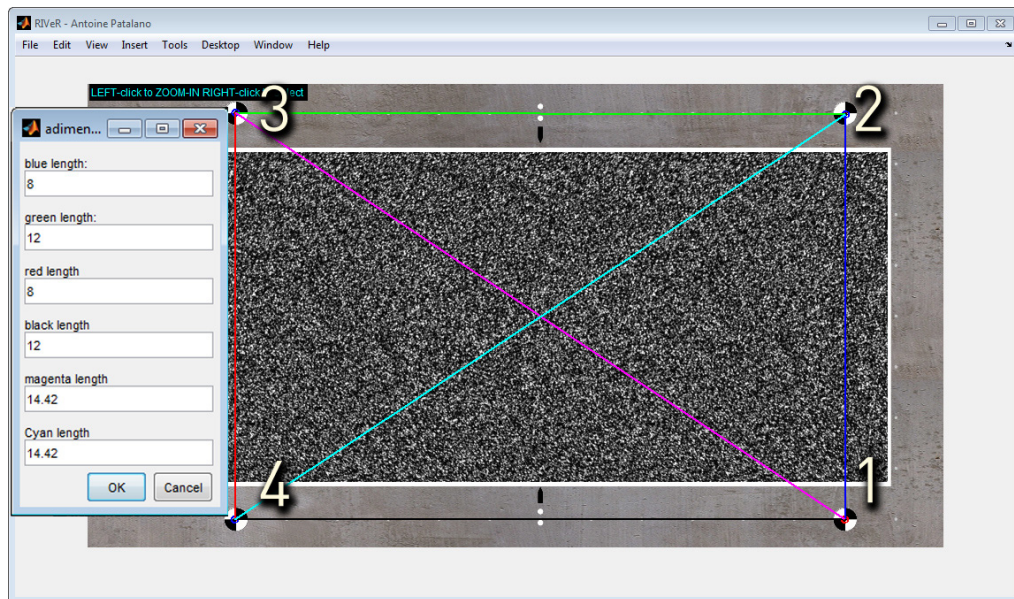


Figura 4.7 Definición de los puntos de referencia para rectificación.

11. DEFINE FLOW DIRECTION: Verificamos que la dirección del flujo sea la correcta.
 12. DEFINE ROI: Dibujamos la Región de Interés, que en nuestro caso coincide con la poligonal definida por los Puntos de Control.
 13. DEFINE SAMPLING TIME: El tiempo entre fotogramas es 33.33 milisegundos (30 FPS)
 14. RECTIFY SINGLE RESULT: Introducimos el número que corresponde al “frame” adicional generado luego de calcular los vectores promedio en PIVLab.
 15. DRAW CROSS SECTION: Definimos tres secciones transversales.

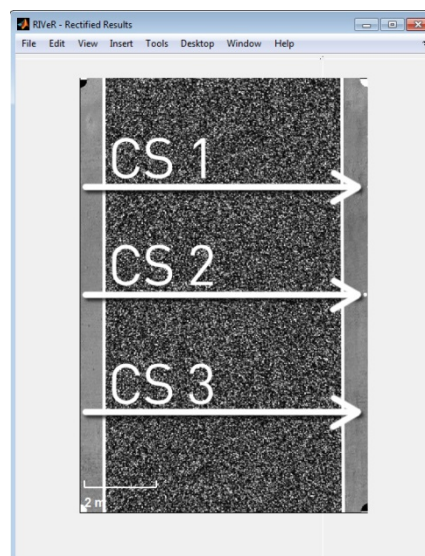


Figura 4.8 Definición de las secciones transversales.

16. PLOT ALL CROSS SECTIONS: Guardamos el gráfico de los perfiles obtenidos por cada una de la secciones transversales definidas.

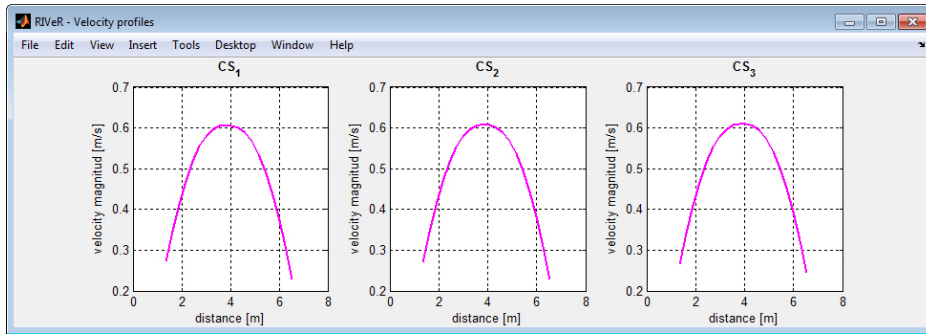


Figura 4.9 Secciones transversales obtenidas

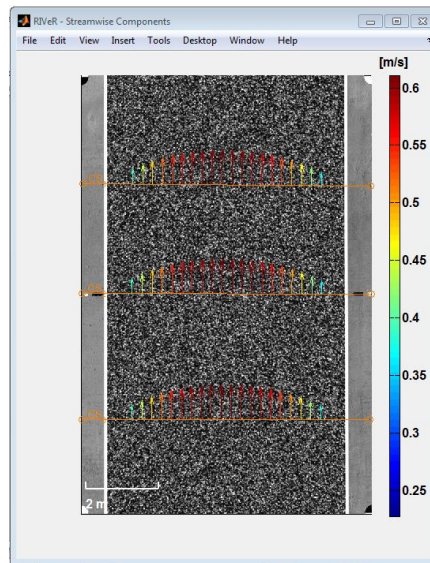


Figura 4.10 Vectores por secciones sobre imagen rectificadas.

17. EXPORT ALL RESULTS: Se genera una carpeta cuyo nombre es la conjunción de RIVER y el número del frame analizado. Adentro encontraremos todas las imágenes generadas y un archivo de Excel denominado Summary.xls en donde se han almacenado, entre otros datos, las componentes de velocidad en función de la progresiva (según como se haya definido el inicio y el fin de la Cross Section) para todas las secciones dibujadas.

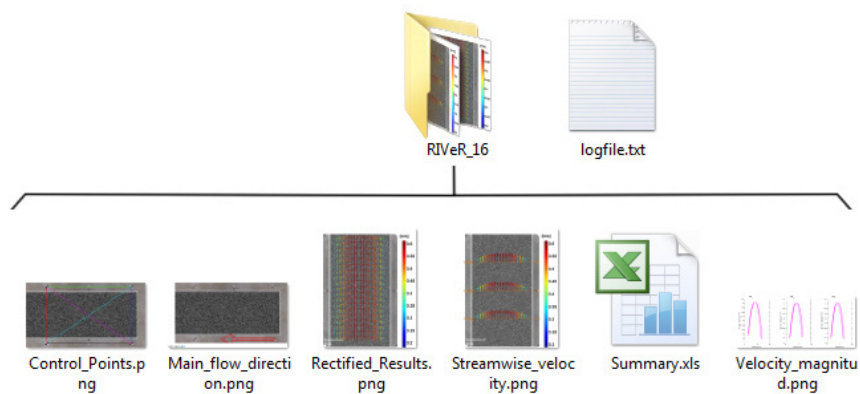


Figura 4.11 Esquema de archivos generados.

EXCEL

18. LECTURA DE LOS DATOS DE SALIDA DE RIVER: Desde el archivo Summary.xls se extraen las componentes de velocidad en la dirección del flujo o “Streamwise” de cada sección transversal definida. Se grafican los perfiles de velocidad obtenidos (CS 1, CS2 y CS3) y el promedio (Línea discontinua negra), contrastándolos con el perfil teórico (Celeste). Se calcula también la velocidad media de la sección.

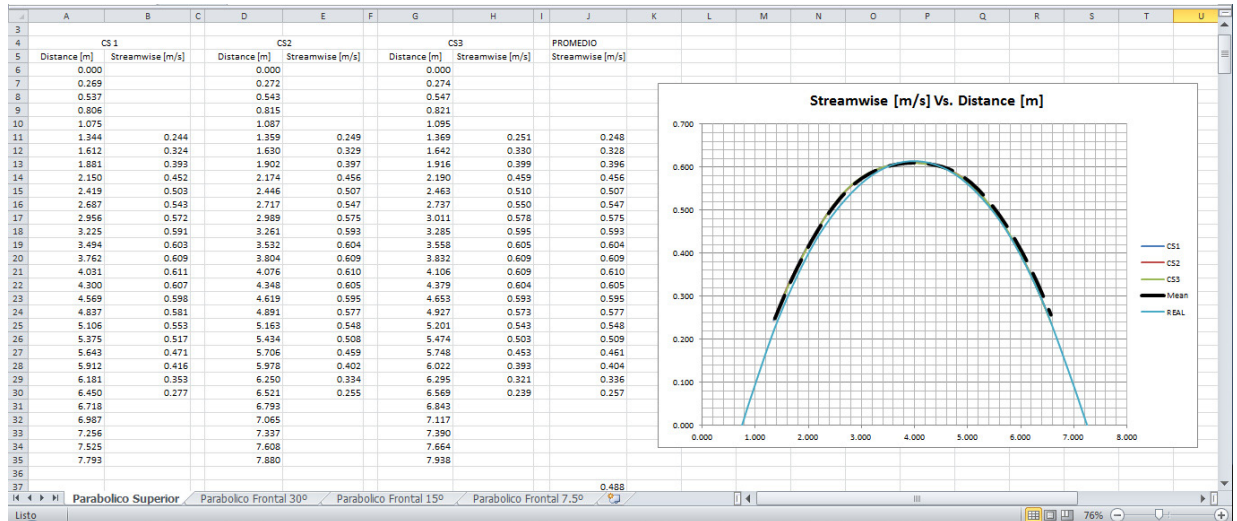


Figura 4.12 Comparación de perfiles Obtenidos Vs. Teórico.

19. CÁLCULO DEL ERROR RELATIVO: Se toman los datos obtenidos de la sección central CS2, ya que es la ubicación más probable, pues en general, a mayor distancia desde la cámara la distorsión es mayor, y por otro lado, para poder encuadrar con la cámara los puntos de referencia se necesita una distancia mínima. Esto es más evidente en las tomas con excesiva perspectiva o con puntos de fuga muy pronunciados.

Para calcular el error relativo, necesitamos la velocidad teórica. Con los datos discretos de los que disponíamos para generar el perfil de velocidad en el modelo 3D, ajustamos una función de interpolación polinómica de grado 6 por el método de mínimos cuadrados, con un Coeficiente de Determinación $R^2 \simeq 1$. Luego:

$$Error \% = \frac{(V. Obtenida - V. Teórica)}{V. Teórica} \times 100$$

20. CÁLCULO DEL ERROR CUADRÁTICO MEDIO: Se suman los cuadrados de los errores relativos en cada punto de la progresiva y luego se divide por n-1, siendo n la cantidad de datos de velocidad obtenidos, y por ende el número de errores relativos calculados. Recordemos que se restringe un grado de libertad con n-1, debido a que si bien podríamos aseverar que el perfil de velocidad teórico es conocido, el error promedio es siempre desconocido, y a medida que n aumenta este tiende hacia el valor medio muestral. Si se empleara n como divisor, estaríamos calculando lo que se denomina “media poblacional” y se estaría subestimando el error. Finalmente se calcula la raíz cuadrada del cociente.

$$E.C.M = \sqrt{\sum_i^n \frac{(E.Rel)^2}{n-1}}$$

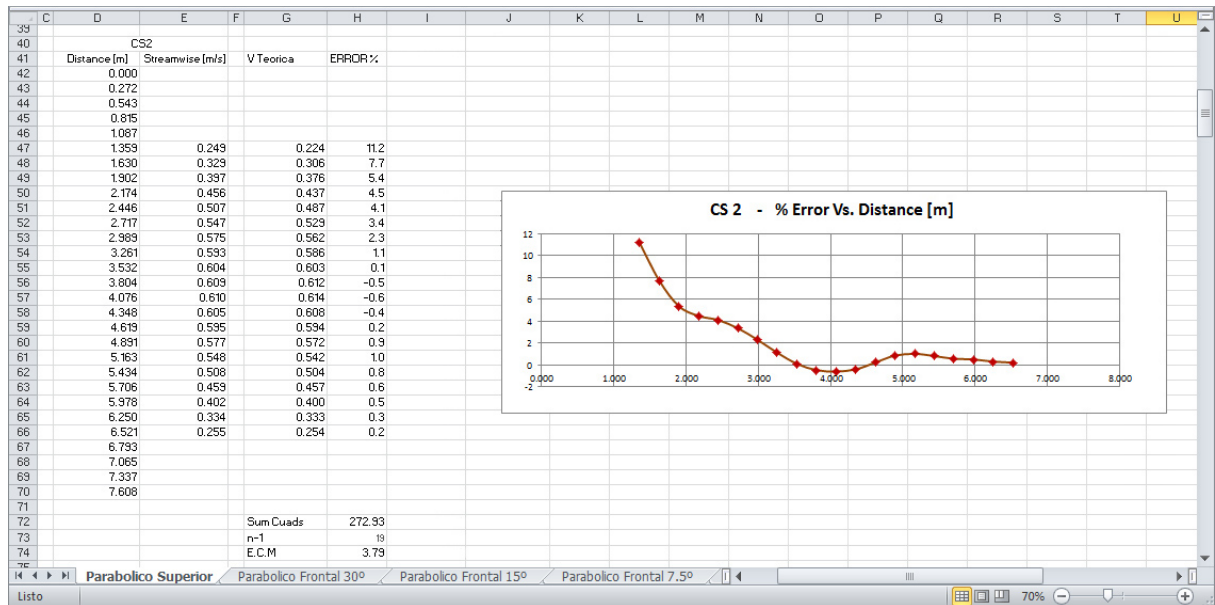


Figura 4.15 Cuantificación del Error Relativo en la sección intermedia.

21. PONDERACIÓN DEL ERROR: Al analizar los gráficos de errores relativos obtenidos se observó que los valores más altos se producen en los extremos de la sección. Sin embargo, las desviaciones no son significativamente mayores que las que se obtienen en el centro de la sección. Esto se debe a la propia definición del error relativo, pues a medida que la Velocidad Teórica disminuye, el resultado del cociente crece proporcionalmente. Entonces, cabe preguntarse, ¿se justifica realmente que estos altos valores extremos incrementen en forma considerable el Error Cuadrático Medio, siendo que para el cálculo de caudales, a medida que nos alejamos del zona central, disminuyen tanto la velocidad como la profundidad del cauce y aún más, su producto decrece sustancialmente? Sin embargo, no podemos eliminar arbitrariamente estos valores, puesto que los datos de progresivas no siempre son iguales en cantidad, así como tampoco coinciden los centros y los puntos extremos de los perfiles obtenidos con el teórico. El tratamiento de estos valores extremos debe realizarse bajo un enfoque que prescinda de la subjetividad del operador.

Para mitigar ese efecto, se definió una Función de Ponderación (explicada a continuación) mediante la cual, se le asigna a cada error un coeficiente de peso dependiendo de la ubicación en la progresiva de la componente de velocidad y el nivel de contribución de la misma en el cálculo del caudal.

Con el nuevo Error Ponderado, se recalcula el Error Cuadrático Medio, observándose diferencias significativas.

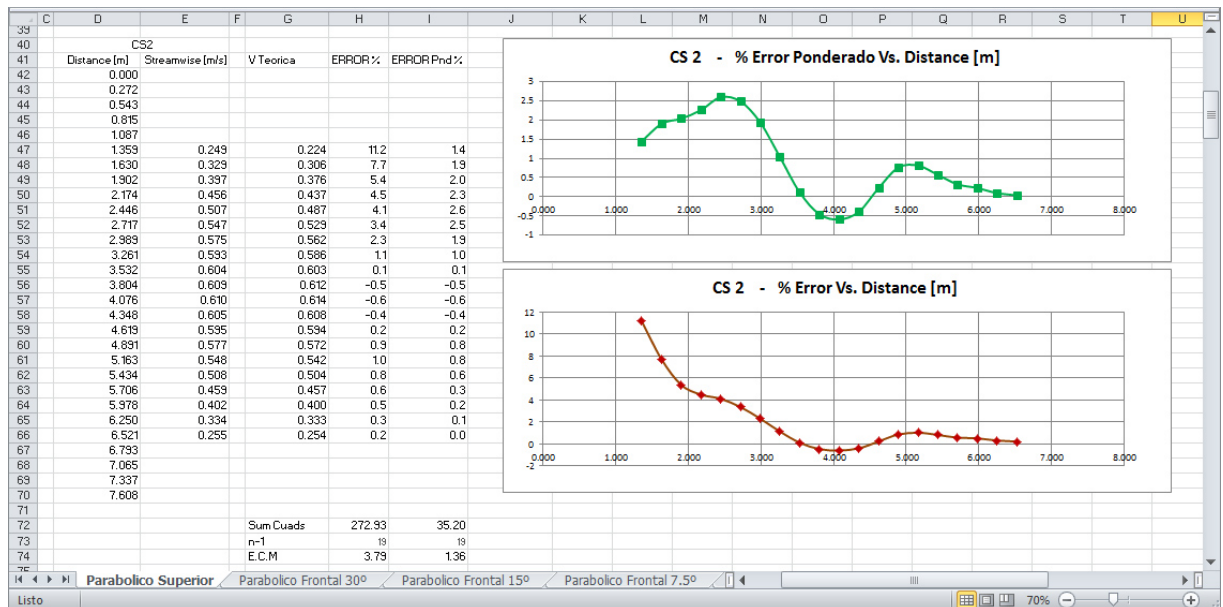


Figura 4.14 Cuantificación del Error Relativo Ponderado en la sección intermedia.

4.3. Ponderación del Error Relativo

Como se comentó anteriormente, la presencia de valores extremos muy dispersos que impactaban desfavorablemente en el cálculo del E.C.M. hizo evidente la necesidad de atribuirle a cada valor de error un factor de corrección en función de la contribución de la respectiva componente de velocidad al cálculo de los caudales. Para ello se definió una Función de Ponderación, la cual le atribuye un factor de peso a cada error relativo en función de la ubicación dentro de la progresiva, y en forma proporcional al aporte, en el cálculo del caudal, del producto de la velocidad media por el área diferencial del punto analizado. La batimetría propuesta es una función parabólica.

Para el caso de un flujo y batimetría parabólicos, a modo ilustrativo:

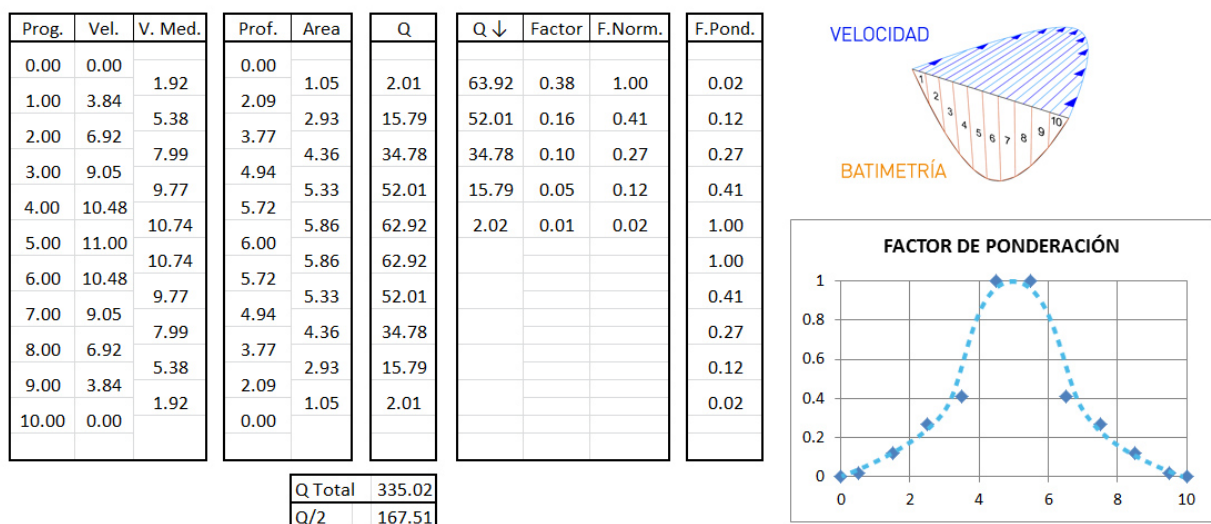


Figura 4.15 Determinación de la función de ponderación.

Con el mismo procedimiento se obtiene la Función de Ponderación para el flujo de estudio:

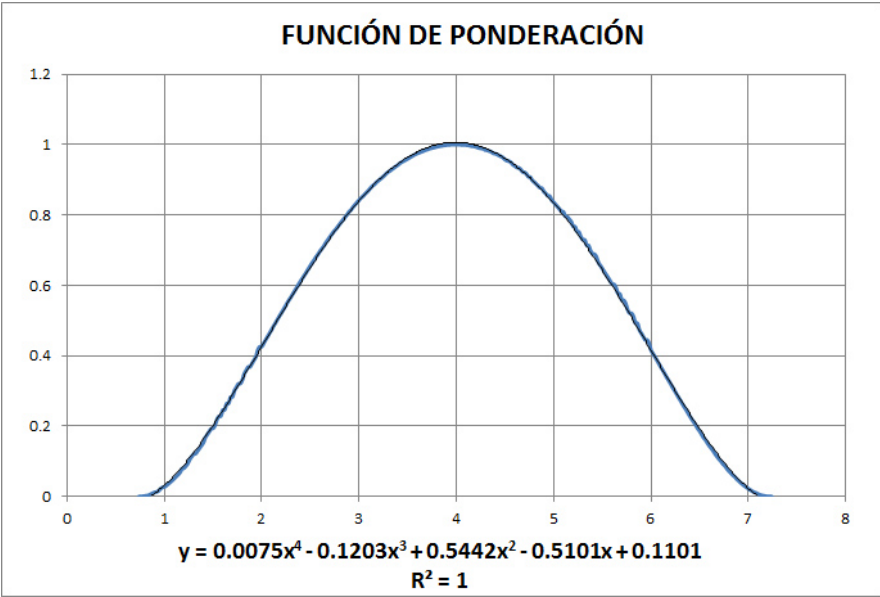


Figura 4.16 Ajuste de la función de ponderación por mínimos cuadrados.

CAPITULO 5: RESULTADOS DEL ANÁLISIS

5. RESULTADOS DEL ANALISIS

5.1. Resultados: gráficos y valores de interés

Las herramientas informáticas generaron un conjunto de gráficos que nos permiten observar en forma rápida como es la variación en dirección y magnitud de los vectores detectados, la impronta o “huella” de los mismos en los gráficos de dispersión para cada una de las vistas definidas, los perfiles de velocidad resultantes y el error en función de la progresiva.

5.2. Casos analizados

Todos los casos de estudio que se han procesado se resumen en el siguiente listado:

-Perfil Lineal Uniforme (Figuras 5.1 a 5.4)

Vista Superior

Vistas Laterales a 30°, 15° y 7.5°

-Perfil Parabólico (Figuras 5.5 a 5.14)

Vista Superior o Cenital

Vistas Laterales a 30°, 15° y 7.5°

Vistas de Esquina a 30°, 15° y 7.5°

Vistas Frontales a 30°, 15° y 7.5°

-Perfil Parabólico Frontal a 30° (Figuras 5.15 a 5.20)

Resolución 1960px x 1080px (Original)

Resolución 980px x 540px (Half)

Resolución 653px x 360px (Third)

Resolución 490px x 270px (Quarter)

Resolución 490px x 270px (Quarter) - Area de Interrogación de 32 px

Resolución 490px x 270px (Quarter) - Area de Interrogación de 16 px

Para poder cuantificar el error en los perfiles de velocidad se aplicó el concepto de error relativo porcentual; mientras que para el caso de los caudales se aplicó el concepto de error relativo ponderado. En este último caso, la batimetría teórica utilizada fue de la misma naturaleza que el perfil de velocidades, es decir, parabólica. Vale aclarar que en el caso lineal uniforme no se utilizó el concepto de error ponderado ya que no hay variación de velocidad en lo ancho de la sección.

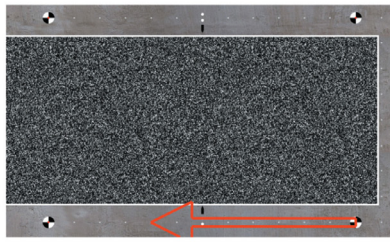
5.3. Perfil Lineal Uniforme

El primer perfil propuesto para comprobar las posibilidades que ofrecía el método de modelado en entornos 3D fue el Lineal. Fue además el más simple y rápido de generar en la simulación. Sin embargo su utilidad fue, por decirlo de alguna manera, solo para validar toda la secuencia de trabajo y eliminar algunos errores iniciales relacionados con la precisión con la cual se había modelado el entorno.

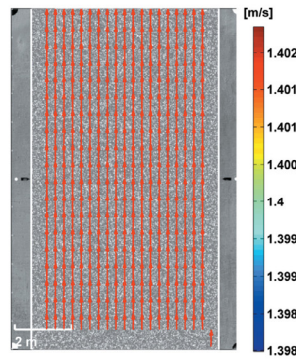
A continuación se presentan los gráficos y resultados obtenidos para cada perfil Lineal Uniforme:

PERFIL LINEAL UNIFORME - VISTA SUPERIOR

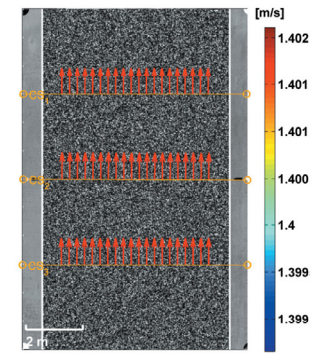
VISTA - DIRECCIÓN DEL FLUJO



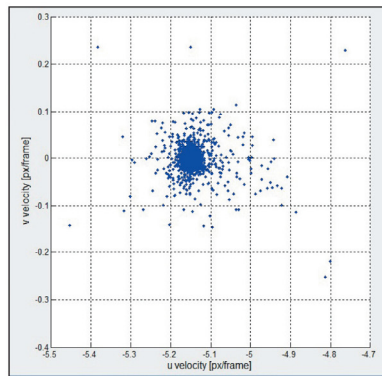
VECTORES GENERADOS



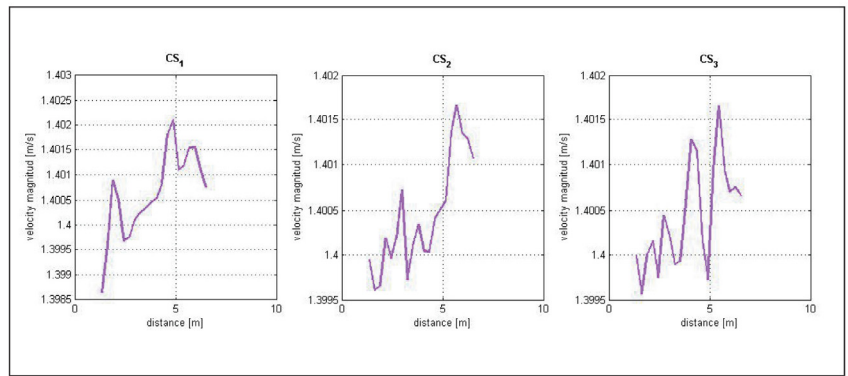
VECTORES POR SECCIONES



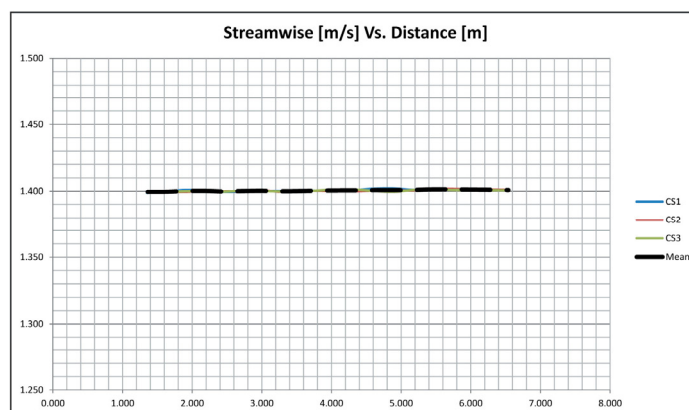
DISPERSIÓN



PERFILES DE VELOCIDADES



PERFILES OBTENIDOS VS. REAL

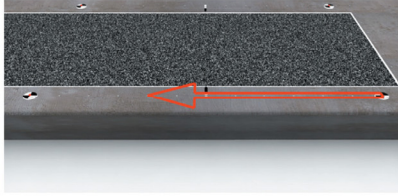


V.M. CS1 = 1.400 m/s
 V.M. CS2 = 1.400 m/s
 V.M. CS3 = 1.400 m/s
 E.C.M. = 0.05 %

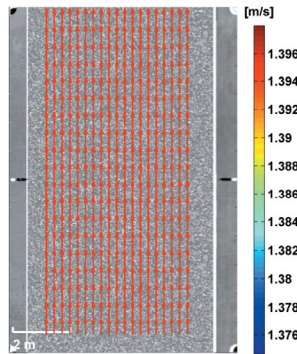
Figura 5.1 Resultados Perfil Lineal Uniforme – Vista Superior.

PERFIL LINEAL UNIFORME - VISTA LATERAL 30°

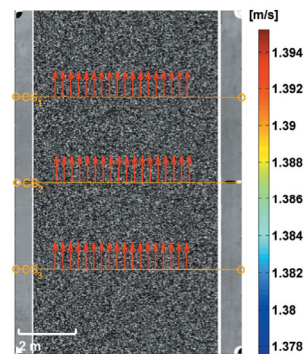
VISTA - DIRECCIÓN DEL FLUJO



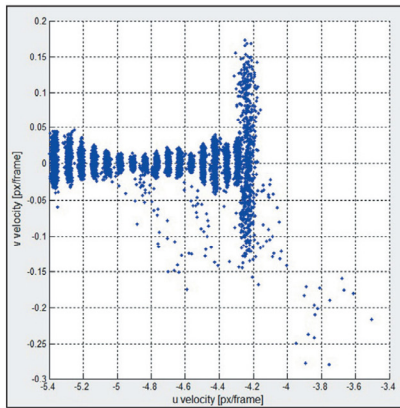
VECTORES GENERADOS



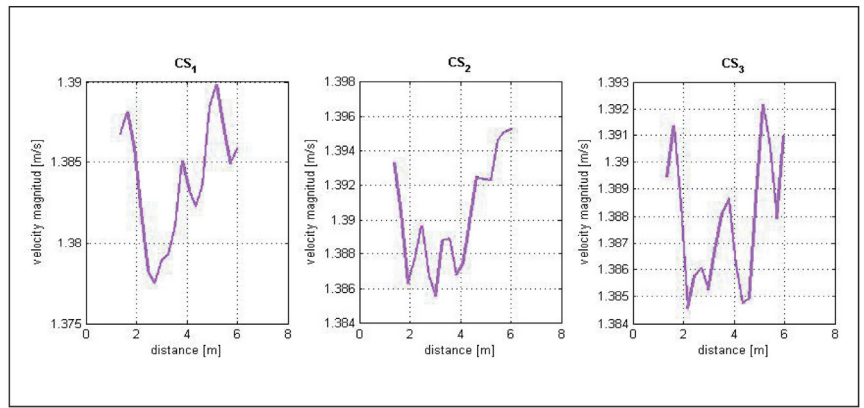
VECTORES POR SECCIONES



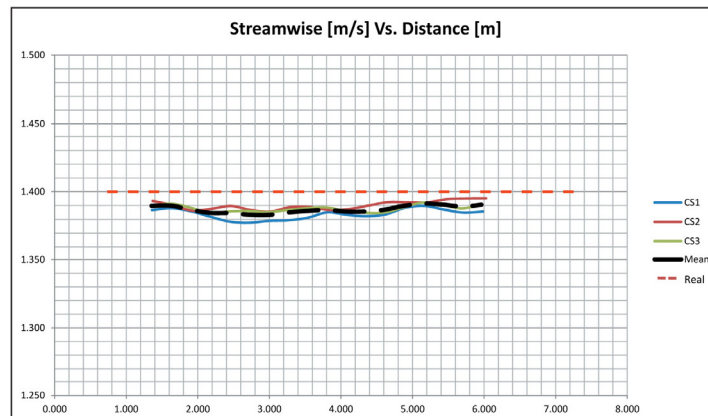
DISPERSIÓN



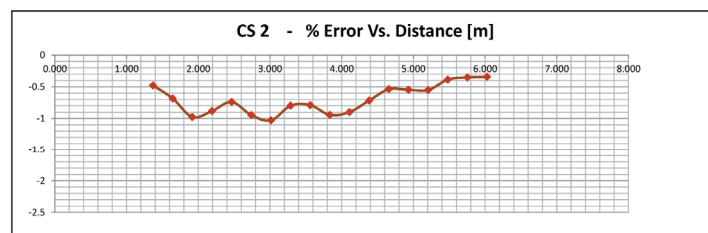
PERFILES DE VELOCIDADES



PERFILES OBTENIDOS VS. REAL



ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA



V.M. CS1 = 1.384 m/s
 V.M. CS2 = 1.390 m/s
 V.M. CS3 = 1.388 m/s
 E.C.M. = 0.76 %

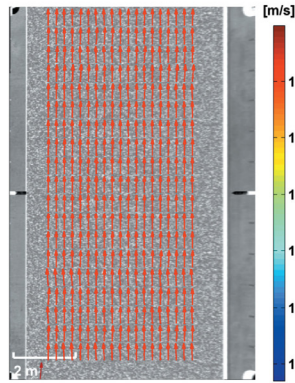
Figura 5.2 Resultados Perfil Lineal Uniforme – Vista Lateral 30°.

