



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FISICAS Y NATURALES.

PRACTICA SUPERVISADA

INGENIERIA CIVIL

“Caracterización experimental del flujo de aproximación a una obra hidráulica en un modelo físico 2D (H:V)”

Alumno: Lippi Dominguez, Carlos Facundo

Matricula: 35525942

Tutor Interno: Dra. Inga. Leticia Tarrab

Tutor Externo: Mg. Ing. Matias Eder

-Octubre de 2016-

AGRADECIMIENTOS:

A mis padres, que desde el día uno de la carrera me dieron su plena confianza y apoyo, que me incentivaron a seguir pese a todo, que me inculcaron la importancia de estudiar, que no me hicieron faltar nada, que apostaron por mí, que me dieron la vida.

A mis compañeros de la facultad, por compartir tantas y tantas horas de estudio, por compartir tantos momentos, por explicarme, por aguantarme, por estar. Que yo haya finalizado la carrera es en gran parte por ustedes. MUCHISIMAS GRACIAS A TODOS.

Al Ing. Matias Eder, por compartir la realización de la Practica Profesional Supervisada, por dedicarme tiempo, por sacarme todas las inquietudes, por ser un gran profesional, por ser una gran persona.

A la Inga. Leticia Tarrab, por su buena predisposición, trato, y por confiar en mí para ser mi tutora.

A los integrantes del tribunal, Inga. Maria Labaque e Ing. Gerardo Hillman por tomarse el tiempo para leer este informe.

A los profesores de la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, que fueron los encargados de formarme estos años.

A la Universidad Nacional de Córdoba.

RESUMEN

En esta práctica supervisada se caracteriza la hidrodinámica del flujo de ingreso a las obras de evacuación de excedentes de una de las estructuras de la Presa Los Molinos, la misma está localizada en la provincia de Jujuy (Argentina). Para la caracterización de ello se ha desarrollado una serie de actividades experimentales sobre el modelo físico 2D construido en las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.

En primer lugar se recopiló información para poder caracterizar hidráulicamente la estructura que se encuentra dentro del modelo físico 2D (Salto Esquí) obteniendo así las curvas características H-Q y Q-D, luego se procedió a aplicar 2 técnicas de medición de velocidad de flujo PIV y ADV. Los ensayos se llevaron a cabo bajo diferentes condiciones experimentales que incluyen diferentes caudales, presencia de compuerta y ausencia de la misma. En los ensayos realizados se pudo definir velocidades medias para cada técnica experimental en función del escenario de modelación (ya sea que trabaje como orificio o como vertedero), y debido a esto obtener un perfil de velocidades a una distancia genérica de la estructura de descarga.

INDICE DE CAPITULOS

1) <i>CAPITULO1: INTRODUCCION</i>	9
1.1) OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA	10
1.1.1) OBJETIVO GENERAL DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA	10
1.1.2) OBJETIVOS ESPECIFICOS DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA.....	10
1.1.3) OBJETIVOS PERSONALES DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA	10
1.2) METODOLOGÍA	10
2) <i>CAPITULO2: MARCO TEORICO</i>	12
2.1) Obras de Descarga	12
2.1.1) Partes que constituyen una Obra de Descarga	12
2.1.2) Descripción de estructuras utilizadas en práctica supervisada.....	13
2.2) MODELACIÓN HIDRÁULICA	27
2.2.1) Modelos físicos.....	28
2.2.2) Modelos matemáticos	29
2.2.3) Bases teóricas de modelación física	31
3) <i>CAPITULO3: Materiales y Métodos</i>	34
3.1) Instalación experimental	34
3.1.1) Canales de aforo.....	34
3.1.2) Canal experimental de pendiente variable y oleaje	35
3.1.3) Equipo de bombeo	35
3.1.4) Cisterna.....	36
3.1.5) Tanque volumétrico	36
3.1.6) Dispositivos de medición fijos.....	36
3.1.7) Infraestructura Complementaria:	37
3.2) MODELO FISICO 3D LOS MOLINOS	37
3.3) MODELO FISICO 2D- CANAL EXPERIMENTAL	38
3.4) TECNICAS EXPERIMENTALES.....	39
3.4.1) PIV.....	39
3.4.2) ADV	43
4) <i>CAPITULO4: COMPARACIÓN Y VALIDACIÓN DE TÉCNICAS EXPERIMENTALES DE MEDICIÓN DE VELOCIDADES.</i>	48
4.1) PIV - Metodología experimental.....	48
4.2) ADV – Metodología Experimental.....	50
4.3) Resultados - PIV	51

4.4) Resultados ADV	57
4.5) Comparación entre los resultados de PIV vs ADV	61
5) CAPITULO5: CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA	65
5.1) Parámetros Hidráulicos:	65
5.2) Curvas H-Q.....	67
5.2.1) Curva H-Q Experimental.	67
5.2.2) Ajuste H-Q considerando datos experimentales.....	68
5.2.3) Ajuste H-Q considerando el exponente de H fijo y averiguando el Cd dependiendo el caso de modelación.	69
5.2.4) Curva H-Qteórica.....	70
5.2.5) Comparación H-Q (Experimental) vs H-Q (Teórica).....	71
5.3) Curvas Q-D.....	74
5.3.1) Curva Q-D Experimental	74
5.3.2) Comparación Q-D Experimental y Q-D Teórica.....	74
5.4) Campo de velocidades Aguas Arriba.....	76
5.4.1) Resultados con PIV.	81
6) CAPITULO6: CONCLUSIONES	88
7) BIBLIOGRAFIA	89

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Modelos Físicos 3D ubicados en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales.....	9
Figura 2 – A) Vertedero de pared delgada B) Vertedero de pared gruesa.....	13
Figura 3 – Tipos de orificios.....	14
Figura 4 – Sección p/ cálculo de Caudal Teórico.....	14
Figura 5 – Caracterización hidráulica	16
Figura 6 – Corte y Sección de un vertedero de pared delgada sin contracciones.....	16
Figura 8 – Vertedero Triangular.....	18
Figura 7 – Vista Frontal y Vista en planta de un vertedero de pared delgada con contracciones	18
Figura 9 – Vertedero Trapezoidal	19
Figura 10 – Vertedero Circular	20
Figura 11 – Sección y Corte de un Vertedero de cresta delgada con contracciones.....	21
Figura 12 Influencia de la lamina en un vertedero A) Deprimida B) Adherida C) Ahogada	22
Figura 13 – Comparación entre un vertedero de Cresta Delgada y Cresta Ancha	22
Figura 14 – Perfil Creager	23
Figura 15 – Caso 1: Funcionamiento del Salto Esquí	24
Figura 16 – Salto Esquí Dentado	25
Figura 17 – Salto Esquí Liso	26

Figura 18 – Trayectoria del chorro en un salto esqui.....	26
Figura 19 – Vertedero Triangular del Canal de aforo.....	34
Figura 20 – Canal de Aforo	34
Figura 21 – Canal experimental	35
Figura 22 – Llave de maniobra del canal experimental	35
Figura 23 – Cañería de alimentación al canal experimental	35
Figura 24 - Limnómetro.....	36
Figura 25 – Modelos Físicos 3D – Izquierda (RIO SUQUIA) – Derecha (DIQUE LOS MOLINOS JUJUY).....	37
Figura 26 – Modelo 2D – Canal Experimental	38
Figura 27 – Modelo 2D – Canal experimental en funcionamiento	39
Figura 28 – CAMARA CCD.....	42
Figura 29 – Laser FlowSense Solo	42
Figura 30 – Equipo Completo PIV	43
Figura 31 – Sonda de ADV	44
Figura 32 – Volumen de medición de ADV.....	44
Figura 33 – Montaje de ADV.....	44
Figura 34 – Modulo de acondicionamiento estándar (ARRIBA), Modulo de acondicionamiento con sensores (ABAJO)	46
Figura 35 – Modulo de procesamiento de la señal ADV	46
Figura 36 – Principio de corrimiento de frecuencia de Doppler.....	47
Figura 37 – Zona de medición para realizar la técnica PIV y 9 puntos para realizar la técnica ADV	48
Figura 38 – Zona Z1 y Zona Z2 para realizar la medición de velocidades a partir de la técnica PIV	49
Figura 39 – Campo de vectores de velocidad en conjunto con mapa de colores de referencia .	49
Figura 40 – Líneas de corriente resultantes del campo de velocidades.	50
Figura 41 – 9 puntos para realizar la técnica ADV	50
Figura 42 – Velocidad U (m/s) vs Tiempo (s), en cada punto de medición con la técnica PIV	52
Figura 43 – Velocidad V (m/s) vs Tiempo (s), en cada punto de medición con la técnica PIV	54
Figura 44 – Velocidad Vtotal (m/s) vs Tiempo (s), en cada punto de medición con la técnica PIV	56
Figura 45 – Velocidad U (m/s) y Velocidad V (m/s) vs Tiempo (s), en el Punto1 de medición con la técnica ADV.....	57
Figura 46 - Velocidad U (m/s) y Velocidad V (m/s) vs Tiempo (s), en el Punto2 de medición con la técnica ADV.....	57
Figura 47 - Velocidad U (m/s) y Velocidad V (m/s) vs Tiempo (s), en el Punto3 de medición con la técnica ADV.....	57
Figura 48 - Velocidad U (m/s) y Velocidad V (m/s) vs Tiempo (s), en el Punto4 de medición con la técnica ADV.....	58
Figura 49 - Velocidad U (m/s) y Velocidad V (m/s) vs Tiempo (s), en el Punto5 de medición con la técnica ADV.....	58
Figura 50 - Velocidad U (m/s) y Velocidad V (m/s) vs Tiempo (s), en el Punto6 de medición con la técnica ADV.....	58

Figura 51 - Velocidad U (m/s) y Velocidad V (m/s) vs Tiempo (s), en el Punto7 de medición con la técnica ADV.....	58
Figura 52 - Velocidad U (m/s) y Velocidad V (m/s) vs Tiempo (s), en el Punto8 de medición con la técnica ADV.....	59
Figura 53 - Velocidad U (m/s) y Velocidad V (m/s) vs Tiempo (s), en el Punto9 de medición con la técnica ADV.....	59
Figura 54 – Velocidad Vtotal (m/s) vs Tiempo (s), en el Punto1 de medición con la técnica ADV.....	59
Figura 55 - Velocidad Vtotal (m/s) vs Tiempo (s), en el Punto2de medición con la técnica ADV.....	59
Figura 56 - Velocidad Vtotal (m/s) vs Tiempo (s), en el Punto3 de medición con la técnica ADV.....	60
Figura 57 - Velocidad Vtotal (m/s) vs Tiempo (s), en el Punto4 de medición con la técnica ADV.....	60
Figura 58 - Velocidad Vtotal (m/s) vs Tiempo (s), en el Punto5 de medición con la técnica ADV.....	60
Figura 59 - Velocidad Vtotal (m/s) vs Tiempo (s), en el Punto6 de medición con la técnica ADV.....	60
Figura 60 - Velocidad Vtotal (m/s) vs Tiempo (s), en el Punto7 de medición con la técnica ADV.....	60
Figura 61 - Velocidad Vtotal (m/s) vs Tiempo (s), en el Punto8 de medición con la técnica ADV.....	61
Figura 62 - Velocidad Vtotal (m/s) vs Tiempo (s), en el Punto9 de medición con la técnica ADV.....	61
Figura 63 – BOXPLOT (Vxpiv vs Vxadv).....	62
Figura 64 – BOXPLOT (Vypiv vs Vxadv).....	63
Figura 65 – BOXPLOT (Vtotalpiv vs Vtotaladv)	64
Figura 66 – Parámetros a relevar para realizar la caracterización hidráulica de la estructura de salto Esqui	65
Figura 67 – H-Q Experimental.....	68
Figura 68 – H-Q utilizando H experimental	68
Figura 69 – H-Q Considerando teoría en el cual H se eleva a la 0.5	69
Figura 70 – H-Q Considerando teoría en el cual H se eleva a la 1.5	70
Figura 71 – H –Q teorica Con Compuerta.....	70
Figura 72 – H –Q teorica Sin Compuerta	71
Figura 73 – Comparación curvas H-Q Con Compuerta	72
Figura 74 – Comparación de curvas H-Q Sin Compuerta	73
Figura 75 – Curvas Q-D Experimental Con Compuerta y Sin Compuerta.....	74
Figura 76 – Punto1 y Punto2 para realizar la medición de v, hv, salto.	75
Figura 77 – Comparación Q-D, Experimental vs Teórico p/ cada escenario de modelación.	76
Figura 78 – Determinación de las zonas de medición.....	77
Figura 79 - PIVLAB.....	77
Figura 80 – Carga de imágenes en PIVLAB	78
Figura 81 – Resultado de filtrado de imagenes	78
Figura 82 – Análisis de imágenes en PIVLAB	79
Figura 83 – Análisis de imágenes en PIVLAB	79

Figura 84 – Analisis de imágenes en PIVLAB	80
Figura 85 – Calibración de imágenes en PIVLAB.....	80
Figura 86 – Campo de velocidades y Líneas de Corriente en PIVLAB	81
Figura 87 – Perfil de velocidades U Con Compuerta (Q = 30 l/s).....	84
Figura 88 – Perfil de velocidades V Con Compuerta (Q = 30 l/s).....	84
Figura 89 – Perfil de velocidades U Sin Compuerta (Q = 30 l/s)	85
Figura 90 – Perfil de velocidades V Sin Compuerta (Q= 30 l/s)	85
Figura 91 – Perfil de velocidades U Con Compuerta (Q = 40 l/s).....	86
Figura 92 – Perfil de Velocidades V Con Compuerta (Q = 40 l/s)	86
Figura 93 – Perfil de Velocidades U Sin Compuerta (Q = 40 l/s).....	87
Figura 94 – Perfil de Velocidades V Sin Compuerta (Q = 40 l/s).....	87

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 – Limitaciones Físicas y Practicas de los Modelos Físicos y Matemáticos	29
Tabla 2 – Velocidad Umedia en cada punto	53
Tabla 3 – Velocidad Vmedia en cada punto	55
Tabla 4 – Velocidad Vtotalmedia en cada punto	56
Tabla 5 – Comparación de velocidades U, V, Vtotal en cada punto.	61
Tabla 6 – Datos relevados Con Compuerta	66
Tabla 7 – Datos relevados Sin Compuerta	66
Tabla 8 – Datos de archivos Con Compuerta Datos de archivos Sin Compuerta.....	67
Tabla 9 – Tabla de comparación de H-Q Con Compuerta	71
Tabla 10 – Diferencia porcentual con compuerta	72
Tabla 11 – Tabla de comparación de H-Q Sin Compuerta	73
Tabla 12 – Diferencias porcentual sin compuerta	73
Tabla 13 – Datos Q-D Experimental Con Compuerta – Sin Compuerta	74
Tabla 14 – Determinación de Longitud de salto por fórmula para el caso Con Compuerta	75
Tabla 15 – Determinación de Longitud de salto por fórmula para el caso Sin Compuerta.	75

1) CAPITULO1: INTRODUCCION

La presente práctica supervisada se llevo a cabo en el ámbito del Laboratorio de hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba ubicado sobre Bv. Dr. Juan Filloy s/n Ciudad Universitaria.

El Laboratorio de Hidráulica (Figura1), perteneciente al departamento de hidráulica de la FCFyN de la UNC, fue creado a mediados de la década del 1940 y presta servicios académicos a la Universidad Nacional de Córdoba UNC y realiza actividades de investigación científico-tecnológico financiada por proyectos provinciales de la Agencia Córdoba Ciencia, nacionales de CONICET, Agencia Nacional de Promoción Científica, SECYT e Internacionales para la Unión Europea. Los servicios técnicos y de consultoría especializada en hidráulica se han realizado para numerosas Direcciones Provinciales del País, y los principales organismos Nacionales. Para los cuales se han realizados numerosos modelos físicos reducidos a fondo fijo y móvil de obras y estructuras hidráulicas, incluyendo presas, azudes, sifones, vertederos, alcantarillas, disipadores de energía, como así también modelos fluviales bidimensionales y tridimensionales. Adicionalmente se realizan tareas de reparación y calibración de instrumental hidrométrico. El laboratorio cuenta con equipamiento propio para realizar estudios experimentales y de campo, cuenta con un canal de vidrio de pendiente variable, instrumental hidrométrico de campo y laboratorio como limnómetros ópticos, limnómetros digitales, vertederos de aforo, molinetes y micro molinetes, velocímetro acústico Doppler 3D, tubos Pitot, instrumental de mediciones limnológicas y sedimentológicas, etc. (Laboratorio de Hidraulica UNC, 2016)



Figura 1 – Modelos Físicos 3D ubicados en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales

1.1) OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA

En esta Práctica Supervisada, se plantearon los siguientes objetivos.

1.1.1) OBJETIVO GENERAL DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA

Caracterizar experimentalmente el flujo de aproximación a una obra hidráulica para diferentes condiciones de funcionamiento utilizando herramientas de medición de última generación (PIV-ADV) en un modelo físico 2D (H:V).

1.1.2) OBJETIVOS ESPECÍFICOS DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA

- Capacitar al estudiante en el área de la hidráulica experimental aplicada a modelos físicos.
- Capacitar al estudiante en el uso de modernas técnicas de medición de velocidades de flujo (PIV-ADV)
- Aplicar estas técnicas de medición a un caso en particular y comparar resultados.
- Caracterizar la hidráulica de una estructura utilizando diferentes escenarios de modelación
- Analizar e interpretar de los resultados experimentales.
- Comparar los resultados experimentales con estimaciones teóricas.

1.1.3) OBJETIVOS PERSONALES DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA

- Obtener experiencia práctica, aplicando y profundizando conceptos adquiridos durante los años de estudio de la carrera.
- Incorporar nuevos conocimientos relacionados con el uso de software de aplicación.
- Desarrollar habilidades para un mejor desenvolvimiento en el ámbito laboral profesional y de trabajo multidisciplinario.
- Redactar un informe de utilidad para estudios posteriores y/o análisis relacionados con la temática expuesta.
- Finalización de la carrera de grado.

1.2) METODOLOGÍA

- En el primer capítulo, se presenta el laboratorio de hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba donde se realizó la práctica supervisada. Además, se presentan los objetivos generales, específicos y personales de la práctica supervisada.
- En el segundo capítulo de este documento, se desarrollan los conceptos hidráulicos, estructuras de descargas y de modelación física básicos necesarios para comprender los estudios realizados en este trabajo.
- En el capítulo 3 se presentan las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica y el modelo físico 2D en el cual se realizaron los estudios experimentales que se presentan en la práctica supervisada, como así también la base teórica de las técnicas experimentales a utilizarse.
- En el capítulo 4, se presenta la metodología llevada a cabo para realizar las mediciones de velocidad en el modelo físico 2D con las técnicas de PIV y ADV.
- En el capítulo 5, se presentan los resultados obtenidos en los estudios experimentales y se comparan los mismos con estimaciones teóricas. Se presentan las curvas características de la estructura en estudio y el flujo de aproximación de la misma.

- Finalmente en el último capítulo, se desarrollan conclusiones en cuanto a las técnicas utilizadas, los resultados de las mismas, y propias de la práctica supervisada.

2) CAPITULO2: MARCO TEORICO

2.1) Obras de Descarga

La función de una obra de descarga en una presa de almacenamiento o de derivación consiste en dejar salir el agua flujo de agua excedente o de avenidas que no cabe en el espacio destinado para el almacenamiento, y en el caso de una presa derivadora, dejar pasar los excedentes que no se envían al sistema de derivación. (UNAM, 2006)

El tamaño del almacenamiento es un factor importante a considerar este se encuentra en función de varios factores:

- Avenida de diseño
- Características del embalse
- Programa de operación de la obra

2.1.1) Partes que constituyen una Obra de Descarga

Una obra de descarga está constituida por las siguientes partes:

2.1.1.1) Canal de acceso

Conduce el agua desde el almacenamiento hasta la estructura de control, de manera que llegue en dirección perpendicular a la cresta en toda su longitud y libre de turbulencias a fin de lograr el coeficiente de descarga máximo y el mínimo de problemas en la estructura de control y no se reviste en su mayor longitud.

Las velocidades a lo largo de este canal deberán limitarse, ya que como no se reviste se puede erosionar, y las curvaturas y transiciones deberán hacerse de forma gradual, con el objeto de disminuir las pérdidas de carga a lo largo del canal.

2.1.1.2) Estructuras de control (vertedero/orificios)

Regula las descargas del almacenamiento. La regulación puede efectuarse mediante una sección de control constituida por un simple umbral, un orificio, o una tubería, que pueden descargar libremente o sumergidos y estar controlados o no por compuertas. En cualquier caso, es muy importante lograr la mayor eficiencia de la estructura de control, con un coeficiente de descarga lo más grande posible para la descarga máxima y evitar el despegue de la lámina vertiente sobre la cresta.

Las estructuras de control pueden tomar varias formas tanto en su posición como en su figura. En planta los vertederos pueden ser rectos, curvos, semicirculares, en forma de U o redondos. En el caso de los orificios, éstos pueden ser horizontales, inclinados o verticales, y en su forma pueden ser circulares, cuadrado, rectangular o de forma irregular.

2.1.1.3) Conducto de descarga

Permite conducir los volúmenes que han pasado por la estructura de control, hasta el río aguas abajo de la presa. Dicho conducto puede ser canal a cielo abierto, o bien un conducto cerrado, o una combinación de ambas. La selección del tipo y dimensiones están regidos por las consideraciones hidráulicas, económicas, topográficas y geológicas del sitio.

2.1.1.4) Estructural terminal

Se ubica al final del conducto de descarga y permite la restitución de las descargas del vertedor al río, disipando la energía cinética excedente que adquiere el agua en su descenso desde el embalse hasta el río aguas abajo, o bien lanzar el agua directamente al río para lograr su disipación, aunque esta ocurra fuera de la estructura terminal.

El objetivo es alcanzar una disipación eficaz de la energía y eliminar la erosión en la zona de la caída.

2.1.1.5) Canal de salida

El canal de salida es la estructura que capta el agua que sale de la estructura terminal; su función es la de conducir el agua nuevamente al río. (No siempre se requiere construir un canal de salida, esto depende de las condiciones topográficas, de la calidad de la roca, de la disposición de otras estructuras, etc. y no se reviste.)

2.1.2) Descripción de estructuras utilizadas en práctica supervisada.

A continuación se describen las estructuras de control y terminal utilizada para realizar la practica supervisada.

2.1.2.1) Orificios

Denominamos orificio (Figura 2), a una abertura de forma regular, que se practica en la pared o el fondo del recipiente, a través del cual eroga el líquido contenido en dicho recipiente, manteniéndose el contorno del orificio totalmente sumergido. (Farras, 2005)

La corriente líquida que sale del recipiente se la llama *vena líquida o chorro*.

Si el contacto de la vena líquida con la pared tiene lugar en una línea estaremos en presencia de un orificio en pared delgada. Si el contacto es en una superficie se tratará de un orificio en pared gruesa.

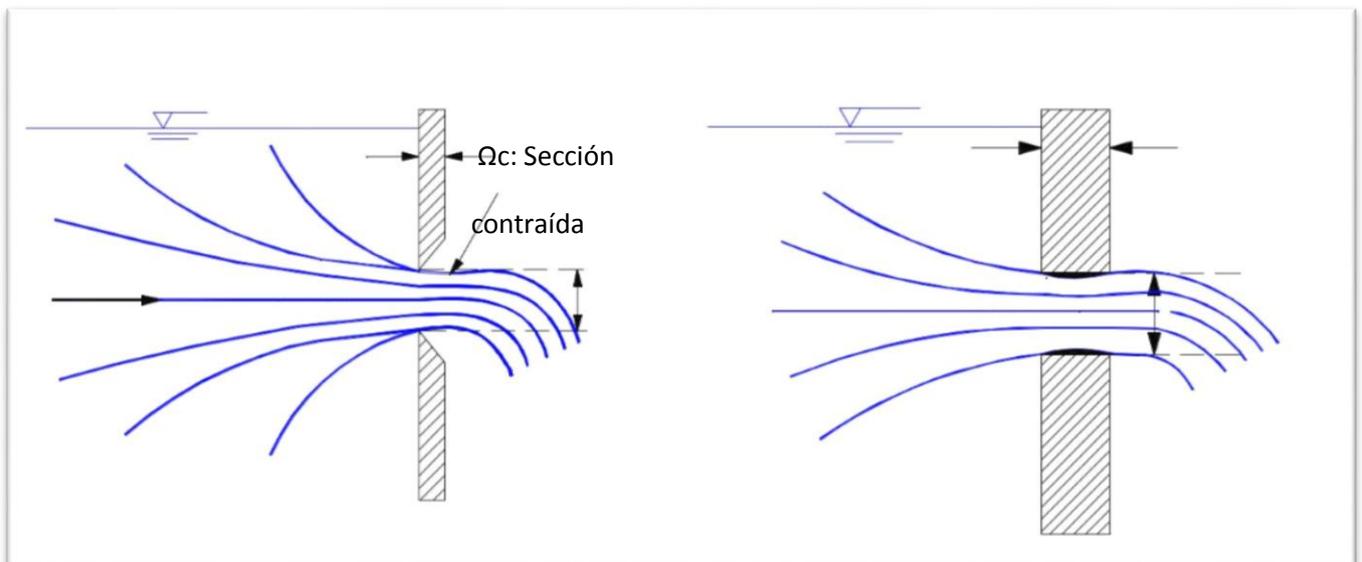


Figura 2 – A) Vertedero de pared delgada

B) Vertedero de pared gruesa

En la práctica se suele considerar:

$$\text{Pared delgada } e < \frac{1}{2} * a$$

$$\text{Pared gruesa } e > 3 * a$$

Siendo e = espesor, a= ancho de vena

- Tipos de orificios:
 - Orificio Sumergido: (Figura 3) cuando el nivel del líquido en el canal de salida o recipiente inferior está por arriba de la arista o borde superior del orificio. Asimismo la pared puede encontrarse vertical o inclinada, ya sea hacia aguas abajo o aguas arriba, afectando obviamente dicha inclinación, la descarga producida por dicho orificio.
 - Orificio Libre: (Figura 3) cuando el nivel del líquido en el canal de salida o recipiente inferior está por debajo de la arista o borde superior del orificio. Asimismo la pared puede encontrarse vertical o inclinada, ya sea hacia aguas abajo o aguas arriba, afectando obviamente dicha inclinación, la descarga producida por dicho orificio.

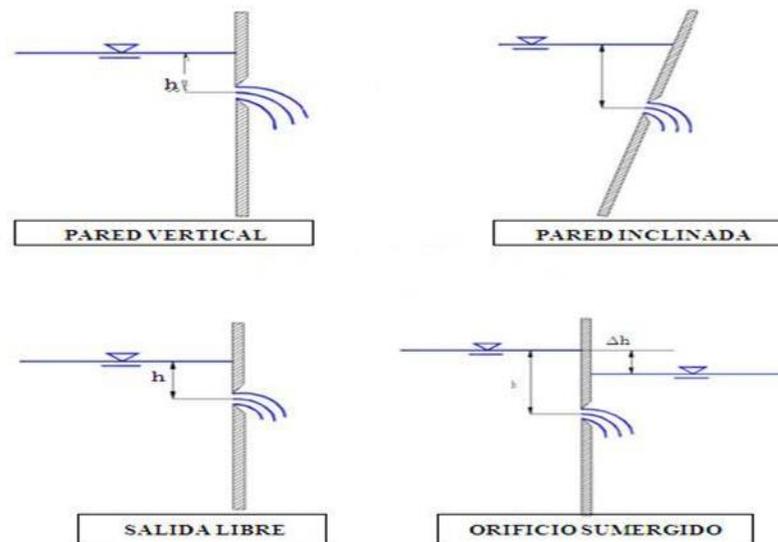


Figura 3 – Tipos de orificios

Calculo del Caudal teórico (Teorema de torricelli)

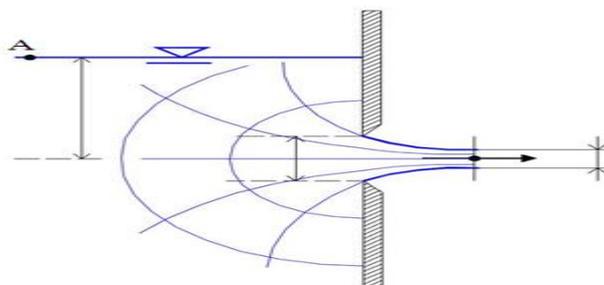


Figura 4 – Sección p/ cálculo de Caudal Teórico

Si se aplica el teorema de Bernoulli entre 0 y A:

$$h + \frac{p_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} = 0 + \frac{p_0}{\gamma} + \frac{V_o^2}{2g}$$

Como $V_A = 0$ y despejamos V_o ,

$$V_o = \sqrt{2gh}$$

Obtenemos:

Un análisis intuitivo de las líneas de corriente, como puede apreciarse en las figuras, permite interpretar la formación de la “sección contraída Ω_c ” a una cierta distancia de la pared del orificio, que es sobre la cual aplicamos Bernoulli.

De esta forma, aplicando la Ecuación de Continuidad y teniendo en cuenta un coeficiente experimental μ “de descarga del orificio”, el cual consiste en una función compleja menor a la unidad (disminuye, en consecuencia, el valor teórico dado por la expresión) en la que influyen la viscosidad, la formación de la sección contraída, la variación real de la velocidad en la misma (consideramos el valor medio en la deducción), la forma de la sección, etc.; se obtiene la expresión para obtener el caudal es:

$$Q = \Omega_c * V_o$$

$$Q = \mu * \Omega * V_o$$

Donde $\Omega =$ *sección real del orificio*

Se tiene un “orificio perfecto”, cuando cumple las siguientes condiciones:

- Pared delgada, vertical y perpendicular al escurrimiento.
- Velocidad de llegada despreciable (menor a 0,30 m/s)
- Contracción de la vena completa, lo que implica suficiente distancia desde el fondo y los laterales (orificio cerca de los límites minimizan la contracción).
- Idéntica presión (atmosférica generalmente, salvo casos muy particulares) aguas arriba del orificio y alrededor de la vena fluida en caída.
- Caída libre, no influenciada por los niveles aguas abajo.

Por lo tanto se puede adoptar que $\mu = 0.60$

Cuando el orificio no cumple con algunas de las propiedades enunciadas debe ser corregido el coeficiente de gasto, el que se obtiene de los manuales especializados y que se simboliza como C_i , (i varia desde 1 a n, esto significa un la cantidad de coeficientes utilizados en el calculo) con lo que la expresión general queda entonces:

$$Q = \mu * C_1 * C_2 \dots C_n * \Omega * \sqrt{2gh}$$

Es importante señalar que este coeficiente de gasto esta relacionado con la diferencia de niveles aguas arriba y aguas abajo.

2.1.2.2) Vertederos

Un vertedero (Figura 5) es un muro o una barrera que se interpone al flujo, causando sobre-elevación del nivel de la lámina aguas arriba y disminución aguas abajo (CAUCA, 2012). Las principales funciones de los vertederos son:

- Control de nivel en embalses, canales, depósitos, estanques, etc.
- Aforo o medición de caudales
- Elevar el nivel del agua.
- Evacuación de crecientes o derivación de un determinado caudal.

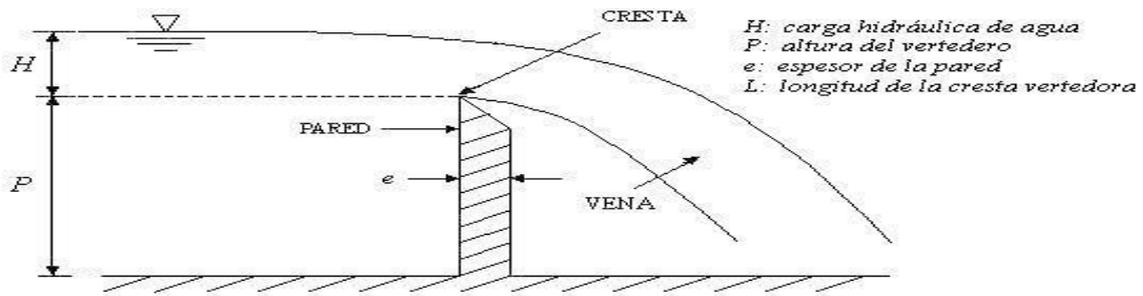


Figura 5 – Caracterización hidráulica

La ecuación para obtener el caudal es la siguiente:

$$Q = K * H^m$$

Donde: Q = Caudal, K = Constante de calibración, H = Carga hidráulica, m = exponente.

Debemos considerar la ecuación de energía (Bernoulli) entre 2 puntos, uno muy alejado $V=0$ y uno por sobre la cresta, y teniendo en cuenta las siguientes condiciones:

- Distribución hidrostática de presiones.
- Las pérdidas por fricción y locales entre 1 y 2 son despreciables. La tensión superficial es despreciable.
- El flujo aguas abajo de la estructura (vena) debe ser libre (no ahogado) para garantizar que la presión en la vena sea la atmosférica (chorro libre).

Clasificación de los vertederos según su forma geométrica:

➤ Vertederos Rectangulares:

A. *Vertederos de pared delgada sin contracciones*

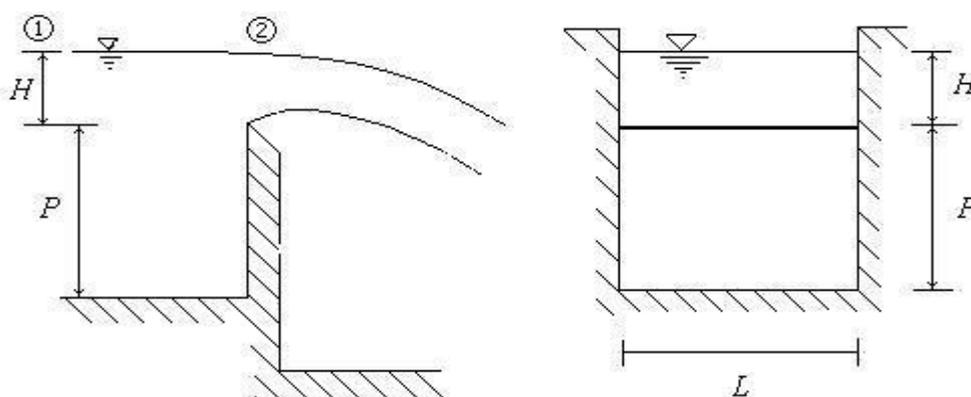


Figura 6 – Corte y Sección de un vertedero de pared delgada sin contracciones

Aplicando la ecuación de energía entre los puntos 1 y 2 (Figura 6), se obtiene una expresión para el caudal:

$$Qt = \frac{2}{3} \sqrt{2g} L \left(H + \frac{V^2}{2g} \right)^{\frac{3}{2}}$$

Donde:

Qt = Caudal teórico, L = longitud del vertedero, H = carga hidráulica, V = velocidad de llegada, g = aceleración debida a la gravedad.

