

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales

Tesis Doctoral



Caracterización Hidrodinámica Detallada del Flujo en
Estructuras Hidráulicas de Plantas de Tratamiento de
Aguas Y Aguas Residuales para Evaluar su
Funcionamiento.

Autor: Mg. Ing. Ivan Matias Ragessi
Director: Dr. Ing. Carlos Marcelo García

Agosto de 2017

Caracterización Hidrodinámica Detallada del Flujo en
Estructuras Hidráulicas de Plantas de Tratamiento de
Aguas Y Aguas Residuales para Optimizar su
Funcionamiento.

por

Mag. Ing. Ivan Matias Ragessi

Dr. Ing. Carlos Marcelo García
Director

COMISIÓN ASESORA:

Dr. Ing. Carlos Marcelo Garcia
FCEFyN - UNC

Dr. Ing. Andrés Rodríguez
FCEFyN - UNC

Dr. Ing. Mariano I. Cantero
Instituto Balseiro - CAB

Esta Tesis fue enviada a la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba para cumplimentar los requerimientos de obtención del grado académico de Doctor en Ciencias de la Ingeniería.

Córdoba, Argentina

Agosto de 2017

Resumen

Las grandes ciudades de Argentina, como Buenos Aires y Córdoba, se encuentran entre las regiones con mayor incremento poblacional de la región, con una rápida incorporación de zonas periféricas a la urbanización. Para satisfacer las necesidades de agua potable, de una población en continuo crecimiento, es necesaria la optimización en los procesos de potabilización existentes. Esto también aplica al diseño de las partes componentes de plantas de tratamiento de aguas residuales, debido a que su objetivo es eliminar o modificar los contaminantes perjudiciales para la salud humana y proteger al cuerpo receptor de la descarga. El diseño y evaluación del correcto funcionamiento de este tipo de obras de infraestructura, se realiza habitualmente siguiendo criterios definidos en ingeniería sanitaria. Sin embargo, las singularidades hidrodinámicas presentes en el flujo de componentes de una planta pueden afectar en gran medida su rendimiento, resultando en un funcionamiento no compatible con el previsto en el diseño sanitario. En esta tesis se abordan problemática identificadas en dos plantas de tratamientos de aguas de la ciudad de Córdoba, y una en la ciudad de Berazategui, Provincia de Buenos Aires. Una de ellas es la planta de tratamiento de agua potable “Los Molinos” que la empresa Aguas Cordobesas S.A. opera en cercanías de la localidad de Bouwer en la provincia de Córdoba. Otra es la planta de tratamiento de aguas residuales “Bajo Grande” situada en la zona de Chacra de la Merced, en el extremo Este de la ciudad Córdoba, que realiza el tratamiento previo a la descarga al Río Suquía. En estas plantas se observan patrones de flujos incompatibles con los procesos de tratamiento. Además, los patrones hidrodinámicos presentes en las estructuras de aforo dificultan la cuantificación del caudal tratado y genera incertidumbre en la correcta dosificación para el tratamiento químico. Problemáticas similares se observan en la planta “Bicentenario” de tratamiento de líquidos residuales localizada en Berazategui, Provincia de Buenos Aires, que opera la empresa Agua y Saneamientos Argentinos S.A (AySA). Esta planta es una de las obras de infraestructura más importantes que se ha construido en los últimos años en el país, en la cual se tratan los líquidos residuales de la población de la ciudad de Buenos Aires y algunos municipios del primer cordón del conurbano bonaerense. La caracterización hidrodinámica detallada del flujo en componentes hidráulicas de estas plantas de tratamiento de agua y aguas residuales en escala de prototipo, a través del uso in-situ de técnicas experimentales de alta resolución espacial y temporal y de la simulación numérica en detalle proporciona información fundamental del flujo: validación de los sistemas de aforo instalados, distribución de caudales entre las unidades de decantación; campos de velocidad media del flujo y su evolución temporal; parámetros característicos de la turbulencia; entre otros. Esto permite avanzar en el conocimiento acerca de la presencia y los efectos de estructuras turbulentas e inestabilidades de flujo y elaborar recomendaciones para optimizar el funcionamiento de componentes hidráulicas de plantas de tratamiento.

