

Universidad Nacional de Córdoba

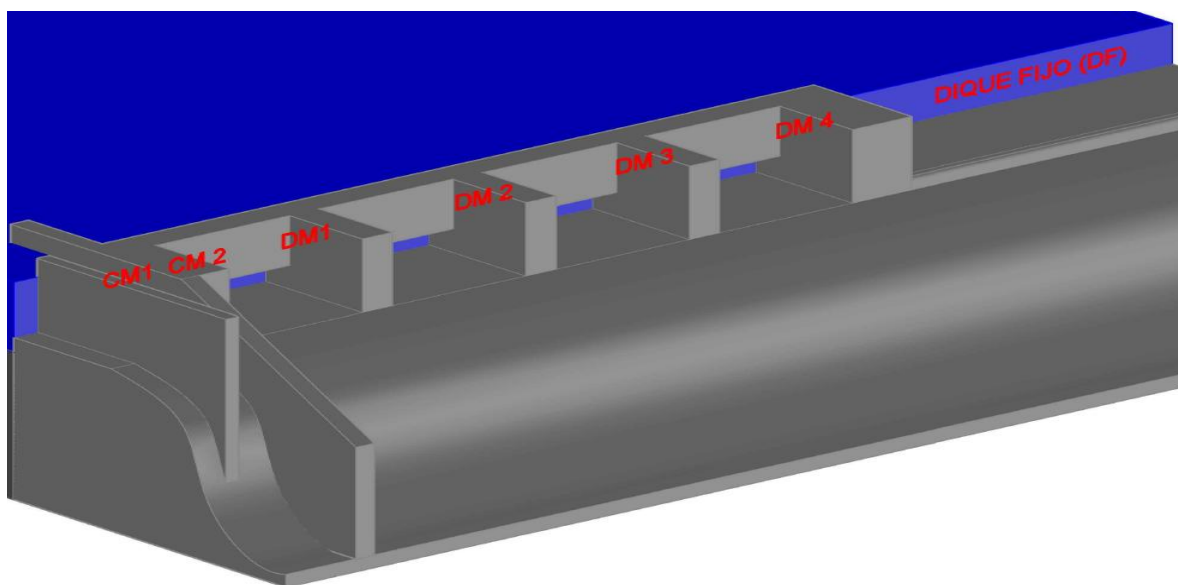
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

CETA

Centro de Estudios y Tecnología del Agua

Informe de Práctica Supervisada Carrera de Ingeniería Civil:

“Caracterización hidrodinámica del flujo de ingreso a las obras de evacuación de excedentes de la Presa Los Molinos, Jujuy”



Autor: Vaschalde, Tomás Santiago

Tuto: García, Carlos Marcelo

Supervisor externo: Moya, Gonzalo

Julio, 2013

AGRADECIMIENTOS

- A mis padres y hermanos por su apoyo incondicional.
- A mis amigos y amigas quienes estuvieron presentes en todo este largo período.
- A Carlos Marcelo García, por su paciencia, amabilidad y dedicación para sus alumnos.
- Al grupo de trabajo quienes siempre están dispuestos a ayudar y con los que hemos pasado momentos muy agradables.

TÍTULO: CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DEL FLUJO DE INGRESO A LAS OBRAS DE EVACUACIÓN DE EXCEDENTES DE LA PRESA LOS MOLINOS, JUJUY

PALABRAS CLAVES

Modelo Físico, obras hidráulicas, técnicas experimentales

RESUMEN

En esta práctica supervisada se caracteriza la hidrodinámica del flujo de ingreso a las obras de evacuación de excedentes de la Presa Los Molinos, Jujuy. Para la caracterización se han desarrollado una serie de actividades experimentales sobre el modelo físico tridimensional con similitud de Froude a escala 1:65 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 referente a la presa Los Molinos y su problemática, y se realizó un entrenamiento en el uso de técnicas de medición de velocidad de flujo para lo cual se calibraron y validaron diferentes instrumentos disponibles en el Laboratorio de Hidráulica y se implementó la técnica velocimetría por seguimiento de partículas (PTV).

Posteriormente se procedió a realizar las mediciones sobre el modelo Físico de la presa Los Molinos. Para ello se realizaron mediciones de velocidades de flujo sobre la estructura de la presa y en sus proximidades aguas arriba para diferentes condiciones experimentales. Las técnicas experimentales empleadas durante las mediciones fueron tubo Pitot estático, para la medición de velocidades sobre la estructura, y PTV para la medición de velocidad del flujo en sus proximidades aguas arriba.

Los ensayos se llevaron a cabo para diferentes condiciones experimentales que incluyen diferentes caudales en condiciones estacionarias (simulando caudales extremos y ordinarios), diferentes configuraciones de apertura de compuertas, tanto las del dique móvil como las del canal moderador; y diferentes condiciones de ingreso del flujo al modelo, ya sea que se ingrese el 100% del caudal por el Río Grande o 100% por el Río Reyes o una combinación entre estos (65% Río Grande y 35% Río Reyes según estudios hidrológicos previos). Todas las condiciones ensayadas se realizaron con fondo fijo aguas arriba de la presa, con una configuración del lecho previamente definida.

En los ensayos realizados se pudo definir el funcionamiento hidráulico de las compuertas que a pesar de que todas las compuertas del dique móvil son geoméricamente iguales hidráulicamente trabajan de forma diferente por lo que se pudo determinar cuáles de estas son las más eficientes para cada condición experimental. Algo similar se observó para las compuertas del canal moderador. Finalmente se presentaron una serie de recomendaciones para el correcto uso del modelo físico.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| CAPITULO 1: MARCO REFERENCIAL DEL TRABAJO..... | 14 |
| 1-1 Localización y descripción de la presa Los Molinos | 14 |
| 1-2 Problemática actual de la presa Los Molinos y modificaciones proyectadas | 15 |
| 1-3 Modelo Físico Los Molinos..... | 18 |
| 1-3-1 Características del modelo físico | 19 |
| 1-3-2 Componentes del Modelo Físico del Dique Los Molinos..... | 20 |
| 1-3-3 Protocolo para la operación del Modelo..... | 22 |
| 1-4 Objetivo de la práctica supervisada..... | 25 |
| 1-4-1 Objetivos generales de la práctica supervisada | 25 |
| 1-4-2 Objetivos específicos..... | 25 |
| 1-5 Metodología | 26 |
| CAPÍTULO 2: ENTRENAMIENTO EN EL USO DE TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE VELOCIDAD DEL FLUJO | 28 |
| 2-1 Introducción | 28 |
| 2-2 Calibración de molinetes y micromolinetes..... | 28 |
| 2-2-1 Objetivos de esta actividad..... | 28 |
| 2-2-2 Instrumentos utilizados | 28 |
| 2-2-3 Metodología..... | 32 |
| 2-2-4 Resultado de calibración | 34 |
| 2-2-5 Síntesis de la calibración de molinetes:..... | 45 |
| 2-2-6 Recomendaciones | 46 |
| 2-3 Verificación del funcionamiento del tubo pitot..... | 46 |
| 2-3-1 Objetivos | 46 |
| 2-3-2 Elementos utilizados..... | 46 |
| 2-3-3 Metodología..... | 48 |
| 2-3-4 Resultados de la validación | 49 |
| 2-3-5 Síntesis de la validación del Tubo Pitot..... | 51 |
| 2-3-6 Recomendaciones | 52 |
| 2-4 Implementación de PTV | 52 |
| 2-4-1 Descripción de la técnica de medición..... | 52 |
| 2-4-2 Programa para el análisis digital de imágenes..... | 55 |
| 2-4-3 Evaluación de aptitud de las partículas para seguir al flujo..... | 56 |

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 3: DISEÑO Y DESARROLLO DE ACTIVIDADES EXPERIMENTALES EN EL MODELO FÍSICO LOS MOLINOS..... | 63 |
| 3-1 Introducción | 63 |
| 3-2 Instrumental utilizado | 63 |
| 3-2-1 Técnica de medición: Tubo Pitot..... | 63 |
| 3-2-2 Técnica de medición: PTV | 63 |
| 3-3 Condiciones experimentales ensayadas | 64 |
| 3-3-1 Topografía del lecho aguas arriba del dique | 64 |
| 3-3-2 Evolución transversal de velocidades de flujo en estructuras del Dique Móvil con apertura total..... | 64 |
| 3-3-3 Evolución vertical de velocidades de flujo en estructuras del Dique Móvil. . | 66 |
| 3-3-4 Medición de velocidades de flujo en dique móvil, para diferentes configuraciones de operación de compuertas..... | 67 |
| 3-3-5 Determinación de la eficiencia de descarga de todas las estructuras móviles. | 68 |
| 3-3-6 Medición de velocidades para diferentes condiciones de ingreso..... | 69 |
| 3-4 Metodología para realización de ensayos | 70 |
| CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS..... | 73 |
| 4-1 Evolución transversal y vertical de velocidades de flujo en estructuras del Dique Móvil | 73 |
| 4-1-1 Evolución transversal de velocidades de flujo en el modelo. | 73 |
| 4-1-2 Evolución transversal de velocidades de flujo en prototipo. | 73 |
| 4-1-3 Evolución vertical de velocidades de flujo en el modelo..... | 74 |
| 4-1-4 Evolución vertical de velocidades de flujo en prototipo. | 74 |
| 4-1-5 Factores de cálculo de Velocidad Media | 75 |
| 4-1-6 Verificación de caudales escurridos en prototipo | 76 |
| 4-1-7 Comparación con ensayos realizados anteriormente en el modelo físico ... | 77 |
| 4-1-8 Síntesis | 79 |
| 4-2 Medición de velocidades en dique móvil, para diferentes configuraciones de operación de compuertas..... | 79 |
| 4-2-1 Velocidades y caudales medidos..... | 79 |
| 4-2-2 Síntesis | 81 |
| 4-3 Determinación de la eficiencia de descarga de todas las estructuras Móviles .. | 81 |
| 4-3-1 Técnica de medición: Tubo Pitot..... | 81 |
| 4-3-2 Técnica de medición: PTV | 83 |
| 4-3-3 Síntesis | 87 |
| 4-4 Medición de velocidades para diferentes condiciones de ingreso..... | 88 |

| | |
|--|------------|
| 4-4-1 Factores de cálculo velocidad media | 88 |
| 4-4-2 Técnica de medición: Tubo Pitot..... | 88 |
| 4-4-3 Técnica de medición: PTV | 89 |
| 4-4-4 Síntesis | 94 |
| CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES..... | 99 |
| 5-1 Conclusiones sobre las técnicas experimentales utilizadas..... | 99 |
| 5-2 Conclusiones sobre la situación de la presa los molinos previa a estos estudios | 99 |
| 5-3 Conclusiones sobre los ensayos realizados en el modelo físico de la presa los molinos..... | 100 |
| 5-4 Recomendaciones para futuros ensayos..... | 101 |
| 5-5 Conclusiones de la práctica supervisada..... | 101 |
| BIBLIOGRAFÍA | 102 |
| ANEXO..... | 103 |

ÍNDICE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Localización de la presa Los Molinos. Extraído de Google Earth | 14 |
| Figura 2: Planta esquemática de la presa Los Molinos | 15 |
| Figura 3: Fotografía de la presa e identificación de sus elementos componentes..... | 15 |
| Figura 4: Tarquinamiento del dique fijo | 16 |
| Figura 5: Erosión generalizada en el lecho del río | 16 |
| Figura 6: Abrasión del dique móvil. | 16 |
| Figura 7: Abrasión del dique fijo..... | 16 |
| Figura 8: Erosión localizada al pie del canal moderador | 16 |
| Figura 9: Modelo Físico Los Molinos..... | 19 |
| Figura 10: Planta esquemática de las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica..... | 20 |
| Figura 11: Cámara de aforo del Río Reyes | 21 |
| Figura 12: Cámara de carga del Río Reyes | 21 |
| Figura 13: Corte esquemático de cámara de aforo | 21 |
| Figura 14: Cámara de ingreso Río Grande | 21 |

| | |
|---|----|
| Figura 15: Estructura de cierre..... | 21 |
| Figura 16: Compuerta rebatible | 22 |
| Figura 17: Tanque volumétrico | 22 |
| Figura 18: Desarenador | 22 |
| Figura 19: Escalas graduadas en las secciones 2 y 3, aguas abajo de la presa. | 23 |
| Figura 20: Canal experimental | 29 |
| Figura 21: Planta esquemática del canal experimental | 29 |
| Figura 22: Corte esquemático del canal experimental..... | 29 |
| Figura 23: Micro ADV YSI Sontek de 16 MHz | 30 |
| Figura 24: Molinetes y Hélices calibradors..... | 31 |
| Figura 25: Micromolinete y Hélices calibrados | 31 |
| Figura 26: Contador de vueltas de Micromolinetes | 32 |
| Figura 27: Molinete de Cazoletas validado | 32 |
| Figura 28: Localización de los instrumentos en el canal durante la calibración de molinetes | 33 |
| Figura 29: Localización del instrumento en el canal durante la validación de molinete de cazoletas | 33 |
| Figura 30: Ajuste de relación lineal entre velocidades de flujo y número de vueltas del molinete 15435 y la hélice 15435-1..... | 35 |
| Figura 31: Ajuste de relación lineal entre velocidades de flujo y número de vueltas del molinete 15435 y la hélice 15430-2..... | 36 |
| Figura 32: Ajuste de relación lineal entre velocidades de flujo y número de vueltas del molinete 15435 y la hélice 15435-3..... | 37 |
| Figura 33: Ajuste de relación lineal entre velocidades de flujo y número de vueltas del molinete 15431 y la hélice 15431-1..... | 38 |
| Figura 34: Ajuste de relación lineal entre velocidades de flujo y número de vueltas del molinete 15431 y la hélice 15431-2..... | 39 |
| Figura 35: Ajuste de relación lineal entre velocidades de flujo y número de vueltas del molinete 15431 y la hélice 15431-3..... | 40 |
| Figura 36: Ajuste de relación lineal entre velocidades de flujo y número de vueltas del micromolinete 13697 y la hélice 13697-1 | 41 |

| | |
|---|----|
| Figura 37: Contraste entre curvas de calibración previas y nueva para el micromolinete 13697 y la hélice 13697-1 | 41 |
| Figura 38: Ajuste de relación lineal entre velocidades de flujo y número de vueltas del micromolinete 13697 y la hélice 13697-3..... | 43 |
| Figura 39: Contraste entre curvas de calibración previas y nueva para el micromolinete 13697 y la hélice 13697-3..... | 44 |
| Figura 40: Contraste entre velocidades medidas con ADV y molinete de eje vertical, la recta de 45° indica acuerdo perfecto entre ambas mediciones. | 45 |
| Figura 41: Corte esquemático de un Tubo Pitot Estático | 46 |
| Figura 42: Tubo Pitot utilizado | 48 |
| Figura 43: Ubicación del instrumental para la validación del tubo Pitot estático..... | 49 |
| Figura 44: Verificación del funcionamiento del tubo Pitot estático, recta a 45° indica arreglo perfecto..... | 50 |
| Figura 45: Variación del error en la medición y curva de tendencia exponencial..... | 50 |
| Figura 46: Incertidumbre porcentual en la determinación de la velocidad medida con Pitot estático, para distintos valores de ΔH (en escala logarítmica), con una precisión de ± 2 mm por lectura de ΔH (roja), con precisión de ± 1 mm (azul.)..... | 51 |
| Figura 47: Incertidumbre porcentual en la determinación de la velocidad medida con Pitot estático, para distintos valores de velocidad (en escala logarítmica), con una precisión de ± 2 mm por lectura de ΔH (roja), con precisión de ± 1 mm (azul.)..... | 51 |
| Figura 48: Cámara y soporte | 53 |
| Figura 49: Grilla de calibración | 53 |
| Figura 50: Mira topográfica | 53 |
| Figura 51: Partículas Discos Plásticos | 53 |
| Figura 52: Partículas Plásticas Negras | 53 |
| Figura 53: Partículas Esféricas Blancas..... | 53 |
| Figura 54: Verticalidad de la cámara frente a la superficie a analizar..... | 55 |
| Figura 55: Programa PTVlab. | 55 |
| Figura 56: Algoritmo del programa..... | 56 |
| Figura 57: Magnitud de velocidades medias de flujo [m/seg.] en ensayo con Partículas Esféricas Blancas | 57 |
| Figura 58: Trayectorias de Partículas Esféricas Blancas | 57 |

| | |
|--|----|
| Figura 59: Líneas de Corriente en ensayo con Partículas Esféricas Blancas | 58 |
| Figura 60: Sección analizada | 58 |
| Figura 61: Perfil transversal de velocidades [m/seg.] de la sección analizada..... | 58 |
| Figura 62: Magnitud de velocidades medias de flujo [m/seg.] en ensayo de Partículas Plásticas Negras..... | 59 |
| Figura 63: Trayectorias de Partículas Plásticas Negras | 60 |
| Figura 64: Líneas de Corriente en ensayo de Partículas Plásticas Negras | 60 |
| Figura 65: Sección analizada | 60 |
| Figura 66: Perfil transversal de velocidades [m/seg.] de la sección analizada..... | 61 |
| Figura 67: Comparación entre las velocidades de flujo registradas en las secciones de análisis con los diferentes tipos de partículas | 61 |
| Figura 68: Denominación de los componentes del dique | 63 |
| Figura 69: Topografía del lecho aguas arriba de la presa | 64 |
| Figura 70: Planta de Dique Móvil localización de puntos de medición | 65 |
| Figura 71: Representación en 3D del dique Móvil y localización de puntos de medición | 65 |
| Figura 72: Planta Esquemática de la configuración adoptada..... | 66 |
| Figura 73: Corte Esquemático de una Compuerta del Dique Móvil | 66 |
| Figura 74: Planta esquemática del procedimiento del ensayo para la compuerta DM1 | 67 |
| Figura 75: Ubicación del tubo Pitot en la compuerta DM3..... | 70 |
| Figura 76: Velocidades de flujo [m/seg] en prototipo de cada compuerta ensayo del 4 de abril del 2013. | 74 |
| Figura 77: Evolución vertical de velocidades [m/seg.] en prototipo de cada compuerta del ensayo del 8 de abril del 2013..... | 75 |
| Figura 78: Velocidades medias de flujo [m/seg] registradas en el ensayo realizado el 28 de noviembre 2013 ($Q=600 \text{ m}^3/\text{s}$) | 78 |
| Figura 79: Líneas de corriente correspondientes al ensayo realizado el 28 de noviembre 2013 ($Q=600 \text{ m}^3/\text{s}$) | 78 |
| Figura 80: Trayectorias de partículas correspondientes al ensayo realizado el 28 de noviembre 2013 ($Q=600 \text{ m}^3/\text{s}$) | 79 |

| | |
|---|----|
| Figura 81: Variación de las velocidades medias de cada compuerta para cada parte del ensayo..... | 81 |
| Figura 82: Velocidades medias, mínimas y máximas en prototipo [m/seg.]..... | 82 |
| Figura 83: Magnitud de velocidades medias de flujo [m/seg] registradas en la Etapa 5 del ensayo..... | 83 |
| Figura 84: Trayectorias de las partículas registradas en la Etapa 5 del ensayo | 83 |
| Figura 85: Magnitud de velocidades medias de flujo [m/seg] registradas en la Etapa 6 del ensayo | 84 |
| Figura 86: Trayectorias de las partículas registradas en la Etapa 6 del ensayo | 84 |
| Figura 87: Magnitud de velocidades medias de flujo [m/seg.] registradas en la Etapa 7 del ensayo | 85 |
| Figura 88: Trayectorias de las partículas registradas en la Etapa 7 del ensayo | 85 |
| Figura 89: Magnitud de velocidades medias de flujo [m/seg] registradas en la Etapa 8 del ensayo | 85 |
| Figura 90: Trayectorias de las partículas registradas en la Etapa 8 del ensayo | 86 |
| Figura 91: Magnitud de velocidades medias de flujo [m/seg.] registradas en la Etapa 9 del ensayo | 86 |
| Figura 92: Trayectorias de las partículas registradas en la Etapa 9 del ensayo | 87 |
| Figura 93: Velocidades, medias mínimas y máximas en prototipo | 89 |
| Figura 94: Magnitud de velocidades medias de flujo [m/seg.] registradas en la Etapa 10 del ensayo | 89 |
| Figura 95: Trayectorias de las partículas registradas en la Etapa 10 del ensayo | 90 |
| Figura 96: Magnitud de velocidades medias de flujo [m/seg.] registradas en la Etapa 11 del ensayo | 91 |
| Figura 97: Trayectorias de partículas registradas en la Etapa 11 del ensayo..... | 91 |
| Figura 98: Magnitud de velocidades medias de flujo [m/seg.] registradas en la Etapa 12 del ensayo | 92 |
| Figura 99: Trayectorias de las partículas registradas en la Etapa 12 del ensayo | 92 |
| Figura 100: Obstáculos analizados | 93 |
| Figura 101: Vectores, Velocidades medias de flujo y Líneas de corriente sobre pila izquierda..... | 93 |

| | |
|--|----|
| Figura 102: Vectores, Velocidades medias de flujo y Líneas de corriente sobre pila derecha..... | 94 |
| Figura 103: Sección de análisis | 96 |
| Figura 104: Perfiles de Velocidades en una sección ubicada a 31 cm del dique móvil para cada una de las partes del ensayo..... | 96 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Calibración del molinete 15435 hélice 15435-1 | 34 |
| Tabla 2: Calibración del molinete 15435 hélice 15430-2 | 35 |
| Tabla 3: Calibración del molinete 15435 hélice 15435-3 | 36 |
| Tabla 4: Calibración del molinete 15431 hélice 15431-1 | 37 |
| Tabla 5: Calibración del molinete 15431 hélice 15431-2 | 38 |
| Tabla 6: Calibración del molinete 15431 hélice 15431-3 | 39 |
| Tabla 7: Calibración del micromolinete 13697 hélice 13697-1 | 40 |
| Tabla 8: Diferencias porcentuales entre las diferentes curvas de calibración..... | 42 |
| Tabla 9: Calibración del micromolinete 13697 hélice 13697-3 | 42 |
| Tabla 10: Diferencias porcentuales entre las diferentes curvas de calibración..... | 44 |
| Tabla 11: Validación de molinete de eje vertical | 44 |
| Tabla 12: Diferencias porcentuales entre las mediciones del ADV y el molinete..... | 45 |
| Tabla 13: Resultados de la validación del tubo Pitot | 49 |
| Tabla 14: Evolución de caudales ensayados en experiencia del día jueves 4 de abril.65 | |
| Tabla 15: Evolución de caudales relevados en el ensayo. | 66 |
| Tabla 16: Procedimiento del ensayo. | 67 |
| Tabla 17: Evolución de los caudales relevados en el ensayo..... | 68 |
| Tabla 18: Procedimiento del ensayo | 69 |
| Tabla 19: Evolución de caudales del ensayo | 69 |
| Tabla 20: Caudales ensayados para cada parte | 70 |

| | |
|--|----|
| Tabla 21: Evolución transversal de velocidades del flujo registrados en cada compuerta..... | 73 |
| Tabla 22: Evolución vertical de velocidad de flujo [m/seg.] registradas en el centro de cada compuerta. | 74 |
| Tabla 23: Velocidades medias en la transversal y factor de cálculo de velocidad media horizontal..... | 76 |
| Tabla 24: Velocidades medias en la vertical y factor de cálculo de velocidad media vertical..... | 76 |
| Tabla 25: Factor de cálculo de velocidad media de flujo..... | 76 |
| Tabla 26: Áreas de Compuertas..... | 76 |
| Tabla 27: Velocidades medias de flujo y caudales estimados en prototipo para ensayo del 4 de abril del 2013..... | 77 |
| Tabla 28: Velocidades y caudales estimados en prototipo para ensayo del 8 de abril del 2013..... | 77 |
| Tabla 29: Velocidades y caudales en prototipo para cada condición ensayada..... | 80 |
| Tabla 30: Velocidades y caudales en prototipo con datos estadísticos relevantes..... | 81 |
| Tabla 31: Diferencias porcentuales entre caudales aforados y caudales calculados. . | 82 |
| Tabla 32: Factores de cálculo de velocidad media para dique móvil y canal moderador..... | 88 |
| Tabla 33: Velocidades, caudales en prototipo y error en la medición..... | 88 |
| Tabla 34: Porcentajes de caudales evacuados por cada una de las compuertas..... | 95 |
| Tabla 35: Caudales registrados y velocidades medias registradas en la sección de análisis..... | 97 |

CAPÍTULO 1: Marco referencial del trabajo.

CAPITULO 1: MARCO REFERENCIAL DEL TRABAJO

1-1 LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA PRESA LOS MOLINOS

La presa derivadora Los Molinos es una obra hidráulica situada en la Provincia de Jujuy, República Argentina. La misma se encuentra un kilómetro río abajo de la confluencia de los ríos Reyes y Grande a pocos kilómetros de la ciudad de San Salvador de Jujuy (ver Figura 1). El objetivo de esta obra es abastecer de agua para riego a la región.

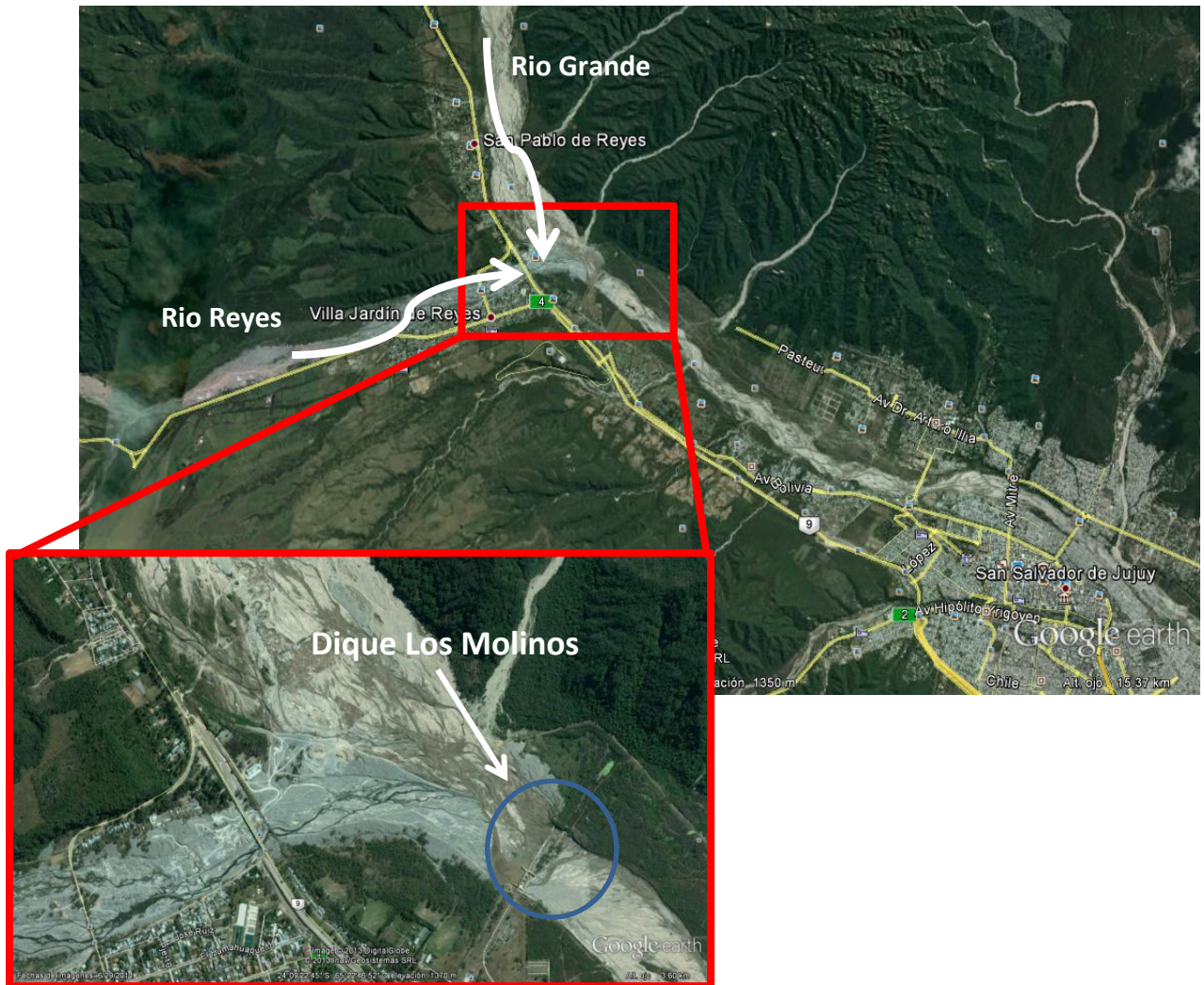


Figura 1: Localización de la presa Los Molinos. Extraído de Google Earth

La presa está constituida por los siguientes elementos (ver Figura 2 y Figura 3):

- Terraplén de materiales sueltos de 340 metros de longitud y 13.1 metros de altura.
- Un vertedero fijo que se denomina en este informe como dique fijo de 200 metros de longitud.
- Un vertedero controlado por compuertas circulares que se denomina como dique móvil de 70 metros de longitud con vanos cada 15 metros.
- Un canal de limpieza de 10 metros de longitud al cual se llama canal moderador.

- Una obra de toma que desvía un caudal máximo 25 m³/s para el abastecimiento de agua para consumo y riego.
- Terraplén de materiales sueltos de 440 metros de longitud y 12.3 metros de altura.

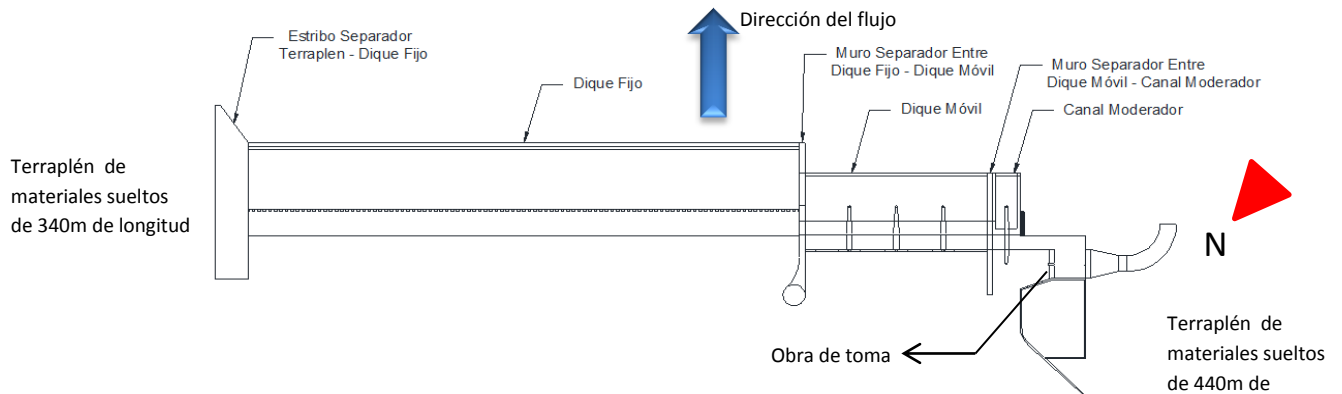


Figura 2: Planta esquemática de la presa Los Molinos

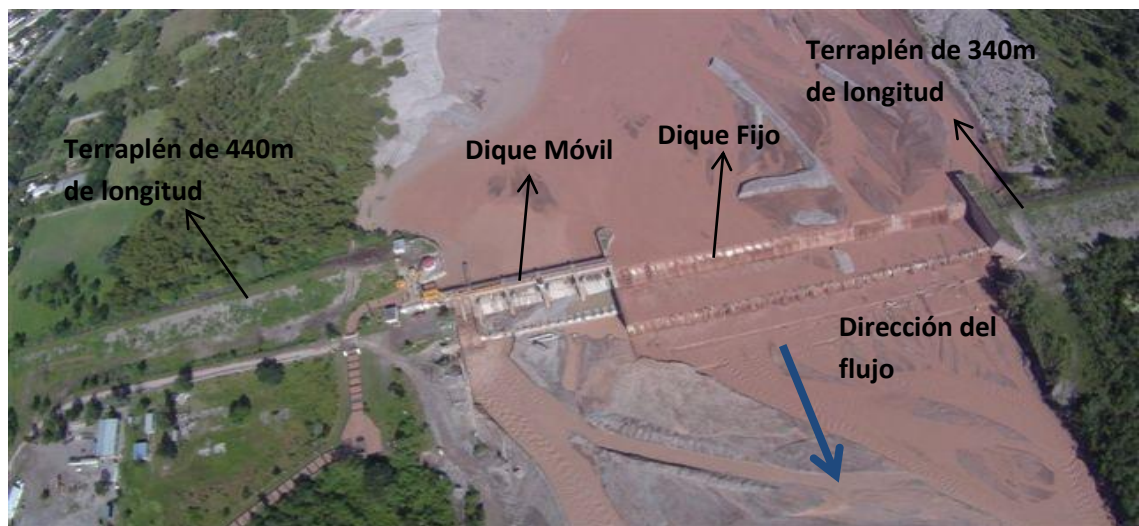


Figura 3: Fotografía de la presa e identificación de sus elementos componentes

1-2 PROBLEMÁTICA ACTUAL DE LA PRESA LOS MOLINOS Y MODIFICACIONES PROYECTADAS

La presa Los Molinos actualmente presenta los siguientes problemas asociados a diversas causas naturales como:

- **Sedimentación y tarquinamiento** aguas arriba de la presa, debido al gran acarreo de materiales transportados por el río (ver Figura 4).
- **Erosión generalizada del lecho** aguas debajo de la presa, lo cual hace que peligre la estabilidad de esta (ver Figura 5).
- Debido a la colmatación de la presa empezó a generarse aporte de material desde aguas arriba hacia aguas abajo, esto genero una gran **abrasión** en el perfil de vertedero y pileta de aquietamiento del dique fijo, cresta del vertedero del dique móvil y dientes disipadores (ver Figura 6 y Figura 7).
- **Erosiones locales** importantes aguas debajo de las obras de descarga, particularmente aguas abajo del canal moderador. Estas erosiones a pie de presa comprometen la estabilidad de la misma (ver Figura 8).

- **Falta de mantenimiento** en las obras civiles y electromecánicas que no permiten el adecuado manejo de las obras de descarga. En especial las que presentan componentes móviles (por ej. Compuertas).



Figura 4: Tarquinamiento del dique fijo



Figura 5: Erosión generalizada en el lecho del río



Figura 6: Abrasión del dique móvil.



Figura 7: Abrasión del dique fijo.



Figura 8: Erosión localizada al pie del canal moderador

La verificación de la estabilidad del dique fijo demostró la importancia del correcto funcionamiento del sistema de drenes. Se verificó "In Situ" un importante número de drenes total o parcialmente ocluidos, por lo que se decidió diseñar un nuevo sistema de drenaje complementario. Este sistema se construirá mediante la perforación de las losas del cuenco amortiguador hasta el dren natural sobre el que se apoyan, colocando luego caños de PVC protegidos por un geotextil.

Las condiciones de erosión generalizada que presenta el lecho del río Grande desde aguas abajo de las obras del dique derivador Los Molinos, significa un descenso del mismo del orden de 5 a 6 m. Ello está acompañado por un descenso del nivel de agua de magnitud semejante, por lo cual el esquema de disipación de energía previstos para los cuencos amortiguadores del dique fijo, dique móvil y canal moderador no se cumplirán.

Realizada la verificación de las condiciones de funcionamiento de las obras para estas nuevas condiciones, se definió la necesidad de instalar una obra nueva que refuerce la seguridad del sistema para crecientes extremas en el río. Dicha obra consiste en la construcción de una pantalla protectora vertical de hormigón armado, a lo largo de todo el perímetro de las obras y yuxtapuesta a los dientes finales de cada uno de los cuencos del dique fijo, dique móvil y canal moderador. Esta pantalla será construida de acuerdo a la técnica de "muros colados", con altura de 15 m en su desarrollo principal, y 18 m en coincidencia con el muro lateral del canal moderador. Su espesor será de 0,8 m y será construido con hormigón armado tipo H25. La armadura fue calculada a partir de la sollicitación que surge de la flexión máxima del muro después de un proceso erosivo aguas abajo asociada al caudal máximo con que puede operar cada estructura.