La ecuación anterior no considera las pérdidas por fricción en el tramo, ni los efectos de tensión superficial, por lo tanto el caudal real es menor que el caudal teórico, por tal razón se introduce un coeficiente que permita incluir estas consideraciones, como se indica en la ecuación:

Cd = coeficiente de descarga, cuyos valores característicos deben estar entre 0.55 y 0.65

$$Qt = \frac{2}{3} \sqrt{2g} L C_d \left(H + \frac{V^2}{2g} \right)^{\frac{3}{2}}$$

Despreciando la influencia de la velocidad de llegada al vertedor, la ecuación se simplifica de la siguiente forma:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_d L H^{\frac{3}{2}}$$

(Sotelo Avila, 1982) Presenta ecuaciones que permiten calcular los coeficientes de descarga para vertederos rectangulares con contracciones o sin ellas y también para vertederos triangulares.

B. Vertederos de pared delgada con contracciones

Para esta situación, la longitud efectiva del vertedero es L'.

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_d L' H^{\frac{3}{2}}$$

El efecto de la contracción se tiene en cuenta restando a la longitud total de la cresta del vertedero L, el número de contracciones multiplicada por 0.1H.

$$L' = L - n (0,1 H)$$

Entonces:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_d (L - n(0,1H)) H^{\frac{3}{2}}$$

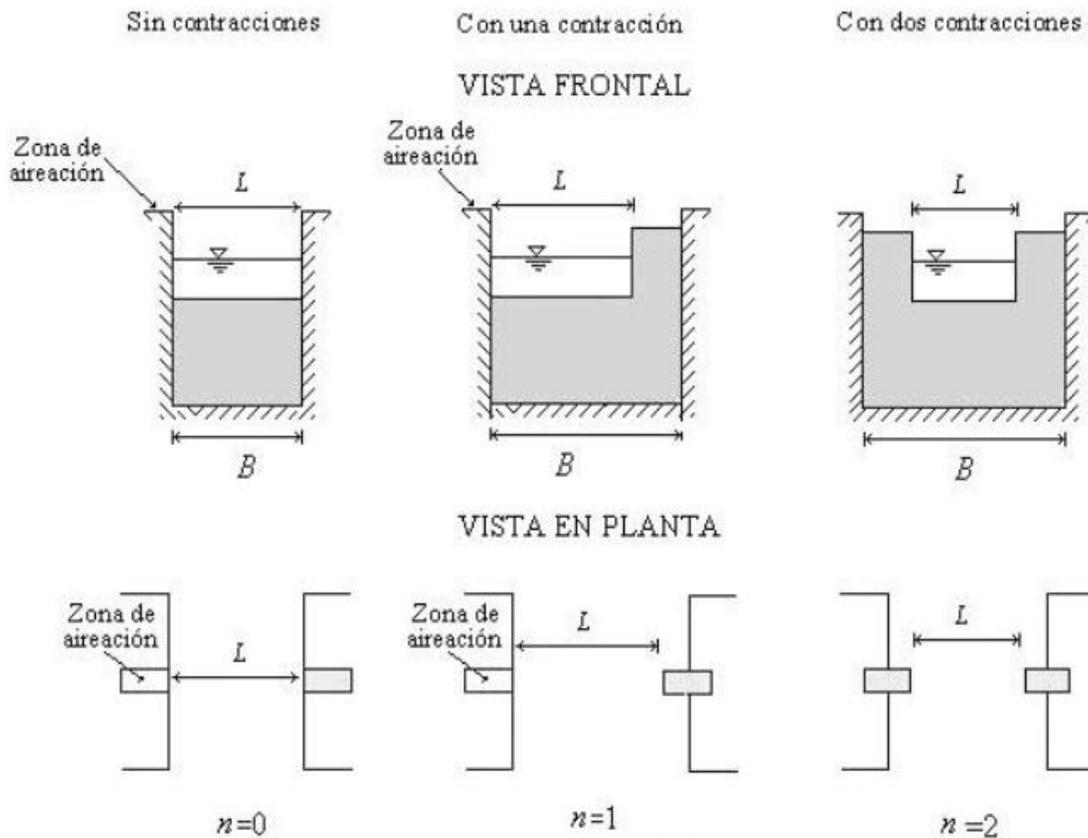


Figura 7 – Vista Frontal y Vista en planta de un vertedero de pared delgada con contracciones

La imagen (Figura 7) muestra una vista frontal y una vista en planta de vertederos rectangulares con contracciones en las cuales n indica la cantidad de contracciones

Para el caso del vertedero sin contracciones laterales ($n = 0$), se requiere de una zona de aireación en los extremos de la estructura que permita el ingreso de aire y así para garantizar que la presión aguas abajo de la estructura sea la atmosférica.

➤ Vertederos triangulares:

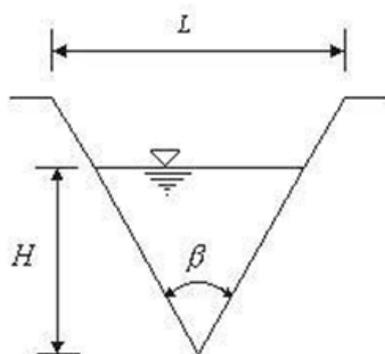


Figura 8 – Vertedero Triangular

Valores característicos de C_d

ÁNGULO β	C_d
15°	0.52-0.75
30°	0.59-0.72
45°	0.59-0.69
60°	0.50-0.54
90°	0.50-0.60

Cuando los caudales son pequeños es conveniente aforar usando vertederos en forma de V (Figura 8) puesto que para pequeñas variaciones de caudal la variación en la lectura de la carga hidráulica H es más representativa.

$$Q = \frac{8}{15} C_d \sqrt{2g} \left(\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \right) H^{\frac{5}{2}}$$

Donde si $\beta = 90$ entonces $Q = 1.4 H^{\frac{5}{2}}$

➤ Vertederos trapezoidales:

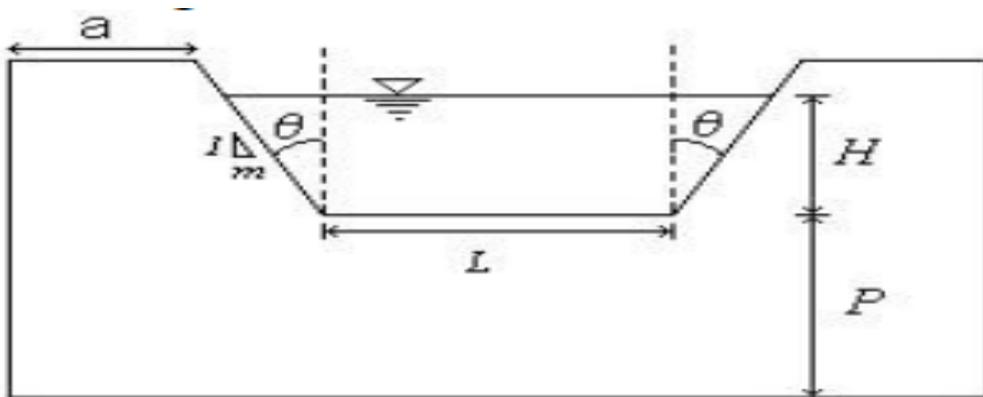


Figura 9 – Vertedero Trapezoidal

Este vertedero (Figura 9) se ha diseñado con el fin de disminuir el efecto de las contracciones que se presentan en un vertedero rectangular contraído.

$$Q = \frac{2}{3} C_{d1} \sqrt{2g} L H^{\frac{3}{2}} + \frac{8}{15} C_{d2} \sqrt{2g} H^{\frac{5}{2}} \operatorname{tg}(\theta)$$

C_{d1} = coeficiente de descarga para el vertedero rectangular con contracciones

C_{d2} = coeficiente de descarga para el vertedero triangular

L = longitud de la cresta

θ = Angulo de inclinación de los lados respecto a la vertical.

m = inclinación lateral.

La ecuación anterior puede transformarse de la siguiente manera:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} \left(C_{d1} + \frac{4H}{5L} C_{d2} \operatorname{tg} \theta \right) L H^{\frac{3}{2}}$$

Cuando la inclinación de los taludes laterales es de 4V:1H, el vertedero recibe el nombre de Cipolletti en honor a su inventor. La geometría de este vertedero ha sido obtenida de manera

que las ampliaciones laterales compensen el caudal disminuido por las contracciones de un vertedero rectangular con iguales longitud de cresta y carga de agua.

(Sotelo Avila, 1982) Afirma que el término entre paréntesis de la ecuación es de 0.63 lo que conduce a la siguiente ecuación, en sistema M.K.S

$$Q = 1,861 L H^{\frac{3}{2}}$$

➤ Vertedero circular

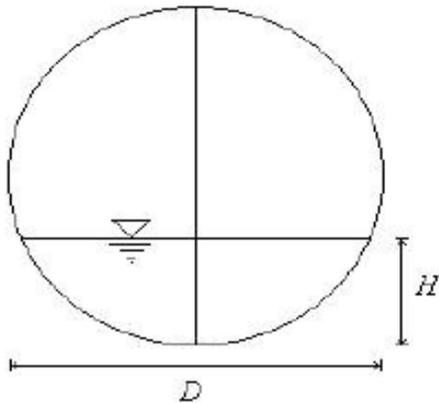


Figura 10 – Vertedero Circular

La ecuación de caudal es la siguiente:

$$Q = \phi \left[0.555 + \frac{D}{110 H} + 0.041 \frac{H}{D} \right] D^{\frac{5}{2}}$$

Donde: D = diámetro en decímetros

H = Carga hidráulica en cm

Q = Caudal en l/s

$\phi = \text{diámetro}$ - depende la relación H/D indicada en la siguiente tabla.

<i>H/D</i>	ϕ	<i>H/D</i>	ϕ
0.05	0.0272	0.55	2.8205
0.10	0.1072	0.60	3.2939
0.15	0.2380	0.65	3.7900
0.20	0.4173	0.70	4.3047
0.25	0.6428	0.75	4.8336
0.30	0.9119	0.80	5.3718
0.35	1.2223	0.85	5.9133
0.40	1.5713	0.90	6.4511
0.45	1.9559	0.95	6.9756
0.50	2.3734	1.00	7.4705

La ecuación típica, planteada por (Azevedo y Acosta, 1976) es:

$$Q = 1,518 D^{0,693} H^{1,807}, \quad \text{En sistema M.K.S}$$

Clasificación según el Ancho de la cresta:

➤ **Cresta delgada**

Este tipo de vertedero es el más usado, especialmente como aforador, por ser una estructura de fácil construcción e instalación. Debidamente calibrados o patronados se obtienen ecuaciones o curvas en las cuales el caudal es función de la carga hidráulica H .

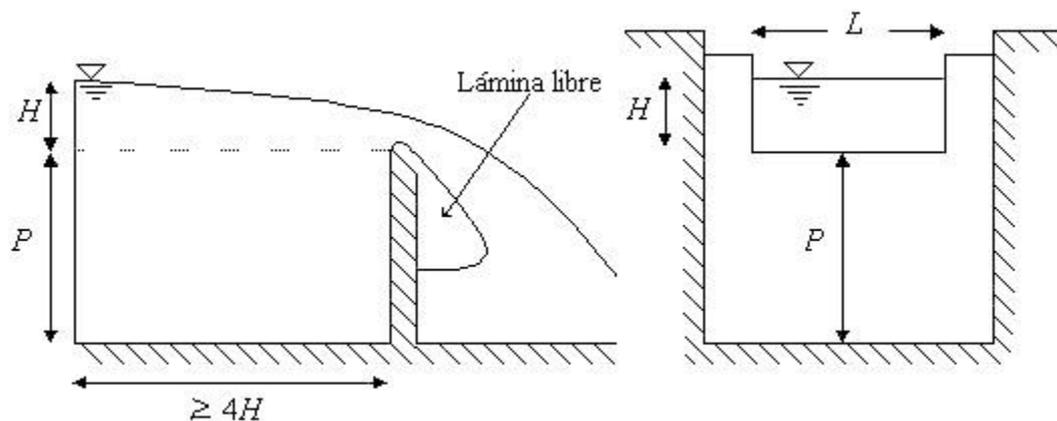


Figura 11 – Sección y Corte de un Vertedero de cresta delgada con contracciones

La ecuación que plantea (Azevedo y Acosta, 1976):

$$Q = 1,84 L H^{\frac{3}{2}}$$

Influencia de la forma de la vena:

El funcionamiento de los vertederos de pared delgada puede variar según la forma de la vena o chorro aguas abajo de la estructura, en situaciones en que no toda la lámina esté en contacto con la presión atmosférica, modificándose la posición de la vena y alterándose el caudal. Es por ello que cuando el vertedero es usado para medición de caudales se debe evitar la situación anterior. Esta influencia se puede presentar en

vertederos sin contracción lateral que no dispongan de una adecuada aireación. En estas circunstancias la lámina líquida puede tomar una de las formas siguientes

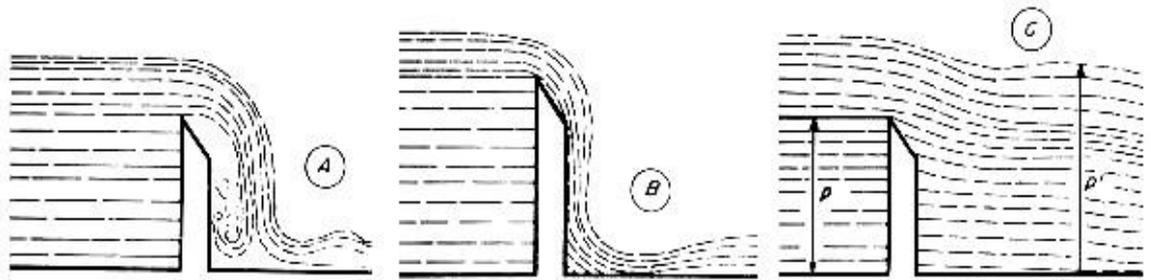


Figura 12 Influencia de la lamina en un vertedero A) Deprimida B) Adherida C) Ahogada

- **Lámina deprimida:** El aire es arrastrado por el agua, ocurriendo un vacío parcial aguas abajo de la estructura, que modifica la posición de la vena, el caudal es mayor al previsto teóricamente.
- **Lámina adherente:** Ocurre cuando el aire sale totalmente. En esta situación el caudal también es mayor.
- **Lámina ahogada:** Cuando el nivel aguas abajo es superior al de la cresta $P' > P$. Los caudales disminuyen a medida que aumenta la sumersión. En esta situación el caudal se puede calcular, teniendo como base los valores relativos a la descarga de los vertederos libres aplicándoles un coeficiente de reducción, que se obtiene de la siguiente tabla:

h/H	Coficiente	h/H	Coficiente
0.0	1.000	0.5	0.937
0.1	0.991	0.6	0.907
0.2	0.983	0.7	0.856
0.3	0.972	0.8	0.778
0.4	0.956	0.9	0.621

➤ **Cresta ancha**

Los vertederos de cresta ancha tienen menor capacidad de descarga para igual carga de Agua que los vertederos de cresta delgada y su uso más frecuente es como estructuras de Control de nivel.

Comparación entre vertedero de cresta delgada y cresta ancha:

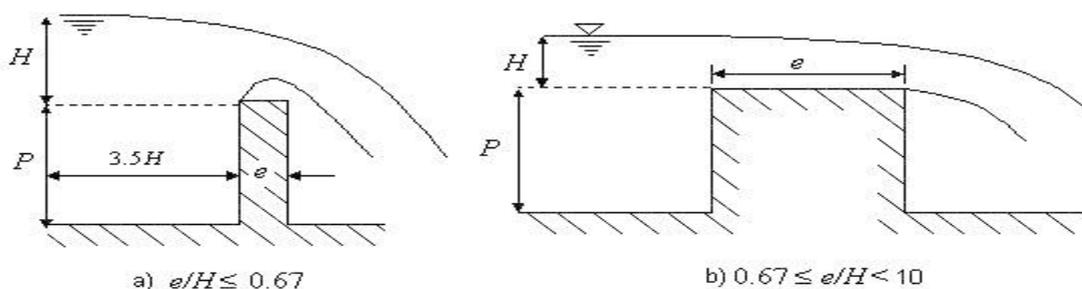


Figura 13 – Comparación entre un vertedero de Cresta Delgada y Cresta Ancha

(Sotelo Avila, 1982) Presenta una clasificación del funcionamiento de los vertederos, según la Relación e/H , como se presenta a continuación:

- Cuando e/H es menor que 0.67 el chorro se separa de la cresta y el funcionamiento es idéntico al del vertedero de pared delgada.
- Cuando e/H es igual a 0.67 el funcionamiento es diferente, pues la lámina vertiente se adhiere a la cresta del vertedero.
- Si la relación e/H es mayor a 0.67 y menor a 10 se considera que el funcionamiento es en canal. (Azevedo y Acosta, 1976) proponen:

$$Q = 1,71 L H^2$$

Perfil Creager:

Se usa para evacuar caudales de creciente, pues la forma especial de su cresta permite la Máxima descarga al compararlo con otra forma de vertedores para igual altura de carga de agua.

(Azevedo y Acosta, 1976) Proponen:

$$Q = 2,2 L H^2, \text{ en sistema M.K.S}$$

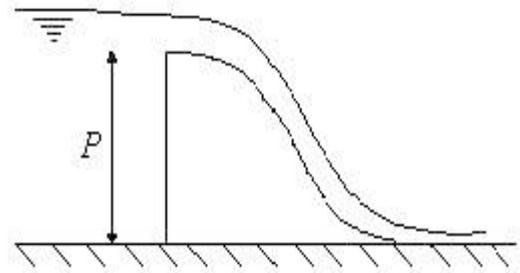


Figura 14 – Perfil Creager

Requisitos generales para la instalación de un vertedero:

- El vertedero deberá ubicarse en canales de sección uniforme y alineamiento recto aguas arriba, en una longitud mayor de $20H$.
- El vertedero debe instalarse normalmente al flujo y la cresta debe estar perfectamente lisa y nivelada.
- La lectura de la carga H sobre la cresta se mide con una regla graduada o limnómetro ubicado por lo menos a una distancia 3.5 veces la carga máxima hacia aguas arriba.
- Para asegurar su funcionamiento con descarga libre, debe instalarse un dispositivo de ventilación que comunique la cara aguas abajo del vertedero con la atmósfera.
- Si la instalación del vertedero es permanente, debe dejarse un dispositivo de drenaje para evacuar los sedimentos depositados.
- Se recomienda que la cresta sea de material resistente a la corrosión como bronce, acero, plástico y con la arista viva.

2.1.2.3) Salto Esquí:

El objetivo de un salto esquí es evitar socavaciones al pie de la caída, ya sea lanzando el agua lejos de los lugares en los que pueda provocar una socavación fuerte o produciendo un remolino bajo la corriente principal que evite que el material suelto que constituye el fondo del cauce sea arrastrado aguas abajo. (UNAM, 2006)

El funcionamiento de un salto esquí puede ser de tres tipos, que son esquematizados como se describe a continuación.

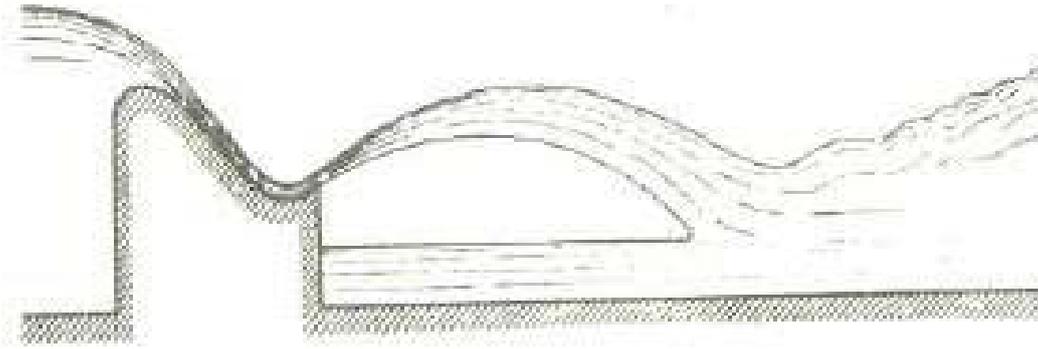


Figura 15 – Caso 1: Funcionamiento del Salto Esquí

Caso 1. El agua en lanzada, de forma libre, lejos del vertedor aprovechando su energía cinética, siguiendo una trayectoria más o menos parabólica.

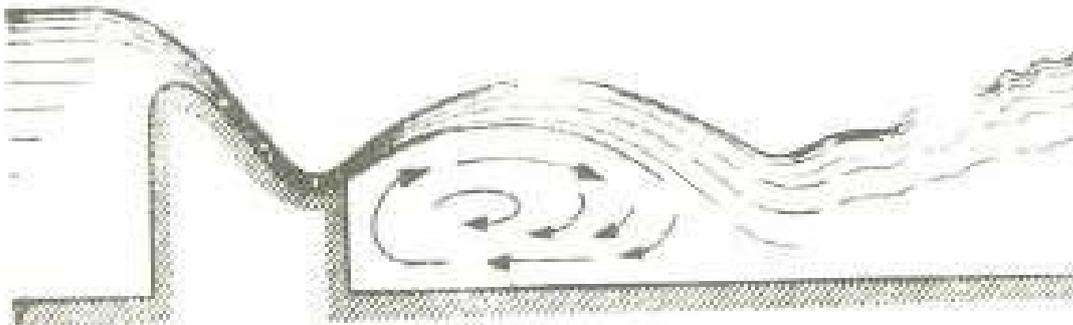


Figura 16 – Caso 2: Funcionamiento del Salto Esquí

Caso 2. Con remolino inferior. El chorro está en contacto en su parte inferior con el agua del cauce, haciéndola girar y formando un remolino de eje horizontal, mientras que la parte superior se encuentra libre. El remolino que se forma permite, por un lado, que el material no se mueva y por el otro la disipación de la energía.



Figura 17 – Caso 3: Funcionamiento del Salto Esquí

Caso 3. Salto esquí ahogado, con remolinos en la parte inferior y superior. En este caso la corriente principal está en contacto por arriba y por abajo con agua muerta, formando con ella los dos remolinos.

Tipos de salto esquí:

- Salto esquí Dentado:

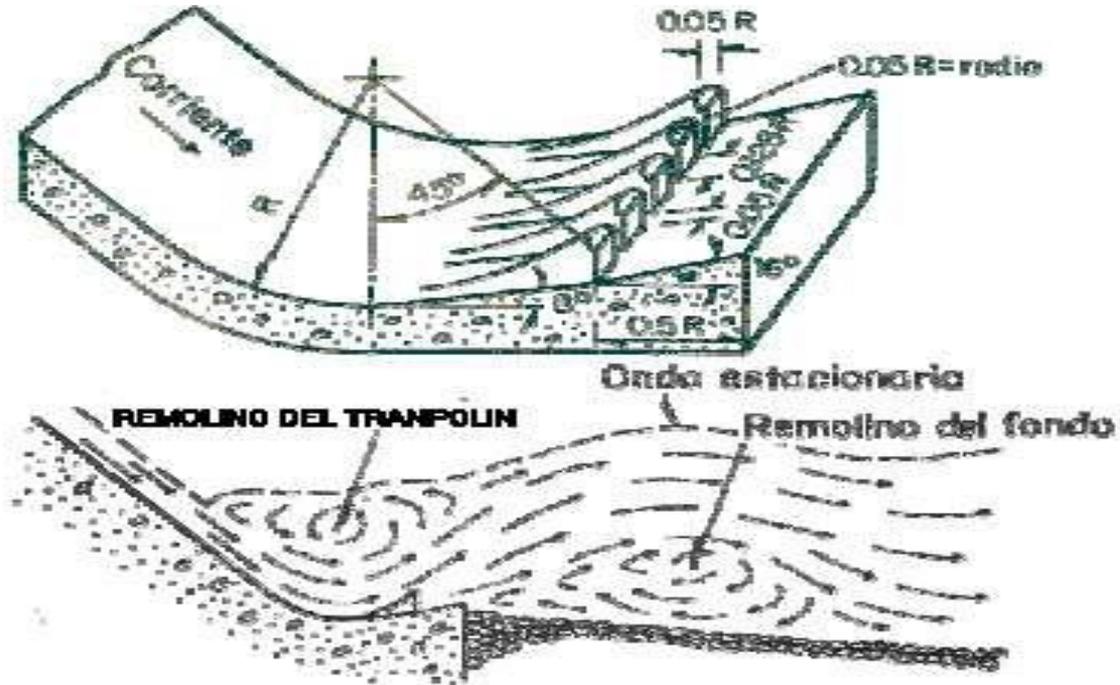


Figura 16 – Salto Esquí Dentado

Su objetivo principal, es evitar la socavación al pie de la estructura, además el material suelto no entrara en la en el salto esquí y (por medio de la colocación de dientes) que no hubiera grandes turbulencias ni ondulaciones en la superficie. En el salto esquí (dentado), el chorro de alta velocidad sale del borde con un ángulo menor que en la cubeta lisa y solamente una parte de él llega a la superficie.

- Salto esquí liso:

Propuesta inicialmente por A.A. Sabaniev (1929) y luego perfeccionada en su cálculo por los profesores I.I. Lievi y M.D. Chertousov

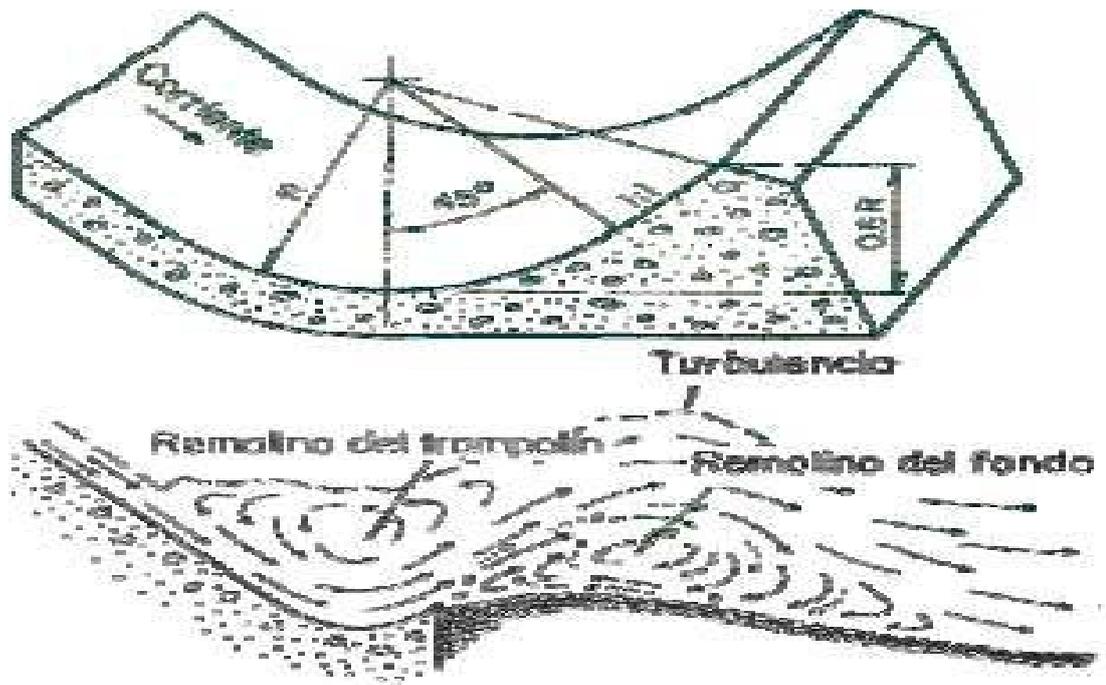


Figura 17 – Salto Esquí Liso

En este caso, la corriente de alta velocidad que sale del borde del extremo del salto esquí se dirige hacia arriba, lo que produce una gran turbulencia en la superficie del agua y un violento remolino en el fondo, que se mueve en el sentido de las agujas del reloj, aguas debajo de la cubeta.

Este remolino del fondo absorbe constantemente, en el borde de la cubeta, material suelto, del cual una parte se mantiene en estado de agitación continua, lo que puede dar lugar a desgaste en la superficie del concreto.

A pesar de que con el funcionamiento del Salto Esquí estriado se obtiene una disipación de energía cinética mucho menor y menores perturbaciones en la superficie, en ella el fluido tiende a desplazarse con tirantes pequeños en la descarga y a producir un chorro ahogado erosivo con tirantes grandes, efectos que no se producen en los Saltos Esquí lisos.

Determinación de la trayectoria

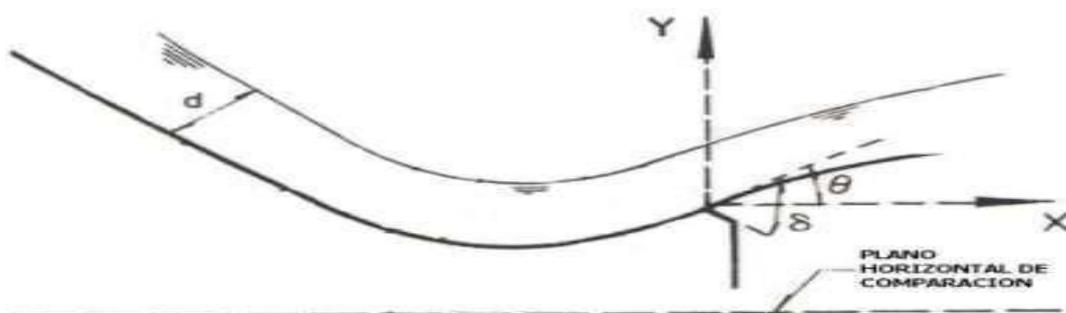


Figura 18 – Trayectoria del chorro en un salto esquí

El agua sale en forma de un chorro libre, que cae al cauce a cierta distancia de la cubeta. La trayectoria de la parte inferior del chorro es función de la energía cinética del flujo y del ángulo

de lanzamiento al salir de la estructura. La longitud de lanzamiento teórica del chorro se determina a partir de la trayectoria parabólica que describe un proyectil con una velocidad inicial V , y forma un ángulo α con la horizontal. La trayectoria del chorro de descarga (UNAM, 2006) se calcula en forma aproximada como

$$y = x * \operatorname{tg} \alpha + \frac{x^2}{3,6 * (d + h_v) * \cos^2 \alpha}$$

Donde:

x e y : coordenadas de un sistema de ejes cartesianos rectangulares con origen en el labio de salida del salto esquí

d : tirante a la salida, en metros

α : ángulo que forma el labio del salto esquí con la horizontal, en grados

h_v : carga de velocidad a la salida del salto esquí, en metros

El valor de 3.6 en la expresión, es una constante que considera la reducción de la velocidad del chorro por la resistencia del aire, turbulencias internas y su propia desintegración. El alcance Horizontal máximo de chorro en la salida se obtiene considerando $[y]$ igual a cero.

2.2) MODELACIÓN HIDRÁULICA

Con frecuencia, el ingeniero debe dar soluciones factibles, en base a ciertos requerimientos, a problemas ingenieriles. Debe decidir a priori el enfoque, técnicas o métodos más convenientes para cada caso en particular.

Algunas veces, estas soluciones pueden ser sencillas, debido a que están bien definidas tanto la parte técnica como la parte económica, por lo que sólo basta aplicarlas.

En otros casos, los problemas son complejos o desconocidos como es el de conocer el comportamiento hidráulico del flujo de agua al pasar por una presa derivadora y al ser captada por una toma. En estos casos, se evaluará que tipo de investigación se va a adoptar. Dicha investigación se iniciará conceptualizando y esquematizando el problema, después se seleccionará la técnica física o matemática para estudiar el problema. A este proceso de abstracción se le conoce como **modelación**.

En definitiva, la modelación implica simular un fenómeno real, conceptualizándolo y simplificándolo en mayor o menor medida, para luego, por último describirlo y cuantificarlo.

La modelación se ha desarrollado notablemente en el campo de la hidráulica, existen evidencias de estudios de diseños hidráulicos realizados desde tiempos antiguos, mediante pequeñas representaciones de estructuras y máquinas, por los cuales se ha llegado a enunciar principios fundamentales en la hidráulica.

El sistema semejante reducido o simplificado es lo que llamamos modelo, frente a la realidad que llamamos prototipo.

Los principios en que se basa este procedimiento incluyen las teorías de similitud hidráulica. El análisis de las relaciones básicas de las diversas cantidades físicas incluidas en el movimiento y la acción dinámica del fluido denominada análisis dimensional.

En la actualidad, se diseñan y construyen pocas o ninguna estructura hidráulica importante, sin estudios preliminares de modelos, más o menos extensos. (Rios Varilla, 2014)

Aplicación y aporte de los modelos hidráulicos

En hidráulica, la modelación se usa para la simulación de situaciones reales que se producen en el prototipo y cuyo comportamiento se desea conocer; puesto que modelo y prototipo están ligados el uno con el otro, las observaciones y estudio del modelo constituyen la información necesaria para comprender la naturaleza del prototipo, debiendo para ello, estar ambos relacionados.

Debido a que las simulaciones se producen bajo condiciones controladas de laboratorio los modelos hidráulicos tienen múltiples aplicaciones.

Tenemos que los modelos hidráulicos, se usan para la solución de problemas relacionados con las estructuras hidráulicas, fenómenos de infiltración o tramos de ríos y recientemente con el transporte de sedimentos.

Es importante destacar que la modelación hidráulica al lograr representar el flujo (tridimensional) de un río o a través de una estructura o suelo con mayor fidelidad y detalle que un simple cálculo teórico, aumenta la confiabilidad de las estructuras proyectadas. Esto significa que los diseños se ajustan más a las solicitaciones reales del flujo, lo cual tiene un importante impacto económico. Por un lado se disminuye el riesgo de diseñar una obra poco resistente que colapse fácilmente con las consecuentes pérdidas económicas o lo que es peor, en vidas humanas; mientras que por otro lado también se reduce la posibilidad de un diseño sobredimensionado que requiera de inversiones innecesarias. *En otras palabras la modelación hidráulica constituye una importante herramienta de optimización para el diseño de obras hidráulicas.*

2.2.1) Modelos físicos

Es la simulación física de un fenómeno hidráulico, que ocurre en relación con una obra de ingeniería, en un sistema semejante simplificado que permite observarlo y controlarlo con facilidad, además confirmar la validez del diseño de la obra, optimizarla o tomar nota de los efectos colaterales, que deberán ser considerados durante la operación de la misma.

Clasificación respecto de la semejanza geométrica con el prototipo:

- Modelos geoméricamente semejantes:
Son aquellos en los que se conserva la semejanza de todas las variables geométricas. Existe un único factor de reducción o amplificación, llamado escala, de todas las magnitudes geométricas y las que se derivan de ellas, además de la igualdad de ángulos correspondientes entre el modelo y el prototipo.
- Modelos geoméricamente distorsionados:
Se conserva la semejanza con el prototipo, pero los factores a usar de reducción o ampliación son distintos para diferentes dimensiones del mismo. Es frecuente que las dimensiones horizontales tengan una escala o factor y las dimensiones verticales, otras. El uso de distorsiones resulta, muchas veces, necesario cuando el factor único produce una reducción demasiado grande en las dimensiones verticales, lo cual originaría efectos significativos en fuerzas que en el modelo son

despreciables o inexistentes en el prototipo. Este tipo de modelos es usual en estructuras marítimas.