PERFIL LINEAL UNIFORME - VISTA LATERAL 15°

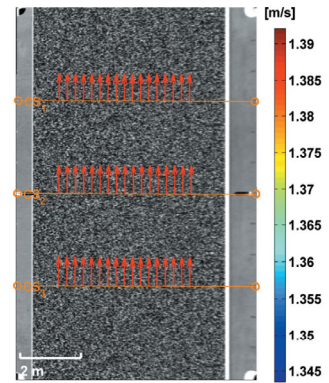
VISTA - DIRECCIÓN DEL FLUJO



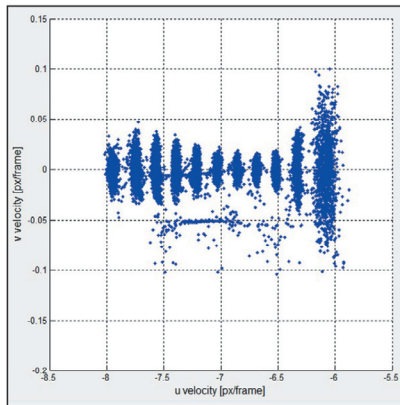
VECTORES GENERADOS



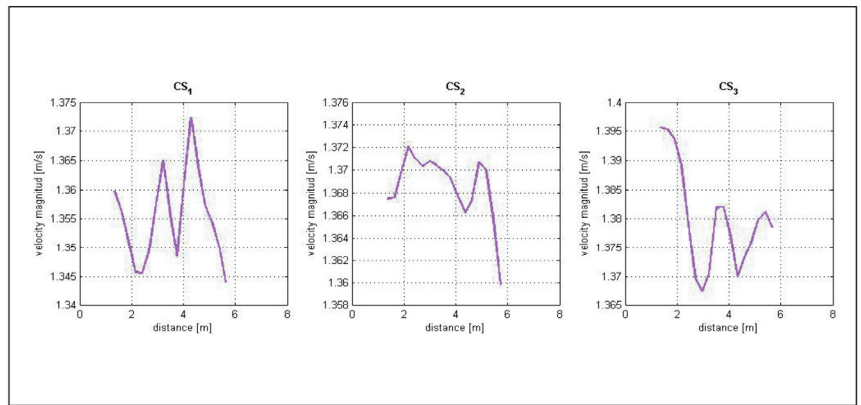
VECTORES POR SECCIONES



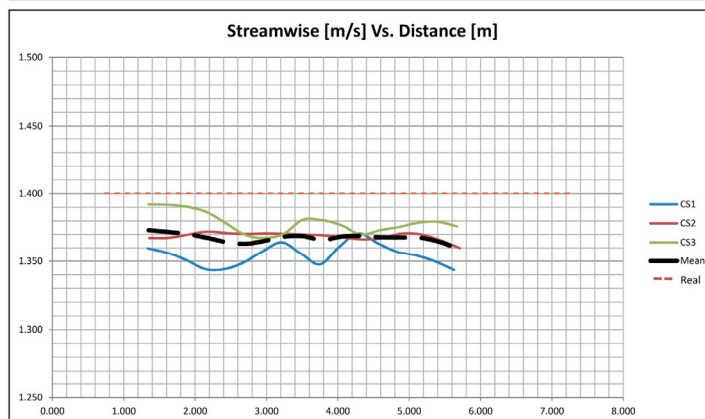
DISPERSIÓN



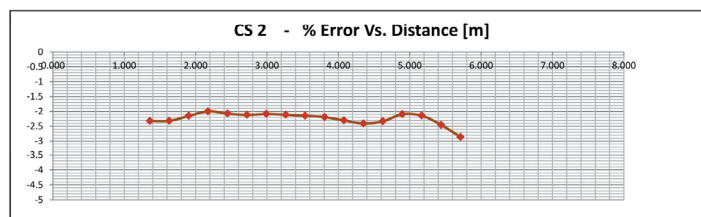
PERFILES DE VELOCIDADES



PERFILES OBTENIDOS VS. REAL



ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA



V.M. CS1 = 1.355 m/s
 V.M. CS2 = 1.369m/s
 V.M. CS3 = 1.379 m/s
 E.C.M. = 2.32 %

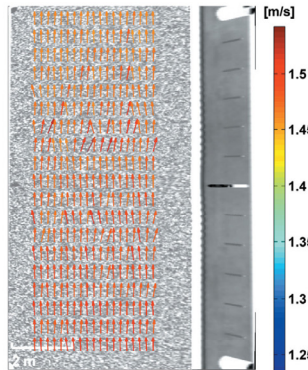
Figura 5.3 Resultados Perfil Lineal Uniforme – Vista Lateral 15°.

PERFIL LINEAL UNIFORME - VISTA LATERAL 7.5°

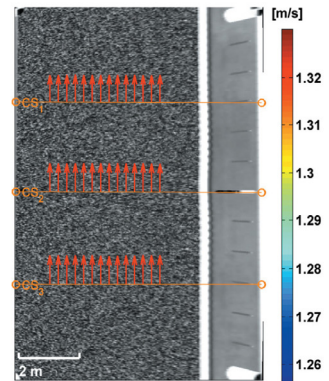
VISTA - DIRECCIÓN DEL FLUJO



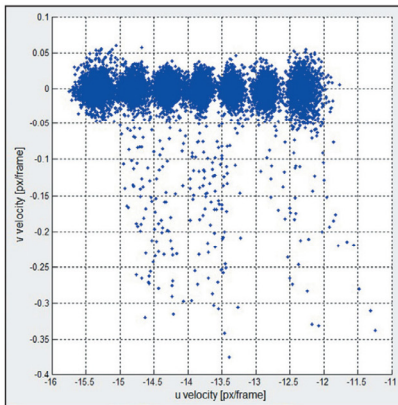
VECTORES GENERADOS



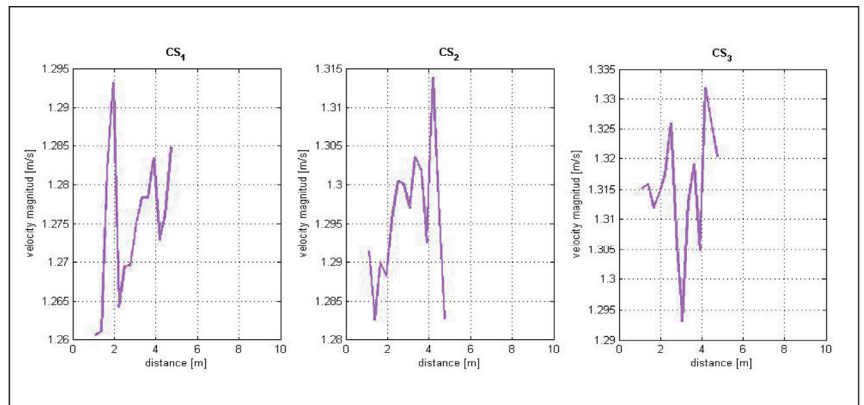
VECTORES POR SECCIONES



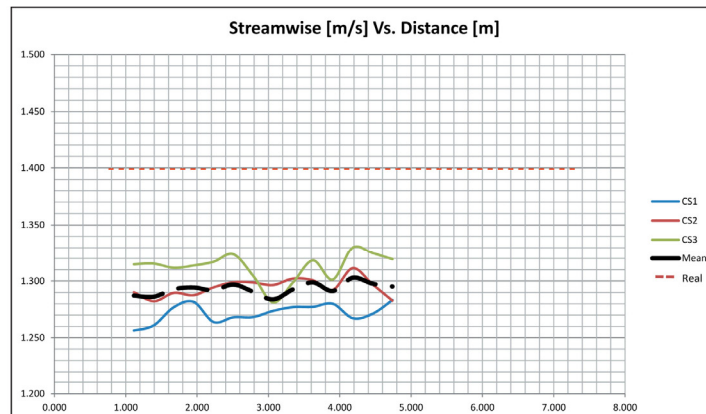
DISPERSIÓN



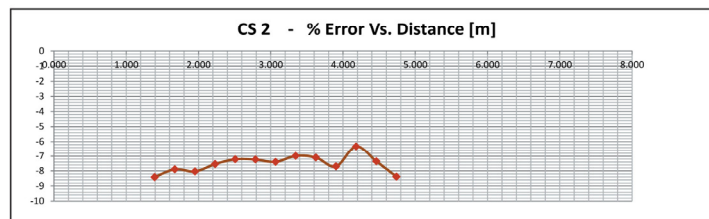
PERFILES DE VELOCIDADES



PERFILES OBTENIDOS VS. REAL



ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA



V.M. CS1 = 1.272 m/s
 V.M. CS2 = 1.295 m/s
 V.M. CS3 = 1.312 m/s
 E.C.M. = 7.83 %

Figura 5.4 Resultados Perfil Lineal Uniforme – Vista Lateral 7.5°.

Respecto de lo expuesto hasta aquí podemos hacer algunas observaciones:

- Ancho del Cauce o extensión de las progresivas con datos de velocidad: Se puede observar que los datos entregados por el programa PIVLab (vectores no nulos) abarcan una distancia que se extiende desde la progresiva 1.40 mts hasta la progresiva 6.60 mts, es decir, un ancho de cauce “detectado” de 5.20 mts, siendo en realidad, de un ancho de 6.50 mts. Este defecto es fácilmente eliminado si se reduce el tamaño de la ventana de interrogación. Sin embargo, no se justifica la necesidad de contar con esa información en casos de flujos reales, ya que las velocidades cerca de las orillas son prácticamente nulas y su aporte en el cálculo de caudales es prácticamente despreciable (es una práctica muy usada y que no reporta mayor error, suponer una variación lineal hasta el valor nulo), más aun, a medida que disminuimos el Área de Interrogación, el tiempo de procesamiento se incrementa sustancialmente.

- Inexistencia de sesgo subyacente: En cuanto a la Vista Superior, observamos que todo el procedimiento no induce errores adicionales. La extensión de cauce que contiene datos validos detectados es, como se dijo anteriormente, menor, sin embargo está perfectamente centrada en relación a la distancia comprendida entre los puntos de control.

- Magnitud de los errores relativos: Los errores calculados, teniendo en cuenta las velocidades medias, son mucho menores que los que se le atribuye a la propia técnica de PIV (alrededor del 20 %). Para la Vista Lateral a 7.5° (caso con errores más significativos de todos los analizados con el perfil lineal uniforme), la Sección 1, con una velocidad media de 1.272 m/s nos da un error relativo de:

$$E. R = \frac{1.272 - 1.400}{1.400} \times 100\% = -9.14\%$$

- Dispersión de los vectores detectados: A medida que disminuye el ángulo respecto de la horizontal, podemos observar una mayor dispersión de los puntos ubicados a la derecha del ScatterPlot. Estos puntos corresponden a los vectores detectados en la zona de movimiento más alejada de la cámara. Tal efecto se debe a la naturaleza de la perspectiva. A medida que aumenta la distancia, y teniendo una rejilla de resolución fija (como en todo sensor de captura digital moderno), cada unidad elemental de captura recibe la información lumínica de un mayor número de objetos, o puntos de la textura, sin embargo el valor entregado será solo uno, un promedio de todo ellos. Es así como la detección de movimiento se ve severamente afectada a medida que se aumenta la distorsión en la perspectiva.

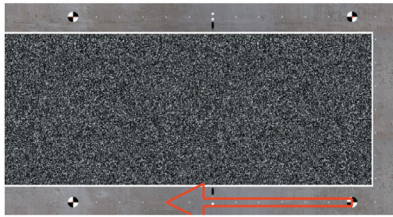
5.4. Perfil Parabólico

De mayor interés práctico resulta el estudio de los perfiles cuya velocidad varíe según alguna ley (lineal, cuadrática, exponencial, gaussiana, etc.) desde un valor nulo en el contorno hasta un valor máximo en algún punto cercano al centro del cauce. Es por ello que se optó por profundizar los estudios adoptando un perfil de velocidades parabólico. Además de ser el perfil típico para abordar cualquier introducción teórica al estudio de flujos naturales, es una distribución de velocidades recurrentemente observada, bajo diversas condiciones de turbulencia, en todos los análisis de material filmico relevado.

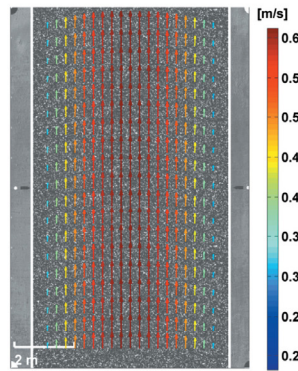
A continuación se presentan los gráficos y resultados obtenidos para cada perfil Parabólico.

PERFIL PARABÓLICO - VISTA SUPERIOR

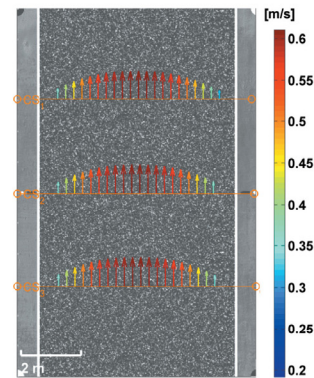
VISTA - DIRECCIÓN DEL FLUJO



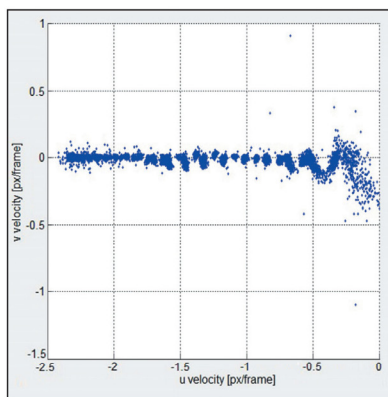
VECTORES GENERADOS



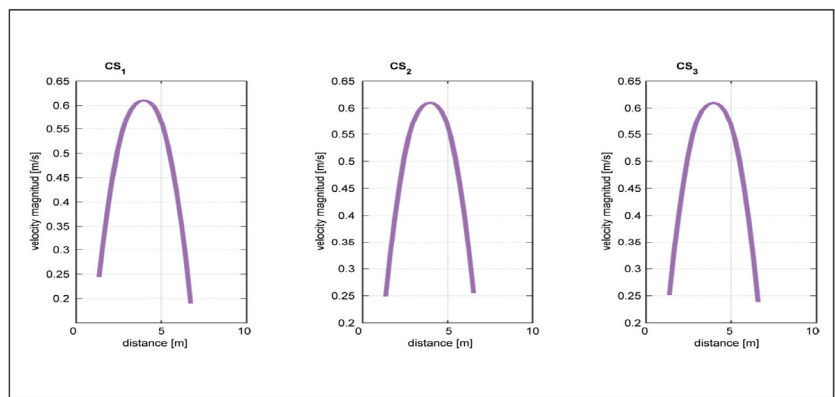
VECTORES POR SECCIONES



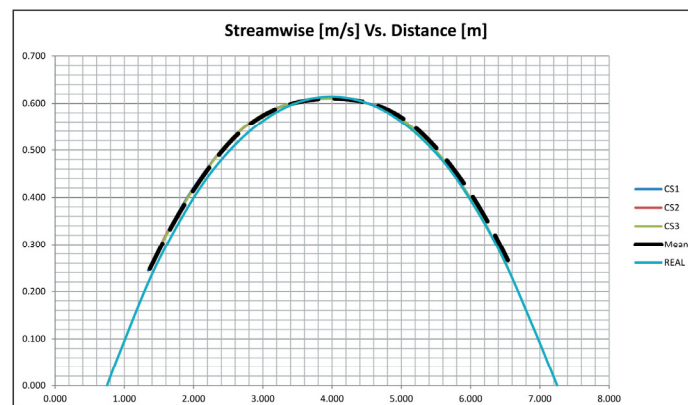
DISPERSIÓN



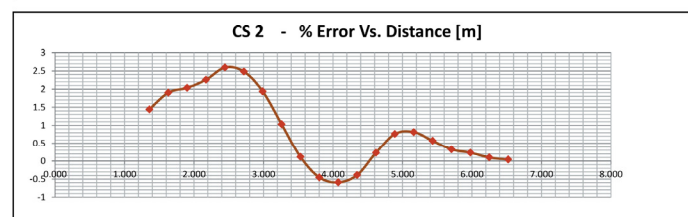
PERFILES DE VELOCIDADES



PERFILES OBTENIDOS VS. REAL



ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA

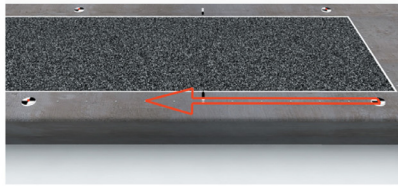


V.M. CS1 = 0.491 m/s
 V.M. CS2 = 0.488 m/s
 V.M. CS3 = 0.486 m/s
 E.C.M. = 3.79 %
 E.C.M.P. = 1.36 %

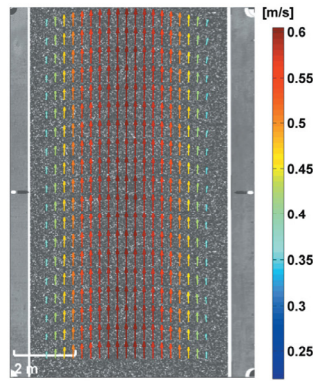
Figura 5.5 Resultados Perfil Parabólico – Vista Superior.

PERFIL PARABÓLICO - VISTA LATERAL 30°

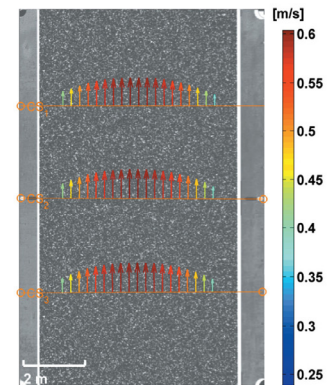
VISTA - DIRECCIÓN DEL FLUJO



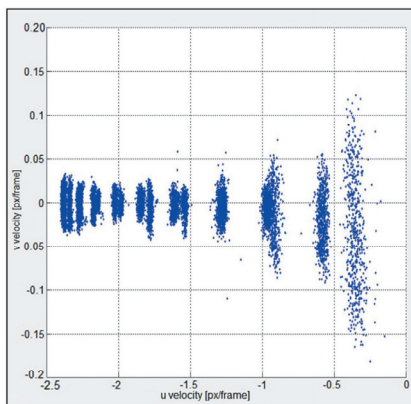
VECTORES GENERADOS



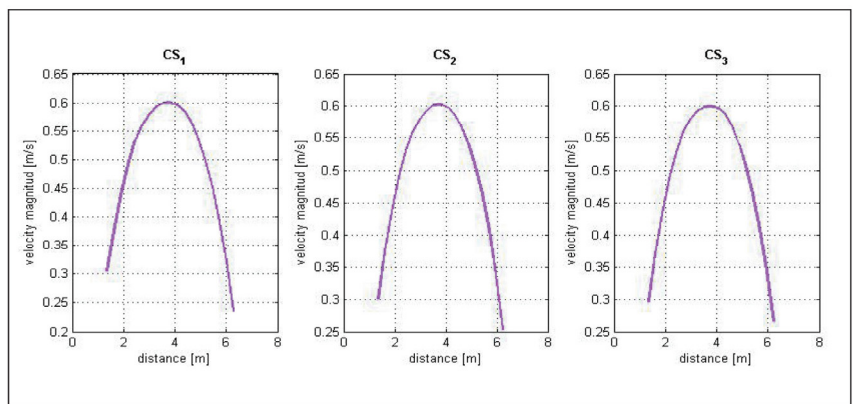
VECTORES POR SECCIONES



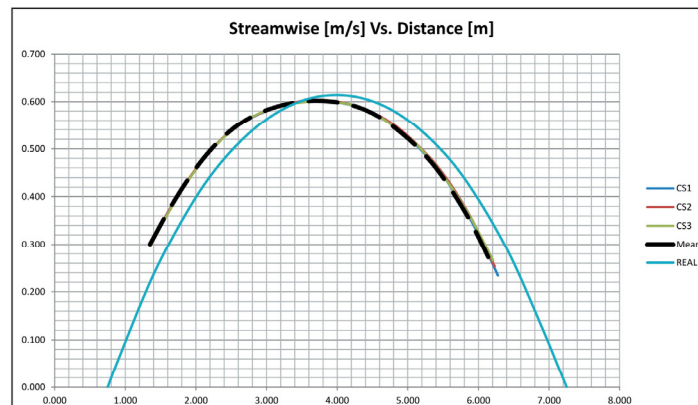
DISPERSIÓN



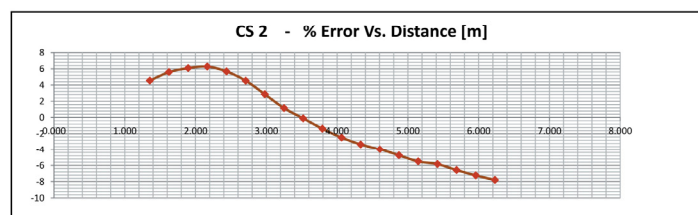
PERFILES DE VELOCIDADES



PERFILES OBTENIDOS VS. REAL



ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA



V.M. CS1 = 0.487 m/s
 V.M. CS2 = 0.491 m/s
 V.M. CS3 = 0.491 m/s
 E.C.M. = 14.0 %
 E.C.M.P. = 5.10 %

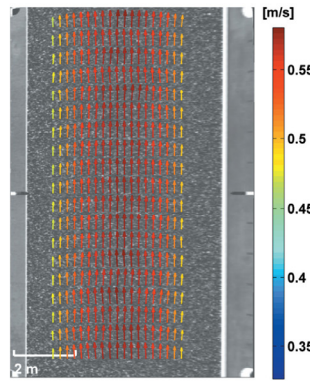
Figura 5.6 Resultados Perfil Parabólico – Vista Lateral 30°.

PERFIL PARABÓLICO - VISTA LATERAL 15°

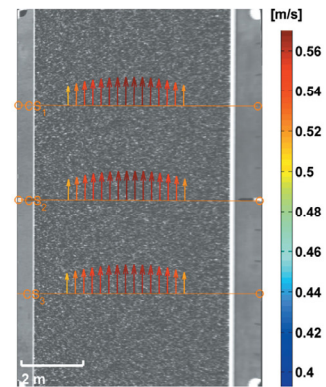
VISTA - DIRECCIÓN DEL FLUJO



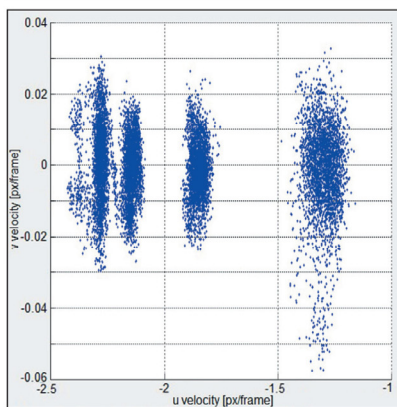
VECTORES GENERADOS



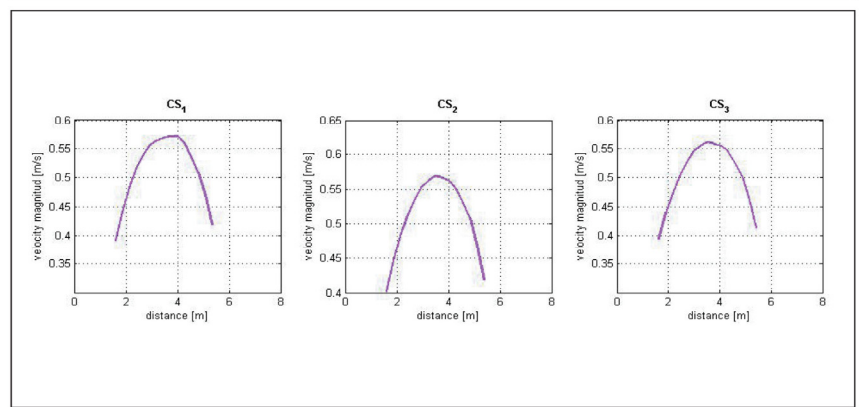
VECTORES POR SECCIONES



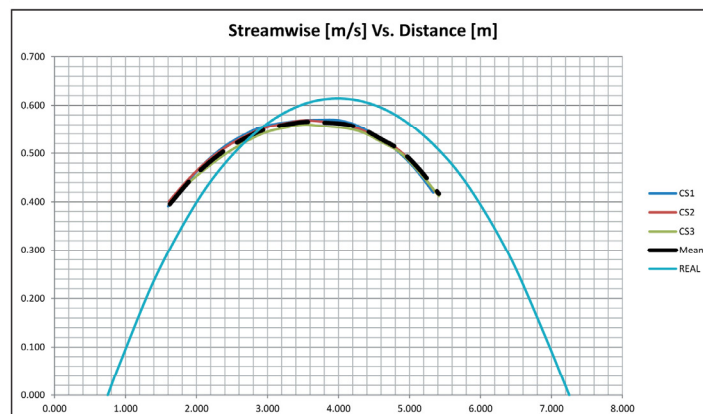
DISPERSIÓN



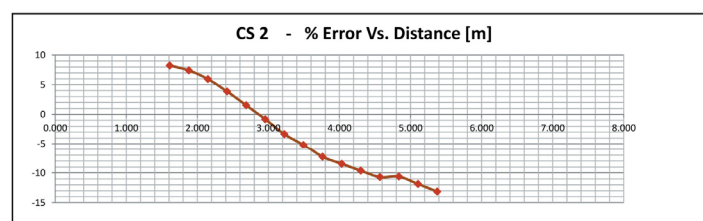
PERFILES DE VELOCIDADES



PERFILES OBTENIDOS VS. REAL



ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA



V.M. CS1 = 0.512 m/s
 V.M. CS2 = 0.511 m/s
 V.M. CS3 = 0.503 m/s
 E.C.M. = 14.15%
 E.C.M.P. = 8.33 %

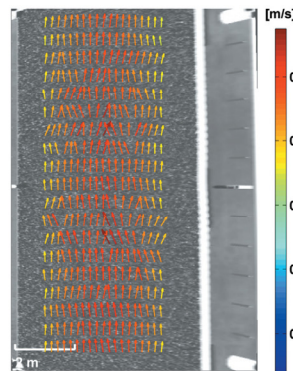
Figura 5.7 Resultados Perfil Parabólico – Vista Lateral 15°.

PERFIL PARABÓLICO - VISTA LATERAL 7.5°

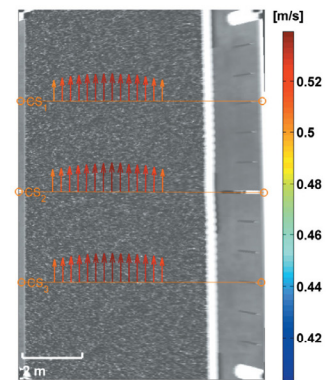
VISTA - DIRECCIÓN DEL FLUJO



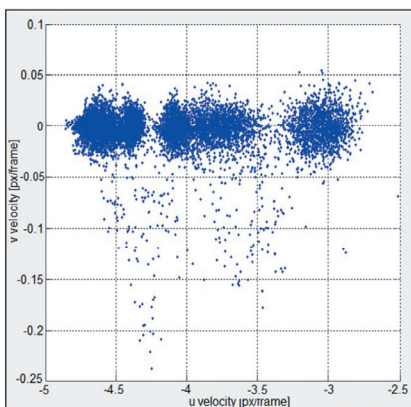
VECTORES GENERADOS



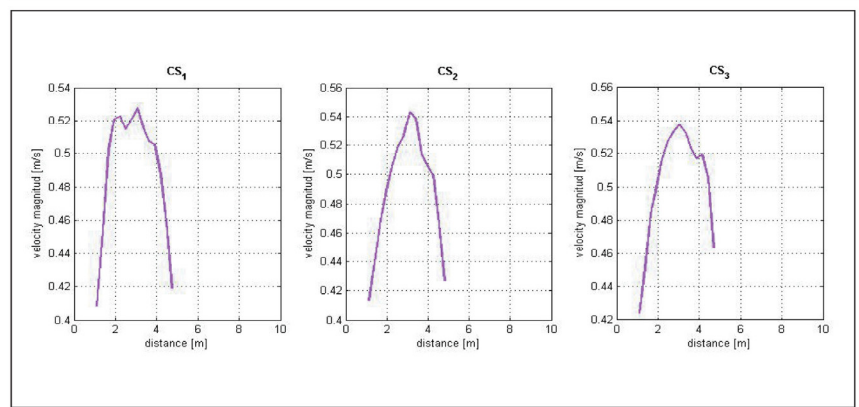
VECTORES POR SECCIONES



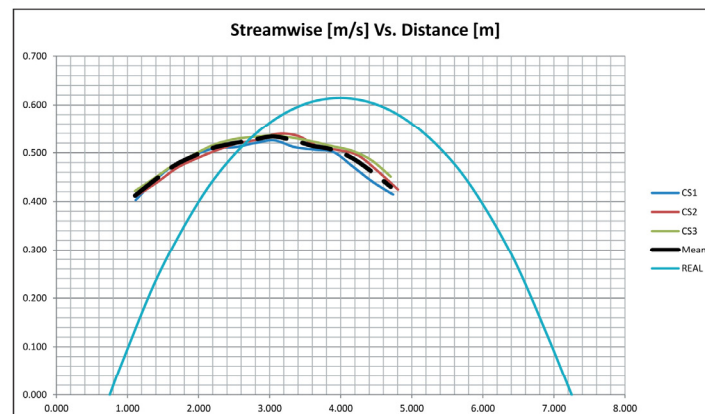
DISPERSIÓN



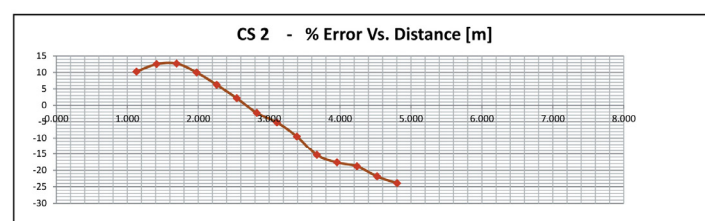
PERFILES DE VELOCIDADES



PERFILES OBTENIDOS VS. REAL



ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA

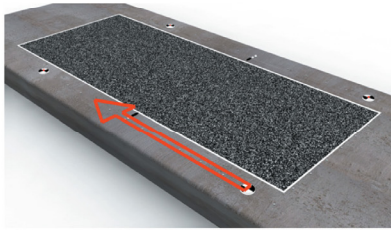


V.M. CS1 = 0.481 m/s
 V.M. CS2 = 0.488 m/s
 V.M. CS3 = 0.497 m/s
 E.C.M. = 58.78 %
 E.C.M.P. = 14.25 %

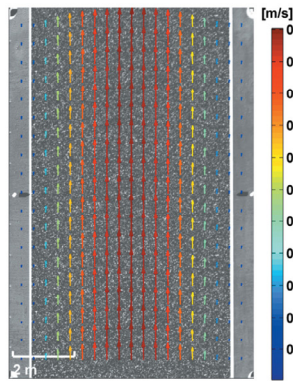
Figura 5.8 Resultados Perfil Parabólico – Vista Lateral 7.5°.