Las modificaciones experimentadas durante los más de 30 años de operación de las obras, tal como se han descripto, evidencian la necesidad de ejecutar un nuevo estudio sobre modelo físico de las obras en su estado actual, a fin de contar con una herramienta de verificación, ajuste y optimización de:

A - Las hipótesis realizadas.

B - Las acciones propuestas como intervenciones en la obra para controlar los riesgos de descalce que pudieran existir.

C - La tipología de maniobras a realizar con las compuertas del dique móvil y el canal moderador en los distintos eventos, para mejorar la seguridad y operatividad de las obras.

Las obras descriptas tienen como objetivo principal aumentar la seguridad actual de la presa. Como complemento se diseñó un sistema de auscultación de las estructuras que permitirá controlar su comportamiento durante el funcionamiento de la obra. El proyecto de la instrumentación prevé la instalación de instrumentos para controlar los valores de presiones en la zona fundación (contacto fundación – estructuras), y los desplazamientos entre módulos de estructuras de hormigón. Cabe señalar que en la actualidad la presa no cuenta con ningún instrumento de auscultación.

Como parte de las tareas de rehabilitación integral de la presa y buscando mejorar la operatividad y seguridad de la obra, se proyectaron reparaciones y mantenimientos extraordinarios para los componentes hidromecánicos y las instalaciones eléctricas. El primero abarca a todas las compuertas del dique móvil y del desarenador y el desripador ubicados aguas abajo de la toma, así como a las grúas pórtico que en la actualidad se utilizan para la operación y limpieza de dichas compuertas.

En el caso particular de las cuatro compuertas radiales del dique móvil, fundamentales para la correcta operación del dique y actualmente con un importante grado de deterioro, se prevé la instalación de un sistema de accionamiento oleohidráulico.

Las instalaciones y equipamientos eléctricos del dique están en general en un estado cercano al agotamiento de su vida útil. Existe un considerable grado de inseguridad para los operarios, y el sistema no encuadrada en las actuales normativas vigentes. Se decidió por lo tanto realizar un proyecto de refuncionalización integral de las instalaciones, que buscará restablecer y mejorar las condiciones originales del proyecto eléctrico en la presa.

Se analizaron diversas alternativas de reparación de las superficies dañadas del dique, concentrándose primordialmente en el reemplazo de la capa superficial del material perdido por abrasión.

Con el objeto de reparar las distintas zonas afectadas por procesos erosivos, se diseñaron distintas alternativas metodológicas en función de la magnitud del daño original y de la sección de la estructura en cuestión. En el caso del dique fijo, se recuperó el perfil original, aumentando la durabilidad de la rápida del vertedero y del sector del cuenco disipador más cercano a dicha rápida. Se adoptó un nuevo perfil de los disipadores de superficies alternadas de los cuencos amortiguadores Gandolfo-Cotta del dique móvil y el canal moderador, con la intención de que presenten un perfil único y evitar la existencia de zonas de abrasión diferencial. Se recuperó también el perfil original de la rápida del dique móvil y del canal moderador, que en la actualidad presentan severos daños por abrasión.

En general, la estrategia de reconstrucción seleccionada consistió en revestir la estructura con materiales resistentes a la erosión por abrasión que supere el desempeño evidenciado por los materiales originales. En aquellos sectores donde la extensión del daño era significativa se proyectó la colocación de un revestimiento de hormigón de alta resistencia tipo H60 según definición del reglamento CIRSOC 201-2005, de espesor variable (mínimo 10 cm).

Finalmente, se planteó la reparación de las juntas de contracción existentes en aquellos sectores donde se encontraban deterioradas por falta de sellado, erosión de los bordes en distinto grado y en algunos casos incluso la presencia de armadura expuesta.

Después de terminadas las tareas de reparación propuestas y de la puesta en servicio de la estructura, se prevé a lo largo de su vida útil tareas de reparaciones menores y tareas de mantenimiento e inspección de rutina.

El conjunto de medidas adoptadas pretende restituir la capacidad operativa del dique y generar, a partir de una mejora sustantiva en la operatividad de las compuertas, condiciones de derivación adecuadas para la toma del canal del Río Grande.

1-3 MODELO FÍSICO LOS MOLINOS

Para evaluar a priori las modificaciones propuestas, se realizó el Modelo Físico Los Molinos construido en el predio del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la UNC (ver Figura 9).



Figura 9: Modelo Físico Los Molinos

1-3-1 Características del modelo físico

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 escala y las capacidades del Laboratorio (capacidad de bombeo, espacio disponible, entre otros.)

1-3-1-1 Características hidráulicas e hidrológicas

Los ensayos se realizaron con caudales constantes en el tiempo (régimen estacionario), iguales a los correspondientes picos de los hidrogramas de aporte, para las condiciones hidrológicas definidas.

1-3-1-2 Área de estudio

El modelo físico representa todas las estructuras presentes en el cuerpo de la presa, incluyendo entre otras, los cierres y las tres estructuras de control (presa móvil, presa fija, y canal moderador), conjuntamente con sus respectivos órganos de regulación (compuerta sector, compuerta plana, etc.)

Agua arriba, el dominio de análisis del modelo físico se extiende a través de un desarrollo longitudinal, tanto sobre el río Grande como sobre el río Reyes, representando el cauce hasta unos 1.000 m aguas arriba de la presa, de modo tal que asegure la correcta representación de los parámetros hidrodinámicos, hidráulicos y sedimentológicos que afectan al comportamiento y desempeño de las estructuras a analizar.

Particularmente en el río Reyes, el desarrollo de la modelación incluye la representación en escala de los puentes presentes en proximidades del área de desembocadura, en la Ruta Nacional N° 9 y el ex. FF CC General Belgrano.

La longitud representada aguas abajo del cuerpo de la presa (500 m en prototipo) se ha definido de tal forma que las condiciones de borde no afecten los procesos hidráulicos y sedimentológicos bajo estudio.

1-3-2 Componentes del Modelo Físico del Dique Los Molinos

Los elementos que componen del modelo son:

- **Cisterna:** se encuentra dentro de las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica, es de forma anular y tiene una capacidad de almacenamiento de 65 m^3 .
- **Bombas tipo flight:** el laboratorio posee dos bombas, de tipo centrífugas y sumergibles; tienen una capacidad de bombeo de 70 l/seg. cada una, y con una altura de carga de 2 metros.
- **Cámaras de Aforo:** ubicadas en el exterior, tienen la función de medir los caudales que circulan en los ríos de los modelos, ya sea río Reyes o Cañada, y los ríos Grandes o Suquía (ver Figura 11 y Figura 13).
- **Cámara de Carga:** recinto donde se selecciona el modelo por donde circulará el agua, consta de compuertas que permiten optar por la utilización del modelo Los Molinos o el del Río Suquía (ver Figura 12).
- **Cámara de Ingreso:** están dispuestas en el extremo aguas arriba de los ríos Grande y Reyes. Su función es la de aquietar y distribuir el agua que proviene de las cámaras de carga, para simular las condiciones hidrológicas reales (ver Figura 14).
- **Obra de Cierre:** está constituida por márgenes derecha e izquierda, dique fijo (DF), dique móvil (DM), canal moderador (CM) y obra de toma (ver Figura 15).
- **Compuerta Rebatible:** se trata de una compuerta, cuya altura se regula a través de un tornillo, tiene la finalidad de simular las condiciones hidrológicas del río aguas abajo de la presa (ver Figura 16).
- **Tanque Volumétrico:** es el recinto donde se miden caudales de egreso del modelo, como medida de control y comparación de los medidos en las cámaras de aforo (ver Figura 17).
- **Sedimentador o Desarenador:** espacio donde al agua sedimenta la arena erosionada en los tramos de fondo móvil; luego la conduce, a través del retorno, a la cisterna (ver Figura 18).

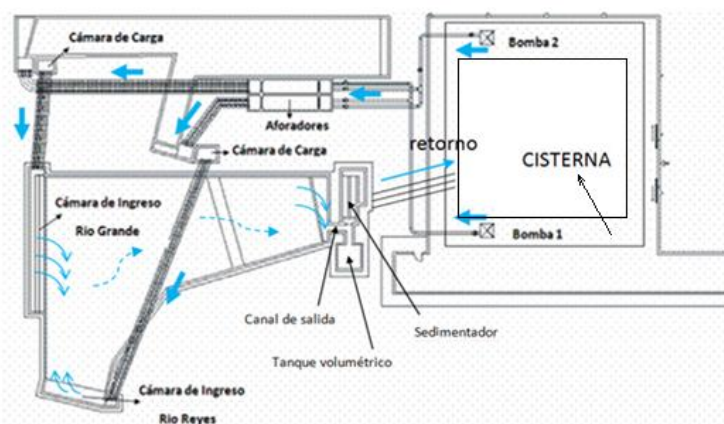


Figura 10: Planta esquemática de las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica



Figura 11: Cámara de aforo del Río Reyes



Figura 12: Cámara de carga del Río Reyes

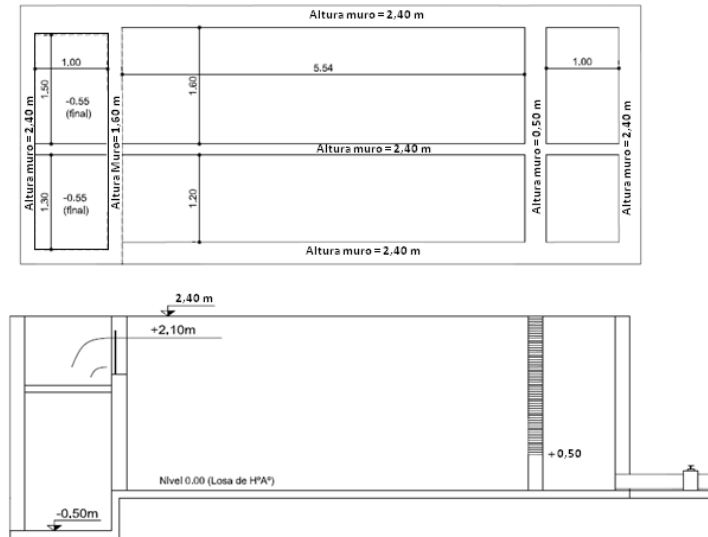


Figura 13: Corte esquemático de cámara de aforo



Figura 14: Cámara de ingreso Río Grande



Figura 15: Estructura de cierre



Figura 16: Compuerta rebatible



Figura 17: Tanque volumétrico

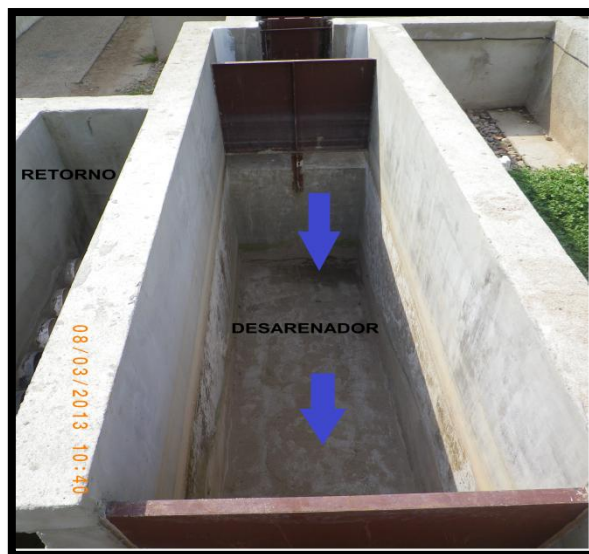


Figura 18: Desarenador

1-3-3 Protocolo para la operación del Modelo

La correcta operación del modelo requiere la realización de actividades antes y durante cada ensayo y en el proceso de apagado. Así se garantiza el correcto funcionamiento y la obtención de resultados representativos. A continuación se enumeran estas actividades.

1-3-3-1 Actividades a realizar el día anterior al ensayo

- 1- Verificar el nivel de cisterna (debe encontrarse en su nivel máximo)
- 2- Llenar tanques volumétricos (el del modelo Dique Los Molinos y el del modelo Presa Los Monos, que se encuentra en el interior del Laboratorio de Hidráulica) para asegurar el volumen de agua necesario para la operación.
- 3- Verificar niveles de canales de aforos, deben estar llenos.
- 4- Verificar cámaras de carga (se deben llenar y verificar que la configuración de las compuertas sea la indicada para su funcionamiento).
- 5- Verificar que las dos cámaras de ingreso estén llenas.

- 6- Verificar con el nivel óptico la configuración del lecho móvil aguas arriba y aguas abajo, en función de lo que se quiere medir.

1-3-3-2 Tareas a realizar antes del ensayo

- 1- Desagotar los dos tanques de recuperación dispuestos a los costados del modelo utilizando las bombas sumergibles. Estos tanques se utilizan para recuperar el agua que se filtra por las paredes del modelo.
- 2- Colocar los limnímetros en el modelo con la siguiente configuración:
 - Limnómetro 11006 en canal de aforo Río Reyes
 - Limnómetro 11007 en canal de aforo Río Grande
 - Limnómetro 11002 en toma margen izquierda en sección 3
 - Limnómetro 11008 en toma margen derecha en sección 2
- 3- Las secciones 2 y 3 corresponden a la segunda y tercera sección ubicadas aguas debajo de la presa. Se utilizan principalmente para verificar los niveles de restitución.



Figura 19: Escalas graduadas en las secciones 2 y 3, aguas abajo de la presa.

- 4- Colocar la bomba sumergible grande en el tanque volumétrico (se utiliza este caudal para aumentar los niveles en cisterna y así garantizar la carga necesaria en las bombas).
- 5- Verificar que las compuertas aguas abajo estén cerradas (las correspondientes al tanque volumétrico y al sedimentador). Esto se mantiene durante los primeros minutos del ensayo, para generar un nivel de restitución acorde a las condiciones de borde correspondiente a cada condición hidrológica.
- 6- Verificar que los drenes de desagote aguas abajo estén cerrados.

1-3-3-3 Actividades a realizar durante el ensayo

- 1- Empezar a llenar el modelo desde aguas abajo utilizando bomba sumergible colocada en el tanque volumétrico, hasta que el nivel de superficie libre alcance el nivel de restitución adecuado para cada condición hidrológica. La compuerta rebatible de aguas abajo del modelo debe estar baja durante esta actividad.

- 2- Elevar la compuerta abatible a medida que la zona de aguas abajo del modelo se llene.
- 3- Encender bombas centrífugas del laboratorio con retornos abiertos y válvulas de paso al modelo cerradas (si el caudal a ensayar en el modelo es menor a 60 l/s, se utiliza una sola bomba).
- 4- Empezar a abrir las válvulas de paso a las cámaras aforadoras en forma convenientemente al caudal necesario.
- 5- Abrir la válvula intermedia y después comenzar a cerrar el retorno (la válvula intermedia se ubican en el interior del laboratorio).
- 6- Abrir las dos compuertas para que el caudal fluya hacia el otro modelo (Río Suquía.)
- 7- Establecer los caudales requeridos en ambos aforadores regulando válvulas y retornos.
- 8- Cambiar configuración de compuertas en cámaras de cargas para que al agua fluya por el modelo de Los Molinos
- 9- Abrir la compuerta aguas abajo hacia la cisterna.
- 10- Bajar y regular la compuerta abatible de aguas abajo hasta que se establezca la condición de borde (nivel de restitución) adecuado.
- 11- Realizar las mediciones requeridas en el experimento mientras se verifican periódicamente las condiciones de borde del modelo (niveles y caudales).

1-3-3-4 Actividades a realizar durante el proceso de apagado del modelo

- 1- Elevar la compuerta abatible subiendo los niveles de restitución, hasta inundar los disipadores de energía. Esta actividad es requerida para minimizar los efectos de los procesos erosivos durante el apagado.
- 2- Llenar tanque volumétrico.
- 3- Abrir las dos compuertas para que el caudal fluya hacia el otro modelo existente en el Laboratorio de Hidráulica (Río Suquía.)
- 4- Abrir retornos de las bombas y cerrar válvulas intermedias.
- 5- Cerrar válvulas de paso al modelo.
- 6- Apagar bombas centrífugas.
- 7- Bajar compuerta abatible para desagotar región de aguas abajo; para evaluar experimentalmente la erosión.

1-3-3-5 Objetivos del modelo

Los objetivos que se plantearon para la construcción del modelo son:

- **Verificar las capacidades hidráulicas de evacuación de las estructuras de control:** Conformadas por el Dique Fijo, el Dique Móvil y el Canal de limpieza o Canal Moderador, definiendo sus límites operativos de descarga. Esta evaluación se llevará a cabo en todo el rango operativo de las obras.
- **Verificar las condiciones de disipación de energía,** de las estructuras de control dispuestas en los distintos sectores de la obra.
- **Analizar y cuantificar las erosiones,** aguas abajo de las estructuras de descarga a los fines de constatar el funcionamiento de las obras proyectadas. Esta evaluación se llevará a cabo para diferentes escenarios hidrológicos de diseño.
- **Verificar y optimizar las consignas de operación de las estructuras de control** (compuertas), a los fines de regular los procesos hidrosedimentológicos presentes en las proximidades de la presa para disminuir la sedimentación aguas arriba y permitir el paso de los sedimentos a través de las estructuras de control.
- **Determinar de la distribución del flujo de aproximación a las obras de descarga** a los fines de conocer el comportamiento del flujo frente a diferentes escenarios hidrológicos.

Queda implícito que en la evaluación integral del comportamiento hidráulico de la obra en la que se piensa analizar los límites de funcionamiento de los distintos componentes hidráulicos. Para ello se establecen capacidades máximas para el funcionamiento aislado del Canal Moderador, del Dique Móvil y del Dique Fijo, así como el comportamiento en conjunto de los elementos. Con estas determinaciones es factible establecer adecuadas consignas de operación de las compuertas durante las crecidas.

1-4 OBJETIVO DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA

1-4-1 Objetivos generales de la práctica supervisada

- Caracterización hidrodinámica del flujo de ingreso a las obras de evacuación de excedentes de la Presa Los Molinos, Jujuy. Este objetivo general, está asociado al primer objetivo del modelo.

1-4-2 Objetivos específicos

- Recopilación de información y entrenamiento en el uso del Modelo Físico de la presa Los Molinos.
- Entrenamiento en el uso de técnicas de medición de velocidad del flujo.
- Diseño y Desarrollo de actividades experimentales requeridas en el Modelo Físico Los Molinos.
- Análisis de resultados experimentales.
- Elaboración de recomendaciones para el Proyecto

1-5 METODOLOGÍA

En el primer capítulo de este documento, se detalla lo relacionado al primer objetivo específico de la práctica, para lo cual se precisa la localización de la presa, se describe su problemática y las obras proyectadas, además se describe en general el modelo físico construido y cada una de sus partes. Finalmente se exponen los objetivos de la práctica supervisada.

En el capítulo 2 se sintetiza lo relacionado al segundo objetivo específico de la práctica, para lo cual se desarrolló el entrenamiento en el uso de técnicas de medición de velocidad de flujo, el cual consistió en la calibración de instrumentos disponibles en el laboratorio de Hidráulica como por ejemplo, molinetes y micromolinetes; se validó el tubo Pitot y se implementó la técnica PTV. Algunas de estas técnicas experimentales fueron utilizadas posteriormente en ensayos realizados para la cumplimentación de los demás objetivos específicos de esta práctica.

En los capítulos 3 y 4 se describen los avances obtenidos en la cumplimentación de los objetivos específicos relacionados a las actividades experimentales desarrolladas en el modelo Físico de la Presa Los Molinos. Específicamente en el capítulo 3, se sintetizan las actividades experimentales realizadas en el modelo físico de la presa Los Molinos. Para ello se detallan las técnicas de medición implementadas, las condiciones experimentales ensayadas y la metodología utilizada para llevar a cabo los ensayos. En el capítulo 4 se detallan los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos realizados durante esta práctica, su comparación con otros ensayos previos realizados en el modelo físico, además de una breve síntesis en la que se resumen todas las observaciones realizadas.

Finalmente, en el capítulo 5 se exponen las conclusiones y recomendaciones de todas las actividades realizadas, de las técnicas implementadas y de la experiencia adquirida por el alumno.

CAPÍTULO 2:

Entrenamiento en el uso de técnicas de medición de velocidad del flujo.

CAPÍTULO 2: ENTRENAMIENTO EN EL USO DE TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE VELOCIDAD DEL FLUJO

2-1 INTRODUCCIÓN

Con el fin de entrenarse en el uso de técnicas de medición de velocidades de flujo, el estudiante participó en diversas actividades que se desarrollaron en el Laboratorio de Hidráulica y en las cuales se utilizan el instrumental específico que luego se utilizó en mediciones en el modelo físico. En las siguientes secciones se detallan las actividades realizadas por el estudiante durante el entrenamiento para lo cual estuvo supervisado por investigadores, profesores y técnicos del Laboratorio de Hidráulica.

2-2 CALIBRACIÓN DE MOLINETES Y MICROMOLINETES

2-2-1 Objetivos de esta actividad

- Obtener las curvas de calibración (velocidad de flujo – número de vueltas) de dos molinetes (15431 y 15435), sus tres hélices (1, 2 y 3) y de un micromolinete con sus dos hélices (1 y 3).
- Verificar el funcionamiento del molinete de eje vertical.

Aclaración:

- o Si bien los molinetes no han sido utilizados en los ensayos realizados en el modelo físico, esta calibración sirvió como entrenamiento y familiarización con instrumental que si se empleó en el modelo Físico Los Molinos.
- o La calibración de los molinetes 15431 y 15435 con sus respectivas hélices, no pertenecen al Laboratorio de Hidráulica, y no se poseía ninguna información que anteceda a dicha calibración para poder realizar algún tipo de comparación.

2-2-2 Instrumentos utilizados

Los elementos que se utilizaron para realizar la calibración fueron:

- Canal experimental.
- Velocímetro acústico doppler - ADV.
- Molinetes con sus distintas tipologías de hélices.
- Micro-molinetes con dos tipologías de hélices.
- Molinete de eje vertical.

2-2-3-1 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 aquietamiento, donde se reduce la velocidad del fluido y la vierte a un canal de restitución, el cual lo conduce a la cisterna (ver Figura 20, Figura 21 y Figura 22.)

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.



Figura 20: Canal experimental

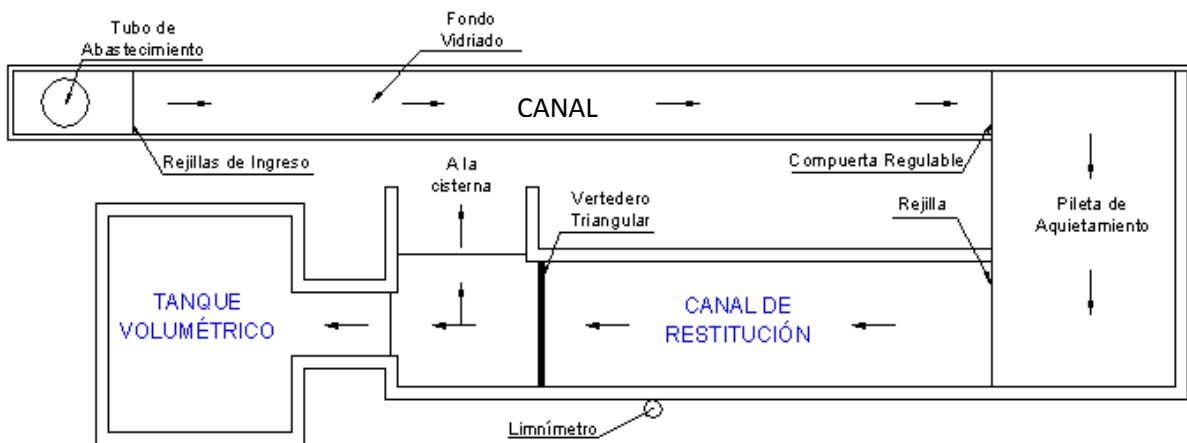


Figura 21: Planta esquemática del canal experimental

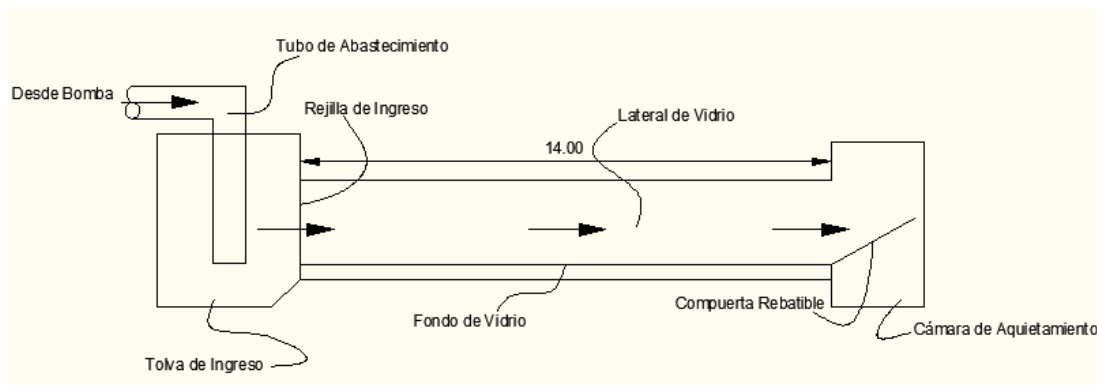


Figura 22: Corte esquemático del canal experimental

2-2-3-2 Velocímetro acústico doppler – ADV

En este trabajo se utilizó un Velocímetro Acústico Doppler (ADV por sus siglas en inglés) para obtener los parámetros medios del flujo, que luego serán utilizados en la calibración de los molinetes. El ADV registra puntualmente series temporales de las tres componentes del vector velocidad del flujo con frecuencias de registro de hasta 50Hz. Específicamente el instrumento utilizado es un Micro ADV YSI Sontek de 16 MHz de frecuencia acústica, con una configuración “down looking” y un volumen de medición de aproximadamente $0,1 \text{ cm}^3$ (ver Figura 23.) Mediciones preliminares indicaron que las condiciones experimentales (niveles de partículas en suspensión) resultan adecuadas para el uso de tecnología acústica. El soporte y plataforma de medición del ADV aseguran rigidez y que el instrumento no modifique las condiciones del flujo.



Figura 23: Micro ADV YSI Sontek de 16 MHz

2-2-3-3 Molinetes y Micro-molinete con sus distintas tipologías de hélices

Los molinetes son aparatos compuestos de paletas, las cuales, impulsadas por el líquido, dan un número de revoluciones proporcional a la velocidad de la corriente. Existen dos tipos de molinetes, el de cazoletas y el de hélice, los cuales se montan sobre una varilla para el aforo de corrientes superficiales o profundas, según se necesite.

En la Figura 24 siguiente, se muestra el molinete y las distintas hélices utilizadas

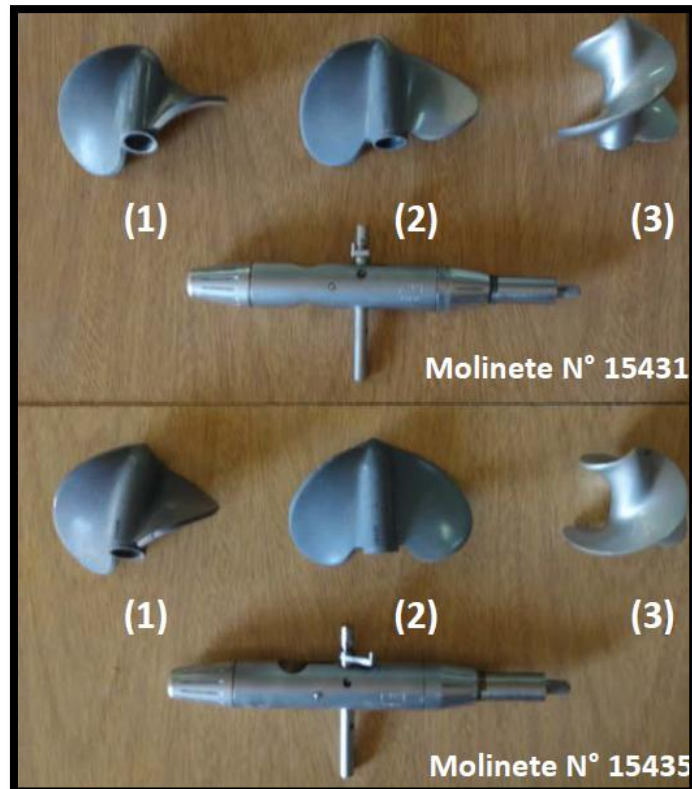


Figura 24: Molinetes y Hélices calibradors

En la Figura 25, se muestra el micromolinete con sus dos hélices y su varilla, calibradas en la experiencia. Como se puede observar las dimensiones de todos sus elementos son menores que la de los molinetes mostrados anteriormente.

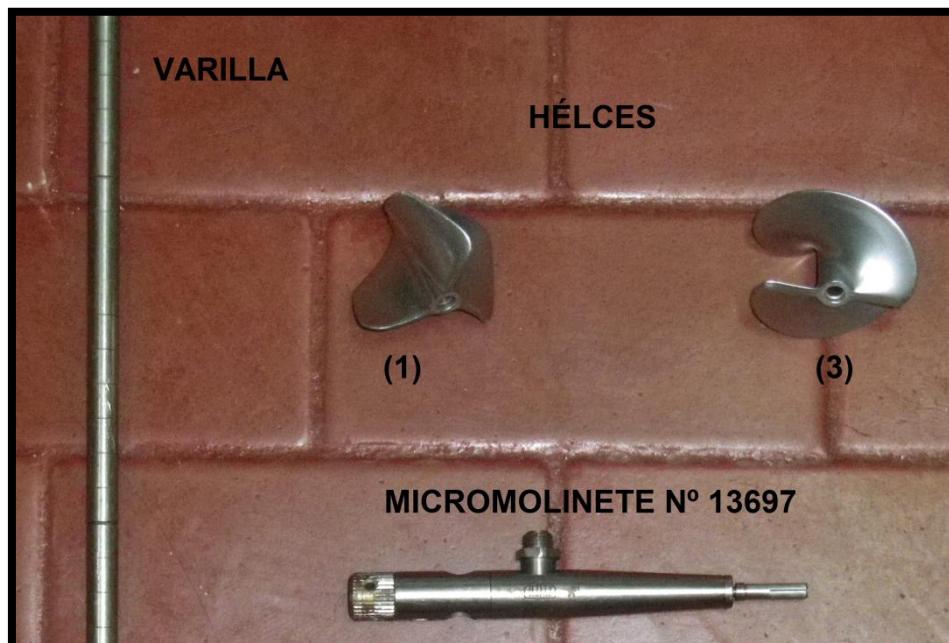


Figura 25: Micromolinete y Hélices calibrados

En la próxima se expone el contador de vueltas de los micromolinetes. El mismo posee un botón que da inicio al conteo, un visor digital que muestra el número de vueltas que se produjeron al cabo de treinta (30) segundos,



Figura 26: Contador de vueltas de Micromolinetes

Por último se muestra el molinete de eje vertical o cazoletas, perteneciente al Laboratorio de Hidráulica, cuyo funcionamiento será verificado.

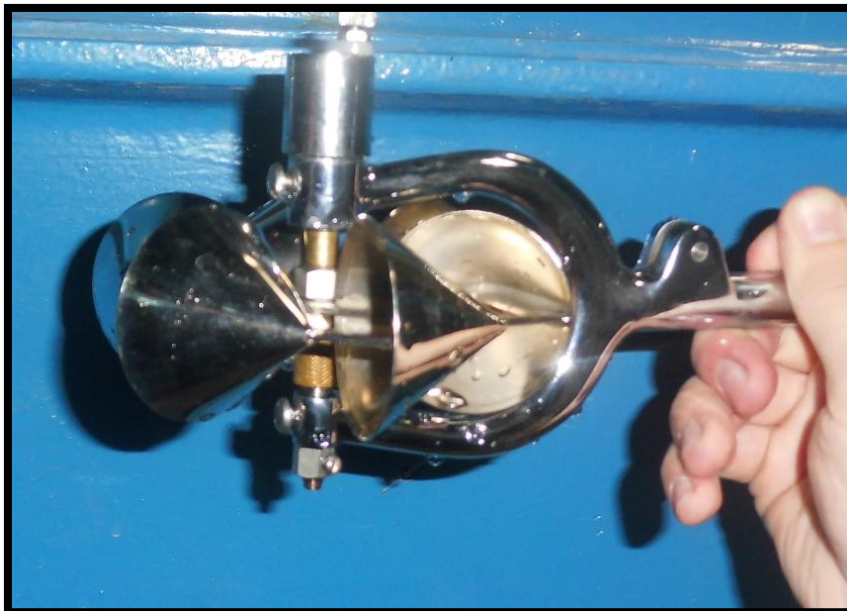


Figura 27: Molinete de Cazoletas validado

2-2-3 Metodología

2-2-3-1 Primer paso: *Instalación del instrumental:*

Para llevar a cabo la experiencia, se colocó sobre el eje del canal y a 10 centímetros del fondo el ADV aguas arriba del molinete, pero suficientemente próximos entre sí para que la medición de la velocidad realizadas con el ADV sea, a los fines prácticos, la misma que la velocidad del fluido que circula por el molinete¹.

¹ Se conoce, de estudios anteriores realizados en el Laboratorio de Hidráulica, que las distorsiones que genera el molinete en las lecturas del ADV son menores al 0.5% de la velocidad media.

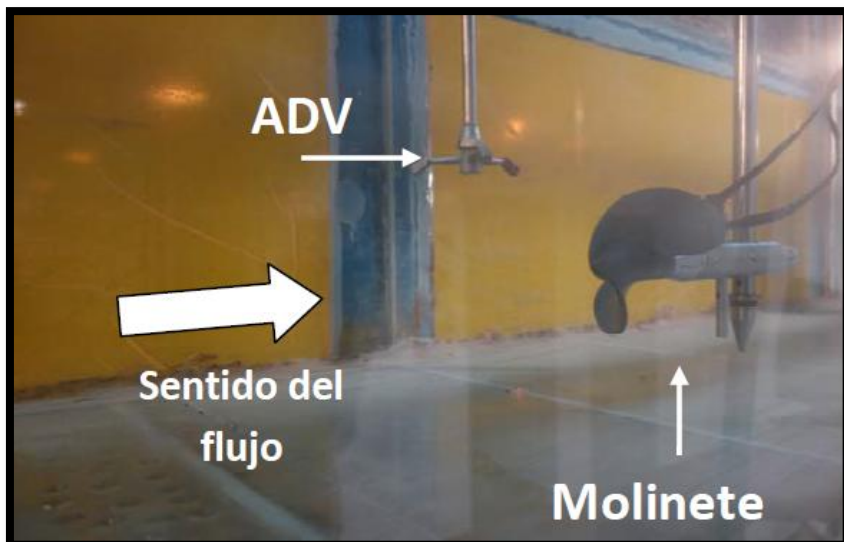


Figura 28: Localización de los instrumentos en el canal durante la calibración de molinetes

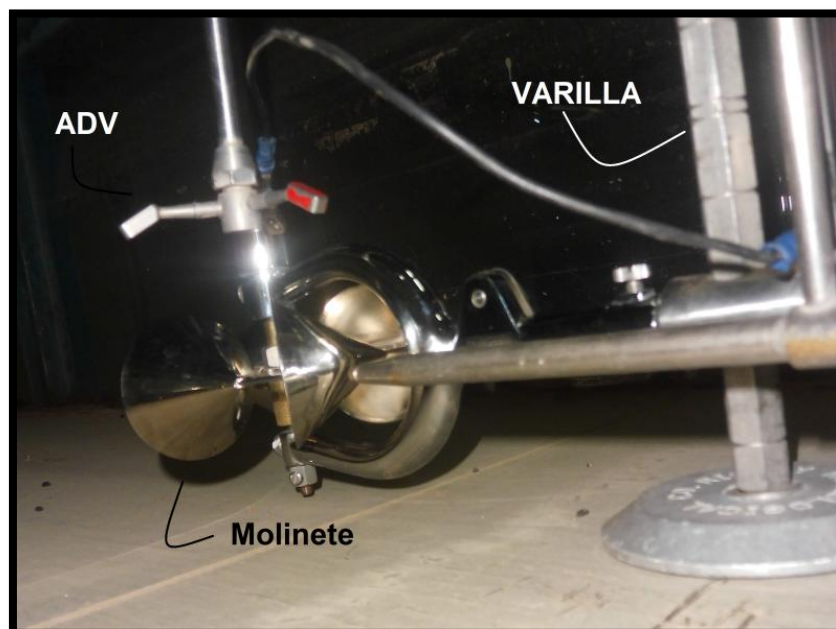


Figura 29: Localización del instrumento en el canal durante la validación de molinete de cazoletas

2-2-3-2 Segundo paso: Implementar caudal a ensayar

Se implementó en el canal con un caudal medido y a través de una compuerta se reguló el tirante aguas arriba para variar las velocidades del flujo las cuales fueron establecidas in situ con la ayuda de las lecturas provistas por el ADV.