Clasificación respecto de la movilidad y deformabilidad del contorno:

- Modelos de contorno fijo:
 Hay casos en que la deformabilidad del contorno no es relevante al fenómeno estricto, por tanto, puede representarse simplificada en el modelo como si fuera fijo o indeformable.
- Modelos de contorno móvil:
 Existen situaciones en que el modelo debe representar el contorno móvil en una forma fiel y confiable, ya que los fenómenos que ocurren, caso del escurrimiento vienen determinado por la movilidad y deformabilidad de la sección.

2.2.2) Modelos matemáticos

Son aquellos en la que se hace uso de las ecuaciones o expresiones matemáticas que definen de una manera simplificada el fenómeno en estudio que ocurre en el prototipo.

Clasificación de modelos matemáticos:

- Modelos determinísticos:
 Los procesos físicos involucrados se expresan a través de relaciones funcionales determinísticas en los que no se considera la probabilidad de ocurrencia del fenómeno.
- Modelos estocásticos:
 Los procesos físicos se representan haciendo uso de variables aleatorias, probabilísticas que involucran el fenómeno en estudio.
- Modelos de simulación numérica:
 Son modelos en los que se emplea, principalmente, ecuaciones diferenciales y condiciones iniciales de borde, que son resueltos utilizando técnicas de análisis numérico, tales como métodos de diferencias finitas y elementos finitos.

Limitaciones Físicas	
Modelos Físicos	Modelos Matemáticos
Tamaño del modelo (en el laboratorio).	Capacidad de almacenamiento en la memoria de la computadora.
Caudal de Bombeo.	Velocidad de cálculo.
Capacidad de Bombeo.	Conjunto incompleto de ecuaciones.
Limitaciones Practicas	
Modelos Físicos	Modelos Matemáticos
Leyes de Similitud	Hipótesis de Turbulencias
Escala mínima del modelo.	Exactitud de Simplificaciones supuestas - Disponibilidad de Coef.
Tamaño del modelo.	Resolución (Espacio-Tiempo).
Método de medida y colección de datos.	Estabilidad numérica, convergencia del calculo numérico.

Tabla 1 – Limitaciones Físicas y Practicas de los Modelos Físicos y Matemáticos

Por lo general, los modelos físicos son deseables para investigar configuraciones locales del flujo; mientras que por lo general, los modelos numéricos son deseables para simular procesos de flujo a gran escala.

Importancia y uso de modelos físicos en una investigación

Los modelos físicos se utilizan normalmente como una herramienta técnica de apoyo al diseño de estructuras hidráulicas y en general a la ingeniería hidráulica, cuando éstos involucran fenómenos complejos o desconocidos para los cuales no hay una teoría y solución aceptadas, como son los fenómenos de turbulencia y la dificultad que imponen los contornos reales tridimensionales caprichosos, tal es el caso de un río.

En estos modelos interesa observar y estudiar los fenómenos, principalmente, en relación con su incidencia en el diseño pudiendo a veces reunir suficiente información como para formular criterios más generales de diseño, que pueden ser aplicables a sistemas similares, sin necesidad de recurrir, luego, a estudios en modelos. Pero es más común que los resultados del estudio en modelos físicos sean empleados en la práctica sólo para el sistema particular modelado.

Es obvio que la investigación en modelo es una fase previa a la construcción del correspondiente prototipo, pues, será mucho más simple y sobretodo económico efectuar el estudio en modelo reducido, para posteriormente hacer la optimización en el prototipo por construir, que en el prototipo ya construido en el campo.

Si bien las capacidades de los modelos matemáticos en la actualidad son muy grandes, estos se basan en la solución numérica de ciertas ecuaciones matemáticas que describen el fenómeno en estudio, y por lo tanto su uso sigue limitado a los casos en los cuales existan dichas relaciones. Es conocido que en la hidráulica no todos los fenómenos pueden ser descritos completamente en forma matemática, especialmente aquellas que involucran la interacción con las partículas sólidas; como por ejemplo la erosión local en una estructura de forma complicada. Para esos casos, la modelación física sigue siendo aún una herramienta poderosa de análisis.

Y en esto radica la importancia de la investigación en modelos físicos, principalmente, en lo concerniente a la hidráulica donde existe un gran avance pero donde el cálculo hidráulico no ha alcanzado la técnica suficiente para sustituirlos, resultando su uso cada vez más frecuentes, tanto en esta área como en múltiples campos de la técnica; y en la tranquilidad para todos los actores de la obra y el poder de convicción del ensayo experimental.

Un modelo hidráulico permite evaluar diversas alternativas de dimensiones y ubicaciones relativas. Cualquier cambio que se efectúe en modelo es rápido y económico respecto al prototipo. Los resultados arrojarían posibles problemas locales, así como alternativas de solución a dichos problemas.

- En la investigación primaria: Se logra obtener una forma geométrica adecuada; se conocen diversas características del flujo como las líneas de corriente, las velocidades, los niveles de turbulencia, etc; se puede establecer la distribución de presiones; se logra definir capacidades de las estructuras de captación o derivación; se puede despejar pérdidas de energía localizadas.
- En el diseño: Se logra obtener el funcionamiento deseado, modificaciones estructurales necesarias; se obtiene reducciones de costo al presentar un diseño óptimo.

Para decidirse por uno u otro tipo de modelo, se deben tener en cuenta los principales factores limitantes: la precisión requerida, la simplicidad, del costo, el tiempo, así como otros factores.

2.2.3) Bases teóricas de modelación física

La similitud junto con el análisis dimensional constituye la base teórica de la modelación física. El análisis dimensional es una técnica que ha probado ser muy útil para reducir al mínimo el número de experimentos requerido. Aunque no produce soluciones analíticas de los problemas, proporciona información acerca de la forma de las relaciones que guardan entre sí las variables pertinentes, y sugiere el modo más efectivo de agrupar estas variables entre sí, dando lugar a las leyes de semejanza.

En relación cercana al análisis dimensional, se encuentra el concepto de similitud que es la condición por la cual las variables características, en el modelo y en el prototipo, guardan perfecta correspondencia; gracias a ellas las observaciones efectuadas en el modelo pueden ser utilizadas para predecir el comportamiento del prototipo y viceversa.

❖ Análisis dimensional

El requisito de la homogeneidad dimensional impone condiciones sobre las cantidades implicadas en un fenómeno físico, y así provee valiosos indicios acerca de las relaciones que conectan entre sí sus magnitudes. La búsqueda correcta de estas relaciones se llama análisis dimensional.

Los resultados obtenidos en el análisis dependen de qué cantidades se consideran al principio que afectan al fenómeno que se está estudiando.

➤ Modelos a semejanza de Froude

El número de Froude representa la razón entre las fuerzas de inercia y las fuerzas gravitatorias, por tanto, para aquellos prototipos en que los fenómenos están, principalmente, determinados por fuerzas gravitacionales se acepta que la condición de semejanza dinámica esté dada para el modelo $F_r = 1$, siendo F_r la relación de los números de Froude entre modelo y prototipo, lo que implica que las demás escalas estarán gobernadas por esta relación. Este tipo de modelación es aplicable a flujos con superficie libre, particularmente, cuando el escurrimiento es bruscamente variado donde los efectos friccionales son despreciables.

El criterio de Froude, también, es válido para fuerzas distintas a las gravitacionales, como por ejemplo, las fuerzas centrífugas, etc.

➤ Modelos a semejanza de Reynolds

El número de Reynolds expresa la razón entre las fuerzas de inercia y las fuerzas de fricción interna, debido a la viscosidad. Existen muchos fenómenos que están determinados, principalmente, por esta razón; tal es el caso del flujo en régimen laminar en presión o superficie libre, el flujo turbulento hidrodinámicamente liso y el flujo viscoso alrededor de un obstáculo sumergido, etc. La condición de semejanza viene expresada por $R_{er} = 1$, siendo R_{er} la relación de los números de Reynolds entre modelo y prototipo.

➤ Modelos a semejanza de Weber

El número de Weber expresa el efecto de la tensión superficial entre líquidos y gases y entre dos líquidos; por ser la fuerza de origen molecular, la fuerza resulta significativa sólo cuando

las dimensiones del flujo son pequeñas: escurrimiento de muy baja altura, napas vertientes de pequeño tamaño y pequeñas ondas superficiales (ondas capilares), donde la condición a satisfacer es $Wer = 1$, donde Wer es la relación de los números de Weber entre modelo y prototipo.

❖ Similitud en modelos físicos

Para asegurar que el modelo represente adecuadamente al prototipo, es necesario que aquel sea mecánicamente similar con éste, es decir, exista similitud geométrica, cinemática y dinámica.

➤ Similitud geométrica

Esta similitud es independiente de la clase de movimiento y contempla sólo similitud en la forma. La propiedad característica de los sistemas geoméricamente similares, ya sea figuras planas, cuerpos sólidos o modelos de flujo, es que la relación de cualquier longitud en el modelo con respecto a la longitud correspondiente en el prototipo, es en todas partes igual. Esta relación se conoce como **factor de escala** y puede expresarse como sigue:

$$L_r = L_M / L_P.$$

Siendo L_M y L_P dimensiones lineales correspondientes en modelo y prototipo, respectivamente y L_r factor de escalas.

La similitud geométrica es quizá el requisito más obvio en un sistema modelo proyectado para corresponder a un sistema prototipo dado. Sin embargo, la similitud geométrica perfecta no siempre es fácil de obtener. No sólo debería ser la forma general del modelo geoméricamente similar a la del prototipo, sino que también deberían ser geoméricamente similares las inevitables rugosidades de la superficie.

➤ Similitud cinemática

La similitud cinemática implica similitud en el movimiento. Esto implica similitud de longitud (esto es similitud geométrica) y en adición similitud de intervalos de tiempo. Entonces, ya que las longitudes correspondientes se encuentran en una relación fija, las velocidades de las partículas correspondientes deben estar en una relación fija de magnitudes de tiempos correspondientes. Si la relación de longitudes correspondiente es L_r y la relación de intervalos de tiempo correspondiente es T_r , entonces las magnitudes de las velocidades correspondientes están en la relación:

$$V_r = L_r / T_r$$

Cuando los movimientos de los fluidos son cinemáticamente similares, los patrones formados por líneas de corriente son geoméricamente similares en los tiempos correspondientes.

➤ Similitud dinámica

La similitud dinámica entre dos sistemas geométrica y cinemáticamente similares, requiere que la razón de todas las fuerzas homólogas (incluyendo la fuerza de inercia) en los dos sistemas sea la misma.

La segunda ley de Newton puede escribirse como sigue:

$$M \cdot a = \sum F$$

$$M \cdot a = F_p + F_g + F_v + F_t + F_e$$

Donde: M.a es la reacción de la masa de las fuerzas actuantes o fuerza de inercia; Fp fuerza de presión; Fg fuerza debida a la acción de la gravedad; Ft fuerza producida por la tensión superficial; Fv fuerza de corte debido a la viscosidad; Fe fuerza producida por compresión elástica del fluido.

Los problemas de obras hidráulicas y de ingeniería fluvial gobernados por flujo libre son dominados por las fuerzas de gravedad. La ley de semejanza en este caso, llamada semejanza de Froude, garantiza que esta fuerza en su proporción con la resultante, se reproduzca correctamente en el modelo.

Sabemos que el número de Froude viene dado por la siguiente relación:

$$F = \frac{V}{\sqrt{g L}}$$

F = numero de Froude

V = velocidad del fluido

g = aceleración de la gravedad

L = longitud caracteristica

La semejanza dinámica está dada cuando $Fr = 1$, es decir, la razón de los números de Froude del prototipo y modelo sea igual a uno

3) CAPITULO3: Materiales y Métodos

El Laboratorio de hidráulica de la UNC, cuenta con modelos físicos 3D entre los cuales se puede mencionar: Presa los Monos (Chubut), Dique derivador los Molinos(Jujuy), Rio Suquia ubicado en la Provincia de Córdoba, entre otros, además cuenta con un canal experimental vidriado de pendiente variable en el cual se construyo una de la estructuras pertenecientes al Dique Los Molinos (Jujuy), por ultimo cuenta una serie de instalaciones complementarias e instrumental de campo y laboratorio de última generación. (Laboratorio de Hidraulica UNC, 2016)

3.1) Instalación experimental

El Laboratorio de Hidráulica cuenta con una superficie cubierta de 850 m² dedicadas a oficinas, biblioteca y área de 500 m² a las actividades de laboratorio como ensayos en modelo físico, ensayos en canal, mediciones hidrodinámicas, tareas de taller, etc.

Sobre dicha superficie están dispuestas, distintas obras y estructuras fijas, estas son:

- Cisterna subterránea,
- Canal experimental (o canal “escuela”) de pendiente variable,
- Canales de aforo,
- Tanque volumétrico para aforo
- Otras.

3.1.1) Canales de aforo

Se utilizan para la medición de los caudales ensayados. Cuentan con vertederos de placa delgada y boca triangular, con ángulo al centro de 90°, ubicado en el extremo aguas abajo del canal. Su colocación se hizo de acuerdo a las normas especificadas por el fabricante, y la curva “Altura limnimétrica vs. Caudal” se calibró de acuerdo a dichas normas. La placa está biselada en su parte superior a los efectos de cumplir con las condiciones de vertedero de pared delgada (**Error! Reference source not found.**).



Lina Domínguez Carlos Facundo
Figura 20 – Canal de Aforo



Figura 19 – Vertedero Triangular del Canal de aforo

3.1.2) Canal experimental de pendiente variable y oleaje



Figura 21 – Canal experimental

Posee una estructura de acero, revestido en paneles de vidrio, con pendiente variable, de 14 metros de longitud y sección transversal de 0.5 m x 0.6 m.

Cambiando la configuración del canal, el mismo tiene la capacidad de usarse para experimentación en el ámbito fluvial, simulando corriente unidireccional como también para generar condiciones de oleaje. En el apartado de equipamiento están expuestas las características del generador de oleaje con el que se cuenta en el LH.

Abajo posee una compuerta de inclinación regulable con la que se puede modificar el tirante y la velocidad del flujo en todo el canal. Posteriormente el flujo es evacuado hacia un canal de restitución paralelo (Canal de Aforo "1"), construido en mampostería, donde se realiza la medición del caudal mediante un vertedero triangular. Éste puede remplazarse por un vertedero rectangular o una canaleta Parshall, ambos disponibles en el Laboratorio.

3.1.3) Equipo de bombeo

Se cuenta con dos bombas sumergibles tipo Flyght, cada una de ellas capaz de desarrollar un caudal máximo de 70 lts/seg. Cada bomba cuenta con una conducción de alimentación y una conducción de retorno a cisterna, ambas de hierro forjado. Sobre tales conducciones se hallan dispuestas válvulas esclusas de operación manual que permiten regular los caudales que viajan hacia el modelo que se quiere ensayar.



Figura 23 – Cañería de alimentación al canal experimental



Figura 22 – Llave de maniobra del canal experimental

3.1.4) Cisterna

La cisterna del LH consiste en un recinto subterráneo de sección rectangular de 1.30 metros de ancho por 0.75 metros de profundidad, y con un desarrollo rectangular en planta de unos 76 metros lineales.

3.1.5) Tanque volumétrico

Se encuentra ubicado por debajo del nivel del suelo, entre la salida de la restitución del canal experimental y el retorno a cisterna. Tiene una sección 1.50 x 1.50 m y una altura total de 3 metros. Es utilizado para el aforo de caudales, cuenta con una regla en toda su longitud para la medición de niveles y con un limnómetro digital con sensor electrónico.

3.1.6) Dispositivos de medición fijos

- Limnómetros: Permiten conocer los diferentes niveles de agua. Existe un limnómetro dispuesto sobre el canal de aforo, tres limnómetros en la zona de los modelos, y tres más en la zona de aguas abajo. Constan de un tubo circular de vidrio interconectado a la zona que se desea medir, sobre el que se dispone el limnómetro que es del tipo cremallera, con precisión de 0.1 mm.

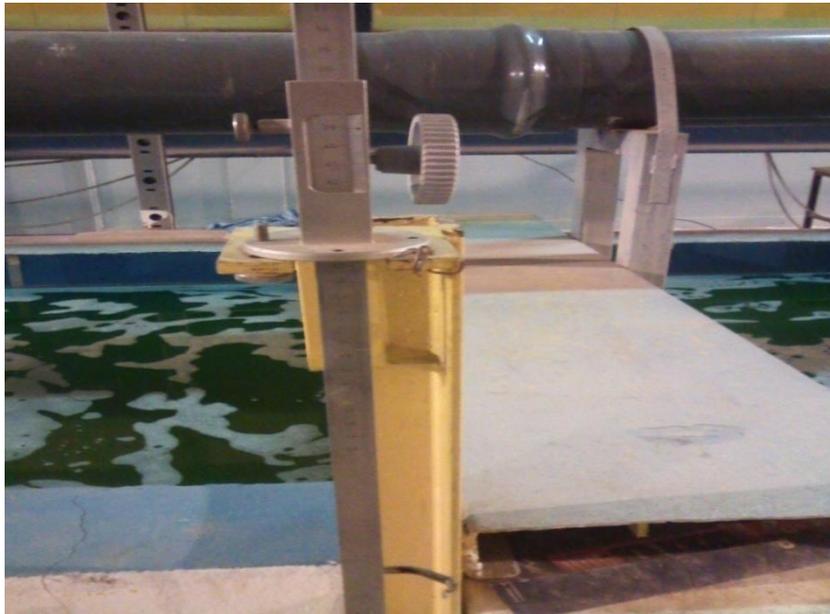


Figura 24 - Limnómetro

- Tableros multipiezométricos (Liras): Corresponden a las distintas partes de un modelo como vertederos, canales de restitución, rápidas, saltos esquí, etc. Permiten conocer las presiones estáticas de agua. Cada toma piezométrica es un pequeño tubo de acrílico interconectado a la zona que se mide, apoyado sobre una escala graduada en milímetros.
- Canaleta de Garganta Cortada: Esta estructura de aforo está conformada por la sección de entrada, la sección de salida, la garganta y una placa de fondo. La sección de entrada está constituida por dos muros verticales convergentes en relación 3:1 (longitudinal:transversal) y la sección de salida la conforman dos muros verticales divergentes en relación 6:1 (longitudinal:transversal). La unión de estas dos secciones forma una contracción en la canaleta denominada garganta. El ancho de esta garganta,

“W”, es de 0.53m y la longitud, “L”, es de 1.20m. La placa del fondo es totalmente horizontal.

3.1.7) Infraestructura Complementaria:

- Cámara de distribución: Es un recinto estanco desde donde se distribuye el agua hacia los diferentes modelos mediante compuertas.
- Canal de ingreso a los modelos: Dispuesto a continuación de la cámara de distribución, rodea la zona de modelos en parte de su perímetro aguas arriba. Tiene una longitud de 9m, un ancho de 60 cm y una altura de 1.50 m.
- Aquietador: Permite el ingreso del agua al modelo con bajas velocidades, para dar así el efecto embalse deseado. De profundidad igual a 50 cm, y ancho de 30 cm.
- Trampa de arena: Antecede el retorno a la cisterna, en el final del modelo. Impide que material del fondo móvil llegue a la cisterna a través de “escalones” de 20 cm de alto en cada potencial vía de retorno (directo a cisterna, o a tanque volumétrico para aforo).
- Conducciones de desagote: Caños de PVC de ½” dispuestos aguas arriba (para desagote del embalse), aguas abajo (para desagote de la zona de fondo móvil), y en zona de trampa de arena. Cada uno con su tapón respectivo. En todos los casos el agua de estas conducciones retorna a cisterna.

3.2) MODELO FISICO 3D LOS MOLINOS

Modelo Físico Los Molinos construido en el predio del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la UNC

El modelo físico tridimensional se construyó siguiendo los lineamientos impuestos por el Criterio de Semejanza de Froude, escala 1:65, con capacidades para llevar a cabo experimentos en una etapa a Fondo Rígido y en otra a Fondo Móvil. Para ello se dispuso de un sector del modelo donde pueda ejecutarse indistintamente: un fondo rígido conformado según la topografía relevada del lugar, o bien un fondo móvil (arena) que permita analizar los procesos erosivos. En la elección de la escala se contempló las variables a estudiar, los efectos de escalas las capacidades del Laboratorio (capacidad de bombeo, espacio disponible, entre otros).



Figura 25 – Modelos Físicos 3D – Izquierda (RIO SUQUIA) – Derecha (DIQUE LOS MOLINOS JUJUY)

Con este modelo físico se pueden analizar efectos tridimensionales que se generan aguas arriba y aguas debajo de las estructuras, su interacción y las fosas de erosión. Los objetivos que se plantearon para este modelo físico fueron los siguientes:

- a) Verificar las capacidades hidráulicas de evacuación de las estructuras.
- b) Verificar las condiciones de disipación de energía, de las estructuras de control dispuestas en los distintos sectores de la obra.
- c) Analizar y cuantificar las erosiones locales.
- d) Verificar y optimizar las consignas de operación de las estructuras de control.

3.3) MODELO FISICO 2D- CANAL EXPERIMENTAL.



Figura 26 – Modelo 2D – Canal Experimental

Canal de vidrio de sección rectangular, de 50 centímetros de base, 85 centímetros de altura y 14 metros de longitud. Tiene una pendiente longitudinal de 1/1000 m/m horizontal. El agua ingresa al canal a través de una rejilla de aberturas de 1 centímetro por 1,5 centímetros, para romper la estructura turbulenta de mayor tamaño. Al final del canal existe una compuerta pivotante regulable que dirige el agua a una pileta de quietamiento, donde se reduce la velocidad del fluido y la vierte a un canal de restitución, el cual lo conduce a la cisterna. Para abastecer el canal existe una bomba tipo flight, sumergible de capacidad máxima de 70 lts./seg., esta conduce el agua a través de un tubo que desemboca en la tolva de ingreso; en ella se disponen ladrillos cerámicos huecos alineados verticalmente con grava de gran tamaño, que actúan como disipadores de energía.

Dentro del canal se encuentra la estructura, la cual consiste en un vertedero de descarga de baja altura y que cuenta con un salto esquí como estructura de disipación, en donde este puede trabajar como vertedero (en caso de estar libre) o como orificio (en caso de tener una compuerta). El material de la compuerta es una chapa zincada anticorrosiva, el material de la estructura terminal es hormigón cubierto con una masilla, este tiene el mismo ancho que el canal y cuenta con un ángulo de 31 grados para despeje del fluido además utiliza unas tomas de aire para insuflar aire de esta manera se garantiza el salto del chorro.



Figura 27 – Modelo 2D – Canal experimental en funcionamiento

3.4) TECNICAS EXPERIMENTALES

3.4.1) PIV

El análisis del campo de velocidad de un fluido en movimiento es de fundamental importancia, uno de los métodos más utilizados para medir campos de velocidad es el conocido como velocimetría por seguimiento de partículas PIV como lo indica su sigla en inglés (particle image velocimetry) el cual es un método efectivo, instantáneo y no intrusivo. (Bardera Mora, 2004)

3.4.1.1) Historia

En 1984 R. J. Adrián iluminó un conjunto de partículas sembradas en un fluido utilizando un abanico de luz, el plano formado por la intersección del abanico de luz y las partículas individuales al ser fotografiado a altas velocidades puede utilizarse para encontrar la dirección y la velocidad de estas partículas, este método tomó el nombre de velocimetría de imagen de partículas (PIV) para distinguirlo de la velocimetría de punto láser (LSV). En la velocimetría de imagen de partículas (PIV) el movimiento del fluido es hecho visible agregando partículas pequeñas para el trazo de líneas, si dos imágenes son obtenidas con un tiempo de separación entre ellas es posible deducir su velocidad en el campo de flujo. La base inicial para una teoría de PIV fue realizada por Adrián en 1988, en donde describe el valor esperado de la función de auto-correlación para una imagen PIV continua de doble-exposición. Esta descripción proporcionó el marco para las reglas experimentales del diseño. Más adelante, la teoría fue generalizada para incluir múltiples exposiciones y análisis de la correlación cruzada. La teoría proporcionó una descripción adecuada para el análisis de las imágenes altamente resueltas de PIV, que era el modo de operación común para un tiempo pequeño de exposición de las imágenes. Sin embargo el PIV es utilizado hoy en día con cámaras digitales para la grabación directa de las imágenes de las partículas. La teoría fue ampliada más a fondo por Westerweel para incluir imágenes digitales de PIV y la valoración de la dislocación en el nivel de sub-píxel.

El término velocimetría de partículas basado en imágenes digitales (PIV) fue adquirido por la división de mecánica de fluidos del Instituto Tecnológico de Lund en 1998. Las modificaciones al software incluyen la mayoría de las últimas técnicas descritas en la literatura reciente como por ejemplo el artículo de Westerweel y Raffel (1996).

En este trabajo se abordan los aspectos fundamentales del diseño, construcción y análisis de un sistema de PIV con el objeto de determinar el campo de velocidad del fluido en estudio.

3.4.1.2) Descripción de la técnica.

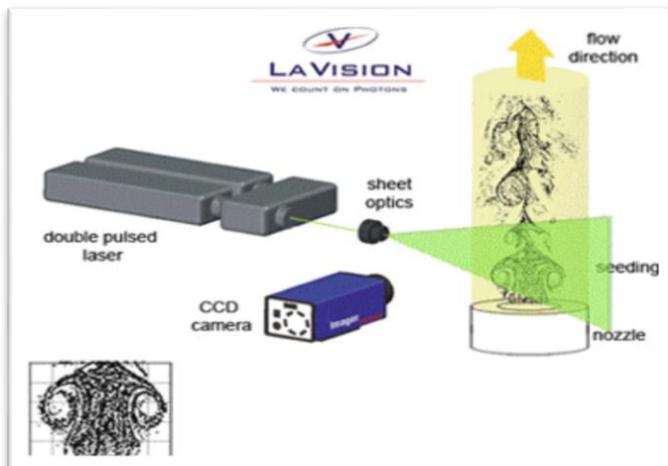
La técnica se llama velocimetría de partículas, o su sigla en inglés PIV (particle image velocimetry). (DANTEC DYNAMICS, 2015)

Este método se basa en iluminar el plano que se desea medir con un haz láser utilizando una lente cóncava y otra cilíndrica para formar así un abanico de luz e introducir en el campo partículas de igual densidad que el fluido para que la luz se refleje sobre ellas e incida sobre la cámara CCD formando una imagen. Se toman dos fotografías separadas entre sí por un tiempo conocido y se analizan estas imágenes utilizando el método de correlación cruzada (hay otros métodos tales como franjas de Young, auto correlación).



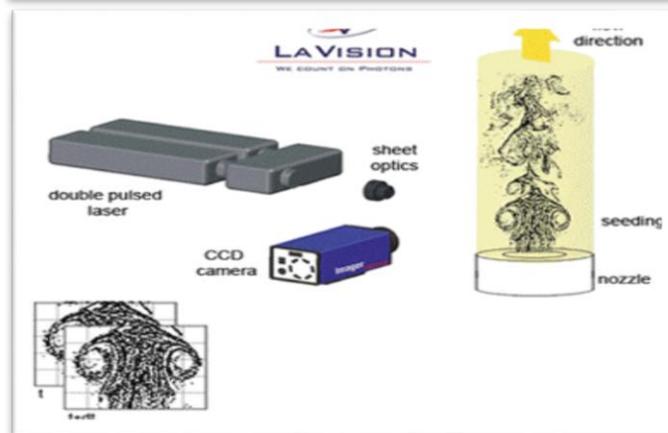
En la imagen se observa:

- La cámara CCD
- El Laser
- El flujo corriendo en una dirección determinada

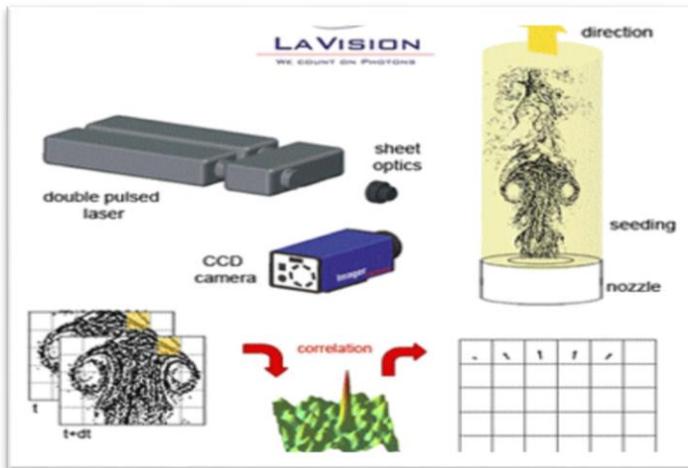


El laser funciona con dos pulsos de luz, de esta manera obtiene el par de imágenes:

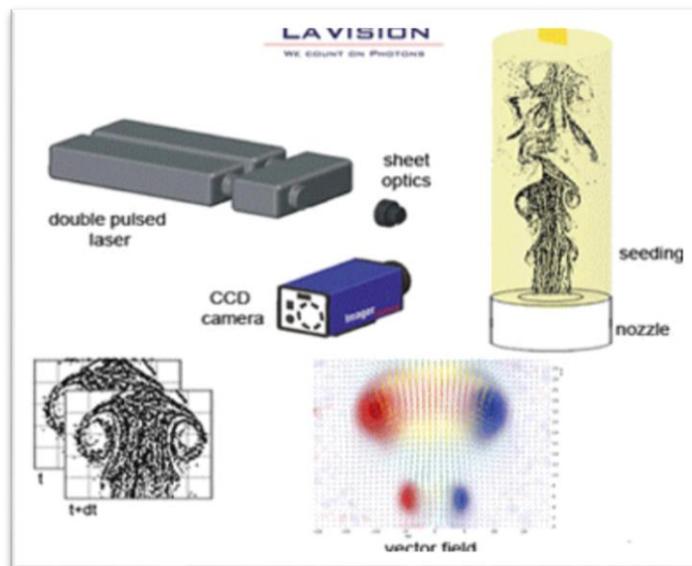
Se puede observar cómo se ilumina cierta porción del fluido en estudio y de esta manera se obtiene en un tiempo t la primera imagen.



Se vuelve a iluminar en un tiempo $t+\Delta t$ la misma porción del fluido, para de esta manera obtener la segunda imagen.



Luego de obtenidas ambas imágenes comienza su análisis, en el cual se compara Áreas de interrogación semejantes de las dos imágenes y a través del método de correlación cruzada se encuentra el pico obteniendo de esta manera magnitud y dirección del vector de velocidad



Como resultado final se obtiene el campo de velocidades del fluido en estudio, tal como se observa en la imagen.

3.4.1.3) Principios de funcionamiento

La técnica PIV, se basa en la siguiente ecuación: (Bardera Mora, 2004)

$$V = \frac{\text{Distancia}}{\text{Tiempo}}$$

El campo de la dislocación determina el movimiento de las partículas entre las dos imágenes, y dividiendo entre el tiempo se obtiene el campo de la velocidad. Un tamaño típico de estas áreas de interrogación es de 32 x 32 píxeles. Para las imágenes expuestas, la dislocación es determinada en nuestro caso por la correlación cruzada de las áreas de interrogación correspondientes a las primeras y segundas imágenes. La localización del pico más **alto** de la correlación del plano corresponde a la dislocación más probable de la partícula en el área de interrogación. La velocidad del Sub-píxel de dislocación es obtenida usando una función gaussiana al pico de la correlación, y encontrando la localización máxima exacta.

3.4.1.4) Características del equipo utilizado

Dentro de las características técnicas, el equipo se compone de:

3.4.1.4.1) Cámara digital



Figura 28 – CAMARA CCD

Una cámara digital con resolución de 1600 x 1200 píxeles y con una frecuencia de adquisición de las imágenes de hasta 30 imágenes por segundo. Sin embargo se pueden obtener frecuencias mayores si se reduce la resolución.

3.4.1.4.2) Laser

Otra de los componentes fundamentales del equipo PIV es el laser, el cual en este caso es del tipo Nd:Yag con una potencia de 50 mJ y una longitud de onda de 532nm.



Figura 29 – Laser FlowSense Solo

3.4.1.4.3) Software para la Adquisición de imágenes

La adquisición de las imágenes y el análisis posterior de las mismas se realiza mediante programa FlowManager 3.5 provisto por la firma DANTEC. (Su uso no es libre, y se necesita de una llave o código que identifique al usuario que lo utiliza.) (DANTEC DYNAMICS, 2015)

3.4.1.4.4) Software para el análisis de imágenes

PIVlab es un SOFTWARE que no sólo permite calcular la distribución de velocidad dentro de pares de imágenes, también se puede utilizar para visualización y exportación de varios parámetros del modelo de flujo. Este posee una interfaz gráfica de usuario muy fácil de usar (GUI) para el análisis PIV y datos post- procesamiento de una manera rápida y eficiente.

Este es una aplicación del programa Matlab, el cual permite la descarga gratuita. Para descargar dirigirse a la siguiente página de internet: (MathWorks, 2016)

http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/27659-pivlab-time-resolved-particle-image-velocimetry--piv--tool?s_tid=srchtitle

3.4.1.5) Aplicaciones en el Laboratorio de Hidráulica

El sistema PIV perteneciente a la UNC es un sistema 2D (bidimensional) de la firma DANTEC (Dinamarca). Este sistema, único en el país, fue adquirido en el marco del Programa de Modernización de Equipamientos (**PME-025**).



Figura 30 – Equipo Completo PIV

El instrumento es utilizado para el apoyo en la docencia durante actividades de cursos de grado y posgrado y de extensión como por ejemplo el taller sobre Velocímetros por Imágenes de Partículas. El sistema PIV es primordial para el desarrollo de trabajos de investigación, tesis y proyectos que se están desarrollando actualmente en el LH.

3.4.2) ADV

La caracterización de flujos turbulentos requiere mediciones de velocidad con altas resoluciones temporales y espaciales. Esta información es generalmente utilizada en estudios y proyectos en Recursos Hídricos relacionados con la determinación del campo de velocidades de flujo medio; del coeficiente de la transferencia de masa entre el líquido y las partículas suspendidas (sedimento, burbujas); índices de la aglomeración de sólidos suspendidos; cálculo de los índices de transferencia de masa entre los líquidos y las paredes (procesos erosivos); etc. Técnicas de mediciones basadas en el principio Láser Doppler y en imágenes de partículas se convirtieron en las técnicas más usadas para caracterizar flujos turbulentos en laboratorio. Sin embargo, la aplicabilidad de estas técnicas, disminuye a medida que se incrementa la escala de las instalaciones experimentales o en estudios donde se prevé la presencia de sedimentos en suspensión. En estos casos, el uso de velocímetros acústicos Doppler (conocidos como ADV por sus siglas en inglés) constituyen la técnica de elección por su robustez, calibración de fábrica invariante, bajo costo relativo y aceptables resoluciones temporales y espaciales obtenidas con estos instrumentos. (Laboratorio de Hidraulica UNC, 2016)

3.4.2.1) Instrumentos:

El Velocímetro Acústico Doppler (más conocido como ADV por sus siglas en inglés) es un instrumento versátil de alta precisión utilizado para medir las tres componentes del vector de velocidad del agua, en una variedad de condiciones de flujo, como ser instalaciones de laboratorios, ríos, estuarios, y océanos. El instrumento ADV utiliza la tecnología Doppler para medir velocidades de flujos en un pequeño volumen de medición localizado entre 5 y 10 cm. del instrumento. El rango de velocidad que el instrumento es capaz de monitorear es

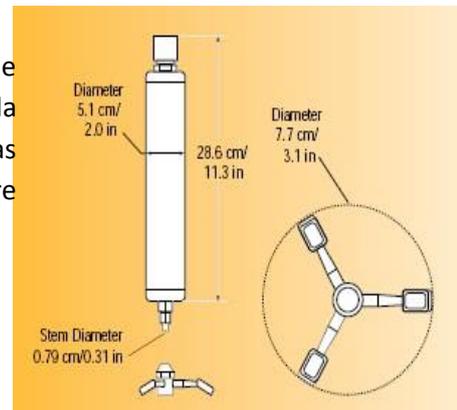
programable por el usuario, y va desde ± 3 a ± 250 cm/s. Los datos pueden ser adquiridos con frecuencias de muestreo de hasta 50 Hz.