Abstract

The large cities of Argentina, such as Buenos Aires and Córdoba, are among the cities with the highest population growth rate in the region, with the integration of peripheral areas into the urban system. To meet the needs of potable water for a population in continuous growth, it is necessary to optimize the existing water potabilization processes. This also applies to the design of the Wastewater Treatment Plants components because their purpose is to eliminate or modify contaminants detrimental to human health and to protect the receiving water body.

The design and evaluation of the correct functioning of these treatment plants, is usually carried out following criteria defined in sanitary engineering. However, the hydrodynamic singularities present in the flow of treatment Plants components can greatly affect its performance, resulting in an operation that is not compatible with that provided in the sanitary design. This thesis addresses problems identified in two water treatment plants in the city of Córdoba, and one in the city of Berazategui, Province of Buenos Aires. The first analyzed plant is the potable water treatment plant "Los Molinos" that the company Aguas Cordobesas S.A. Operates in the vicinity of the town of Bouwer in the province of Córdoba. Another plant is the "Bajo Grande" wastewater treatment plant located in the area of Chacra de la Merced, in the eastern end of the city of Córdoba, which performs the wastewater treatment prior to discharge to the Suquía River. Hydrodynamics flow patterns incompatible with the treatment processes are observed in these plants. In addition, the hydrodynamic patterns present in the flow-gauging structures of these plants make it difficult to quantify the treated flow rate and generates uncertainty in the correct dosage for the chemical treatment. Similar problems are observed in the "Bicentenario" plant for the treatment of wastewater located in Berazategui, Province of Buenos Aires, which operates the company Agua y Saneamientos Argentinos S.A (AySA). This plant is one of the most important infrastructure works that has been built in recent years in the country, which treats the wastewater of the population of the city of Buenos Aires and some municipalities of the peripheral areas.

The detailed hydrodynamic characterization of the flow in hydraulic components of these water and wastewater treatment plants through in-situ measurements using high spatial and temporal resolution experimental techniques and detailed numerical simulation provides important information validating the installed flow-gauging systems, evaluating the flow distribution between the settling units; mean velocity fields and its temporal evolution; parameters characteristic of flow turbulence; among others. This information allows advance in the knowledge about the presence and the effects of turbulent structures and flow instabilities in the treatment processes and to make recommendations to optimize the operation of hydraulic components of water treatment plants.

Resumo

As grandes cidades Argentinas, como Buenos Aires e Córdoba estão entre as regiões com maior crescimento populacional e acelerado processo de urbanização das áreas periféricas. Para atender as necessidades de água potável de uma população em crescimento, torna-se necessário à otimização dos processos de tratamento de água existentes. Isto também se aplica ao sistema de tratamento de águas residuais, onde o seu objetivo é eliminar ou modificar os poluentes nocivos para a saúde humana e proteger o fluxo de descarga do corpo. A concepção e avaliação do bom funcionamento deste tipo de infraestrutura geralmente são feitos de acordo com critérios definidos pela engenharia sanitária. No entanto, as peculiaridades hidrodinâmicas presentes no fluxo de componentes dos sistemas podem afetar fortemente o seu desempenho, resultando no funcionamento incompatível com o previsto na concepção do projeto de tratamento sanitário. Nesta tese são abordados os problemas de duas estações de tratamento, sendo uma na cidade Córdoba e outra na cidade de Berategui, província de Buenos Aires. Uma delas é a estação de tratamento de água "Los Molinos" da empresa Aguas Cordobesas S.A que opera perto da cidade de Bouwer, na província de Córdoba. A outra é a estação de tratamento de águas residuais "Bajo Grande", localizado na área de Chacra de la Merced, no extremo leste da cidade de Córdoba, que realiza o tratamento prévio da descarga do Rio Suquía. Nestes sistemas são observados padrões de fluxo incompatíveis com os processos de tratamento. Além disso, os padrões hidrodinâmicos presentes nas estruturas do vertedouro dificultam a quantificação do fluxo tratado e cria incerteza na dosagem correta para o tratamento químico. Problemas semelhantes são observados nos sistema "Bicentenario" no tratamento dos líquidos residuais localizados em Berategui, Província de Buenos Aires, que opera a companhia de Água e Saneamento Argentina S.A. (AySA). Este sistema é uma das mais importantes obras de infraestrutura que foi construída nos últimos anos no país, onde se tratam o líquido residual da população da cidade de Buenos Aires e alguns municípios próximos a província de Buenos Aires. A caracterização detalhada do fluxo hidrodinâmico em componentes hidráulicos no sistema de tratamento de água e de águas residuais em escala de protótipo, pode ser realizada através do uso de técnicas experimentais in-situ com alta resolução espacial e temporal, e simulação numérica em detalhes fornecendo informações essenciais do fluxo como: validação de sistemas de capacidade instalada, de distribuição dos fluxos entre unidades despejos; campos de velocidade média de fluxo e sua evolução temporal; parâmetros característicos da turbulência; entre outros. Isso permite que o conhecimento prévio sobre a presença e efeitos de estruturas turbulentas e instabilidades de fluxo e desenvolver recomendações para aperfeiçoar o funcionamento das estações de tratamento de componentes hidráulicas.