2-2-3-3 Tercer paso: Mediciones

Se realizaron mediciones a cinco (5) velocidades diferentes, en un rango que iba de 0,20 m/seg. a 0,70 m/seg.

Una vez estabilizada la velocidad del flujo, se procedió a tomar la medición del número de vueltas que realiza el molinete en un lapso de 30 segundos, acción que se repitió tres veces, en las mismas condiciones, para luego obtener un promedio del mismo. Posteriormente se cambió las hélices y se repitió el proceso.

2-2-3-4 Cuarto paso: Análisis de Datos

Para cada hélice de cada molinete o micromolinete se obtuvieron cinco (5) lecturas de números de vueltas promedios, a distintas velocidades. Con estos datos, se realizó las curvas de velocidad media (ADV) – número de vueltas por segundo y una regresión lineal con la que se obtuvo la ecuación de la recta; que nos da la velocidad del fluido medido en función del número de vueltas por segundo de cada molinete con cada hélice.

$$V_{MOL} = A \times n + B \quad \text{[Ecuación 1]}$$

Donde:

- V_{MOL} : Velocidad medida con molinete [m/seg].
- n: Número de vueltas por segundo [1/seg].
- A y B: Parámetros a calibrar, pendiente y ordenada al origen respectivamente.

2-2-4 Resultado de calibración

2-2-4-1 Molinete Nº 15435

2-2-4-1-1 Hélice 15435 - 1

En la Tabla 1 se muestran los datos de velocidades medidas en el canal con el ADV para cada condición (V_{ADV}); la lectura del número de vueltas que realiza el molinete en treinta (30) segundos (n_1, n_2, n_3); de estos se obtuvo el promedio (n prom.); que luego, se lo expresó en número de vueltas por segundo (n 1/seg) También se muestra, la ecuación del molinete ($V_{MOL}=A.n+B$); y con esta última se recalcula la velocidad (V_{MOL}):

| $V_{MOL} \text{ [m/seg]} = A.n + B$ | | | | | | | |
|--|----------------------|-------|-------|-------|-----------|---------------|----------------------|
| $A = 0,215; B = 0,042; n = \text{vueltas / seg}$ | | | | | | | |
| Datos de la calibración | | | | | | | |
| Condición | V_{ADV} [m/seg] | n_1 | n_2 | n_3 | n prom | n (1/seg.) | V_{MOL} [m/seg] |
| 1 | 0,623 | 80 | 82 | 81 | 81 | 2,70 | 0,623 |
| 2 | 0,485 | 61 | 61 | 61 | 61 | 2,03 | 0,479 |
| 3 | 0,396 | 50 | 49 | 50 | 50 | 1,66 | 0,398 |
| 4 | 0,338 | 41 | 42 | 43 | 42 | 1,40 | 0,343 |
| 5 | 0,204 | 24 | 22 | 20 | 22 | 0,73 | 0,200 |

Tabla 1: Calibración del molinete 15435 hélice 15435-1

De las siete (7) primeras columnas de la tabla anterior se realizó el siguiente gráfico, y la regresión lineal para poder obtener la ecuación de la velocidad en función del número de vueltas del molinete ($V_{MOL}=A.n+B$). Se puede apreciar en la Figura 30 que la dispersión de la regresión es suficientemente baja ($R^2 = 0.9993$) lo que se evidencia comparando las columnas de velocidades V_{ADV} y V_{MOL} .

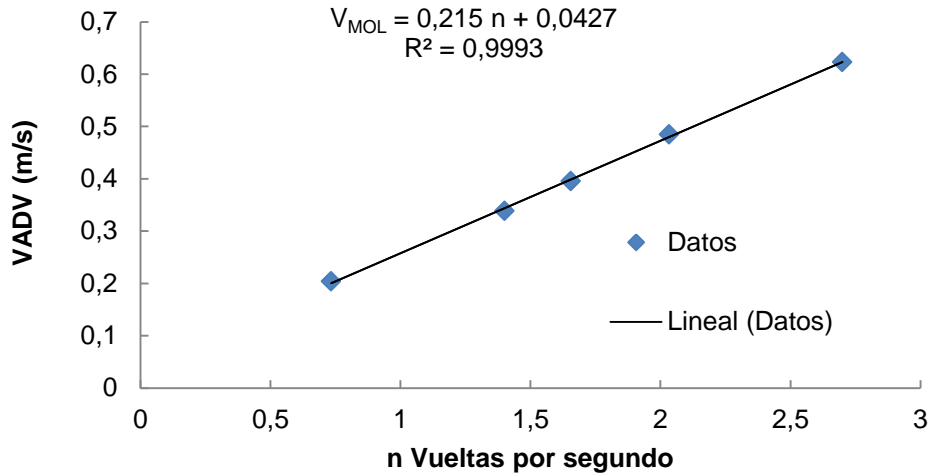


Figura 30: Ajuste de relación lineal entre velocidades de flujo y número de vueltas del molinete 15435 y la hélice 15435-1

2-2-4-1-2 Hélice 15430 - 2

En la Tabla 2: Calibración del molinete 15435 hélice 15430-2 Tabla 2 se muestran los datos de velocidades medidas en el canal con el ADV en para cada condición (V_{ADV}); la lectura del número de vueltas que realiza el molinete en treinta (30) segundos (n_1, n_2, n_3); de estos se obtuvo el promedio ($n \text{ prom.}$); que luego, se lo expresó en número de vueltas por segundo ($n \text{ 1/seg}$) También se muestra, la ecuación del molinete ($V_{MOL}=A.n+B$); y con esta última se recalcula la velocidad (V_{MOL}):

$$V_{MOL} \text{ [m/seg]} = A.n + B$$

$A = 0,471; B = 0,051; n = \text{vueltas / seg}$

| Datos de la calibración | | | | | | | |
|-------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------------|-----------------|----------------------|
| Condición | V_{ADV} [m/seg] | n_1 | n_2 | n_3 | n prom | n (1/seg.) | V_{MOL} [m/seg] |
| 1 | 0,629 | 37 | 37 | 37 | 37 | 1,23 | 0,632 |
| 2 | 0,484 | 28 | 27 | 26 | 27 | 0,90 | 0,475 |
| 3 | 0,392 | 23 | 23 | 23 | 23 | 0,77 | 0,412 |
| 4 | 0,337 | 15 | 16 | 16 | 16 | 0,52 | 0,297 |
| 5 | 0,204 | 12 | 11 | 11 | 11 | 0,38 | 0,229 |

Tabla 2: Calibración del molinete 15435 hélice 15430-2

De las siete (7) primeras columnas de la tabla anterior se realizó el siguiente gráfico, y la regresión lineal para poder obtener la ecuación de la velocidad en función del número de vueltas del molinete ($V_{MOL}=A.n+B$). Se puede apreciar en la Figura 31 que la dispersión de la regresión es suficientemente baja ($R^2 = 0,9731$) lo que se evidencia comparando las columnas de velocidades V_{ADV} y V_{MOL} .

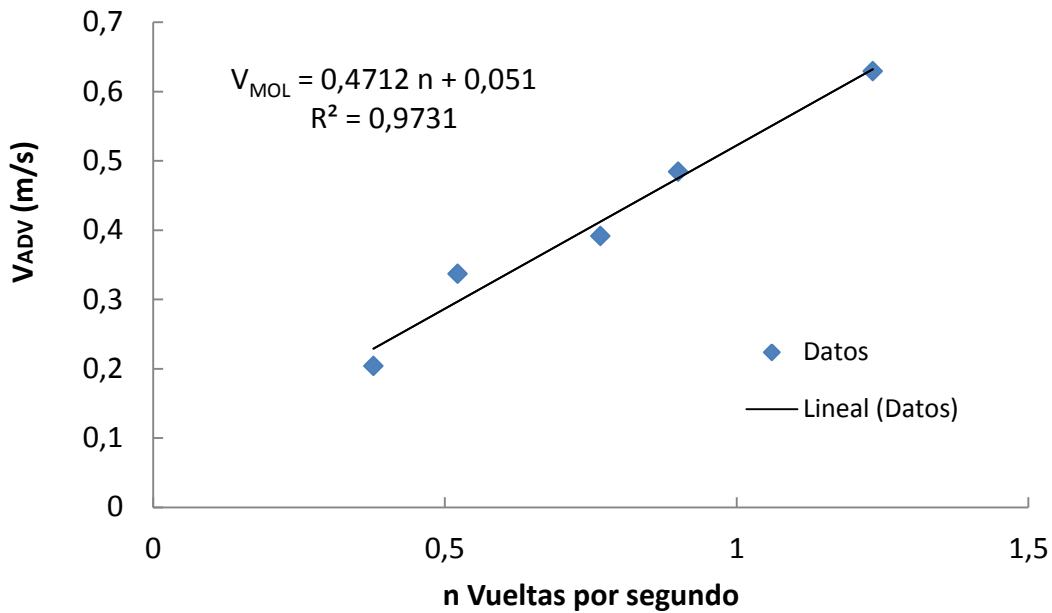


Figura 31: Ajuste de relación lineal entre velocidades de flujo y número de vueltas del molinete 15435 y la hélice 15430-2

2-2-4-1-3 Hélice 15435 - 3

En la Tabla 3 se muestran los datos de velocidades medidas en el canal con el ADV para cada condición (V_{ADV}); la lectura del número de vueltas que realiza el molinete en treinta (30) segundos (n_1, n_2, n_3); de estos se obtuvo el promedio (n prom.); que luego, se lo expresó en número de vueltas por segundo (n 1/seg) También se muestra, la ecuación del molinete ($V_{MOL}=A.n+B$); y con esta última se recalcula la velocidad (V_{MOL}):

| $V_{MOL} [m/seg] = A.n + B$ $A = 0,090; B = 0,090; n = vueltas / seg$ | | | | | | | |
|--|----------------------|-------|-------|-------|-------------|-----------------|----------------------|
| Datos de la calibración | | | | | | | |
| Condición | V_{ADV} [m/seg] | n_1 | n_2 | n_3 | n prom | n (1/seg.) | V_{MOL} [m/seg] |
| 1 | 0,561 | 163 | 162 | 164 | 163 | 5,43 | 0,579 |
| 2 | 0,476 | 122 | 120 | 124 | 122 | 4,07 | 0,456 |
| 3 | 0,391 | 94 | 93 | 93 | 93 | 3,11 | 0,370 |
| 4 | 0,338 | 82 | 80 | 79 | 80 | 2,68 | 0,331 |
| 5 | 0,200 | 45 | 42 | 43 | 43 | 1,44 | 0,220 |

Tabla 3: Calibración del molinete 15435 hélice 15435-3

De las siete (7) primeras columnas de la tabla anterior se realizó el siguiente gráfico, y la regresión lineal para poder obtener la ecuación de la velocidad en función del número de vueltas del molinete ($V_{MOL}=A.n+B$). Se puede apreciar en la Figura 32 que la dispersión de la regresión es suficientemente baja ($R^2 = 0,9787$) lo que se evidencia comparando las columnas de velocidades V_{ADV} y V_{MOL} .

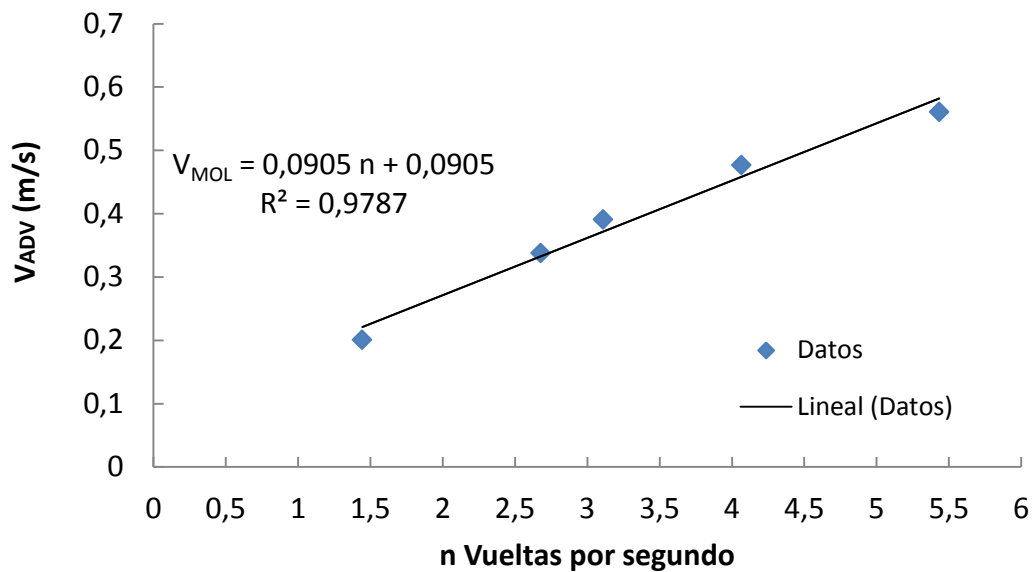


Figura 32: Ajuste de relación lineal entre velocidades de flujo y número de vueltas del molinete 15435 y la hélice 15435-3

2-2-4-2 Molinete N° 15431

2-2-4-2-1 Hélice 15431 - 1

En la Tabla 4 se muestran los datos de velocidades medidas en el canal con el ADV para cada condición (V_{ADV}); la lectura del número de vueltas que realiza el molinete en treinta (30) segundos (n_1, n_2, n_3); de estos se obtuvo el promedio (n prom.); que luego, se lo expresó en número de vueltas por segundo (n 1/seg) También se muestra, la ecuación del molinete ($V_{MOL}=A.n+B$); y con esta última se recalcula la velocidad (V_{MOL}):

$$V_{MOL} \text{ [m/seg]} = A.n + B$$

$A = 0,206$; $B = 0,067$; $n = \text{vueltas / seg}$

| Datos de la calibración | | | | | | | |
|-------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------------|-----------------|----------------------|
| Condición | V_{ADV} [m/seg] | n_1 | n_2 | n_3 | n prom | n (1/seg.) | V_{MOL} [m/seg] |
| 1 | 0,594 | 76 | 75 | 76 | 76 | 2,52 | 0,587 |
| 2 | 0,525 | 68 | 67 | 67 | 67 | 2,24 | 0,529 |
| 3 | 0,394 | 49 | 49 | 47 | 48 | 1,61 | 0,399 |
| 4 | 0,296 | 28 | 28 | 28 | 28 | 0,93 | 0,259 |
| 5 | 0,206 | 25 | 24 | 24 | 24 | 0,81 | 0,234 |

Tabla 4: Calibración del molinete 15431 hélice 15431-1

De las siete (7) primeras columnas de la tabla anterior se realizó el siguiente gráfico, y la regresión lineal para poder obtener la ecuación de la velocidad en función del número de vueltas del molinete ($V_{MOL}=A.n+B$). Se puede apreciar en la Figura 33 que la dispersión de la regresión es suficientemente baja ($R^2 = 0,9783$) lo que se evidencia comparando las columnas de velocidades V_{ADV} y V_{MOL} .

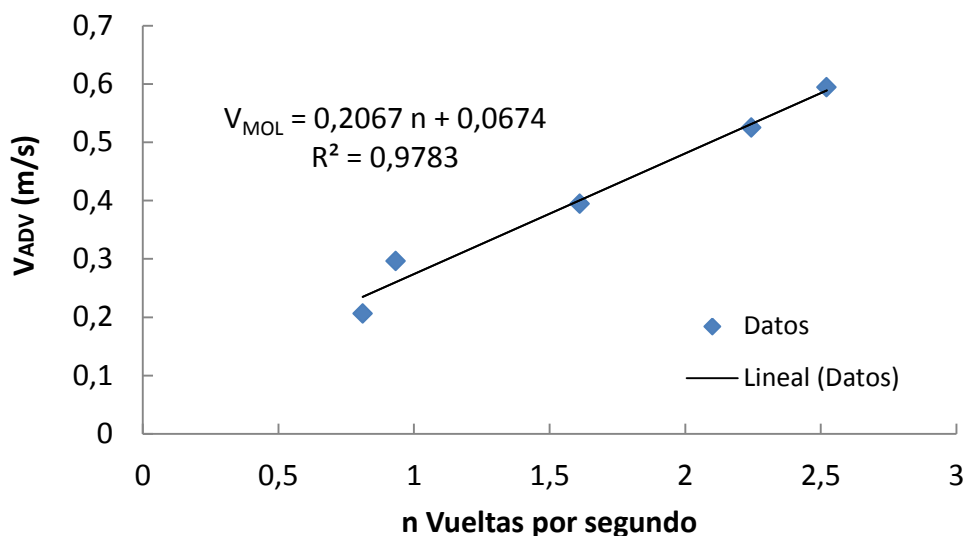


Figura 33: Ajuste de relación lineal entre velocidades de flujo y número de vueltas del molinete 15431 y la hélice 15431-1

2-2-4-2-2 Hélice 15431 - 2

En la Tabla 5 se muestran los datos de velocidades medidas en el canal con el ADV para cada condición (V_{ADV}); la lectura del número de vueltas que realiza el molinete en treinta (30) segundos (n_1, n_2, n_3); de estos se obtuvo el promedio (n prom.); que luego, se lo expresó en número de vueltas por segundo (n 1/seg) También se muestra, la ecuación del molinete ($V_{MOL}=A.n+B$); y con esta última se recalcula la velocidad (V_{MOL}):

| $V_{MOL} \text{ [m/seg]} = A.n + B$ $A = 0,500; B = 0,011; n = \text{vueltas / seg}$ | | | | | | | |
|---|----------------------|-------|-------|-------|-----------|---------------|----------------------|
| Datos de la calibración | | | | | | | |
| Condición | V_{ADV} [m/seg] | n_1 | n_2 | n_3 | n prom | n (1/seg.) | V_{MOL} [m/seg] |
| 1 | 0,588 | 34 | 34 | 35 | 34 | 1,14 | 0,583 |
| 2 | 0,524 | 31 | 31 | 31 | 31 | 1,03 | 0,528 |
| 3 | 0,395 | 23 | 23 | 23 | 23 | 0,77 | 0,394 |
| 4 | 0,298 | 17 | 17 | 17 | 17 | 0,57 | 0,294 |
| 5 | 0,211 | 12 | 12 | 12 | 12 | 0,40 | 0,211 |

Tabla 5: Calibración del molinete 15431 hélice 15431-2

De las siete (7) primeras columnas de la tabla anterior se realizó el siguiente gráfico, y la regresión lineal para poder obtener la ecuación de la velocidad en función del número de vueltas del molinete ($V_{MOL}=A.n+B$). Se puede apreciar en la Figura 34 que la dispersión de la regresión es suficientemente baja ($R^2 = 0,9995$) lo que se evidencia comparando las columnas de velocidades V_{ADV} y V_{MOL} .

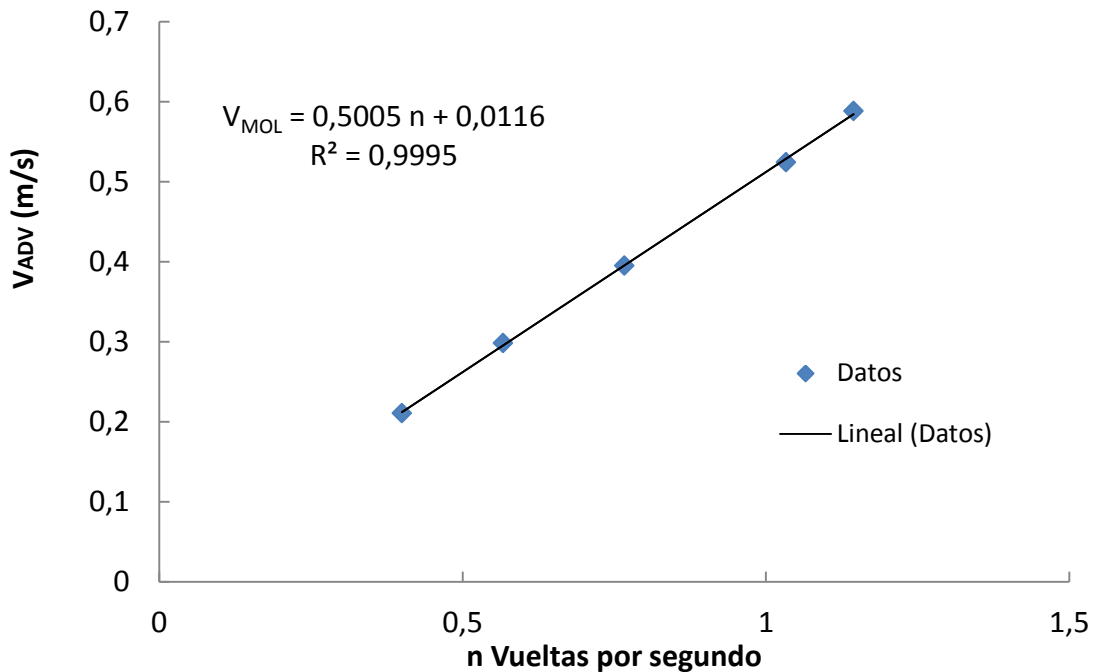


Figura 34: Ajuste de relación lineal entre velocidades de flujo y número de vueltas del molinete 15431 y la hélice 15431-2

2-2-4-2-3 Hélice 15431 - 3

En la Tabla 6 se muestran los datos de velocidades medidas en el canal con el ADV para cada condición (V_{ADV}); la lectura del número de vueltas que realiza el molinete en treinta (30) segundos (n_1, n_2, n_3); de estos se obtuvo el promedio (n prom.); que luego, se lo expresó en número de vueltas por segundo (n 1/seg) También se muestra, la ecuación del molinete ($V_{MOL}=A.n+B$); y con esta última se recalcula la velocidad (V_{MOL}):

| $V_{MOL} \text{ [m/seg]} = A.n + B$ | | | | | | | |
|--|----------------------|-------|-------|-------|-----------|---------------|----------------------|
| $A = 0,105; B = 0,050; n = \text{vueltas / seg}$ | | | | | | | |
| Datos de la calibración | | | | | | | |
| Condición | V_{ADV} [m/seg] | n_1 | n_2 | n_3 | n prom | n (1/seg.) | V_{MOL} [m/seg] |
| 1 | 0,595 | 154 | 154 | 155 | 154 | 5,14 | 0,590 |
| 2 | 0,522 | 133 | 134 | 134 | 134 | 4,46 | 0,518 |
| 3 | 0,398 | 100 | 99 | 100 | 100 | 3,32 | 0,399 |
| 4 | 0,298 | 69 | 71 | 69 | 70 | 2,32 | 0,294 |
| 5 | 0,212 | 46 | 44 | 47 | 46 | 1,52 | 0,210 |

Tabla 6: Calibración del molinete 15431 hélice 15431-3

De las siete (7) primeras columnas de la tabla anterior se realizó el siguiente gráfico, y la regresión lineal para poder obtener la ecuación de la velocidad en función del número de vueltas del molinete ($V_{MOL}=A.n+B$). Se puede apreciar en la Figura 35 que la dispersión de la regresión es suficientemente baja ($R^2 = 0,9998$) lo que se evidencia comparando las columnas de velocidades V_{ADV} y V_{MOL} .

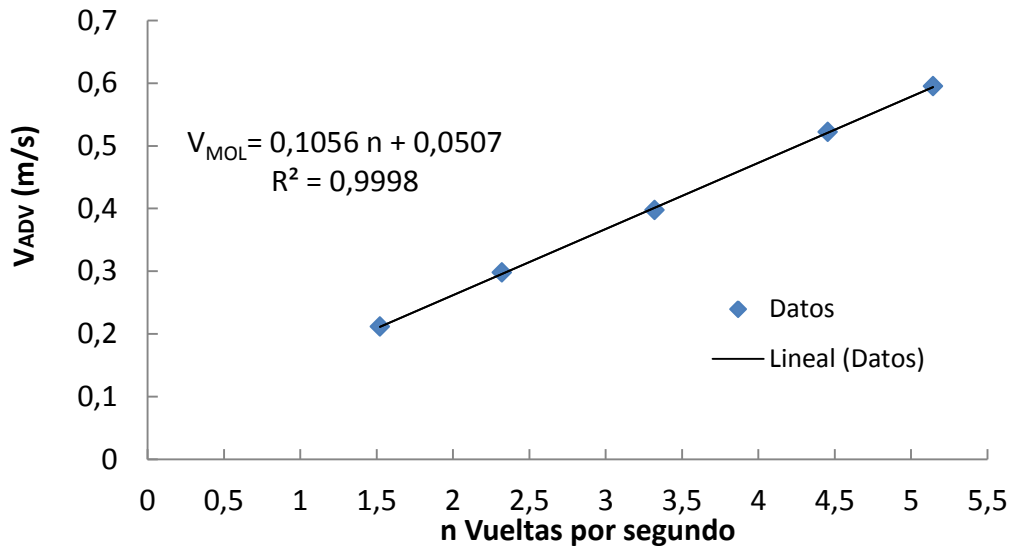


Figura 35: Ajuste de relación lineal entre velocidades de flujo y número de vueltas del molinete 15431 y la hélice 15431-3

2-2-4-3 Micromolinete N° 13697

Para este caso, micromolinete N° 13697, al ser de propiedad del Laboratorio Hidráulica se disponía de mayor información. Se tiene las ecuaciones originales, y resultados de otra calibración que se habían llevado a cabo con anterioridad. A continuación se procede a mostrar los resultados obtenidos de la nueva calibración y se lo compara con la información presente.

2-2-4-3-1 Hélice 13697 - 1

Los resultados de la calibración realizada se presentan en la Tabla 7, donde se muestran los datos de velocidades medidas en el canal con el ADV para cada condición (V_{ADV}); la lectura del número de vueltas que realiza el molinete en treinta (30) segundos (n_1 , n_2 , n_3); de estos se obtuvo el promedio (n prom.); que luego, se lo expresó en número de vueltas por segundo (n 1/seg) También se muestra, la ecuación del molinete ($V_{MOL}=A.n+B$); y con esta última se recalcula la velocidad (V_{MOL}):

$$V_{MOL} \text{ [m/seg]} = A.n + B$$

$A = 0,054$; $B = 0,025$; $n = \text{vueltas / seg}$

| Datos de la calibración | | | | | | | |
|-------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------------|-----------------|----------------------|
| Condición | V_{ADV} [m/seg] | n_1 | n_2 | n_3 | n prom | n (1/seg.) | V_{MOL} [m/seg] |
| 1 | 0,629 | 337 | 340 | 339 | 339 | 11,29 | 0,632 |
| 2 | 0,484 | 254 | 252 | 255 | 254 | 8,46 | 0,480 |
| 3 | 0,392 | 205 | 201 | 204 | 203 | 6,78 | 0,389 |
| 4 | 0,337 | 174 | 174 | 176 | 175 | 5,82 | 0,338 |
| 5 | 0,204 | 101 | 101 | 100 | 101 | 3,36 | 0,205 |

Tabla 7: Calibración del micromolinete 13697 hélice 13697-1

De las siete (7) primeras columnas de la tabla anterior se realizó el siguiente gráfico, y la regresión lineal para poder obtener la ecuación de la velocidad en función del número de vueltas del molinete ($V_{MOL}=A.n+B$). Se puede apreciar en la Figura 36 que la dispersión de la regresión es suficientemente baja ($R^2 = 0.9996$) lo que se evidencia comparando las columnas de velocidades V_{ADV} y V_{MOL} .

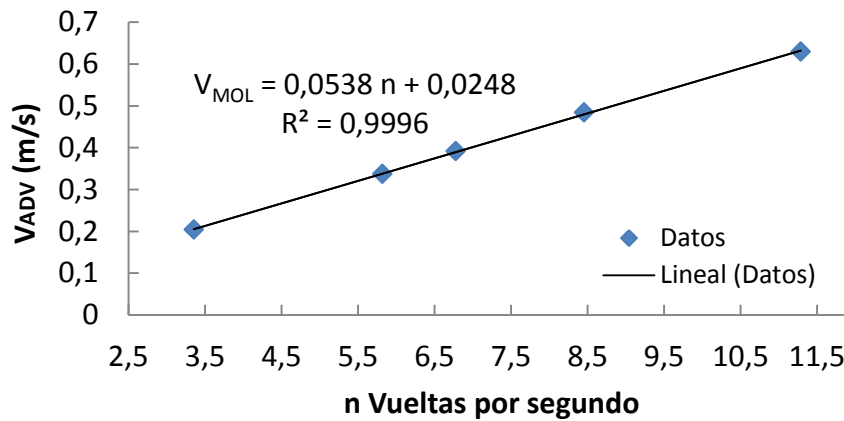


Figura 36: Ajuste de relación lineal entre velocidades de flujo y número de vueltas del micromolinete 13697 y la hélice 13697-1

Si realizamos una comparación entre las ecuaciones de calibración originales del molinete, la ecuación de la calibración realizada en el año 2008² y la ecuación obtenida en esta nueva calibración tenemos:

$$V \left[\frac{m}{s} \right] = 0.0559 n [rps] + 0.036 \text{ para } n < 8.57 \quad \text{[Ecuación 2 Calibración original]}$$

$$V \left[\frac{m}{s} \right] = 0.0511 n [rps] + 0.0415 \text{ para } 4 < n < 14 \quad \text{[Ecuación 3 Calibración 2008]}$$

$$V \left[\frac{m}{s} \right] = 0.054 n [rps] + 0.025 \text{ para } 3 < n < 12 \quad \text{[Ecuación 4 Calibración 2013]}$$

Si se grafican las ecuaciones anteriores, se tiene el siguiente gráfico:

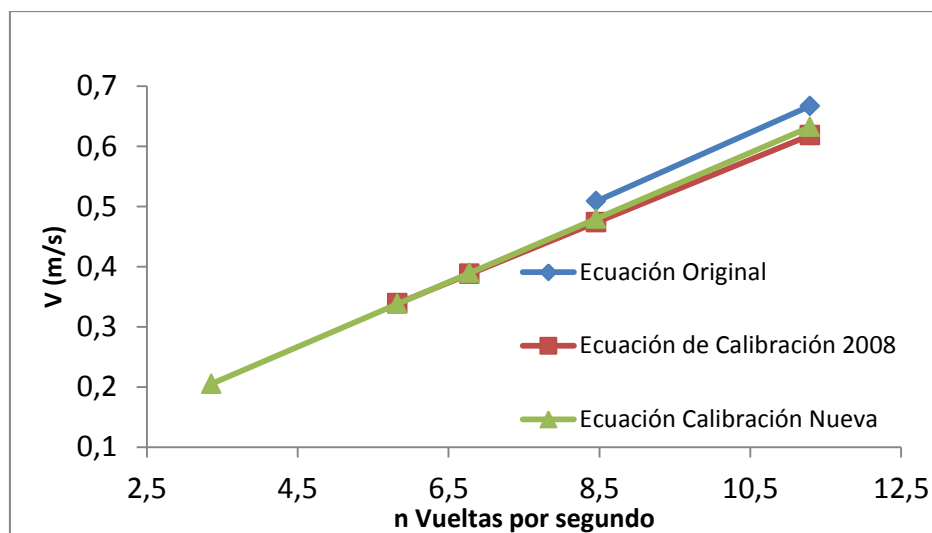


Figura 37: Contraste entre curvas de calibración previas y nueva para el micromolinete 13697 y la hélice 13697-1

² Extraído de: Laco, Maximiliano; Turelli, Pablo "Técnicas de medición de caudales en canales y ríos, Calibración de instrumental y Evaluación de incertidumbre" – Trabajo Final – Universidad Nacional de Córdoba – Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Córdoba – 2008.

En la Tabla 8 se muestra la diferencia porcentual que existe entre los valores calculados con una u otra curva, lo cual se condensa en la siguiente tabla:

| Diferencias Porcentuales entre curvas | | | |
|---------------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Condición | Ec original-Ec Cal 2008 | Ec original-Ec Cal Nueva | Ec Cal 2008-Ec Cal Nueva |
| 1 | -7,30 | -5,23 | 2,23 |
| 2 | -6,90 | -5,69 | 1,29 |
| 3 | - | - | 0,41 |
| 4 | - | - | -0,29 |
| 5 | - | - | - |
| Promedio | -7,1 | -5,5 | 0,9 |

Tabla 8: Diferencias porcentuales entre las diferentes curvas de calibración

Las diferencias no se pudieron realizar para todas las condiciones, debido a que el rango de aplicabilidad de las ecuaciones no permitió calcular sus respectivas velocidades. Analizando la diferencias porcentuales entre la ecuación de calibración obtenida en el 2008 y la nueva calculada, se observa que el error aumenta a medida que el número de vueltas por segundo es mayor. Pero que en promedio, la diferencia no es muy elevada.

Esta diferencia podría estar generada por del deterioro de las piezas rotatorias del micromolinete. Además se debe considerar que, el método empleado, no es el que recomiendan las normas internacionales, el método empleado, debería contrastarse con estudios bajo normas, realizados previamente al mismo instrumental. La única institución que posee las instalaciones requeridas para realizar esta calibración se encuentra en la Universidad de San Juan.

2-2-4-3-2 Hélice 13697 – 3

En la Tabla 9 se muestran los datos de velocidades medidas en el canal con el ADV para cada condición (V_{ADV}); la lectura del número de vueltas que realiza el molinete en treinta (30) segundos (n_1, n_2, n_3); de estos se obtuvo el promedio ($n_{prom.}$); que luego, se lo expresó en número de vueltas por segundo (n 1/seg) También se muestra, la ecuación del molinete ($V_{MOL}=A.n+B$); y con esta última se recalcula la velocidad (V_{MOL}):

| $V_{MOL} [m/seg] = A.n + B$ $A = 0,231; B = 0,024; n = vueltas / seg$ | | | | | | | |
|--|----------------------|-------|-------|-------|------------|-----------------|----------------------|
| Datos de la calibración | | | | | | | |
| Condición | V_{ADV} [m/seg] | n_1 | n_2 | n_3 | n_{prom} | n (1/seg.) | V_{MOL} [m/seg] |
| 1 | 0,623 | 78 | 77 | 79 | 78 | 2,60 | 0,626 |
| 2 | 0,485 | 59 | 59 | 58 | 59 | 1,96 | 0,477 |
| 3 | 0,396 | 49 | 48 | 49 | 49 | 1,62 | 0,400 |
| 4 | 0,338 | 41 | 41 | 40 | 41 | 1,36 | 0,338 |
| 5 | 0,204 | 24 | 23 | 23 | 23 | 0,78 | 0,204 |

Tabla 9: Calibración del micromolinete 13697 hélice 13697-3

De las siete (7) primeras columnas de la tabla anterior se realizó el siguiente gráfico, y la regresión lineal para poder obtener la ecuación de la velocidad en función del número de vueltas del molinete ($V_{MOL}=A.n+B$). Se puede apreciar en la Figura 38 que la dispersión de la regresión es suficientemente baja ($R^2 = 0.9991$) lo que se evidencia comparando las columnas de velocidades V_{ADV} y V_{MOL} .