PERFIL PARABÓLICO - VISTA ESQUINA 30°

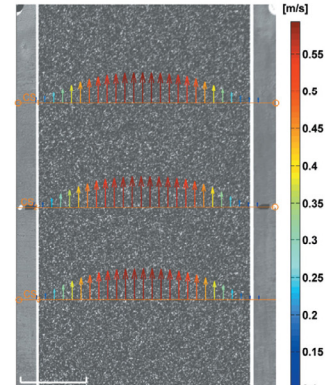
VISTA - DIRECCIÓN DEL FLUJO



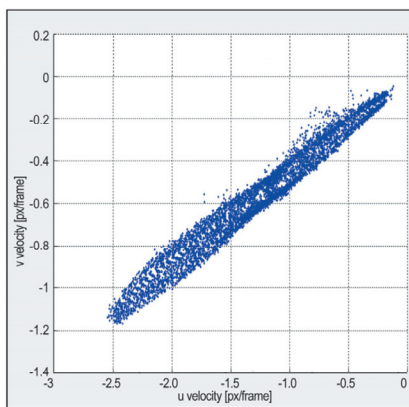
VECTORES GENERADOS



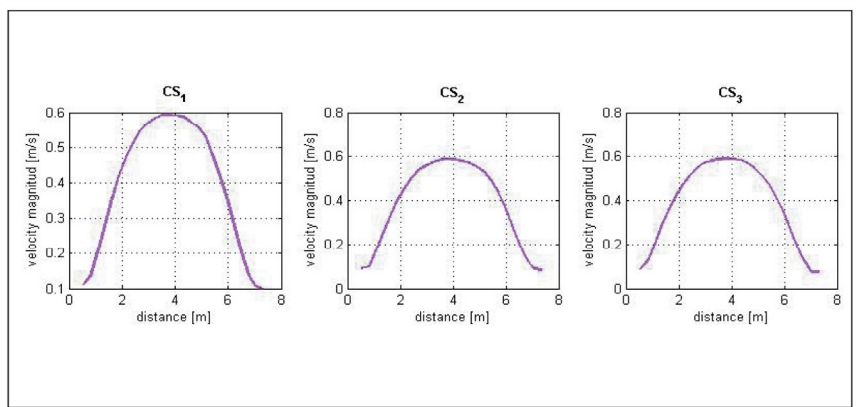
VECTORES POR SECCIONES



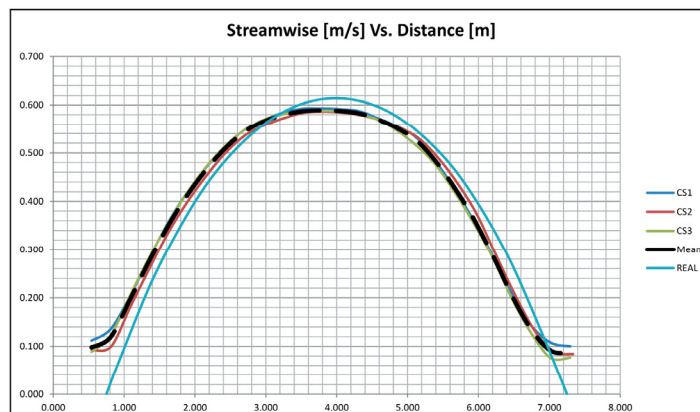
DISPERSIÓN



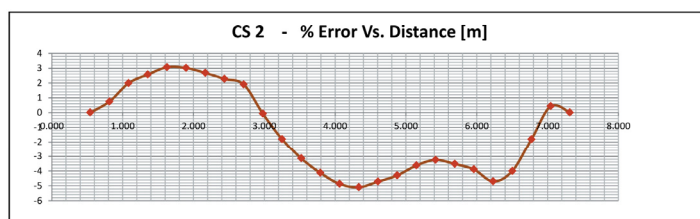
PERFILES DE VELOCIDADES



PERFILES OBTENIDOS VS. REAL



ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA

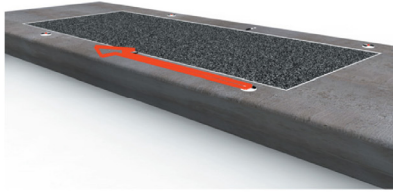


V.M. CS1 = 0.393 m/s
 V.M. CS2 = 0.387 m/s
 V.M. CS3 = 0.385 m/s
 E.C.M. = 105.6 %
 E.C.M.P. = 3.22 %

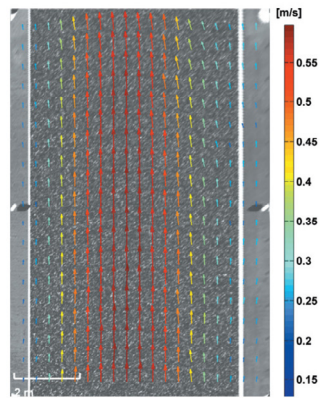
Figura 5.9 Resultados Perfil Parabólico – Vista Esquina 30°.

PERFIL PARABÓLICO - VISTA ESQUINA 15°

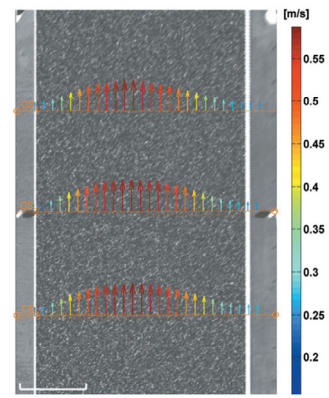
VISTA - DIRECCIÓN DEL FLUJO



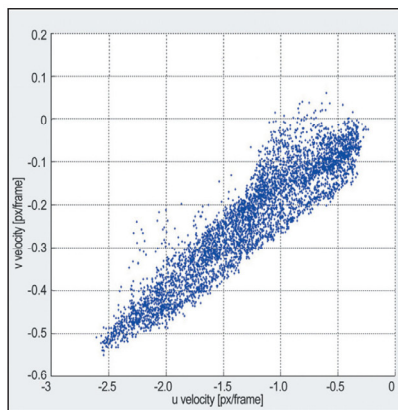
VECTORES GENERADOS



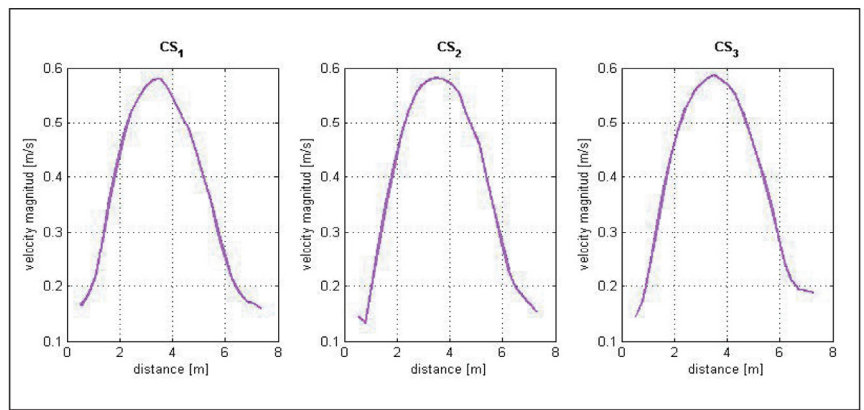
VECTORES POR SECCIONES



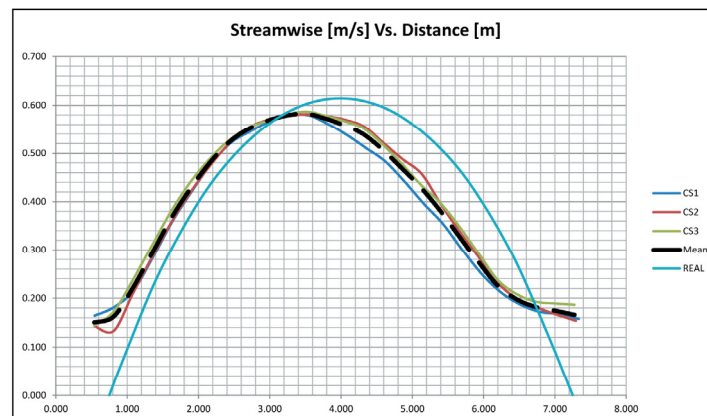
DISPERSIÓN



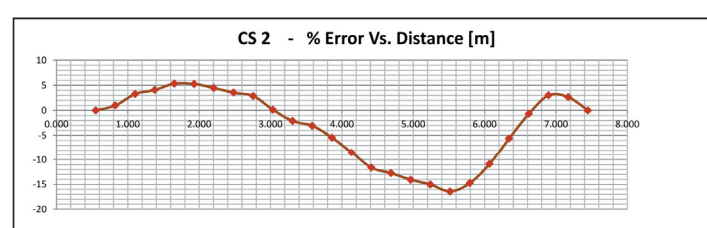
PERFILES DE VELOCIDADES



PERFILES OBTENIDOS VS. REAL



ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA



V.M. CS1 = 0.372 m/s
 V.M. CS2 = 0.385 m/s
 V.M. CS3 = 0.395 m/s
 E.C.M. = 257.9 %
 E.C.M.P. = 8.04 %

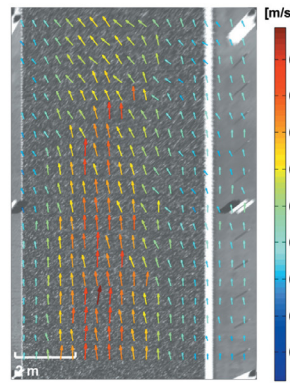
Figura 5.10 Resultados Perfil Parabólico – Vista Esquina 15°.

PERFIL PARABÓLICO - VISTA ESQUINA 7.5°

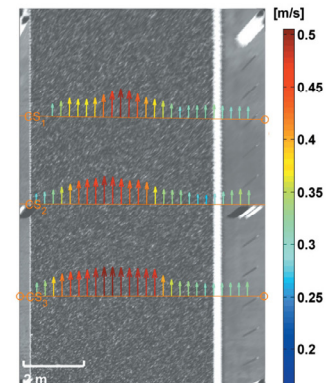
VISTA - DIRECCIÓN DEL FLUJO



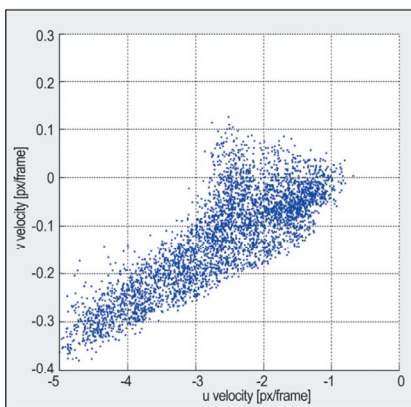
VECTORES GENERADOS



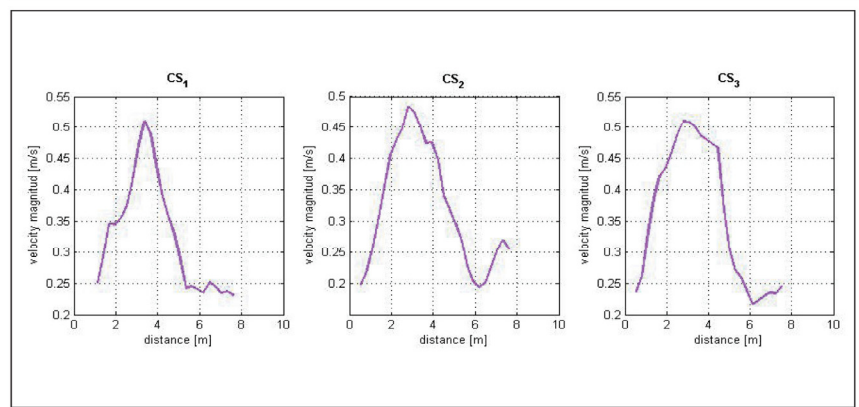
VECTORES POR SECCIONES



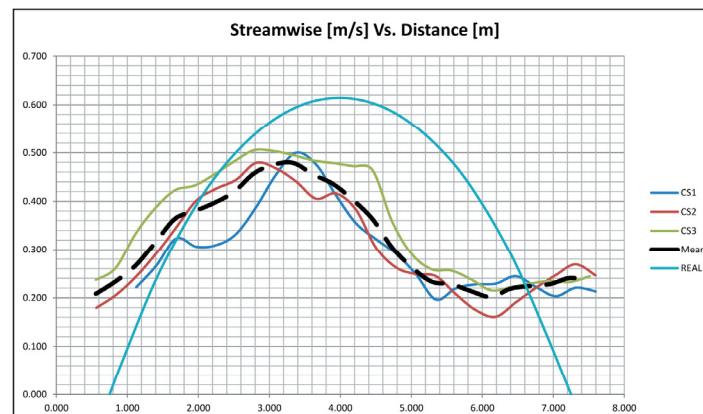
DISPERSIÓN



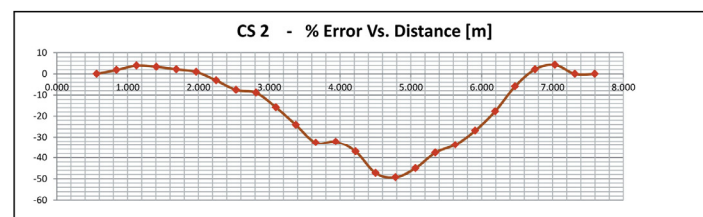
PERFILES DE VELOCIDADES



PERFILES OBTENIDOS VS. REAL



ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA



V.M. CS1 = 0.299 m/s
 V.M. CS2 = 0.304 m/s
 V.M. CS3 = 0.353 m/s
 E.C.M. = 195.7 %
 E.C.M.P. = 24.6 %

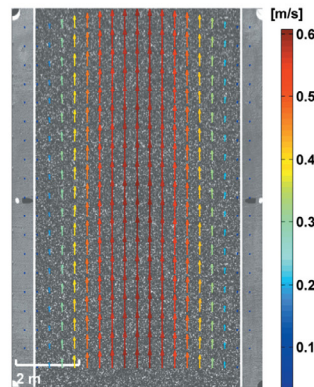
Figura 5.11 Resultados Perfil Parabólico – Vista Esquina 7.5°.

PERFIL PARABÓLICO - VISTA FRONTAL 30°

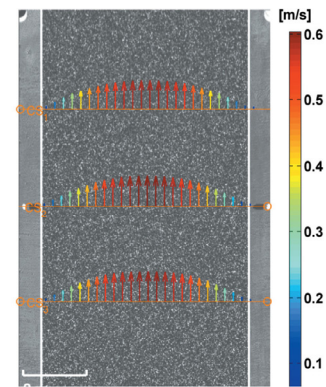
VISTA - DIRECCIÓN DEL FLUJO



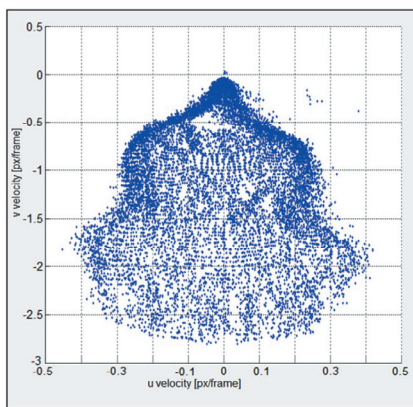
VECTORES GENERADOS



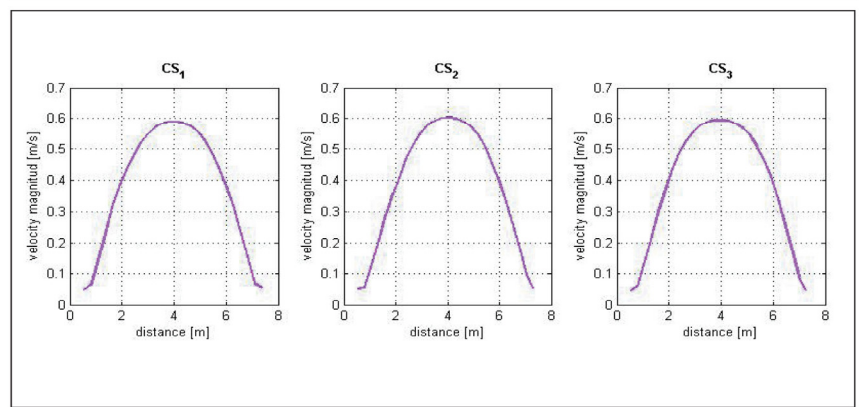
VECTORES POR SECCIONES



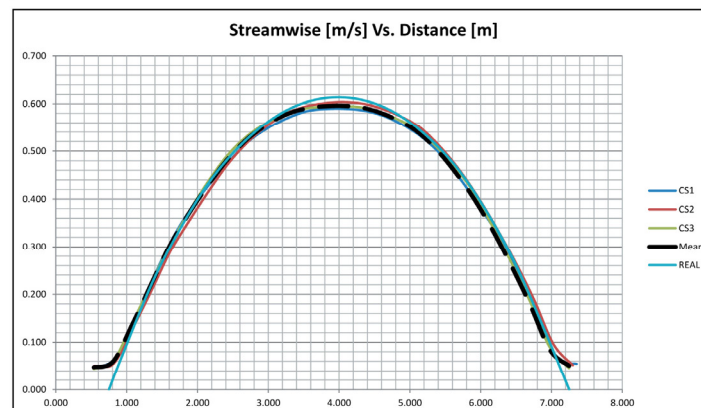
DISPERSIÓN



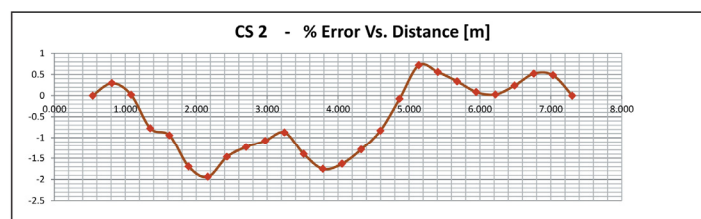
PERFILES DE VELOCIDADES



PERFILES OBTENIDOS VS. REAL



ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA

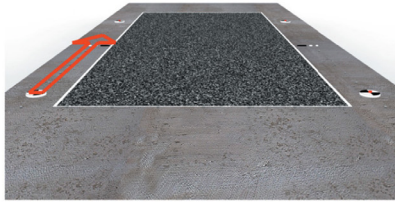


V.M. CS1 = 0.380 m/s
 V.M. CS2 = 0.387 m/s
 V.M. CS3 = 0.389 m/s
 E.C.M. = 64.17 %
 E.C.M.P. = 1.01 %

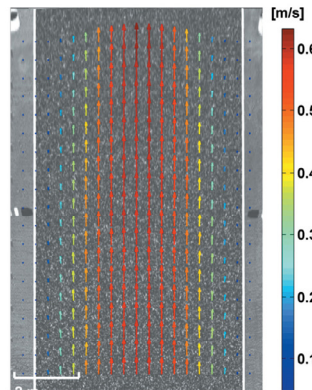
Figura 5.12 Resultados Perfil Parabólico – Vista Frontal 30°.

PERFIL PARABÓLICO - VISTA FRONTAL 15°

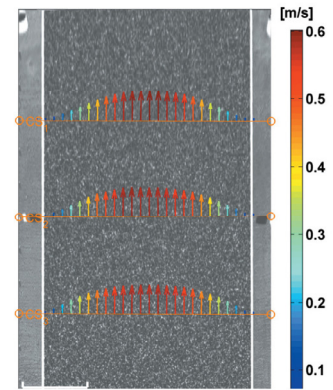
VISTA - DIRECCIÓN DEL FLUJO



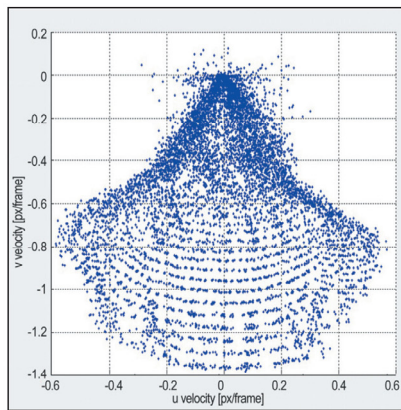
VECTORES GENERADOS



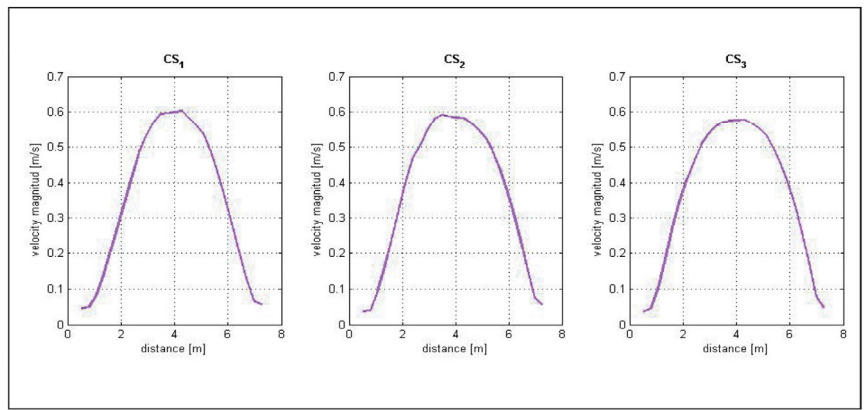
VECTORES POR SECCIONES



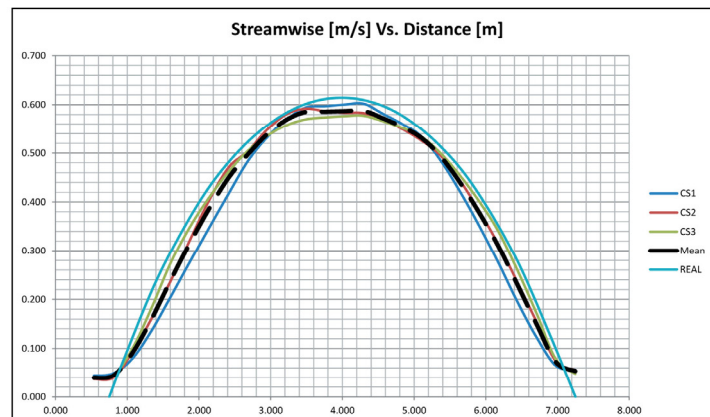
DISPERSIÓN



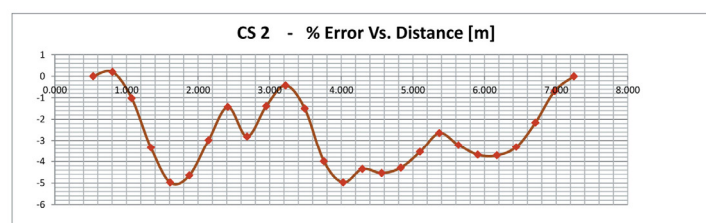
PERFILES DE VELOCIDADES



PERFILES OBTENIDOS VS. REAL



ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA

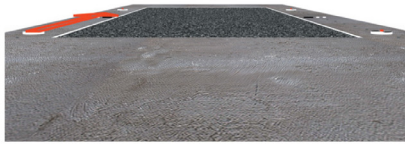


V.M. CS1 = 0.378 m/s
 V.M. CS2 = 0.392 m/s
 V.M. CS3 = 0.397 m/s
 E.C.M. = 101.9 %
 E.C.M.P. = 3.19 %

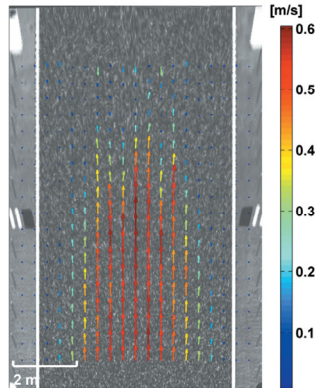
Figura 5.13 Resultados Perfil Parabólico – Vista Frontal 15°.

PERFIL PARABÓLICO - VISTA FRONTAL 7.5°

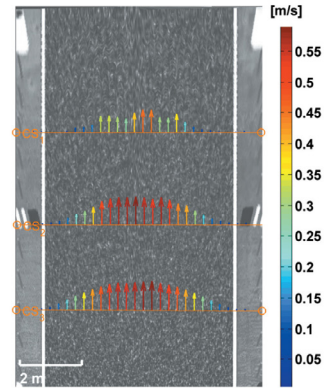
VISTA - DIRECCIÓN DEL FLUJO



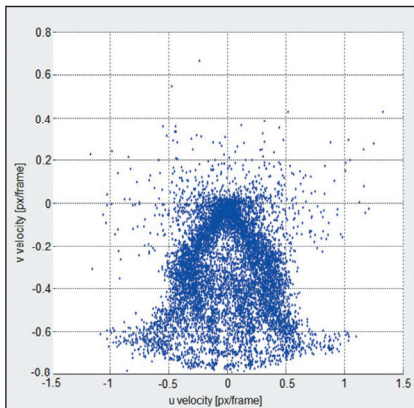
VECTORES GENERADOS



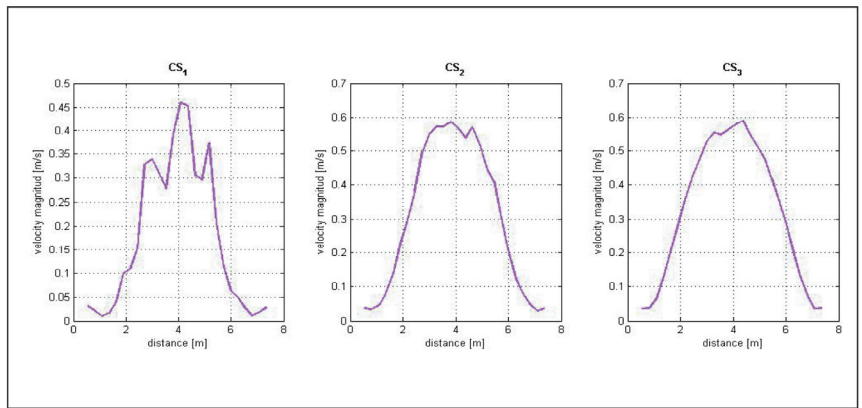
VECTORES POR SECCIONES



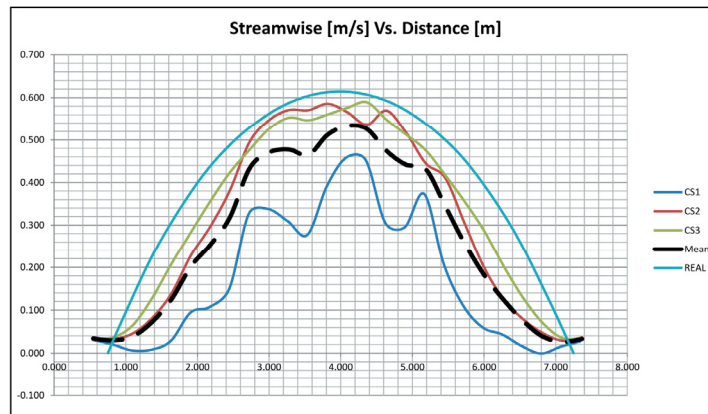
DISPERSIÓN



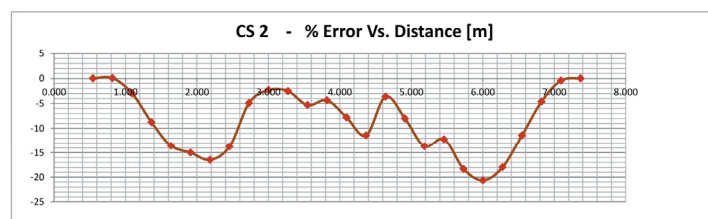
PERFILES DE VELOCIDADES



PERFILES OBTENIDOS VS. REAL



ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA



V.M. CS1 = 0.171 m/s
 V.M. CS2 = 0.303 m/s
 V.M. CS3 = 0.324 m/s
 E.C.M. = 55.69 %
 E.C.M.P. = 10.72 %

Figura 5.14 Resultados Perfil Parabólico – Vista Frontal 7.5°.

Respecto de lo expuesto hasta aquí podemos hacer algunas observaciones:

- Ancho del Cauce o extensión de las progresivas con datos de velocidad: Al igual que en el caso del Perfil Lineal Uniforme, a medida que disminuye el ángulo respecto de la horizontal, la extensión con valores no nulos de velocidad disminuye. Este efecto es menor en las tomas desde la esquina. Sin embargo no podemos relacionarlo con el tamaño de la ventana de interrogación. Convenientemente hemos definido tres secciones transversales que ahora nos permiten corroborar la aseveración antes formulada. Para las tomas de Esquina y Frontal, vemos que las secciones transversales extremas (Celeste y Verde) tienen la misma extensión de progresivas con datos de velocidad, por lo que la distorsión por perspectiva no es la causa del problema en cuestión.

-Corrimiento del perfil de velocidad detectado: También para este perfil se observa el fenómeno de corrimiento del total de los datos hacia el lado donde se ubica la cámara. Si comparamos los máximos valores de velocidad del perfil detectado y del perfil teórico, podemos determinar el corrimiento relativo para el perfil promedio (el ancho es el definido entre los puntos de referencia durante la rectificación):

<u>Lateral 30</u>	<u>Lateral 15</u>	<u>Lateral 7.5</u>
$C.R = \frac{0.30\ m}{8.00\ m} \times 100\% = 3.75\%$	$C.R = \frac{0.40\ m}{8.00\ m} \times 100\% = 5.00\%$	$C.R = \frac{1.00\ m}{8.00\ m} \times 100\% = 12.5\%$
<u>Esquina 30</u>	<u>Esquina 15</u>	<u>Esquina 7.5</u>
$C.R = \frac{0.30\ m}{8.00\ m} \times 100\% = 3.75\%$	$C.R = \frac{1.00\ m}{8.00\ m} \times 100\% = 12.5\%$	$C.R = \frac{1.60\ m}{8.00\ m} \times 100\% = 20.0\%$

- Disminución en magnitud de los valores del perfil: Con la disminución del ángulo de la cámara, también disminuyen las velocidades de cada punto de las secciones transversales. Además, se observa una disminución aun mayor sobre los puntos más alejados de la cámara, e incluso más acentuada sobre las secciones transversales más alejadas. Porcentaje de la velocidad promedio máxima respecto de la teórica (% VPM)

<u>Lateral 30</u>	<u>Lateral 15</u>	<u>Lateral 7.5</u>
$\% V.P.M = \frac{0.600\ m/s}{0.615\ m/s} \times 100\% = 97.6\%$	$\% V.P.M = \frac{0.560\ m/s}{0.615\ m/s} \times 100\% = 91.1\%$	$\% V.P.M = \frac{1.00\ m/s}{0.615\ m/s} \times 100\% = 86.2\%$
<u>Esquina 30</u>	<u>Esquina 15</u>	<u>Esquina 7.5</u>
$\% V.P.M = \frac{0.590\ m/s}{0.615\ m/s} \times 100\% = 95.9\%$	$\% V.P.M = \frac{0.580\ m/s}{0.615\ m/s} \times 100\% = 94.3\%$	$\% V.P.M = \frac{0.480\ m/s}{0.615\ m/s} \times 100\% = 78.0\%$

5.5. Perfil Parabólico – Análisis sobre la resolución y el IA

A modo de cierre de esta primera parte, se planteó la posibilidad de estudiar el error derivado del uso de resoluciones del dispositivo de captura cada vez menores. Esto resulta de interés ya que el material filmico recolectado durante períodos de violentas crecidas proviene de las más diversas fuentes digitales disponibles en el mercado y en muchos casos, dicho material no cuenta con la calidad o definición optimas con las que el personal de laboratorio acostumbra trabajar en proyectos de investigación. Al igual que en los casos anteriores, se calcularán los errores ponderados.