3.4.2.2) COMPONENTES DEL INSTRUMENTO

El ADV consiste en tres elementos básicos:

3.4.2.2.1) La sonda:

En un velocímetro acústico está formada por un emisor de la señal acústica que se encuentra situado al centro de la misma, y tres receptores para la señal reflejada, cuyas extremidades vistas en planta están desplazadas 120° entre sí y forman un círculo de 7,7 cm de diámetro.



Volumen de medición

La localización precisa del volumen de medición queda determinada por la geometría de la sonda, y normalmente esta distancia está aproximadamente entre 5 cm. y 10 cm. desde el extremo de la misma dependiendo del modelo de ADV seleccionado.

La localización del volumen de muestreo está a 5 cm. de la extremidad de dicha punta. El tamaño del volumen de muestreo de ADV es determinado por la configuración del muestreo usada. El volumen de muestreo estándar es un cilindro de agua con un diámetro de 4.5 milímetros y una altura de 5.6 milímetros.

Figura 31 – Sonda de ADV

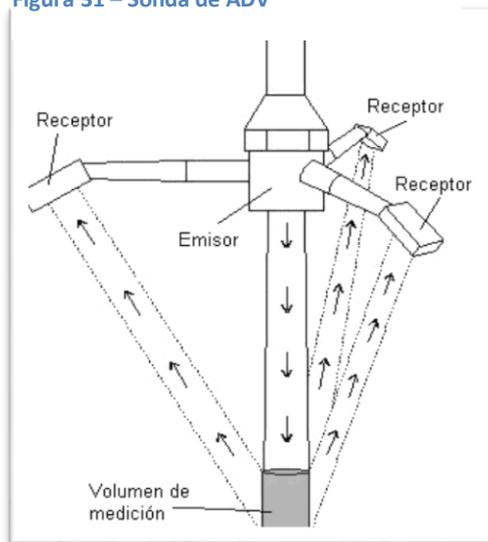


Figura 32 – Volumen de medición de ADV

Montaje

La sonda acústica puede ir montada sobre un vástago rígido, de 25 o 40 cm. de largo, o sobre un cable flexible de 100 cm. El vástago de 40 cm. es común para aplicaciones en laboratorio pues la mayoría de las mediciones se pueden hacer con el módulo de condicionamiento fuera del agua (aunque es totalmente sumergible). Para aplicaciones en campo, el vástago de 25 cm. nos proporciona una instalación más rígida. El montaje del cable de 100 cm. nos brinda gran flexibilidad para la instalación de la punta de prueba, pero es necesario asegurar la orientación confiable del sensor.

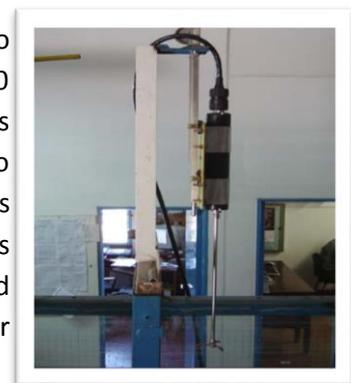


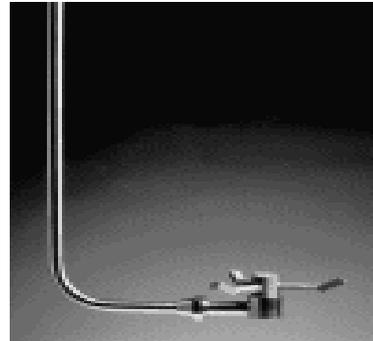
Figura 33 – Montaje de ADV

Orientación

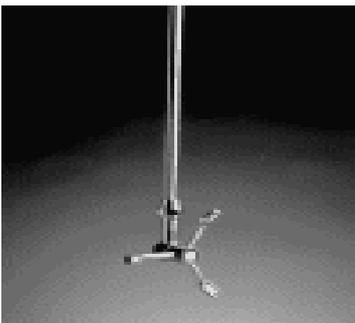
Las puntas de prueba se pueden colocar utilizando cualquiera de las siguientes combinaciones:



Orientación hacia abajo 3D



Orientación hacia arriba 3D



Orientación hacia el costado 3D



Orientación hacia el costado 2D

La orientación de la sonda mirando hacia abajo (estándar para todos los sistemas) es ideal para mediciones cerca del fondo. La posición del sensor mirando al costado se emplea para evitar interferencias del flujo. Y si lo que nos interesa es medir la velocidad en la superficie, o debajo estructuras, se prefiere orientar la sonda mirando hacia arriba.

3.4.2.2.2) MÓDULO DE ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL

El módulo de acondicionamiento de señal del ADV estándar es una cubierta cilíndrica del acetilo (Delrin). El cable que va hacia el procesador va unido con un conector subacuático. El sensor va montado permanentemente al frente de la cubierta.

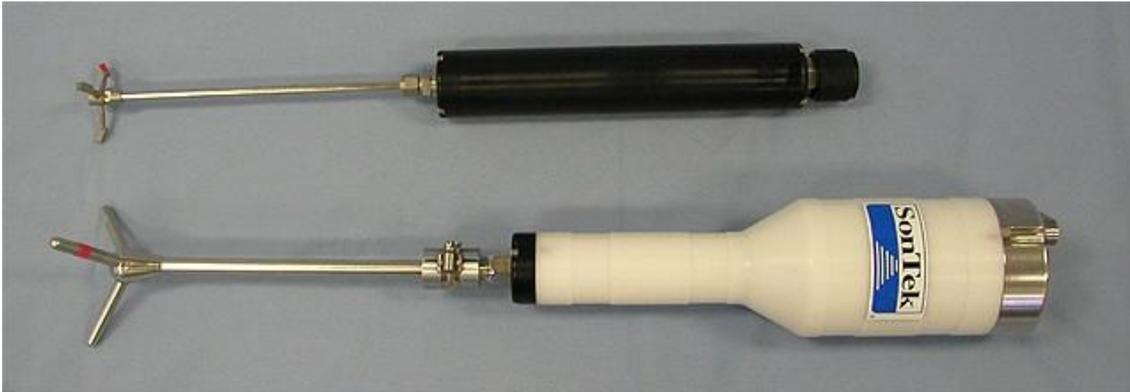


Figura 34 – Modulo de acondicionamiento estándar (ARRIBA), Modulo de acondicionamiento con sensores (ABAJO)

3.4.2.2.3) MÓDULO DE PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL

El módulo de procesamiento de la señal registrada por el ADV puede tener distintas configuraciones, dependiendo de cómo el sistema será utilizado y si el módulo necesitará o no estar sumergido.

Los velocímetros utilizados para mediciones de campo (ADV Field para SonTek y NDV Field para Nortek) funcionan con corriente continua y va conectado a una computadora con un potente software de adquisición de datos de SonTek.

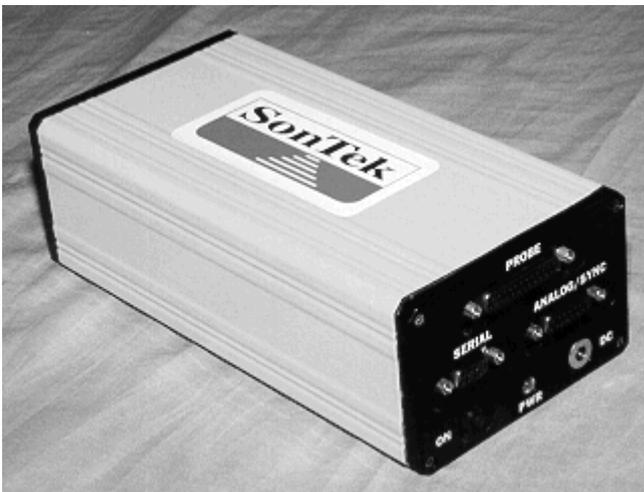


Figura 35 – Modulo de procesamiento de la señal ADV

Para los usos donde el procesador del ADV no necesita ser sumergido, el procesador se incluye en una cubierta con los conectores para la sonda, energía, comunicación, y entrada/salida auxiliar. La cubierta puede incluir una batería recargable interna (capacidad para 6-10 horas de operación)

3.4.2.3) PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El Velocímetro Acústico Doppler es un instrumento que permite medir con alta resolución la velocidad del flujo en 3D. Las técnicas de acondicionamiento de la señal implementadas en el ADV presentan ventajas importantes, como por ejemplo: mediciones de las componentes del vector velocidad en un volumen de medición alejado; calibración de fábrica invariante (no requiere recalibración periódica en campo o laboratorio); operación simple; y funcionamiento excelente para condiciones de de flujo bajo.

EFECTO DOPPLER

Un Velocímetro Acústico Doppler (ADV) mide velocidades tridimensionales del flujo, utilizando el principio de corrimiento de frecuencia de Doppler. Si una fuente de sonido se está moviendo con respecto al receptor, la frecuencia del sonido en el receptor cambia con respecto a la frecuencia del emisor. La ecuación que relaciona este corrimiento de frecuencia y la velocidad es incluida a continuación:

$$F_{doppler} = -2 * F_{fuente} * V / C$$

Donde $F_{Doppler}$: frecuencia registrada en el receptor
 F_{Fuente} : frecuencia transmitida por el emisor
 V : velocidad relativa entre el emisor y el receptor
 C : velocidad del sonido

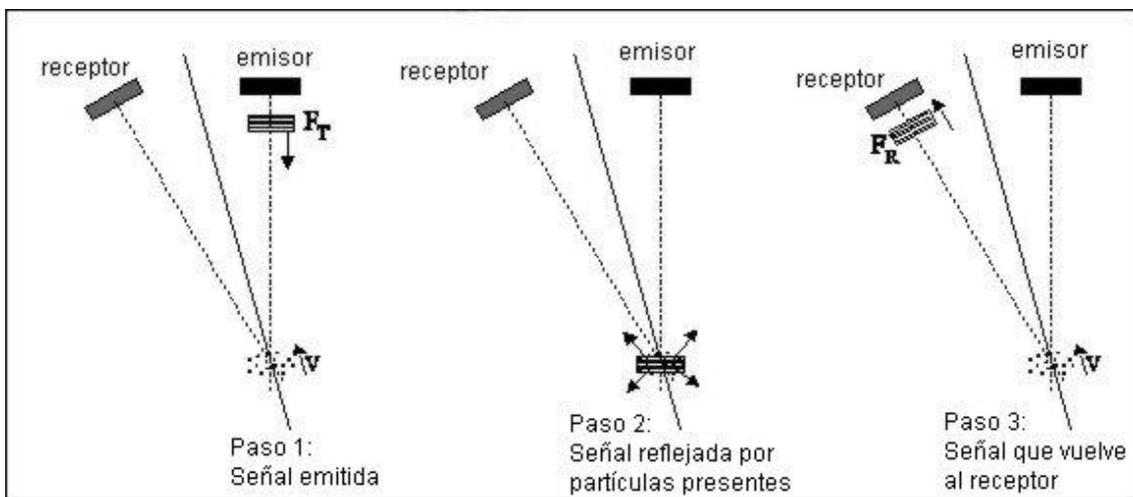


Figura 36 – Principio de corrimiento de frecuencia de Doppler

El emisor de sonido genera una señal acústica en una frecuencia conocida que se propaga a través del agua a lo largo de su eje, y es reflejada por partículas presentes en el agua (sedimento, organismos pequeños, burbujas), que se asume se desplazan a la velocidad del agua y deben tener inercia muy pequeña. Una cierta porción de la energía reflejada vuelve a lo largo de los ejes de los receptores, la señal es registrada y procesada por los distintos componentes del ADV para determinar el cambio de frecuencia debido al efecto Doppler.

Cada par emisor/receptor define la proyección de la velocidad del agua sobre su eje biestático (ver figura). Los receptores están alineados de modo tal que se interceptan formando un volumen de muestreo común. La velocidad medida por cada receptor se refiere como la velocidad biestática, y es la proyección del vector de la velocidad sobre el eje biestático. Las velocidades de son convertidas por el módulo de procesamiento en componentes de velocidades referidas a los ejes cartesianos XYZ utilizando la geometría de la sonda. Las velocidades de XYZ están referidas de acuerdo a la orientación de la sonda del ADV. Ya que no siempre es posible controlar la orientación del instrumento, el ADV se puede equipar de un compás y de un sensor de la inclinación interno. En los casos que no se cuente con dichos accesorios, es necesario realizar una perfecta alineación y verticalización del instrumento.

4) CAPITULO4: COMPARACIÓN Y VALIDACIÓN DE TÉCNICAS EXPERIMENTALES DE MEDICIÓN DE VELOCIDADES.

La comparación de las técnicas para medir velocidades de flujo PIV y ADV, se realizó en una zona de medición aguas arriba de la estructura y en ella se aplicaron ambas técnicas. Los resultados obtenidos se discuten en los siguientes puntos.

Se eligió una zona de medición aguas arriba de la estructura próxima a la cresta del vertedero en el cual se aplicó la técnica PIV, posteriormente se midió en nueve puntos con ADV (Figura 39) (USBR, 2013), esto se realizó con el objetivo de analizar cada técnica y realizar una comparación entre ellas.

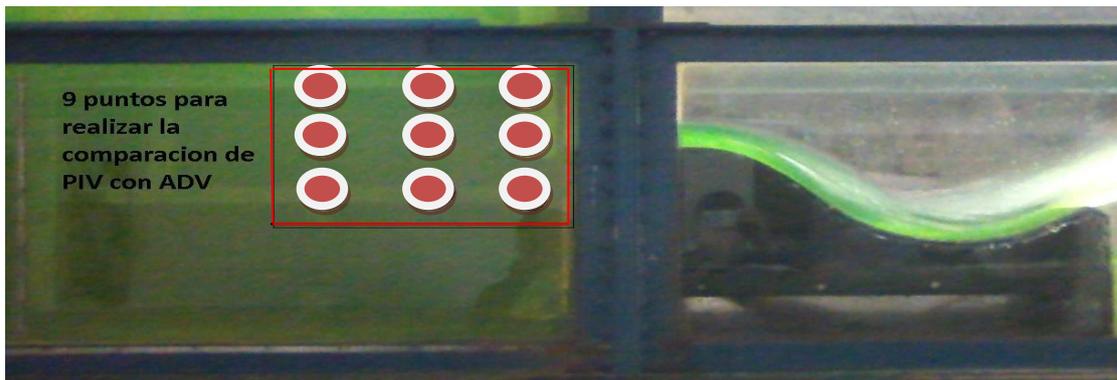


Figura 37 – Zona de medición para realizar la técnica PIV y 9 puntos para realizar la técnica ADV

La metodología que se realizó en cada técnica y su comparación se discuten en los siguientes puntos.

4.1) PIV - Metodología experimental.

Para realizar la medición con la técnica PIV, se deben seguir los siguientes pasos:

Antes de realizar las mediciones se prenden las bombas que alimentan el canal y se ajustan los caudales con las válvulas exclusas y el retorno a la cisterna midiendo los mismos en el canal de aforo verificando que el sistema entre en régimen.

Posteriormente:

- Se localiza la zona de medición.
- Se colocan todos los dispositivos para realizar la medición (Trípode, CAMARA CCD, Laser, Reglas, Plomadas, etc.).

Una vez que se siguieron estos pasos comienzan las mediciones propiamente dichas, para lo cual se configura en el programa FlowManager 3.5 la frecuencia y la cantidad de imágenes que se quieren obtener. (DANTEC DYNAMICS, 2015). Se obtuvieron así 150 pares de imágenes en la cual previamente se configuró que el tiempo entre dos imágenes sucesivas es de 10 milisegundos, con una frecuencia de 8Hz (La cantidad de imágenes se elige en función de ciertas variables, tales como, Precisión, Memoria RAM de la computadora, tiempo que se desea medir, etc.).

Dado que el laser trabaja como un abanico iluminando la parte inferior del canal de vidrio, el mismo no alcanza para iluminar toda la zona de medición, por lo que se decidió, tomar dos zonas una llamada Z1 que comprende los puntos 1,2,3,4,5,6 y otra llamada Z2 que comprende los puntos 4,5,6,7,8,9. Se definirá una zona ZS (zona de superposición) en la cual se da la superposición de los puntos 4, 5, 6 entre las dos zonas de medición Z1 y Z2. (Figura 38)

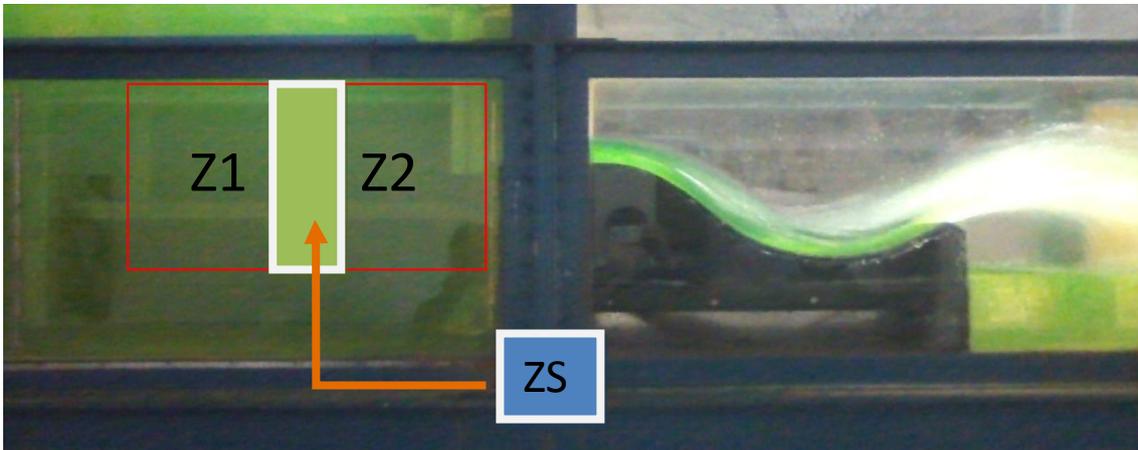


Figura 38 – Zona Z1 y Zona Z2 para realizar la medición de velocidades a partir de la técnica PIV

Luego se dirige a gabinete donde se procede al análisis de las imágenes, luego de tal análisis se obtiene como resultado una imagen en la que se observa los vectores de velocidad (Figura 39) y en la que se puede incluir líneas de corriente (Figura 40).

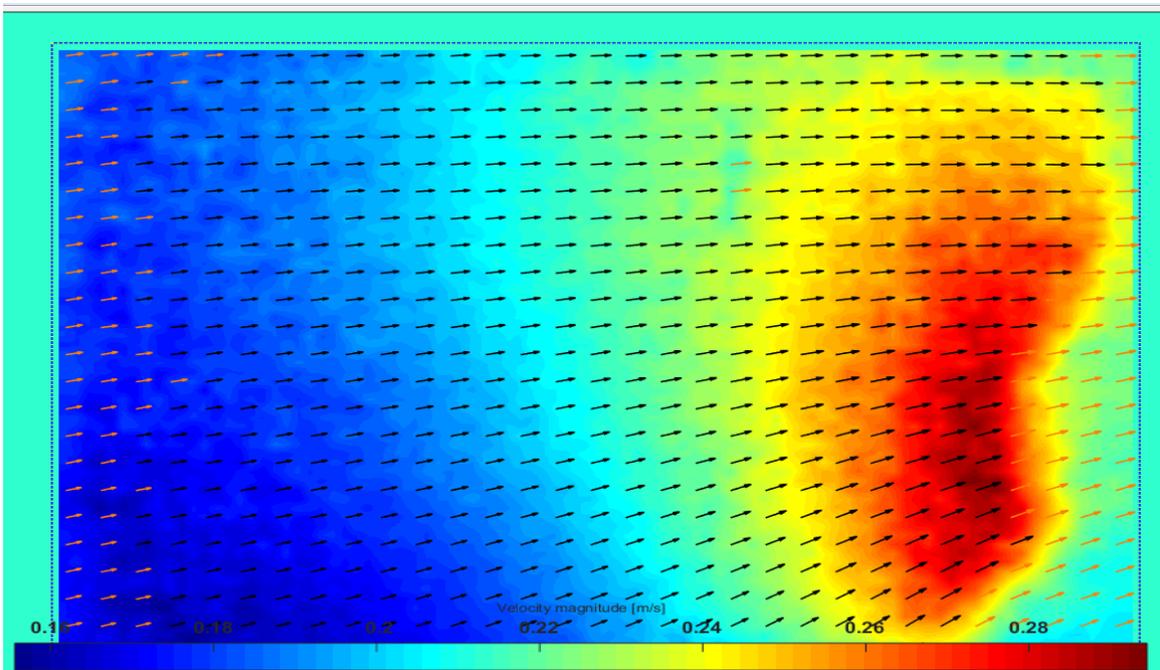


Figura 39 – Campo de vectores de velocidad en conjunto con mapa de colores de referencia

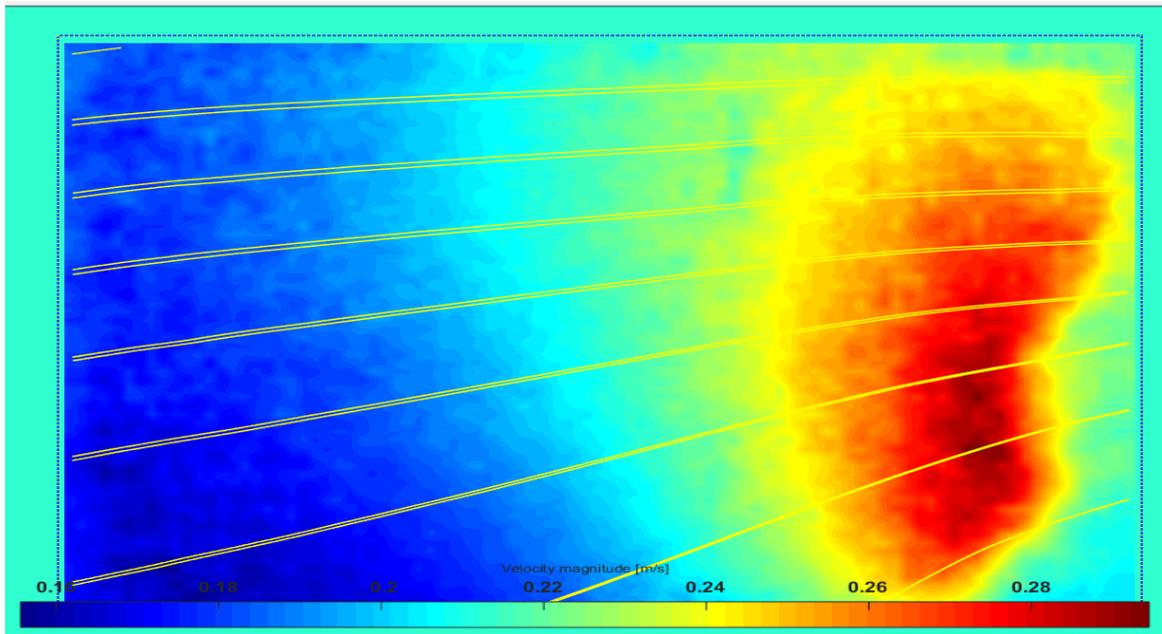


Figura 40 – Líneas de corriente resultantes del campo de velocidades.

4.2) ADV – Metodología Experimental.

Para realizar las mediciones con la técnica ADV (MathWorks, 2016) , se sigue la siguiente metodología:

- Se coloca el ADV sobre el canal experimental de vidrio.
- Se localiza el ADV en la zona de medición.
- Se coloca el sensor en la posición que corresponde.

Con el instrumento ubicado en posición comienzan las mediciones, para ello lo que se realizo fue el posicionamiento del instrumento en 9 puntos distintos (tener en cuenta que esto se realizo en el mismo plano que la medición con PIV para de esta manera poder compararlos) estos puntos se localizan cada 4cm en vertical y 6cm en horizontal. (Figura 41)

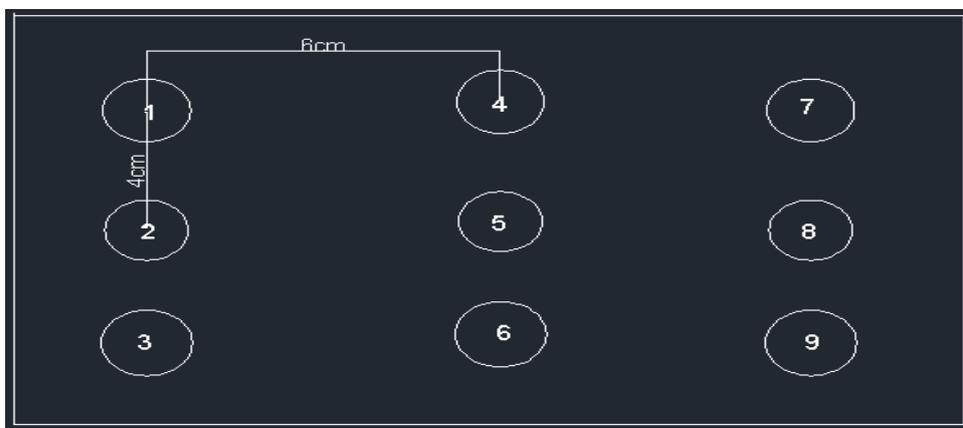


Figura 41 – 9 puntos para realizar la técnica ADV

Finalmente con el programa WINADV (USBR, 2013), se realizó el procesamiento de los datos anteriormente medidos. Las mediciones se realizaron con una frecuencia de adquisición de datos de 50Hz y un tiempo de medición de 120segundos.

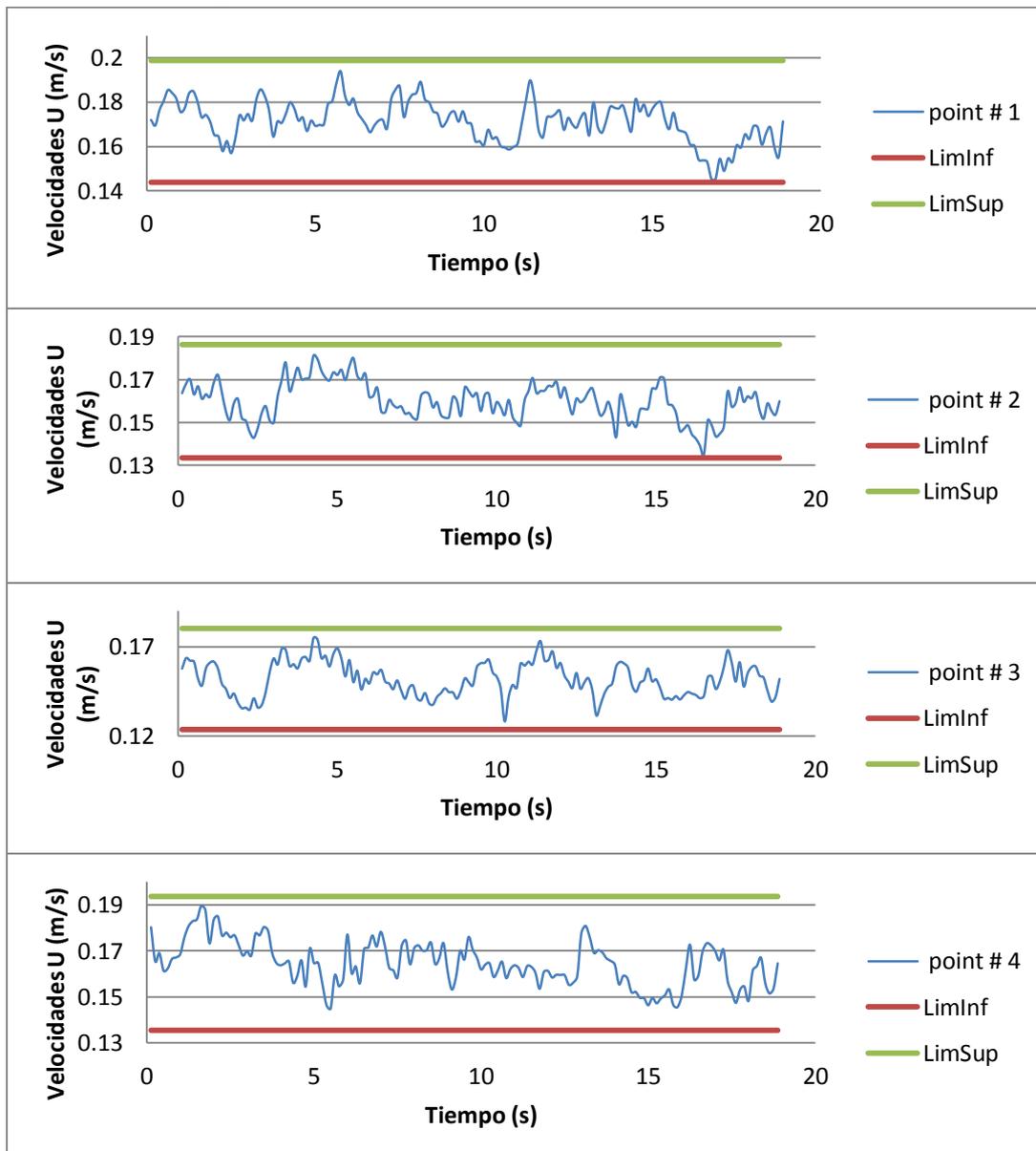
4.3) Resultados - PIV

Finalmente, de la medición con PIV, se extraen la componente de velocidad U (horizontal), V (vertical), en el plano de medición.

Dichos resultados se presentan en los siguientes gráficos, donde por cada punto se representa la variación los valores de velocidad instantáneos en el tiempo y además su intervalo de confianza limitado por un Límite Inferior = LimInf y Limite Superior = LimSup. (Los intervalos de confianza se calcularon con $\pm 3 \cdot \text{Desvíos}$).

Por cada punto tendremos una Velocidad U, Velocidad V, Velocidad Vtotal.