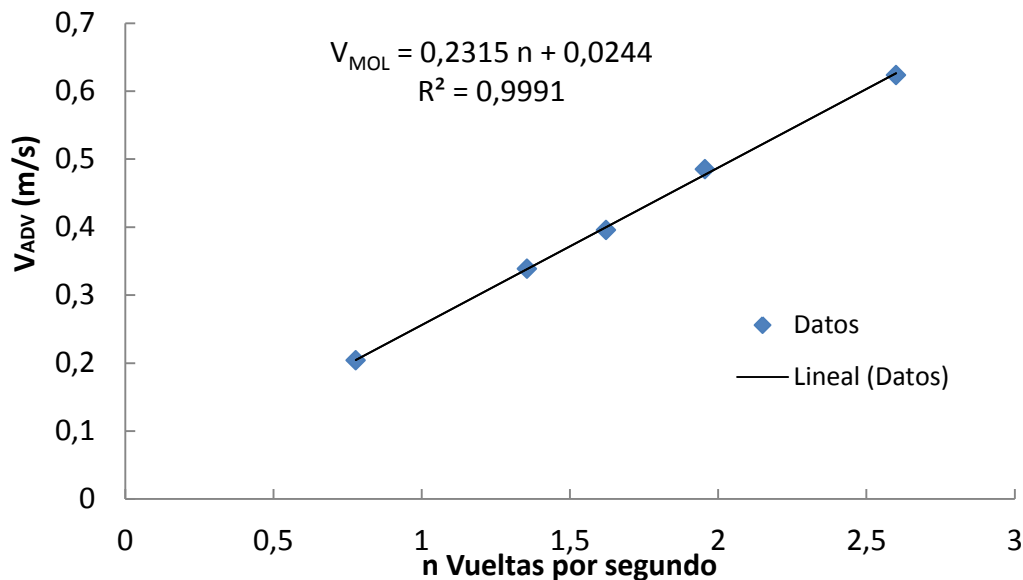


Figura 38: Ajuste de relación lineal entre velocidades de flujo y número de vueltas del micromolinete 13697 y la hélice 13697-3

Con los datos obtenidos de reciente calibración, más la información de las ecuaciones originales y la ecuación de calibración realizada en el año 2008³, se puede realizar el siguiente análisis.

$$\left. \begin{aligned} V \left[\frac{m}{s} \right] &= 0.2182 n [rps] + 0.05 \text{ para } n < 0.84 \\ V \left[\frac{m}{s} \right] &= 0.2421 n [rps] + 0.03 \text{ para } 0.84 < n < 2.66 \\ V \left[\frac{m}{s} \right] &= 0.2515 n [rps] + 0.005 \text{ para } n > 2.66 \end{aligned} \right\} \text{ [Ecuación 5 Originales]}$$

$$V \left[\frac{m}{s} \right] = 0.2331 n [rps] + 0.0321 \text{ para } 4 < n < 14 \quad \text{[Ecuación 6 Calibración 2008]}$$

$$V \left[\frac{m}{s} \right] = 0.231 n [rps] + 0.024 \text{ para } 3 < n < 12 \quad \text{[Ecuación 7 Calibración 2013]}$$

Si las graficamos a todas ellas tenemos:

³ Extraído de: Laco, Maximiliano; Turelli, Pablo “Técnicas de medición de caudales en canales y ríos, Calibración de instrumental y Evaluación de incertidumbre” – Trabajo Final – Universidad Nacional de Córdoba – Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Córdoba – 2008.

| Condición | Diferencias Porcentuales |
|-----------|--|
| | Ecuación original- Ecuación Cal Nueva |
| 1 | 5,0 |
| 2 | 5,2 |
| 3 | 5,4 |
| 4 | 5,6 |
| 5 | 6,9 |
| Promedio | 5,6 |

Tabla 10: Diferencias porcentuales entre las diferentes curvas de calibración

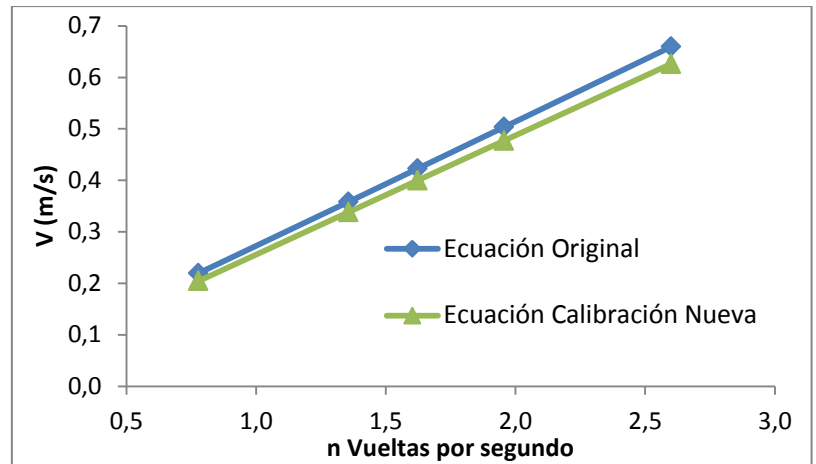


Figura 39: Contraste entre curvas de calibración previas y nueva para el micromolinete 13697 y la hélice 13697-3

En la Figura 39 no se expresa la recta de la calibración del 2008, debido a que el rango de aplicabilidad de esta no está dentro de las condiciones analizadas.

En este caso, el error es más elevado, esto se debe a que la comparación se realizó con la ecuación original. Si consideramos que el error que se había calculado en la calibración del 2008, se encontraba entre el 2.8 y el 3.8%, lo que es razonable decir que el error ahora sea de 5.6%. Al igual que en el caso anterior pudiese ser atribuible al desgaste de las piezas rotatorias.

2-2-4-4 Molinete de eje vertical o cazoletas

En este caso, el contador del molinete, proveía directamente en la pantalla la información de la velocidad registrada y no se obtiene acceso a la recta de calibración original. El funcionamiento de este es algo diferente al de los demás, ya que al iniciar el conteo el mismo releva un número entero de vueltas, que se llevan a cabo de alrededor de cuarenta (40) segundos. Al finalizarse, la pantalla expresa, el número entero de vueltas, el tiempo exacto y finalmente la velocidad.

2-2-4-4-1 Resultado de la verificación experimental

En la Tabla 11 se muestran los datos de velocidades medias medidas en el canal con el ADV en el lapso de 2 minutos previo y 2 minutos posterior a la medición (V_{ADV}); la lectura del número de vueltas que realiza el molinete en cuarenta (40) segundos (n_1 , n_2 , n_3); las velocidades registradas para cada una de las mediciones, expresado en la tabla en las columnas V_{MOL1} , V_{MOL2} , V_{MOL3} y luego de estas se realizó el promedio, que se muestra en la columna siguiente ($V_{MOL PROM}$):

| Cond | V_{ADV} | n_1 | n_2 | n_3 | n prom | V_{MOL1} | V_{MOL2} | V_{MOL3} | $V_{MOL PROM}$ |
|------|-----------|-------|-------|-------|-----------|------------|------------|------------|----------------|
| | [m/seg] | | | | | [m/seg] | [m/seg] | [m/seg] | [m/seg] |
| 1 | 0,301 | 19 | 18 | 19 | 18,7 | 0,320 | 0,307 | 0,325 | 0,317 |
| 2 | 0,412 | 26 | 25 | 26 | 25,7 | 0,440 | 0,422 | 0,433 | 0,432 |
| 3 | 0,479 | 30 | 31 | 31 | 30,7 | 0,503 | 0,526 | 0,526 | 0,518 |
| 4 | 0,619 | 37 | 36 | 36 | 36,3 | 0,621 | 0,610 | 0,604 | 0,612 |
| 5 | 0,833 | 47 | 47 | 47 | 47,0 | 0,789 | 0,795 | 0,793 | 0,792 |

Tabla 11: Validación de molinete de eje vertical

De la tabla anterior se realizó el siguiente gráfico, donde se comparan los datos medidos con ambos instrumentos.

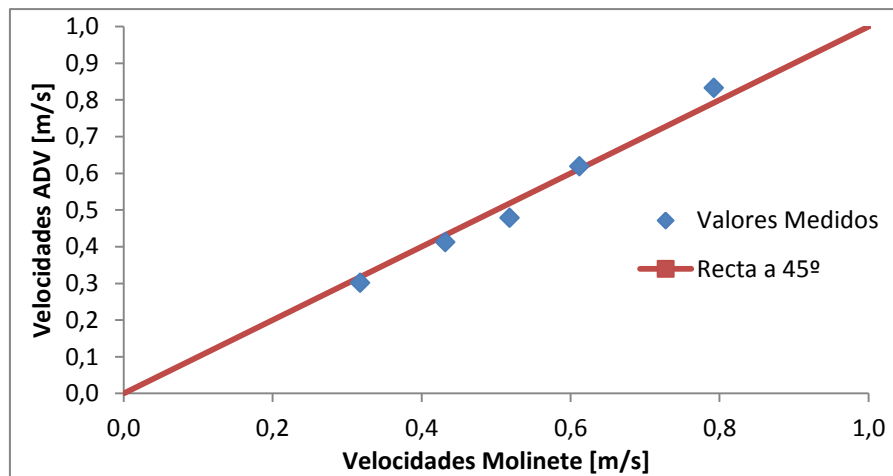


Figura 40: Contraste entre velocidades medidas con ADV y molinete de eje vertical, la recta de 45° indica acuerdo perfecto entre ambas mediciones.

En la siguiente tabla se expresan porcentualmente las diferencias producidas entre ambos instrumentos

| Error [%] | |
|-----------|-----------------|
| Condición | VADV- VMOL PROM |
| 1 | -5% |
| 2 | -5% |
| 3 | -8% |
| 4 | 1% |
| 5 | 5% |

Tabla 12: Diferencias porcentuales entre las mediciones del ADV y el molinete

Como se observa, las diferencias no son elevadas, ya que ninguna supera el 10%. Se debe destacar qué no se realiza una calibración del instrumento, sino que se busca conocer la magnitud del error que se comete con él. Además se evalúa el método de calibración de los molinetes cuyos resultados se mencionaron anteriormente. No se observó sesgo en los resultados lo que valida la metodología experimental empleada.

2-2-5 SÍNTESIS DE LA CALIBRACIÓN DE MOLINETES:

A través de la experiencia y el análisis de los datos, se obtuvo la relación número de vueltas y la velocidad del flujo, para cada molinete y cada hélice.

Se pudo realizar comparaciones entre las distintas curvas que se fueron obteniendo a lo largo del tiempo, y así mostrar cómo varían los resultados de las mediciones debido al desgaste que el instrumento sufre a lo largo de su vida útil.

También se verificó el funcionamiento del molinete de eje vertical, a través de su comparación con al ADV y se validó la metodología experimental.

2-2-6 RECOMENDACIONES

Es recomendable al realizar mediciones con los molinetes calibrados, realizar al menos tres (3) mediciones en cada punto con duración no menor de 30 segundos⁴.

2-3 VERIFICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL TUBO PITOT

2-3-1 Objetivos

Registrar velocidades de flujo con el Tubo Pitot y con el Velocímetro Acústico Doppler (ADV), para luego poder contrastar los resultados.

2-3-2 Elementos utilizados

Los elementos que se utilizaron para realizar la calibración fueron:

- Canal experimental.
- Velocímetro acústico doppler - ADV.
- Tubo Pitot.

2-3-2-1 Canal experimental

Véase en sección 2-2-3-1.

2-3-2-2 Velocímetro acústico doppler – ADV

Véase en sección 2-2-3-2.

2-3-2-3 Tubo Pitot estático

El tubo *Pitot estático* es un instrumento que permite medir velocidades de un fluido, a través de la determinación de las presiones estáticas y totales. Para ello consta de un tubo *Pitot* y un tubo *piezométrico*.

En el primero su orificio de entrada se ubica en dirección opuesta al sentido de la circulación del flujo. La velocidad del fluido se anula en el interior del tubo, al ser un punto de estancamiento, transformando la energía cinética en energía de presiones.

Mientras que el tubo piezométrico, consta de varias entradas laterales interconectadas entre sí, que no perturban la corriente; con él se mide la presión estática o piezométrica (altura topográfica más la altura de presiones.)

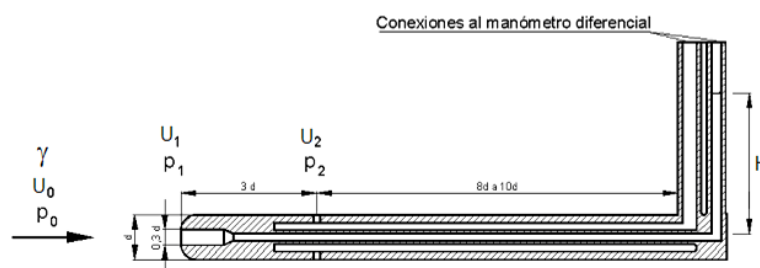


Figura 41: Corte esquemático de un Tubo Pitot Estático

⁴ Si bien el procedimiento utilizado para la calibración no es el mismo que propone las normas internacionales, este logra satisfactoriamente los objetivos planteados, y se adapta al instrumental que se dispone en el Laboratorio de Hidráulica.

El punto 0 de la Figura 41, la corriente no se encuentra perturbada, y se tiene una presión P_0 , para una velocidad U_0 .

De lo dicho anteriormente podemos escribir:

$$U_1 = 0 \quad [\text{Ecuación 8}]$$

Despreciando las diferencias de altura de velocidad y geodésica entre los puntos 0 y 2 que es muy pequeña por ser el tubo muy fino, y estar la corriente en 2 prácticamente normalizada después de la perturbación en 1, además de relegar las pérdidas, tenemos:

$$P_2 = P_0 \quad [\text{Ecuación 9}]$$

$$U_2 = U_{0t} \quad [\text{Ecuación 10}]$$

Donde U_{0t} es la velocidad teórica en el punto 0.

Por lo tanto, según la ecuación de Bernoulli en los tubos 0 y 1, sin considerar las pérdidas, tenemos:

$$Punto_0 = Punto_1 \quad [\text{Ecuación 11}]$$

$$z_0 + \frac{U_{0t}^2}{2g} + \frac{P_0}{\rho_{agua}} = z_1 + \frac{U_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho_{agua}} \quad [\text{Ecuación 12}]$$

Donde g es la fuerza de gravedad; ρ_{agua} es el densidad del agua; z_0 y z_1 son las alturas topográficas de los puntos 0 y 1 respectivamente, a los fines prácticos $z_0 = z_1$, referenciado a un plano. U_{0t} y U_1 son las velocidades del fluido en los puntos 0 y 1. P_0 y P_1 son las presiones en los respectivos puntos.

Reescribiendo, obtenemos las siguientes ecuaciones:

$$\frac{U_{0t}^2}{2g} + \frac{P_0}{\rho_{agua}} = \frac{P_1}{\rho_{agua}} \quad [\text{Ecuación 13}]$$

Despejando U_{0t} de la ecuación 11, tenemos:

$$U_{0t} = \sqrt{2g \frac{(P_1 - P_0)}{\rho_{agua}}} \quad [\text{Ecuación 14}]$$

Se sabe que:

$$P_0 = P_2 = \rho_{agua} H_2 \quad [\text{Ecuación 15}]$$

$$P_1 = \rho_{agua} H_1 \quad [\text{Ecuación 16}]$$

Donde H_1 es la altura de presiones totales y H_2 es la altura de presiones estáticas, sustituyendo en la Ecuación 14, tenemos:

$$U_{0t} = \sqrt{2g \frac{(\rho_{agua} H_1 - \rho_{agua} H_2)}{\rho_{agua}}} \quad [\text{Ecuación 17}]$$

$$U_{0t} = \sqrt{2g \frac{\rho_{agua}(H_1 - H_2)}{\rho_{agua}}} \quad [\text{Ecuación 18}]$$

$$U_{0t} = \sqrt{2g(H_1 - H_2)} \quad [\text{Ecuación 19}]$$

$$U_{0t} = \sqrt{2g \Delta H} \quad [\text{Ecuación 20}]$$

Se debe introducir un coeficiente de corrección C_v , llamado coeficiente de velocidad del tubo Pitot, que relaciona la velocidad teórica con la real:

$$C_v = \frac{U_0}{U_{0t}} \quad [\text{Ecuación 21}]$$

$$U_0 = C_v \sqrt{2g\Delta H} \quad [\text{Ecuación 22}]$$

Ventajas

- Construcción simple.
- Bajo costo.
- Perdidas de cargas relativamente bajas.
- Se requiere un pequeño espacio para su utilización.
- Se puede emplear cuando los tirantes son pequeños.

Limitaciones:

- Resolución espacial insuficiente para algunas aplicaciones.
- Caracterización de una sola componente del vector velocidad.
- Precisión insuficiente para velocidades bajas (menores a 0,4 m/s.)
- El tubo debe estar perfectamente alineado con la dirección del flujo.
- Desalineamiento máximo de construcción $\pm 5^\circ$ para tener resultados fiables.
- En la configuración adoptada, no caracteriza las fluctuaciones turbulentas.

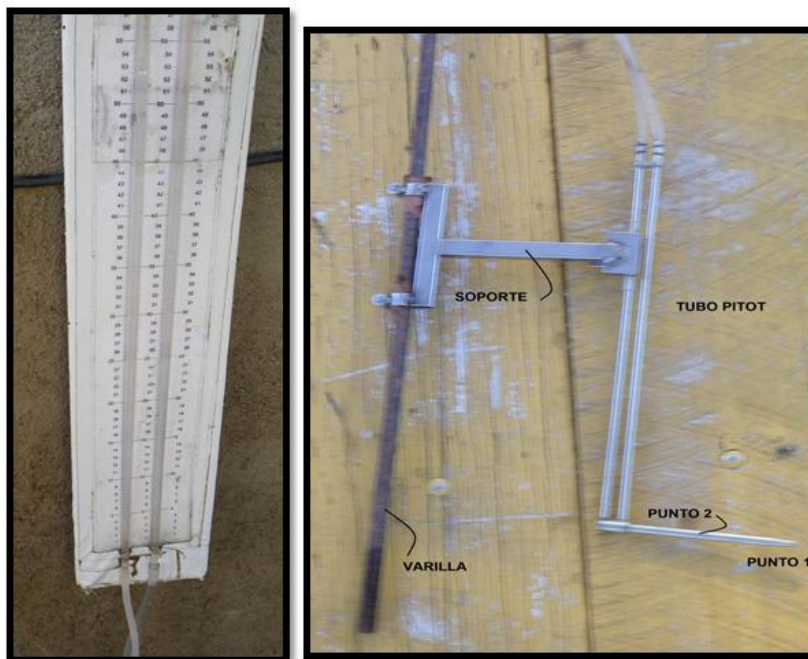


Figura 42: Tubo Pitot utilizado

2-3-3 Metodología

2-3-3-1 Paso 1: Instalación del instrumental:

Se coloca el tubo ADV a 10 centímetros del fondo del canal, luego se ubica el tubo Pitot lo más próximo posible al volumen de medición, sin que este interfiera en la medición, a 5 centímetros del fondo, como se muestra en la figura.

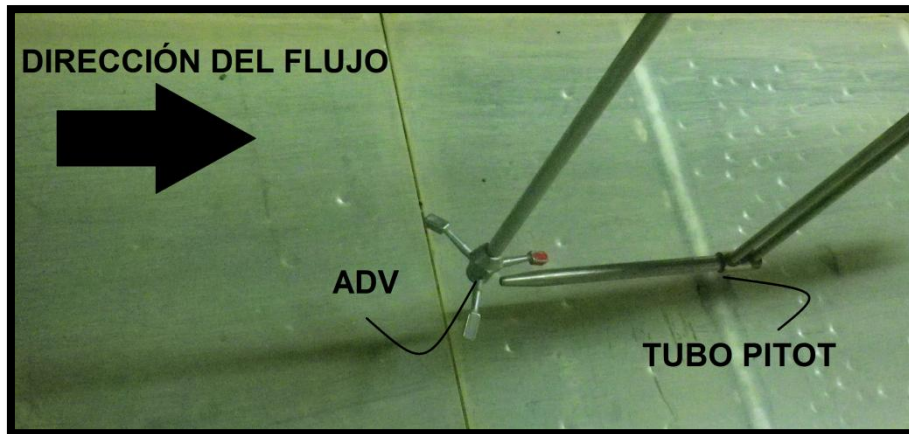


Figura 43: Ubicación del instrumental para la validación del tubo Pitot estático

2-3-3-2 Paso 2: Implementación del caudal:

Se implementó en el canal con un caudal medido y a través de una compuerta se reguló el tirante aguas arriba para variar las velocidades del flujo las cuales fueron establecidas in situ con la ayuda de las lecturas provistas por el ADV.

2-3-3-3 Paso 3: Mediciones:

Se realizaron mediciones a cinco (5) velocidades diferentes, en un rango de 0,30 m/seg. a 0,85 m/seg.

Una vez estabilizada la velocidad del flujo, se procedió a realizar la lectura de las liras, luego de dos (2) minutos, se vuelve a tomar lectura en las mismas condiciones, para realizar posteriormente un promedio del mismo

2-3-3-4 Paso 4: Análisis de Datos:

Se calcularon las diferencias de altura, luego los promedios; y con ellos, se obtuvieron las velocidades. Estas se graficaron y compararon con los antecedentes que se poseían.

2-3-4 Resultados de la validación

De la experiencia se recolectaron los datos de velocidad media medida con el ADV (V_{ADV}), y las lecturas 1 y 2 de cada una de las liras. Con ellas se calculó la diferencia de lecturas para cada condición (ΔH_1 y ΔH_2) que luego se promedió (ΔH_{Prom}). Para que finalmente, con un coeficiente de velocidad (C_v) de 0,94, se obtuviera las velocidades (V_{Pitot}). Esto se muestra en la siguiente tabla.

| Cond | V_{ADV} | Lecturas 1 | | ΔH_1 | Lecturas 2 | | ΔH_2 | ΔH_{Prom} | Cv | V_{pitot} |
|------|-----------|------------|------|--------------|------------|------|--------------|-------------------|------|-------------|
| | [m/s] | [cm] | [cm] | [cm] | [cm] | [cm] | [cm] | [cm] | | [m/s] |
| 1 | 0,301 | 52,6 | 52,0 | 0,6 | 52,6 | 51,9 | 0,7 | 0,7 | 0,94 | 0,336 |
| 2 | 0,412 | 47,8 | 46,6 | 1,2 | 47,8 | 46,6 | 1,2 | 1,2 | | 0,456 |
| 3 | 0,479 | 44,0 | 42,5 | 1,5 | 43,9 | 42,5 | 1,4 | 1,5 | | 0,501 |
| 4 | 0,619 | 38,5 | 36,1 | 2,4 | 38,5 | 36,1 | 2,4 | 2,4 | | 0,645 |
| 5 | 0,833 | 34,0 | 29,8 | 4,2 | 34,2 | 29,8 | 4,4 | 4,3 | | 0,863 |

Tabla 13: Resultados de la validación del tubo Pitot

Realizando una comparación gráfica entre las velocidades medias medidas con el ADV y las velocidades medidas con el tubo Pitot, obtenemos la siguiente curva, a la que se le agregó los datos de calibraciones precedentes.

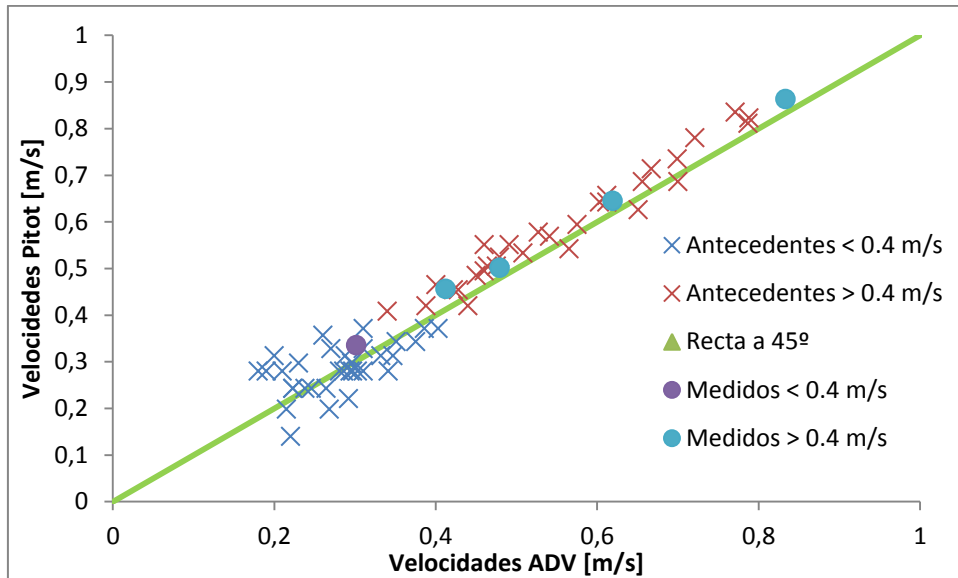


Figura 44: Verificación del funcionamiento del tubo Pitot estático, recta a 45° indica arreglo perfecto.

En él se muestran una recta de color verde, que representa la curva ideal, es decir que la velocidad medida con el ADV es la misma que la medida con el tubo Pitot; y una serie de puntos que son el resultado de mediciones precedentes y actuales.

Es de destacar cómo aumenta la diferencia entre los puntos y la curva ideal para valores de velocidad menores a los 0.4 m/seg.; mientras que para valores mayores se aproximan bastante. Si se expresa gráficamente la variación del error para diferentes valores de velocidad, se tiene:

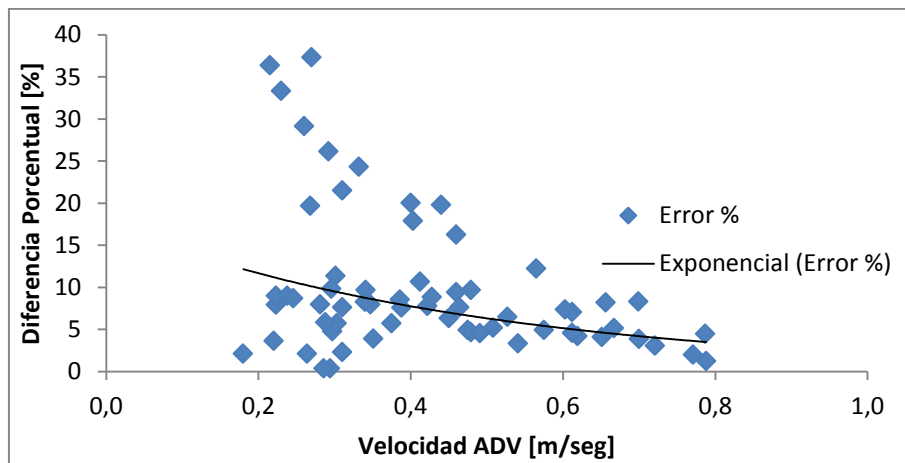


Figura 45: Variación del error en la medición y curva de tendencia exponencial

Como se ha expresado en otros trabajos realizados en el Laboratorio de Hidráulica, el error para velocidades superiores a los 0.4 m/seg. es del $\pm 11\%$ y disminuye rápidamente hasta valores de velocidad del orden de los 0.5 m/seg., luego la disminución no es tan abrupta, pero llega a valores de error de no más de $\pm 3\%$. Para valores de velocidades menores, los errores aumentan considerablemente, lo que lleva a no ser recomendable su utilización.

En la Figura 47 se muestra gráficamente la incertidumbre porcentual para distintos valores de velocidad, en la curva de color azul se asume una precisión de lecturas de

± 1 mm. y de ella se ve, que para valores de 0,4 m/seg. la incertidumbre adquiere una magnitud menor del 10%. La curva de color rojo se realizó asumiendo una precisión de lectura de ± 2 mm. y de ella se observa que la magnitud de la incertidumbre adquiere valores superiores al 10%. Esta última se la que más se asemeja a la curva tendencial que se realizó con los datos relevados (expuestos anteriormente en la Figura 45.)

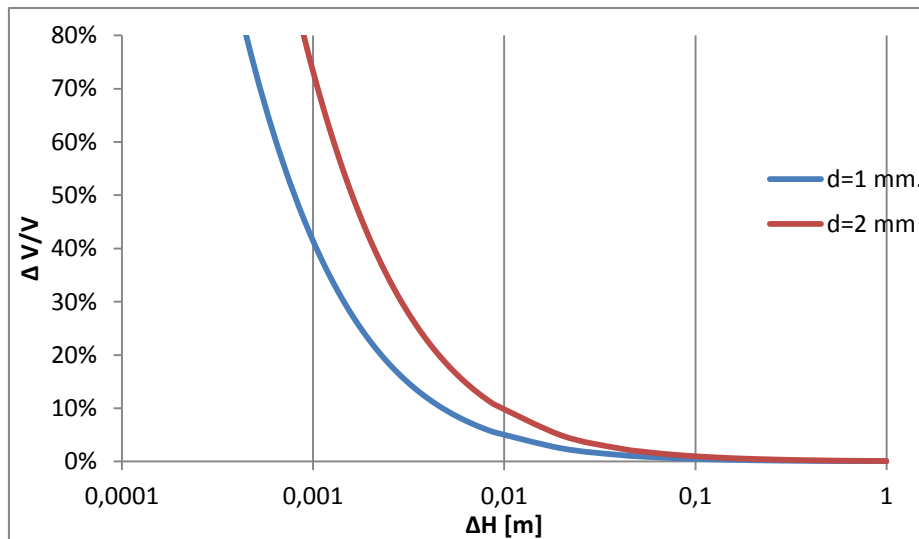


Figura 46: Incertidumbre porcentual en la determinación de la velocidad medida con Pitot estático, para distintos valores de ΔH (en escala logarítmica), con una precisión de ± 2 mm por lectura de ΔH (roja), con precisión de ± 1 mm (azul.)

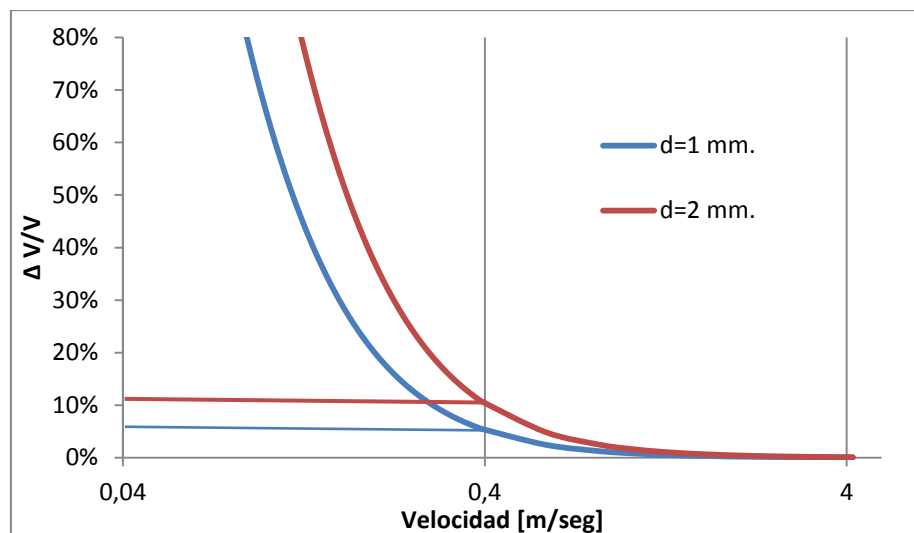


Figura 47: Incertidumbre porcentual en la determinación de la velocidad medida con Pitot estático, para distintos valores de velocidad (en escala logarítmica), con una precisión de ± 2 mm por lectura de ΔH (roja), con precisión de ± 1 mm (azul.)

2-3-5 SÍNTESIS DE LA VALIDACIÓN DEL TUBO PITOT

Los resultados de la calibración han dado valores esperados según estudios previos realizados sobre el instrumento. Es necesario conocer en qué condiciones se encuentran el tubo Pitot, y qué errores se cometen al llevar a cabo mediciones con él.

2-3-6 RECOMENDACIONES

Como recomendación se puede decir que para velocidades mayores a 0,4 m/s, utilizando un $C_d = 0,9448$, el tubo de Pitot da resultados aceptables para determinadas aplicaciones, con un error máximo posible de $\pm 11\%$. Para velocidades menores a 0,4 m/s, el error aumenta en forma considerable, por lo cual no se recomienda emplear el tubo de Pitot dentro de este rango de velocidades.

2-4 IMPLEMENTACIÓN DE PTV

2-4-1 Descripción de la técnica de medición

La idea conceptual de la técnica PTV es simple. La localización de cada partícula sembrada en el flujo se detecta en dos imágenes digitales secuenciales para determinar su desplazamiento, y con el tiempo entre las imágenes se determina el vector velocidad de cada partícula que se asume que se mueve con el flujo. La técnica de velocimetría por seguimiento de partículas (PTV) permite caracterizar el campo de velocidades en una región del flujo, en función de la cantidad de partículas detectadas, sin embargo su desventaja radica en que solo se pueden conocer las velocidades en un plano que se puede materializar con un láser o sembrando partículas, con densidad menor al fluido, en la superficie.

La dificultad de la técnica del PTV se circunscribe en la identificación de cada partícula individualmente entre imágenes consecutivas cuando hay muchas partículas sembradas en el flujo y se produce su aglomeración. Para ello se han propuesto una variedad de algoritmos, basados en los métodos de relajación y el tensor del gradiente de la velocidad.

2-4-1-1 Instrumental requerido

A continuación se detallan los elementos necesarios para implementar la técnica PTV:

- Soporte: Es necesaria una estructura de soporte para instalar la cámara desde donde se toman las imágenes del área de flujo en estudio (ver Figura 48.)
- Cámara: Para obtener las imágenes necesarias para realizar el procesamiento se debe utilizar una cámara digital con una resolución de video aceptable (es importante aclarar que la resolución de video no es la misma que la resolución que posee la cámara para tomar fotografías) y una frecuencia de captación acorde con la velocidad del fluido, área a analizar y tamaño de la partícula (ver Figura 48.)
- Iluminación. El área debe estar suficientemente iluminada para lograr una buena visualización de las partículas. Es conveniente que la iluminación sea uniforme y difusa para evitar sombras y reflejos, y así garantizar una identificación adecuada de las partículas en toda el área de estudio.
- Grilla. Es fundamental disponer de una placa graduada o grilla para obtener una correspondencia entre el tamaño del pixel en la imagen y la distancia real (ver Figura 49.) Este es un elemento auxiliar indispensable para obtener el desplazamiento real de la partícula, y luego la velocidad. Se puede utilizar una mira topográfica (ver Figura 50) en vez de la grilla, debido a que permite realizar una buena correspondencia entre el pixel de la imagen y la distancia real.