Índice

CAPITULO 1: MARCO REFERENCIAL

1.1.- INTRODUCCIÓN GENERAL	2
1.2.- PROBLEMÁTICA ESPECÍFICA	2
1.2.1.- Planta de tratamiento de agua potable "Los Molinos"	3
1.2.2.- Planta de tratamiento de aguas residuales "Bajo Grande"	5
1.2.3.- Planta "Bicentenario" de tratamiento de aguas residuales	6
1.3.- ANTECEDENTES.....	8
1.4.- ÁREAS DE VACANCIA CIENTÍFICO-TECNOLÓGICA	10
1.5.- OBJETIVO	12
1.6.- METODOLOGÍA.....	12

CAPITULO 2: TÉCNICAS EXPERIMENTALES Y HERRAMIENTAS NUMÉRICAS

2.1.- INTRODUCCIÓN	15
2.2.- TÉCNICAS EXPERIMENTALES	15
2.2.1.- Velocímetro Acústico Doppler (ADV)	15
2.2.2.- Perfilado de Corriente Acústico Doppler	16
2.2.3.- Velocimetría por Imágenes de Partículas y Seguimiento de Partículas a Gran Escala (LSPIV/PTV)	17
2.2.3.1.- Instrumental requerido.....	18
2.2.3.2.- Programa de análisis de imágenes digitales	21
2.3.- SIMULACIONES NUMÉRICAS (CFD)	22
2.3.1.- Modelo de simulación basado en las ecuaciones de Navier Stokes promediadas según Reynolds (RANS).	23
2.3.2.- Modelo de simulación de Grande Vórtices (LES).....	26
2.3.3.- Implementación de los modelos numéricos.....	28

CAPITULO 3: CARACTERIZACIÓN DE LOS PATRONES FLUJO TURBULENTOS EN COMPONENTES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLES "LOS MOLINOS"

3.1.- INTRODUCCIÓN.....	31
3.2.- ESTUDIO EXPERIMENTAL	33
3.2.1.- Mediciones con el Velocímetro Acústico Doppler (ADV)	33
3.2.2.- Mediciones con el Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP)	