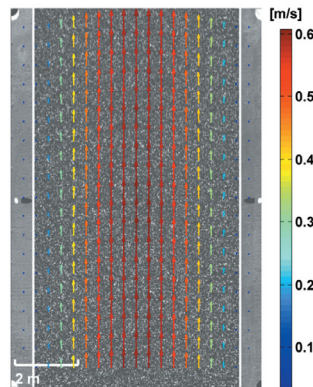
Para ello se han estudiado las siguientes variantes:

P. PARABÓLICO - V. FRONTAL 30° [Full Res. 1960 x 1080 px]

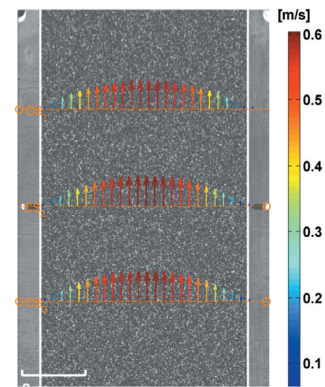
VISTA - DIRECCIÓN DEL FLUJO



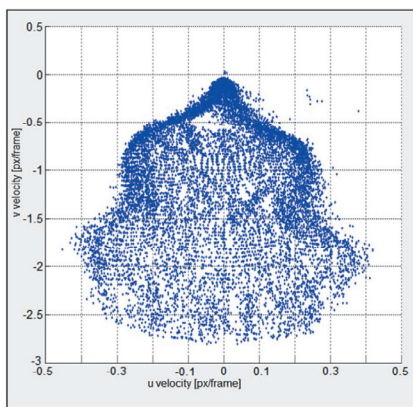
VECTORES GENERADOS



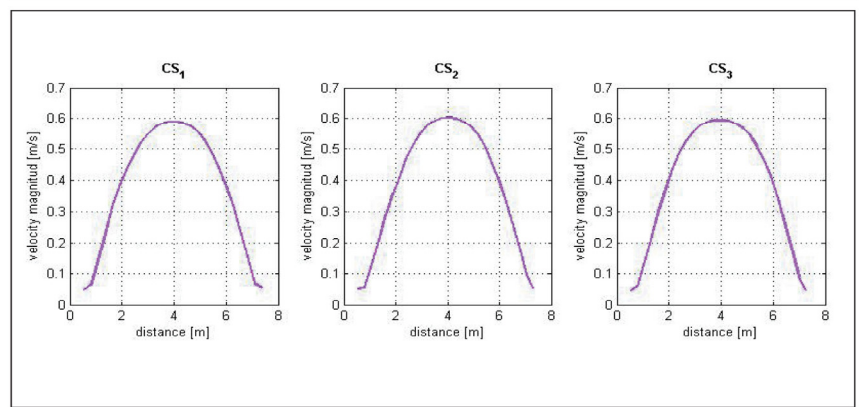
VECTORES POR SECCIONES



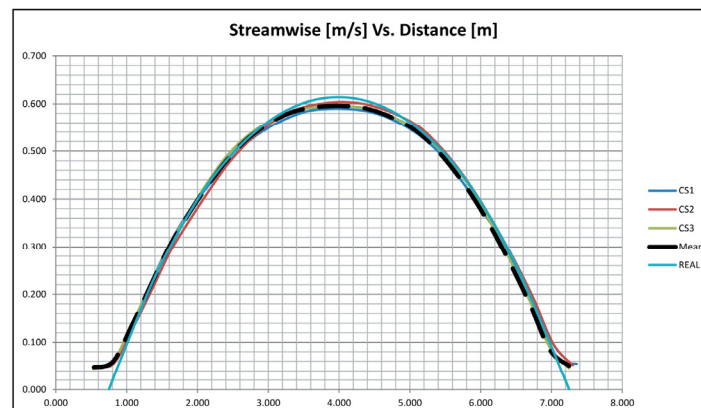
DISPERSIÓN



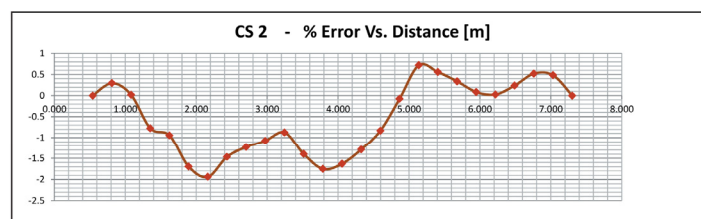
PERFILES DE VELOCIDADES



PERFILES OBTENIDOS VS. REAL



ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA

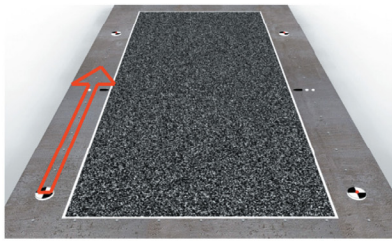


V.M. CS1 = 0.380 m/s
 V.M. CS2 = 0.387 m/s
 V.M. CS3 = 0.389 m/s
 E.C.M. = 64.17 %
 E.C.M.P. = 1.01 %

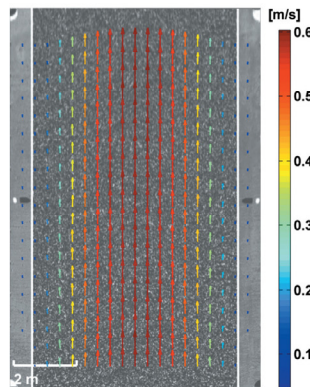
Figura 5.15 Resultados Perfil Parabólico – Vista Frontal 30° - Resolución Completa- 1960 x 1080 px.

P. PARABÓLICO - V. FRONTAL 30° [Half Res. 980 x 540 px]

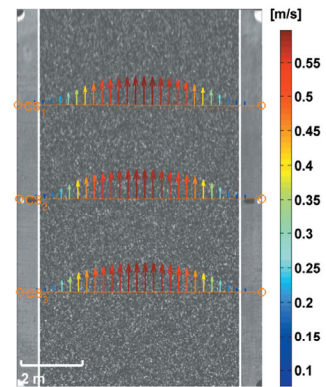
VISTA - DIRECCIÓN DEL FLUJO



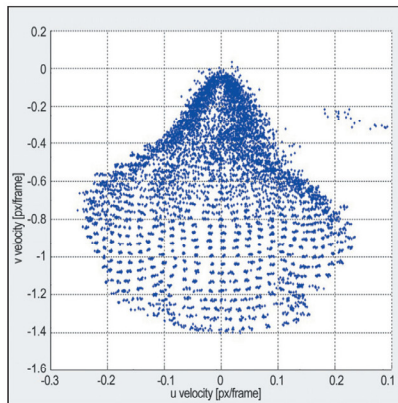
VECTORES GENERADOS



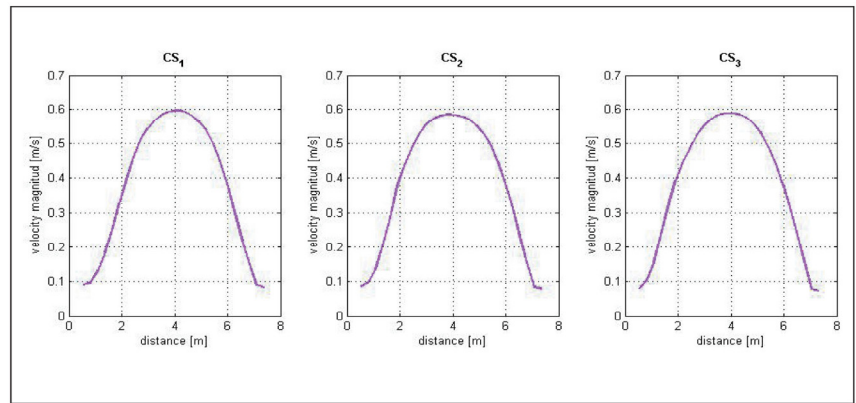
VECTORES POR SECCIONES



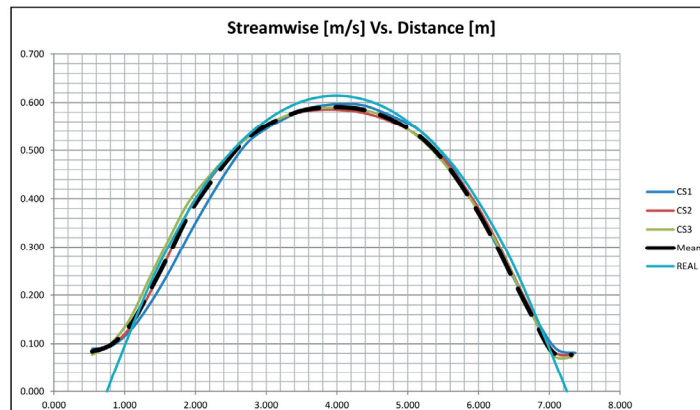
DISPERSIÓN



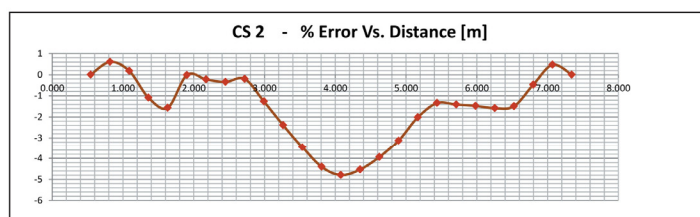
PERFILES DE VELOCIDADES



PERFILES OBTENIDOS VS. REAL



ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA

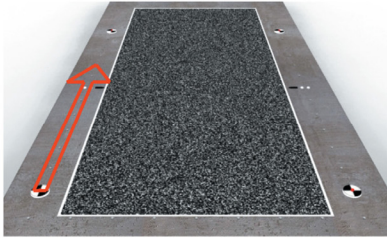


V.M. CS1 = 0.376 m/s
 V.M. CS2 = 0.382 m/s
 V.M. CS3 = 0.386 m/s
 E.C.M. = 88.22 %
 E.C.M.P. = 2.25 %

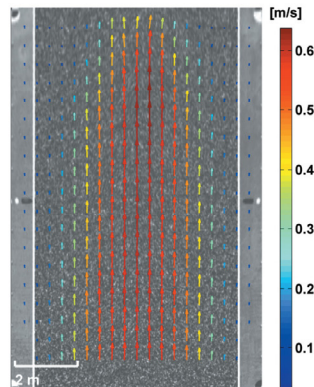
Figura 5.16 Resultados Perfil Parabólico – Vista Frontal 30° - Resolución al 50% - 980 x 540 px.

P. PARABÓLICO - V. FRONTAL 30° [Third Res. 653 x 360 px]

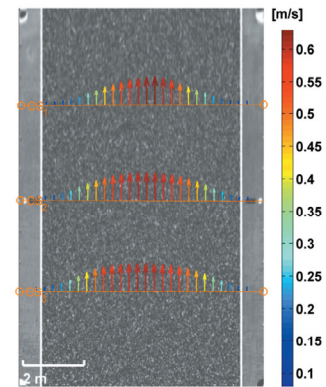
VISTA - DIRECCIÓN DEL FLUJO



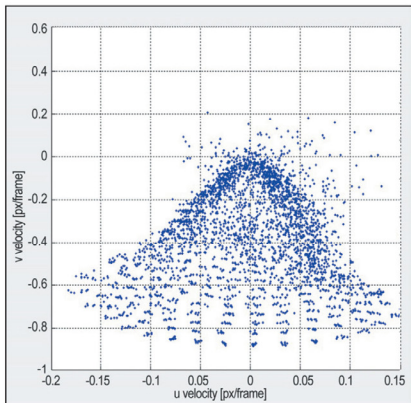
VECTORES GENERADOS



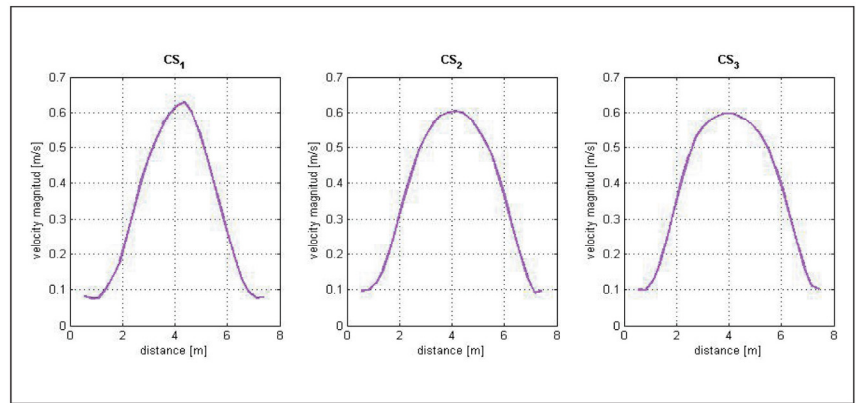
VECTORES POR SECCIONES



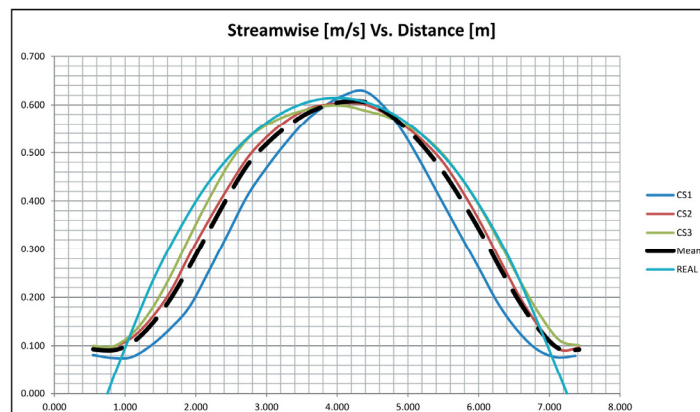
DISPERSIÓN



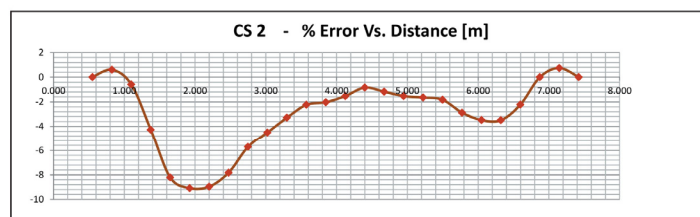
PERFILES DE VELOCIDADES



PERFILES OBTENIDOS VS. REAL



ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA

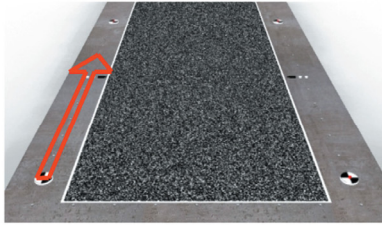


V.M. CS1 = 0.317 m/s
 V.M. CS2 = 0.364 m/s
 V.M. CS3 = 0.381 m/s
 E.C.M. = 91.08 %
 E.C.M.P. = 4.17 %

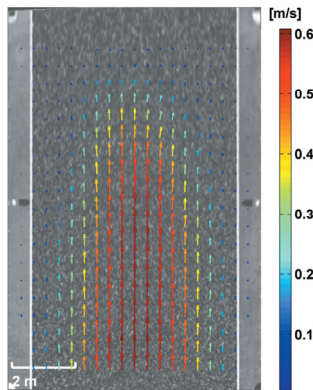
Figura 5.17 Resultados Perfil Parabólico – Vista Frontal 30° - Resolución al 33.3% - 653 x 360 px.

P. PARABÓLICO - V. FRONTAL 30° [Quarter Res. 490 x 270 px]

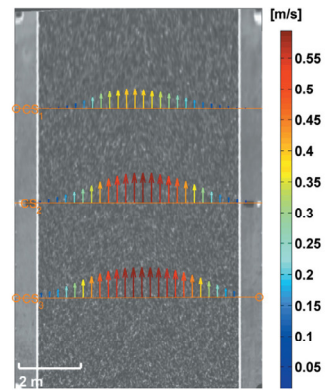
VISTA - DIRECCIÓN DEL FLUJO



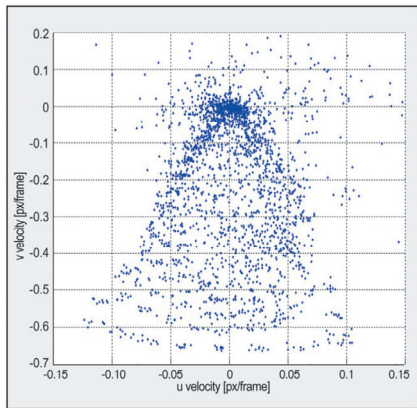
VECTORES GENERADOS



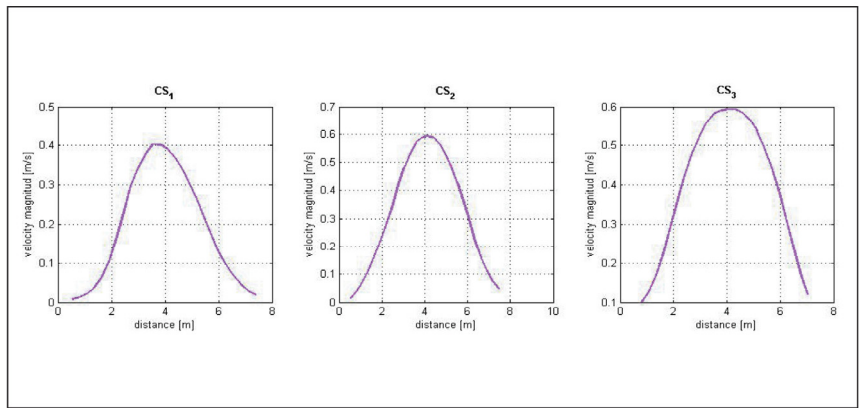
VECTORES POR SECCIONES



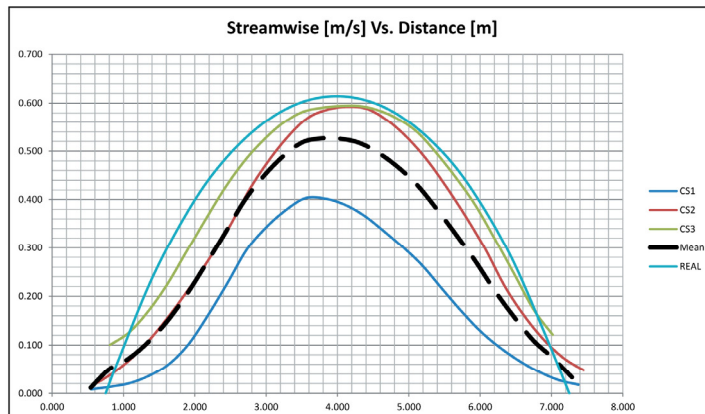
DISPERSIÓN



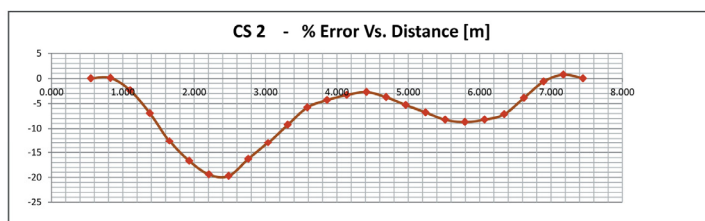
PERFILES DE VELOCIDADES



PERFILES OBTENIDOS VS. REAL



ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA

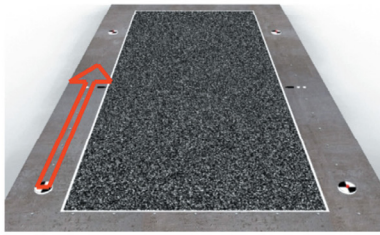


V.M. CS1 = 0.188 m/s
 V.M. CS2 = 0.319 m/s
 V.M. CS3 = 0.396 m/s
 E.C.M. = 79.27 %
 E.C.M.P. = 9.41 %

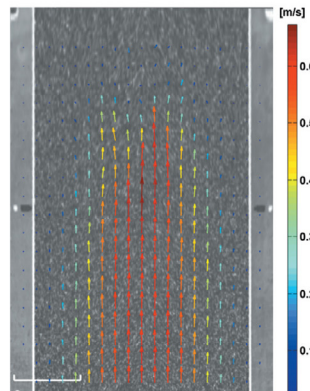
Figura 5.18 Resultados Perfil Parabólico – Vista Frontal 30° - Resolución al 25% - 490 x 270 px.

P. PARABÓLICO - V. FRONTAL 30° [Quarter - Int. Área = 32 px]

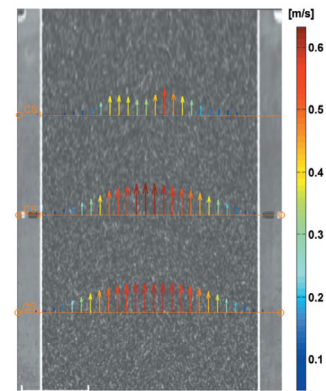
VISTA - DIRECCIÓN DEL FLUJO



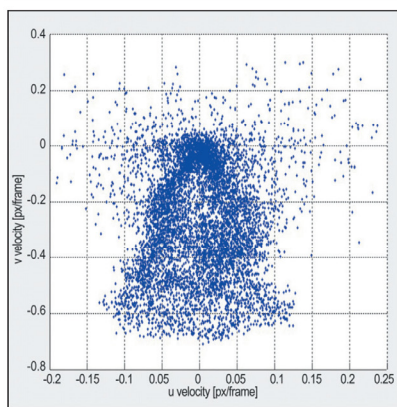
VECTORES GENERADOS



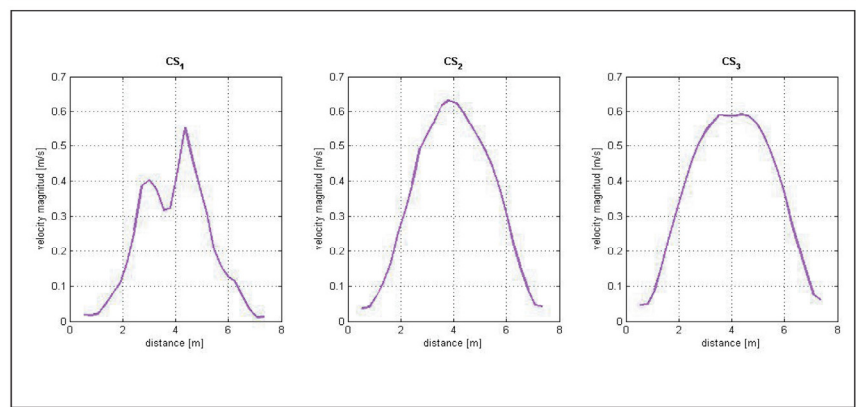
VECTORES POR SECCIONES



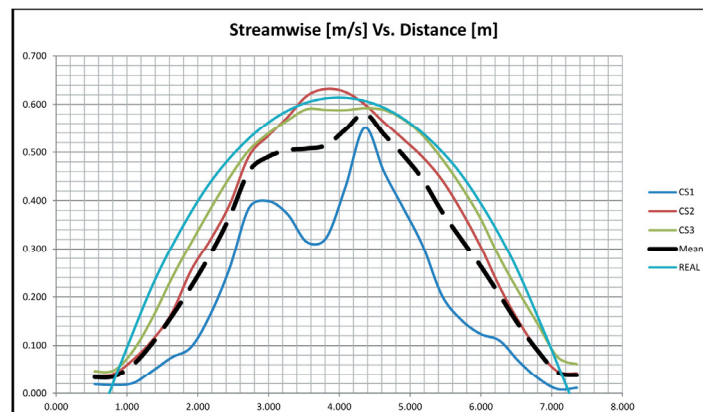
DISPERSIÓN



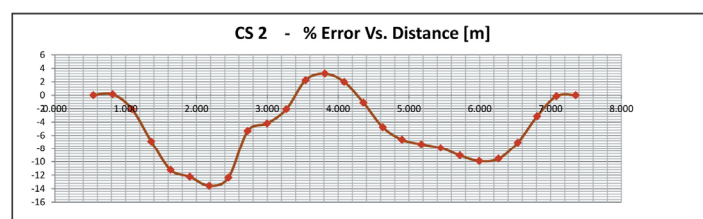
PERFILES DE VELOCIDADES



PERFILES OBTENIDOS VS. REAL



ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA

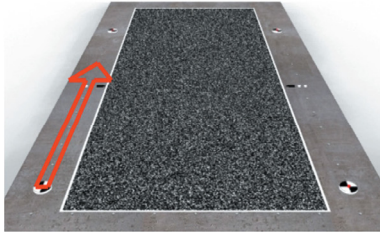


V.M. CS1 = 0.205 m/s
 V.M. CS2 = 0.336 m/s
 V.M. CS3 = 0.363 m/s
 E.C.M. = 51.73 %
 E.C.M.P. = 7.07 %

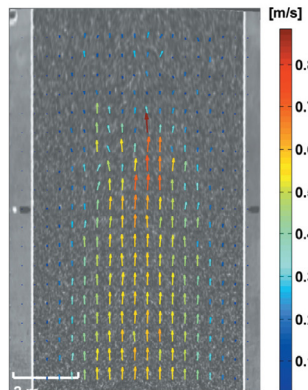
Figura 5.19 Resultados Perfil Parabólico – Vista Frontal 30° - Resolución al 25% - 490 x 270 px – IA 32 px.

P. PARABÓLICO - V. FRONTAL 30° [Quarter - Int. Área = 16 px]

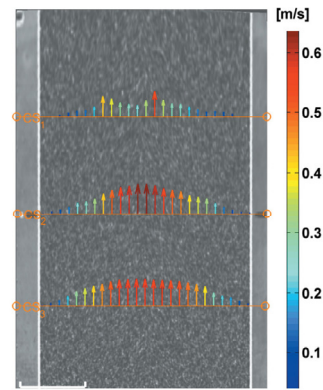
VISTA - DIRECCIÓN DEL FLUJO



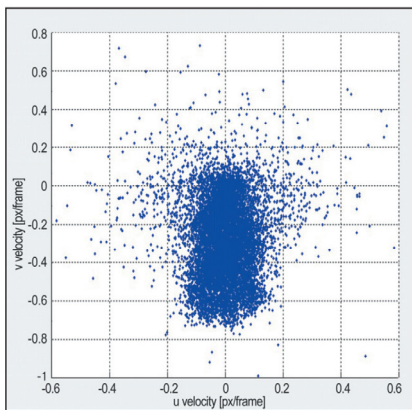
VECTORES GENERADOS



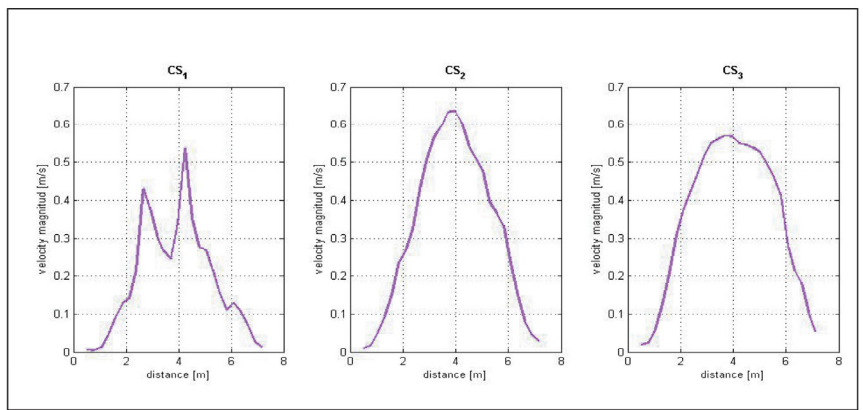
VECTORES POR SECCIONES



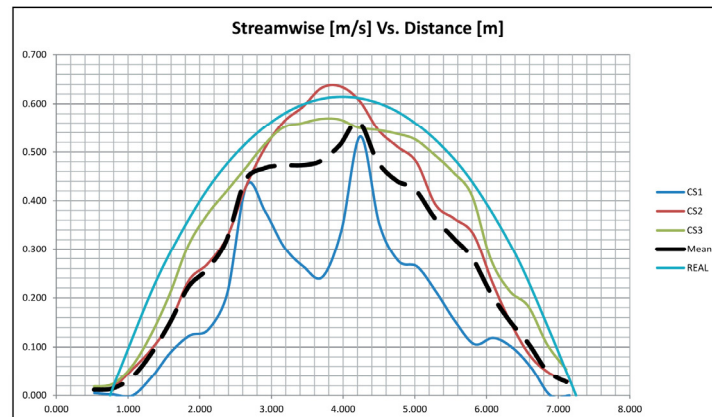
DISPERSIÓN



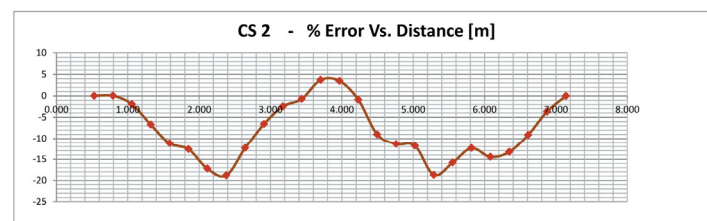
PERFILES DE VELOCIDADES



PERFILES OBTENIDOS VS. REAL



ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA



V.M. CS1 = 0.182 m/s
 V.M. CS2 = 0.319 m/s
 V.M. CS3 = 0.351 m/s
 E.C.M. = 40.12 %
 E.C.M.P. = 10.57 %

Figura 5.20 Resultados Perfil Parabólico – Vista Frontal 30° - Resolución al 25% - 490 x 270 px – IA 16 px.

Respecto de lo expuesto hasta aquí podemos hacer algunas observaciones:

- Efecto sobre la dispersión de los valores de velocidad obtenidos: A medida que se disminuye la resolución, hasta un tercio, los puntos sobre el ScatterPlot se dispersan, manteniéndose la forma o impronta original. Si se disminuye aún más, los puntos se empiezan a ubicar aleatoriamente alrededor de la coordenada 0.0, un comportamiento que indica que el algoritmo de correlación no puede obtener un patrón diferenciable dentro de la ventana de interrogación, y se encuentra trabajando sobre píxeles que no son más que un promedio, siempre cambiante, del movimiento capturado con una resolución insuficiente, o que los resultados son fuertemente influenciados por la presencia del algún algoritmo de compresión propio del formato digital elegido.

- Para la menor de las resoluciones propuestas, un cuarto de la original, se puede observar que un aumento en la precisión del análisis (disminuyendo el tamaño de la ventana de interrogación a 32px) produce un efecto positivo y el E.C.M.P se reduce, pero se acentúan algunos fenómenos locales ya observados en diversos otros casos estudiados de flujos reales, como una pronunciada hendidura o “valle” en el centro del perfil de la sección más alejada. Su causa es actualmente motivo de discusión. Por otro lado, disminuir aún más la ventana de interrogación produce el efecto contrario al esperado y el error se incrementa nuevamente. Además se acentúan los fenómenos locales mencionados.

De esta última parte ha surgido una interrogante, en particular, al observar los gráficos denominados como “Vectores Generados”: Se puede ver que a medida que disminuye la resolución, y teniendo en cuenta que por la perspectiva, la parte más alejada del flujo es la más severamente afectada en el proceso de detección de movimiento, la ausencia de vectores es más evidente. Esto nos lleva a plantearnos si es posible definir cualitativa o cuantitativamente una porción de la imagen de manera tal de poder establecer una relación entre el nivel de “ruido”, o diferenciabilidad de un patrón de movimiento por sobre la señal de base, y la resolución mínima necesaria para que una determinada ventana de interrogación permita al algoritmo entregar valores significativos. Esto sería de gran utilidad en vistas de poder definir los rangos óptimos de trabajo de los dispositivos de captura en función de su resolución, la distancia al objetivo, y el ancho de cauce a relevar. Sin embargo este aspecto revista una complejidad que excede el ámbito dentro del cual se encuadra este trabajo de investigación.