- Partículas. La elección de las partículas es una parte importante de la técnica ya que éstas deben tener características muy específicas (ver Figura 51, Figura 52 y Figura 53):



Figura 48: Cámara y soporte

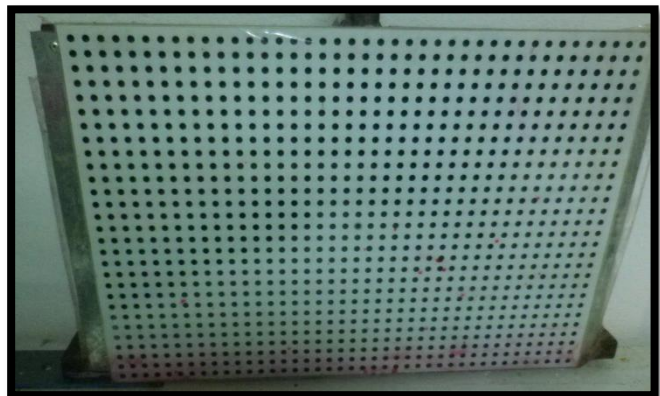


Figura 49: Grilla de calibración

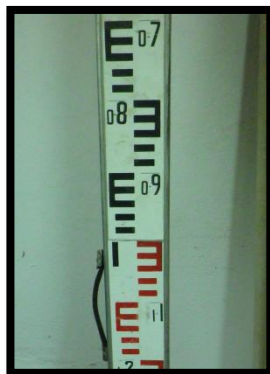


Figura 50: Mira topográfica



Figura 51: Partículas Discos Plásticos



Figura 52: Partículas Plásticas Negras



Figura 53: Partículas Esféricas Blancas

- Densidad: las partículas deben flotar en el agua pero, tener la densidad suficiente para no ser arrastradas por agentes externos como el viento. Actualmente el equipo de trabajo se encuentra realizando un estudio para conocer cómo afecta el viento sobre cada tipología de partículas que el Laboratorio de Hidráulica posee.

- **Color:** deben ser perfectamente visibles, con color uniforme, contrastantes con el fondo y fluorescentes o refractivas.
- **Tamaño:** tiene relación con la resolución de la cámara digital, con el área de flujo que se desea muestrear, y con la distancia entre la cámara y la superficie del flujo. Para reconocer las partículas en cada imagen, la técnica PTV requiere que el tamaño de las mismas sea el adecuado para ser detectada por el programa de procesamiento. Si el área de flujo a muestrear en el estudio del modelo físico Los Molinos tiene una longitud característica de 5 metros y la resolución de la utilizada durante el registro de video es de 640x480 pixeles por lo que el tamaño del pixel es de aproximadamente 1 cm. Por lo tanto son requeridas partículas con un diámetro mayor o igual a 1 cm. Para medir en el canal de 0,5 metros de longitud característica, con la misma resolución de video, el tamaño del pixel es de aproximadamente 1 mm. por lo que con partículas mayores a 1 mm. sería suficiente para aplicar la técnica.
- **Forma:** Es conveniente una forma uniforme para el fácil reconocimiento de las partículas. La forma aproximadamente esférica es ideal.
- **Material:** Un problema que presentan las partículas sembradas es la tendencia a formar aglomeraciones debido a tensión superficial. Debemos buscar un material que evite la aglomeración de partículas.

- Dispositivo para sembrado de partículas. Una distribución homogénea y una buena densidad de partículas dispersas en la superficie del flujo son necesarias para resultados óptimos. Si la densidad de partículas en un sector es muy baja el programa de correlación no obtiene velocidades, generando una zona sin información. La manera de sembrar las partículas, para obtener distribución uniforme en toda la sección de estudio y densidad constante, durante el tiempo necesario de filmación, requiere de algún dispositivo específico preparado para tal fin.

2-4-1-2 Metodología

Para la implementación de la técnica PTV se recomiendan los siguientes procedimientos:

- Paso 1: **Definir la zona del flujo a caracterizar**, se deben realizar los experimentos bajo una iluminación uniforme y difusa de forma tal de garantizar una correcta identificación de las partículas y evitar que se generen reflejos y sombras.

- Paso 2: **Colocar la cámara** apuntando al área a estudiar cuidando que el ángulo formado por la vertical de la lente y el área a analizar sea 90° (ver Figura 54). Si esto no es posible, se deben rectificar las imágenes para obtener resultados válidos. Además debe asegurarse de que la cámara quede bien fija y no vibre sobre el soporte. Es recomendable que la cámara tenga una memoria disponible mínima de 2 Gb libres, ya que las filmaciones requieren mucho espacio.

Se despeja toda el área que queda dentro del foco de la cámara y se procede a dar inicio a la filmación. Al inicio de la misma se coloca la grilla o mira topográfica, la cual permite luego obtener el desplazamiento real de la partícula.

- Paso 3: **Sembrado de las partículas**, el cual debe ser homogéneo y debe lograrse una buena densidad de partículas, para evitar de esta manera zonas del flujo sin información. El tiempo de filmación debe ser el adecuado para obtener una buen

estimador del campo medio (al menos 30 veces el tiempo característico del flujo en la instalación experimental) - García, et al (2007) -

Se detiene la filmación y se nombra al archivo con un nombre que permita identificarlo rápidamente. Es recomendable siempre hacer una copia de respaldo de los videos para evitar, ante cualquier falla, la pérdida de todos los ensayos realizados.

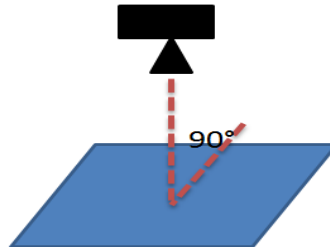


Figura 54: Verticalidad de la cámara frente a la superficie a analizar.

- Paso 4: **Recolección de las partículas.**
- Paso 5: **Extracción las imágenes** digitales del video registrado.
- Paso 6: **Procesamiento** de las imágenes digitales utilizando el software PTVlab detallado anteriormente.

2-4-2 Programa para el análisis digital de imágenes

Para el análisis de las imágenes se utilizó el software desarrollado en Matlab denominado PTVLab (Patalano et al, 2013), este programa fue desarrollado por el grupo de trabajo Detu del Laboratorio de Hidráulica de la FCEFYN. Mediante este software se realiza el preprocesamiento, detección de partículas, determinación por correlación cruzada, se aplican los filtros y se realiza el post-procesamiento de una manera muy sencilla gracias a su interfaz gráfica (ver Figura 55.)

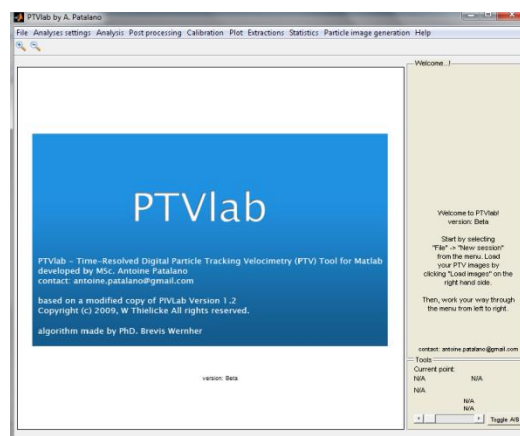


Figura 55: Programa PTVlab.

La forma en que este programa procesa las imágenes se basa en la aplicación de un algoritmo dinámico, binario y espacial, basado en la correlación cruzada entre dos imágenes secuenciales. Este algoritmo fue verificado usando datos sintéticos obtenidos de la implementación computacional de flujo inviscido (es decir, sin fricción)

alrededor de un cilindro, y usando imágenes estándar proveídas por la Sociedad de Visualización del Japón (Okamoto et al, 2000).

El algoritmo se divide básicamente en 4 etapas principales (ver Figura 56):

- Datos de entrada (imágenes, coeficientes de correlación mínimos permitidos, tamaños de las ventanas de interrogación, etc.)
- Proceso principal. En esta etapa, se realiza el preprocesamiento de la imagen (eliminación ruido, mejoramiento, etc.), la detección de las partículas y la aplicación de una técnica de correlación a los fines de encontrar el vector de velocidad correspondiente a cada partícula.
- Aplicación de distintos filtros y salida de datos.
- Postprocesamiento de los datos de salida, los cuales pueden ser utilizados para generar gráficos que contengan campo de velocidad media, vorticidad, secuencias de imágenes, etc.

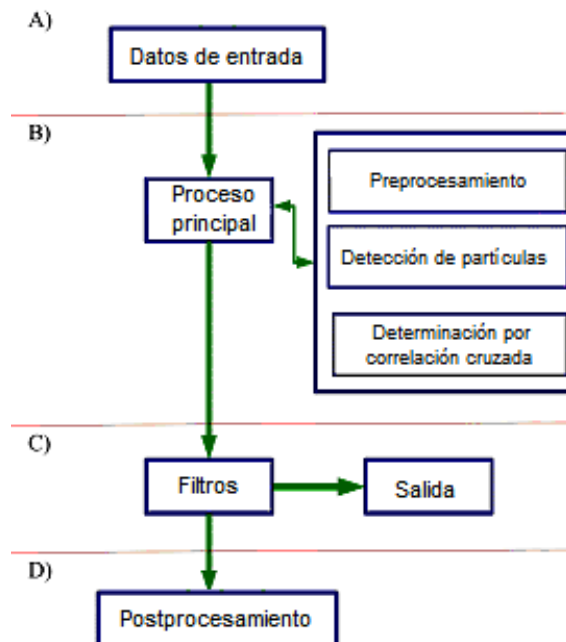


Figura 56: Algoritmo del programa.

2-4-3 Evaluación de aptitud de las partículas para seguir al flujo

2-4-3-1 Introducción

Se realizaron una serie de ensayos de prueba en el canal experimental, en los cuales se midió la velocidad superficial del agua con la técnica PTV con distintos tipos de partículas.

Las partículas ensayadas fueron de dos tamaños y de diferentes materiales, las partículas plásticas negras (ver Figura 52) y las partículas esféricas blancas (ver Figura 53). Los resultados de los mismos se muestran a continuación.

2-4-3-2 Resultados y análisis de partículas esféricas blancas

Las partículas empleadas en este caso están compuestas de una bolita de polietileno expandido, que se le colocó un tornillo a cada una de ellas, con la finalidad de aumentar su peso (y por lo tanto su densidad) para que se cumpla la condición de que las partículas tengan la misma velocidad que la del flujo.

Se realizó el análisis de los videos tomados el día jueves 18 de Abril. La cámara empleada tiene una resolución de video de 1080 x 720 y toma 30 cuadros por

segundo. Los parámetros para la detección de partículas empleados se describen a continuación:

- Coeficiente de correlación C: 0.4 (valor óptimo para la detección)
- Desvío σ : 3
- Umbral de intensidad: 70 %
- Área de Correlación: 20 pix
- Correlación mínima: 0.7
- Similitud de áreas vecinas: 25%
- Calibración Esc.: 1 pix/imag = 0.033 m/seg.

A continuación se presentan una serie de gráficos que se obtienen luego del análisis, vale aclarar que el programa provee muchas más opciones, aquí solo se muestran las que serán utilizadas en este trabajo.

- Magnitud de velocidades medias de flujo son:

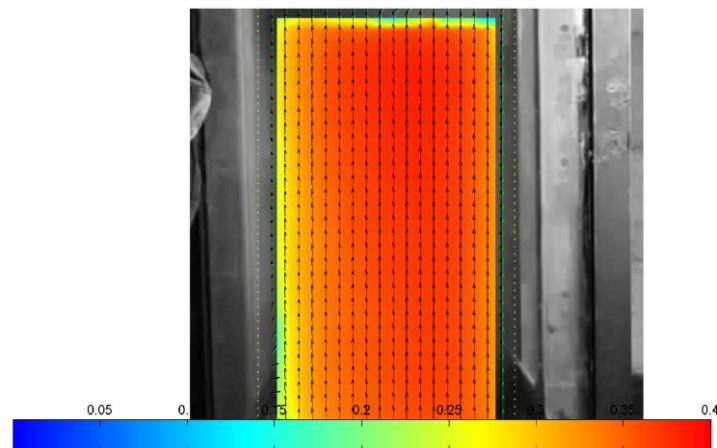


Figura 57: Magnitud de velocidades medias de flujo [m/seg.] en ensayo con Partículas Esféricas Blancas

- Trayectorias de partículas:



Figura 58: Trayectorias de Partículas Esféricas Blancas

- Líneas de corriente:

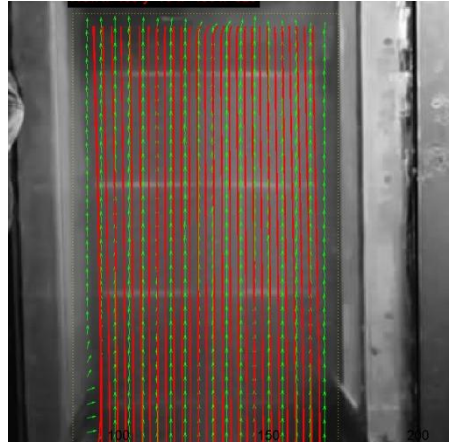


Figura 59: Líneas de Corriente en ensayo con Partículas Esféricas Blancas

- Velocidades en una sección transversal del canal:
En la siguiente imagen se muestra la sección de la cual se obtuvieron los datos.

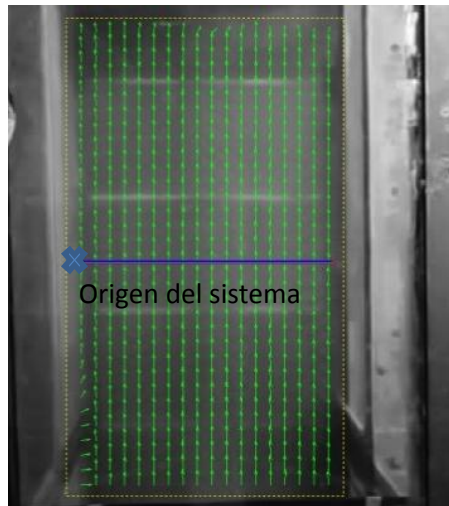


Figura 60: Sección analizada

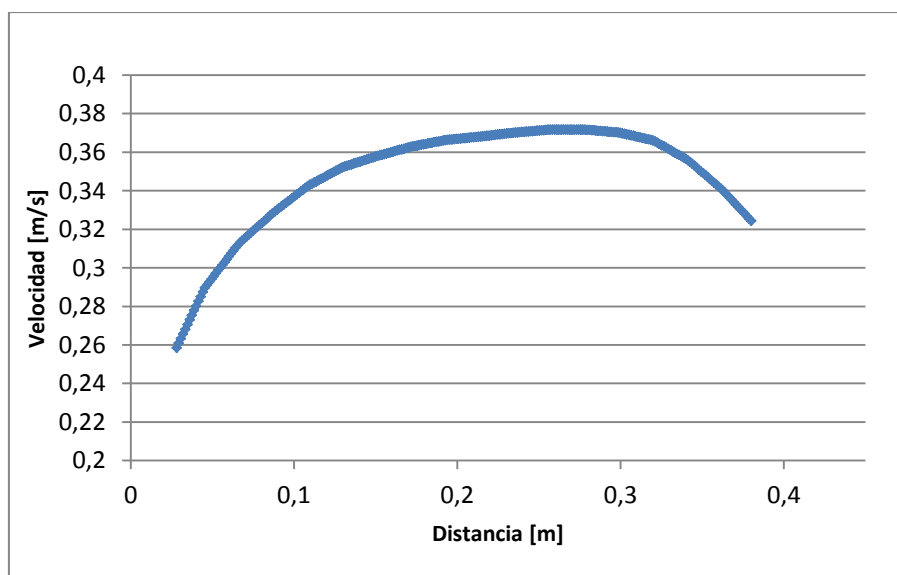


Figura 61: Perfil transversal de velocidades [m/seg.] de la sección analizada

En los gráficos anteriores se muestra la dirección del flujo en un grupo de puntos en el área analizada, también se ven las trayectorias que siguen cada una de las partículas, además de un campo de velocidades del área y un gráfico de las velocidades en una sección transversal del canal.

Es de destacar que las partículas tienden a desplazarse en líneas rectas, en sentido longitudinal del canal, las velocidades son máximas en el centro del canal y disminuyen a medida que se aproximan a las paredes.

2-4-3-3 Resultados y análisis de partículas plásticas negras

Las partículas utilizadas en esta experiencia, son pequeños trazos de plástico fundido.

Se realizó el análisis de los videos tomados el día jueves 18 de Abril. . La cámara empleada tiene una resolución de video de 1080 x 720 y toma 30 cuadros por segundo. Los parámetros para la detección de partículas empleados se describen a continuación:

- Coeficiente de correlación C: 0.4 (valor óptimo para la detección)
- Desvío σ : 5
- Umbral de intensidad: 15 %
- Área de Correlación: 20 pix
- Correlación mínima: 0.7
- Similitud de áreas vecinas: 25%
- Calibración Esc.: 1 pix/imag = 0.033 m/seg.

A continuación se presentan una serie de gráficos que se obtienen luego del análisis:

- Magnitud de velocidades medias de flujo son:

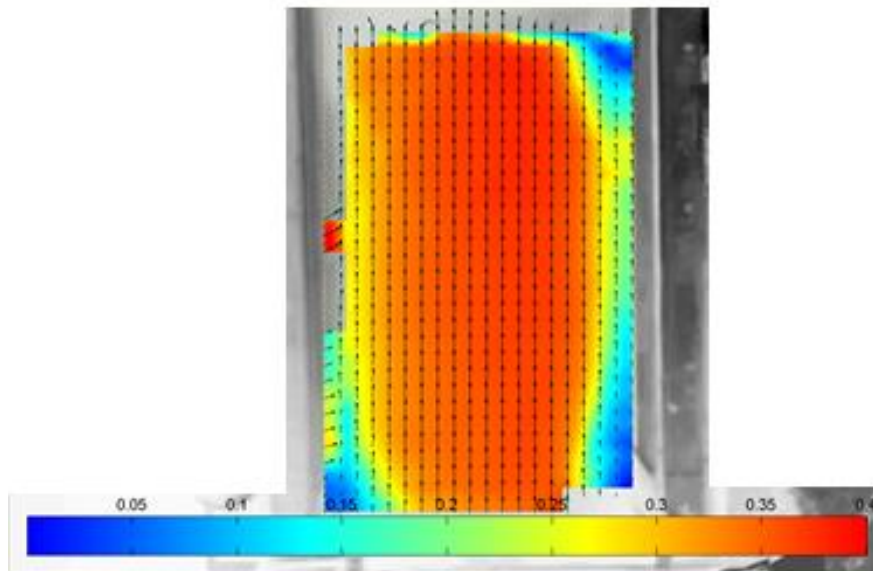


Figura 62: Magnitud de velocidades medias de flujo [m/seg.] en ensayo de Partículas Plásticas Negras

- Trayectorias de partículas:

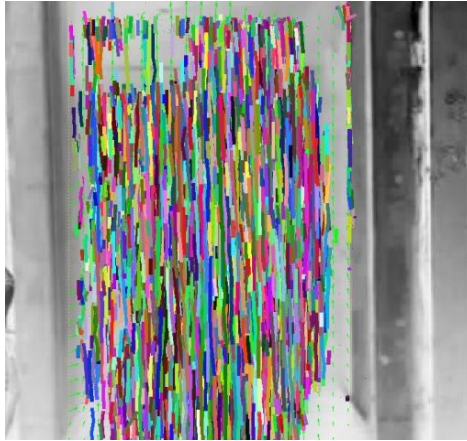


Figura 63: Trayectorias de Partículas Plásticas Negras

- Líneas de corriente:

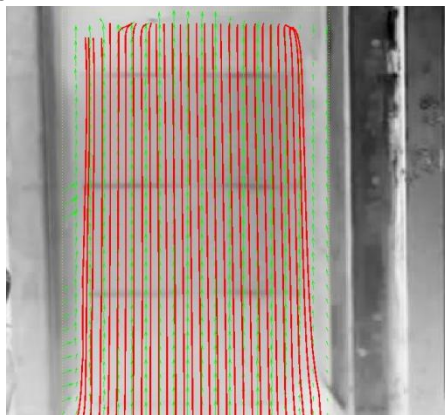


Figura 64: Líneas de Corriente en ensayo de Partículas Plásticas Negras

- Velocidades en una sección transversal del canal:

En la siguiente imagen se muestra la sección de la cual se obtuvieron los datos.

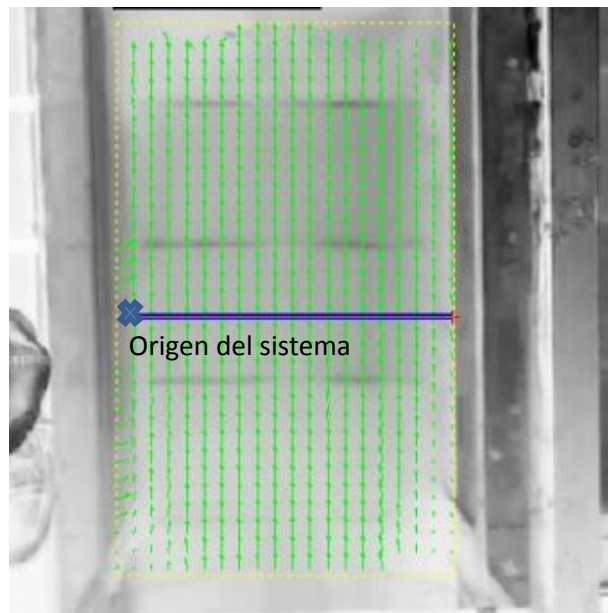


Figura 65: Sección analizada

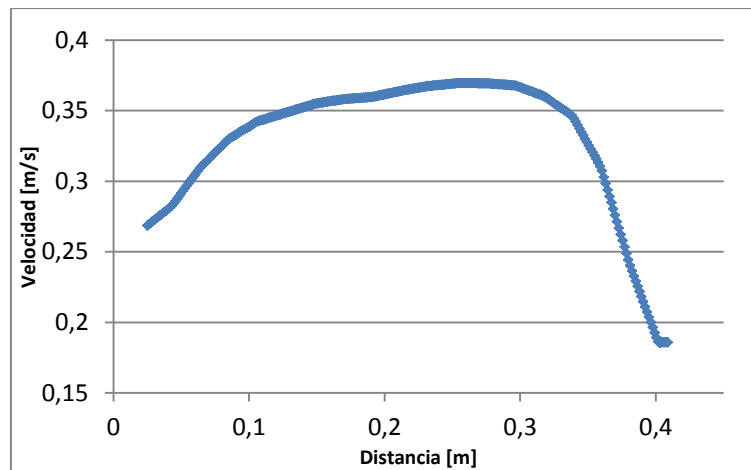


Figura 66: Perfil transversal de velocidades [m/seg.] de la sección analizada

En los gráficos anteriores se muestra, los mismos gráficos que se mostraron en el ensayo de las partículas esféricas blancas.

Es de destacar que, al igual que el caso anterior, las partículas tienden a desplazarse en líneas rectas, en sentido longitudinal del canal, las velocidades son máximas en el centro del canal y disminuyen a medida que se aproximan a las paredes.

2-4-3-4 Síntesis de verificación de aptitudes de PTVlab

De esta experiencia, se observó las diferentes partículas generan campos de velocidades comparables lo que indican que pueden ser utilizadas en forma complementarias.

Además es importante destacar, que si bien las partículas esféricas blancas no requieren invertir los colores de las imágenes y son de muy fácil detección con el programa; las partículas de plástico negro al ser de menor tamaño se adaptan mejor para análisis en detalle de ciertos elementos, esto se ve en la Figura 67 y más adelante en los ensayos realizados.

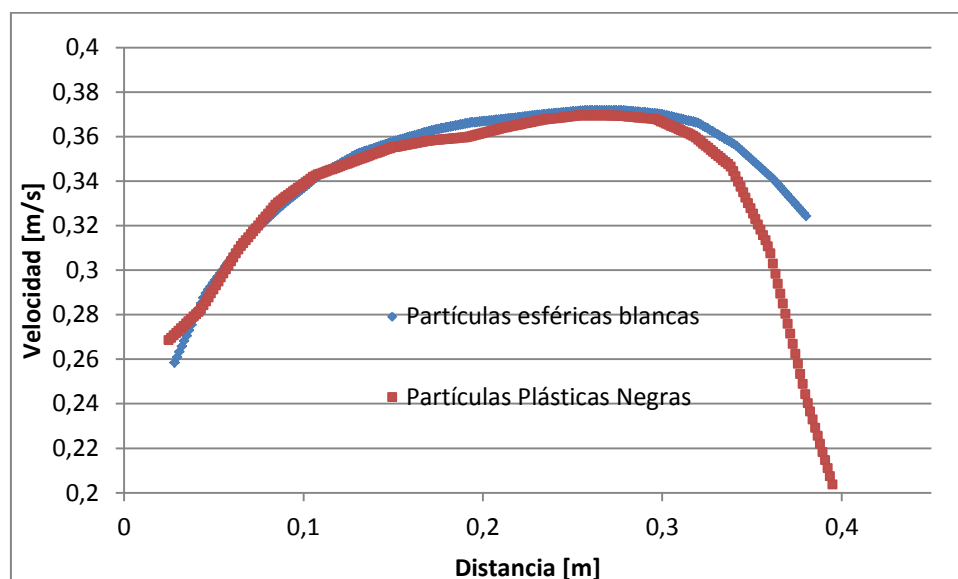


Figura 67: Comparación entre las velocidades de flujo registradas en las secciones de análisis con los diferentes tipos de partículas

CAPÍTULO 3:

Diseño y desarrollo de actividades experimentales en el modelo físico los molinos.

CAPÍTULO 3: DISEÑO Y DESARROLLO DE ACTIVIDADES EXPERIMENTALES EN EL MODELO FÍSICO LOS MOLINOS

3-1 INTRODUCCIÓN

En el siguiente capítulo se detallan las condiciones experimentales ensayadas y con qué elementos y metodologías experimentales se llevaron a cabo.

Los diferentes componentes del dique se denominarán como muestra la figura a continuación:

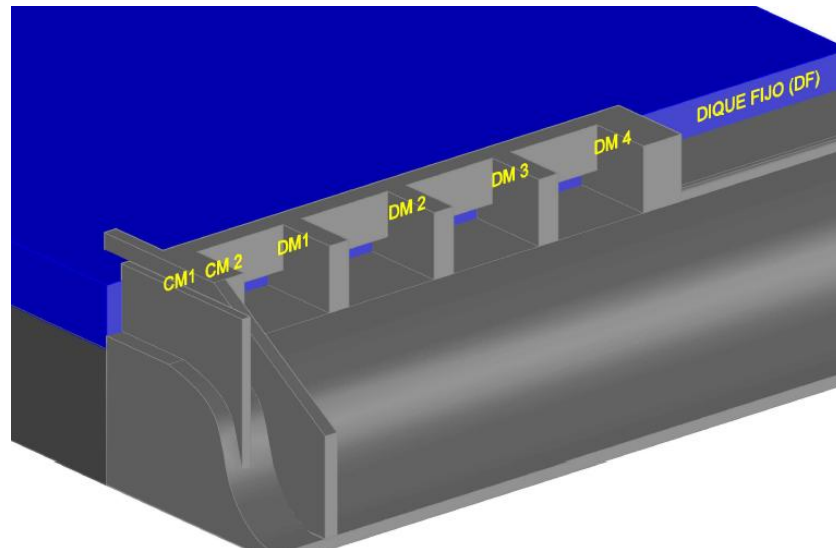


Figura 68: Denominación de los componentes del dique.

Los ensayos realizados fueron:

1. Medición en planta de velocidades en estructuras del Dique Móvil.
2. Medición de perfiles de velocidades en estructuras del Dique Móvil.
3. Medición de velocidades en dique móvil, para diferentes configuraciones de compuertas
4. Determinación de la eficiencia de descarga de las estructuras de Dique Móvil.
5. Medición de velocidades para diferentes condiciones de ingreso.

3-2 INSTRUMENTAL UTILIZADO

3-2-1 Técnica de medición: Tubo Pitot

Los elementos que se requirieron para poder realizar la medición con dicha técnica fueron los siguientes:

- Tubo Pitot: ver sección 2-3-2Tubo Pitot.
- Manguera: elemento flexible para conducir el agua, se utilizó para poder llenar las liras del tubo Pitot.
- Netbook: en la cual se registraron los valores de cada lectura realizada.

3-2-2 Técnica de medición: PTV

Los elementos requeridos para llevar a cabo esta técnica de medición fueron los expresados en la sección 2-4-1-1 Instrumental requerido.

En este caso se empleó una cámara montada en un trípode las imágenes que se tomaron, tuvieron que ser rectificadas para obtener las magnitudes reales de velocidades.

La cámara tiene una resolución 1280 x 720 y toma 30 cuadros por segundo.

3-3 CONDICIONES EXPERIMENTALES ENSAYADAS

3-3-1 Topografía del lecho aguas arriba del dique

En el caso particular de los futuros trabajos, el área de estudio dentro del modelo, se encuentra entre la confluencia de los ríos Grande y Reyes y la obra de cierre. Por este motivo ha sido relevado una serie de puntos, de las márgenes y el cauce, para poder obtener la topografía del área antes citada.

En la Figura 69 se muestran las curvas de nivel, con un sombreado, el cual representa según la tonalidad la altura del terreno (cuanto más oscuro más elevado); además se muestra los cauces de los ríos y las distintas partes del dique. Para poder obtener la, se tuvo que realizar un relevamiento con nivel y mira del terreno, luego procesar los datos para alcanzar las cotas altimétricas de cada uno de los puntos; y finalmente con la ayuda de un programa computacional se obtuvieron las curvas de nivel, que se referenció a una vista en planta del modelo.

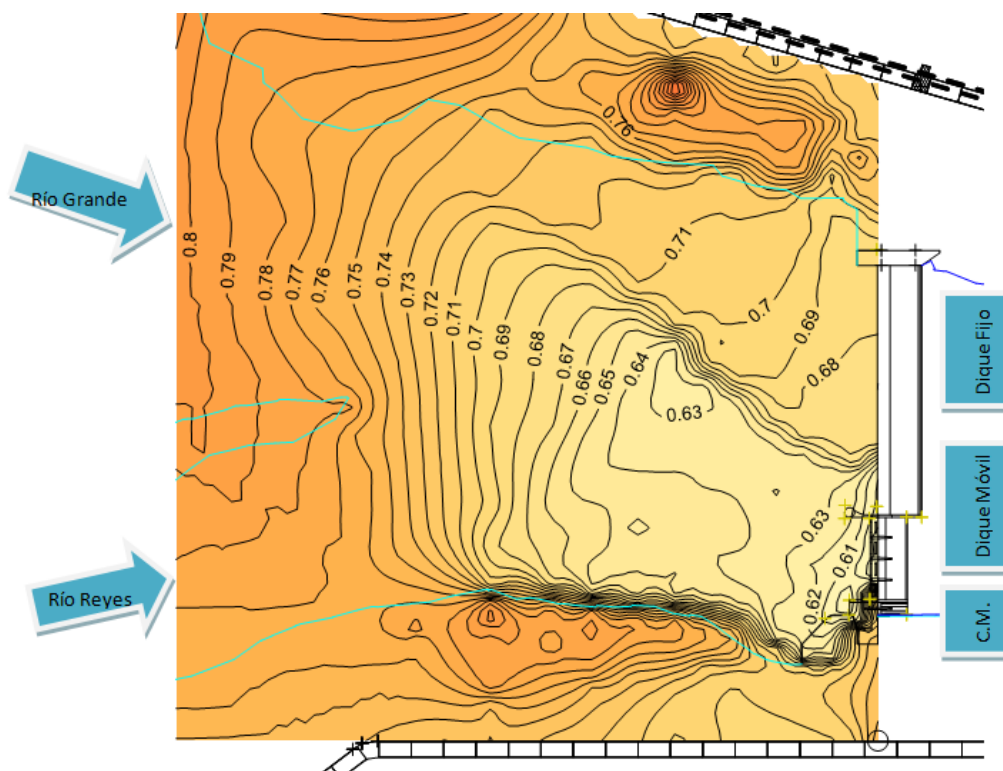


Figura 69: Topografía del lecho aguas arriba de la presa

3-3-2 Evolución transversal de velocidades de flujo en estructuras del Dique Móvil con apertura total.

El ensayo se realizó el día 4 de Abril del 2013, en él se procedió a medir las velocidades en distintos puntos de cada compuerta del dique móvil con el tubo Pitot.

Los caudales ingresaron al modelo únicamente por el río Grande, con una evolución de magnitud que se muestra a continuación:

| Lectura de Limnómetro [cm] | Hora de Lectura | Q en modelo [l/s] | Q en prot [m ³ /s] | Q Medio en prot [m ³ /s] |
|----------------------------|-----------------|-------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| 31,8 | 16:20 | 16,43 | 559,49 | 540,44 |
| 31,5 | 17:20 | 15,81 | 538,62 | |
| 31,5 | 18:00 | 15,36 | 523,22 | |

Tabla 14: Evolución de caudales ensayados en experiencia del día jueves 4 de abril.

Para cada compuerta se realizó la toma de velocidades en cinco puntos diferentes, ubicados simétricamente respecto al centro de cada compuerta. Se colocó el tubo Pitot a 3 cm. respecto al fondo, esto se debe a que la estructura de cierre posee una viga que se extiende entre las pilas, que impedían realizar las mediciones en puntos más elevados, y condicionan al flujo. En las siguientes figuras se muestran los puntos relevados en una vista en planta y una vista tridimensional.

Es importante destacar que, al estar la obra de toma y el canal moderador cerrados, el tirante siempre fue mayor a los 3 cm. por lo que las compuertas descargaron siempre con carga.

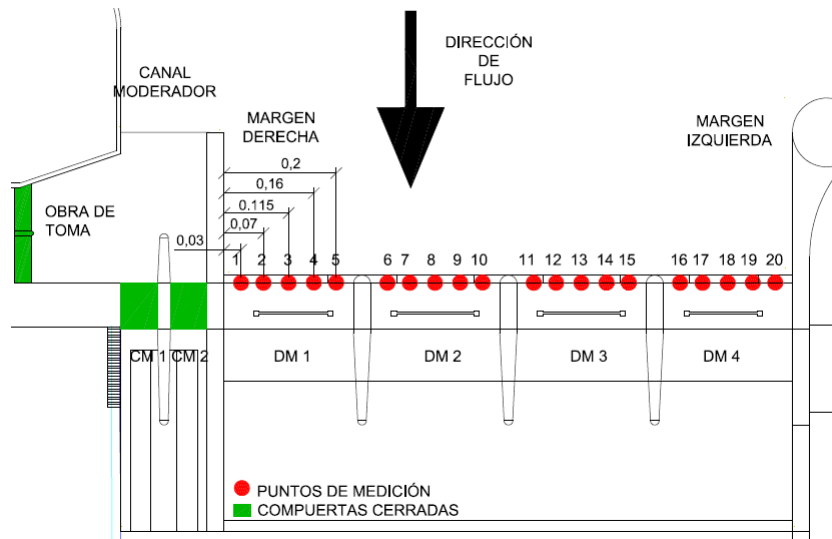


Figura 70: Planta de Dique Móvil localización de puntos de medición

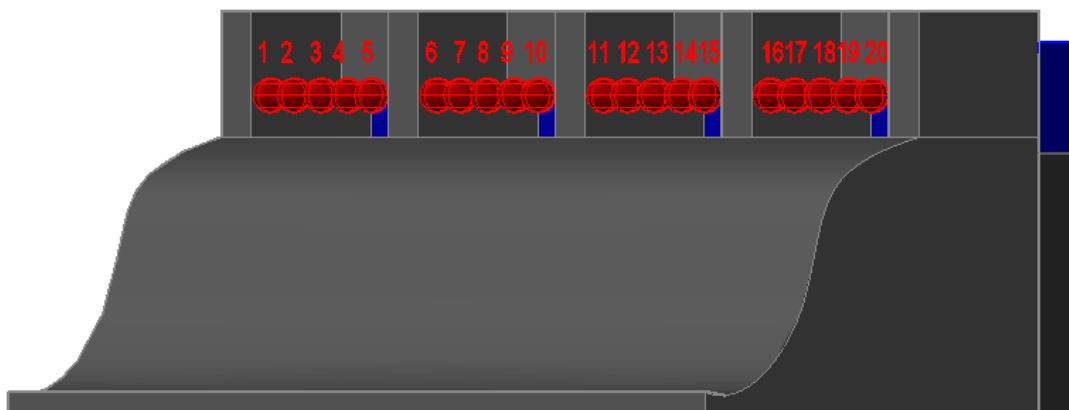


Figura 71: Representación en 3D del dique Móvil y localización de puntos de medición

3-3-3 Evolución vertical de velocidades de flujo en estructuras del Dique Móvil.