4.3.1.1) Velocidad U



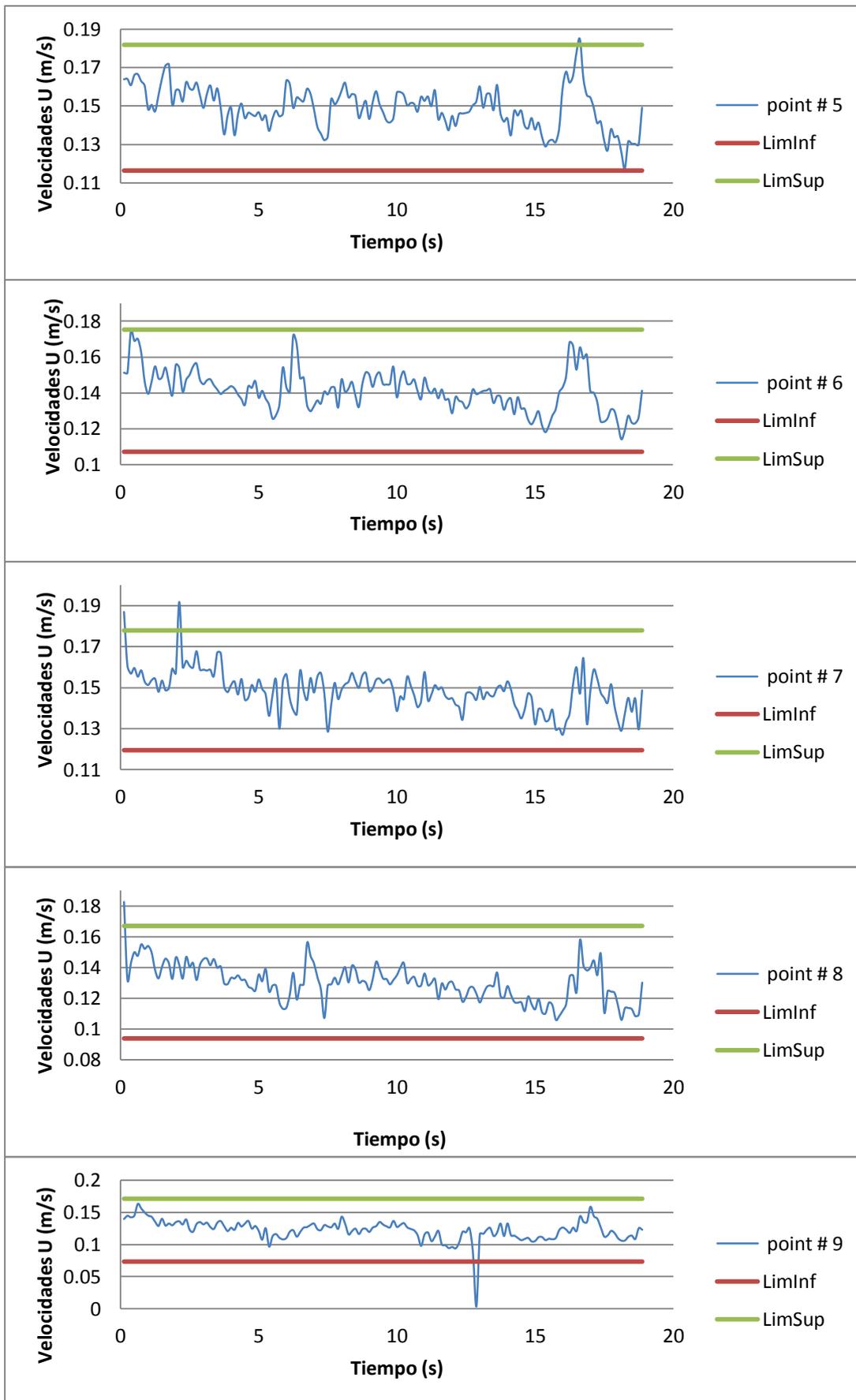


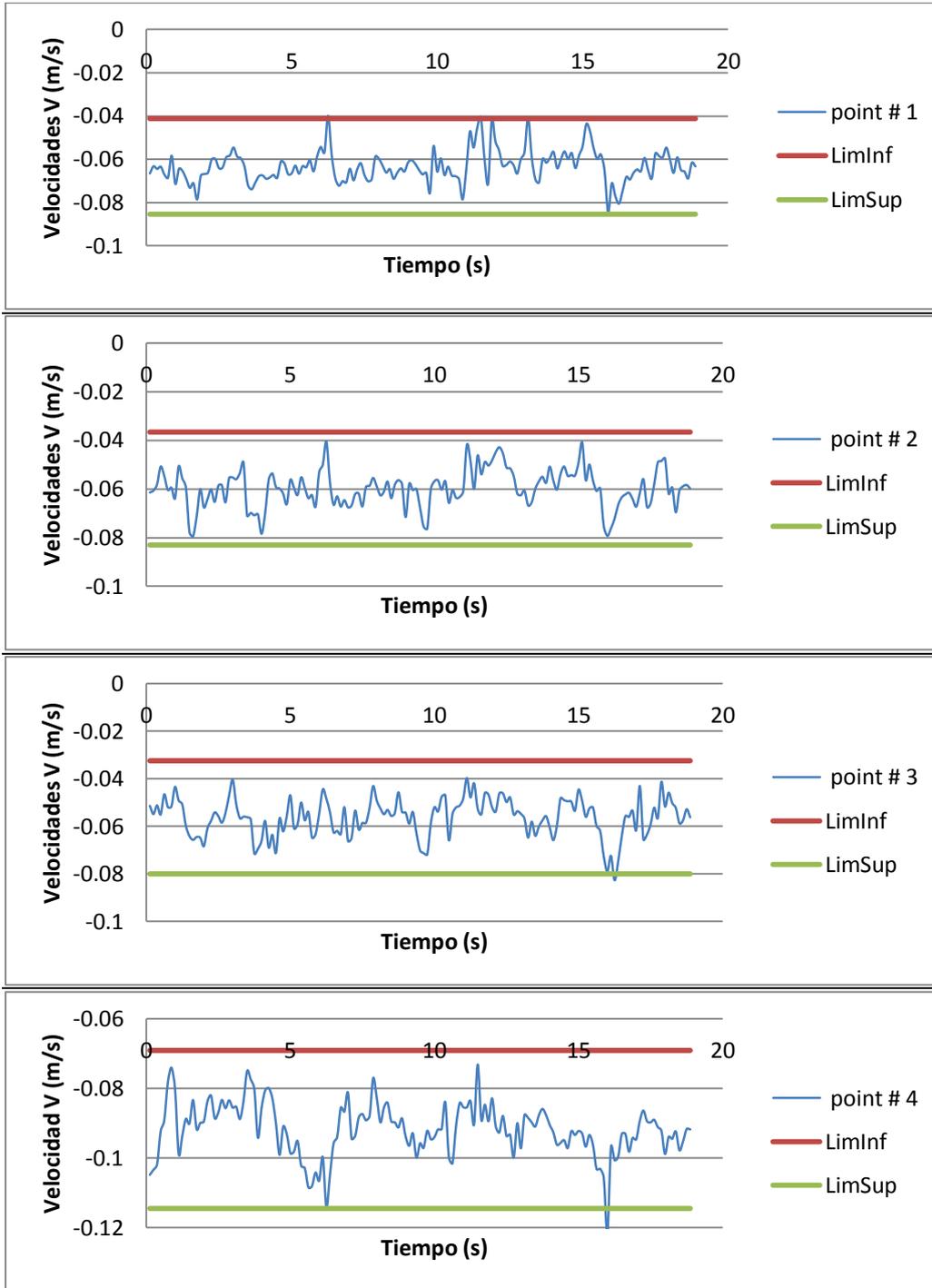
Figura 42 – Velocidad U (m/s) vs Tiempo (s), en cada punto de medición con la técnica PIV

Los resultados de los valores medios de velocidad U, se presentan en la siguiente Tabla resumen:

PIV	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
$U_{media}(m/s)$	0,171	0,160	0,152	0,165	0,149	0,141	0,149	0,130	0,122

Tabla 2 – Velocidad Umedia en cada punto

4.3.1.2) Velocidad V



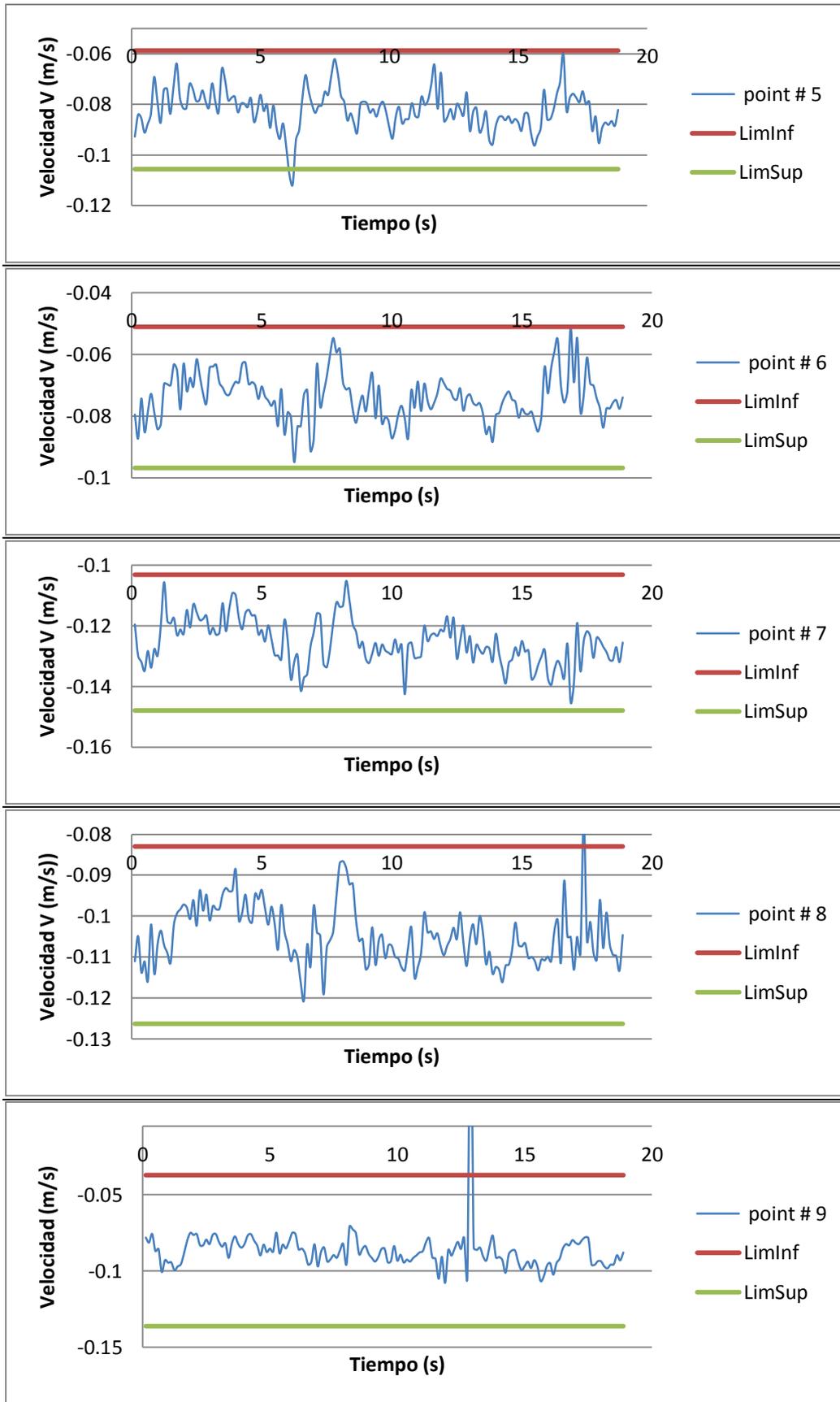


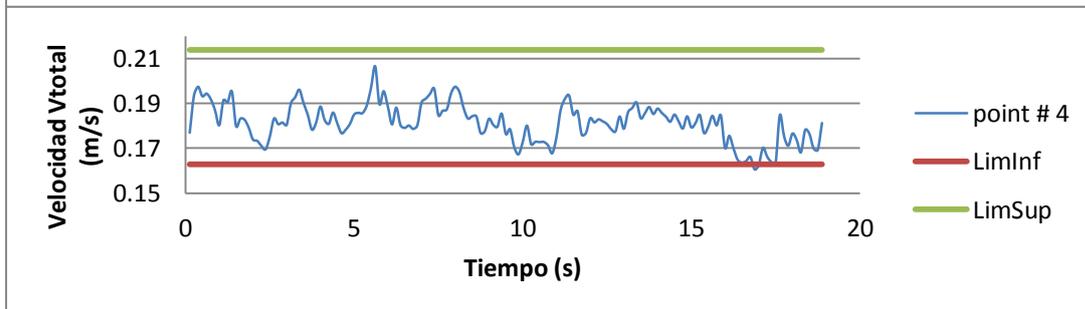
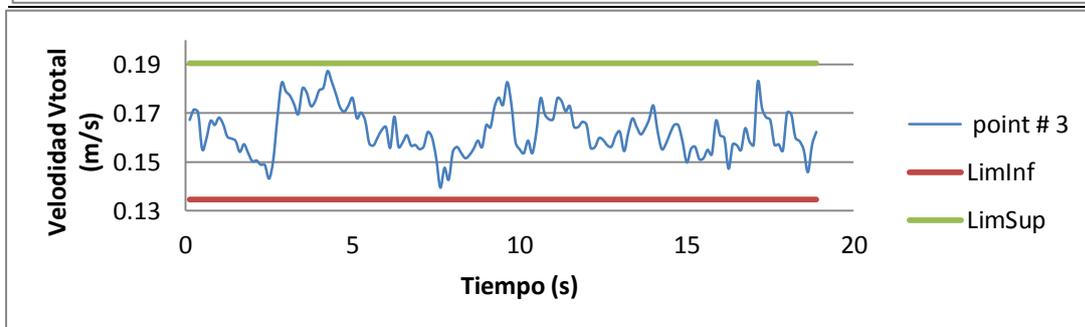
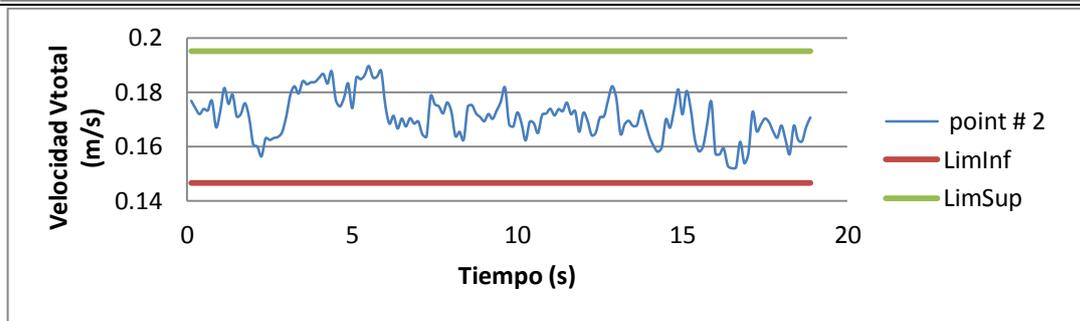
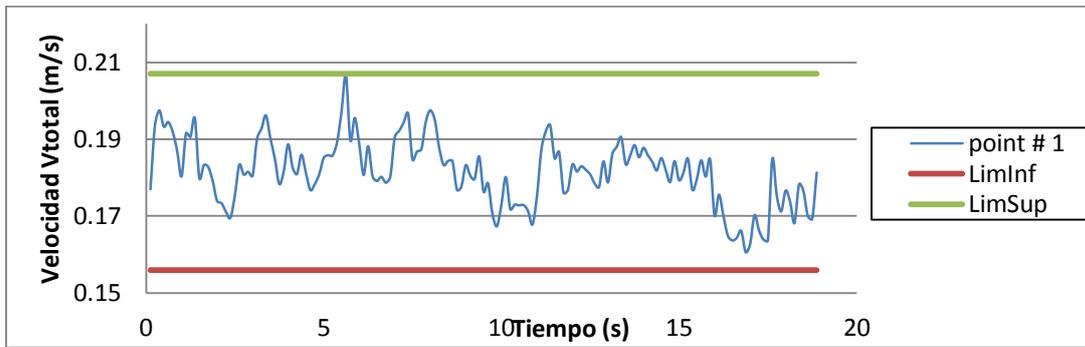
Figura 43 – Velocidad V (m/s) vs Tiempo (s), en cada punto de medición con la técnica PIV

Los resultados de los valores medios de velocidad V , se presentan en la siguiente Tabla resumen:

PIV	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
V_{media} (m/s)	-0,063	-0,060	-0,056	-0,092	-0,082	-0,074	-0,126	-0,105	-0,087

Tabla 3 – Velocidad V_{media} en cada punto

4.3.1.3) Velocidad V_{total}



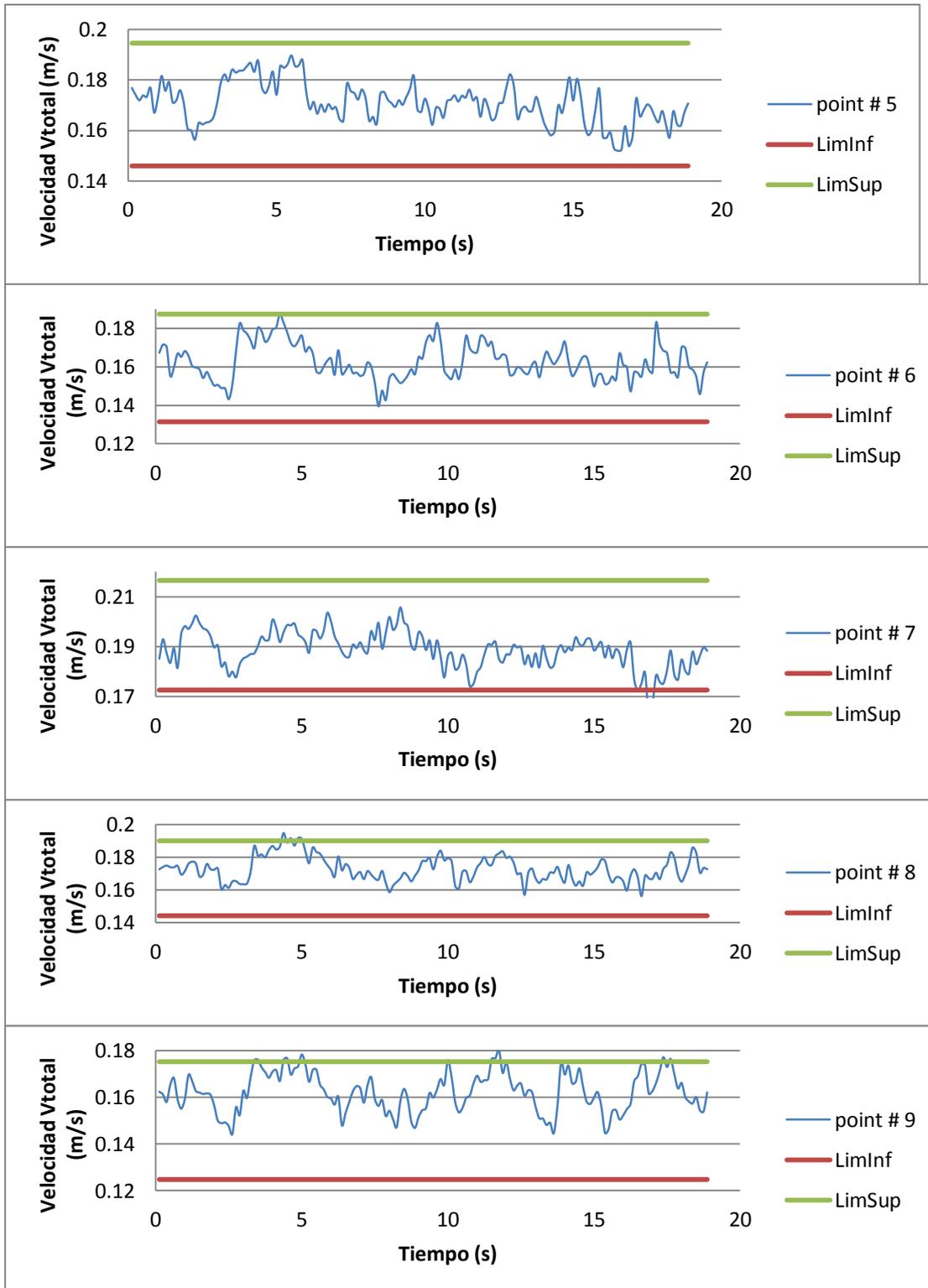


Figura 44 – Velocidad Vtotal (m/s) vs Tiempo (s), en cada punto de medición con la técnica PIV

Los resultados de los valores medios de velocidad V, se presentan en la siguiente Tabla resumen:

PIV	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
V _{total} (m/s)	0,181	0,171	0,163	0,188	0,170	0,159	0,195	0,167	0,150

Tabla 4 – Velocidad Vtotalmedia en cada punto

4.4) Resultados ADV

La medición en cada punto se realizó durante un tiempo aproximado de 2 minutos (120 segundos)

Estos resultados se obtuvieron del programa WINADV (USBR, 2013) el mismo arroja como resultado Velocidades (m/s) vs Tiempo (s), donde en color negro se observan las velocidades en la dirección U, mientras que en color rojo las velocidades en la dirección V.

Luego también el programa arroja en color negro la velocidad compuesta V_{total} .

Velocidades U, Velocidades V:

#Punto1

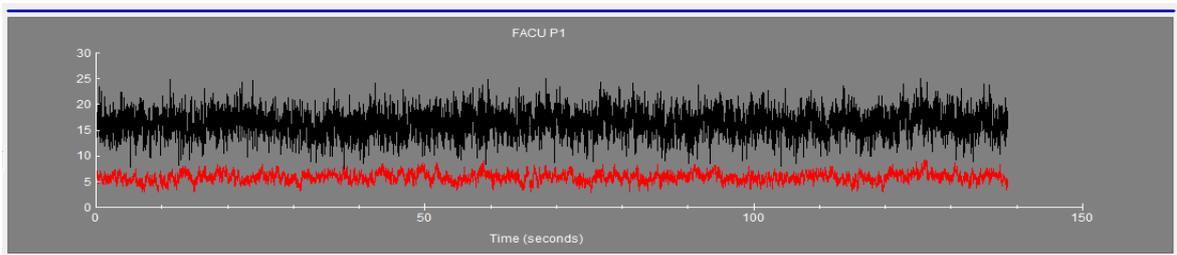


Figura 45 – Velocidad U (m/s) y Velocidad V (m/s) vs Tiempo (s), en el Punto1 de medición con la técnica ADV

#Punto2

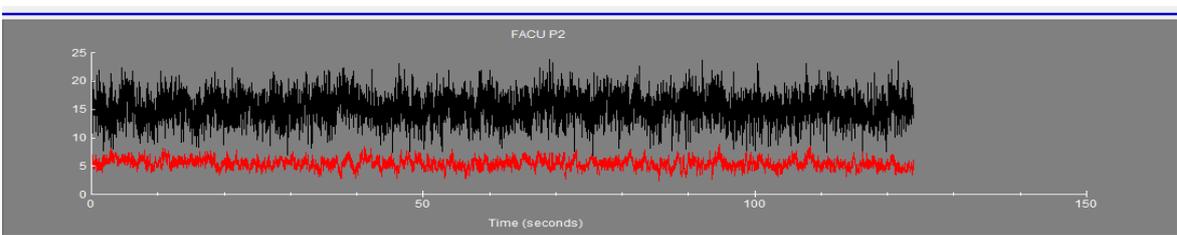


Figura 46 - Velocidad U (m/s) y Velocidad V (m/s) vs Tiempo (s), en el Punto2 de medición con la técnica ADV

#Punto3

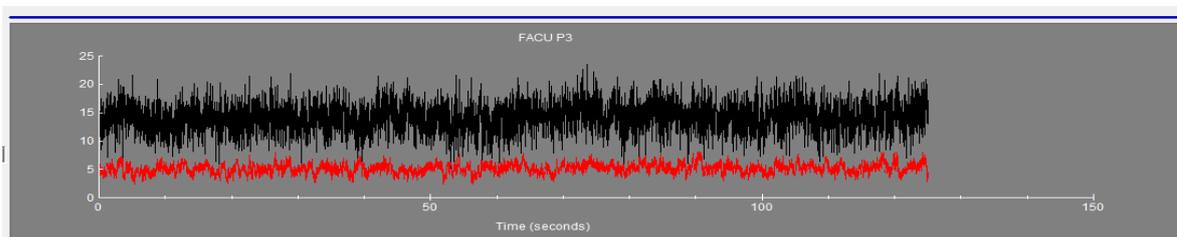


Figura 47 - Velocidad U (m/s) y Velocidad V (m/s) vs Tiempo (s), en el Punto3 de medición con la técnica ADV

#Punto4

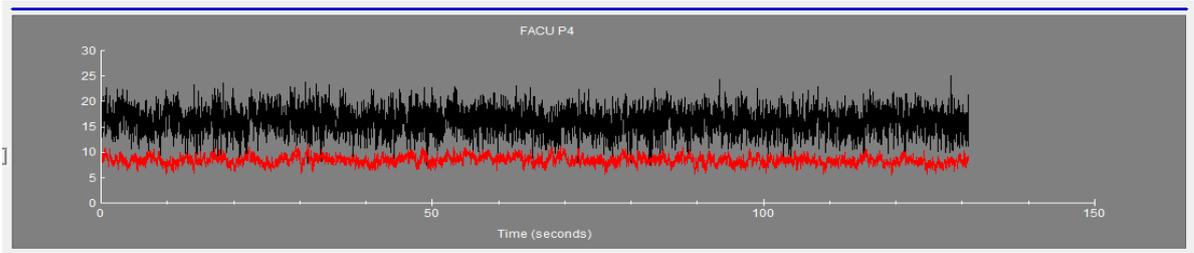


Figura 48 - Velocidad U (m/s) y Velocidad V (m/s) vs Tiempo (s), en el Punto4 de medición con la técnica ADV

#Punto5

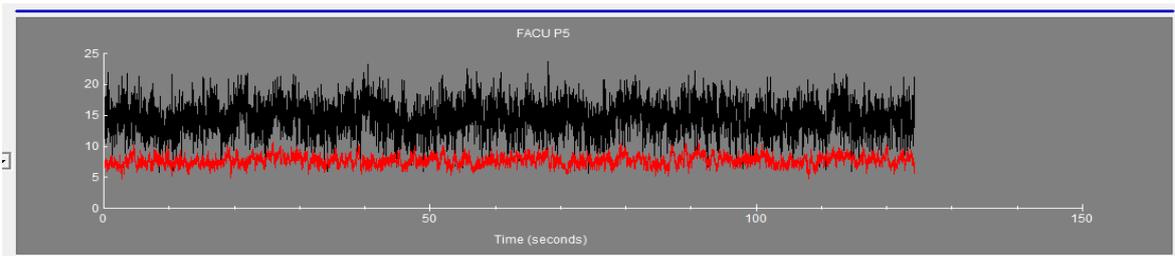


Figura 49 - Velocidad U (m/s) y Velocidad V (m/s) vs Tiempo (s), en el Punto5 de medición con la técnica ADV

#Punto6

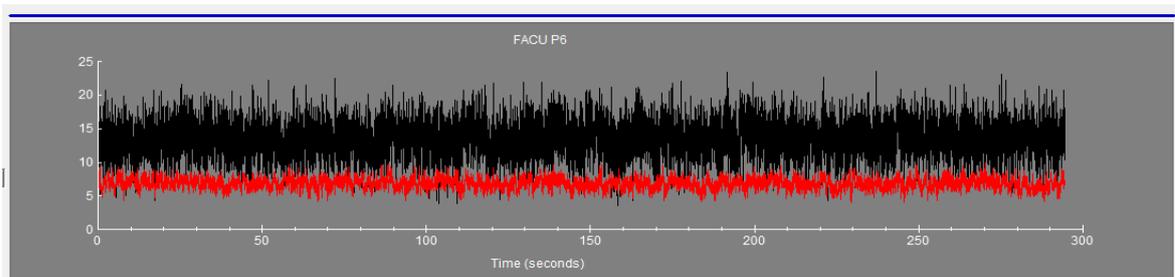


Figura 50 - Velocidad U (m/s) y Velocidad V (m/s) vs Tiempo (s), en el Punto6 de medición con la técnica ADV

#Punto7

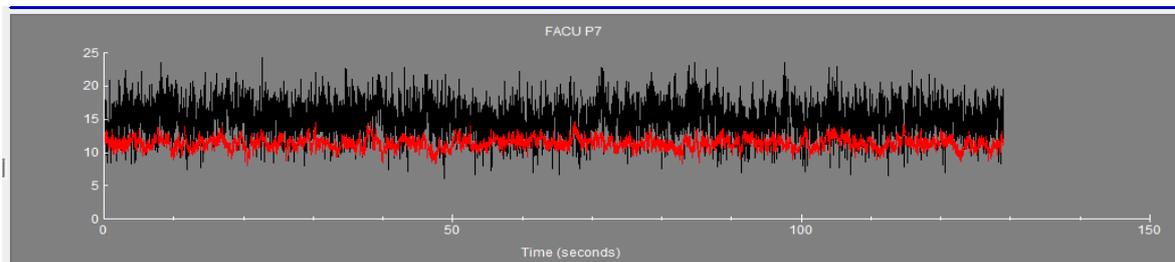


Figura 51 - Velocidad U (m/s) y Velocidad V (m/s) vs Tiempo (s), en el Punto7 de medición con la técnica ADV

#Punto8

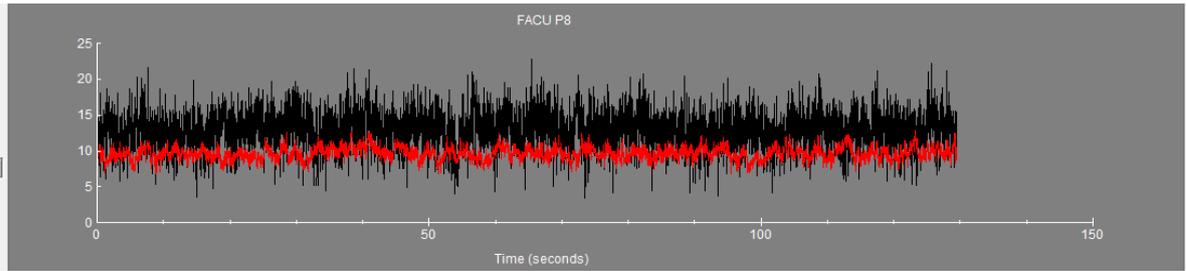


Figura 52 - Velocidad U (m/s) y Velocidad V (m/s) vs Tiempo (s), en el Punto8 de medición con la técnica ADV

#Punto9

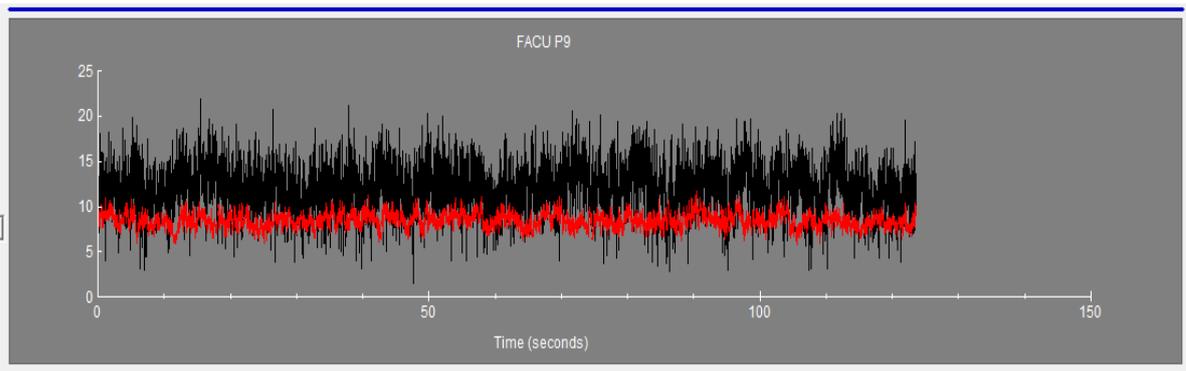


Figura 53 - Velocidad U (m/s) y Velocidad V (m/s) vs Tiempo (s), en el Punto9 de medición con la técnica ADV

Velocidad Vtotal en c/ punto:

#Punto1

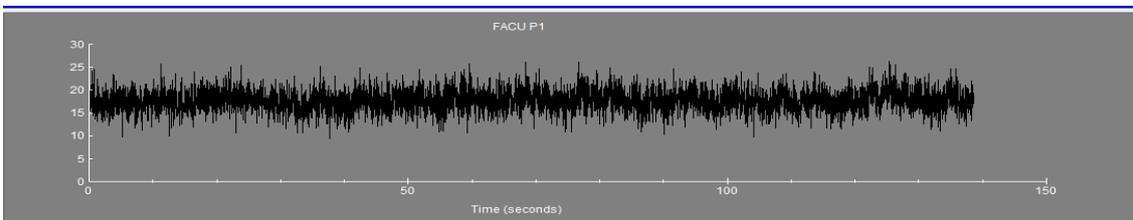


Figura 54 – Velocidad Vtotal (m/s) vs Tiempo (s), en el Punto1 de medición con la técnica ADV

#Punto2

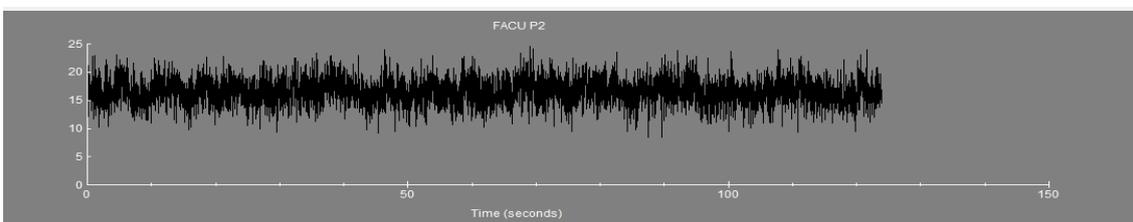


Figura 55 - Velocidad Vtotal (m/s) vs Tiempo (s), en el Punto2de medición con la técnica ADV

#Punto3

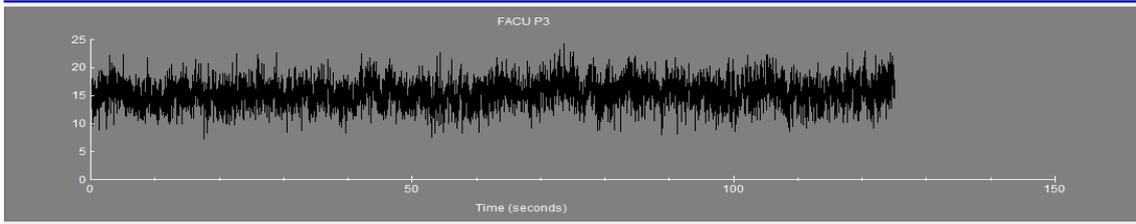


Figura 56 - Velocidad V_{total} (m/s) vs Tiempo (s), en el Punto3 de medición con la técnica ADV

#Punto4

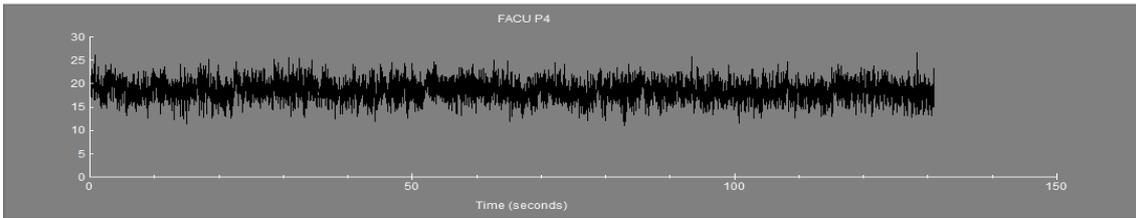


Figura 57 - Velocidad V_{total} (m/s) vs Tiempo (s), en el Punto4 de medición con la técnica ADV

#Punto5

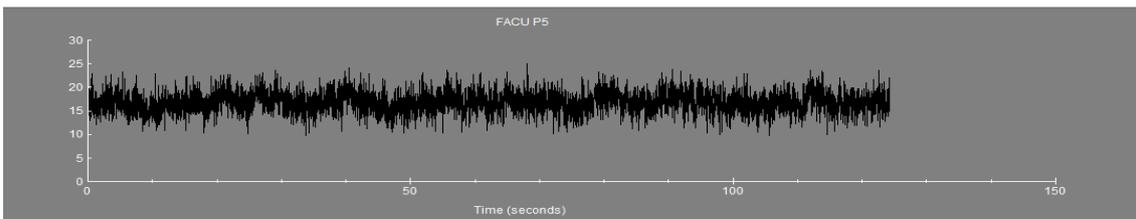


Figura 58 - Velocidad V_{total} (m/s) vs Tiempo (s), en el Punto5 de medición con la técnica ADV

#Punto6

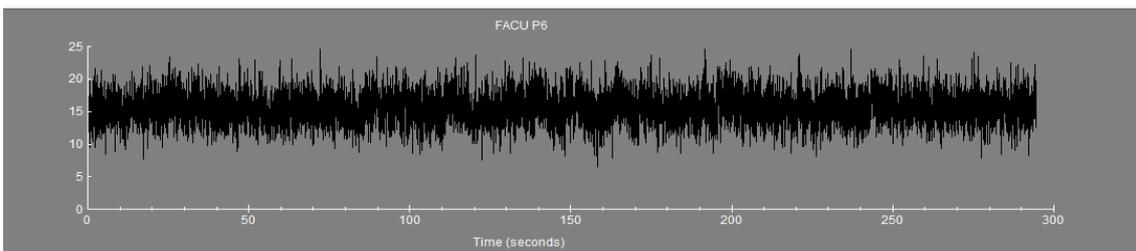


Figura 59 - Velocidad V_{total} (m/s) vs Tiempo (s), en el Punto6 de medición con la técnica ADV

#Punto7

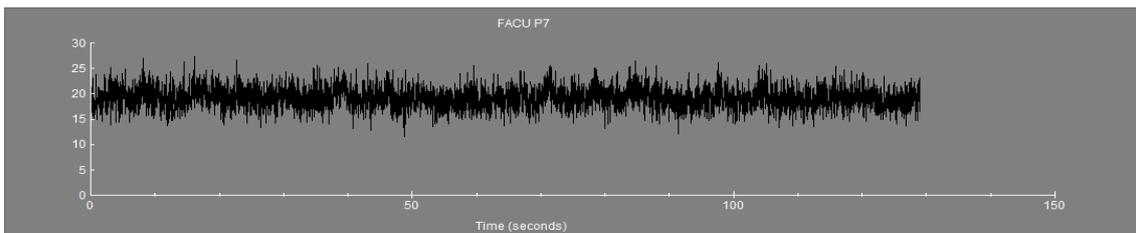


Figura 60 - Velocidad V_{total} (m/s) vs Tiempo (s), en el Punto7 de medición con la técnica ADV

#Punto8

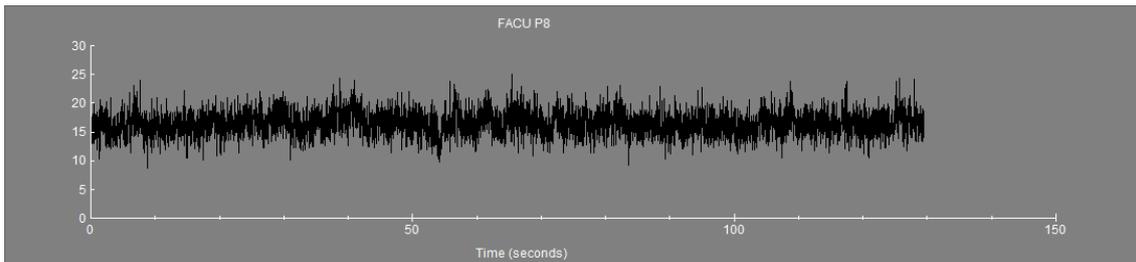


Figura 61 - Velocidad Vtotal (m/s) vs Tiempo (s), en el Punto8 de medición con la técnica ADV

#Punto9

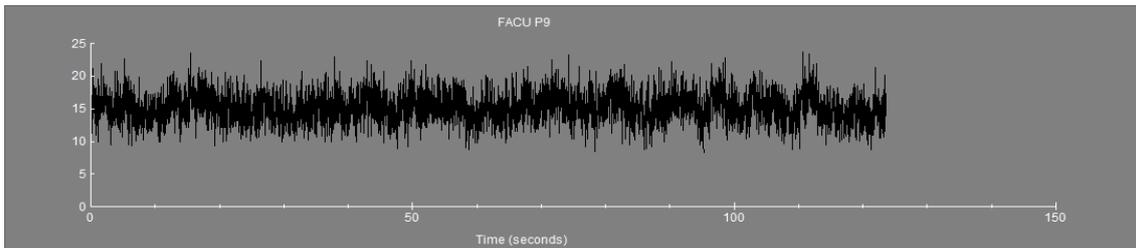


Figura 62 - Velocidad Vtotal (m/s) vs Tiempo (s), en el Punto9 de medición con la técnica ADV

4.5) Comparación entre los resultados de PIV vs ADV

TABLA DE COMPARACION U									
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
PIV	0,171	0,160	0,152	0,165	0,149	0,141	0,149	0,130	0,122
ADV	0,163	0,152	0,141	0,161	0,146	0,134	0,150	0,129	0,120
PORCENTAJE	4,86%	4,89%	7,88%	2,08%	2,18%	5,14%	1,08%	1,23%	1,66%
TABLA DE COMPARACION V									
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
PIV	-0,063	-0,060	-0,056	-0,092	-0,082	-0,074	-0,126	-0,105	-0,087
ADV	0,058	0,055	0,052	0,085	0,077	0,069	0,114	0,096	0,085
PORCENTAJE	8,23%	8,49%	8,70%	8,09%	6,61%	6,47%	10,06%	8,58%	2,31%
TABLA DE COMPARACION VTOTAL									
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
PIV	0,181	0,171	0,163	0,188	0,170	0,159	0,195	0,167	0,150
ADV	0,174	0,163	0,151	0,183	0,166	0,152	0,190	0,162	0,148
PORCENTAJE	4,28%	5,04%	7,94%	3,08%	2,73%	4,91%	2,64%	3,20%	1,04%

Tabla 5 – Comparación de velocidades U, V, Vtotal en cada punto.