5.6. Resumen de los resultados obtenidos

Finalmente y para facilitar una rápida comparación, se presentan en la siguiente tabla, los errores calculados para cada uno de los casos analizados:

VISTA	VELOCIDADES MEDIAS			ECM	ECMP															
	CS1	CS2	CS3																	
L UNIFORME																				
SUPERIOR	1.401	1.400	1.400	0.05	-															
LATERAL 30	1.384	1.390	1.388	0.76	-															
LATERAL 15	1.355	1.369	1.379	2.32	-															
LATERAL 7.5	1.272	1.295	1.312	7.83	-															
<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td>V.Teórica Lineal</td> <td>1.400</td> </tr> <tr> <td>V.Teórica Media Parabólica</td> <td>0.416</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">ERROR RELATIVO % (respecto de V.Teórica Media Parabólica)</td> </tr> <tr> <td>CS1</td> <td>CS2</td> <td>CS3</td> </tr> </table>						V.Teórica Lineal	1.400	V.Teórica Media Parabólica	0.416	ERROR RELATIVO % (respecto de V.Teórica Media Parabólica)		CS1	CS2	CS3						
V.Teórica Lineal	1.400																			
V.Teórica Media Parabólica	0.416																			
ERROR RELATIVO % (respecto de V.Teórica Media Parabólica)																				
CS1	CS2	CS3																		
PARABÓLICO																				
SUPERIOR	0.491	0.488	0.486	3.79	1.36															
LATERAL 30	0.487	0.491	0.491	14.00	5.10															
LATERAL 15	0.512	0.511	0.503	14.15	8.33															
LATERAL 7.5	0.481	0.488	0.497	58.78	14.25															
<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td>18.0</td> <td>17.3</td> <td>16.8</td> </tr> <tr> <td>17.1</td> <td>18.0</td> <td>18.0</td> </tr> <tr> <td>23.1</td> <td>22.8</td> <td>20.9</td> </tr> <tr> <td>15.6</td> <td>17.3</td> <td>19.5</td> </tr> </table>						18.0	17.3	16.8	17.1	18.0	18.0	23.1	22.8	20.9	15.6	17.3	19.5			
18.0	17.3	16.8																		
17.1	18.0	18.0																		
23.1	22.8	20.9																		
15.6	17.3	19.5																		
ESQ. 30	0.393	0.387	0.385	105.57	3.22															
ESQ. 15	0.372	0.385	0.395	257.93	8.04															
ESQ. 7.5	0.299	0.304	0.353	195.67	24.36															
<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td>-5.5</td> <td>-7.0</td> <td>-7.5</td> </tr> <tr> <td>-10.6</td> <td>-7.5</td> <td>-5.0</td> </tr> <tr> <td>-28.1</td> <td>-26.9</td> <td>-15.1</td> </tr> </table>						-5.5	-7.0	-7.5	-10.6	-7.5	-5.0	-28.1	-26.9	-15.1						
-5.5	-7.0	-7.5																		
-10.6	-7.5	-5.0																		
-28.1	-26.9	-15.1																		
FRONTAL 30	0.380	0.387	0.389	64.17	1.01															
FRONTAL 15	0.378	0.392	0.397	101.92	3.19															
FRONTAL 7.5	0.171	0.303	0.324	55.69	10.72															
<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td>-8.7</td> <td>-7.0</td> <td>-6.5</td> </tr> <tr> <td>-9.1</td> <td>-5.8</td> <td>-4.6</td> </tr> <tr> <td>-58.9</td> <td>-27.2</td> <td>-22.1</td> </tr> </table>						-8.7	-7.0	-6.5	-9.1	-5.8	-4.6	-58.9	-27.2	-22.1						
-8.7	-7.0	-6.5																		
-9.1	-5.8	-4.6																		
-58.9	-27.2	-22.1																		
Máximos	0.512	0.511	0.503	257.93	24.36															
Mínimos	0.171	0.303	0.324	3.790	1.010															
F. 30 HALF	0.376	0.382	0.386	88.22	2.25															
F.30 THIRD	0.317	0.364	0.381	91.08	4.17															
F.30 QUAR	0.188	0.319	0.396	79.27	9.41															
F.30 Q IA 32	0.205	0.336	0.363	51.73	7.07															
F.30 Q IA 16	0.182	0.319	0.351	40.12	10.57															
<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td>-9.6</td> <td>-8.2</td> <td>-7.2</td> </tr> <tr> <td>-23.8</td> <td>-12.5</td> <td>-8.4</td> </tr> <tr> <td>-54.8</td> <td>-23.3</td> <td>-4.8</td> </tr> <tr> <td>-50.7</td> <td>-19.2</td> <td>-12.7</td> </tr> <tr> <td>-56.3</td> <td>-23.3</td> <td>-15.6</td> </tr> </table>						-9.6	-8.2	-7.2	-23.8	-12.5	-8.4	-54.8	-23.3	-4.8	-50.7	-19.2	-12.7	-56.3	-23.3	-15.6
-9.6	-8.2	-7.2																		
-23.8	-12.5	-8.4																		
-54.8	-23.3	-4.8																		
-50.7	-19.2	-12.7																		
-56.3	-23.3	-15.6																		

Figura 5.21 Tabla resumen de resultados obtenidos sobre velocidades.

- Se puede observar que en la mayoría de los casos, el error sobre velocidades medias es mayor en la sección más alejada en relación a la cámara (Sección 1, de color celeste). Aun en la vista superior y las laterales, donde equidistan la CS1 y la CS2 respecto de la cámara, el error es, en general, mayor en la sección ubicada “aguas abajo”, es decir, la CS1.

-A excepción de las vistas laterales donde el área de análisis disminuye drásticamente para los ángulos menores, en el resto de las tomas el error sobre velocidades medias crece a medida que dicho ángulo disminuye.

- Se puede apreciar la diferencia entre el E.C.M y el E.C.M.P., mostrando este último una tendencia en relación a los demás datos que se presentan. Observando la tasa incremental de los errores sobre velocidades medias para cada sección transversal, se parecía un crecimiento similar en el E.C.M.P. En general, se considera que un E.C.M.P. mayor al 10% indica que el perfil obtenido no representa satisfactoriamente el perfil teórico.

En vistas de proporcionar una forma distinta de representación de los resultados obtenidos, que permita al lector generarse una mejor idea de los errores asociados a cada una de las distintas posiciones de la cámara, se ha elaborado el siguiente esquema en base al entorno de simulación 3D.

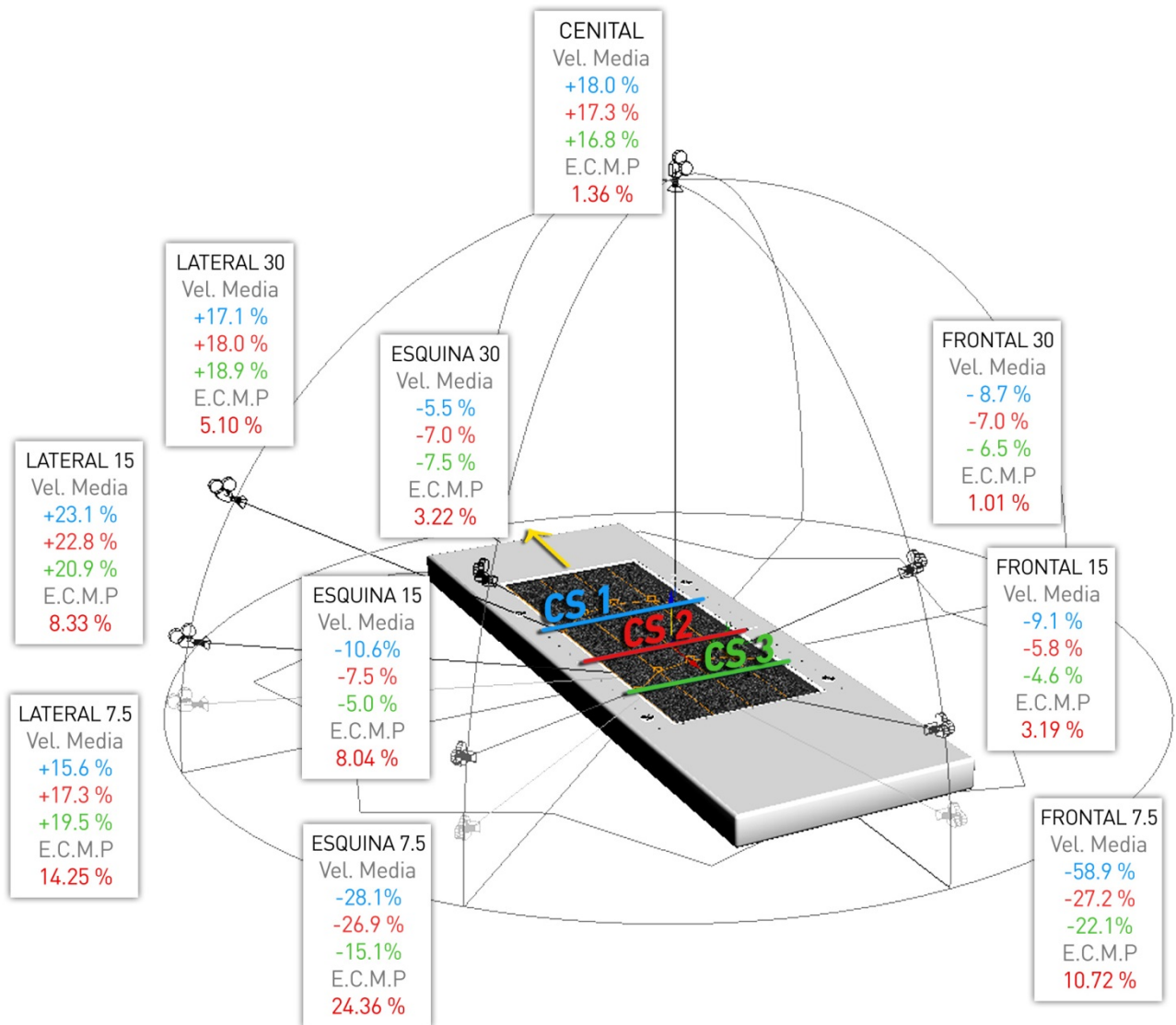


Figura 5.22 Esquema tridimensional del entorno de simulación mostrando las cámaras involucradas y los errores correspondientes.

SEGUNDA PARTE

ESTUDIOS SOBRE CAUDALES

CAPITULO 6: CONCEPTOS PRELIMINARES

6. CONCEPTOS PRELIMINARES

6.1. Hacia una aproximación a los flujos naturales

Recordando que objetivo de este trabajo es poder cuantificar errores en la aplicación de la técnica de PIV sobre flujos a gran escala, es menester analizar el desempeño de la técnica sobre una amplia variedad de flujos y perfiles de velocidad que de alguna manera se asemejen a los que se observan en la naturaleza. Nuestro estudio en esta etapa involucrará no sólo el perfil de velocidad obtenido sino además un perfil batimétrico, ya que ambos son esenciales para el cálculo de caudales. Sin embargo, estos no pueden ser definidos arbitrariamente, debe existir un basamento teórico que permita modelar una situación de flujo, relacionando esos elementos, y que refleje una aproximación al comportamiento de flujos naturales. Este se materializará a través de la generación de perfiles batimétricos por medio de un Interpolador paramétrico, y la subsiguiente obtención del perfil de velocidades a través de un desarrollo en MATLAB específico para este trabajo y del conocido método de la Entropía.

6.2. Generación de perfiles batimétricos

La forma de cada uno de los hipotéticos cauces, de los cuales se obtendrá luego el correspondiente perfil de velocidad, se definirá por medio del uso de un Interpolador Paramétrico de distribución Gamma (Díaz Lozada, J. M.; 2014 [4]). Siendo el software Excel el soporte de tal interpolador, el mismo provee un perfil de profundidad máxima y ancho unitarios. Siendo α y β los parámetros de entrada, los mismos permiten definir la forma general y la ubicación de la profundidad máxima del cauce, siendo u la profundidad según ecuación 6.1. El incremento de progresivas es variable y los datos obtenidos serán luego utilizados para aplicar el método Entrópico (Anexo).

$$\frac{u(y)}{U} = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{y}{B}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{y}{B}\right)^{\beta-1} \tag{Ec.6.1}$$

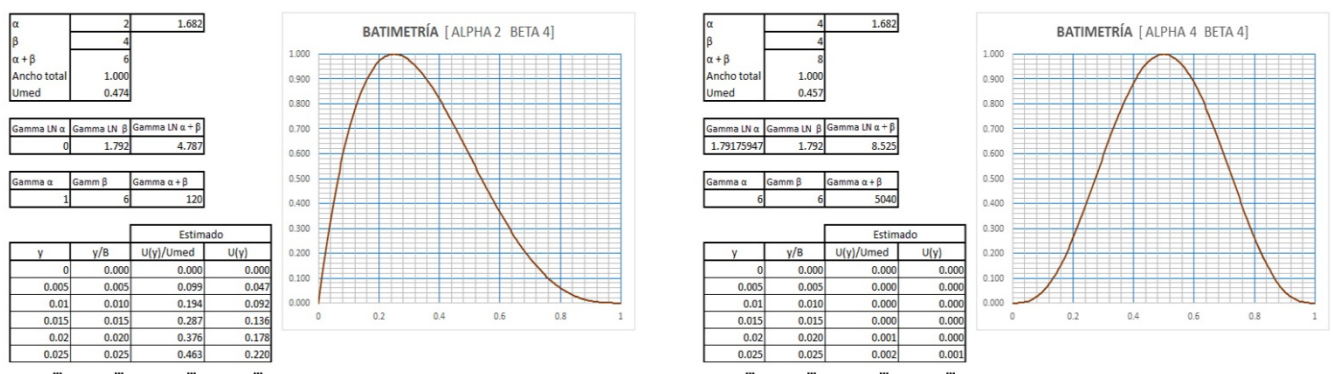


Figura 6.1 Perfiles batimétricos generados por el interpolador paramétrico.

6.3. Generación de perfiles de velocidad

Chiu, y más tarde Chiu y Murray, Chiu y Said, Chiu y Tung, formularon un modelo probabilístico, basado en la maximización de la entropía en una sección transversal de un río; que vincula la velocidad u en un punto genérico con el valor correspondiente de la distribución de probabilidad acumulada $F(u)$:

$$u = \frac{u_{\max}}{M} \ln[1 + (e^M - 1)F(u)]$$

donde u_{\max} es la máxima velocidad puntual dentro de la sección transversal y M es un parámetro. En particular, $F(u)$ se puede leer como la fracción de área de flujo en el que la velocidad sigue siendo inferior o igual a u y es por lo tanto rápida y fácilmente identificable una vez que se conocen las curvas de isovelocidad.

En este trabajo, los datos de progresivas y las profundidades correspondientes, sirven de entrada para el programa que aplica el método de Entropía (Patalano, A.; 2014 [5]). Este programa genera como salida los siguientes elementos: Un gráfico de la batimetría con una escala de color representado las velocidades en toda la sección transversal del perfil, un perfil de las velocidades superficiales estimadas, y un archivo de Excel que contiene los datos de las progresivas y los correspondientes valores de velocidad, que servirán para definir con precisión el desplazamiento de los objetos que simularán el movimiento en el entorno de modelado 3D. En este caso particular, una rutina basada sobre un concepto descrito en Bechle [6] permite, a partir de una batimetría dada y la posición de la velocidad más alta de una sección, sintetizar el campo de velocidades verticales de la misma. La Entropía nos proporcionará el campo completo de velocidades verticales, sin embargo se utilizará solamente el perfil de velocidad superficial en la simulación ya que el principal objetivo es reproducir las condiciones de campo.

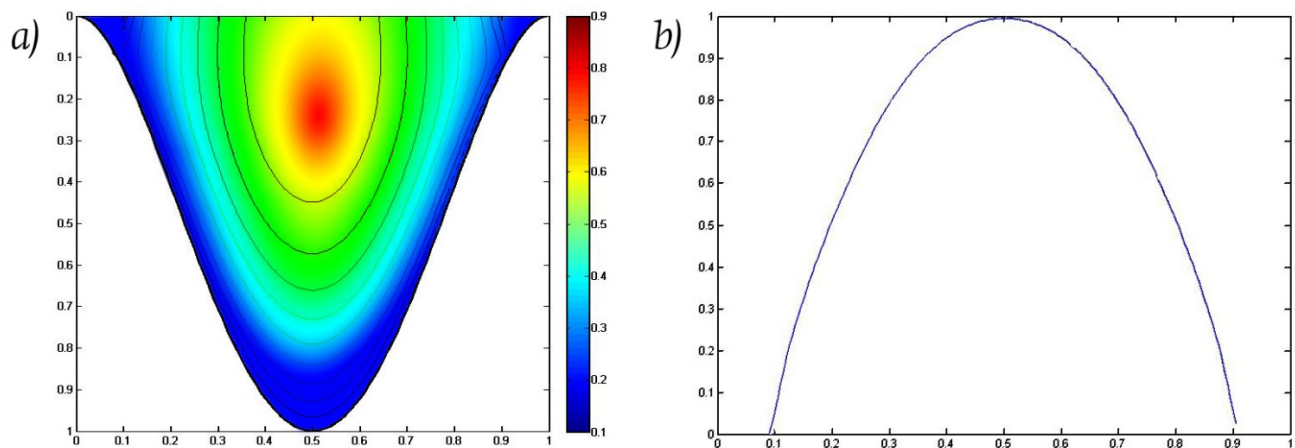


Figura 6.2 a) Gráfico de Progresiva-Profundidad-Velocidad de Flujo generado por el método de Entropía. b) Perfil de velocidad superficial resultante.

6.4. Generación de la simulación

Debido a la los altos gradientes que presentan los nuevos perfiles de velocidad generados por el método de la Entropía, se debió generar una solución para el problema de distorsión de la textura base (Figura 6.4.a) que ocasionaba el método de malla y caja de deformación paramétrica (Figura 6.4.b).

La solución consiste en subdividir la malla, sobre la cual se aplicó la textura, en un número lo suficientemente grande de fajas longitudinales (alrededor de 200) para obtener una buena resolución del movimiento, y animar cada una de ellas por medio de un sencillo script que toma las coordenadas del archivo de Excel, producto del código del método de la Entropía.

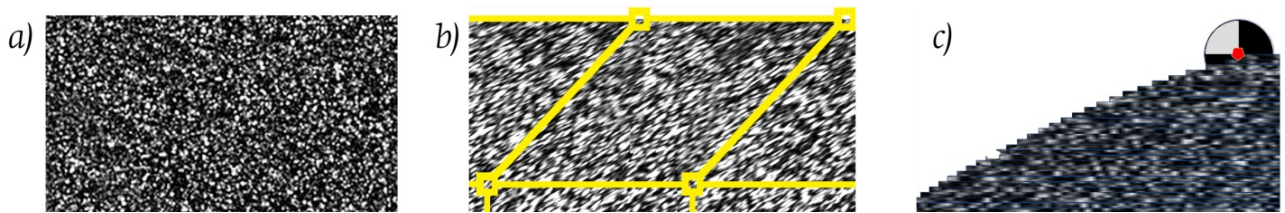


Figura 6.3 a) Textura base b) Textura distorsionada por efecto del modificador paramétrico. c) Textura animada sin distorsión, obtenida por medio del método de subdivisión en fajas.

6.5. Secuencia de trabajo

La secuencia de operaciones es, en su mayor parte, similar a la definida en capítulos anteriores. Sin embargo, debido al mayor número de combinaciones de perfiles de batimetría y velocidad superficial, el método de ponderación de error implica elaborar una función específica para cada combinación en particular, por lo que el método de tratamiento de los errores extremos será de un carácter más expeditivo: Aquellos valores de velocidad menores al 15 % de la máxima, que introduzcan altos valores de error serán apartados del cálculo del Error Cuadrático Medio. La validez de esta forma de trabajo puede comprobarse fácilmente al observar, que en general, los mayores errores de extremo se corresponden con el hecho de que los perfiles de velocidad teóricos presentan quiebres muy pronunciados sobre sus contornos, y como los perfiles obtenidos de los análisis contienen datos interpolados en forma similar a la gaussiana, esos errores calculados no tienen otro origen más que la imposibilidad de “calcar” esos quiebres a no ser que la precisión del algoritmo se incremente de forma totalmente innecesaria. Si se observan los perfiles superpuestos, se verá que esos valores no coincidentes corresponden a velocidades incluso menores al 10% de la máxima. En conclusión, el aporte de estos valores apartados, multiplicados por su respectiva área diferencial igualmente pequeña, es en el cálculo de caudales, insignificante.

El análisis final de los errores relativos se hará teniendo en cuenta los caudales observados y teóricos para cada combinación.

Se compararán pares de perfiles simétricos respecto del eje paralelo al flujo, de manera de poder analizar el error por ubicación de la cámara.

Por último, en vista de obtener una guía a la hora de elegir la mejor posición de captura digital, se calculará el E.C.M para cada cámara en función de todas las combinaciones generadas.

6.6. Listado de combinaciones

Parámetros del Interpolador (Batimetría)

$\alpha=1.2$	$\beta=1.2$
$\alpha=1.2$	$\beta=2$
$\alpha=2$	$\beta=1.2$
$\alpha=2$	$\beta=2$
$\alpha=2$	$\beta=3$
$\alpha=3$	$\beta=2$
$\alpha=2$	$\beta=4$
$\alpha=4$	$\beta=2$
$\alpha=3$	$\beta=3$
$\alpha=3$	$\beta=5$
$\alpha=5$	$\beta=3$

Cámaras

Superior
Lateral 45
Lateral 15
Esquina 45
Esquina 15
Frontal 45
Frontal 15

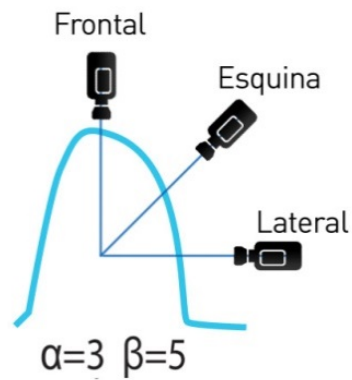


Figura 6.4 Esquema de ubicación de cámaras.

CAPITULO 7: RESULTADOS DEL ANÁLISIS

7. RESULTADOS DEL ANÁLISIS

7.1. Tabla resumen de caudales

Como se había indicado en el capítulo anterior, nos centramos ahora en el cálculo de caudales. Por cada uno de los perfiles propuestos, se ha calculado un caudal “Teórico” a partir de los perfiles de batimetría propuesta y de velocidades superficiales (como resultado de la aplicación del método de Entropía). Luego, por cada perfil y para las diferentes posiciones de la cámara, se ha calculado un caudal, que denominaremos “Obtenido”. A continuación se presentan los Q. Teóricos y Q. Obtenidos para cada una de las variantes analizadas, el error relativo porcentual involucrado y, como una medida general que permita una apreciación rápida de la dispersión para cada posición de la cámara, el Error Cuadrático Medio en base a todos los perfiles para cada ángulo.

	V. Superior		Lateral 45°		Lateral 15°		Esquina 45°		Esquina 15°		Frontal 45°		Frontal 15°	
	Q. Obt.	Q. Teór.	Q. Obt.	Q. Teór.	Q. Obt.	Q. Teór.	Q. Obt.	Q. Teór.	Q. Obt.	Q. Teór.	Q. Obt.	Q. Teór.	Q. Obt.	Q. Teór.
a=1.2 b=1.2	0.5715	0.5684	0.5759	0.5684	0.5832	0.5684	0.5724	0.5684	0.5689	0.5684	0.5705	0.5684	0.5715	0.5684
a=1.2 b=2	0.4766	0.4763	0.4801	0.4763	0.4814	0.4763	0.4734	0.4763	0.4757	0.4763	0.4763	0.4763	0.4715	0.4763
a=2 b=1.2	0.4570	0.4762	0.4575	0.4762	0.4795	0.4762	0.4814	0.4762	0.4718	0.4762	0.4692	0.4762	0.4584	0.4762
a=2 b=2	0.5135	0.5146	0.5107	0.5146	0.5094	0.5146	0.5197	0.5146	0.5167	0.5146	0.5174	0.5146	0.5136	0.5146
a=2 b=3	0.4153	0.4197	0.4141	0.4197	0.4426	0.4197	0.4157	0.4197	0.4033	0.4197	0.4166	0.4197	0.4141	0.4197
a=3 b=2	0.4224	0.4213	0.4316	0.4213	0.4228	0.4213	0.4211	0.4213	0.4412	0.4213	0.4214	0.4213	0.4343	0.4213
a=2 b=4	0.3861	0.3837	0.3798	0.3837	0.4205	0.3837	0.3819	0.3837	0.3642	0.3837	0.3820	0.3837	0.3627	0.3837
a=4 b=2	0.3863	0.3837	0.3856	0.3837	0.4065	0.3837	0.3838	0.3837	0.3808	0.3837	0.3818	0.3837	0.3771	0.3837
a=3 b=3	0.4309	0.4309	0.4309	0.4309	0.4322	0.4309	0.4300	0.4309	0.4233	0.4309	0.4309	0.4309	0.4282	0.4309
a=3 b=5	0.3636	0.3644	0.3619	0.3644	0.4173	0.3644	0.3597	0.3644	0.3671	0.3644	0.3645	0.3644	0.3504	0.3644
a=5 b=3	0.3651	0.3643	0.3666	0.3643	0.3604	0.3643	0.3678	0.3643	0.3619	0.3643	0.3643	0.3643	0.3592	0.3643

ERROR %							
a=1.2 b=1.2	0.55%	1.32%	2.60%	0.70%	0.09%	0.37%	0.55%
a=1.2 b=2	0.06%	0.80%	1.07%	-0.61%	-0.13%	0.00%	-1.01%
a=2 b=1.2	-4.03%	-3.93%	0.69%	1.09%	-0.92%	-1.47%	-3.74%
a=2 b=2	-0.21%	-0.76%	-1.01%	0.99%	0.41%	0.54%	-0.19%
a=2 b=3	-1.04%	-1.33%	5.46%	-0.95%	-3.90%	-0.73%	-1.33%
a=3 b=2	0.26%	2.44%	0.36%	-0.05%	4.72%	0.02%	3.09%
a=2 b=4	0.63%	-1.02%	9.59%	-0.47%	-5.08%	-0.44%	-5.47%
a=4 b=2	0.68%	0.50%	5.94%	0.03%	-0.76%	-0.50%	-1.72%
a=3 b=3	0.00%	0.00%	0.30%	-0.21%	-1.76%	0.00%	-0.62%
a=3 b=5	-0.21%	-0.67%	14.53%	-1.28%	0.75%	0.04%	-3.83%
a=5 b=3	0.21%	0.63%	-1.08%	0.96%	-0.66%	-0.01%	-1.41%

V. Superior	Lateral 45°		Lateral 15°		Esquina 45°		Esquina 15°		Frontal 45°		Frontal 15°		
Sum Cuad	0.00	Sum Cuad	0.00	Sum Cuad	0.04	Sum Cuad	0.00	Sum Cuad	0.01	Sum Cuad	0.00	Sum Cuad	0.01
n-1	10	n-1	10	n-1	10	n-1	10	n-1	10	n-1	10	n-1	10
E.C.M	1.37%	E.C.M	1.68%	E.C.M	6.16%	E.C.M	0.82%	E.C.M	2.63%	E.C.M	0.60%	E.C.M	2.77%



Figura 7.1 Tabla Resumen de Caudales.

7.2. Gráfico de Dispersión por Perfil

En una búsqueda por lograr dilucidar una posible relación entre la distribución de velocidades superficiales y la posición de la cámara, se realizó una síntesis de los errores alcanzados en las mediciones de caudal y se construyó la siguiente gráfica. En la misma se observa para cada una de las batimetrías y las diferentes posiciones de la cámara el error porcentual alcanzado:

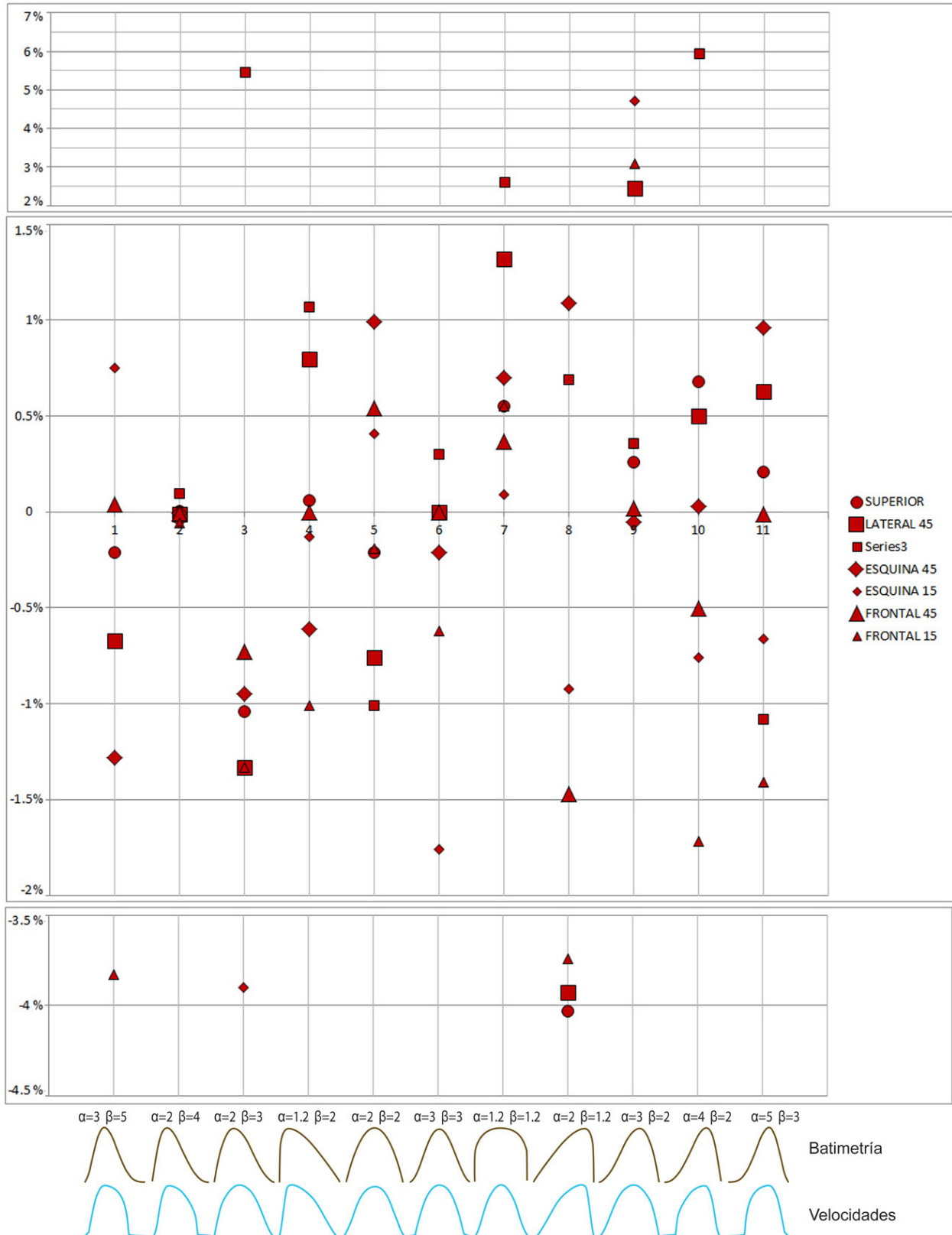


Figura 7.2 Error relativo sobre caudales para cada perfil.

7.3. Observaciones

- Si bien la cantidad de perfiles necesarios para obtener patrones de dispersión consistentes en vistas de caracterizar el desempeño del procedimiento y su sensibilidad frente a las variables involucradas es, al menos, de un orden de magnitud superior al analizado en este trabajo, es posible hacer algunas observaciones de lo expuesto anteriormente en este capítulo.

- En función del tipo de perfil analizado, podemos decir que aquellos con fuertes gradientes y marcadamente asimétricos, involucran mayores errores.

- Los perfiles asimétricos que presentan su pico de velocidad máxima alejado de la posición de captura, están asociados a caudales obtenidos menores que el teórico. Así mismo, aquellos con su valor máximo de velocidad cercano a la cámara, entregan valores de caudal menores al teórico.

- Las posiciones de Esquina a 45° y Frontal a 45° entregan valores de E.C.M menores incluso que el asociado a la posición Superior, Se estima que esto se debe a una mayor área disponible para el análisis PIV como consecuencia de la naturaleza propia de la perspectiva. Si bien el cálculo de los caudales se realiza tomando los datos de una sección intermedia (CS 2), se puede apreciar que bajo la naturaleza de la perspectiva, el perfil más cercano a la cámara es el que ostenta un mejor ajuste al perfil teórico

- En general, las vistas Laterales proveen la mayor dispersión, y en particular para los ángulos más extremos se obtienen valores muchas veces superiores al del resto de las posiciones de la cámara.

Sobre lo expuesto, debemos tener en cuenta que gran parte del material filmico relevado por diversas fuentes involucra posiciones de cámara con ángulos menores a 15°. La presencia de soportes físicos como puentes o puntos elevados, en primera instancia, parecieran ser una buena opción para lograr una captura aceptable, sin embargo, la inevitable necesidad de encuadrar puntos de referencia lo suficientemente alejados para reducir el error por relevamiento topográfico conlleva a direccionar la cámara hacia objetivos más distantes. El ángulo se reduce, y el área de imagen próxima a la cámara por lo general quedará fuera de la zona de rectificación, mientras que el área más alejada implica mayor error sobre las estimaciones de velocidad en secciones transversales allí definidas. Emplear dispositivos de captura con un grado mayor de definición, que lógicamente conllevará a mayores costos en tiempo de cálculo, no pareciera ser una línea de acción por la cual transitar para lidiar con estos conflictos, en especial si tenemos en mente que las rutinas de procesamiento del software de PIV involucran un importante grado de “suavizado” como consecuencia de la interpolación.

TERCERA PARTE

ESTUDIOS SOBRE FLUJOS REALES

CAPITULO 8: ANÁLISIS SOBRE EL RÍO SUQUÍA

8. ANÁLISIS SOBRE EL RÍO SUQUÍA

8.1. Introducción

Siendo el principal objetivo de este trabajo la cuantificación del error en la aplicación de la técnica de LSPIV sobre cursos fluviales, es menester realizar estudios sobre flujos naturales. El río Suquía no solo es una buena opción por su cercanía, sino también por la accesibilidad para el relevamiento de distancias y la variedad de objetos urbanísticos ubicados muy próximos a ambas orillas, los que incluso guardan relaciones modulares entre ellos, permitiendo ello eliminar algunas incertidumbres al momento de realizar calibraciones y rectificaciones. Además, la basta variedad de trabajos de investigación realizados sobre el río Suquía nos permite tener una apreciación de la naturaleza de los resultados que se irán presentando en cada uno de los pasos de la metodología de análisis. No menos importante es el hecho de poder incluso realizar un estudio vinculando lo relevado sobre el curso natural con ensayos realizados en el modelo físico del que dispone el Laboratorio de Hidráulica.