El ensayo se realizó el 8 de Abril del corriente, para obtener las velocidades del agua, con el tubo Pitot, en las compuertas del dique móvil del modelo Los Molinos. La configuración que se pretendió ensayar fue que un caudal de 600 m³/seg. (en prototipo) que ingresa solo por el Río Grande. Respecto a la estructura de cierre, la misma se encuentra con las cuatro compuertas del dique móvil abiertas, las del canal moderador y la obra de toma, cerradas; además es para destacar, que el dique fijo no vertía agua, dado que el tirante de agua no lo alcanzaba la elevación necesaria.

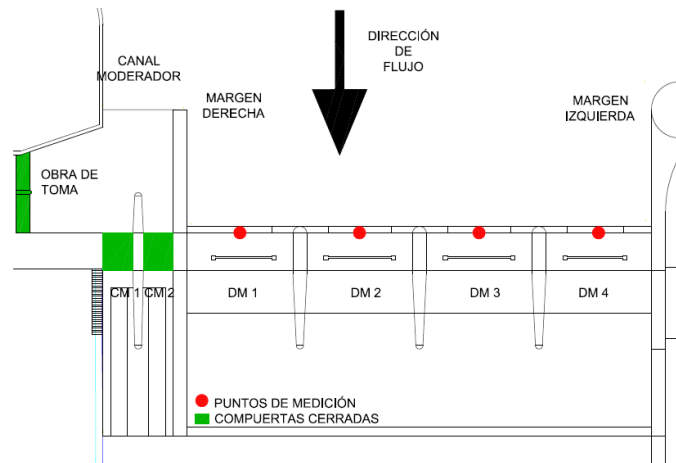


Figura 72: Planta Esquemática de la configuración adoptada.

El agua poseía una temperatura de 20°C y la evolución de los caudales a lo largo del ensayo se muestra en la siguiente tabla:

| Lectura de Limnómetro [cm] | Hora de Lectura | Q en modelo [l/s] | Q en prot [m3/s] | Q Medio en prot [m3/s] |
|----------------------------|-----------------|-------------------|------------------|------------------------|
| 34,29 | 16:20 | 17,71 | 603,30 | 581,97 |
| 33,99 | 17:20 | 17,06 | 581,20 | |
| 33,8 | 18:00 | 16,48 | 561,42 | |

Tabla 15: Evolución de caudales relevados en el ensayo.

Los puntos relevados en el ensayo planimetricamente se encuentran en el centro de cada compuerta (11,5 cm. de la margen o pila), mientras que altimétricamente se midieron tres puntos, el punto 1 que se encuentra a 0,5 cm. del fondo, el punto 2 a 1,75 cm. y el punto 3 a 3 cm. del fondo, como se observa en la siguiente imagen.

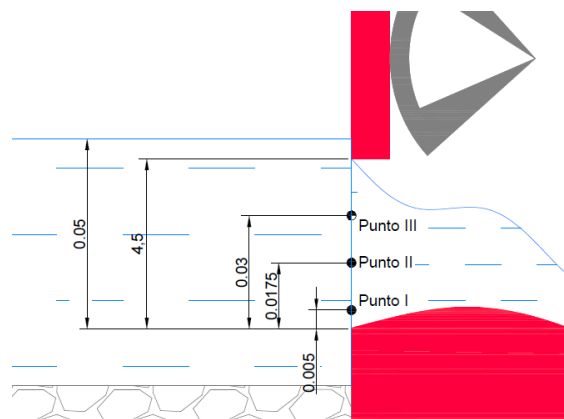


Figura 73: Corte Esquemático de una Compuerta del Dique Móvil

3-3-4 Medición de velocidades de flujo en dique móvil, para diferentes configuraciones de operación de compuertas

El ensayo se realizó el 4 de Abril, con el fin de conocer cómo varía la velocidad en el centro de cada compuerta en función de la configuración que se adopte, teniendo el canal moderador y la obra de toma cerrados durante la totalidad del ensayo.

Para ello se procedió a medir las velocidades en el centro de una compuerta dada con el tubo Pitot, en cuatro condiciones diferentes (ver Figura 74 y Tabla 16):

- Etapa 1:
Con cuatro compuertas abiertas.
- Etapa 2:
Con tres compuertas abiertas (cerrando la compuerta del extremo opuesto).
- Etapa 3:
Con dos compuertas abiertas (cerrando la compuerta adyacente a la compuerta anterior.)
- Etapa 4:
Con una compuerta abierta (cerrando la totalidad de las compuertas que no se encuentran midiendo.)

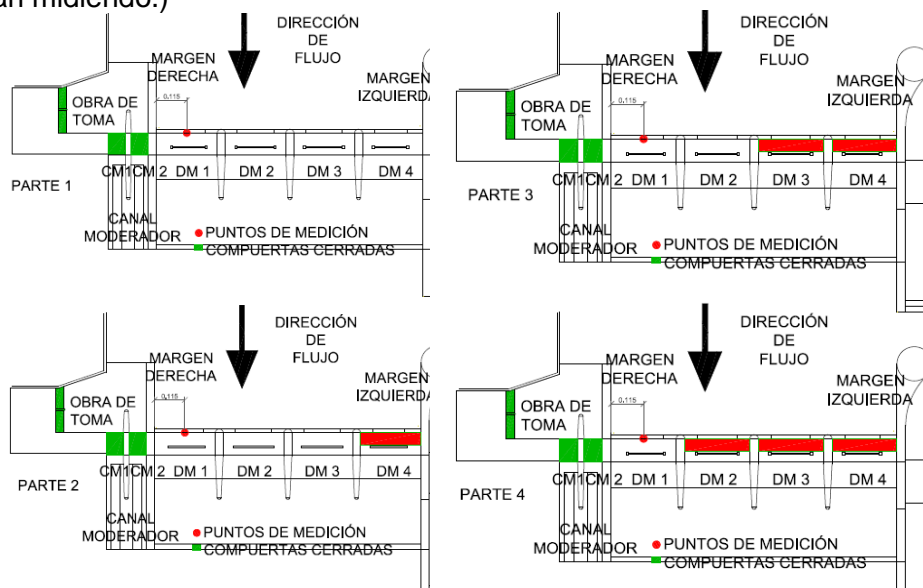


Figura 74: Planta esquemática del procedimiento del ensayo para la compuerta DM1

| | Medición | DM1 | DM2 | DM3 | DM4 |
|-------|----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Etapa | 1 | Todo abierto | Todo abierto | Todo abierto | Todo abierto |
| | 2 | Cerrada DM4 | Cerrada DM4 | Cerrada DM1 | Cerrada DM1 |
| | 3 | Cerradas DM4 y DM3 | Cerradas DM4 y DM3 | Cerradas DM1 y DM2 | Cerradas DM1 y DM2 |
| | 4 | Cerradas DM4, DM3 y DM2 | Cerradas DM4, DM3 y DM1 | Cerradas DM1, DM2 y DM4 | Cerradas DM1, DM2 y DM3 |

Tabla 16: Procedimiento del ensayo.

El ensayo se realizó con una temperatura del agua de 24°C, y la evolución de los caudales medidos a lo largo del ensayo fueron:

| Lectura de Limnómetro [cm] | Hora de Lectura | Q en modelo [l/s] | Q en prot [m ³ /s] | Q Medio en prot [m ³ /s] |
|----------------------------|-----------------|-------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| 34,21 | 16:20 | 17,67 | 601,90 | 587,93 |
| 34,05 | 17:20 | 17,09 | 582,22 | |
| 33,9 | 18:00 | 17,02 | 579,66 | |

Tabla 17: Evolución de los caudales relevados en el ensayo

3-3-5 Determinación de la eficiencia de descarga de todas las estructuras móviles.

El ensayo se realizó el 20 de Mayo del corriente, en él se evaluó la distribución de velocidades en las estructuras del Dique Móvil y el Canal Moderador para caudales menores a 900 m³/s en prototipo de tal manera que no hubiera flujo que vertiese por el Dique Fijo. En los distintos ensayos realizados (que se enumeran y explicitan posteriormente), se utilizaron las técnicas:

- Tubo Pitot: se midió la velocidad en el centro de cada una de las compuertas del dique móvil que estaban abiertas y en el centro de cada canal moderador en cada ensayo.
- PTV (Velocimetría por seguimiento de partículas): se midió la distribución de velocidades superficiales en la zona aguas arriba de las distintas estructuras que conforman el dique.

Vale aclarar que en todos los ensayos el caudal se hizo ingresar al modelo por el Río Grande. Además, todas las mediciones se hicieron estando cerrada la toma de agua lateral del dique.

El ensayo se puede dividir en las siguientes etapas (ver Tabla 18):

- Etapa 5
 El caudal fue el máximo (cerca de 900 m³/s en prototipo) capaz de pasar por el dique móvil y el canal moderador sin que pase agua por el dique fijo.
- Etapa 6
 El caudal se disminuyó de tal manera de poder cerrar la compuerta DM4 de Dique Móvil y que no pase agua por el dique fijo. El caudal alcanzado fue de aproximadamente 750 m³/s en prototipo.
- Etapa 7
 Nuevamente se disminuyó el caudal de tal manera de poder cerrar las compuertas DM3 y 4 y que no pase agua por el dique fijo. El caudal alcanzado fue de aproximadamente 550 m³/s en prototipo.
- Etapa 8
 Nuevamente se disminuyó el caudal de tal manera de poder cerrar las compuertas DM2, 3 y 4 y que no pase agua por el dique fijo. El caudal alcanzado fue de aproximadamente 385 m³/s en prototipo.
- Etapa 9
 Nuevamente se disminuyó el caudal de tal manera de poder cerrar todas las compuertas del DM y que no pase agua por el dique fijo. El caudal alcanzado fue de aproximadamente 300 m³/s en prototipo.

*** Aclaración:**

No se pudo seguir disminuyendo el caudal para poder evaluar el caso en que solo estaría abierto uno de los dos canal moderador, ya que el caudal necesario para ensayar esta condición era de aproximadamente 150 m³/s en prototipo y el caudal mínimo que se puede verter en el modelo es de 200 m³/s.

Para clarificar lo anteriormente descrito, se presenta la siguiente tabla:

| Etapa | Q prototipo (m ³ /s) | % de apertura | | | | | | Cota Superficie Agua prototipo (m) |
|-------|---------------------------------|---------------|------|------|------|------|------|------------------------------------|
| | | CM1 | CM2 | DM1 | DM2 | DM3 | DM4 | |
| 5 | 961 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 1373 |
| 6 | 787 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 0% | 1373 |
| 7 | 594 | 100% | 100% | 100% | 100% | 0% | 0% | 1373 |
| 8 | 426 | 100% | 100% | 100% | 0% | 0% | 0% | 1373 |
| 9 | 306 | 100% | 100% | 0% | 0% | 0% | 0% | 1373 |

Tabla 18: Procedimiento del ensayo

La evolución de los caudales en el transcurso del ensayo fueron:

| Etapa | Hora | Tiempo de medición | H vertedero (cm) | Q prototipo (m ³ /s) | Q modelo (lt/s) |
|-------|-------|--------------------|------------------|---------------------------------|-----------------|
| 5 | 14:45 | 00:00 | 37,8 | 961 | 28,21 |
| 6 | 15:30 | 00:45 | 36,3 | 787 | 23,10 |
| 7 | 15:50 | 00:20 | 33,6 | 594 | 17,45 |
| 8 | 16:20 | 00:30 | 32,1 | 426 | 12,50 |
| 9 | 16:35 | 00:15 | 30,1 | 306 | 8,97 |

Tabla 19: Evolución de caudales del ensayo

3-3-6 Medición de velocidades para diferentes condiciones de ingreso.

El ensayo se realizó el 29 de Mayo del corriente, en él se evaluó la distribución de velocidades en las distintas estructuras del Dique Los Molinos para un caudal de 600 m³/s en prototipo y distintas condiciones de ingreso al modelo (Río Reyes, Río Grande.) Para este caudal el flujo no vierte por el Dique Fijo. En los distintos ensayos realizados (que se enumeran y explicitan posteriormente), se utilizaron las técnicas:

- Tubo Pitot: se midió la velocidad en el centro de cada una de las compuertas del dique móvil y en el centro de cada canal moderador.
- PTV (Velocimetría por seguimiento de partículas): se midió la distribución de velocidades superficiales en la zona aguas arriba de las distintas estructuras que conforman el dique.

Vale aclarar que todos los ensayos se hicieron estando cerrada la toma de agua lateral del dique y que estuvieron abiertas todas las compuertas (tanto las 4 del dique móvil como los dos descargadores de fondo del canal moderador.)

El ensayo se divide en las siguientes etapas (ver Tabla 20):

- Etapa 10

El caudal total se hizo ingresar al modelo por el Río Reyes.

- Etapa 11

El caudal fue ingresado tanto por el Río Grande como por el Río Reyes. El 65% del total del mismo ingresó por el Río Grande, mientras que el 35% restante lo hizo por el Río Reyes.

- Etapa 12

El caudal total se hizo ingresar al modelo por el Río Grande.

Para clarificar lo anteriormente descrito, se presenta la siguiente tabla:

| Etapa | Río Grande | | | Río Reyes | | | Q Total en prototipo (m3/s) |
|-------|------------------|--------------------|-----------------|------------------|--------------------|-----------------|-----------------------------|
| | H vertedero (cm) | Q prototipo (m3/s) | Q modelo (lt/s) | H vertedero (cm) | Q prototipo (m3/s) | Q modelo (lt/s) | |
| 10 | 0,0 | 0 | 0,00 | 36,97 | 628 | 18,45 | 628 |
| 11 | 30,4 | 421 | 12,35 | 30,27 | 194 | 5,70 | 615 |
| 12 | 34,9 | 656 | 19,25 | 0 | 0 | 0,00 | 656 |

Tabla 20: Caudales ensayados para cada parte

En todos los casos, la cota de la superficie de agua estuvo alrededor de los 1751.5 m en prototipo; es decir por debajo de la cota del labio del dique fijo (1373), por lo que el flujo no paso a través de esta estructura.

3-4 METODOLOGÍA PARA REALIZACIÓN DE ENSAYOS

- Paso 1: **Puesta en funcionamiento del modelo**, según se mencionó en las secciones 1-3-3-1 Actividades a realizar el día anterior al ensayo, 1-3-3-2 Tareas a realizar antes del ensayo y 1-3-3-3 Actividades a realizar durante el ensayo.

- Paso 2: **Regulación de caudales**, según sea el caudal a ensayar, se requerirá prender una o las dos bombas. Mediante las válvulas de paso a las cámaras aforadoras, se ajustará el caudal hasta que las lecturas limnométricas sean las correspondientes al caudal requerido para cada uno de los ríos.

- Paso 3: **Medición con Tubo Pitot**, según lo expresado en la sección 2-3-3 Metodología



Figura 75: Ubicación del tubo Pitot en la compuerta DM3

- Paso 6: **Medición con PTV**, según lo expresado en la sección 2-4-1-2 Metodología.
- Paso 7: **Apagado de Modelo**, según se mencionó en la sección 1-3-3-4 Actividades a realizar durante el proceso de apagado.
- Paso 8: **Procesamiento y análisis de datos**.

CAPÍTULO 4:

Análisis de resultados de los ensayos.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

4-1 EVOLUCIÓN TRANSVERSAL Y VERTICAL DE VELOCIDADES DE FLUJO EN ESTRUCTURAS DEL DIQUE MÓVIL

4-1-1 Evolución transversal de velocidades de flujo en el modelo.

La siguiente tabla se muestra las velocidades de flujo relevadas con el tubo Pitot en los distintos puntos medidos en la transversal a una altura de 3 cm. desde el labio del vertedero. Dichos puntos se representaron en la Figura 70 y Figura 71.

En la primer columna de la tabla se muestra la compuerta en la que se encuentran los puntos de medición, luego se numeran los puntos medidos y finalmente las velocidades⁵ de flujo registrado de cada punto.

| Compuertas | Punto | Velocidad V ₃ [cm/seg.] |
|------------|-------|------------------------------------|
| DM 1 | 1 | 51,0 |
| | 2 | 57,4 |
| | 3 | 58,9 |
| | 4 | 60,3 |
| | 5 | 67,1 |
| DM 2 | 6 | 51,0 |
| | 7 | 51,0 |
| | 8 | 51,0 |
| | 9 | 54,3 |
| | 10 | 52,7 |
| DM 3 | 11 | 54,3 |
| | 12 | 54,3 |
| | 13 | 55,9 |
| | 14 | 55,9 |
| | 15 | 51,0 |
| DM 4 | 16 | 55,9 |
| | 17 | 52,7 |
| | 18 | 52,7 |
| | 19 | 43,7 |
| | 20 | 41,6 |

Tabla 21: Evolución transversal de velocidades del flujo registrados en cada compuerta

Los valores de velocidad registrados, fueron mayores a 40 cm/seg. condición que es necesaria para tener valores confiables con la medición del tubo Pitot estático.

4-1-2 Evolución transversal de velocidades de flujo en prototipo.

Las velocidades medidas se llevan a valores de prototipo, y se representan en la siguiente figura. De la que se observa claramente que las compuertas trabajan de manera diferente.

$$Vel_{prototipo} = \frac{Vel_{modelo}}{\sqrt{\lambda}} \quad \text{Donde} \quad \lambda = \frac{1}{65} \quad [\text{Ecuación 23}]$$

⁵ Estas velocidades (V₃) son referidas al modelo, y tomadas a 3 cm de altura respecto al labio del dique móvil.

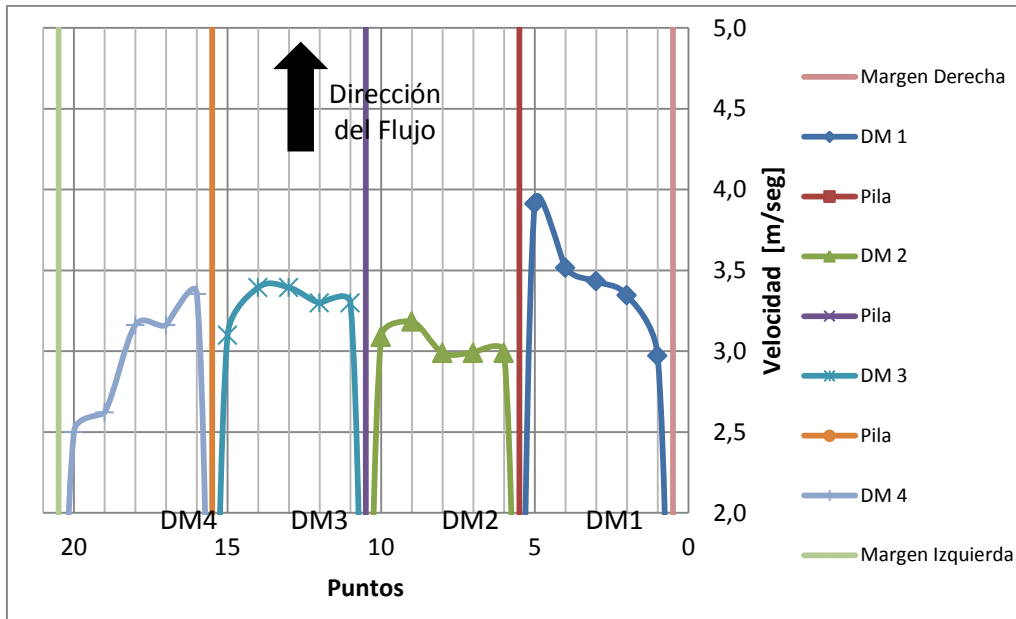


Figura 76: Velocidades de flujo [m/seg] en prototipo de cada compuerta ensayo del 4 de abril del 2013.

4-1-3 Evolución vertical de velocidades de flujo en el modelo

En la línea central de cada compuerta se relevaron velocidades de flujo a tres alturas diferentes (ver Figura 73.) En cada localización se realizaron dos mediciones de velocidades con el tubo Pitot estático y luego se promediaron. Con estos datos se pudieron calcular las velocidades de cada una de las compuertas para cada punto.

Las velocidades del flujo registradas se muestran a continuación:

| Compuertas | Localización | | |
|------------|--------------|-------|-------|
| | I | II | III |
| DM 1 | 54,29 | 55,86 | 62,46 |
| DM 2 | 52,67 | 55,86 | 61,05 |
| DM 3 | 51,84 | 55,08 | 56,63 |
| DM 4 | 50,99 | 57,39 | 58,88 |

Tabla 22: Evolución vertical de velocidad de flujo [m/seg.] registradas en el centro de cada compuerta.

4-1-4 Evolución vertical de velocidades de flujo en prototipo.

Las velocidades medidas se llevan a valores de prototipo, y se representan en la siguiente figura. De la que se observa claramente que las compuertas trabajan de manera diferente.

$$Vel_{prototipo} = \frac{Vel_{modelo}}{\sqrt{\lambda}} \quad \text{Donde} \quad \lambda = \frac{1}{65} \quad \text{[Ecuación 24]}$$

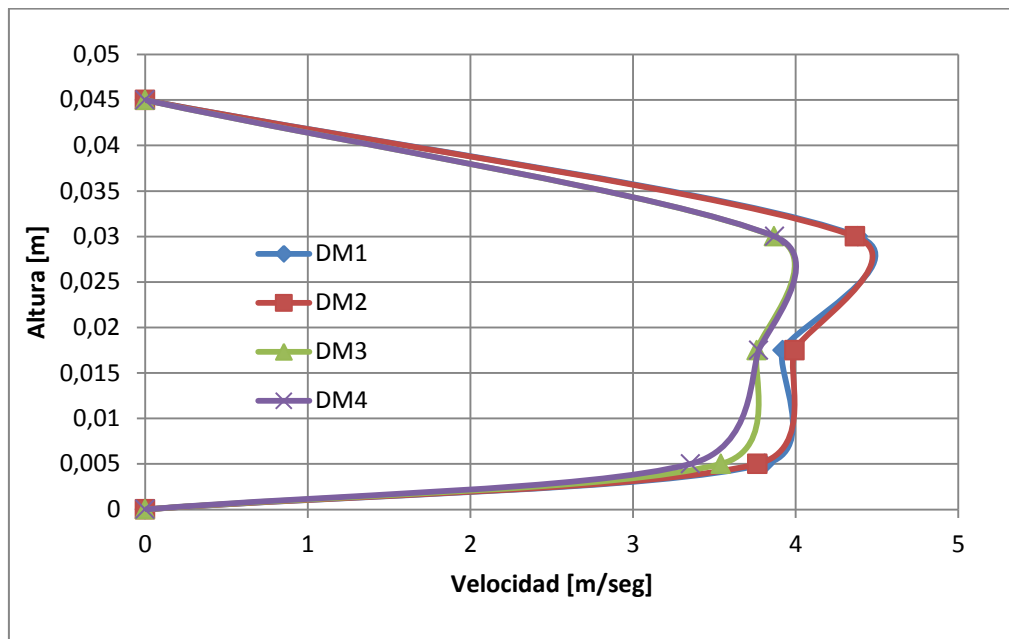


Figura 77: Evolución vertical de velocidades [m/seg.] en prototipo de cada compuerta del ensayo del 8 de abril del 2013.

4-1-5 Factores de cálculo de Velocidad Media

Con los valores de velocidades registradas se determinó un factor K que permite calcular las velocidades medias de flujo en la compuerta, a partir de la velocidad registrada en la línea central de cada compuerta a 3 cm de altura (V_{C3}). Para ello se calculó en primer lugar, la velocidad media horizontal utilizando valores incluidos en la Tabla 21 (asumiendo velocidades nulas en las paredes y una variación lineal entre la pared y el primer punto medido), se realizó el cociente entre esta y la velocidad del punto central, así se obtuvo el factor de cálculo de velocidad media horizontal (K_h). Es decir:

$$K_h = \frac{\text{Velocidad Media Horizontal}}{V_{C3}} \quad \text{[Ecuación 25]}$$

Luego se realizó algo similar pero con el perfil vertical de velocidades, y se obtuvo un factor de cálculo de velocidad media vertical (K_v), de la siguiente manera:

$$K_v = \frac{\text{Velocidad Media Vertical}}{V_{C3}} \quad \text{[Ecuación 26]}$$

Para el caso de K_v como en todas las condiciones se observó que las compuertas trabajan ahogadas, se asumió velocidades nulas en el borde superior y en el fondo; y una variación lineal entre estos y el punto de medición consecutivo.

Finalmente con el producto entre ambos se obtuvo el factor de cálculo de velocidad media buscado.

$$K = K_h \times K_v \quad \text{[Ecuación 27]}$$

En la siguiente tabla se muestran los valores de velocidades medias en la transversal para cada compuerta, y el valor del factor de cálculo de velocidad media horizontal.

| Compuertas | Velocidad Media Horizontal Modelo [cm/seg] | Kh |
|------------|--|------|
| DM 1 | 51,3 | 0,87 |
| DM 2 | 45,2 | 0,89 |
| DM 3 | 47,3 | 0,85 |
| DM 4 | 42,9 | 0,82 |

Tabla 23: Velocidades medias en la transversal y factor de cálculo de velocidad media horizontal

A continuación se muestran los valores medios de velocidad de flujo en la vertical en la línea central de cada compuerta, y su respectivo factor de cálculo de velocidad media vertical.

| Compuertas | Velocidad Media Vertical [cm/seg.] | Kv |
|------------|------------------------------------|------|
| DM 1 | 45,16 | 0,72 |
| DM 2 | 44,41 | 0,73 |
| DM 3 | 42,68 | 0,75 |
| DM 4 | 43,85 | 0,74 |

Tabla 24: Velocidades medias en la vertical y factor de cálculo de velocidad media vertical

Finalmente el valor del factor de cálculo de velocidad media en cada compuerta se muestra en la siguiente tabla:

| Compuertas | K |
|------------|------|
| DM 1 | 0,63 |
| DM 2 | 0,64 |
| DM 3 | 0,64 |
| DM 4 | 0,61 |

Tabla 25: Factor de cálculo de velocidad media de flujo

4-1-6 Verificación de caudales escurridos en prototipo

Utilizando los valores de velocidad medidos en cada compuerta (en prototipo) para las condiciones del ensayo del 4 de abril del 2013 se calculan los caudales escurridos en cada compuerta, esto se detalla en la Tabla 27.

$$Q_{compuerta} = Vel_{media\ prototipo} \times \text{Área}_{compuerta} \quad [\text{Ecuación 28}]$$

Donde : $Vel_{media\ prototipo} = \frac{Vel_{media\ modelo}}{\sqrt{\lambda}}$ Donde $\lambda = \frac{1}{65}$ [Ecuación 29]

El área de cada compuerta se muestra a continuación:

| | Modelo | Prototipo |
|------------|------------------------|------------------------|
| Compuertas | Área [m ²] | Área [m ²] |
| DM 1 | 0,010 | 43,7 |
| DM 2 | 0,010 | 43,7 |
| DM 3 | 0,010 | 43,7 |
| DM 4 | 0,010 | 43,7 |

Tabla 26: Áreas de Compuertas

| Prototipo | | |
|------------|-----------------------------|-------------------------|
| Compuertas | Velocidades Medias [m/seg.] | Q [m ³ /seg] |
| DM 1 | 3,0 | 130,6 |
| DM 2 | 2,7 | 115,9 |
| DM 3 | 2,9 | 125,7 |
| DM 4 | 2,6 | 112,7 |
| Sumatoria | | 485,0 |

| | |
|------------------------------|--------|
| Caudal en Prototipo Ensayado | 540,44 |
| Error [%] | 10% |

Tabla 27: Velocidades medias de flujo y caudales estimados en prototipo para ensayo del 4 de abril del 2013

De la comparación de los caudales presentados en la tabla y los medidos con las cámaras de aforo se encuentra un error del 10%, el cual es aceptable dadas las suposiciones utilizadas, como fueron los métodos de extrapolación utilizado entre el último punto observado y las paredes.

En forma similar a lo reflejado anteriormente se puede realizar la validación del ensayo donde se calculó la evolución vertical de las velocidades en el ensayo del 8 de abril del 2013.

| Prototipo | | |
|------------|--------------------------|-------------------------|
| Compuertas | Velocidad media [m/seg.] | Q [m ³ /seg] |
| DM 1 | 3,17 | 138,5 |
| DM 2 | 3,17 | 138,7 |
| DM 3 | 2,91 | 127,3 |
| DM 4 | 2,88 | 126,0 |
| Sumatoria | | 530,5 |

| | |
|------------------------------|-------|
| Caudal en Prototipo Ensayado | 582,0 |
| Error [%] | 9 |

Tabla 28: Velocidades y caudales estimados en prototipo para ensayo del 8 de abril del 2013

De la comparación de los caudales presentados en la tabla y los medidos con las cámaras de aforo se encuentra un error del 9%, el cual es aceptable dadas las suposiciones utilizadas, como fueron los métodos de extrapolación utilizado entre el último punto observado y el borde superior y fondo.

4-1-7 Comparación con ensayos realizados anteriormente en el modelo físico

En estudios experimentales en el modelo previo a esta práctica supervisada, se realizaron mediciones de velocidad superficial de flujo, con la técnica PTV (Díaz

Lozada, 2013⁶.) Las condiciones en la que se llevó a cabo el ensayo fueron las mismas que las que se realizaron los anteriores ensayos, es decir se ingresó un caudal de $600 \text{ m}^3/\text{seg.}$ por el Río Grande y se mantuvo cerrada la obra de toma y el canal moderador.

En este informe, reprocesó el video correspondiente y de él se obtuvieron los siguientes datos:

- a) Magnitud de velocidades medias de flujo:

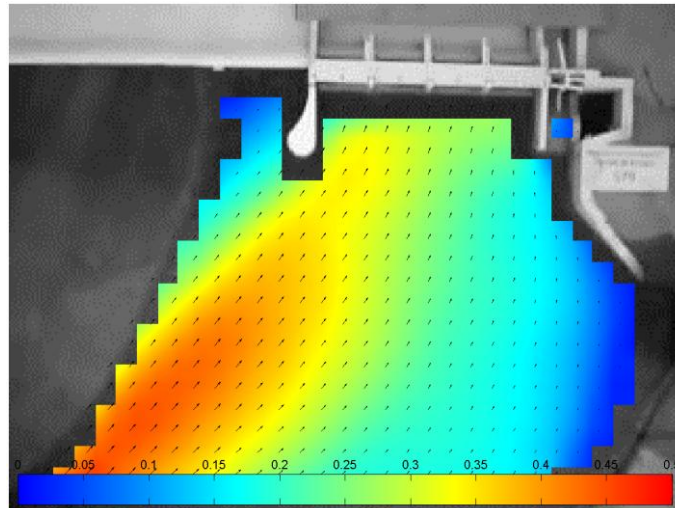


Figura 78: Velocidades medias de flujo [m/seg] registradas en el ensayo realizado el 28 de noviembre 2013 ($Q=600 \text{ m}^3/\text{s}$)

- b) Líneas de corriente:

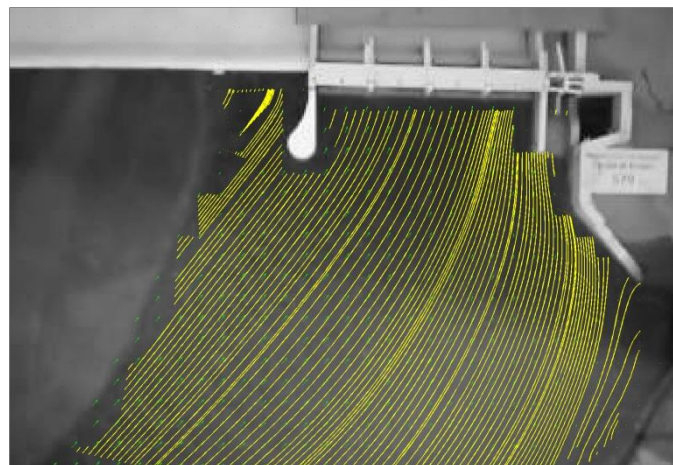


Figura 79: Líneas de corriente correspondientes al ensayo realizado el 28 de noviembre 2013 ($Q=600 \text{ m}^3/\text{s}$)

- c) Trayectorias de las partículas son:

⁶ Videos extraídos de Díaz Lozada, José Manuel. “*Descripción experimental, utilizando un modelo físico, del flujo de aproximación a la Presa Los Molinos.*” - Práctica Supervisada de Carrera de Ingeniería Civil- Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Universidad Nacional de Córdoba- Febrero 2013



Figura 80: Trayectorias de partículas correspondientes al ensayo realizado el 28 de noviembre 2013 ($Q=600 \text{ m}^3/\text{s}$)

De esto se observa que el flujo no ingresa perpendicular a la estructura del dique móvil. También, de las líneas de corriente se puede destacar el efecto sombra que genera la margen izquierda del dique móvil sobre la compuerta DM4. Además, debido a que el descargador de fondo y la obra de toma se encuentran cerradas, se produce una concentración de líneas de corriente en la compuerta DM1, lo que genera que las velocidades de flujo ($3,0 \text{ m/seg.}$) y los caudales ($130,6 \text{ m}^3/\text{seg}$) sean aproximadamente un 9% más elevados que los demás. Ambos efectos fueron cuantificados también por el tubo Pitot estático.

4-1-8 Síntesis

Para la condición de flujo ensayada, de $600 \text{ m}^3/\text{seg.}$ en prototipo que ingresan por el río Grande, con obra de toma y canal moderador cerrados, las compuertas trabajan bajo carga.

Se puede decir que a partir de las velocidades medidas con el tubo Pitot estático y PTV, las velocidades de flujo en la transversal son variadas, debido a que el flujo no ingresa en forma perpendicular a la estructura, y las compuertas de los extremos se ven afectadas por los efectos de borde, la compuerta DM4 registra las menores velocidades debido al efecto sombra que genera la margen izquierda del dique móvil. Así la compuerta DM4 posee menor eficiencia.

La compuerta que registra la mayor eficiencia es la DM1 (eroga el 27% del caudal), le sigue la compuerta DM3 (26% del caudal), la compuerta DM2 (24% del caudal) y finalmente la compuerta DM4 (23%). Sin embargo la variación en la eficiencia no es relevante.

La compuerta DM 1 posee la mejor eficiencia debido a que la obra de toma y el canal moderador se encuentran cerrados, además de que el caudal se hizo ingresar el 100% por el Río Grande. Esto se verifica con los ensayos siguientes.

4-2 MEDICIÓN DE VELOCIDADES EN DIQUE MÓVIL, PARA DIFERENTES CONFIGURACIONES DE OPERACIÓN DE COMPUERTAS

4-2-1 Velocidades y caudales medidos

De las distintas etapas del ensayo realizado (ver sección 3-3-4) se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación:

| Medición en compuerta DM1 | | | | |
|---------------------------|---|------------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Etapas | Altura del tirante en modelo [cm] en las distintas etapas | Modelo | Prototipo | |
| | | Velocidades Medias [cm/seg.] | Velocidades Medias [m/seg.] | Q [m ³ /seg] |
| 1 | 5 | 38,0 | 3,1 | 134 |
| 2 | 5,9 | 42,3 | 3,4 | 149 |
| 3 | 6,8 | 46,9 | 3,8 | 165 |
| 4 | 7,3 | 51,7 | 4,2 | 182 |

| Medición en compuerta DM 2 | | | | |
|----------------------------|---|------------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Etapas | Altura del tirante en modelo [cm] en las distintas etapas | Modelo | Prototipo | |
| | | Velocidades Medias [cm/seg.] | Velocidades Medias [m/seg.] | Q [m ³ /seg] |
| 1 | 5 | 32,9 | 2,7 | 116 |
| 2 | 5,8 | 37,0 | 3,0 | 130 |
| 3 | 6,5 | 46,5 | 3,7 | 164 |
| 4 | 7 | 50,2 | 4,0 | 177 |

| Medición en compuerta DM 3 | | | | |
|----------------------------|---|------------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Etapas | Altura del tirante en modelo [cm] en las distintas etapas | Modelo | Prototipo | |
| | | Velocidades Medias [cm/seg.] | Velocidades Medias [m/seg.] | Q [m ³ /seg] |
| 1 | 5 | 35,7 | 2,9 | 126 |
| 2 | 6 | 40,3 | 3,2 | 142 |
| 3 | 6,6 | 47,5 | 3,8 | 168 |
| 4 | 7,2 | 51,8 | 4,2 | 183 |

| Medición en compuerta DM 4 | | | | |
|----------------------------|---|------------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Etapas | Altura del tirante en modelo [cm] en las distintas etapas | Modelo | Prototipo | |
| | | Velocidades Medias [cm/seg.] | Velocidades Medias [m/seg.] | Q [m ³ /seg] |
| 1 | 5 | 27,7 | 2,2 | 98 |
| 2 | 5,5 | 39,2 | 3,2 | 138 |
| 3 | 6,7 | 44,5 | 3,6 | 157 |
| 4 | 7,2 | 48,0 | 3,9 | 169 |

Tabla 29: Velocidades y caudales en prototipo para cada condición ensayada

Es importante destacar qué a medida que se cerraron las compuertas el caudal que en principio pasaba solo por el dique móvil, comienza a pasar por el dique fijo, cada vez en mayor proporción, esto se puede observar en el tirante de agua que aumenta.