3.2.3.- Mediciones con la técnica de Velocimetría por Seguimiento de Partículas Implementada a Gran Escala (LSPTV)	35
3.3.- SIMULACIÓN DEL FLUJO TURBULENTO	36
3.3.1.- Generación de la malla de volúmenes finitos.....	36
3.3.2.- Condiciones iniciales y de borde.....	41
3.4.- RESULTADOS	42
3.4.1.- Validación del esquema de modelación	42
3.4.1.1.- Evolución espacial de parámetros turbulentos.....	43
3.4.1.2.- Campo de velocidad.....	48
3.4.2.- Explotación del modelo numérico	51
CAPITULO 4: CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DEL FLUJO TURBULENTO EN COMPONENTES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LÍQUIDOS RESIDUALES DE LA CIUDAD DE CÓDOBA "BAJO GRANDE"	
4.1.- INTRODUCCIÓN.....	57
4.2.- ESTUDIO EXPERIMENTAL.....	60
4.2.1.- Mediciones con el Perfilador de Corriente Acustico Doppler (ADCP)	62
4.2.2.- Mediciones con la técnica de Velocimetría por Impágenes de Partículas y Seguimiento de Partículas	63
4.3.- SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL FLUJO TURBULENTO	65
4.3.1.- Simulación de los Grandes Vórtices (LES)	67
4.4.- RESULTADOS y DISCUSIONES.....	68
4.4.1.- Resultados experimentales	68
4.4.2.- Resultados de la simulación numérica	76
4.5.- RECOMENDACIONES.....	84
CAPITULO 5: EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO TURBULENTO EN COMPONENTES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LÍQUIDOS RESIDUALES "BICENTENARIO"	
5.1.- INTRODUCCIÓN.....	87
5.2.- ESTUDIO EXPERIMENTAL	90
5.2.1.- Velocimetría por imágenes de particular a gran escala (LSPIV)	91
5.2.3.- Mediciones con el Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP)	93
5.3.- SIMULACIÓN NUMÉRICA	94
5.4.- RESULTADOS	95
5.4.1.- Caracterización del flujo en el canal de ingreso	95
5.4.1.1.- Resultados experimentales	95
5.4.1.2.- Resultados de la simulación numérica	101

5.4.2.- Caracterización del flujo en la zona de decantación.....	104
CAPITULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
6.1.- CONCLUSIONES	110
6.2.- TRABAJOS FUTUROS.....	112
CAPITULO 7:	
7.1.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	114

Índice de Figuras

Figura 1.1.- Planta de tratamiento de agua potable "Los Molinos". Córdoba, Argentina.....	3
Figura 1.2.- Canal de Aforo y Canal de distribución transversal de la Planta de tratamiento de agua potable "Los Molinos". Córdoba, Argentina.....	4
Figura 1.3.- Canal de Aforo a la salida de la planta de tratamiento de aguas residuales "Bajo Grande", Córdoba, Argentina.	5
Figura 1.4.- Esquema y dimensiones (en metros) del Canal de Aforo a la salida de la planta de tratamiento de aguas residuales "Bajo Grande", Córdoba, Argentina.	6
Figura 1.5.- Sensor de nivel instalado en el canal de aforo de la planta de tratamiento de aguas residuales "Bajo Grande".....	6
Figura 1.6.- Canal de ingreso y Canal de Aforo de la planta de tratamiento de aguas residuales "Bicentenario", Berazategui, Argentina.	7
Figura 2.1.- Velocímetro Acústico Doppler Micro ADV YSI Sontek de 16 MHz de frecuencia acústica utilizado en la caracterización experimental.	16
Figura 2.2.- Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADP) "RiverSurveyor S5" utilizado en la caracterización experimental.....	17