En el caso de U, las diferencia máxima se da en el punto 3 (7,88%), y estas diferencias son menores que las que arroja la dirección V.

En el caso de V, la diferencia máxima se da en el punto 7 (10,06%), y estas diferencias son mayores que en la dirección U.

Se observo que para los 9 puntos analizados las diferencias porcentuales de las componentes en la dirección U (horizontal) son menores a las observadas en la dirección V (vertical) y las

diferencias entre ambas componentes se compensan, es decir, las diferencias para la velocidad total V_{total} es cada punto es menor a la diferencia de las componente (U o V) de mayor diferencia.

Considerando como valor admisible máximo una diferencia de 10%, se concluye que aplicando las técnicas de medición descriptas con anterioridad se obtienen resultados satisfactorios (Tabla 5) con lo cual se logra la validación de las técnicas.

Para visualizar de manera grafica la comparación de las velocidades en cada dirección medidas con PIV y ADV en cada punto, se utilizaran Gráficos de cajas (BOXPLOT) (wikipedia, 2016)

El diagrama de caja, también conocido como diagrama de caja y bigotes, es un gráfico que está basado en "cuartiles" y mediante el cual se visualiza la distribución de un conjunto de datos. Está compuesto por un rectángulo, la "caja", y dos brazos, los "bigotes". Es un gráfico que suministra información sobre los valores mínimos y máximos, los "cuartiles" Q1, Q2 o "mediana" y Q3, sobre la existencia de valores atípicos y la simetría de la distribución.

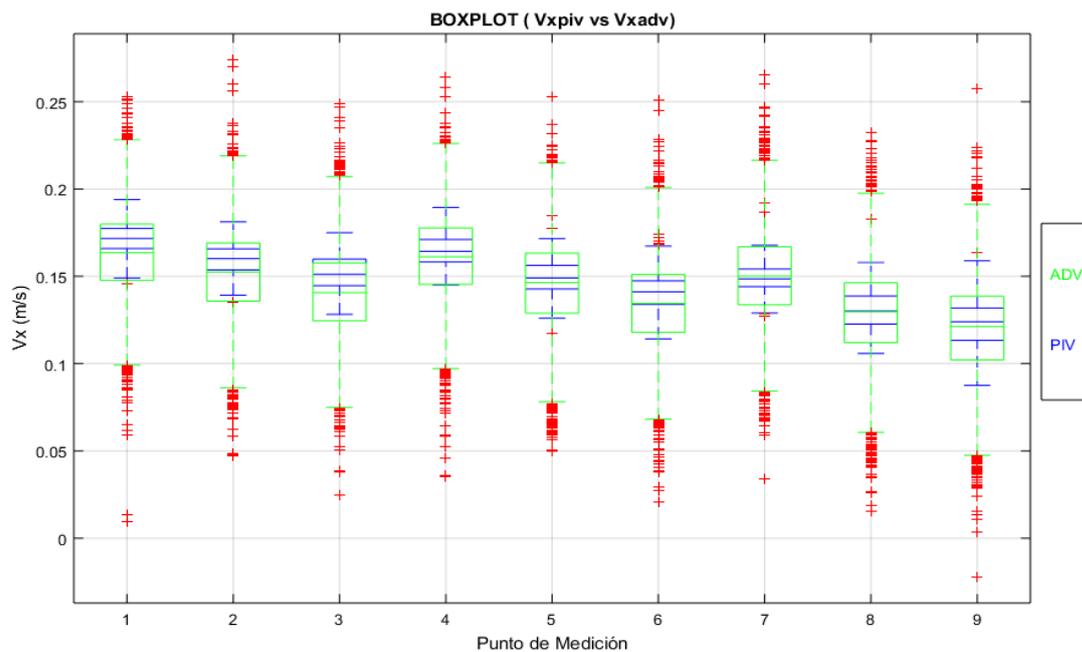


Figura 63 – BOXPLOT (V_{xpiv} vs V_{xadv})

Información útil que se puede obtener de la Figura 63

- En todos los puntos de medición la "caja" de las mediciones realizadas con PIV se encuentra dentro de la "caja" de las mediciones realizadas con ADV, por lo que los datos obtenidos con PIV están dentro del rango de trabajo de ADV.
- Los valores medios de velocidad en la dirección U (Horizontal) en cada punto obtenidos mediante la técnica PIV son mayores que los valores medios en cada punto obtenidos mediante la técnica ADV. Con excepción del punto 7 (En este punto el valor medio de

Velocidad dado por el PIV es menor que el valor medio de Velocidad dado por el ADV (– 1,08% de diferencia). (Ver Tabla 5)

- En todos los puntos, los datos arrojados por la técnica ADV tienen una dispersión mucho mayor que la datos obtenidos mediante la técnica PIV.

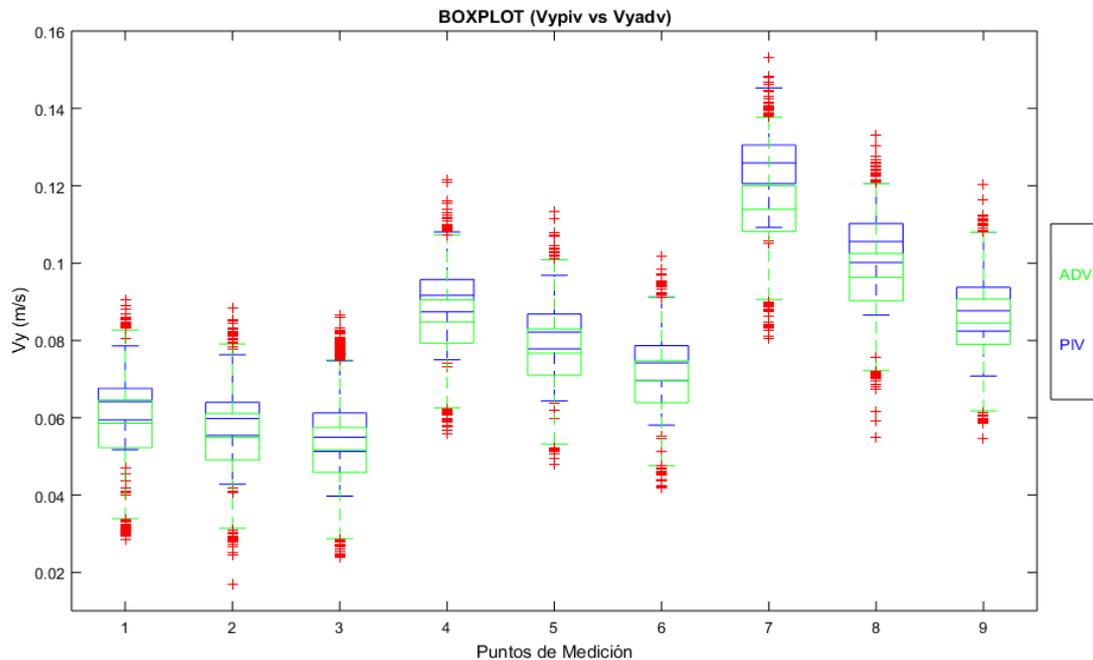


Figura 64 – BOXPLOT (Vypiv vs Vxadv)

Información útil que se puede obtener de la Figura 64

- En todos los puntos de medición la “caja” de las mediciones realizadas con PIV se encuentra desfasada hacia la dirección del tercer cuartil (Q3) de la “caja” de las mediciones realizadas con ADV, esto se cumple en todos los puntos excepto el punto 7 donde la “caja” de los datos obtenidos con PIV no se superpone con la “caja” de los datos obtenidos con el ADV en este punto.
- Los valores medios de velocidad en la dirección V (Vertical) en cada punto obtenidos mediante la técnica PIV son mayores que los valores medios en cada punto obtenidos mediante la técnica ADV.
- En todos los puntos, los datos arrojados por la técnica ADV tienen una dispersión mucho mayor que los datos obtenidos mediante la técnica PIV.

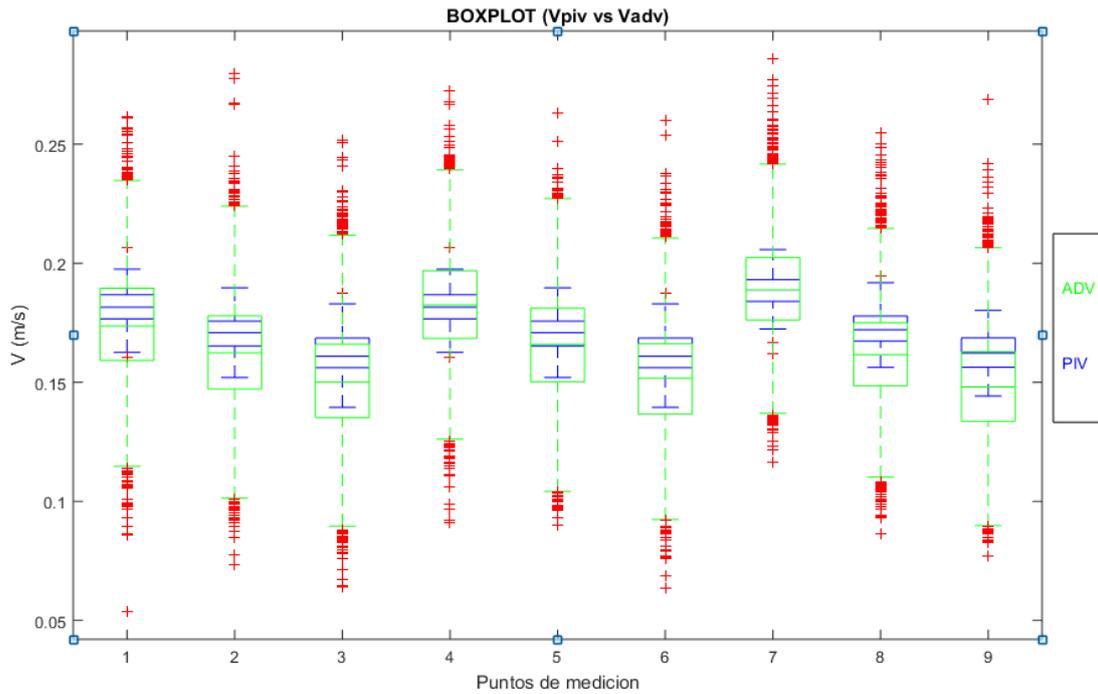


Figura 65 – BOXPLOT ($V_{totalpiv}$ vs $V_{totaladv}$)

Información útil que se puede obtener de la Figura 65

- En este caso no se observa un patrón por el cual la “caja” de los datos obtenidos con PIV se encuentre dentro de la “caja” obtenida con los datos ADV, ya que esto se cumple en algunos puntos y en otros no. Por ejemplo: no se cumple en el punto 3
- Los valores medios de velocidad en la dirección V_{total} (V) en cada punto obtenidos mediante la técnica PIV son mayores que los valores medios en cada punto obtenidos mediante la técnica ADV.
- En todos los puntos, los datos arrojados por la técnica ADV tienen una dispersión mucho mayor que la datos obtenidos mediante la técnica PIV.

5) CAPITULOS: CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA

En este capítulo se realiza la caracterización hidráulica aguas arriba de la estructura de descarga funcionando con compuerta y sin ella. Para las mismas se obtienen las leyes de descarga H-Q y Q-D para las dos condiciones anteriormente mencionadas de la estructura. Por otro lado se aplicó la técnica de PIV para calcular el campo de velocidades aguas arriba de la estructura y se obtuvieron perfiles de velocidades a 12cm de la misma para las diferentes condiciones de modelación.

5.1) *Parámetros Hidráulicos:*

Para caracterizar hidráulicamente la estructura modelada se procedió a relevar los siguientes parámetros:

- Lectura del limnimetro (HI): La lectura aquí permitirá aplicar la ecuación de vertederos y de esta manera obtener el Caudal que está circulando por el modelo físico.
- Altura sobre la cresta (Hcresta): Se toma desde el punto más alto de la estructura hasta el pelo de agua.
- Ancho de lámina sobre estructura (Hlamina): Se toma desde la base superior de la estructura hasta el pelo de agua (dado que hay muchas fluctuaciones se suele tomar un promedio de las mediciones realizadas).
- Longitud del salto (L): Se toma desde el borde de la estructura hasta la mitad de la lámina que forma el chorro del salto.

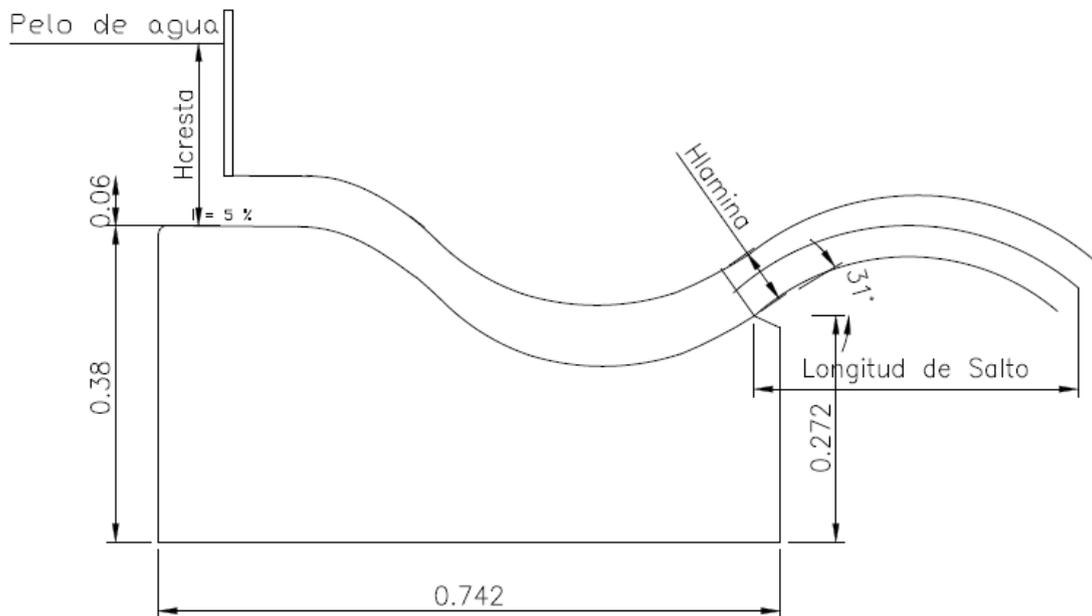


Figura 66 – Parámetros a relevar para realizar la caracterización hidráulica de la estructura de salto Esqui

Para la obtención de estos parámetros es necesaria la utilización de instrumentos tales como reglas (de por lo menos 1,50m), plomadas, reflectores, entre otros. También, es indispensable la presencia de más de una persona a la hora de realizar las mediciones, con esto se garantiza la correcta medición de los parámetros o por lo menos reducir los errores al máximo.

Para poder realizar las mediciones se deberá, poner en funcionamiento las bombas para que de esta manera circule agua por el canal de vidrio, hasta que el mismo entre en régimen (tarea que dura varios minutos), para verificar que haya entrado en régimen se utiliza el limnómetro en el cual si este no ha cambiado su lectura durante varios minutos, se considera que el canal a entrado en régimen.

En el canal de vidrio se tomaron 2 escenarios de modelación primero sin compuerta y luego con compuerta (tener en cuenta que esto varía según los caudales que se utilice ya que si se utiliza un caudal mayor el agua puede salir del canal de vidrio excediendo de esta manera la capacidad del modelo físico y si se utiliza Compuerta con un caudal muy pequeño esta no tendrá efecto.)

De esta manera al considerarlo SIN compuerta trabaja como vertedero, mientras que al considerarlo CON compuerta trabaja como orificio. (Ver. Capítulo 2).

Los datos que fueron relevados se observan en la siguiente tabla:

Con Compuerta (EXPERIMENTALES)					
Lectura Lim	Caudal Q	Hcresta	H ^{0.5} (Sobre cresta)	Long. Salto (L)	Hlamina
mm	L/s	cm	cm	cm	cm
38,58	23,44	12,00	3,46	30,40	3,40
40,54	29,74	16,10	4,01	37,60	3,50
42,00	35,04	21,90	4,68	37,40	3,50
42,28	36,12	22,40	4,73	41,20	3,50
42,78	38,09	24,80	4,98	47,60	3,50
43,60	41,45	26,50	5,15	48,70	3,70
44,48	45,26	33,80	5,81	52,10	3,80

Tabla 6 – Datos relevados Con Compuerta

Sin Compuerta (EXPERIMENTALES)					
Lectura Lim	Caudal Q	Hcresta	H ^{1.5} (Sobre Cresta)	Long. Salto (L)	Hlamina
mm	L/s	cm	cm	cm	cm
40,63	30,05	10,90	35,99	26,40	4,20
43,50	41,03	13,20	47,96	36,00	5,50
45,30	48,99	14,40	54,64	36,00	5,80
35,10	14,39	7,10	18,92	24,00	1,50
43,23	39,91	13,00	46,87	30,80	4,50
42,44	36,74	12,40	43,66	30,40	4,00
38,58	23,44	9,50	29,28	24,40	2,60
45,64	50,59	15,00	58,09	37,00	5,20
42,33	36,31	12,30	43,14	31,50	4,00

Tabla 7 – Datos relevados Sin Compuerta

En la columna 1 se relevo las lecturas del limnómetro y con ella se obtuvo la columna 2, también se midió el Hcresta el mismo se mide desde la parte más alta de la estructura hasta el pelo de agua esto se ve en la columna 3, en la columna 4 se tiene Hcresta^{0.5} en el caso de Con

Compuerta y Hcresta^{1.5} en el caso de Sin Compuerta esto se realiza para obtener el grafico H-Q considerando la teoría, la columna 5 es la longitud del salto esto se mide desde el borde más alto a la salida de la estructura en horizontal hasta la mitad del chorro del salto, la columna 6 es el ancho de lamina de agua en la estructura.

5.2) Curvas H-Q

De los datos obtenidos anteriormente se realiza el análisis de las curvas H-Q.

5.2.1) Curva H-Q Experimental.

Para obtener la curva H-Q Experimental se complementan los datos experimentales medidos en esta práctica, Q vs Hcresta (Columna2 vs Columna3, Tabla 7), con datos obtenidos en ensayos anteriores (Tabla 8). En la Figura 67 se presentan los datos experimentales a partir de los cuales se ajustaron las curvas H-Q.

Con Compuerta (ARCHIVOS)	
Caudal Q	H - Sobre Cresta
L/s	cm
20,63	9,40
22,92	10,80
25,68	13,00
27,92	14,70
29,26	16,00
33,17	18,90
35,54	21,85
37,53	23,55
40,24	26,50

Sin Compuerta (ARCHIVOS)	
Caudal Q	H - Sobre Cresta
L/s	cm
9,29	4,55
13,93	6,10
20,62	8,20
28,38	10,00
35,61	11,20
43,16	12,80
50,02	14,00
55,93	14,80
62,56	15,80
67,19	16,70

Tabla 8 – Datos de archivos Con Compuerta Datos de archivos Sin Compuerta

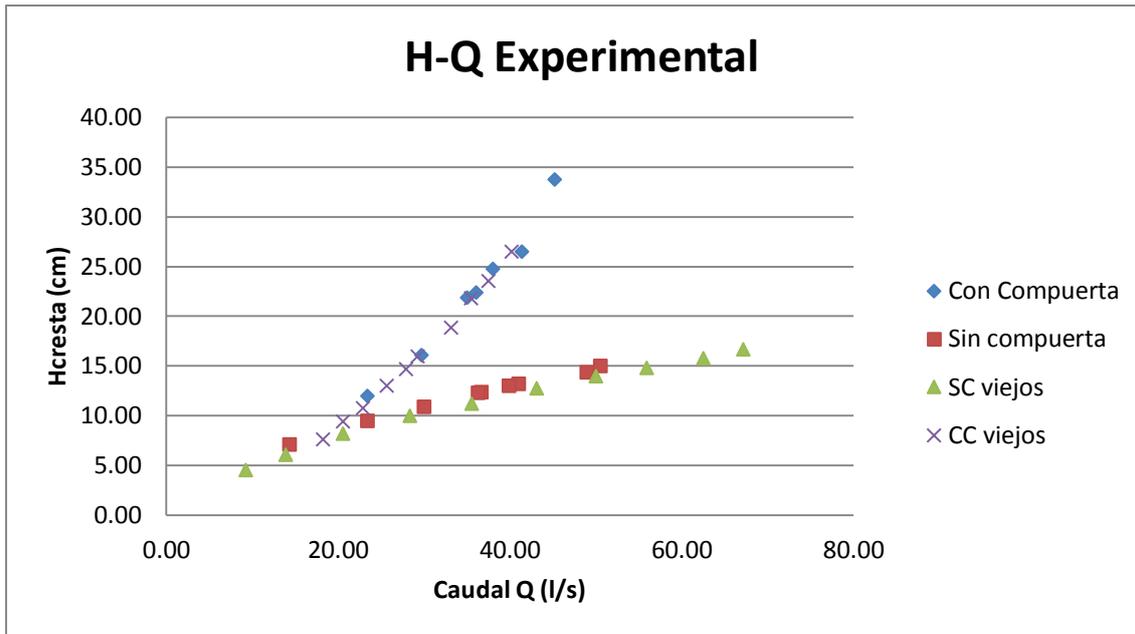


Figura 67 – H-Q Experimental

5.2.2) Ajuste H-Q considerando datos experimentales

Se ajustó una ecuación potencial a los datos medidos (H-Q) en el modelo físico:

- Con Compuerta:

Se obtuvo la siguiente ecuación de ajuste $Q = 4.87x^{0.642}$

Con un $R^2 = 0.987$

- Sin Compuerta

Se obtuvo la siguiente ecuación de ajuste $Q = 0.513x^{1.699}$

Con un $R^2 = 0.999$

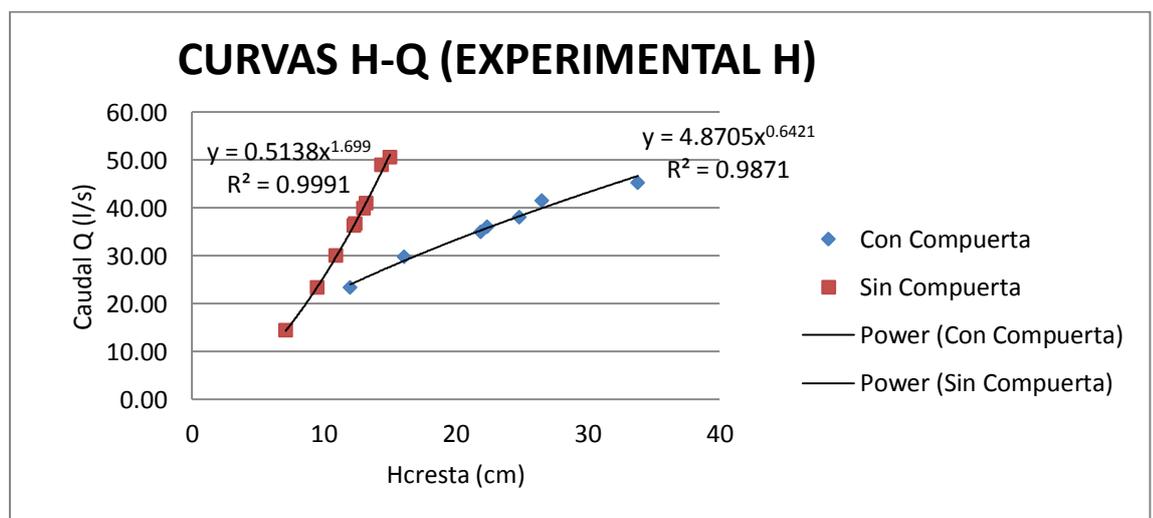


Figura 68 – H-Q utilizando H experimental

5.2.3) Ajuste H-Q considerando el exponente de H fijo y averiguando el Cd dependiendo el caso de modelación.

Considerando ecuaciones teóricas, para vertederos y orificios, presentadas en el capítulo 2 “Marco Teórico” se ajustó una ecuación lineal para la estructura trabajando con compuerta, considerando como variables Q y $H^{0.5}$, y para la estructura sin compuerta con Q y $H^{1.5}$:

- Con Compuerta:

Se obtuvo la siguiente ecuación de ajuste $Q = 9.420x - 8.591$

Con un $R^2 = 0.986$

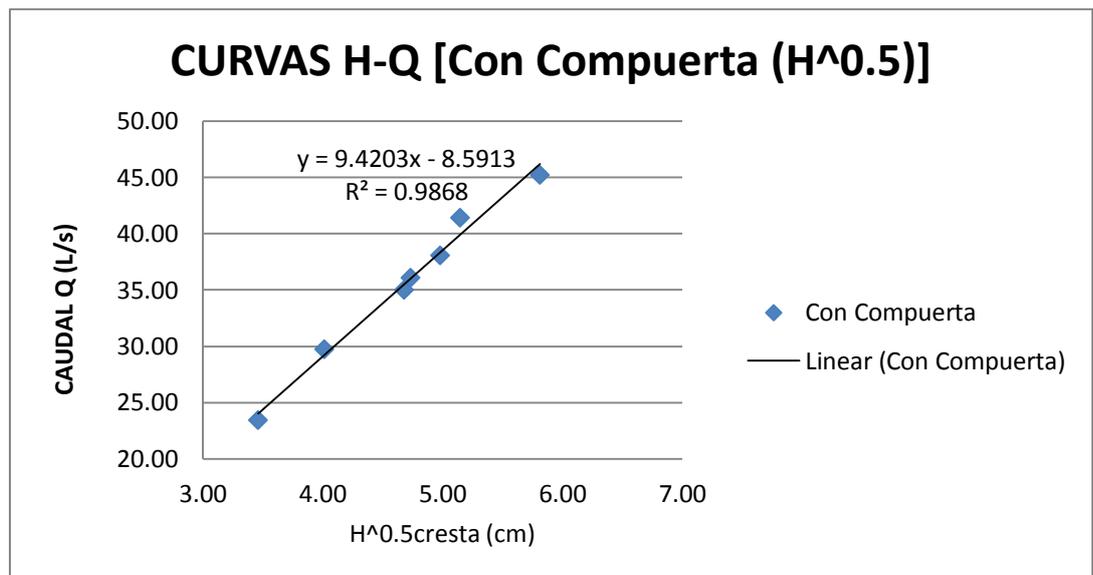


Figura 69 – H-Q Considerando teoría en el cual H se eleva a la 0.5

- Sin Compuerta

Se obtuvo la siguiente ecuación de ajuste $Q = 0.943x - 3.964$

Con un $R^2 = 0.997$

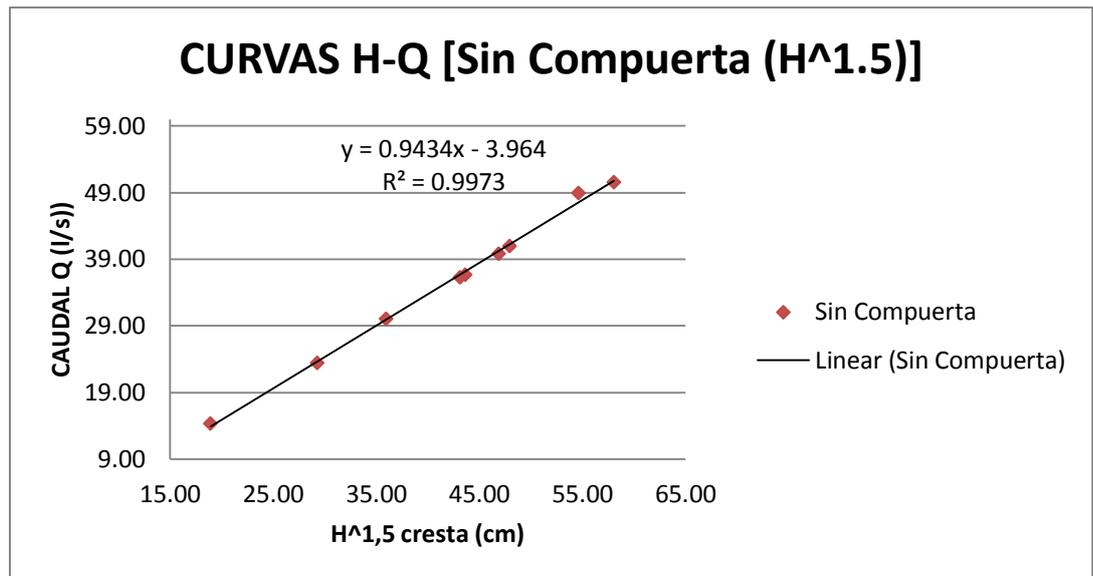


Figura 70 – H-Q Considerando teoría en el cual H se eleva a la 1.5

En todos los ajustes se reemplazó el valor de $X = H$ para el caso experimental y $X = H^{0.5}$ en el caso de trabajar como orificio y $X = H^{1.5}$ en el caso de trabajar como vertedero. El tipo de distribución se eligió en función de el valor de R^2 el cual mientras más cercano a 1 el ajuste es satisfactorio.

5.2.4) Curva H-Qteorica

- Con Compuerta:

Para obtener la curva H- Qteorico utilizamos la formula de orificio dada por Sotelo Avila:

$$Q_{teorico} = 0,6 * \Omega c * \sqrt{2 * g * x}$$

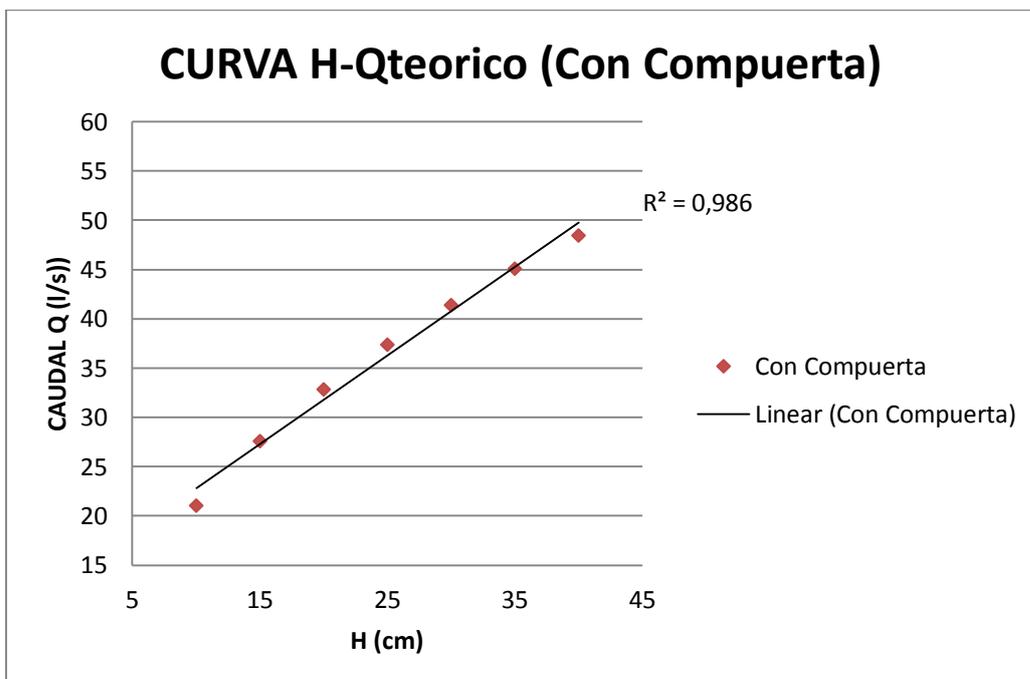


Figura 71 – H –Q teorica Con Compuerta

- Sin Compuerta:

Para obtener la curva H-Qteorico utilizamos la formula de vertedero de cresta ancha dada por Sotelo Avila:

$$Q_{teorico} = 1,71 * L * X^{3/2} \text{ Donde } L=\text{ancho de canal}$$

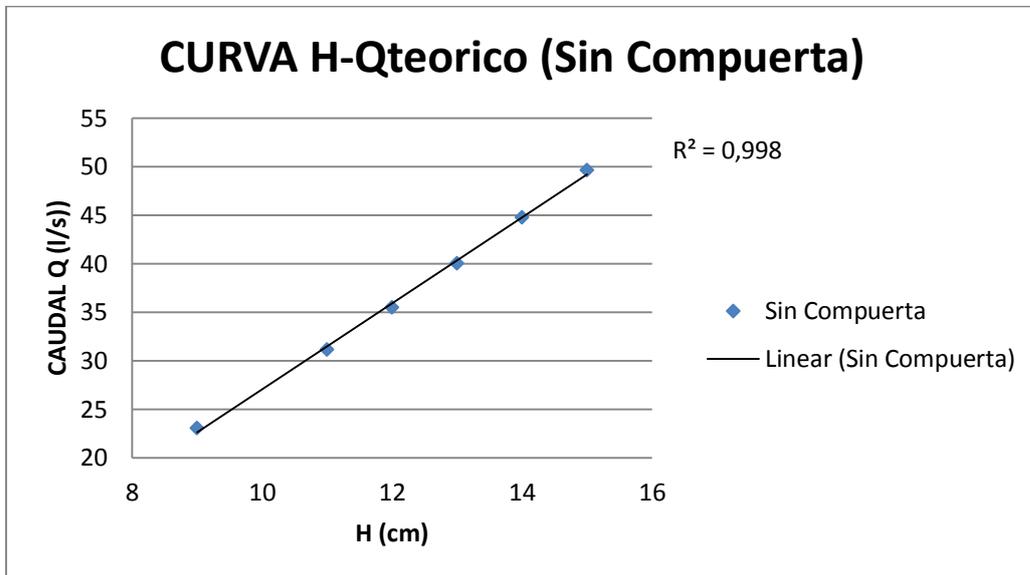


Figura 72 – H –Q teorica Sin Compuerta

5.2.5) Comparación H-Q (Experimental) vs H-Q (Teorica)

La Tabla 9 y Tabla 10 resumen las Curvas Experimentales **ajustadas** de las dos maneras, además se presenta la Curva H-QTeórica y los datos experimentales.