8.2. Zona relevada y posiciones de cámaras

La zona sobre la cual se han realizado las tomas es la correspondiente al lado oeste del puente sobre la Av. Nicolás Avellaneda. El relevamiento se llevó a cabo durante el mediodía del día domingo 19 de Abril de 2015. En ese momento el ancho del curso de agua era de aproximadamente 32 mts. Se relevaron las distancias de todos los objetos significativos susceptibles de ser encuadrados en las distintas tomas, aun habiéndose definido previamente aquellos que, por convención, aparecerían a lo largo de todas las ubicaciones de captura. El método de medición de distancias fue el empleo de cinta métrica. También se obtuvo la distancia vertical desde los puntos de apoyo de la cámara sobre el puente hasta la superficie del agua. El tiempo de filmación de cada toma era de alrededor de 25 segundos en promedio.

La zona resultó elegida ya que proporcionaba puntos elevados accesibles, un trazado recto de aproximación del canal de H^0 (más adelante se hará evidente su influencia sobre la superficie del agua), márgenes relativamente simétricas y amplia variedad de objetos identificables en las proximidades inmediatas.

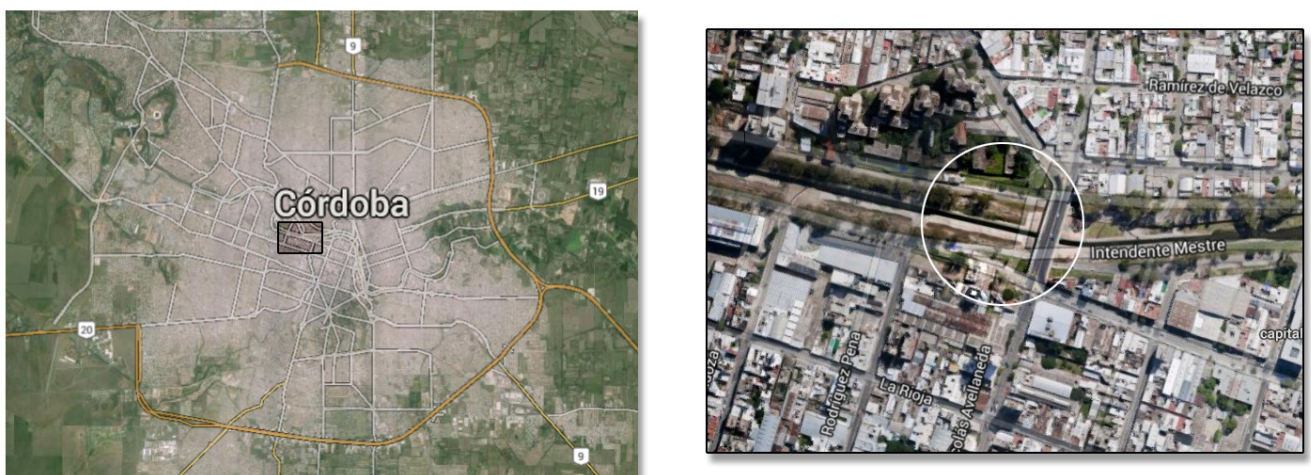


Figura 8.1 Ubicación de la zona de relevamiento sobre el río Suquía.

Las posiciones de la cámara que se han ensayado en esta oportunidad son:

Frontal 13° (2 Tomas)

Lateral Sur 5° y 11°

Lateral Norte 4° y 7°

Esquina Sur 4° y 8°

Esquina Norte 4° y 8°

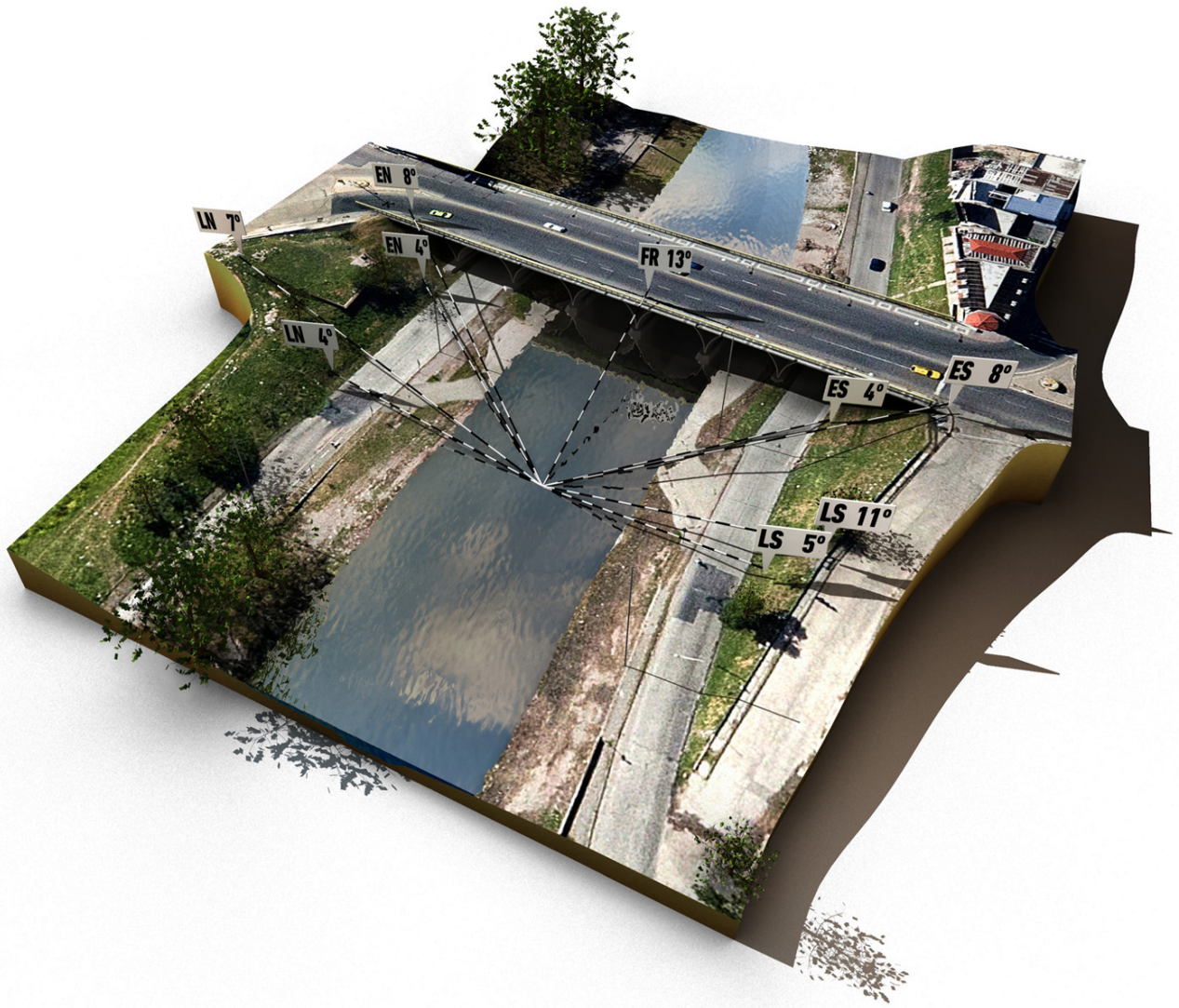


Figura 8.2 Maqueta con el detalle de las ubicaciones de cámara en el relevamiento del Suquia.

8.3. Metodología de trabajo

El material relevado se analizará en forma similar a la ya definida en capítulos anteriores. Sin embargo, el análisis en esta ocasión vuelve a estar centrado en las velocidades superficiales. Para poder determinar el error relativo en cada una de las variantes, necesitamos de un perfil de comparación que denominaremos perfil teórico o “base”. Considerando que las posiciones propuestas involucran ángulos por debajo de los 10° (valor que ha demostrado ser crítico en la primer parte de este informe), que la posición sobre el puente implica un ángulo de 13° (siendo 15° un valor al cual se le asociaba un E.C.M.P de menos de 5%) y que el objetivo de este análisis es corroborar las observaciones hechas en capítulos anteriores acerca de las variaciones de los perfiles obtenidos en función de ángulos críticos y no la determinación precisa de velocidades o caudales (por lo que prescindiremos de instrumentos de alta complejidad), hemos optado por definir el perfil base mediante un ajuste por tramos, en búsqueda de la

menor dispersión, a través del empleo de 6 perfiles obtenidos para la vista frontal de 13° antes mencionada.

Otro aspecto que reiteraremos en esta parte es la definición de una función de ponderación para el posterior cálculo del Error Cuadrático Medio Ponderado. La misma se ha definido en función del perfil base obtenido y de hacer uso de un supuesto fundamental acerca de cursos de agua naturales, aquel que sugiere que la distribución de velocidades superficiales está en estrecha relación con la forma del perfil batimétrico del cauce. Por ende, asumiremos que ambos perfiles, el de velocidad y el batimétrico, son similares (ambos se consideran, a estos fines, de extensión y valor máximo unitarios). No obstante se incluye el relevamiento topográfico de la sección solo a fines de lograr una apreciación mejor de los fenómenos observados en superficie.

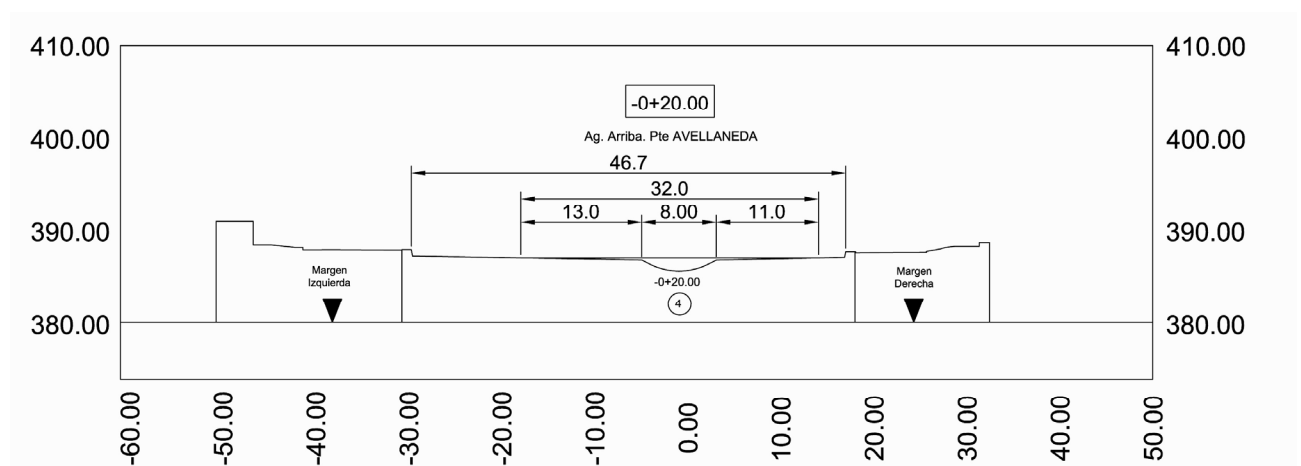


Figura 8.3 Sección relevada en trabajos de topografía vinculados al desarrollo del modelo físico del Río Suquía.

Además, analizaremos el desfase entre el grupo de perfiles obtenidos respecto del perfil base, para luego realizar el centrado correspondiente (práctica empleada en reiteradas ocasiones por el personal de laboratorio, que reconoce tal efecto como una verdadera anomalía que amerita ser intervenida) y recalcular el E.C.M.P. Así mismo se calculará la relación porcentual entre el máximo valor de velocidad obtenido y el máximo correspondiente al perfil base.

8.4. Definición del Perfil Base

Como se ha mencionado, la forma propia del cauce nos brinda información importante con la cual podemos completar la definición del perfil base.

De hecho, la forma propia de los diferentes perfiles obtenidos, y en especial, el perfil promedio por cada toma (Frontal 13°) refleja lo que se puede apreciar a simple vista sobre el cauce del río en periodos de bajo caudal, ya que el valor máximo de velocidad coincide con el eje del canal de H°, y los puntos de quiebre del perfil acusan la proyección de la pendiente los taludes.

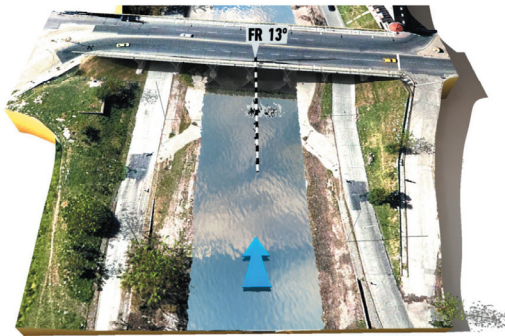
A partir de los puntos de quiebre observados, se completa el perfil siguiendo la proyección de los últimos valores, aun con mínima dispersión, asumiendo por ende y como es usual, una variación lineal hasta un valor nulo de velocidad. Convenientemente, el ancho de flujo obtenido coincide con la extensión del flujo relevado, con una diferencia de unos pocos metros.

8.5. Resultados

A continuación se presentan por cada figura, la ubicación de cada cámara en una maqueta digital del lugar, un fotograma detallando los puntos elegidos para la calibración/rectificación, la comparación de los perfiles obtenidos y el perfil base, y el gráfico del error relativo ponderado en la sección intermedia en función de la progresiva. Además, y como se había mencionado, excepto para las vistas frontales, se incluyen los gráficos de perfiles y del error relativo ponderado luego de realizar el centrado del grupo de perfiles, por medio del desplazamiento en función de un valor que denominaremos “corrimiento”.

RÍO SUQUÍA - VISTA FRONTAL - FR 13° - TOMA 1

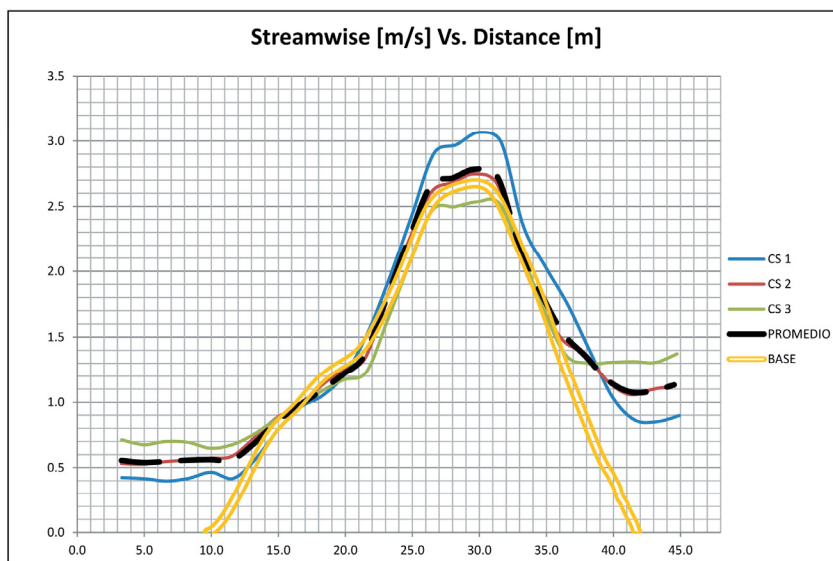
UBICACIÓN DE LA CÁMARA



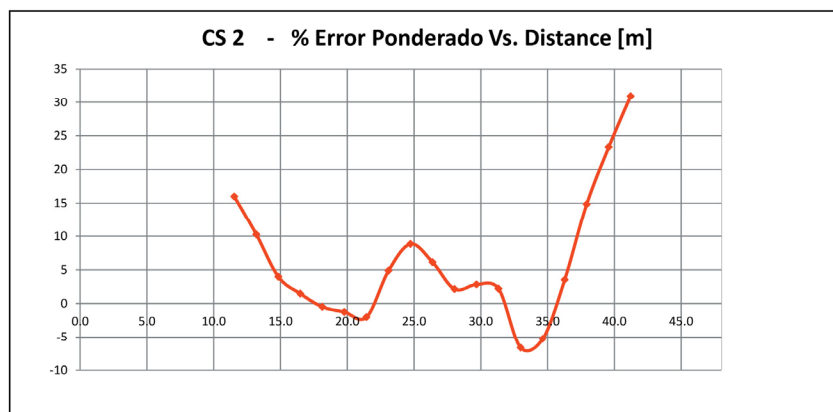
VISTA - DIRECCIÓN DEL FLUJO



PERFILES OBTENIDOS VS. TEÓRICO (BASE)



ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA

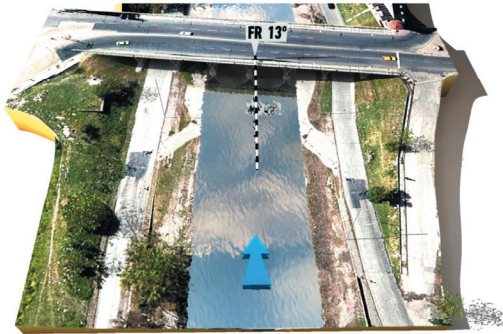


V.MEDIA 3 CS = 1.377 m/s
 E.C.M. = 110.71 %
 E.C.M.P = 11.42 %

Figura 8.4 Resultados Río Suquía – Vista Frontal 13° – TOMA 1.

RÍO SUQUÍA - VISTA FRONTAL - FR 13° - TOMA 2

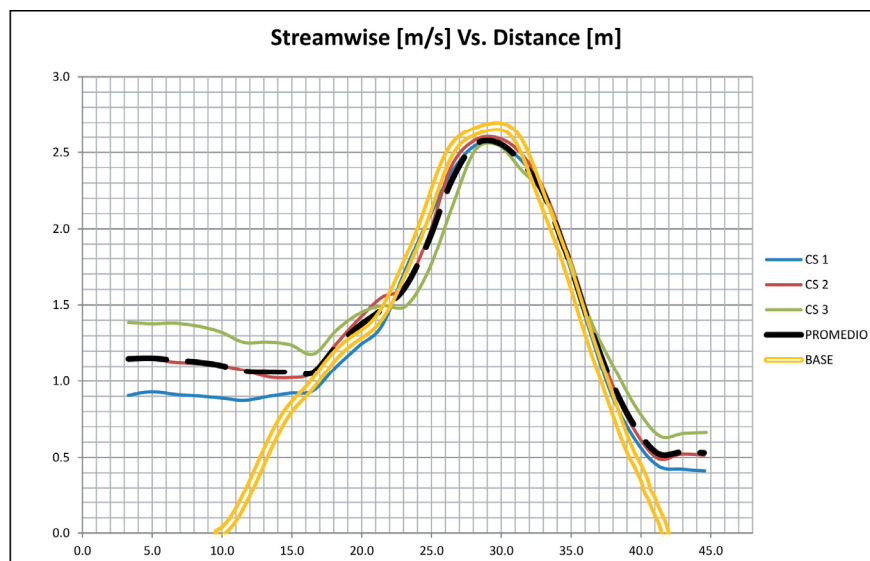
UBICACIÓN DE LA CÁMARA



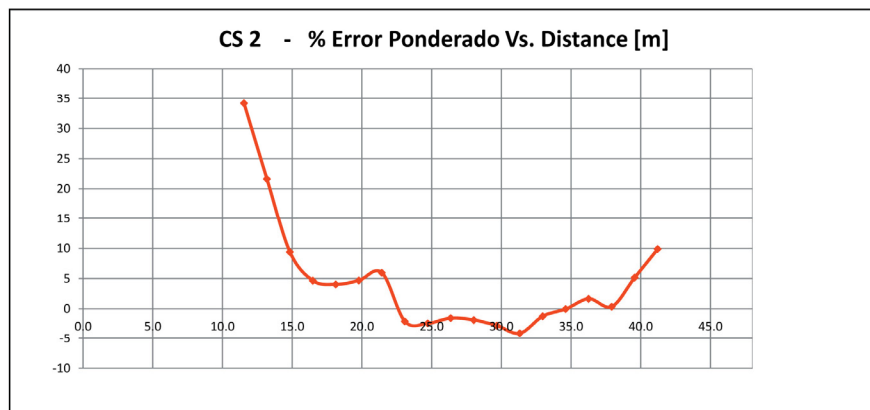
VISTA - DIRECCIÓN DEL FLUJO



PERFILES OBTENIDOS VS. TEÓRICO (BASE)



ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA

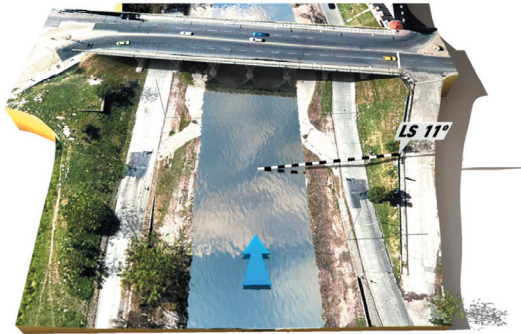


V.MEDIA 3 CS = 1.389 m/s
 E.C.M. = 141.14 %
 E.C.M.P = 10.51 %

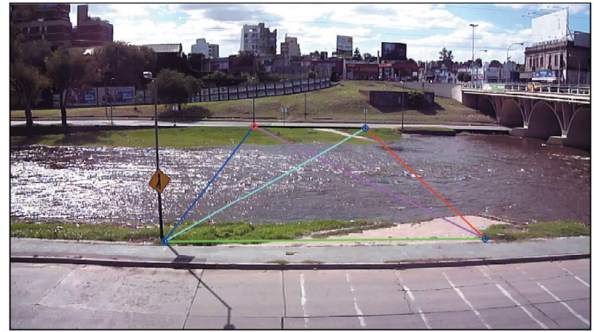
Figura 8.5 Resultados Río Suquía – Vista Frontal 13° – TOMA 2.

RÍO SUQUÍA - VISTA LATERAL SUR - LS 11°

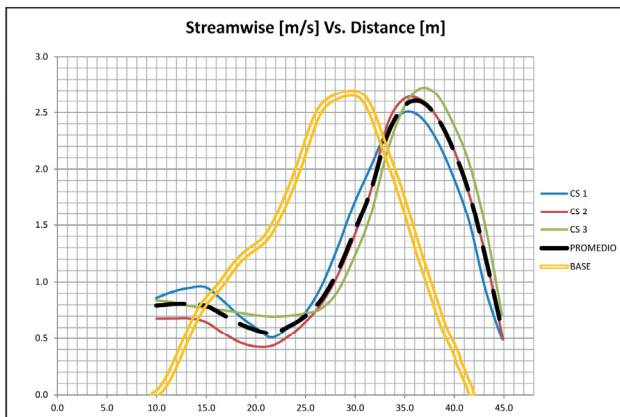
UBICACIÓN DE LA CÁMARA



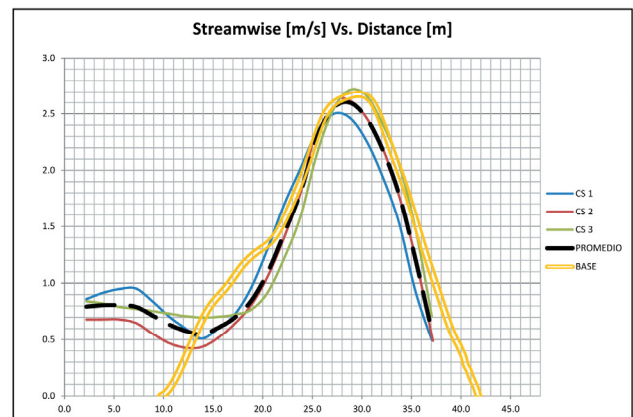
VISTA - DIRECCIÓN DEL FLUJO



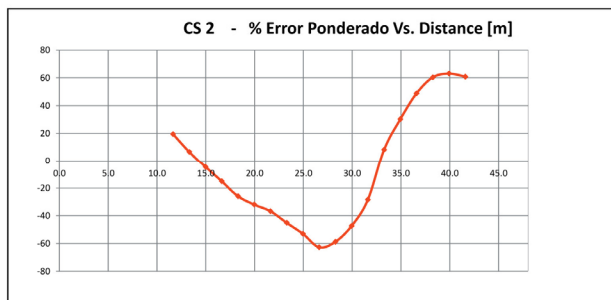
PERFILES OBTENIDOS VS. TEÓRICO (BASE)



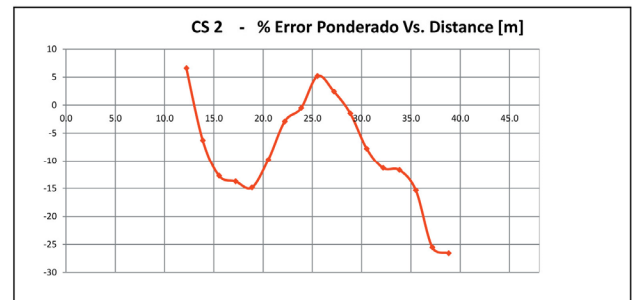
PERFILES OBTENIDOS CENTRADOS VS. TEÓRICO (BASE)



ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA



ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA CENTRADA



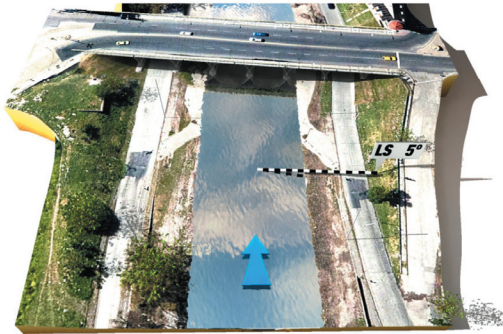
V.MEDIA 3 CS = 1.263 m/s
 E.C.M. = 345.73 %
 E.C.M.P = 43.25 %
 CORRIMIENTO = 7.75 m (16.2 %)

V.MEDIA 3 CS = 1.263 m/s
 E.C.M. = 39.29 %
 E.C.M.P = 11.20 %
 V.MÁX.PROM. = 97.1 %

Figura 8.6 Resultados Río Suquía – Vista Lateral Sur 11°.

RÍO SUQUÍA - VISTA LATERAL SUR - LS 5°

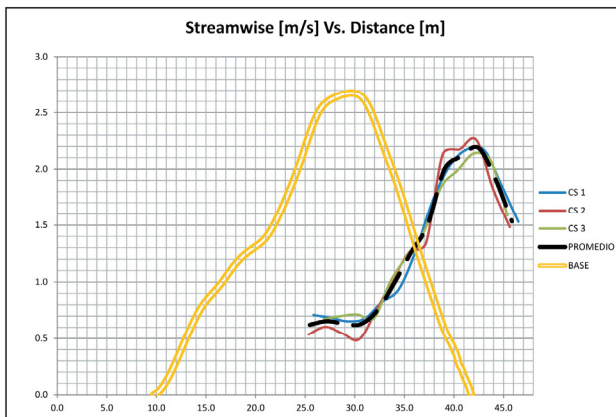
UBICACIÓN DE LA CÁMARA



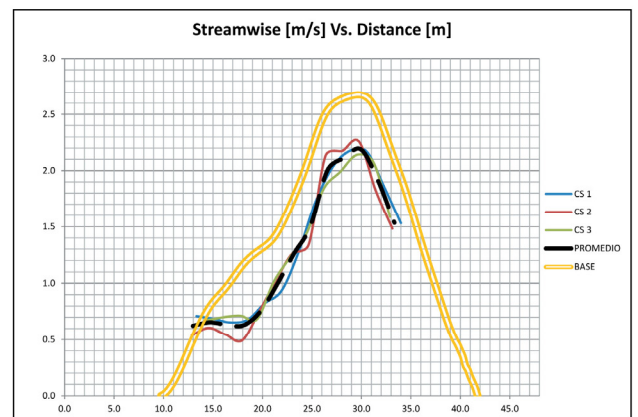
VISTA - DIRECCIÓN DEL FLUJO



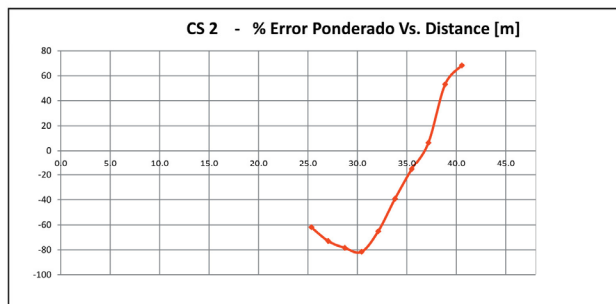
PERFILES OBTENIDOS VS. TEÓRICO (BASE)



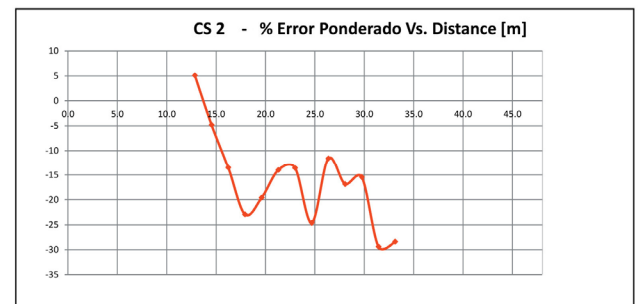
PERFILES OBTENIDOS CENTRADOS VS. TEÓRICO (BASE)



ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA



ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA CENTRADA



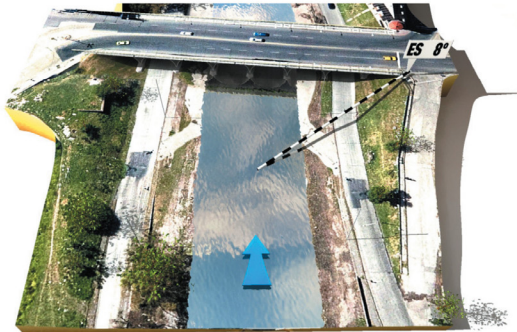
V.MEDIA 3 CS = 1.292 m/s
 E.C.M. = 195.66 %
 E.C.M.P = 62.79 %
 CORRIMIENTO = 12.5 m (26 %)

V.MEDIA 3 CS = 1.292 m/s
 E.C.M. = 32.79 %
 E.C.M.P = 19.26 %
 V.MÁX.PROM. = 86.5 %

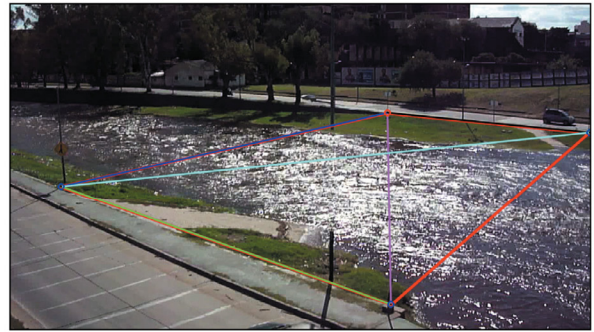
Figura 8.7 Resultados Río Suquia – Vista Lateral Sur 5°.