Figura 2.3.- Esquema de la técnica PTV (Weitbrecht, 2007).	19
Figura 2.4.- Imagen rectificada del canal de aforo de la planta depuradora de aguas residuales "Bajo Grande".....	19
Figura 2.5.- Esquema de una grilla de dimensiones conocidas.....	20
Figura 2.6.- Interfaz gráfica del programa PTVlab (Patalano et al. 2013).	21
Figura 2.7.- Esquema del algoritmo del PTVlab.	22
Figura 3.1.- Esquema de la zona que incluye al canal de aforo, canal de distribución transversal e ingreso a los decantadores. Planta de tratamiento de agua potable "Los Molinos". Las flechas indican la dirección y sentido del flujo.....	32
Figura 3.2.- Esquema de la zona de estudio y ubicación de las secciones de medición con velocímetro Acústico Doppler- ADV. Las flechas azules indican la dirección del flujo.	34
Figura 3.3.- Ubicación de las secciones de medición con Perfilador de Corriente Acústico Doppler – ADCP. Las flechas azules indican la dirección del flujo.....	35
Figura 3.4.- a) Partículas trazadoras adoptados en este estudio; b) Ubicación de la Cámara digital en la implementación de la técnica PTV en la campaña 5; c) Marcas de referencia utilizadas en el proceso de rectificación.....	36
Figura 3.5.- Vista superior y lateral de la malla implementada para el modelo tridimensional.	37
Figura 3.6.- Detalle mallado en la zona de encuentro entre el canal de aforo y el canal distribuidor. Las flechas indican el sentido del flujo.	37
Figura 3.7.- Sección transversal del canal de aforo a 2 metros aguas arriba de la pasarela. Vista de las mallas para implementar el modelo numérico en tres dimensiones.....	38
Figura 3.8.- Perfil vertical de la velocidad longitudinal del flujo en el centro del canal de aforo para una sección ubicada 2 metros aguas arriba de la pasarela. La cota de fondo está a cota 0.58m. Condiciones de flujo presentes en la campaña de medición 2.	39
Figura 3.9.- Perfil transversal de la velocidad longitudinal del flujo en el de canal de aforo para una sección ubicada 2 metros aguas arriba de la pasarela y a una profundidad de 0.60 m de la superficie. Condiciones de flujo presentes en la campaña de medición 2.	39
Figura 3.10.- Perfil vertical de la energía cinética turbulenta del flujo en el centro del canal de aforo para una sección ubicada 2 metros aguas arriba de la pasarela. La cota de fondo está a 0.58 m. Condiciones de flujo presentes en la campaña de medición 2.	40
Figura 3.11.- Perfil transversal de la energía cinética turbulenta del flujo en el de canal de aforo a una profundidad de 0.6 m para una sección ubicada 2 metros aguas arriba de la pasarela. Condiciones de flujo presentes en la campaña de medición 2.	41
Figura 3.12.- Comparación de los valores de la velocidad longitudinal media del flujo resultantes del modelo numérico y los experimentales registrados con ADV en la sección C-C en el canal de distribución transversal de la planta para una profundidad de 0.07m. Con.....	43
Figura 3.13.- Comparación de los valores de la velocidad longitudinal media del flujo resultantes del modelo numérico y los experimentales registrados con ADV en la sección C-C en el canal de distribución transversal de la planta para una profundidad de 0.27m. Condiciones de flujos	