H (cm)	Con Compuerta		
	Experimental H	Experimental H ^{0,5}	Qteorico
	$Q = 4,87x^{0,642}$	$Q = 9,420x - 8,591$	$Q = 0,6 * \Omega c * (2 * g * x)^{(1/2)}$
10	21,36	21,20	21,09
15	27,71	27,89	27,62
20	33,33	33,54	32,87
25	38,46	38,51	37,40
30	43,24	43,00	41,43
35	47,73	47,14	45,10
40	52,01	50,99	48,50

Tabla 9 – Tabla de comparación de H-Q Con Compuerta

Los datos Experimentales (Figura 67) se grafican conjuntamente con los datos de la Tabla9:

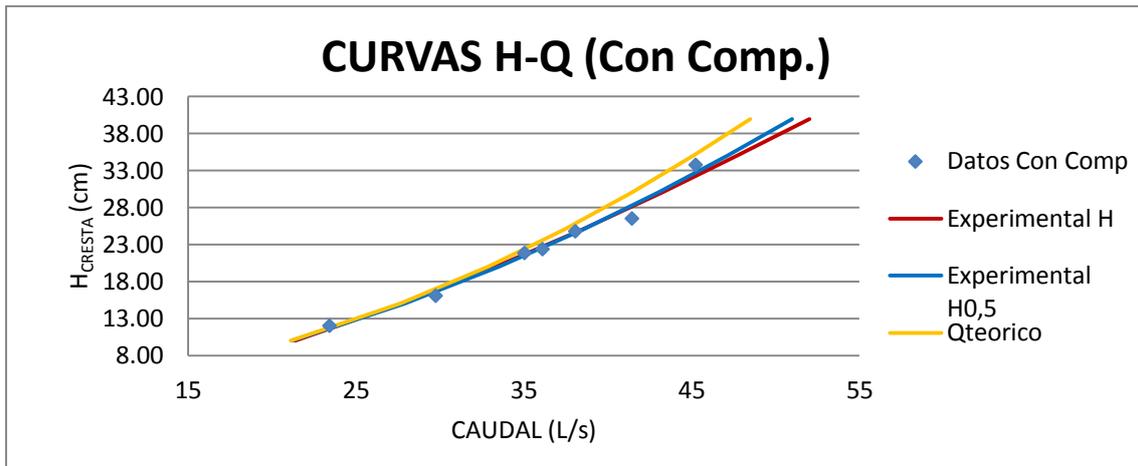


Figura 73 – Comparación curvas H-Q Con Compuerta

Tomando como punto de comparación los resultados experimentales y realizando su comparación respecto al resultado utilizando $H^{0.5}$ y $Q_{teorico}$ se tiene:

H (cm)	Diferencias	
	Dif1	Dif2
10	0,74%	1,23%
15	0,67%	0,31%
20	0,63%	1,36%
25	0,13%	2,76%
30	0,53%	4,18%
35	1,25%	5,51%
40	1,96%	6,75%

Tabla 10 – Diferencia porcentual con compuerta

De esta manera observando el gráfico y sustentado por la tabla 10, se puede ver que para caudales más pequeños (hasta aproximadamente 35 l/s) y por ende a alturas menores (hasta aproximadamente 23cm), las diferencias porcentuales no superan el 2% por lo que cualquier forma que se utilice para obtener los datos será satisfactoria ya que las diferencias son insignificantes.

Luego de aquí comparando $H_{experimental}$ vs $H_{exp}^{0.5}$ las diferencias son insignificantes no llegando a superar el 2%, esto no es así si se compara $H_{experimental}$ con $Q_{teorico}$ donde las diferencias llegan a ser de hasta 6.75%. Cuanto a los resultados obtenidos de manera experimental y los resultados teóricos (ej. Para una altura de 33cm se tendrá un caudal experimental de 45 l/s, pero para una altura de 33cm se tendría un caudal teórico de 43 l/s)..

Conclusión: A la hora del diseño la teoría tendría pleno uso en caudales pequeños no así para caudales grandes donde las diferencias son mucho más acentuadas.

H (cm)	SinCompuerta		
	Experimental H	Experimental H ^{1,5}	Qteorico
	$Q = 0.513x^{1.699}$	$Q = 0.943x - 3.964$	$Q = 1.71 * L * X^{(3/2)}$
9	21,45	21,50	23,09
11	30,16	30,44	31,19
12	34,97	35,24	35,54
13	40,06	40,24	40,08
14	45,43	45,43	44,79
15	51,09	50,82	49,67

Tabla 11 – Tabla de comparación de H-Q Sin Compuerta

Los datos Experimentales (Figura 67) se grafican conjuntamente con los datos de la Tabla10:

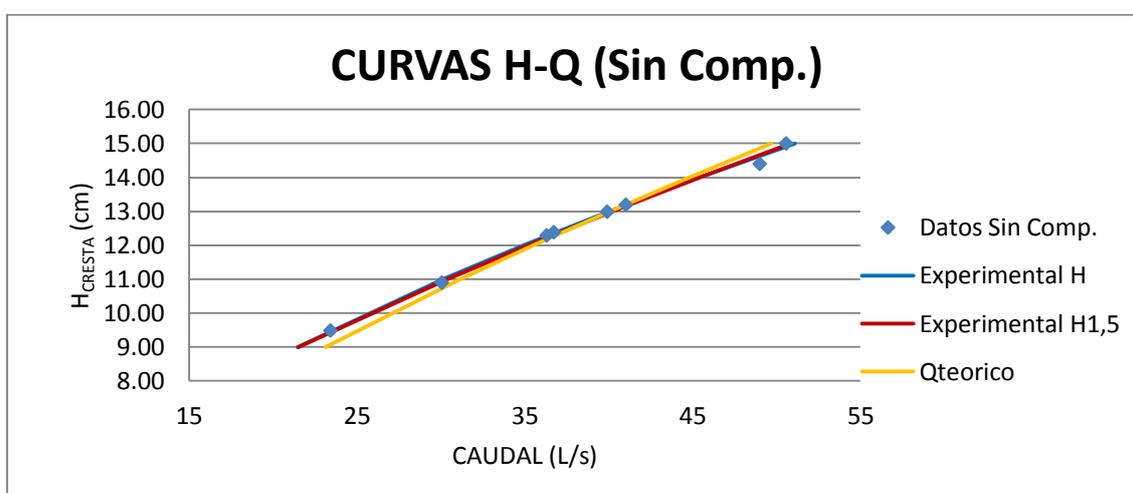


Figura 74 – Comparación de curvas H-Q Sin Compuerta

Tomando como punto de comparación los resultados experimentales y realizando su comparación respecto al resultado utilizando H^{1,5} y Qteorico se tiene:

H (cm)	Diferencias	
	Dif1	Dif2
9	7,64%	7,39%
11	3,42%	2,48%
12	1,65%	0,87%
13	0,04%	0,40%
14	1,42%	1,42%
15	2,77%	2,26%

Tabla 12 – Diferencias porcentual sin compuerta

De esta manera observando el grafico y sustentado por la tabla 12, se puede ver que a caudales pequeños se observa una gran diferencia porcentual entre las formas de obtener los resultados, luego en un caudal de aproximadamente 33 l/s y a una altura de 13cm las diferencias son muy pequeñas llegando a ser casi nulas, y de aquí en adelante las diferencias vuelven a crecer.

Conclusión: A la hora del diseño a alturas medias (13cm aproximadamente) se podría utilizar cualquier manera para realizar los cálculos.

5.3) Curvas Q-D

De los datos obtenidos anteriormente se analizan las curvas Q-D.

5.3.1) Curva Q-D Experimental

Tomando las siguientes columnas se grafica la curva Q-D Experimental (Tener en cuenta que en este caso no se presentaban datos preexistentes de estas mediciones).

Con Compuerta		Sin Compuerta	
		Caudal Q	Long. Salto
L/s	cm	L/s	cm
		14,39	24,00
23,44	30,40	23,44	24,40
29,74	37,60	30,05	26,40
35,04	37,40	36,31	30,40
36,12	41,20	36,74	30,80
38,09	47,60	39,91	31,50
41,45	48,70	41,03	33,00
45,26	52,10	48,99	36,30
		50,59	38,00

Tabla 13 – Datos Q-D Experimental Con Compuerta – Sin Compuerta

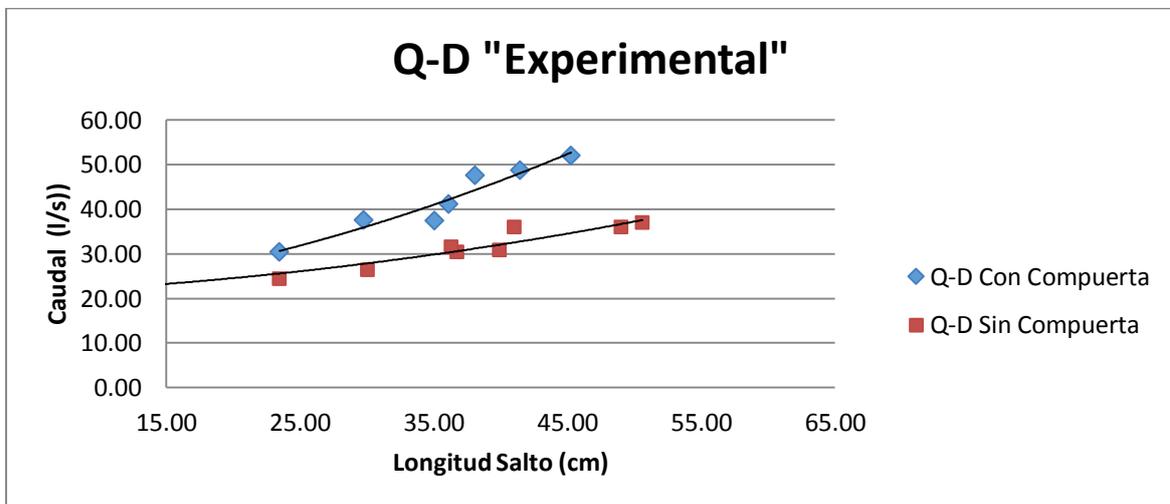


Figura 75 – Curvas Q-D Experimental Con Compuerta y Sin Compuerta

5.3.2) Comparación Q-D Experimental y Q-D Teórica

Se realiza Bernoulli entre dos puntos, el punto 1 se ubica aguas arriba de la estructura y el punto 2 se ubica en el punto de despegue de la lámina sobre la estructura:

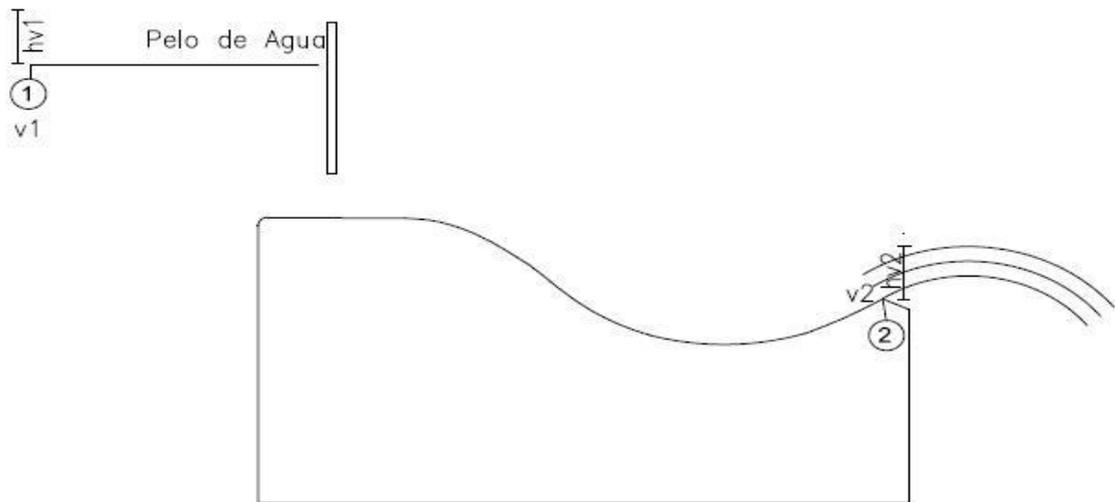


Figura 76 – Punto1 y Punto2 para realizar la medición de v, hv, salto.

Con Compuerta							
Caudal Q	Hcresta	v1	hv1	v2	hv2	hsalto	Lformula
L/s	cm	(m/s)	m	(m/s)	m	m	cm
23,44	12,00	0,39	0,01	2,16	0,24	0,02	41,24
29,74	16,10	0,37	0,01	2,34	0,28	0,03	48,22
35,04	21,90	0,32	0,01	2,56	0,33	0,03	57,47
36,12	22,40	0,32	0,01	2,58	0,34	0,03	58,37
38,09	24,80	0,31	0,00	2,67	0,36	0,03	62,20
41,45	26,50	0,31	0,00	2,73	0,38	0,03	65,22
45,26	33,80	0,27	0,00	2,98	0,45	0,03	76,61

Tabla 14 – Determinación de Longitud de salto por fórmula para el caso Con Compuerta

Sin Compuerta							
Caudal Q	Hcresta	v1	hv1	v2	hv2	hsalto	Lformula
L/s	cm	(m/s)	m	(m/s)	m	m	m
14,39	7,10	0,41	0,01	1,93	0,19	0,01	32,47
23,44	9,50	0,49	0,01	2,07	0,22	0,02	38,16
30,05	10,90	0,55	0,02	2,14	0,23	0,03	41,72
36,31	12,30	0,59	0,02	2,22	0,25	0,03	45,06
36,74	12,40	0,59	0,02	2,22	0,25	0,03	45,29
39,91	13,00	0,61	0,02	2,26	0,26	0,04	46,82
41,03	13,20	0,62	0,02	2,27	0,26	0,04	47,35
48,99	14,40	0,68	0,02	2,33	0,28	0,04	50,79
50,59	15,00	0,67	0,02	2,36	0,28	0,04	51,83

Tabla 15 – Determinación de Longitud de salto por fórmula para el caso Sin Compuerta.

- v1: velocidad en el punto 1
- hv1: carga de velocidad en el punto 1
- v2: velocidad en el punto 2
- hv2: carga de velocidad en el punto 2
- hsalto = ancho de la lamina en el punto 2
- Lformula: longitud de salto calculado con

$$y = x * \operatorname{tg} \alpha + \frac{x^2}{3,6 * (d + h_v) * \cos^2 \alpha}$$

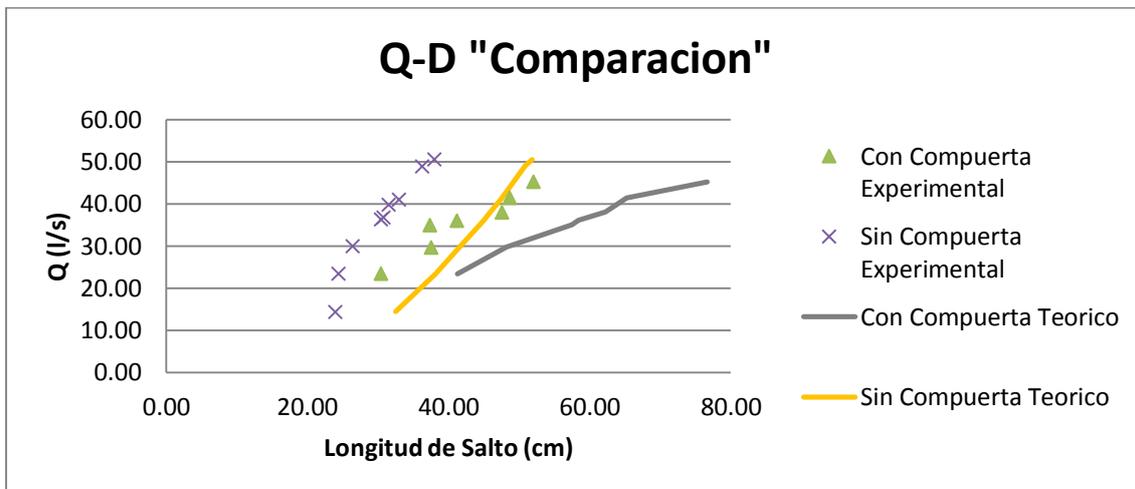


Figura 77 – Comparación Q-D, Experimental vs Teórico p/ cada escenario de modelación.

En ambos gráficos se puede observar, que la curva Teórica tiene valores de Longitud de salto mayor a los experimentales, con un valor promedio de 15 cm, esto se debe a que en la formula tiene en cuenta valor de 3.6, que es una constante que considera la reducción de la velocidad del chorro por la resistencia del aire, turbulencias internas y su propia desintegración

5.4) Campo de velocidades Aguas Arriba

Utilizando la herramienta de última generación PIV, se realizara la medición del campo de velocidades del flujo Aguas Arriba de la estructura.

Aplicando la siguiente metodología:

- Instalación del Equipo de PIV (Cámara, Trípode, Computadora, Laser, Conexión a red eléctrica).
- Acondicionamiento del lugar de medición
- Localización de zona de medición
- Realización de la técnica de medición.

Dado la altura del canal de vidrio (54 cm) desde base a perfil, se considera, que para definir el perfil de velocidades, se dividirá la zona de análisis en 4 zonas cada una de ellas tendrá aproximadamente 18 cm de altura y una superposición entre ellas de aproximadamente 6cm.

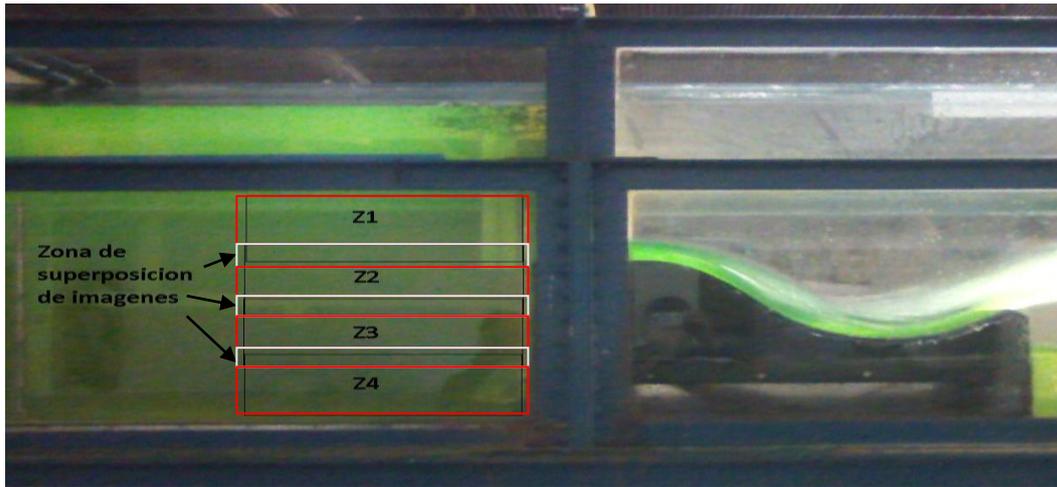


Figura 78 – Determinación de las zonas de medición

Una vez definida las zonas se procede en primer lugar tomar una imagen para poder calibrar luego en el programa PIVLAB, esto se realiza seteando la cámara del programa FlowManager en M2 8bit.

Para realizar esta calibración se procede a colocar una regla que coincide con el plano del laser y se captura la imagen, este proceso se realiza para las 4 zonas de medición.

Una vez tomada la imagen de calibración se procede a realizar la toma de imágenes para poder obtener el campo de velocidades de esa zona, para ello, se setea la cámara y el laser en el programa FlowManager en M2 8bit (cámara) y FlowSense Solo (laser).

Luego se configura la frecuencia de toma de imágenes y la cantidad de ellas (se utilizo 8hz, 100 imágenes).

Se aplica la técnica PIV (Ver Capitulo 3)

Una vez obtenidas todas las imágenes se procede a dirigirse a gabinete para el análisis de las mismas, en este caso se utiliza el programa PIVlab el cual es una aplicación del MathLab.

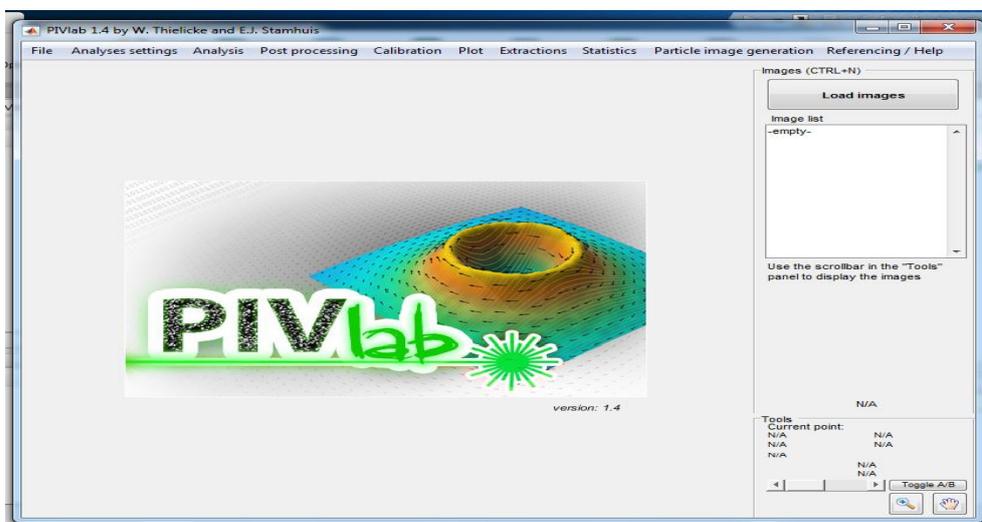


Figura 79 - PIVLAB

Para el análisis de las imágenes se carga las imágenes y se procede a eliminar los “ruidos” para que los resultados tengan el menor error posible, para ello, se elimina el fondo de las imágenes de modo que únicamente queden visiblemente las partículas a analizar. En este paso se deben cargar las imágenes y luego quitar esos “ruidos”.

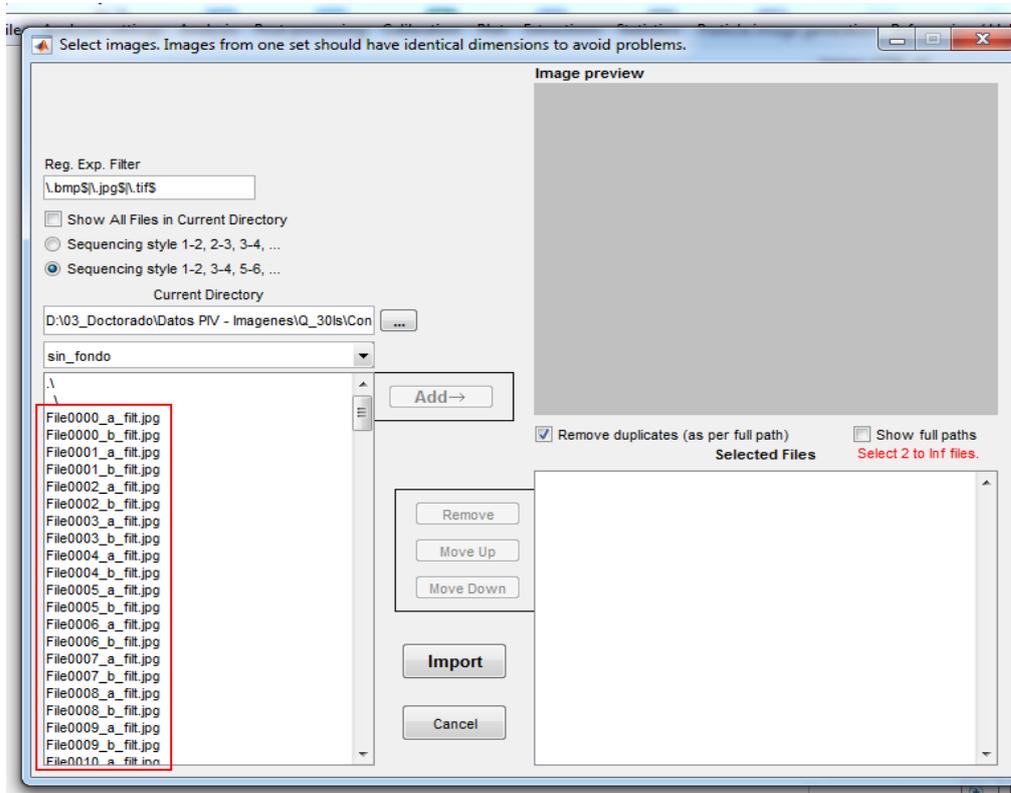


Figura 80 – Carga de imágenes en PIVLAB

Luego de cargar las imágenes el resultado es el siguiente.

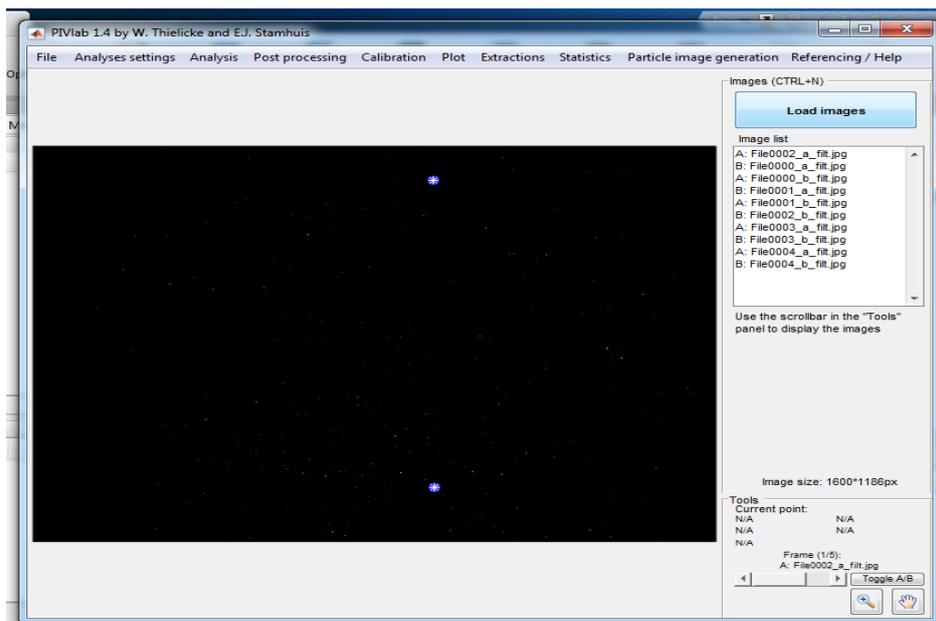


Figura 81 – Resultado de filtrado de imágenes

En este punto se deben analizar de la siguiente manera

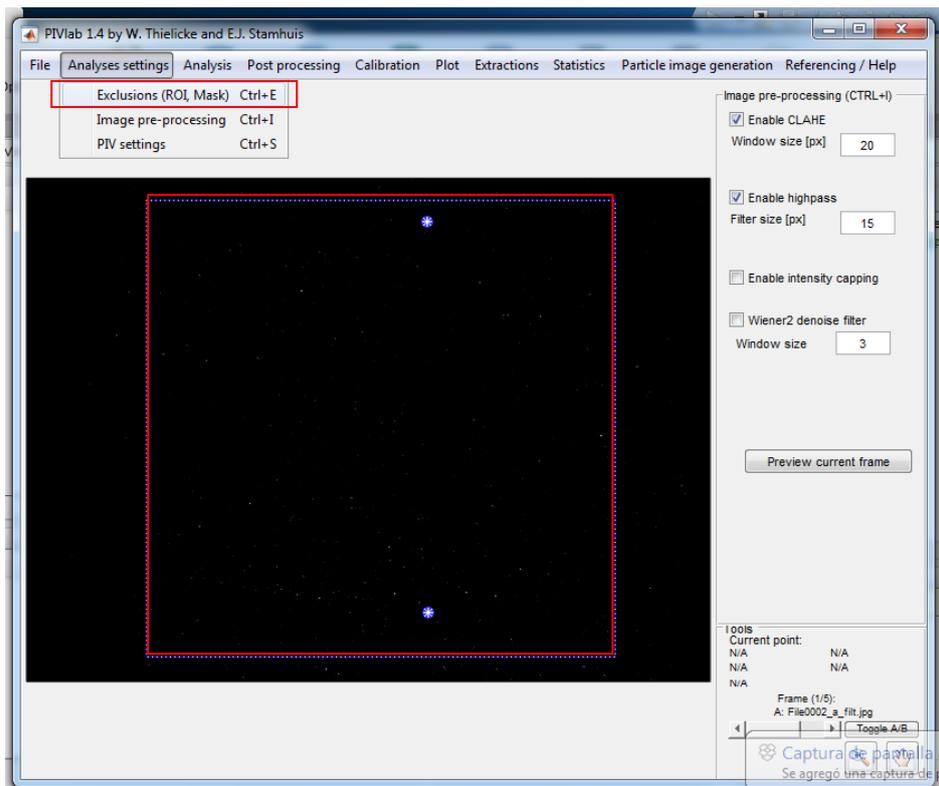


Figura 82 – Análisis de imágenes en PIVLAB

Se selecciona el tamaño de ventana a analizar (ROI), entrando a la opción marcada.

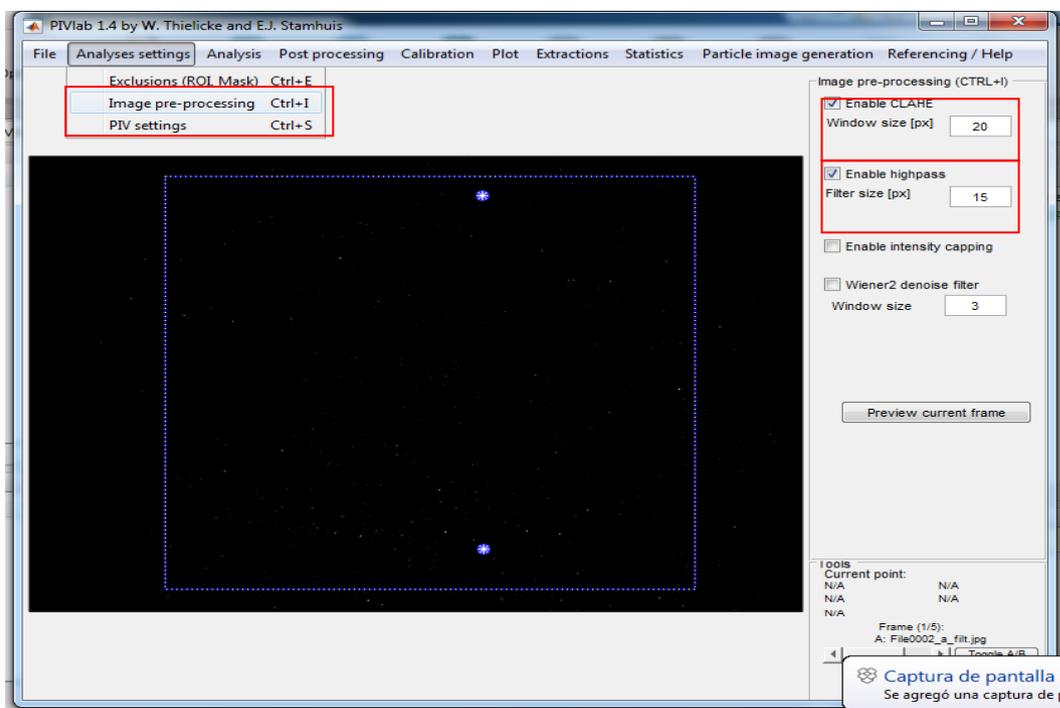


Figura 83 – Análisis de imágenes en PIVLAB

Una vez hecho esto comienza el análisis, para ello se selecciona la siguiente opción

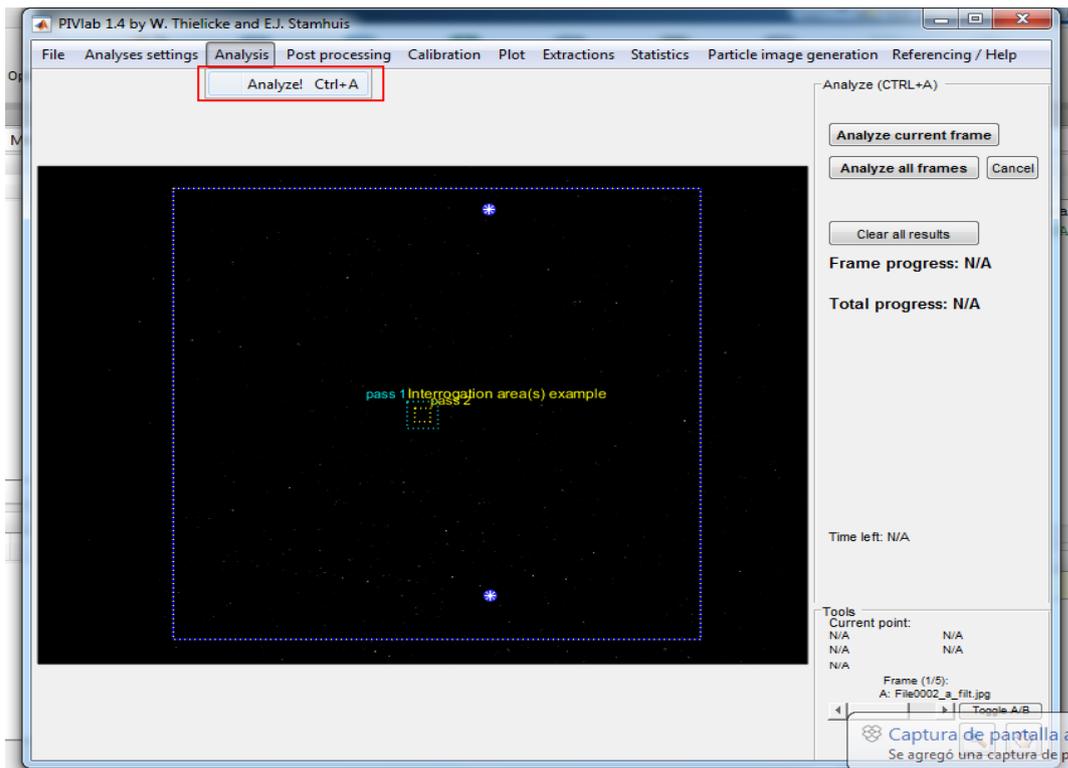


Figura 84 – Analisis de imágenes en PIVLAB

Este proceso dura varios minutos dependiendo de la configuración realizada anteriormente



Figura 85 – Calibración de imágenes en PIVLAB

Con las imágenes de calibración obtenidas durante el proceso de obtención de imágenes con la técnica PIV, se calibra la imagen de manera que se configure cuantos pixeles equivalen a una unidad métrica.