RÍO SUQUÍA - VISTA ESQUINA SUR - ES 8°

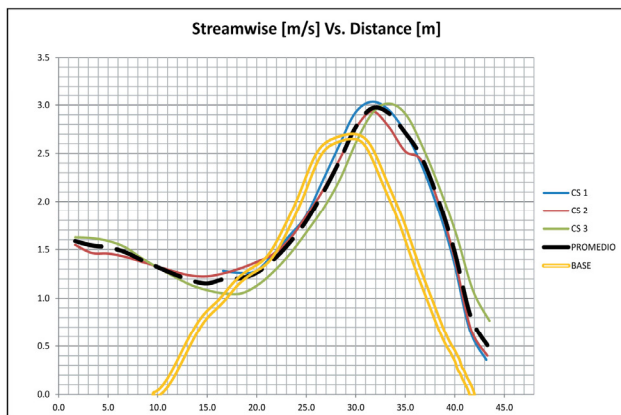
UBICACIÓN DE LA CÁMARA



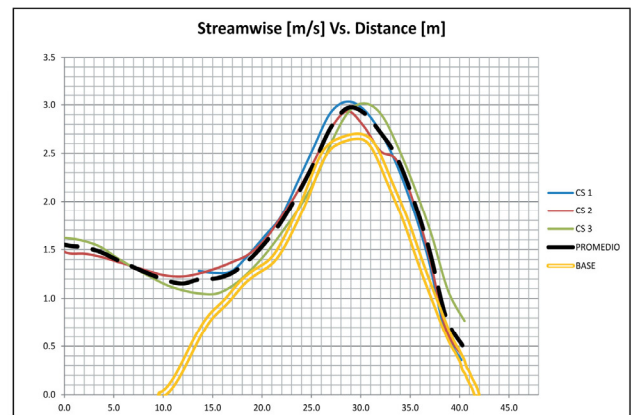
VISTA - DIRECCIÓN DEL FLUJO



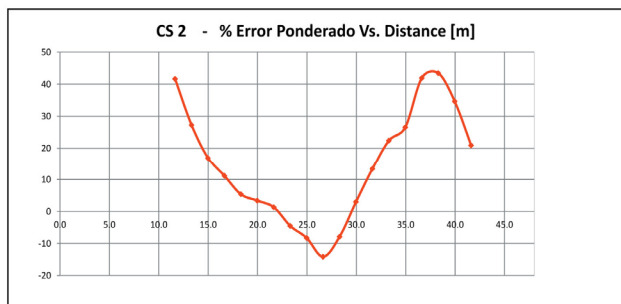
PERFILES OBTENIDOS VS. TEÓRICO (BASE)



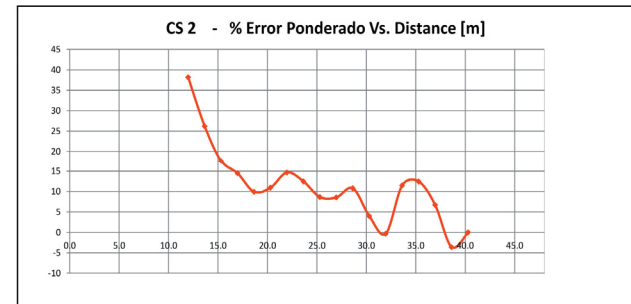
PERFILES OBTENIDOS CENTRADOS VS. TEÓRICO (BASE)



ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA



ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA CENTRADA



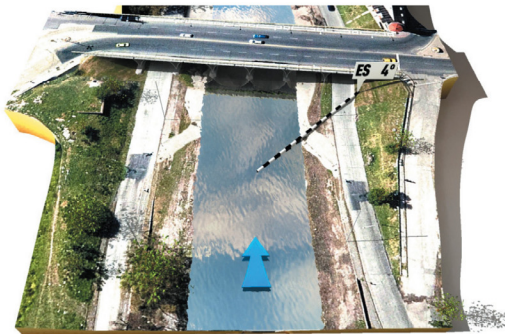
V.MEDIA 3 CS = 1.692 m/s
 E.C.M. = 210.07 %
 E.C.M.P = 23.54 %
 CORRIMIENTO = 3.00 m (6.25 %)

V.MEDIA 3 CS = 1.692 m/s
 E.C.M. = 127.42 %
 E.C.M.P = 15.11 %
 V.MÁX.PROM. = 111 %

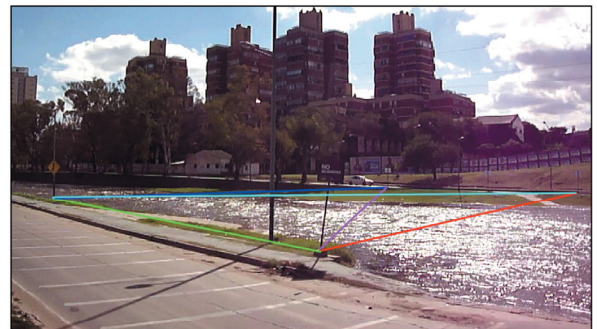
Figura 8.8 Resultados Río Suquia – Vista Esquina Sur 8°.

RÍO SUQUÍA - VISTA ESQUINA SUR - ES 4°

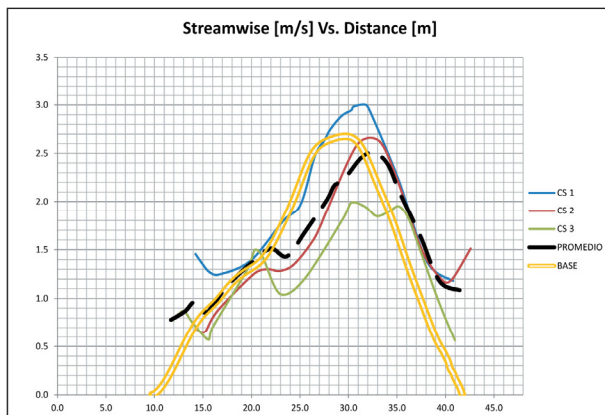
UBICACIÓN DE LA CÁMARA



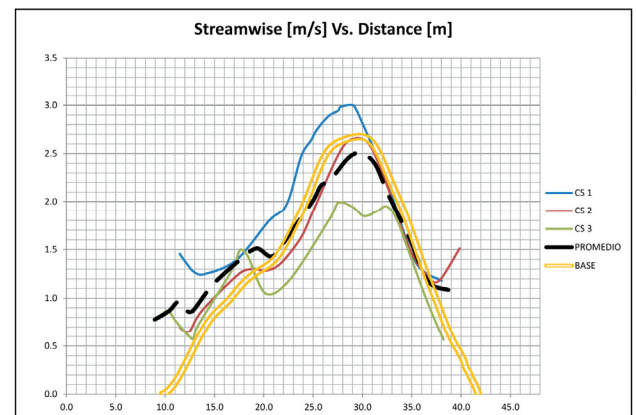
VISTA - DIRECCIÓN DEL FLUJO



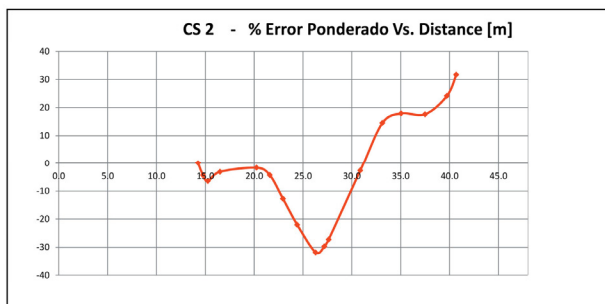
PERFILES OBTENIDOS VS. TEÓRICO (BASE)



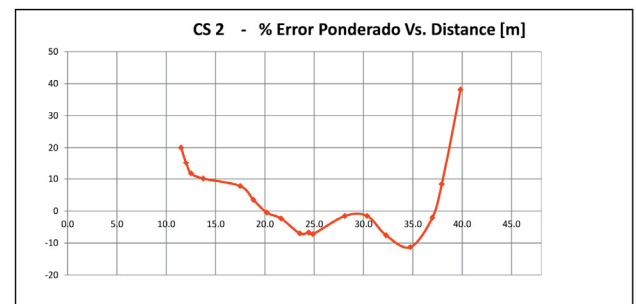
PERFILES OBTENIDOS CENTRADOS VS. TEÓRICO (BASE)



ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA



ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA CENTRADA



V.MEDIA 3 CS = 1.562 m/s
 E.C.M. = 71.28 %
 E.C.M.P = 19.07 %
 CORRIMIENTO = 2.75 m (5.73 %)

V.MEDIA 3 CS = 1.562 m/s
 E.C.M. = 106.68 %
 E.C.M.P = 12.86 %
 V.MÁX.PROM. = 94.5 %

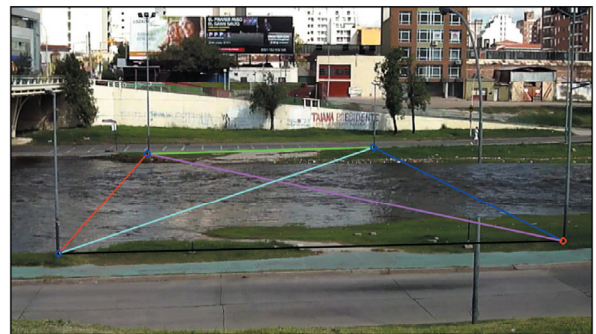
Figura 8.9 Resultados Río Suquia – Vista Esquina Sur 4°.

RÍO SUQUÍA - VISTA LATERAL NORTE - LN 7°

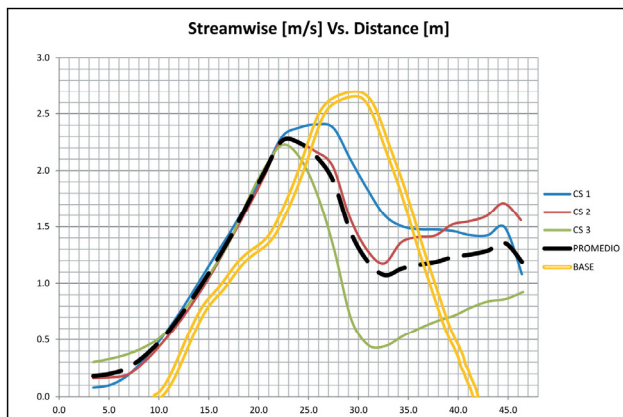
UBICACIÓN DE LA CÁMARA



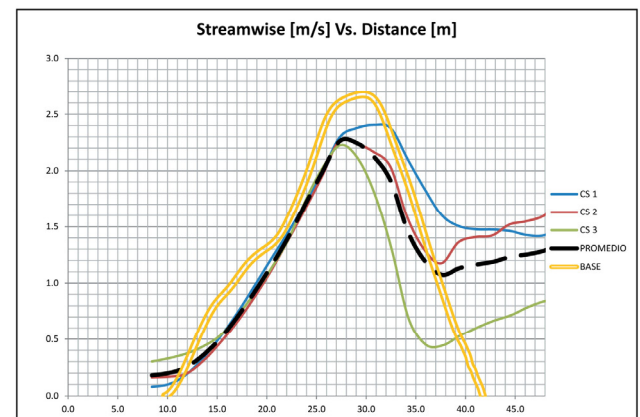
VISTA - DIRECCIÓN DEL FLUJO



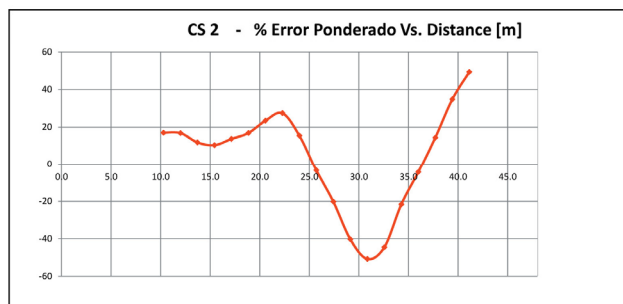
PERFILES OBTENIDOS VS. TEÓRICO (BASE)



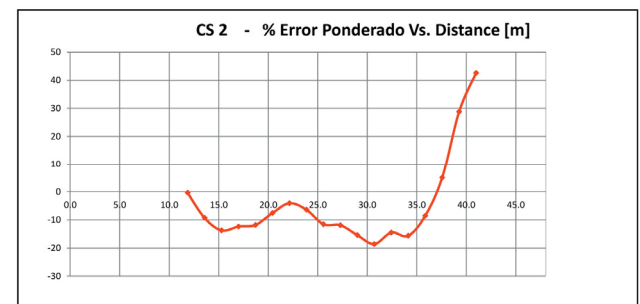
PERFILES OBTENIDOS CENTRADOS VS. TEÓRICO (BASE)



ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA



ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA CENTRADA



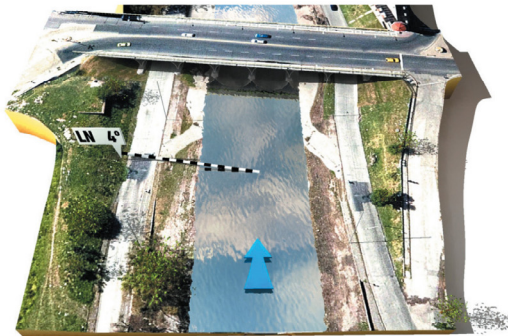
V.MEDIA 3 CS = 1.209 m/s
 E.C.M. = 157.84 %
 E.C.M.P = 28.15 %
 CORRIMIENTO = -5.00 m (10.4 %)

V.MEDIA 3 CS = 1.209 m/s
 E.C.M. = 109.26 %
 E.C.M.P = 16.69 %
 V.MÁX.PROM. = 85.8 %

Figura 8.10 Resultados Río Suquia – Vista Lateral Norte 7°.

RÍO SUQUÍA - VISTA LATERAL NORTE - LN 4°

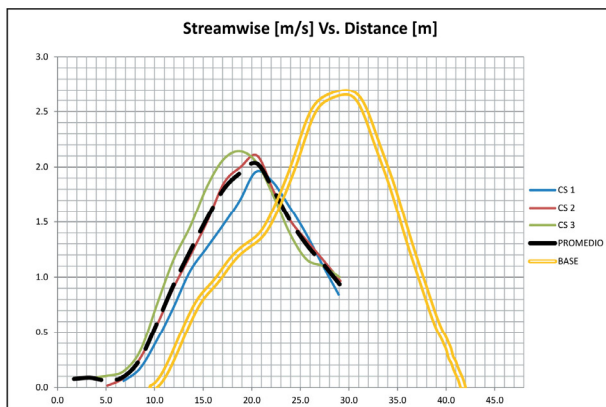
UBICACIÓN DE LA CÁMARA



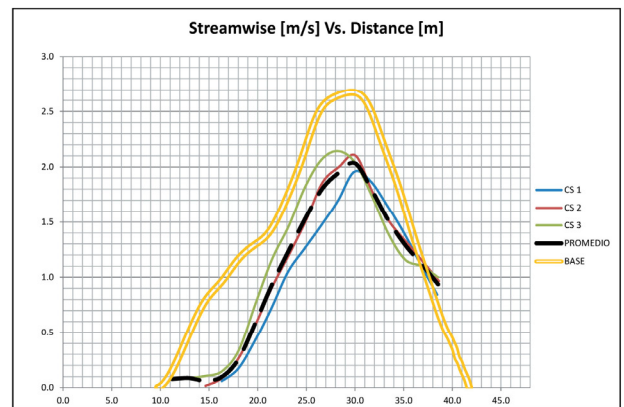
VISTA - DIRECCIÓN DEL FLUJO



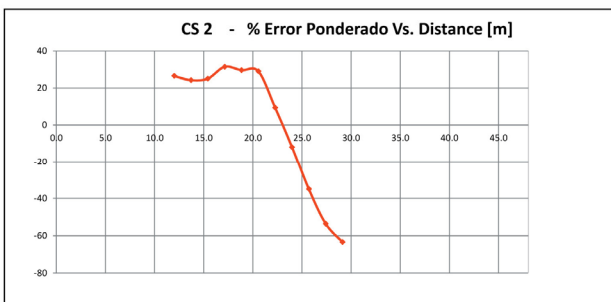
PERFILES OBTENIDOS VS. TEÓRICO (BASE)



PERFILES OBTENIDOS CENTRADOS VS. TEÓRICO (BASE)

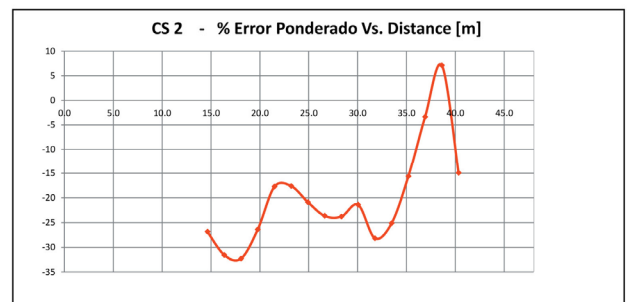


ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA



V.MEDIA 3 CS = 1.077 m/s
 E.C.M. = 128.7 %
 E.C.M.P = 36.00 %
 CORRIMIENTO = -9.50 m (19.8 %)

ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA CENTRADA



V.MEDIA 3 CS = 1.077 m/s
 E.C.M. = 49.33 %
 E.C.M.P = 23.66 %
 V.MÁX.PROM. = 77.2 %

Figura 8.11 Resultados Río Suquía – Vista Lateral Norte 4°.

RÍO SUQUÍA - VISTA ESQUINA NORTE - EN 8°

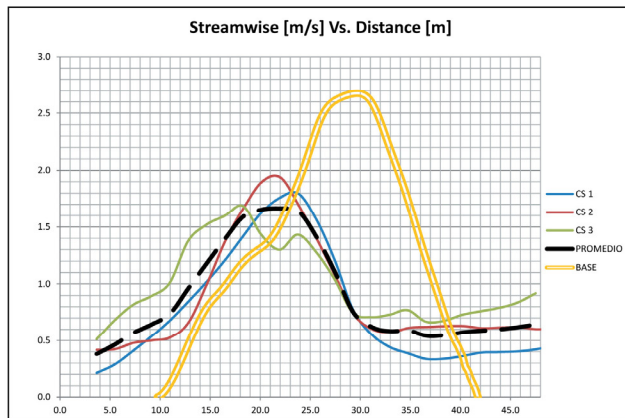
UBICACIÓN DE LA CÁMARA



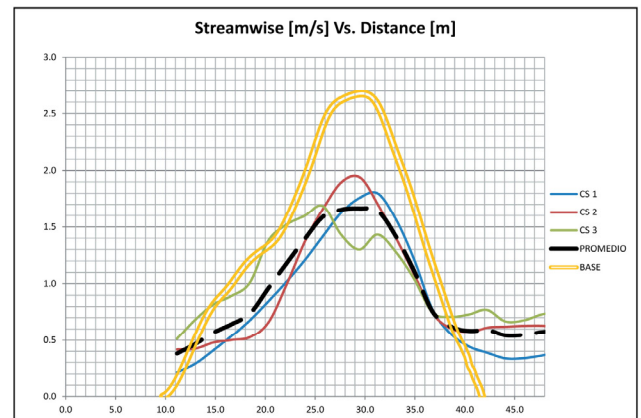
VISTA - DIRECCIÓN DEL FLUJO



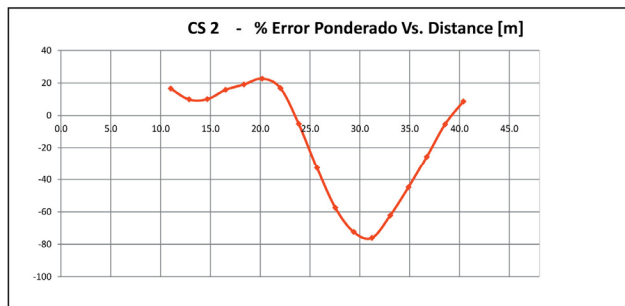
PERFILES OBTENIDOS VS. TEÓRICO (BASE)



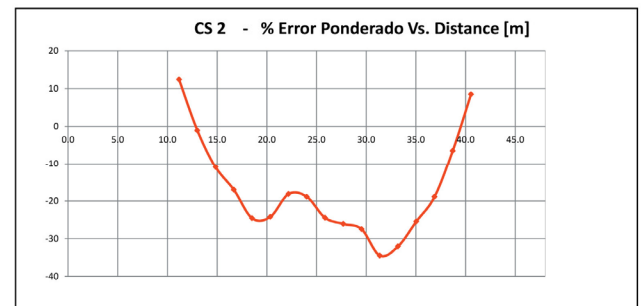
PERFILES OBTENIDOS CENTRADOS VS. TEÓRICO (BASE)



ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA



ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA CENTRADA



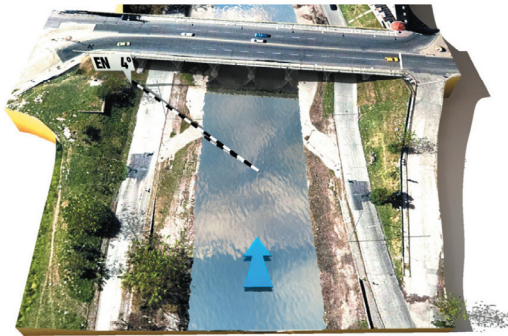
V.MEDIA 3 CS = 0.883 m/s
 E.C.M. = 141.24 %
 E.C.M.P = 36.68 %
 CORRIMIENTO = -7.50 m (15.6 %)

V.MEDIA 3 CS = 0.883 m/s
 E.C.M. = 105.20 %
 E.C.M.P = 22.09 %
 V.MÁX.PROM. = 62.9 %

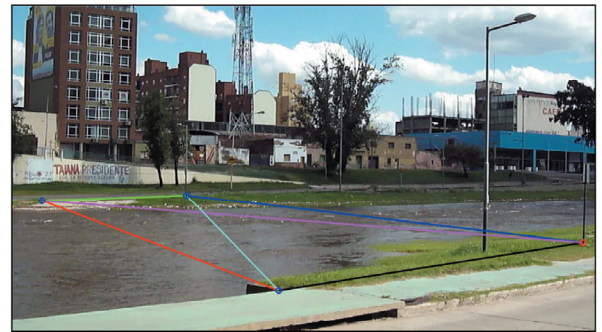
Figura 8.12 Resultados Río Suquía – Vista Esquina Norte 8°.

RÍO SUQUÍA - VISTA ESQUINA NORTE - EN 4º

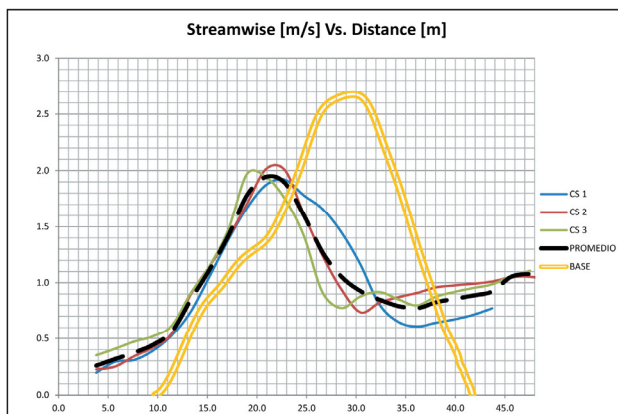
UBICACIÓN DE LA CÁMARA



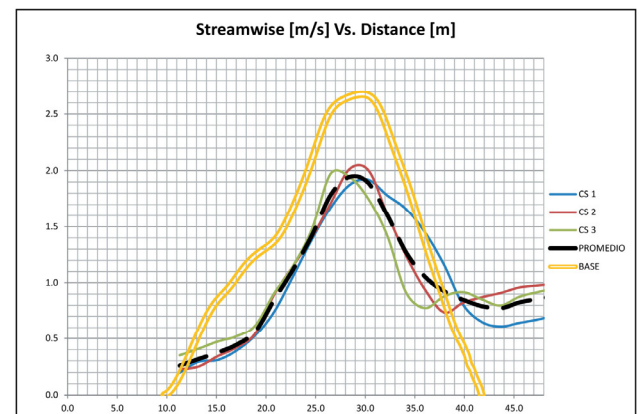
VISTA - DIRECCIÓN DEL FLUJO



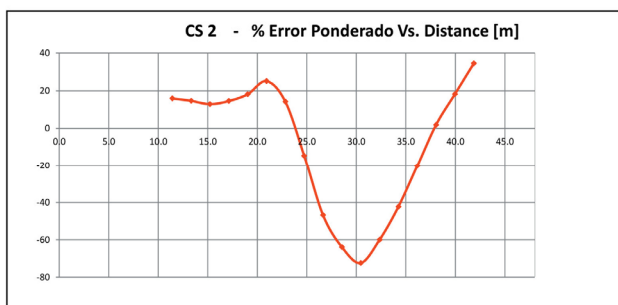
PERFILES OBTENIDOS VS. TEÓRICO (BASE)



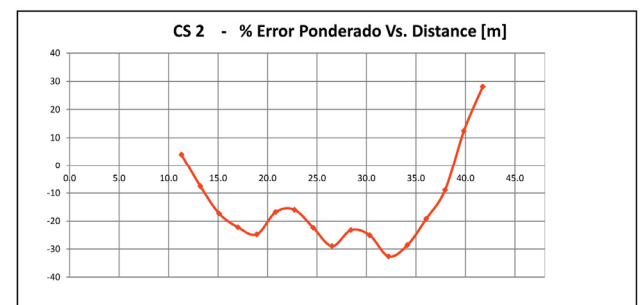
PERFILES OBTENIDOS CENTRADOS VS. TEÓRICO (BASE)



ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA



ERROR EN SECCIÓN INTERMEDIA CENTRADA



V.MEDIA 3 CS = 0.994 m/s
 E.C.M. = 345.12 %
 E.C.M.P = 36.25 %
 CORRIMIENTO = -7.50 m (15.6 %)

V.MEDIA 3 CS = 0.994 m/s
 E.C.M. = 163.18 %
 E.C.M.P = 22.06 %
 V.MÁX.PROM. = 73.4 %

Figura 8.13 Resultados Río Suquía – Vista Esquina Norte 4º.

8.6. Tabla resumen

En la siguiente tabla se ha resumido los siguientes datos: Dentro de la parte titulada como “Perfil Obtenido”, en la primera columna, el valor promedio de las 3 velocidades medias de cada sección. Seguidamente, los errores cuadráticos medios. Como “corrimiento”, el valor porcentual de desfase del perfil obtenido respecto del perfil base o estimado, en relación al ancho total definido entre los puntos de referencia durante el proceso de rectificación. Definido como “% Vel.Máx”, el valor porcentual del cociente entre la máxima velocidad obtenida del análisis y la máxima velocidad del perfil base. Luego, en las dos últimas columnas incluidas bajo el título “Centrado”, se han incluido los valores de error antes mencionados luego de corregir el corrimiento observado de cada perfil.

	Perfil Obtenido					Centrado		
	V. Med 3 CS	ECM	ECMP	CORRIMIENTO	% Vel. Max	ECM	ECMP	
Lateral S 11º	1.263 m/s	345.73%	43.25%	7.75 m	16.30%	97.10%	39.29%	11.20%
Lateral S 5º	1.292 m/s	195.66%	62.79%	12.5m	26.00%	86.50%	32.79%	19.26%
Esquina S 8º	1.692 m/s	210.07%	23.45%	6.25 m	6.25%	111%	127.42%	15.11%
Esquina S 4º	1.562 m/s	71.28%	19.07%	2.75 m	5.73%	94.50%	106.68%	12.86%
Lateral N 7º	1.208 m/s	157.84%	28.15%	- 5.00 m	10.40%	85.50%	109.26%	16.69%
Lateral N 4º	1.077 m/s	128.70%	36.00%	-9.50 m	19.80%	77.20%	49.33%	23.66%
Esquina N 8º	0.883 m/s	141.24%	36.68%	-7.50m	15.60%	62.90%	105.20%	22.09%
Esquina N 4º	0.994 m/s	345.12%	36.25%	-7.50m	15.60%	73.40%	163.18%	22.06%



Figura 8.14 Resumen de los resultados obtenidos en el análisis del Río Suquía.

8.7. Comparación con los resultados del perfil parabólico simulado

Con el objetivo de poder establecer relaciones entre lo ensayado por medio de la simulación de perfiles de velocidad y los resultados obtenidos del análisis sobre el material relevado en campo, se compararán los errores, corrimientos, y porcentajes de velocidad máxima de cada una de las posiciones de cámaras.

		Angulo º	% ECMP	% Corrimiento	% ECMP Centrado	%V. Máx
PARABÓLICO SIMULADO	Lateral	30	5.1	3.8	2.1	97.6
		15	8.33	5.0	4.6	91.1
		7.5	14.25	12.5	18.7	86.2
	Esquina	30	3.22	1.9	1.0	95.9
		15	8.04	6.3	5.4	94.3
		7.5	24.6	10.0	10.0	78.0
RÍO SUQUÍA	Lateral S	11	43.3	16.2	11.2	97.1
		5	62.8	26.0	19.3	86.5
	Esquina S	8	23.5	6.3	15.1	111.0
		4	19.1	5.7	12.9	94.5
	Lateral N	7	28.2	10.4	16.7	85.8
		4	36	19.8	23.7	77.2
	Esquina N	8	36.7	15.6	22.1	62.9
		4	36.3	15.6	22.1	73.6

Figura 8.15 Resumen de los resultados del Río Suquía y del perfil parabólico simulado.

Previamente, se compararán entre sí los resultados de las posiciones de cámara Lateral y de Esquina, es decir, las relevadas en campo, obtenidos del análisis del perfil parabólico simulado. Sobre el eje de las ordenadas se indica el ángulo de la cámara, y sobre el eje de abscisas el valor porcentual de las variables de interés: Corrimiento, Error Cuadrático Medio directo y Ponderado, y el porcentaje de la velocidad máxima obtenida respecto de la teórica.

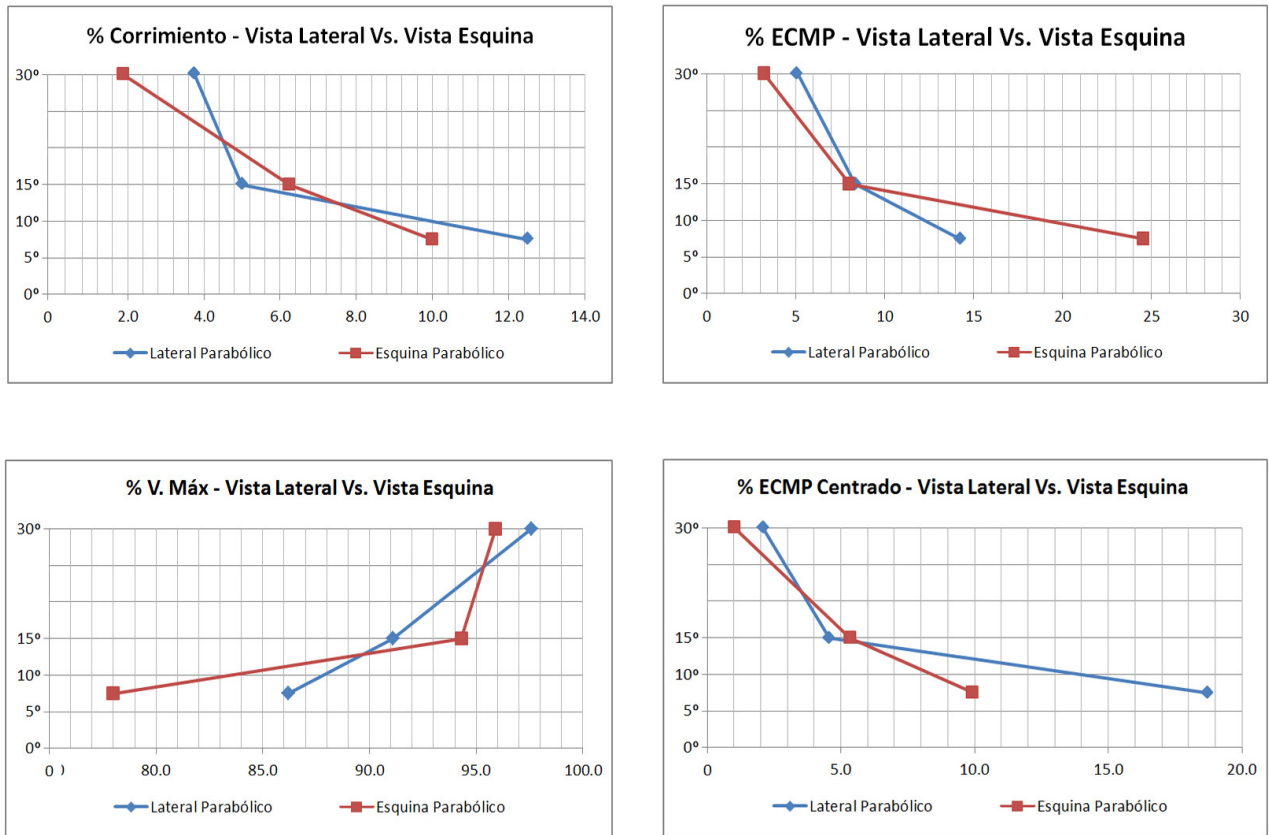


Figura 8.16 Comparación de las vistas ensayados en campo, sobre el perfil parabólico simulado.

A continuación se comparan las variables antes mencionadas para las posiciones de cámaras ensayadas en el Río Suquía junto con el perfil parabólico simulado a los fines de establecer posibles semejanzas o configurar un comportamiento tendencial.

Para la vista lateral, se observa que para las tres variables, Corrimiento, Porcentaje de Velocidad Máxima y Error Cuadrático Medio Ponderado con perfil centrado, muestran tendencias claras. Sin embargo para la vista de esquina no se han obtenido los resultados deseados, en ninguna de las ubicaciones alternativas respecto del eje del cauce, es decir, esquina norte o esquina sur, por lo que se deduce que las anomalías observadas no necesariamente se deben a errores del analista. Si se observan los resultados obtenidos para el perfil parabólico en sus vistas lateral y de esquina, para el ángulo de 7.5°, podemos ver que para la vista lateral, los perfiles de las 3 secciones son bastante similares, mientras que para la vista de esquina, los mismos se vuelven bastante dispersos, con una alta sinuosidad. Se sospecha que tal fenómeno puede deberse a la oblicuidad del movimiento del flujo respecto del sentido que sigue la ventana de interrogación, incrementado a su vez por la variación de extensión del patrón objetivo entre dos frames consecutivos por efecto de la excesiva perspectiva para pequeños ángulos.