presentes en la campaña 1. La Progresiva 0 indica la margen derecha.	44
Figura 3.14.- Comparación de los valores de la velocidad longitudinal media del flujo resultantes del modelo numérico y los experimentales registrados con ADV en la sección C-C en el canal de distribución transversal de la planta para una profundidad de 0.67m. Condiciones de flujos presentes en la campaña 1. La Progresiva 0 indica la margen derecha.	44
Figura 3.15.- Comparación de los valores de la velocidad longitudinal media del flujo resultantes del modelo numérico y los experimentales registrados con ADV en la sección B-B en el canal de distribución transversal de la planta para una profundidad de 0.07m. Condiciones de flujos presentes en la campaña 1. La Progresiva 0 indica la margen izquierda.	45
Figura 3.16.- Comparación de los valores de la velocidad longitudinal media del flujo resultantes del modelo numérico y los experimentales registrados con ADV en la sección B-B en el canal de distribución transversal de la planta para una profundidad de 0.27m. Condiciones de flujos presentes en la campaña 1. La Progresiva 0 indica la margen izquierda.	45
Figura 3.17.- Comparación de los valores de la velocidad longitudinal media del flujo resultantes del modelo numérico y los experimentales registrados con ADV en la sección B-B en el canal de distribución transversal de la planta para una profundidad de 0.67m. Condiciones de flujos presentes en la campaña 1. La Progresiva 0 indica la margen izquierda.	46
Figura 3.18.- Comparación de los valores de la velocidad longitudinal media del flujo resultantes de modelo numérico y los registrados con ADV en la zona cercana a las compuertas 3 (a) y 4 (b) de la planta (puntos D y E en Figura 2. 2). Condiciones de flujos presentes en la campaña 1	46
Figura 3.19.- Campos de la magnitud de velocidad superficial obtenidos con la técnica PTV y resultante de la simulación numérica para la campaña 3.	49
Figura 3.20.- Campo de velocidad longitudinal media del flujo observado y el resultante de la simulación numérica a lo largo de la sección G-G para la campaña 4. Para el modelo numérico los valores negativos corresponden a la dirección predominante del flujo. El cero en el eje "Progresiva" corresponde a la pared del canal distribuidor.	49
Figura 3.21.- Campo de la magnitud de velocidad de flujo para toda la rama izquierda (progresivas 0 a 9 m) y parte de la rama derecha (progresivas 14 m a 20 m) del canal distribuidor. El cero en el eje "Progresiva" corresponde a la pared final de la rama izquierda del canal distribuidor. Condiciones de flujo presentes en la campaña 3. El recuadro indica las zonas de estancamiento de flujo observadas y simuladas.	50
Figura 3.22.- Campo de la magnitud de velocidad de flujo para los 10 m restantes de la rama derecha del canal distribuidor. En ambos casos la escala está en m/s. El cero en el eje "Progresiva" corresponde a la pared final de la rama derecha del canal distribuidor. Condiciones de flujo presentes en la campaña 3. El recuadro indica las zonas de estancamiento de flujo observadas y simuladas.	51
Figura 3.23.- Esquema de la zona que incluye al canal de aforo, canal de distribución transversal, ingreso a los decantadores 3 y 4, y compuerta al final de la rama derecha de canal distribuidor transversal. Planta de tratamiento de agua potable "Los Molinos". Las flechas indican la dirección y sentido del flujo.	52
Figura 3.24.- Simulación numérica del flujo cuando el decantador 1 está fuera de operación. VISTA EN PLANTA: Magnitud de la velocidad media del flujo superficial. VISTA FRONTAL-COMPUERTAS: Magnitud de la velocidad media del flujo en las compuertas.	53
Figura 3.25.- Simulación numérica del flujo cuando el decantador 2 está fuera de operación. VISTA EN PLANTA: Magnitud de la velocidad media del flujo superficial. VISTA FRONTAL-COMPUERTAS: Magnitud de la velocidad media del flujo en las compuertas.	53
Figura 3.26.- Simulación numérica del flujo cuando el decantador 3 está fuera de operación. VISTA EN PLANTA: Magnitud de la velocidad media del flujo superficial. VISTA FRONTAL-COMPUERTAS: Magnitud de la velocidad media del flujo en las compuertas.	54
Figura 3.27.- Simulación numérica del flujo con los decantadores 3 y 4 en operación y habilitada la compuerta al final de la rama derecha del canal distribuidor. VISTA EN PLANTA: Magnitud de la velocidad media del flujo superficial. VISTA FRONTAL-COMPUERTAS: Magnitud de la velocidad media del flujo en las compuertas 3 y 4. VISTA FRONTAL-COMPUERTA DERECHA: Magnitud de la velocidad media del flujo en la compuerta al final de la rama derecha del canal distribuidor.	55
Figura 4.1.- Vista superior de la planta de tratamiento de aguas residuales "Bajo Grande".	58
Figura 4.2.- Esquema general de la planta de tratamiento de aguas residuales "Bajo Grande".	59
Figura 4.3.- a) Bomba en la estación elevadora; b) Panel digital de la estación elevadora; c) Tabla	