Si se grafican las variaciones de velocidad de cada compuerta para cada condición, se tiene el gráfico que se muestra a continuación:

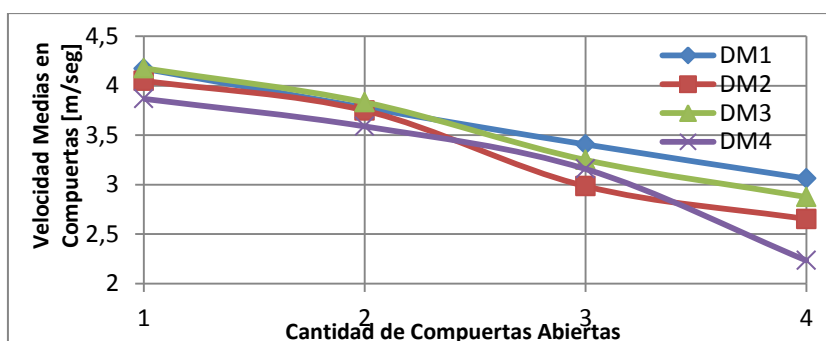


Figura 81: Variación de las velocidades medias de cada compuerta para cada parte del ensayo.

Del gráfico se observa claramente que las velocidades son mayores cuando el número de compuertas abiertas es menor, además la compuerta DM4 es la menos eficiente, ya que en la mayoría de las condiciones registra menores velocidades. Sin embargo cuando solo una compuerta está abierta, la eficiencia de todas ellas es similar debido a similares valores de tirante.

4-2-2 Síntesis

A pesar de que todas las compuertas son geométricamente iguales, hidráulicamente trabajan de forma diferente, siendo las más eficientes las compuertas DM1 eroga un 28% del caudal, la DM3 eroga un 27%; hecho que ya fue previamente observado en el grupo de medidas que se detallan en la Tabla 27 y Tabla 28. Es atribuible a la condición de tener cerrados los dos compuertas del canal moderador y la obra de toma además de hacer ingresar el 100% del caudal por el Río Grande, se genera una concentración del flujo sobre la margen derecha de la presa, que hace que la compuerta DM1 mejore su eficiencia.

4-3 DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE DESCARGA DE TODAS LAS ESTRUCTURAS MÓVILES

4-3-1 Técnica de medición: Tubo Pitot

En la Tabla 30 se presentan las velocidades medias del modelo y del prototipo (utilizando los valores de los factores de cálculo de velocidad media correspondientes a cada compuerta, sección 4-1-5 Factores de cálculo de velocidad media)

| Etapas | Prototipo | | | | | | | | | | | |
|----------|-----------------------|------|------|------|------|------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Velocidad media (m/s) | | | | | | Caudal (m ³ /s) | | | | | |
| | CM1 | CM2 | DM1 | DM2 | DM3 | DM4 | CM1 | CM2 | DM1 | DM2 | DM3 | DM4 |
| 5 | 9,43 | 9,37 | 3,96 | 4,40 | 4,40 | 4,04 | 153,44 | 152,47 | 172,98 | 192,49 | 192,49 | 176,80 |
| 6 | 9,78 | 9,55 | 4,07 | 4,35 | 4,35 | - | 159,16 | 155,37 | 177,85 | 190,19 | 190,19 | - |
| 7 | 9,78 | 9,49 | 3,96 | 4,08 | - | - | 159,16 | 154,41 | 172,98 | 178,21 | - | - |
| 8 | 9,19 | 9,19 | 3,78 | - | - | - | 149,51 | 149,51 | 165,40 | - | - | - |
| 9 | 9,49 | 9,37 | - | - | - | - | 154,41 | 152,47 | - | - | - | - |
| Máx | 9,78 | 9,55 | 4,07 | 4,40 | 4,40 | 4,04 | 159,16 | 155,37 | 177,85 | 192,49 | 192,49 | 176,80 |
| Mín | 9,19 | 9,19 | 3,78 | 4,08 | 4,35 | 4,04 | 149,51 | 149,51 | 165,40 | 178,21 | 190,19 | 176,80 |
| Prom | 9,54 | 9,40 | 3,94 | 4,28 | 4,38 | 4,04 | 155,14 | 152,85 | 172,30 | 186,97 | 191,34 | 176,80 |
| σ | 0,25 | 0,14 | 0,12 | 0,18 | 0,04 | 0,00 | 4,11 | 2,25 | 5,14 | 7,67 | 1,63 | 0,00 |

Tabla 30: Velocidades y caudales en prototipo con datos estadísticos relevantes

Cabe aclarar que para los canales moderadores se utilizó $K=1$, ya que es el valor que mejor ajusta en la etapa 9, donde solo está abierto el canal moderador.

La grafica siguiente muestra las velocidades máximas, mínimas y promedio de cada una de las compuertas

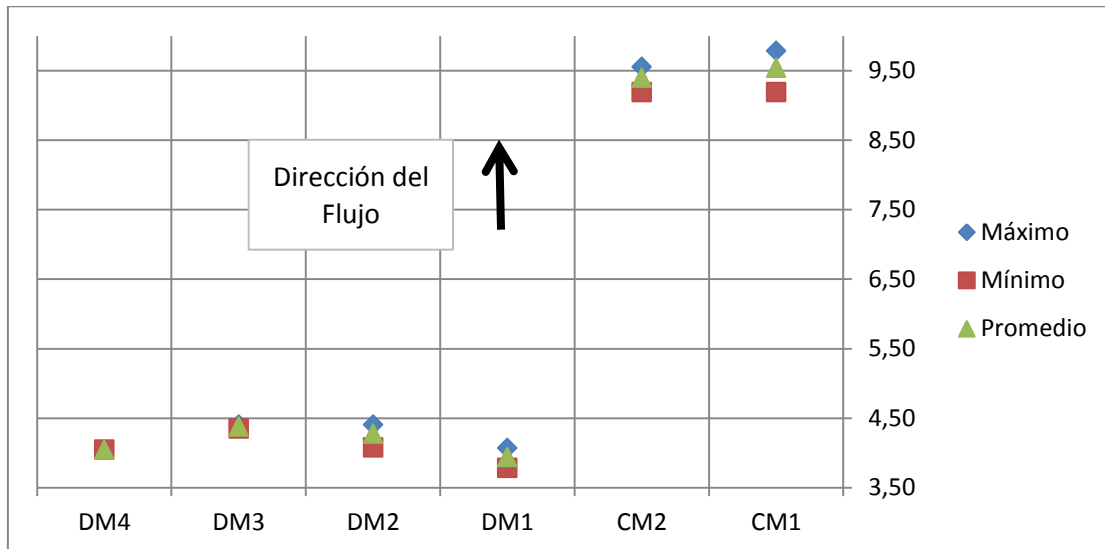


Figura 82: Velocidades medias, mínimas y máximas en prototipo [m/seg.]

A modo de control, se puede realizar la suma de los caudales que erogan las compuertas, y compararlo con el caudal que se midió en las cámaras de aforo, y así obtener el error que se está cometiendo en la estimación de las velocidades medidas con el tubo Pitot.

En la siguiente tabla se muestran los caudales antes mencionados y el error porcentual

| Etapa | Aforado | Estimado | Diferencia | Error |
|-------|---------------------------------|---------------------------------|------------|-------|
| | Q prototipo (m ³ /s) | Q prototipo (m ³ /s) | | |
| 5 | 961 | 1041 | 79,75 | 8% |
| 6 | 787 | 873 | 85,91 | 10% |
| 7 | 594 | 665 | 70,37 | 11% |
| 8 | 426 | 464 | 38,62 | 8% |
| 9 | 306 | 307 | 1,33 | 0% |

Tabla 31: Diferencias porcentuales entre caudales aforados y caudales calculados.

El error máximo que se comete en la medición está en el orden del 10% la cual es aceptable, dadas las condiciones en la que se realizan las mediciones y los instrumentos utilizados para las mismas.

Si tenemos en cuenta los caudales de la condición 1 (con todas las estructuras abiertas), podemos decir que:

- DM1 = puede evacuar 170 m³/s aproximadamente.
- DM2 = puede evacuar 190 m³/s aproximadamente.
- DM3 = puede evacuar 190 m³/s aproximadamente.

- DM4 = puede evacuar $175 \text{ m}^3/\text{s}$ aproximadamente.
- CM1 y 2 = pueden evacuar $150 \text{ m}^3/\text{s}$ cada una aproximadamente.

4-3-2 Técnica de medición: PTV

Para poder explicar mejor la variabilidad de caudales erogados entre estructuras de iguales dimensiones, se realizó un análisis del campo de flujo aguas arriba del dique para cada etapa. En las próximas imágenes se muestra la dirección de los vectores de velocidad superficial en los distintos ensayos, las trayectorias de las partículas y la magnitud velocidad en cada uno de ellos. Vale aclarar que las velocidades son correspondientes al modelo y no al prototipo.

- Etapa 5:

- Magnitudes de velocidades medias de flujo son:

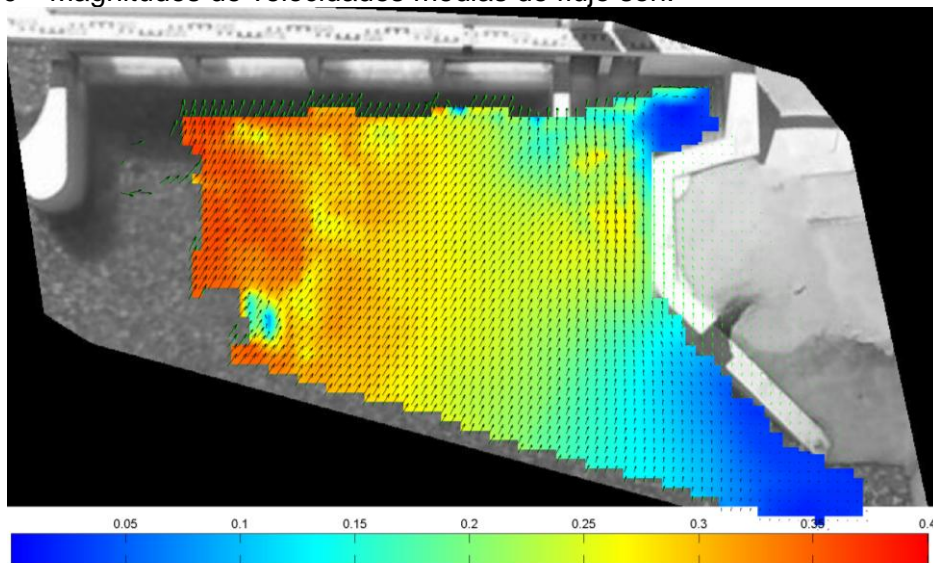


Figura 83: Magnitud de velocidades medias de flujo [m/seg] registradas en la Etapa 5 del ensayo.

- Trayectorias de las partículas:

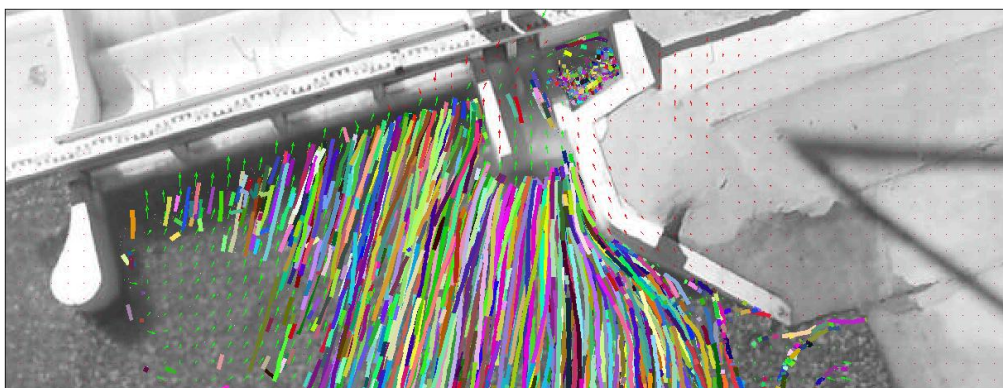


Figura 84: Trayectorias de las partículas registradas en la Etapa 5 del ensayo

En este ensayo se ve claramente la zona de recirculación en la zona de toma y en la margen derecha e izquierda del dique móvil. Estos vórtices lo que hacen es disminuir el caudal evacuado por los dique móvil de los extremos (DM1 y DM4). Además, el

muro existente entre dique móvil y canal moderador hace que el caudal evacuado por CM1 sea mayor al de CM2.

- Etapa 6:

- Magnitud de velocidades medias de flujo son:

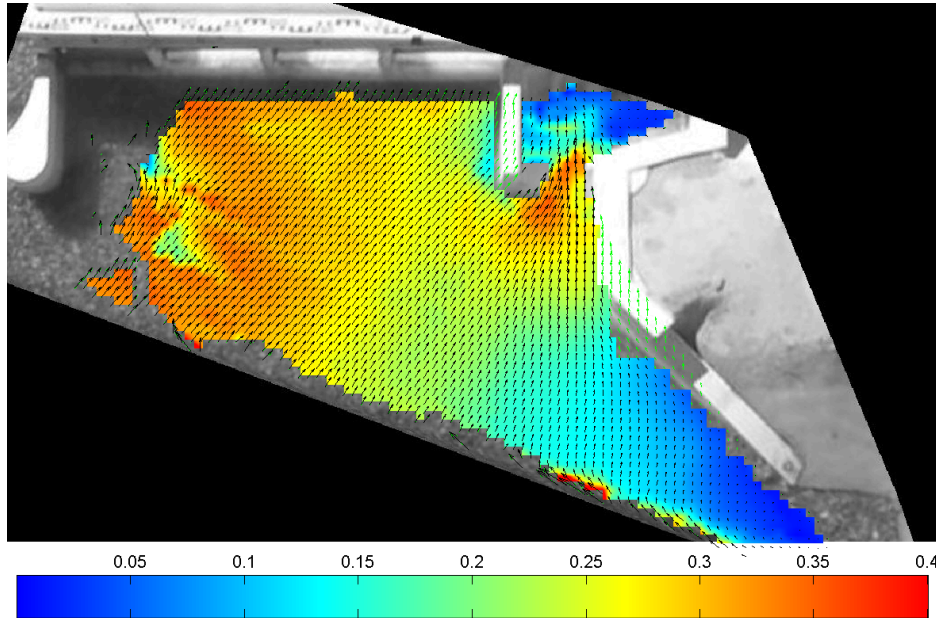


Figura 85: Magnitud de velocidades medias de flujo [m/seg] registradas en la Etapa 6 del ensayo

- Trayectorias de las partículas:

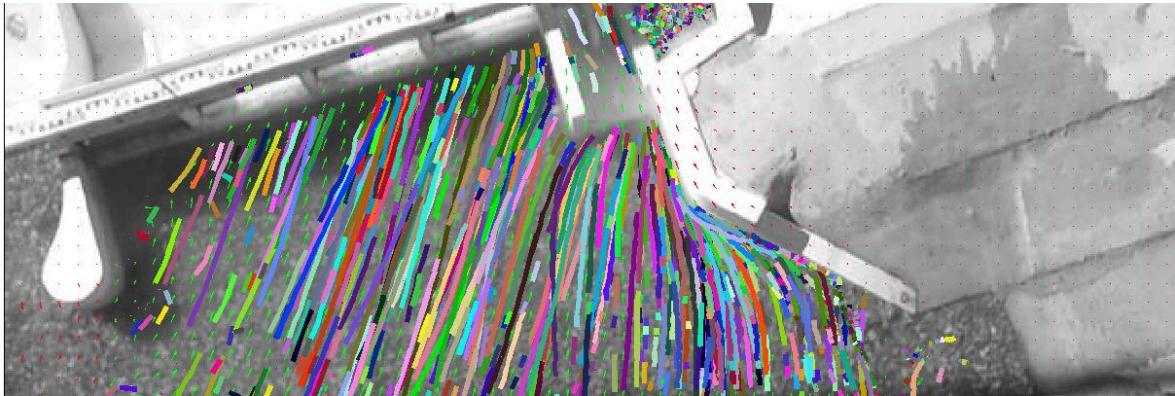


Figura 86: Trayectorias de las partículas registradas en la Etapa 6 del ensayo

En este ensayo se ve que además de las zonas de recirculación antes mencionadas debido a los muros de separación entre las estructuras y debido a la zona de toma; lo que ocurre es que al estar cerrada la compuerta DM4 se generan velocidades en el sentido transversal del flujo, lo que disminuye el caudal evacuado por DM3. Se ve claramente que las zonas de máxima velocidad están en el canal moderador.

- Etapa 7:

- Magnitud de velocidades medias de flujo son:

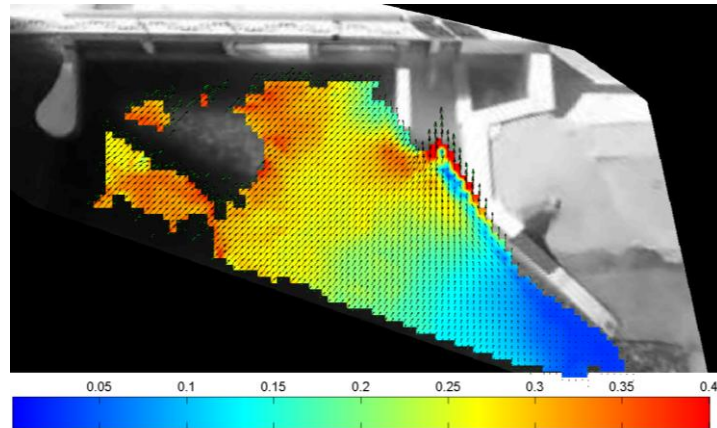


Figura 87: Magnitud de velocidades medias de flujo [m/seg.] registradas en la Etapa 7 del ensayo

- Trayectorias de las partículas:

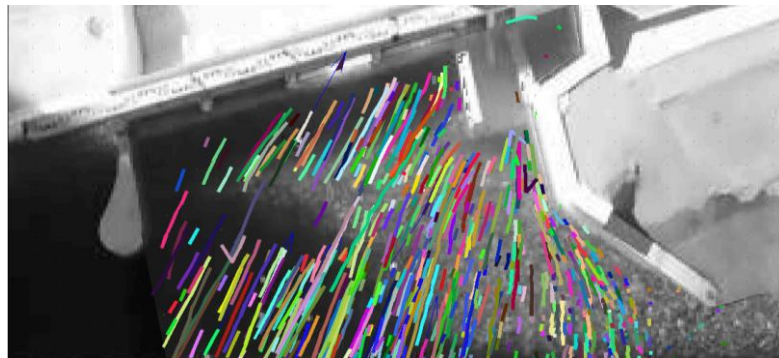


Figura 88: Trayectorias de las partículas registradas en la Etapa 7 del ensayo

En este ensayo se observa una zona de estancamiento en DM3 y DM4. Al estar cerrada la compuerta DM3 y DM4 se generan velocidades en el sentido transversal del flujo, lo que disminuye el caudal evacuado por DM2. Se ve claramente que las zonas de máxima velocidad están en el canal moderador.

- Etapa 8:

- Magnitud de velocidades medias de flujo son:

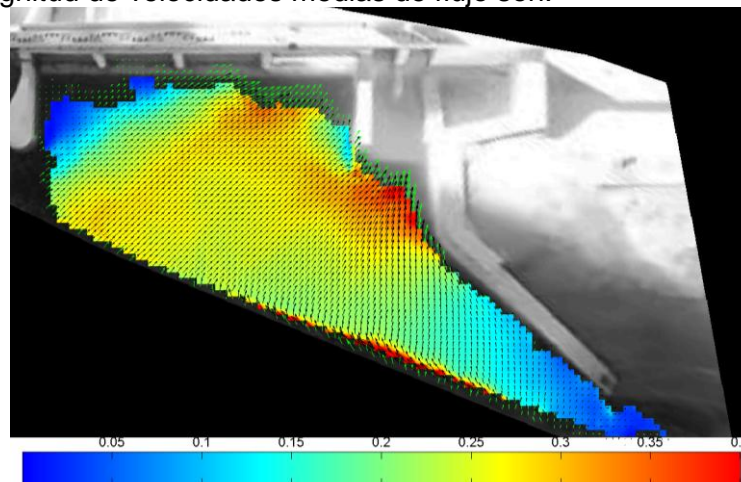


Figura 89: Magnitud de velocidades medias de flujo [m/seg] registradas en la Etapa 8 del ensayo

- Trayectorias de las partículas:

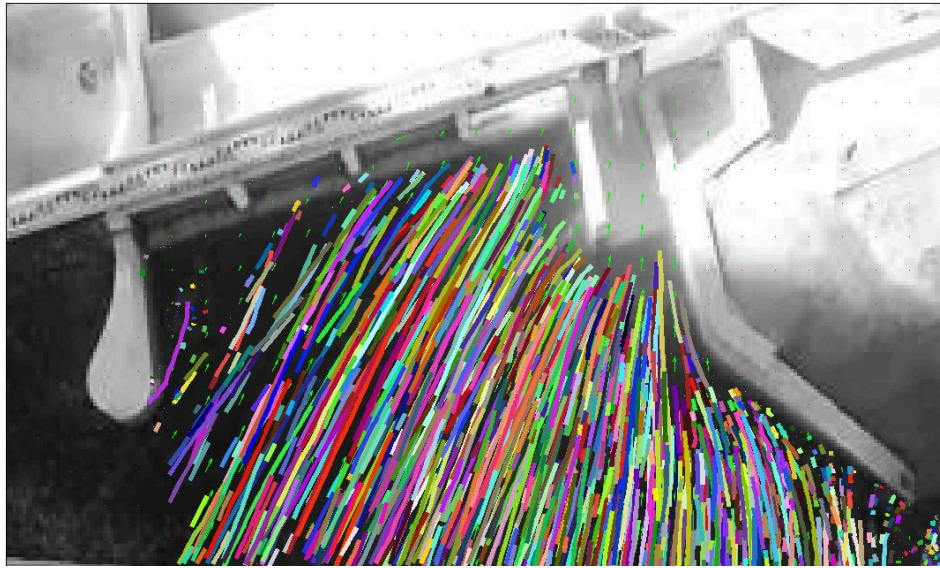


Figura 90: Trayectorias de las partículas registradas en la Etapa 8 del ensayo

En este ensayo se observa una zona de bajas velocidades en DM2, DM3 y DM4. Al estar cerradas dichas compuertas se generan velocidades en el sentido transversal del flujo, lo que disminuye el caudal evacuado por DM1. Se ve claramente que las zonas de máxima velocidad están en el canal moderador.

- Etapa 9:

- Magnitud de velocidades medias de flujo son:

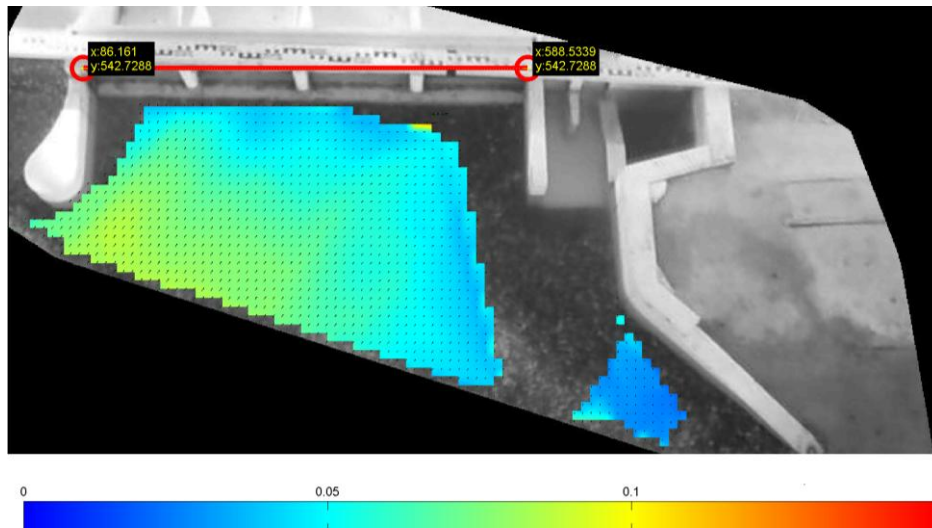


Figura 91: Magnitud de velocidades medias de flujo [m/seg.] registradas en la Etapa 9 del ensayo

- Trayectorias de las partículas:

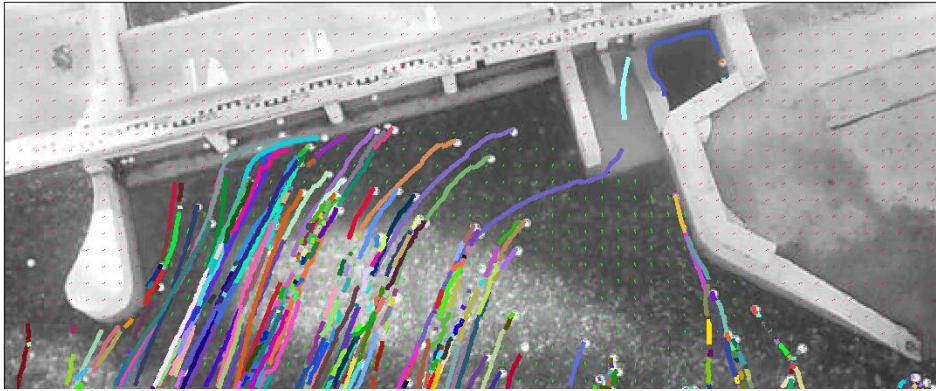


Figura 92: Trayectorias de las partículas registradas en la Etapa 9 del ensayo

En este ensayo se observa una gran zona de pequeñas velocidades (menores a 0.05 m/s en modelo) en la zona aguas arriba del dique móvil y esto es debido a que todas las compuertas se encontraban cerradas. No se observa la zona de velocidades máximas (aguas arriba del canal moderador) ya que no se pudo captar partículas en esa zona durante el procesamiento de las imágenes.

4-3-3 Síntesis

A partir de este análisis se puede evaluar la eficiencia hidráulica de las estructuras bajo estudio:

Canal moderador

A pesar de que los dos descargadores de fondo del canal moderador (CM1 y 2) tienen las mismas dimensiones, no tienen el mismo comportamiento hidráulico. Esto también se debe a las distintas condiciones de borde que tienen (que perturban el flujo e impiden que evacúen el máximo caudal teórico).

El descargador CM1 es el más eficiente, ya que la velocidad medida con el Tubo Pitot es mayor que la obtenida en CM2 y al igual que su caudal. Aproximadamente, CM1 y CM2 evacuan el 15% del caudal total cada una.

Dique Móvil

Igual que en el canal moderador, a pesar de que todas las compuertas tienen las mismas dimensiones, no todas tienen el mismo comportamiento hidráulico. Esto se debe a las distintas condiciones de borde que tienen (efecto obstáculo, pilas laterales, entre otras estructuras que perturban el flujo e impiden que las compuertas evacúen el máximo caudal teórico).

La compuerta DM3 es la más eficiente, ya que evacúa el mayor caudal (y las velocidades medidas con el Tubo Pitot son las máximas). Si seguimos este criterio, le sigue DM2, luego DM4 y finalmente DM1 (la compuerta menos eficiente). Aproximadamente, DM2 y DM3 evacuan el 18% del caudal total cada una; mientras que DM1 y DM4 evacuan el 17% cada una.

A partir de los ensayos de campos de velocidad verificamos que a medida que el caudal disminuye las velocidades superficiales medidas son menores.

4-4 MEDICIÓN DE VELOCIDADES PARA DIFERENTES CONDICIONES DE INGRESO.

4-4-1 Factores de cálculo velocidad media

En este caso, como se hace ingresar 600 m³/seg. y se encuentran todas las estructuras móviles abiertas y la obra de toma cerrada, las compuertas trabajan a pelo libre. Es por esto que no se pueden emplear los factores de cálculo de velocidad media obtenidos en la sección 4-1-5, dado que los perfiles de velocidad son diferentes.

Entonces se decidió obtener un valor del factor de cálculo de velocidad para el dique móvil y otro para el canal moderador (como se muestra en la Ecuación 30), cuyo valor numérico fue aquel que mejor se adapte a las distintas etapas del ensayo (ver .

$$K_{DM}(V_{DM1} \times A_{DM1} + V_{DM2} \times A_{DM2} + V_{DM3} \times A_{DM3} + V_{DM4} \times A_{DM4}) + K_{CM}(V_{CM1} \times A_{CM1} + V_{CM2} \times A_{CM2}) = Q_{estimado} \quad [\text{Ecuación 30}]$$

| Factores de Cálculo de Velocidad Media | |
|--|------|
| K _{DM} | 0,65 |
| K _{CM} | 0,90 |

Tabla 32: Factores de cálculo de velocidad media para dique móvil y canal moderador

4-4-2 Técnica de medición: Tubo Pitot

Una vez obtenidos los datos, se procedió a realizar el cálculo de las velocidades medias en prototipo y de los caudales que cada compuerta eroga para cada condición.

| Etapa | Prototipo | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|-------|
| | Velocidad media Prototipo (m/s) | | | | | | Caudal (m ³ /s) | | | | | | | | |
| | CM1 | CM2 | DM1 | DM2 | DM3 | DM4 | CM1 | CM2 | DM1 | DM2 | DM3 | DM4 | TOTAL | Δ | Error |
| 10 | 7,1 | 7,1 | 3,0 | 3,6 | 3,4 | 3,2 | 116,3 | 116,3 | 102,3 | 121,1 | 115,8 | 107,5 | 679 | 51 | 7,47% |
| 11 | 7,3 | 7,4 | 3,2 | 3,2 | 3,2 | 3,2 | 119,3 | 120,4 | 107,5 | 108,3 | 110,1 | 107,5 | 673 | 58 | 8,66% |
| 12 | 7,7 | 7,5 | 3,4 | 3,5 | 3,4 | 3,2 | 125,3 | 122,3 | 114,9 | 118,0 | 115,8 | 107,5 | 704 | 48 | 6,84% |
| Máx | 7,7 | 7,5 | 3,4 | 3,6 | 3,4 | 3,2 | 125,3 | 122,3 | 114,9 | 121,1 | 115,8 | 107,5 | | | |
| Mín | 7,1 | 7,1 | 3,0 | 3,2 | 3,2 | 3,2 | 116,3 | 116,3 | 102,3 | 108,3 | 110,1 | 107,5 | | | |
| Prom | 7,4 | 7,4 | 3,2 | 3,4 | 3,3 | 3,2 | 120,3 | 119,7 | 108,2 | 115,8 | 113,9 | 107,5 | | | |
| σ | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,0 | 4,6 | 3,1 | 6,4 | 6,7 | 3,3 | 0,0 | | | |

Tabla 33: Velocidades, caudales en prototipo y error en la medición

De esta tabla se puede destacar, que los errores que se producen entre los caudales medidos en las cámaras de aforo, y los caudales obtenidos a través de las mediciones de velocidad se encuentran en un rango aceptable, dado que ninguno supera en 10%.

En el siguiente gráfico se muestran las velocidades medias máximas, medias y mínimas en prototipo obtenidas en cada estructura:

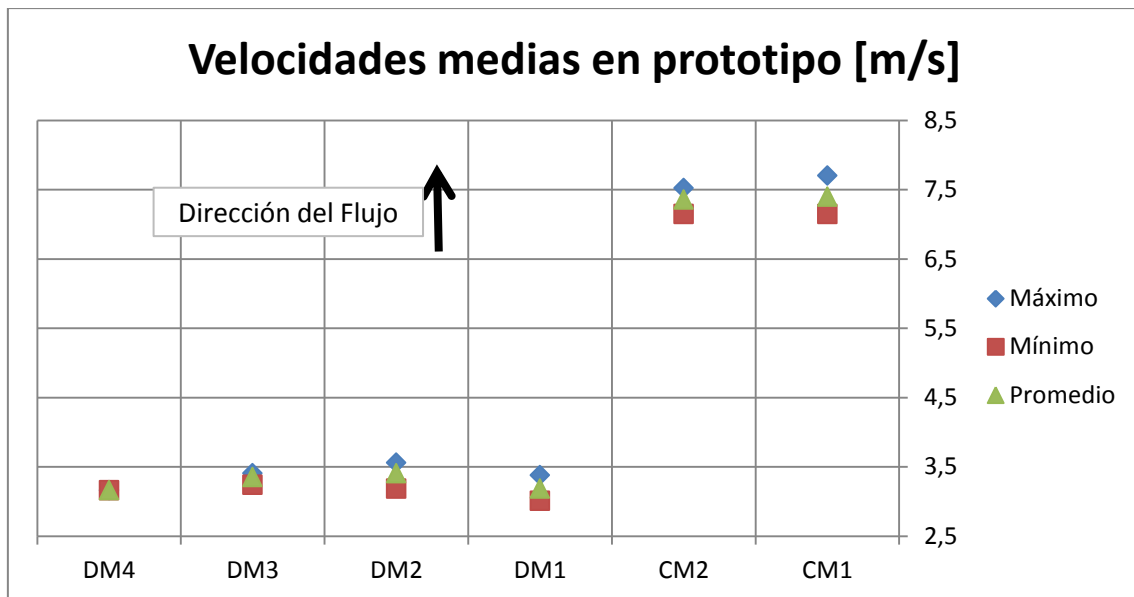


Figura 93: Velocidades, medias mínimas y máximas en prototipo

4-4-3 Técnica de medición: PTV

Para poder explicar mejor esta gran variabilidad de caudales entre estructuras de iguales dimensiones, se realizó un análisis del campo de flujo aguas arriba del dique. En las próximas imágenes se muestra la dirección de los vectores de velocidad superficial en los distintos ensayos, las trayectorias de las partículas sembradas en el flujo y la magnitud velocidad en cada uno de ellos. Vale aclarar que las velocidades son correspondientes al modelo y no al prototipo.

- Etapa 10:

- Magnitud de velocidades medias de flujo son:

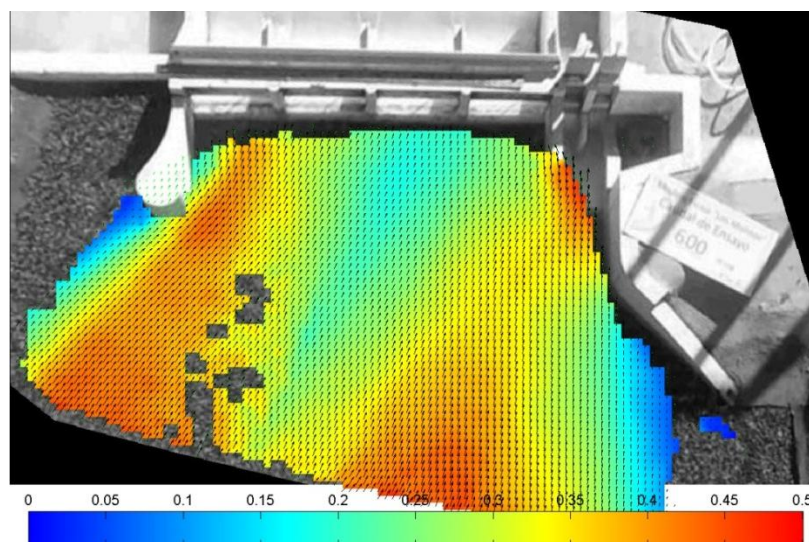


Figura 94: Magnitud de velocidades medias de flujo [m/seg.] registradas en la Etapa 10 del ensayo

- Trayectorias de partículas:



Figura 95: Trayectorias de las partículas registradas en la Etapa 10 del ensayo

En este ensayo se observa las zonas de separación del flujo debido a los obstáculos existentes en las márgenes del dique móvil. Estos muros lo que hacen es disminuir el caudal evacuado por las compuertas de los extremos (DM1 y DM4). Además, el muro existente entre dique móvil y el canal moderador hace que el caudal evacuado por CM1 sea mayor al de CM2.