Finalmente luego de realizados todos estos pasos obtenemos un campo de velocidades tal como se indica a continuación, donde además, se puede obtener las líneas de corriente, etc.

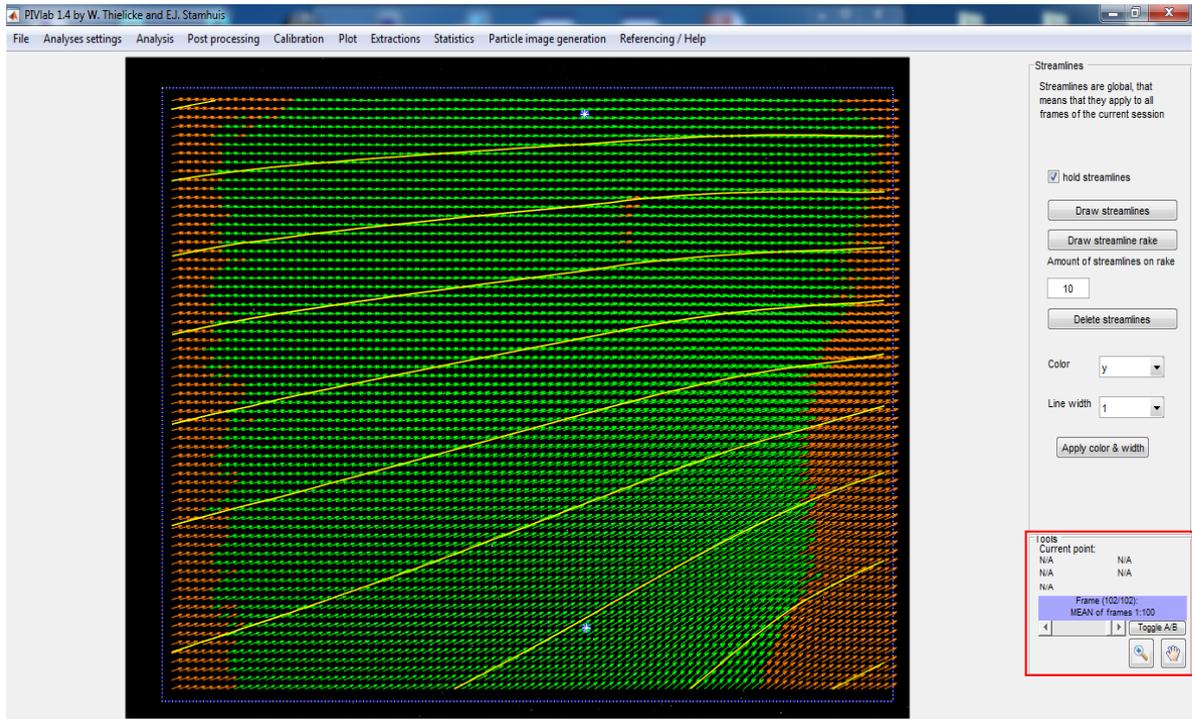
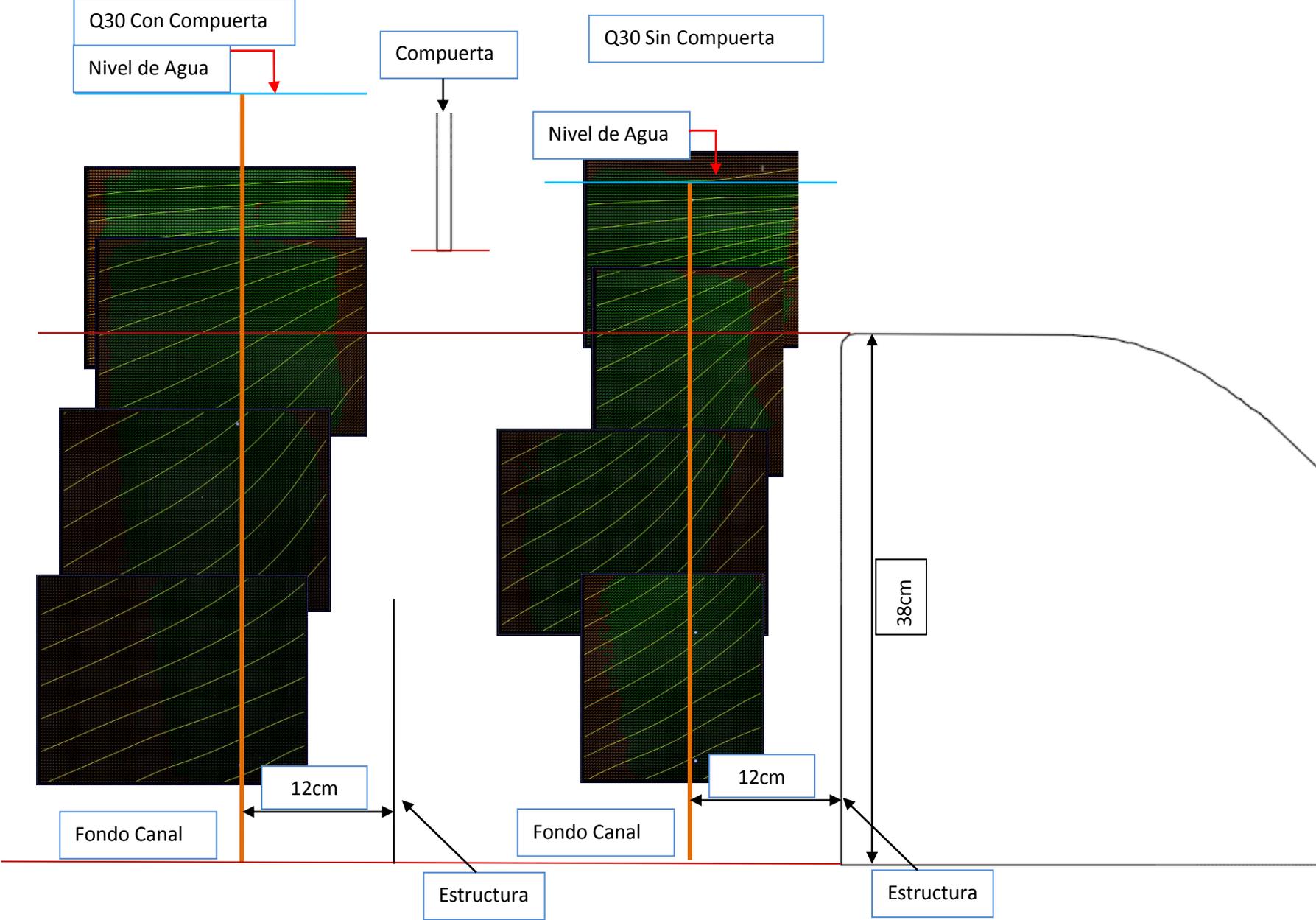


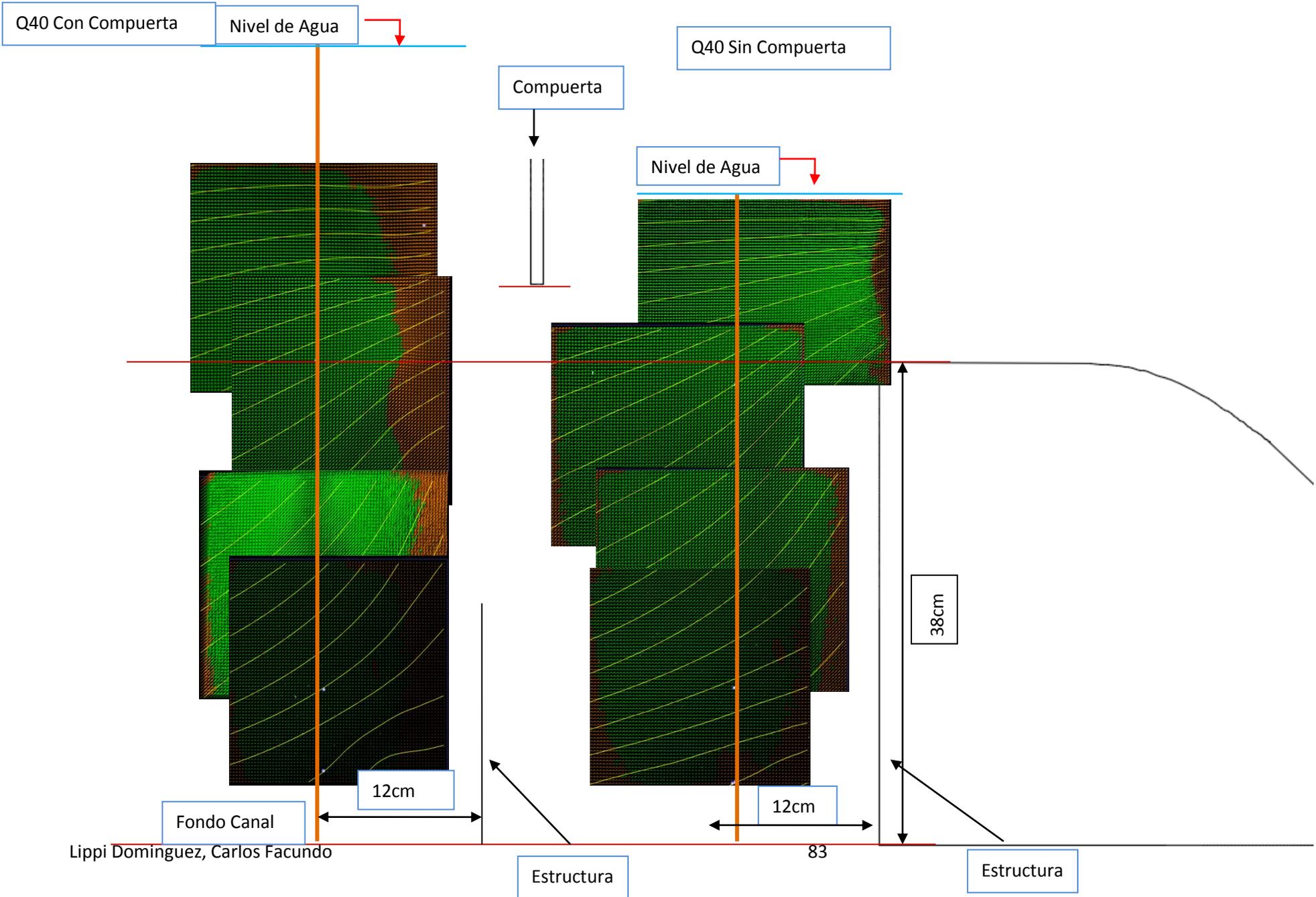
Figura 86 – Campo de velocidades y Líneas de Corriente en PIVLAB

Esta es una imagen promedio de donde se obtienen los valores de X, Y, U, V. (estos se extraen directamente de la ventana indicada como “file/extractions parameters”

5.4.1) Resultados con PIV.

A modo de clarificar los conceptos previos, en las siguientes figuras se ve el resultado de analizar cada zona de medición de la cual se obtiene una imagen promedio y de ella se pueden ver las líneas de corriente (esto se realizó para un $Q=30$ l/s y $Q=40$ l/s). Como se mencionó anteriormente el análisis será a 12 cm de la estructura, para cada escenario de modelación.





En las anteriores figuras no se observa una marcada diferencia del comportamiento del flujo a pesar de la variación del caudal (aproximadamente 10 l/s) comparando los mismos escenarios de modelación.

A continuación se analizaran cada caudal por separado ($Q = 30$ l/s y $Q = 40$ l/s), para de esta manera poder realizar una comparación de los mismos.

5.4.1.1) $Q = 30$ l/s.

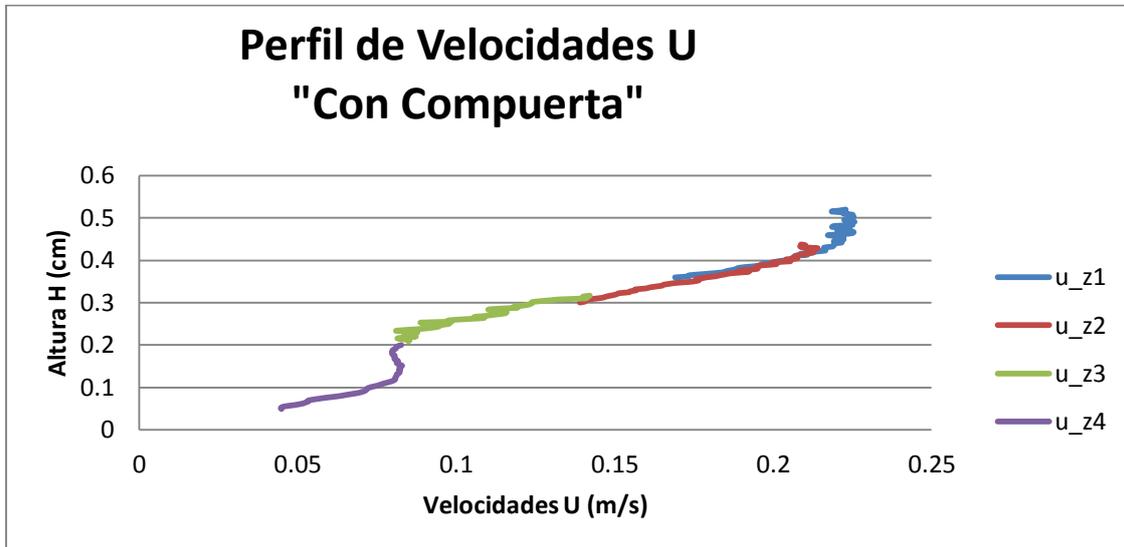


Figura 87 – Perfil de velocidades U Con Compuerta ($Q = 30$ l/s)

En el gráfico se puede observar, que crece monótonamente con la altura desde los 4cm hasta los 12 en este punto y hasta los 18cm la velocidad varía muy levemente, luego desde los 18cm hasta los 50cm la velocidad aumenta con la altura.

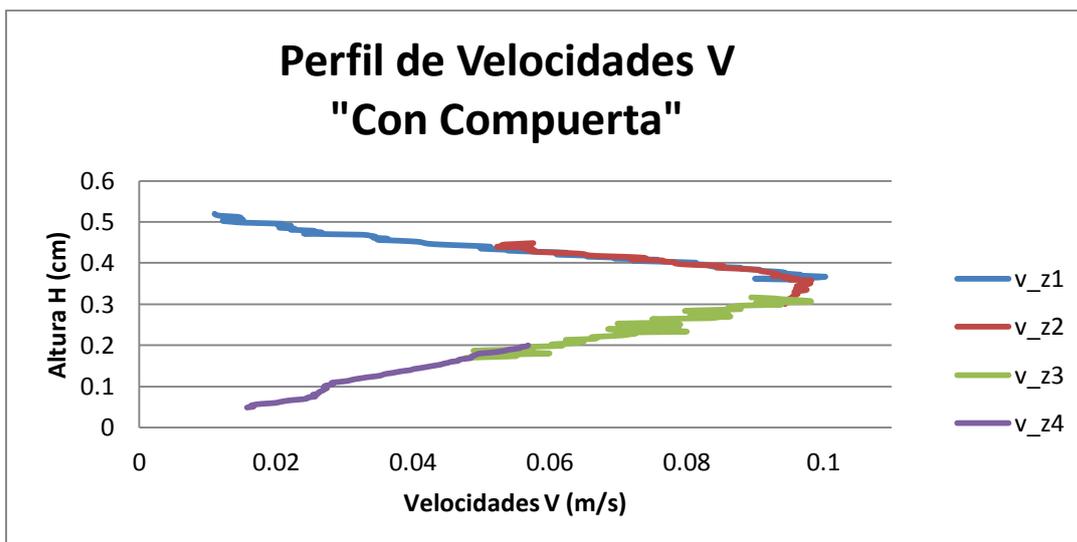


Figura 88 – Perfil de velocidades V Con Compuerta ($Q = 30$ l/s)

En el gráfico se puede ver un constante crecimiento de velocidad desde el fondo hasta aproximadamente 38 cm luego de este punto, decrece la velocidad con la altura donde aproximadamente a los 50cm la velocidad toma el mismo valor que a los 2cm.

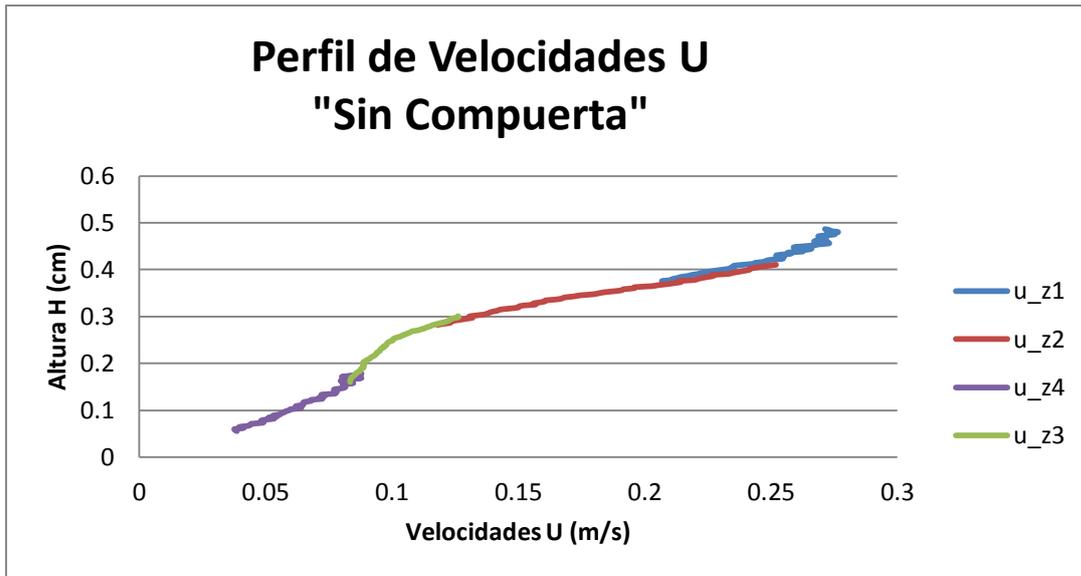


Figura 89 – Perfil de velocidades U Sin Compuerta (Q = 30 l/s)

En el gráfico se puede ver un crecimiento monótono de velocidad con la altura.

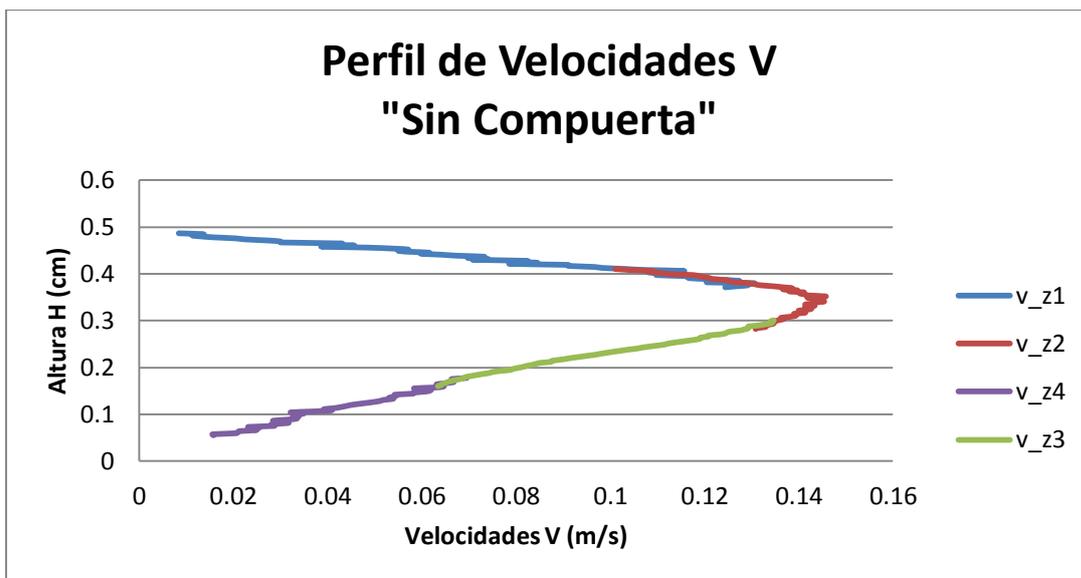


Figura 90 – Perfil de velocidades V Sin Compuerta (Q= 30 l/s)

En el gráfico se puede ver un crecimiento monótono de velocidad con la altura hasta aproximadamente los 36cm y luego la velocidad comienza a disminuir con altura, donde a los 50cm aproximadamente la velocidad toma el mismo valor que a los 2cm.

5.4.1.2) $Q = 40 \text{ l/s}$

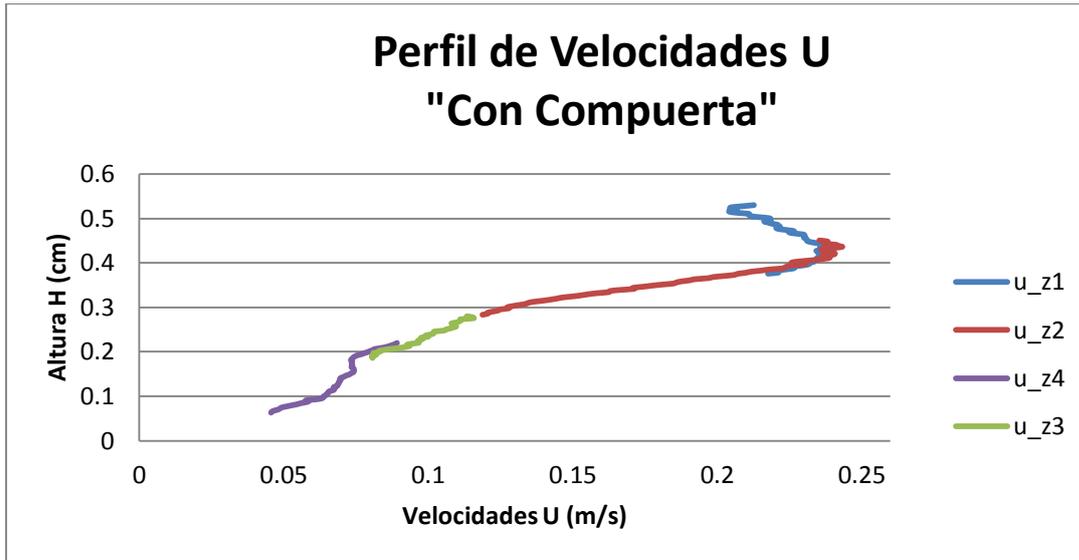


Figura 91 – Perfil de velocidades U Con Compuerta ($Q = 40 \text{ l/s}$)

En el gráfico se puede observar, que crece monótonamente con la altura desde los 4cm hasta los 16cm luego hay una variación de la velocidad pequeña, luego vuelve a crecer monótonamente hasta los 43cm y luego la velocidad decrece hasta que a los 50cm es de aproximadamente 0,22 m/s.

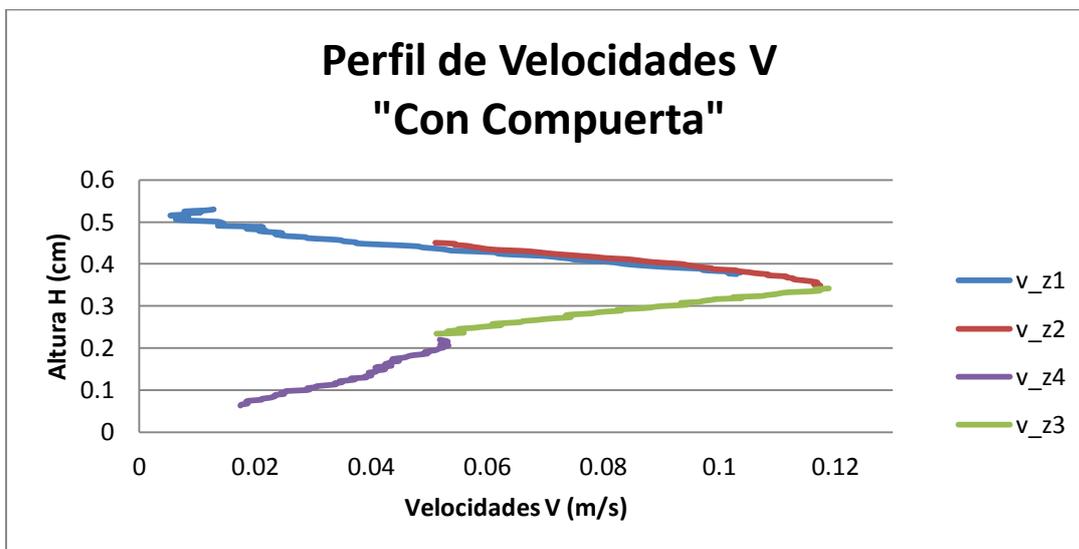


Figura 92 – Perfil de Velocidades V Con Compuerta ($Q = 40 \text{ l/s}$)

En el gráfico se puede ver un constante crecimiento de velocidad desde el fondo hasta aproximadamente 32 cm luego de ahí, decrece la velocidad con la altura donde aproximadamente a los 48cm la velocidad es casi la misma que a los 2cm.

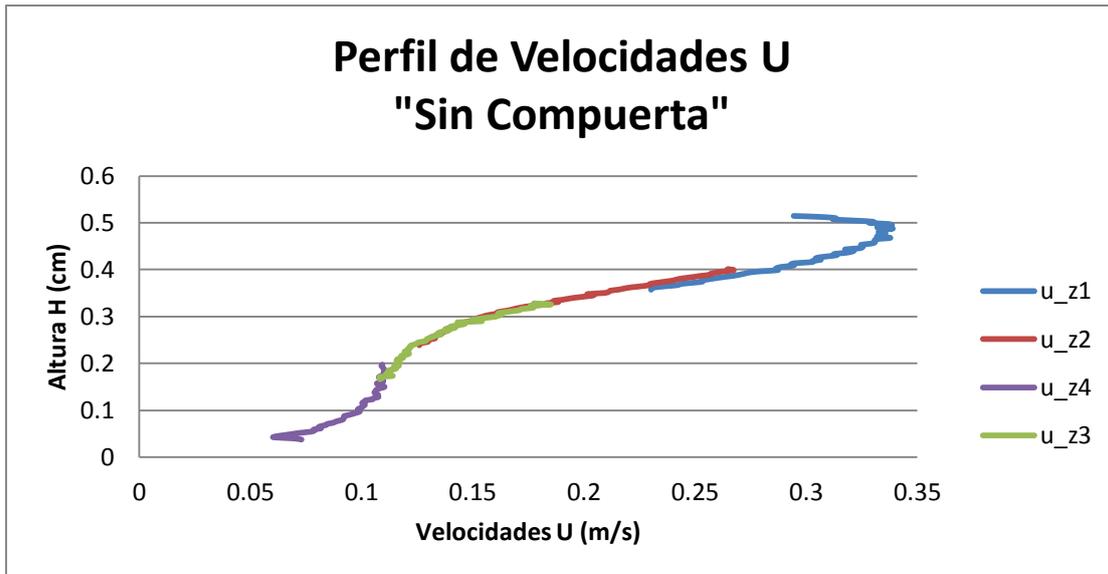


Figura 93 – Perfil de Velocidades U Sin Compuerta (Q = 40 l/s)

En el gráfico se puede ver un crecimiento monótono de velocidad con la altura hasta los 48cm y luego se observa una disminución de la velocidad con respecto a la altura.

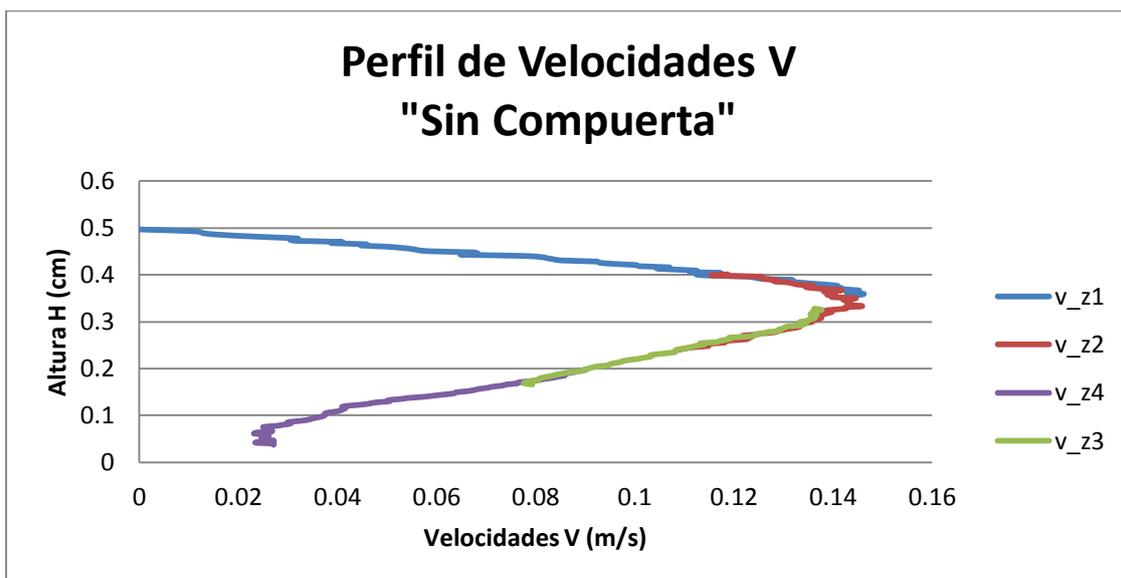


Figura 94 – Perfil de Velocidades V Sin Compuerta (Q = 40 l/s)

Se puede ver un crecimiento monótono de velocidad con la altura hasta aproximadamente los 36cm y luego la velocidad comienza a disminuir con altura, donde a los 46cm aproximadamente la velocidad toma el mismo valor que a los 2cm.

6) CAPITULO6: CONCLUSIONES

1) Curvas características de la estructura:

H-Q: Se obtuvieron las curvas de manera experimental y teórica todas presentaron el mismo comportamiento dependiendo el análisis que se realizaba si trabajaba como orificio o si trabajaba como vertedero.

Q-D: Se observó un patrón que se mantiene tanto para el caso con compuerta como para el caso sin compuerta, en ellos la diferencia entre el salto teórico y el experimental es de aproximadamente 15 cm, donde los resultados obtenidos de manera experimental siempre son menores los resultados obtenidos de manera teórica.

2) Funcionamiento de la estructura:

A lo largo de la práctica supervisada, el funcionamiento de la estructura fue óptimo para cada una de las condiciones de modelación siempre respondiendo como se lo esperaba en función del caudal utilizado.

3) Comparación de técnicas de medición de velocidad de flujo:

- Resultados:

En todos los puntos de medición se observó que entre las componentes U,V la componente con más peso es la componente U ya que siempre sus valores de velocidad media eran mayores a los de la otra dirección V

Los datos obtenidos mediante la técnica PIV tienen una dispersión menor que los datos obtenidos a partir de la técnica ADV.

Ya que se tomo como diferencia máxima un 10% entre los valores que arroja el PIV y los valores que arroja el ADV y tomando como velocidad limitante la Velocidad compuesta (V_{total}), ningún punto supero este criterio por lo que los resultados finales fueron satisfactorios.

- Técnicas:

El ADV (3D) tiene mayor resolución temporal pero muy baja resolución espacial (puntual), es fácil de realizar sus mediciones y configurar el equipo pero su tamaño es mayor y esto dificulta su traslado.

El PIV (2D) tiene una muy buena resolución espacial y buena resolución temporal (hasta 15 hz), es más complicado de realizar ya que se debe localizar la zona de medición, colocar el laser, configurar el laser, colocar el trípode, colocar la cámara, configurar la cámara, etc.

4) Perfil de velocidad obtenidos a partir de la técnica PIV:

Tanto para el caso Con Compuerta como para el caso Sin Compuerta, no se observa una diferencia marcada a la hora de esquematizar el perfil a 12 cm de la estructura (siguen un mismo patrón cambiando el Caudal).

7) BIBLIOGRAFIA

Azevedo y Acosta. (1976). *Manual de Hidraulica*. Mexico: Harla S.A.

Bardera Mora, R. (2004). *APLICACIONES DEL PIV*. Madrid.

CAUCA. (2012). *Estudio y Patronamiento de Vertederos*. Colombia: Limusa S.A.

DANTEC DYNAMICS. (2015). *DANTEC DYNAMICS*. Obtenido de <http://www.dantecdynamics.com/particle-image-velocimetry>

Farras, L. P. (Agosto de 2005). *CÁTEDRA DE HIDRÁULICA APLICADA A LA INGENIERÍA*. Obtenido de http://www.fi.uba.ar/archivos/institutos_orificios_vertederos.pdf

Laboratorio de Hidraulica UNC. (2016). Obtenido de <http://www.efn.uncor.edu/investigacion/hidraulica/>

MathWorks. (12 de Febrero de 2016). *PIV*. Obtenido de <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/27659-pivlab-time-resolved-particle-image-velocimetry--piv--tool>

Rios Varilla, D. I. (Febrero de 2014). *Repositorio Institucional PIRHUA*. Obtenido de http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_123_183_81_1150.pdf

Sotelo Avila, G. (1982). *Hidraulica General Volumen I*. Mexico: Limusa S.A.

UNAM, R. d. (2006). *Obras de descarga*. Mexico.

USBR. (26 de Noviembre de 2013). *WINADV*. Obtenido de <http://www.usbr.gov/tsc/techreferences/computer%20software/software/winadv/winadvdownload.html>

wikipedia. (26 de Septiembre de 2016). *Diagrama de Caja*. Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Diagrama_de_caja