que vincula la frecuencia de cada bomba con el caudal elevado.	61
Figura 4.4.- Imagen rectificada del canal de aforo de la planta depuradora de aguas residuales "Bajo Grande"	64
Figura 4.5.- Imagen de Bajo Grande con los puntos de referencia reales marcados.	64
Figura 4.6.- Partículas utilizadas en el flujo durante los experimentos en la planta de tratamiento de líquidos cloacales de Bajo Grande. Diámetro de 65 mm.	65
Figura 4.7.- Dominio de la simulación y detalle de la resolución de la malla.	66
Figura 4.8.- Resolución del mallado. Acercamiento y detalle de la zona de separación del flujo. ...	67
Figura 4.9.- Campo de velocidad longitudinal resultante del promediado de las 20 transectas realizadas en la campaña 1. La progresiva 0 corresponde a la margen izquierda.	69
Figura 4.10.- Campo de velocidad longitudinal resultante del promediado de las 12 transectas realizadas en la campaña 2. La progresiva 0 corresponde a la margen izquierda.	69
Figura 4.11.- Campo de velocidad longitudinal resultante del promediado de las 16 transectas realizadas en la campaña 3. La progresiva 0 corresponde a la margen izquierda.	70
Figura 4.12.- Variación del ancho efectivo de flujo en el canal de aforo en función del caudal registrado para las tres campañas de medición.	70
Figura 4.13.- Componente longitudinal del vector velocidad de flujo en el plano de la superficie libre del canal de aforo, para dos instantes. Campaña 2. Velocidades en m/s.	72
Figura 4.14.- Líneas de corriente obtenidas con el software PTVLab.	72
Figura 4.15.- Serie temporal de velocidad longitudinal media en la vertical para $t = [300-900]$. Medición realizada en la campaña 2, en el centro del canal de aforo en la Pasarela B.	73
Figura 4.16.- Serie temporal de velocidad longitudinal media en la vertical para $t = [1000-1600]$. Medición realizada en la campaña 3, en el centro del canal de aforo en la Pasarela B.	73
Figura 4.17.- Velocidad longitudinal. Serie temporal de perfiles registrados con ADCP durante la campaña 2 en el centro del canal de aforo en la Pasarela B.	74
Figura 4.18.- Velocidad longitudinal. Serie temporal de perfiles registrados con ADCP durante la campaña 3 en el centro del canal de aforo en la Pasarela B.	74
Figura 4.19.- Velocidad transversal. Serie temporal de perfiles registrados con ADCP durante la campaña 2 en el centro del canal de aforo en la Pasarela B.	74
Figura 4.20.- Velocidad transversal. Serie temporal de perfiles registrados con ADCP durante la campaña 3 en el centro del canal de aforo en la Pasarela B.	74
Figura 4.21.- Evolución del valor medio de la componente longitudinal (línea roja) y transversal (línea azul) del vector velocidad para las campañas campaña 2.	75
Figura 4.22.- Evolución del valor medio de la componente longitudinal (línea roja) y transversal (línea azul) del vector velocidad para las campañas campaña 3.	75
Figura 4.23.- Espectro de energía de las señales registradas para la componente longitudinal de velocidad en las campañas 2 (línea color azul) y 3 (línea color rojo).	76
Figura 4.24.- Espectro de energía de la señal registrada para la componente transversal de velocidad en las campañas 2 (línea color azul) y 3 (línea color rojo).	76
Figura 4.25.- Campo medio de la magnitud de velocidad para la simulación en detalle con los modelos de cierre k- ϵ y k- ω SST. Campaña 3.	77
Figura 4.26.- Acercamiento a la zona de separación y recirculación. Campo medio de la magnitud de velocidad para la simulación en detalle con los modelos de cierre k- ϵ y k- ω SST. Campaña 3.	77
Figura 4.27.- Velocidad longitudinal. Comparación de los resultados de la simulación con los datos experimentales. La progresiva 0 corresponde en la margen izquierda. Los valores positivos de la velocidad son en dirección a la salida del canal.	77
Figura 4.28.- Componente longitudinal del vector velocidad en la sección de aforo para los instantes 3, 18, 62 y 241 segundos. Los valores negativos de indican la dirección principal del flujo, mientras los valores positivos indican recirculación. La progresiva cero corresponde a la margen derecha.	79
Figura 4.29.- Promedio temporal de la componente longitudinal del vector velocidad en la sección de aforo. Comparación de los resultados de los modelos LES, k- ϵ estándar, k- ω SST y resultados reportados por el ADCP.	80
Figura 4.30.- Campos instantáneos de la magnitud de la velocidad para el canal de aforo.	80
Figura 4.31.- Espectro de energía de la componente longitudinal de la velocidad de la serie temporal registrada con ADCP (línea color azul) y obtenida de la simulación con LES (línea color	