Las zonas de estancamiento (con mínimas velocidades) se encuentran en la cercanía de dique fijo (ya que al no pasar agua a través de él se forma allí una zona de estancamiento en el flujo con recirculación del mismo) y en la zona aguas arriba del dique, sobre la margen derecha antes del muro lateral que contrae el flujo hacia las estructuras.

Las zonas de máxima velocidad (alrededor de 0,5 m/s en modelo) se encuentran en dos zonas principalmente: en la zona de ingreso al canal moderador y aguas arriba de DM4. Esto último se debe a que **al hacer ingresar todo el caudal por el Rio Reyes, se genera una zona de máxima velocidad sobre la margen izquierda del dique y una zona de velocidades menores sobre la margen derecha. Esto es debido a la separación del flujo aguas arriba.**

- Etapa 11:

- Magnitud de velocidades medias de flujo son:

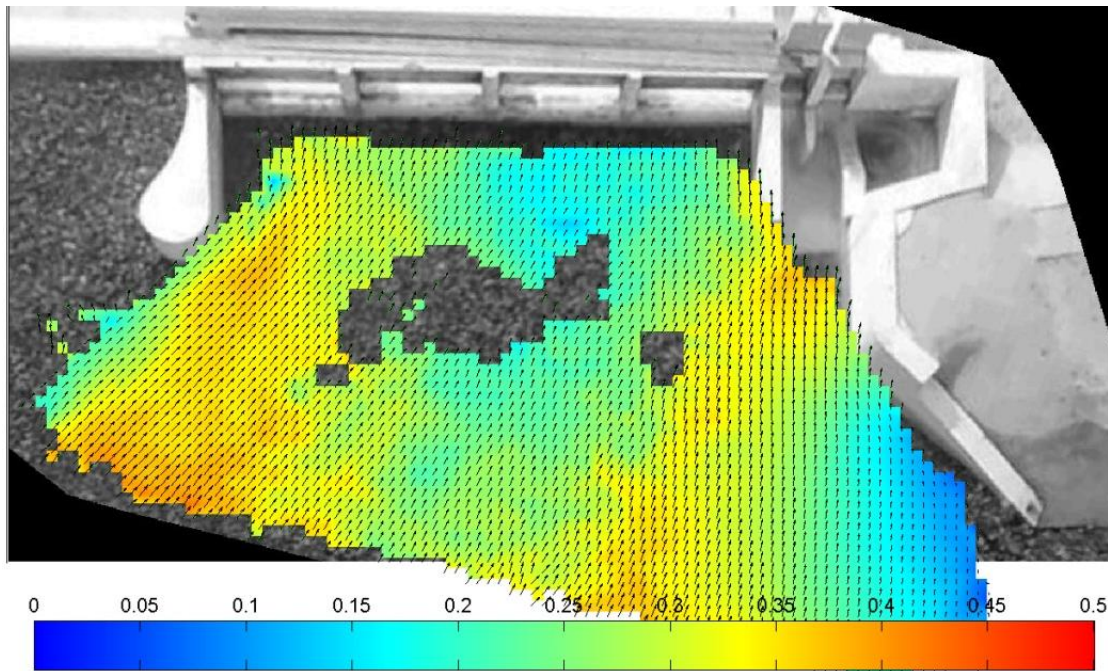


Figura 96: Magnitud de velocidades medias de flujo [m/seg.] registradas en la Etapa 11 del ensayo

- Trayectorias de las partículas:

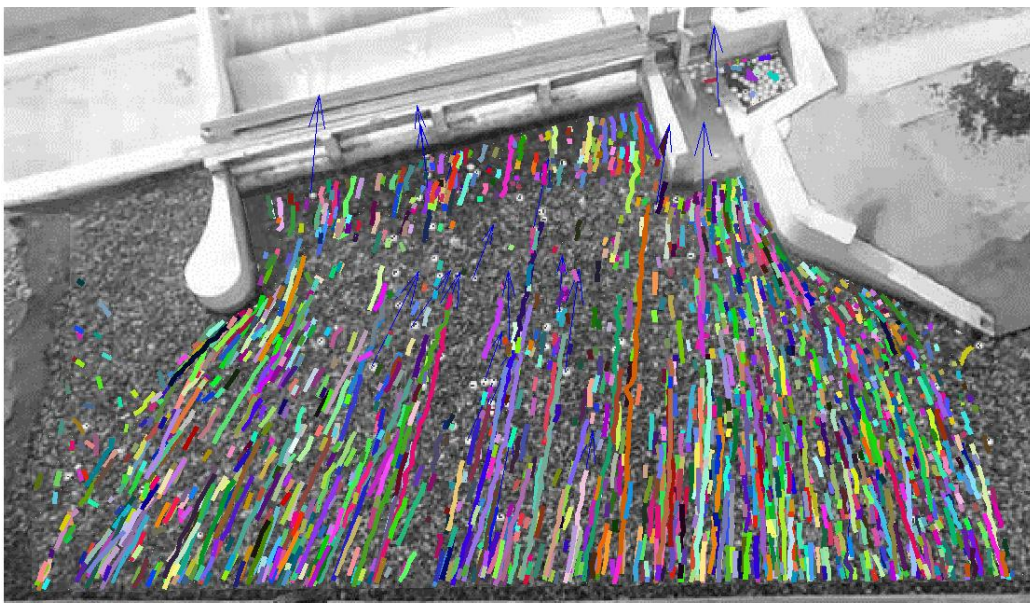


Figura 97: Trayectorias de partículas registradas en la Etapa 11 del ensayo

En este ensayo obtienen conclusiones similares al del ensayo anterior. Aquí también se observan las zonas de separación del flujo debido a los obstáculos existentes en los márgenes del dique móvil. Además, las zonas de velocidad mínima (que rondan los 0 m/s en modelo) se encuentran en las mismas zonas antes descritas.

- Etapa 12:

- Magnitud de velocidades medias de flujo son:

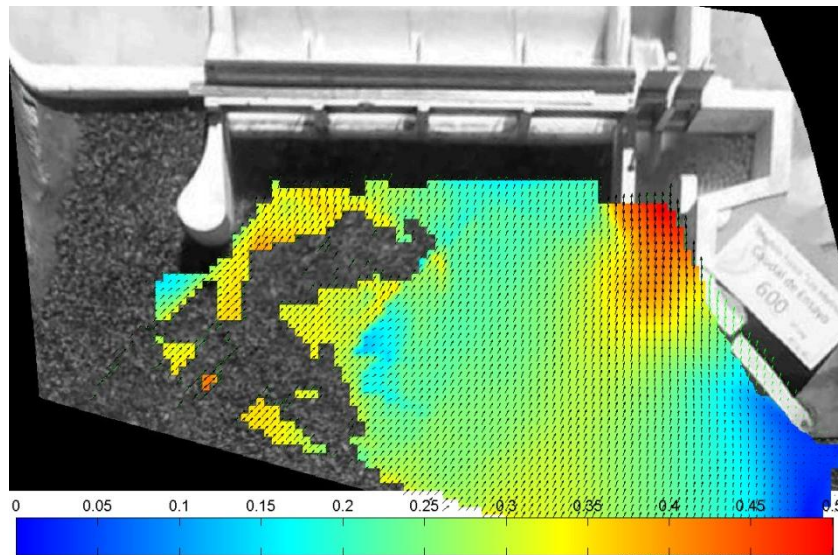


Figura 98: Magnitud de velocidades medias de flujo [m/seg.] registradas en la Etapa 12 del ensayo

- Trayectorias de las partículas:

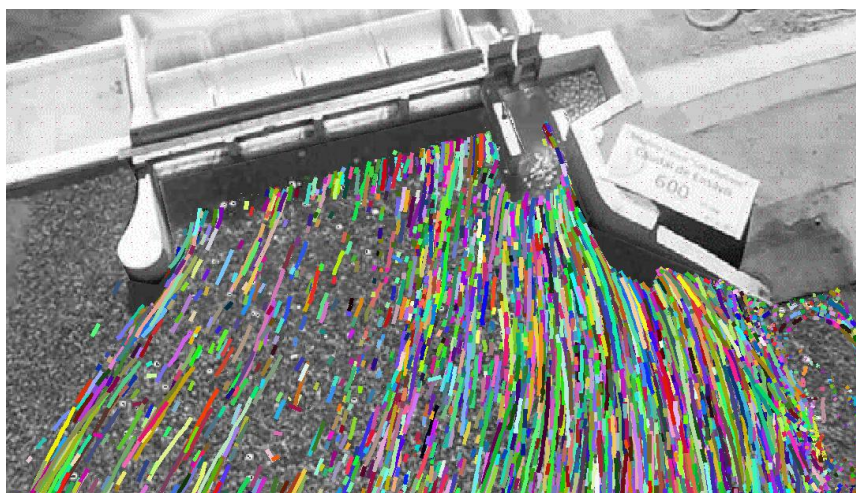


Figura 99: Trayectorias de las partículas registradas en la Etapa 12 del ensayo

En este ensayo también se ven zonas de separación del flujo debido a los obstáculos existentes en las márgenes del dique móvil.

Las zonas de estancamiento (velocidades mínimas) se encuentran en las mismas zonas antes mencionadas. Las zonas de máxima velocidad (alrededor de 0,5 m/s en modelo) se encuentran en la zona de ingreso al canal moderador. Esto último se debe a que **al hacer ingresar todo el caudal por el Rio Grande, se genera una zona de máxima velocidad sobre la margen derecha del dique y una zona de velocidades menores sobre la margen izquierda. Esto es debido a la separación del flujo aguas arriba.**

4-4-3-1 Detalle de comportamiento del flujo en los obstáculos de la obra.

Como complemento a los ensayos realizados, para analizar la recirculación del flujo en las zonas cercanas a los obstáculos existentes aguas arriba del dique se utilizó nuevamente la técnica PTV. Como se comentó anteriormente, todos los resultados que se mostraran de velocidad son referidas al modelo y no al prototipo. El ensayo se

llevó a cabo con un caudal de $600 \text{ m}^3/\text{seg.}$ (prototipo) que ingresaba por el Río Grande, con todas las estructuras móviles abiertas, y la obra de toma cerrada.

Las zonas en las que va a estudiarse el fenómeno de recirculación son las que se esquematizan a continuación:

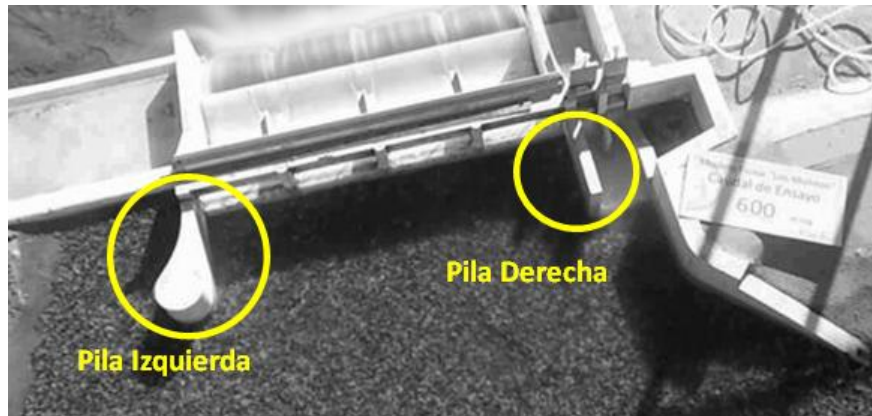


Figura 100: Obstáculos analizados

○ Pila Izquierda

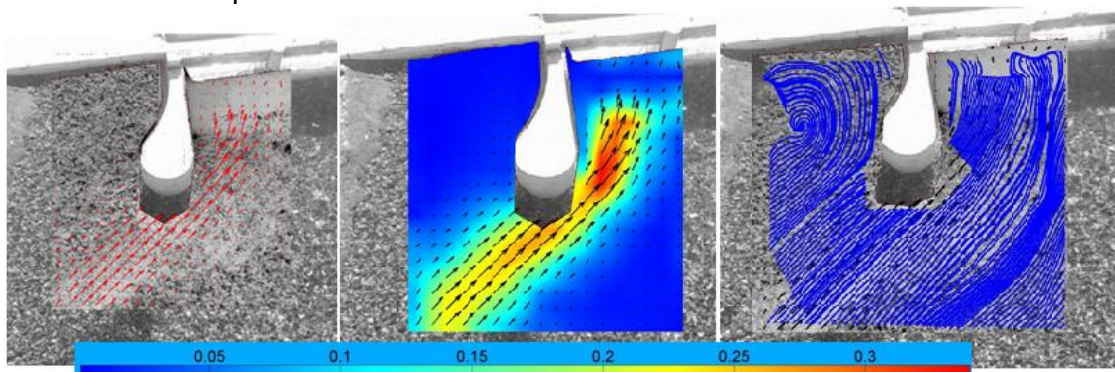


Figura 101: Vectores, Velocidades medias de flujo y Líneas de corriente sobre pila izquierda

En este análisis pueden sacarse importantes conclusiones.

En primer lugar se observa claramente la distribución de velocidades debido a este obstáculo. Las velocidades mínimas se encuentran en la zona del dique fijo (zona muerta debido a que el tirante de agua es menor a la altura de la cresta de esta estructura) y en la margen izquierda de DM4 (esto se debe a la separación que experimenta el flujo por la existencia al muro). Por otra parte, las velocidades máximas (que rondan los $0,35 \text{ m/s}$) se encuentran sobre las líneas de corriente que se dirigen directamente al DM4.

Es interesante observar las líneas de corriente cerradas que se forman en la zona de recirculación existente aguas arriba del dique fijo.

Cabe aclarar porque no pudo medirse en la zona inmediatamente aguas arriba de la nariz del muro: el motivo es la gran sombra que se observa allí que no permite detectar partículas en ese sector al ser sembradas en el flujo.

○ Pila Derecha

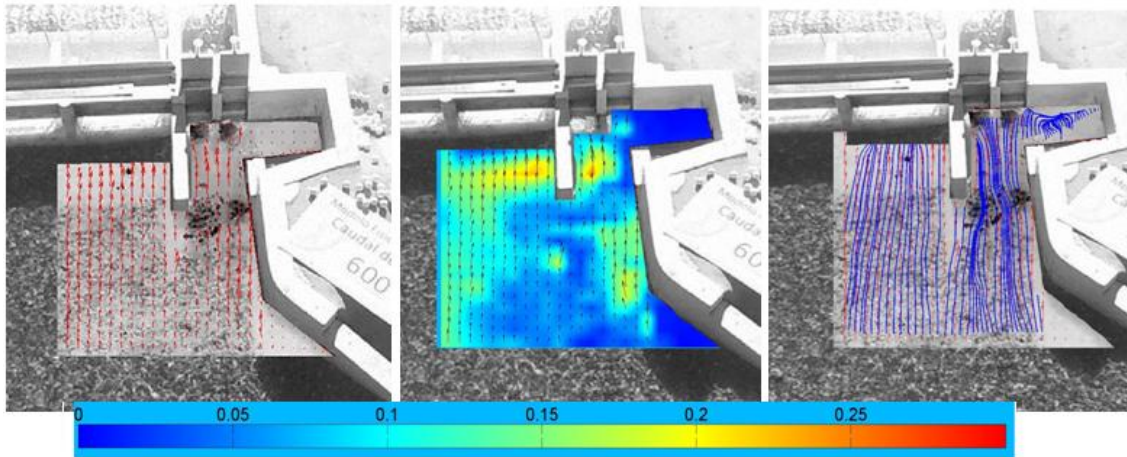


Figura 102: Vectores, Velocidades medias de flujo y Líneas de corriente sobre pila derecha

Lo que aquí se observa es que la zona de máxima velocidad (alrededor de 0,3 m/s en modelo) se encuentra en la zona de descarga tanto del DM1 como de los canales moderadores CM1 y CM2.

Además, se ve claramente la zona muerta en la toma con líneas de corriente cerradas que hacen recircular al flujo allí.

Aquí tampoco pudo medirse en la zona inmediatamente aguas arriba de DM1 debido a la importante sombra existente allí.

4-4-4 Síntesis

A partir de los caudales que permite evacuar cada estructura se evalúa su eficiencia hidráulica.

Eficiencia del canal moderador:

A pesar de que los dos descargadores de fondo del canal moderador (CM1 y CM2) tienen las mismas dimensiones, no tienen el mismo comportamiento hidráulico. Esto se debe a las distintas condiciones de borde que tienen (que perturban el flujo e impiden que evacuen el máximo caudal teórico).

En este caso también el caudal erogado por cada CM depende de la forma de hacer ingresar agua al modelo.

De todas maneras, se observa que el descargador CM1 es el más eficiente, ya que el caudal evacuado es mayor que el calculado para CM2. Esto se magnifica cuando el caudal ingresa por el Río Grande (Etapa 12)

Aproximadamente, CM1 evacua el 18% del caudal total mientras que CM2 evacua el 17%.

Eficiencia del dique móvil:

Análogamente al anterior análisis, a pesar de que todas las compuertas tienen las mismas dimensiones, no todas tienen el mismo comportamiento hidráulico. Esto se debe a las distintas condiciones de borde que tienen (efecto obstáculo, pilas laterales, entre otras estructuras que perturban el flujo e impiden que las compuertas evacuen el máximo caudal teórico).

Además, según desde donde se haga ingresar agua al modelo, los caudales erogados por cada una de las compuertas son distintos.

Si se toman los valores promedios de los ensayos realizados, se puede decir que la compuerta DM3 y DM2 son las más eficientes, ya que evacúa el mayor caudal. Si seguimos este criterio, les siguen DM4 y DM1. Aproximadamente, DM2 y DM3 evacuan aproximadamente el 17% del caudal total cada una; mientras que DM1 y DM4 evacuan el 16%.

A partir de los resultados de PTV realizados aguas arriba de la presa en los distintos ensayos, se observa que las velocidades superficiales en el modelo varían entre 0 y 0.5 m/s, que equivale a valores entre 0 y 4 m/s en prototipo.

A partir del ensayo de PTV realizado en la zona circundante a los muros existentes aguas arriba de la presa (tanto el que separa el dique fijo y el dique móvil como el que divide el dique móvil y el canal moderador), se comprobó la separación del flujo que estas estructuras provocan. Se pudo observar claramente las líneas de corriente, y los valores de velocidad superficial.

Si se tiene en cuenta que para los ensayos realizados el caudal fue el mismo y la única variante entre ellos fue la forma de aportarlo al mismo al modelo, las diferencias existentes entre los mismos se pueden sintetizar en lo siguiente:

- En primer lugar, es importante aclarar que a partir de las mediciones realizadas, se ha comprobado que no es lo mismo hacer ingresar al modelo todo el caudal por el Río Grande, el Río Reyes o bien una combinación de ambos.

Al hacer ingresar toda el agua por el Río Reyes (Etapa 10), las compuertas que más trabajan son las centrales y luego las laterales. El flujo se concentra en la margen izquierda del dique móvil y esto es debido a la curvatura explicada, de la entrada de caudal por este curso fluvial.

Por otro lado, al hacer ingresar toda el agua por el Río Grande (Etapa 12), también son las compuertas centrales las que más trabajan. Además, CM1 evacua mayor caudal que CM2. El caudal evacuado por canal moderador es mayor en este caso que en el de la Etapa 10.

En la Etapa 11, en el que se hace ingresar al modelo un 65% del caudal por el Río Grande y un 35% del mismo por el Río Reyes (tal como lo dicta el estudio hidrológico realizado en la cuenca) se obtiene como resultado una combinación de las etapas anteriormente descriptas (la 10 y la 12).

A continuación, en forma de tabla se presentan los porcentajes de caudal evacuado por cada estructura en cada parte del ensayo realizado:

| Prototipo | | | | | |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| % de caudal evacuado | | | | | |
| CM1 | CM2 | DM1 | DM2 | DM3 | DM4 |
| 17% | 17% | 15% | 18% | 17% | 16% |
| 18% | 18% | 16% | 16% | 16% | 16% |
| 18% | 17% | 16% | 17% | 16% | 15% |

Tabla 34: Porcentajes de caudales evacuados por cada una de las compuertas.

Si bien las trayectorias de las partículas son diferentes para cada condición ensayada, los caudales evacuados por cada compuerta no son significativamente diferentes.

Como comentario final, se puede decir que sería conveniente que se realicen los ensayos según lo que dicta el estudio hidrológico realizado en la cuenca; es decir que el agua que se vierta en el modelo deberá ser repartido en un 65% por el Rio Grande y un 35% por el Rio Reyes.

A continuación se procede a realizar un análisis de las velocidades en una sección próxima al dique móvil, para verificar si la etapa 11 es una combinación lineal de las etapas 10 y 12 . Para ello, se analiza una sección próxima a presa como se muestra a continuación:

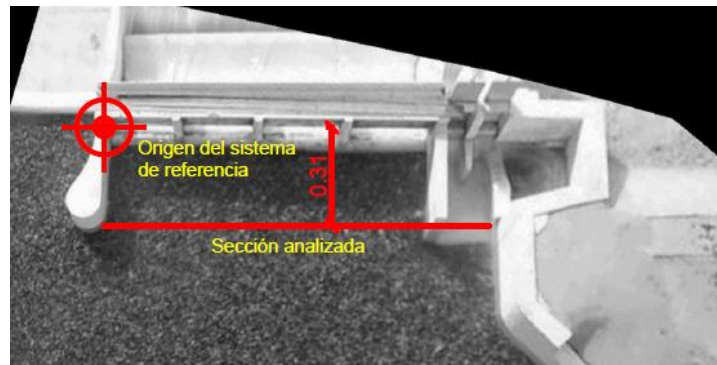


Figura 103: Sección de análisis

A través de PTVlab se extraen los siguientes datos de velocidades, lo cuales se grafican a continuación:

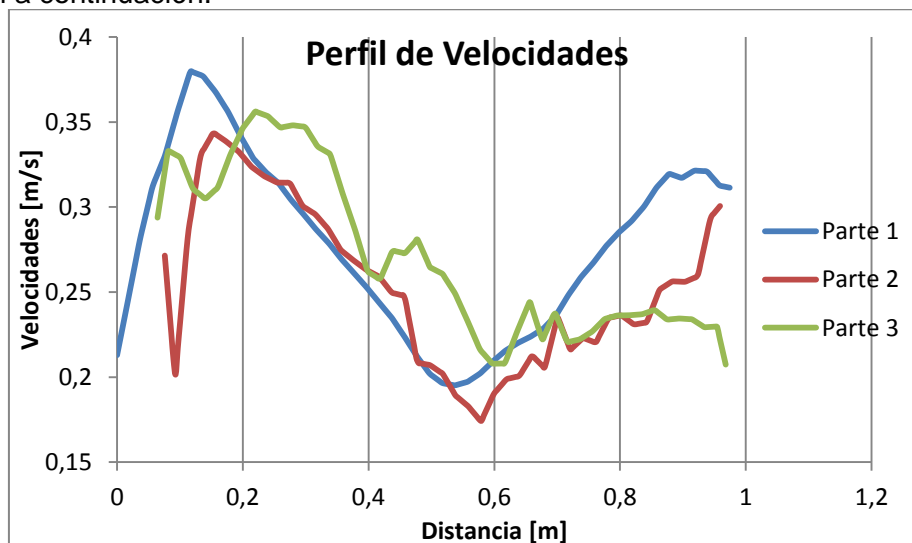


Figura 104: Perfiles de Velocidades en una sección ubicada a 31 cm del dique móvil para cada una de las partes del ensayo

Con la finalidad de demostrar lo antes dicho, respecto a que la parte 2 es la combinación entre la parte 1 y la parte 3 se procede a:

$$0.65 Vel_{Media\ Parte\ 3} + 0.35 Vel_{Media\ Parte\ 1} = Vel_{Media\ Parte\ 2} \quad [\text{Ecuación 31}]$$

Pero como los caudales totales registrados para cada una de las partes del ensayo son diferentes se procedió de la siguiente manera:

$$\frac{0.65 Vel_{Media\ Parte\ 3}}{Q_{Total\ Parte\ 3}} + \frac{0.35 Vel_{Media\ Parte\ 1}}{Q_{Total\ Parte\ 1}} = \frac{Vel_{Media\ Parte\ 2}}{Q_{Total\ Parte\ 2}} \quad [\text{Ecuación 32}]$$

Con la serie de valores de velocidad extraídas del PTVlab se calcularon las velocidades medias para cada una de las partes del ensayo. Numéricamente se tiene, lo siguiente:

| Parte | Río Grande | | | Río Reyes | | | Q Prot Total | Velocidades Medias [m/s] |
|-------|------------------|--------------------|-----------------|------------------|--------------------|-----------------|--------------|--------------------------|
| | H vertedero (cm) | Q prototipo (m3/s) | Q modelo (lt/s) | H vertedero (cm) | Q prototipo (m3/s) | Q modelo (lt/s) | | |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 36,97 | 628 | 18,45 | 628 | 0,26 |
| 2 | 30,4 | 421 | 12,35 | 30,27 | 194 | 5,7 | 615 | 0,22 |
| 3 | 34,9 | 656 | 19,25 | 0 | 0 | 0 | 656 | 0,24 |

Tabla 35: Caudales registrados y velocidades medias registradas en la sección de análisis

$$3.84 \times 10^{-4} \approx 3.56 \times 10^{-4}$$

Teniendo una diferencia del 8% entre los miembros de izquierda y derecha de la igualdad, lo que significa que es válido considerar a la parte 2 como una combinación lineal entre las otras dos partes.

CAPÍTULO 5: Conclusiones.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

5-1 CONCLUSIONES SOBRE LAS TÉCNICAS EXPERIMENTALES UTILIZADAS

Las técnicas experimentales con las que tuve contacto a lo largo de la Práctica Supervisada han sido muy variadas, entre ellas están:

- PTV (velocimetría por seguimiento de partículas) la cual permitió obtener campos de velocidad superficial del flujo, trayectorias de partículas, líneas de corriente y vectores siendo muy eficientes para describir el flujo de aproximación en el modelo físico de la presa Los Molinos. En el periodo de entrenamiento se implementó la técnica de PTV (velocimetría de seguimiento de partículas) para lo cual se ensayaron diferentes partículas trazadoras que generaron campos de velocidades comparables lo que indican que pueden ser utilizadas en forma complementarias. Además es importante destacar, que si bien las partículas esféricas blancas no requieren invertir los colores de las imágenes y son de muy fácil detección con el programa; las partículas de plástico negro al ser de menor tamaño se adaptan mejor para análisis en detalle de ciertos elementos cerca de las fronteras.
- ADV (velocímetro acústico Doppler) el cual permitió obtener velocidades instantáneas y medias del flujo de agua en el canal experimental utilizado para las diferentes calibraciones y validaciones de instrumental aunque no se pudo aplicar en el modelo físico por las bajas profundidades de flujo presentes en el modelo.
- Tubo Pitot fue la técnica de medición de velocidad de flujo que mejor se adaptaba para la medición de velocidades sobre la estructura del dique móvil y canal moderador. Como recomendación para la medición de velocidades con el tubo Pitot estático, se puede decir que para velocidades mayores a 0,4 m/s, utilizando un $C_d = 0,9448$, el instrumento da resultados aceptables para determinadas aplicaciones, con un error máximo posible de $\pm 11\%$. Para velocidades menores a 0,4 m/s, el error aumenta en forma considerable, por lo cual no se recomienda emplearlo dentro de este rango de velocidades.
- Respecto a las mediciones realizadas con los molinetes durante su calibración y validación se recomienda realizar al menos tres (3) lecturas del número de vueltas en cada punto con duración del proceso de integración no menor de 30 segundos. Para cada molinete y cada hélice se obtuvo la relación número de vueltas y la velocidad del flujo. Además, se pudo realizar comparaciones entre las distintas curvas de calibración que se fueron obteniendo a lo largo del tiempo para cada instrumento, y así mostrar cómo varían los resultados de las mediciones debido al desgaste que el instrumento sufre a lo largo de su vida útil. También se verificó el funcionamiento del molinete de eje vertical, a través de su comparación con al ADV y se validó la metodología experimental utilizada.

5-2 CONCLUSIONES SOBRE LA SITUACION DE LA PRESA LOS MOLINOS PREVA A ESTOS ESTUDIOS

- Se identificaron los componentes de la presa y se identificó la problemática de la presa que motivó a la materialización de un modelo físico. Se identificaron los objetivos del modelo físico y en base a ellos se definió los objetivos del informe de la Práctica Supervisada. Además se especificó la metodología para realizar dicho informe.

5-3 CONCLUSIONES SOBRE LOS ENSAYOS REALIZADOS EN EL MODELO FÍSICO DE LA PRESA LOS MOLINOS

- Para la condición de flujo ensayada, de $600 \text{ m}^3/\text{seg.}$ en prototipo que ingresan por el río Grande, con obra de toma y canal moderador cerrados, las compuertas trabajan bajo carga. Se puede decir que las velocidades de flujo en la transversal son variadas, debido a que el flujo no ingresa en forma perpendicular a la estructura, y las compuertas de los extremos se ven afectadas por los efectos de borde.
- A partir del análisis de la eficiencia de descarga de las estructuras móviles se puede decir: **Canal moderador:** A pesar de que los dos descargadores de fondo del canal moderador tienen las mismas dimensiones, no tienen el mismo comportamiento hidráulico. Esto también se debe a las distintas condiciones de borde que tienen (que perturban el flujo e impiden que evacúen el máximo caudal teórico).
Dique Móvil: Igual que en el canal moderador, a pesar de que todas las compuertas tienen las mismas dimensiones, no todas tienen el mismo comportamiento hidráulico. Esto se debe a las distintas condiciones de borde que tienen (efecto obstáculo, pilas laterales, entre otras estructuras que perturban el flujo e impiden que las compuertas evacúen el máximo caudal teórico).
- Para diferentes condiciones de ingreso se evaluó, si la eficiencia hidráulica de las estructuras móviles varían para cada condición. De lo que se observó: **Eficiencia del canal moderador:** no tienen el mismo comportamiento hidráulico. En este caso también el caudal erogado por cada CM depende de la forma de hacer ingresar agua al modelo. **Eficiencia del dique móvil:** Análogamente al anterior análisis, no todas las compuertas tienen el mismo comportamiento hidráulico. Según desde donde se haga ingresar agua al modelo, los caudales erogados por cada una de las compuertas son distintos.
- A partir de los resultados de PTV realizados aguas arriba de la presa en los distintos ensayos, se observa que las velocidades superficiales en el modelo varían entre 0 y 0.5 m/s, que equivale a valores entre 0 y 4 m/s en prototipo. A partir del ensayo de PTV realizado en la zona circundante a los muros existentes aguas arriba de la presa (tanto el que separa el dique fijo y el dique móvil como el que divide el dique móvil y el canal moderador), se comprobó la separación del flujo que estas estructuras provocan. Se pudo observar claramente las líneas de corriente, y los valores de velocidad superficial.
- A partir de las mediciones realizadas, se ha comprobado que no es lo mismo hacer ingresar al modelo todo el caudal por el Río Grande, el Río Reyes o bien una combinación de ambos. Al hacer ingresar toda el agua por el Río Reyes, las compuertas que más trabajan son las centrales y luego las laterales. El flujo se concentra en la margen izquierda del dique móvil y esto es debido a la curvatura explicada, de la entrada de caudal por este curso fluvial. Por otro lado, al hacer ingresar toda el agua por el Río Grande, también son las compuertas centrales las que más trabajan. Cuando se hace ingresar al modelo un 65% del caudal por el Río Grande y un 35% del mismo por el Río Reyes (tal como lo dicta el estudio hidrológico realizado en la cuenca) se obtiene como resultado una combinación de las etapas previas.

- Si bien las trayectorias de las partículas son diferentes para cada condición ensayada, los caudales evacuados por cada compuerta no son significativamente diferentes.

5-4 RECOMENDACIONES PARA FUTUROS ENSAYOS

- Se debe establecer con anterioridad qué condiciones se va a ensayar, qué compuertas se van a abrir y cuáles van a quedar cerradas, dado que para cada condición la eficiencia de cada compuerta es diferente.
- Respecto a las condiciones de ingreso, es recomendable que los caudales ingresen 65 % por el Río Grande y 35 % por el Río Reyes, según lo establecen los estudios hidrológicos previos.

5-5 CONCLUSIONES DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA

Como conclusión de esta actividad, puedo decir que he trabajado en un grupo donde priman el compañerismo y el trabajo en equipo, en el que todos están dispuestos a enseñar y ayudar. A lo largo del desarrollo se me fue enseñando diferentes técnicas y actividades, algunas desconocidas para mí, que han sido de gran interés y utilidad para la concreción de los objetivos planteados. Además es de destacar el acompañamiento y participación permanente de todos los integrantes del Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA), a los cuales estoy profundamente agradecido.

BIBLIOGRAFÍA

- Díaz Lozada, José Manuel. “*Descripción experimental, utilizando un modelo físico, del flujo de aproximación a la Presa Los Molinos.*” - Práctica Supervisada de Carrera de Ingeniería Civil- Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Universidad Nacional de Córdoba- Febrero 2013.
- Herrero, Horacio Sebastián; Castro, Pablo Gabriel; García, Carlos Marcelo y Rodríguez, Andrés (2007). “Guía práctica para realizar mediciones de velocidad en flujos turbulentos con ADV” - Instituto Superior de Recursos Hídricos, Universidad Nacional de Córdoba.
- Laco, Maximiliano; Turelli, Pablo “*Técnicas de medición de caudales en canales y ríos, Calibración de instrumental y Evaluación de incertidumbre*” – Trabajo Final – Universidad Nacional de Córdoba – Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Córdoba – 2008
- Patalano, Brevis, Garcia, Bleninger y Rodriguez. “PTVlab, una herramienta grafica para el procesamiento digital en velocimetria por seguimiento de partículas” – Resumen extendido a ser presentado en el III simposio sobre métodos experimentales en hidráulica, Santa Fe, Argentina, Marzo 2013.
- Quiroga Crespo, Lucas Santiago Nicolás “*Determinación experimental, en un modelo físico, de la capacidad hidráulica de las obras de evacuación de la presa Los Molinos, Jujuy*” – Práctica Supervisada de Carrera de Ingeniería Civil- Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Universidad Nacional de Córdoba- Febrero 2013.
- Streeter, Víctor L y Wylie, E. Benjamín. (1999) “*Mecánica de Fluidos*” Novena Edición. Editorial McGraw Hill.
- Waldo Chayle, Natalia Solis, Alba Ramirez y Bernardo Matthews (2007) “*Control de la cuenca del Río Grande - Jujuy- Argentina*”
- Zárate, F; Menéndez Aran, D; Fava, C; Bacchiega, J (2010) “*Rehabilitación de obras hidráulicas en ríos de montaña. Caso de estudio: Dique derivador Los Molinos- Jujuy*”

ANEXO

Se adjuntan los resúmenes extendidos, preparados con los contenidos de este informe, que serán presentados y publicados en el VI Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos a llevarse a cabo en el mes de Noviembre del año 2013. El autor de este informe es coautor de los trabajos que se presentan.