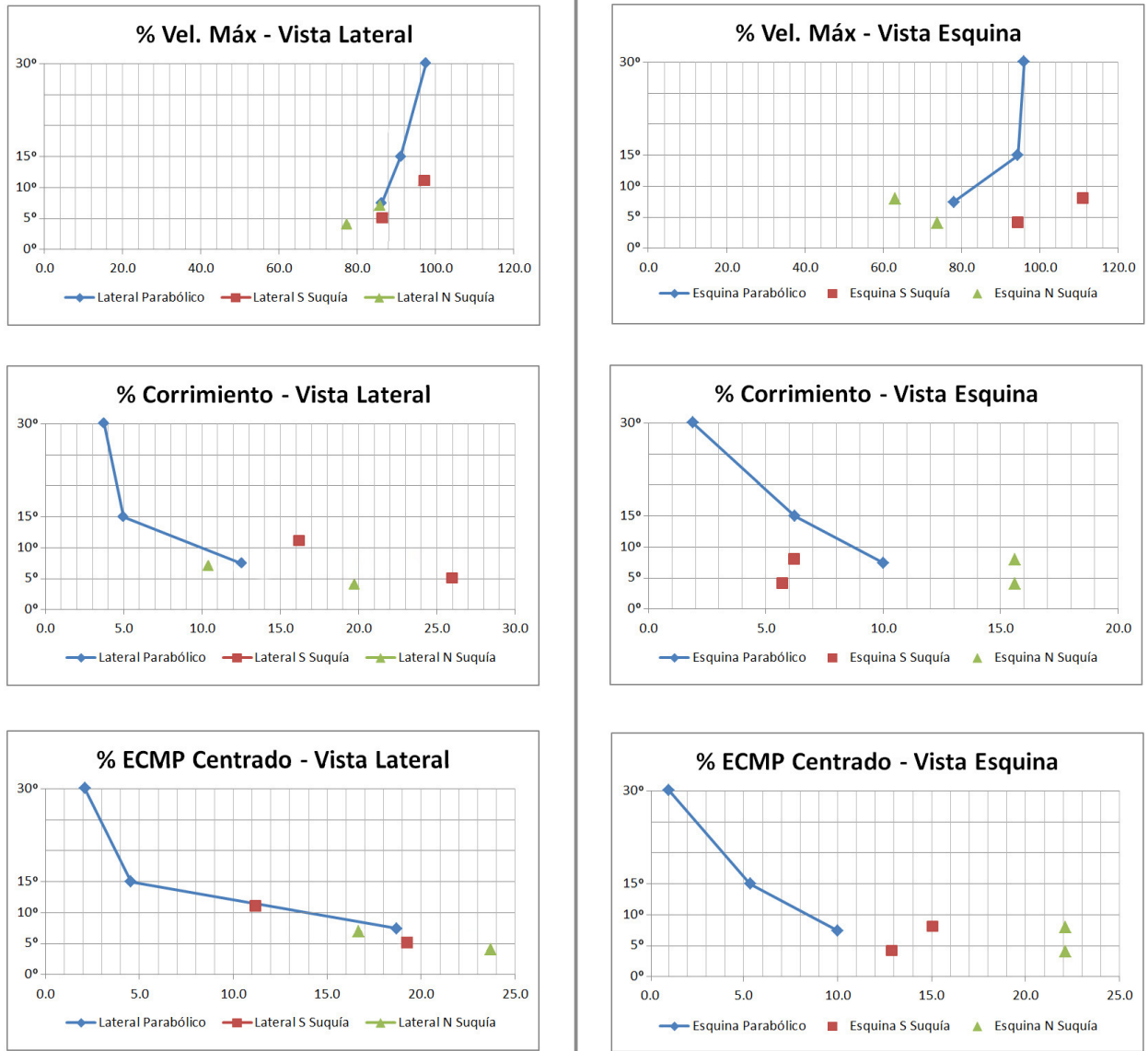


Figura 8.17 Comparación de los resultados obtenidos del análisis del Rio Suquia y los correspondientes al perfil parabólico simulado.

CUARTA PARTE

EPÍLOGO

CAPITULO 9: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1. Conclusiones sobre el entrenamiento en el uso del software PIVLAB-RIVeR

Podemos decir que ambas aplicaciones presentan curvas de aprendizaje adecuadas para cualquier individuo que desea lograr una rápida puesta en práctica de los conocimientos teóricos asociados. Presentan interfaces muy intuitivas, con una visual clara, y con ayudas en pantalla que continuamente alertan al usuario acerca de los pasos que requieren especial atención. El material de salida de ambos programas es fácilmente accesible. Aprender la secuencia adecuada de trabajo para lograr resultados satisfactorios no requiere más de una jornada de laboratorio. Sin embargo, lograr un manejo avanzado, manejando los parámetros que influyen sobre el propio algoritmo de correlación, adecuando las variables de análisis para casos particulares, puede requerir mucho más tiempo, pues si bien cada herramienta presenta una breve descripción que hace referencia al concepto teórico involucrado, entender como este afecta el procesamiento requiere un gran volumen de ensayos. Las inquietudes que han surgido a lo largo de las jornadas de trabajo han tenido respuesta eficaz por parte del personal del laboratorio, pero se hizo evidente que por ser esta una técnica de reciente aplicación, a veces no ha resultado fácil recibir una idea clara de la influencia de cada uno de los parámetros avanzados sobre el desempeño en el análisis.

9.2. Conclusiones sobre los ensayos de simulación de flujos

Si bien la idea original era utilizar herramientas de modelación de flujos del entorno 3D que brindarían un espectro mayor de posibilidades en cuanto a la simulación de efectos como turbulencia superficial, vórtices, ondas secundarias y espuma, rápidamente se hizo evidente las limitaciones que incluso hoy en día presentan tales paquetes de software. Principalmente, no hay ningún entorno que pueda simular bajo una sola entidad todos los fenómenos involucrados en un flujo real. Más detalladamente, la masa de fluido se modela como una entidad aislada, luego otra entidad se encarga de las interacciones con otras superficies o con masas de fluidos en confluencia y a partir de esto, una tercera entidad se ocupa de generar efectos superficiales tales como espuma (“foam”), salpicaduras (“splashes”), y ondas secundarias con o sin vorticidad. Todo esto insume un gran costo computacional que luego quedaría en evidencia su poca practicidad a los fines de nuestro estudio. Es por ello que se optó por la simulación a través de texturas y su correspondiente deformación. Esto trajo aparejado otro problema, el filtrado, es decir, simular el enfoque propio de un dispositivo genérico de captura. Este aspecto deberá ser estudiado en profundidad en caso de realizar futuros ensayos bajo la modalidad empleada en este trabajo de investigación.

9.3. Conclusiones sobre el trabajo con perfiles y caudales unitarios

El trabajo más laborioso en términos de volumen de procesamiento fue el de la generación de perfiles para la aplicación del método de la entropía. A pesar de que obtuvieron valores que de alguna manera permitieron tener una idea global del desempeño de proceso según la posición de la cámara y la forma del perfil de velocidades, no se lograron los resultados que se esperaban en términos de obtener

una gráfico de dispersión que marcara alguna tendencia identificable. Esto en gran parte se debió al hecho de trabajar con perfiles unitarios en extensión y en valor máximo de las variables de interés. El orden de magnitud de los errores involucrados que eran objeto del estudio estaban muy por debajo de los correspondientes a otros aspectos como el redondeo en las planillas de cálculo, el filtrado, la definición de los puntos de referencia y rectificación, la exclusión de valores extremos, y el ajuste de las funciones de interpolación relacionadas con las batimetrías y las velocidades superficiales a los fines del cálculo del caudales en cada caso. A futuro, se recomienda trabajar con valores que estén en el mismo orden de magnitud que los correspondientes a casos reales.

9.4. Conclusiones acerca de lo trabajado en campo

Según la propia experiencia de quien escribe, aún debe profundizarse mucho en cuanto a prácticas de trabajo eficientes en campo. En general, se observa que aspectos tales como la correcta elección de los puntos de referencia o la posición de captura del material filmico no son tenidos en cuenta adecuadamente sobre la base de un estudio previo de los efectos de distorsiones geométricas tanto de propio curso de agua como de la poligonal conformada por los objetos cuyas distancias se conocen o serán relevadas. Aun no hay un conocimiento claro acerca de la relación entre las prestaciones de cada dispositivo de captura y las dimensiones de lo que se pretende relevar. Tampoco se tiene en cuenta la negativa influencia de objetos que se interponen entre la cámara y la propia superficie del agua. En síntesis, el volumen de material filmico susceptible de ser analizado es considerablemente alto, los aportes provienen de las más diversas fuentes, sin embargo un porcentaje muy pequeño contribuye a obtener resultados satisfactorios. Se aconseja profundizar en la práctica del análisis de material relevado desde distintas posiciones para un mismo caso de flujo real, analizando los resultados de acuerdo a la influencia de los distintos factores antes mencionados.

9.5. Conclusiones generales de la aplicación de la técnica LSPIV para la cuantificación de recursos hídricos superficiales

La técnica de LSPIV ofrece amplias ventajas en términos de la toma de mediciones, por la posibilidad de hacer relevamientos a distancia, sin contacto con el propio curso de agua, por el alto volumen de mediciones posibles a bajo costo, y muchas otras. Sin embargo, tal vez por su reciente aplicación extendida, o por todos los fenómenos involucrados en todo el proceso de análisis y que son susceptibles de ser fuente de error, no se ha logrado definir una metodología de trabajo rigurosa que le permita establecerse sin la asistencia de otros métodos de medición que validen los resultados obtenidos. Se le ha manifestado al autor de este trabajo, en forma reiterada, que el error global involucrado era significativo, alrededor del 20%.

9.6. Recomendaciones para trabajos de investigación futuros

Durante el desarrollo de este trabajo fueron surgiendo distintas líneas de investigación derivadas de cada una de las incertidumbres que se presentaban a lo largo de todas las etapas. Es así que se plantean distintas interrogantes sobre las cuales profundizar en trabajos futuros:

- La influencia de fenómenos locales, como vórtices o áreas de reflexiones, en la generación de vectores de velocidad y como estas particularidades influyen más allá de su zona de ubicación aparente por efectos tales como la interpolación entre las zonas recorridas por la ventana de interrogación.

- Posibilidad de caracterizar condiciones de flujo a través de la descripción o parametrización de un patrón reconocible de la superficie del agua a los fines de establecer las prestaciones mínimas de un determinado dispositivo de captura, o cual debería ser su rango óptimo de captura, en términos de distancia desde el dispositivo hasta la superficie del agua, teniendo en cuenta las limitaciones de resolución, enfoque y zoom.

- Caracterizar condiciones de flujo, en términos del movimiento superficial, a los fines de calificar su aptitud para que los algoritmos de correlación entreguen resultados satisfactorios. Se ha visto que en ocasiones, se presentan flujos que a simple vista manifiestan un movimiento aparente, pero que sin embargo, el patrón observable varía considerablemente entre frames (aun con altas frecuencias de captura) y por ende, no hay una dirección de movimiento definida. Este se manifiesta en condiciones extremas de flujo, es decir, pequeños cursos de baja velocidad sobre cauces uniformes, y grandes flujos de llanura del orden de cientos de metros de ancho, para los cuales la influencia del fondo se hace menos evidente y la distancia mínima de captura conlleva a una pérdida de detalle. En ámbitos relacionados con el modelado 3D suele denominarse a esta caracterización sugerida como “morfismo” (concepto que difiere sustancialmente de aquel involucrado en la Teoría de Categorías del álgebra y las matemáticas) y se utiliza para describir la relación entre el movimiento relativo de los puntos que definen un modelo entre sí, y el movimiento del conjunto como un todo.

9.7. Conclusiones personales sobre la Práctica Supervisada

Puedo decir que ha sido una experiencia muy amena y agradable, durante la cual he contado con la mejor predisposición del todo el personal del laboratorio para todas mis inquietudes. Un ámbito muy sociable y de cooperación. Más importante aún para mí ha sido el hecho de recibir la responsabilidad de instruir a otros pasantes en el uso de la técnica.

Me he familiarizado además con la dinámica de un ámbito de investigación, con las actividades externas involucradas, la importancia de un equipo de profesionales especializados para hacer frente a fenómenos extraordinarios que afectan a toda la región. En síntesis, ha sido una experiencia enriquecedora desde todo punto de vista, pero más aún en lo humano, para apreciar todo el horizonte de desarrollo intelectual y de aplicación que se extiende más allá de la obtención de un título de grado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS

- [1] K. Hirsch, Meas. Sci. Technol. "Three-Dimensional Particle Velocimetry" 1995, 6, 742-753.
- [2] Siddiqi, K. Kimia, B. Shu, C. Geometric Shock-Capturing ENO Schemes for Subpixel Interpolation, Computation and Curve Evolution. In Proceedings of the IEEE International Symposium on Computer Vision, Florida, pp. 20-22, 1995.
- [3] Richards, J. A.. Remote Sensing Digital Image Analysis. Ed. Springer-Verlag, 1999.
- [4] Díaz Lozada, José Manuel.; 2014 – “Cuantificación y Caracterización del escurrimiento superficial en el sistema fluvial del Río Carcarañá” – Tesis de Maestría – Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mención Recursos Hídricos – FCEfYN – UNC – Córdoba, Argentina.
- [5] Patalano, Antoine.; 2014 – Desarrollo de un programa para MATLAB, que intercambia información entre planillas de cálculo, aplicando el método Entrópico para la determinación de velocidades superficiales en función de una sección batimétrica arbitraria.
- [6] Bechle, Adam J. ; 2014 - An entropy-based surface velocity method for estuarine discharge measurement

BIBLIOGRAFÍA

- Chiu, Said (1995) - “Maximum and Mean Velocities and Entropy in Open-Channel Flow”
- Giovanna Cavazzini (2010) - “The Particle Image Velocimetry – Characteristics, Limits and Possible Applications”
- Díaz Lozada, José Manuel; Guillén, Nicolás F. (2014) – “Medición de caudales con LSPIV en el Río San Antonio”
- Raffel, Markus; Willert, Christian E.; Kompenhans, Jürgen (1998) - “Particle Image Velocimetry, A Practical Guide”
- Le Coz, J.; Hauet, A.; Pierrefeu, G.; Dramais, G.; Camenen, B (2010) - “Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flash-flood discharge measurements in Mediterranean rivers”
- Iriarte Muñoz, José Miguel (2008) – “Velocimetría PIV en tiempo real basada en lógica programable FPGA”
- Chapra, Steven C. (1987) – “Métodos numéricos para ingenieros”
- Kreyszig, Erwin (2003) - “Matemáticas avanzadas para ingeniería”
- Jahanmiri, Mohsen (2011) – “Particle Image Velocimetry: Fundamentals and Its Applications”

- <http://pivlab.blogspot.com.ar/p/pivlab-documentation.html>
- <http://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-piv>
- <http://www.mathworks.com/help/matlab/>

ANEXO 1

MAXIMUM AND MEAN VELOCITIES AND ENTROPY IN OPEN-CHANNEL FLOW

By Chao-Lin Chiu,¹ Member, ASCE, and Chairil A. Abidin Said²

ABSTRACT: The maximum velocity in a channel cross section is highlighted with respect to its information content and relation to the mean velocity and entropy parameter. Under a wide range of discharge and water depth, a channel section seems to have propensity to establish and maintain an equilibrium state that corresponds to a value of entropy parameter. The entropy parameter of a channel section can be determined from the relation between the mean and maximum velocities. A technique has been developed to determine the discharge from a velocity profile on a single vertical passing through the point of maximum velocity in a channel cross section. The technique is an efficient way to estimate the discharge in streams and rivers, that can be used to continuously update the flow resistance during an unsteady flow, to enhance a filtering scheme designed to reduce uncertainties in flow forecasting. The use of the constant value of entropy parameter predetermined for a channel section can simplify the discharge estimation.

INTRODUCTION

In open-channel hydraulics the mean velocity is needed in the governing equations for the transport of mass, momentum, and energy through a channel cross section. Therefore, the importance of determining the mean velocity is well known. To determine the mean velocity and discharge in rivers and streams, available methods include the use of empirical formulas and velocity samples. Originally derived for uniform flows, Manning's equation is a popular empirical formula but its application in an unsteady nonuniform flow is difficult, because both the energy slope and Manning's n tend to vary with time and water depth from section to section along the flow direction. These temporal and spatial variations of energy slope and Manning's n are often irregular and pronounced in flows affected by such factors as ice and wind, and tend to cause great uncertainties in flow forecasting (Crissman et al. 1993).

To determine the mean velocity and discharge from velocity samples, the conventional method requires a great amount of time and measurements, and, hence, is unsuitable for unsteady flows and (Kalman) filtering schemes used to reduce uncertainties in flow forecasting (Chiu 1978). What is needed for unsteady flows and filtering schemes is an efficient method to quickly determine the discharge and flow resistance that may change rapidly.

In comparison with the mean velocity, the maximum velocity in a channel cross section has never been considered important enough to receive special attention. Very little about it is mentioned in textbooks. One of the rare situations in which the maximum velocity is mentioned is when the velocity-decay law or a power law is used to describe a velocity distribution. Another situation is when researchers sought to explain why the maximum velocity sometimes occurs below the water surface in open channel flows. Even in these situations, it has never been considered worthwhile to make special efforts for measurements, analysis and modeling of maximum velocity, and determining the relation of maximum velocity to the mean velocity and other hydraulic variables. An apparent reason is that there has not been a practical need or a theoretical basis to motivate such efforts.

PROBABILITY, ENTROPY, AND VELOCITY DISTRIBUTION

The maximum velocity does not appear very useful from the viewpoint of deterministic hydraulics. However, its importance can be seen clearly within the framework of a probability- and entropy-based approach. Chiu (1987, 1989) expressed the velocity distribution in a channel cross section as

$$\frac{\xi - \xi_0}{\xi_{\max} - \xi_0} = \int_0^u p(u) du \quad (1)$$

where u = velocity at ξ ; ξ = independent variable with which u develops; and ξ_0 and ξ_{\max} = minimum and maximum values of ξ , at which u is zero and u_{\max} , respectively; u_{\max} = maximum

¹Prof. of Civ. Engrg., Dept. of Civ. Engrg., School of Engrg., 949 Benedum Hall, Univ. of Pittsburgh, Pittsburgh, PA 15261.

²Grad. Student, Dept. of Civ. Engrg., School of Engrg., 949 Benedum Hall, Univ. of Pittsburgh, Pittsburgh, PA.

Note. Discussion open until June 1, 1995. To extend the closing date one month, a written request must be filed with the ASCE Manager of Journals. The manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on December 22, 1993. This paper is part of the *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 121, No. 1, January, 1995. ©ASCE, ISSN 0733-9429/95/0001-0026-0035/\$2.00 + \$.25 per page. Paper No. 7564.

velocity in the cross section; and $p(u)$ = probability density function. The simplest form of $p(u)$ that can be derived by entropy-maximization (Chiu 1989) is

$$p(u) = \exp(a_1 + a_2 u) \tag{2}$$

in which a_1 and a_2 are parameters. $p(u)$ in (2) satisfies the constraints that the integration of $p(u)$ within the interval $(0, u_{max})$ should be unity; and that $p(u)$ should also be such that the mean velocity \bar{u} in the cross section is Q/A , where Q is the discharge and A is the cross-sectional area. With $p(u)$ represented by (2), (1) can be integrated to yield the simplest form of Chiu's velocity distribution equations (Chiu 1989)

$$u = \frac{u_{max}}{M} \ln \left[1 + (e^M - 1) \frac{\xi - \xi_0}{\xi_{max} - \xi_0} \right] \tag{3}$$

in which u_{max} and M can be expressed in terms of the parameters a_1 and a_2 of $p(u)$. M is "entropy parameter," a measure of entropy. The entropy of $p(u/u_{max})$ increases as M decreases. When $M = 0$, u/u_{max} increases linearly with $(\xi - \xi_0)/(\xi_{max} - \xi_0)$; and when M approaches infinity, u/u_{max} becomes constant and invariant with $(\xi - \xi_0)/(\xi_{max} - \xi_0)$.

Definition and Expressions of ξ

By defining ξ in terms of coordinates in the physical plane, (1) and (3) can describe one- or two-dimensional velocity distributions. Eq. (1) indicates that $(\xi - \xi_0)/(\xi_{max} - \xi_0)$ is equal to the cumulative distribution function, or the probability of velocity being less than or equal to u . Therefore, to identify an expression for ξ , the probability concept is needed. If a large number of ξ values are randomly generated within the range (ξ_0, ξ_{max}) and substituted into (3) to obtain a set of velocity samples, the probability of velocity being between u and $u + du$ is $p(u) du$. Under such a concept, $(\xi - \xi_0)/(\xi_{max} - \xi_0)$ is equivalent to the ratio of the area in which the velocity is less than or equal to $u(\xi)$ to the total cross-sectional area. For example, for a wide, rectangular channel in which isovels in most part of a cross section are parallel, horizontal lines, $(\xi - \xi_0)/(\xi_{max} - \xi_0) = (By)/(BD) = y/D$ where B is channel width, D is flow depth, and y is vertical distance from the channel bed. For an axially symmetric flow in a circular pipe, in which isovels are concentric circles, $(\xi - \xi_0)/(\xi_{max} - \xi_0) = (\pi R^2 - \pi r^2)/(\pi R^2) = 1 - (r/R)^2$ where r is radial distance from the pipe center; and R is pipe radius (Chiu et al. 1993). In both cases $\xi_0 = 0$; $\xi_{max} = 1$; and, hence, $(\xi - \xi_0)/(\xi_{max} - \xi_0) = \xi$. Equations of $(\xi - \xi_0)/(\xi_{max} - \xi_0)$ for two-dimensional velocity distributions in the open channels shown in Fig. 1, in which u_{max} may occur on or below the water surface, are not obvious and are difficult to identify. However, the following equation (Chiu and Chiou 1986) for ξ has been found to be suitable:

$$\xi = Y(1 - Z)^\beta \exp(\beta Z - Y + 1) \tag{4}$$

in which

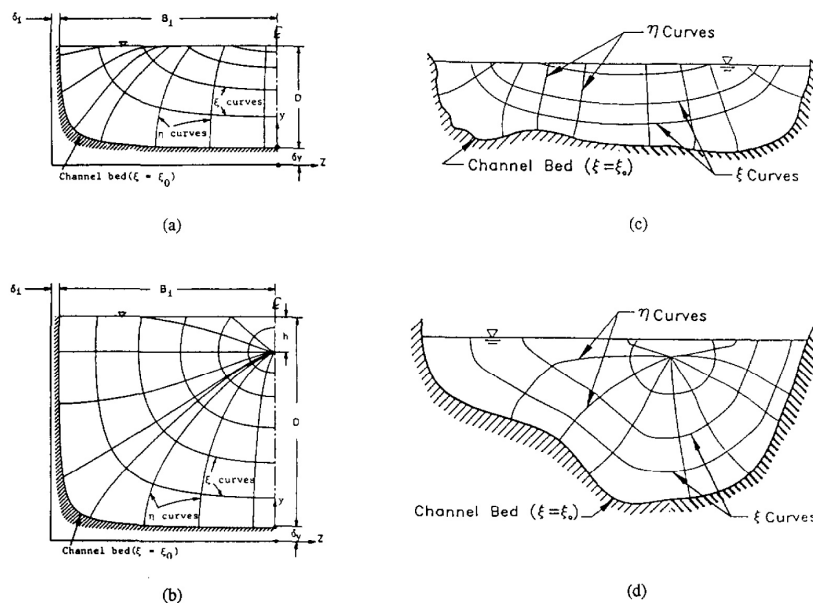


FIG. 1. Patterns of Velocity Distributions and Definition of ξ : (a) Pattern I: $h < 0$; (b) Pattern II: $h > 0$; (c) Irregular Channel: $h < 0$; (d) Irregular Channel: $h > 0$

$$Y = \frac{y + \delta_v}{D + \delta_v - h}; \quad Z = \frac{|z|}{B_i + \delta_i} \tag{5.6}$$

Eq. (4) represents a family of isovels. Each isovel has a value of ξ . The channel bed itself is an isovel on which $\xi = \xi_0$. In (4)–(6), as shown in Fig. 1, y = vertical coordinate measured from the channel bed along the y -axis, which is defined as the special vertical that passes through the point where the maximum velocity in the channel cross section occurs; D is water depth at the y -axis; z is coordinate in the transverse direction; B_i for i equal to either 1 or 2 = transverse distance on the water surface between the y -axis and either the left or right side of a channel cross section; and δ_v , δ_i , β_i , and h are parameters. Among these parameters, δ_v and δ_i vary with the geometrical shape of the channel cross section. Both δ_v and δ_i approach zero, if the channel cross section tends towards the rectangular shape. They increase as the cross-sectional shape deviates from the rectangular, as indicated by Fig. 1. The parameter h controls the shape and slope of isovels, especially near the water surface and in the vicinity of the point of maximum velocity. If $h > 0$, u_{max} occurs below the water surface; h is the depth of u_{max} below the water surface; and, along the y -axis, the velocity increases with y only up to $y = D - h$, and decreases with y in the region, $(D - h) < y \leq D$. If $h \leq 0$, u_{max} occurs at the water surface. If $h = 0$, isovels are perpendicular to the water surface. If $h < 0$, h is a parameter that can be used to fine-tune the slope of the isovels; and if the magnitude of h is very large, isovels are parallel, horizontal lines such that velocity varies only with y and ξ approaches y/D . Such a situation occurs in very wide channels. The η curves shown in Fig. 1 are orthogonal trajectories of ξ curves, that can be derived from (4) as

$$\eta = \pm \frac{1}{Z} (|1 - Z|)^{\beta_i(D + \delta_v - h)/(B_i + \delta_i)^2} \exp \left[Z + \beta_i \left(\frac{D + \delta_v - h}{B_i + \delta_i} \right)^2 Y \right] \tag{7}$$

in which η takes the negative sign only when $y > D - h$ and $h > 0$. In other cases, η takes the positive sign. The network of $\xi - \eta$ curves can be used as a coordinate system in modeling two-dimensional, velocity and shear-stress distributions and related processes (Chiu and Chiu 1986).

SUMMARY AND CONCLUSION

A great deal of information about an open-channel flow is contained in the maximum velocity u_{max} , which, along with the entropy parameter M , can determine the mean velocity \bar{u} in a channel section. Therefore, u_{max} as well as M and \bar{u} should be treated as an important parameter in hydraulics and fluid mechanics.

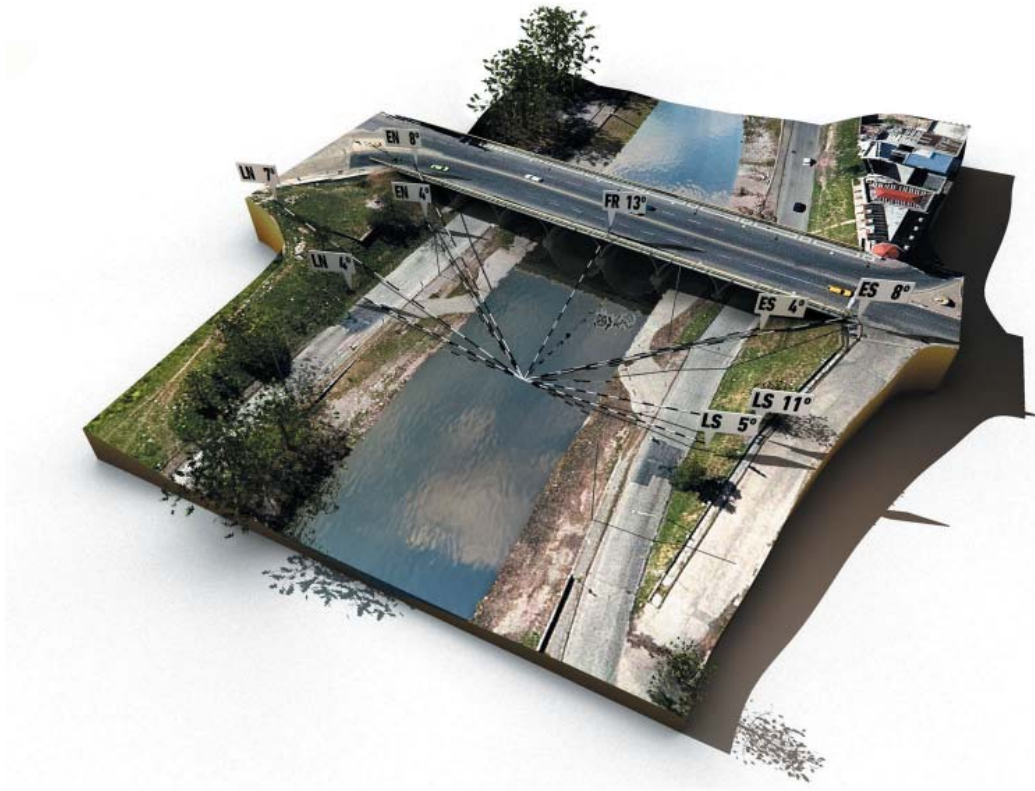
Under a wide range of flow conditions, represented by the discharge and water depth, a channel section has a propensity to establish and maintain an equilibrium state measurable by M and entropy. An erodible channel section establishes the equilibrium state by adjusting the channel characteristics, represented by the bed form and material, slope, geometrical shape, and alignment, under various flow conditions. A nonerodible channel, such as a well-established, mature channel, or a channel of rigid boundaries maintains the equilibrium state and the corresponding values of M and entropy by adjusting the velocity distribution through modifying u_{max} and h when the flow condition changes. When the discharge fluctuates, a channel section of larger entropy is capable of adjusting the velocity distribution in a wider range than those of smaller entropy values.

The M value of a channel section, that can be determined from the $u_{max} - \bar{u}$ relation, contains information about the overall characteristics of the channel section. Therefore, the M value is an effective, diagnostic measure of changes in bed form and material, slope, shape, and alignment that may result from man’s activities such as constructions of dams and bridges. It can also be used in determining the kinetic-energy head and energy slope at the section. An efficient method has been developed to determine the mean velocity and the discharge from the M value of a channel section and a velocity profile on a single vertical that passes through the point where u_{max} occurs. It can be used with automatic velocity-profile measurements by such systems as an acoustic device, to efficiently determine the discharge in streams and rivers. An acoustic device cannot measure velocity data near the water surface and channel bed because of some technical reasons. The velocity distribution model used in the developed technique is capable of accurately filling these missing data. During unsteady-flow periods, in which the flow resistance may change rapidly with time due to various factors, the discharge and water level measured sequentially can be used to update the flow resistance, to enhance a (Kalman) filtering scheme that can be designed to reduce the uncertainty in flow forecasting.

"EDUCATION IS NOT THE LEARNING OF THE FACTS, BUT THE TRAINING
OF THE MIND TO THINK, IS WHAT REMAINS AFTER ONE HAS
FORGOTTEN WHAT ONE HAS LEARNED IN SCHOOL"

ALBERT EINSTEIN

CUANTIFICACIÓN DE ERRORES EN LA IMPLEMENTACIÓN DE LSPIV PARA LA DETERMINACIÓN DE CAUDALES EN CURSOS FLUVIALES



En hidráulica fluvial, la medición de caudales representa uno de los pilares fundamentales para la realización de todo tipo de estudios y modelaciones.

La determinación de transformaciones lluvia-caudal, el tránsito de crecidas, delimitación de zonas inundables y muchas otras tareas, no pueden llevarse a cabo sin el soporte de una gran cantidad de mediciones de flujos naturales.

Debido a la gran necesidad de mediciones experimentales en la actualidad, la obtención de estimaciones en forma rápida, sin instrumental sofisticado, y aplicando técnicas de bajo costo es algo necesario, deseable y conveniente.

Una de las maneras de obtener datos de la forma descrita es a través de la aplicación de la técnica LSPIV, que se basa en la determinación de la velocidad superficial de un curso de agua a través del análisis de imágenes.

Este trabajo tiene como objetivo brindar un acercamiento al estudio de dichos errores, lograr una cuantificación de los mismos, determinando las principales fuentes e intervalos óptimos de las variables humanas y tecnológicas involucradas, lograr una reducción de la variabilidad entre el valor teórico y el observado, y finalmente, proporcionar metodologías de trabajo adecuadas.