rojo).....	81
Figura 4.32.- Espectro de energía de la componente transversal de la velocidad de la serie temporal registrada con ADCP (línea color azul) y obtenida de la simulación con LES (línea color rojo).....	82
Figura 4.33.- Espectro de energía de las fluctuaciones de velocidad en el dominio de la frecuencia, registradas en el centro del canal de aforo en la misma sección de la Pasarela B para las mismas condiciones de la campaña de medición 3.	83
Figura 4.34.- Esquema de alternativas para incorporar deflectores al ingreso del Canal de Aforo..	85
Figura 5.1.- Distribución de las unidades desarenadoras en la Planta de Pre-tratamiento de líquidos cloacales del Bicentenario. 89	
Figura 5.2.- Ejemplo de procesamiento de LSPIV en el canal aforador de la planta del Bicentenario a) imagen instantánea con los 4 Puntos de control visibles al pelo de agua. b) campo de velocidad superficial medio rectificado del sector 2. c) perfil de transversal de velocidad superficial media.	92
Figura 5.3.- Sectores donde se realizaron los trabajos experimentales en la Planta del Bicentenario en Berazategui. También se indica la estación elevadora que define los caudales procesados. ..	92
Figura 5.4.- Canal de entrada de la planta de pre-tratamiento. Secciones de medición con ADCP.	93
Figura 5.5.- Dominio computacional del modelo. Detalle del sector 1 y de la cámara de carga de los tornillos de Arquímedes.....	94
Figura 5.6.- Detalle Sector 1. Zona de ingreso del flujo al canal de aforo. Zona de medición con la técnica LSPIV. Descargar directa al río y canal de salida luego del tratamiento.	96
Figura 5.7.- Señal temporal de la componente longitudinal del vector velocidad superficial para la planta funcionando con 1 tornillo. Se incluye además las fluctuaciones de baja frecuencia presentes en la señal. Medición en el Sector 1.	97
Figura 5.8.- Señal temporal de la componente longitudinal del vector velocidad superficial para la planta funcionando con 2 tornillos. Se incluye además las fluctuaciones de baja frecuencia presentes en la señal. Medición en el Sector 1.	97
Figura 5.9.- Evolución del valor medio de las componentes del vector velocidad para la planta funcionando con 1 tornillo. Línea color rojo: componente longitudinal. Línea color azul: componente transversal. Se indican con líneas de punto los intervalos +/- 5% del valor medio.....	98
Figura 5.10.- Evolución del valor medio de las componentes del vector velocidad para la planta funcionando con 2 tornillo. Línea color rojo: componente longitudinal. Línea color azul: componente transversal. Se indican con líneas de punto los intervalos +/- 5% del valor medio.....	98
Figura 5.11.- Evolución temporal del caudal del flujo en el sector 2 del canal de aforo para las distintas condiciones de flujo determinados por el número de tornillos en funcionamiento.	100
Figura 5.12.- perfil medio de velocidad en la vertical en la sección de aforo del canal (sector 3 en Figura 5.4).	101
Figura 5.13.- Perfiles de velocidad obtenidos con ADCP sobre el sector 2 del canal de entrada. .	101
Figura 5.14.- Comparación perfiles medios de velocidad obtenidos con ADCP (en rojo) y el perfil resultante de la simulación numérica tridimensional (en negro) para el sector 3 del canal de entrada de la planta.	102
Figura 5.15.- Comparación perfiles medios de velocidad obtenidos con ADCP (en colores) y el perfil resultante de la simulación numérica tridimensional (en negro) para el sector 2 del canal de entrada de la planta.	103
Figura 5.16.- Magnitud de la velocidad del flujo a lo largo del canal de aforo y los canales de salida que alimentan los tornillos de arquímedes.	104
Figura 5.17.- Componente longitudinal de la velocidad registrado con ADCP en la zona de ingreso del desarenador 17 mientras la plataforma móvil se desplazaba desde la orilla derecha a la orilla izquierda. Los valores positivos indican el sentido de ingreso al desarenador, las velocidades negativas indican la zona de recirculación. La progresiva cero, indica la orilla derecha, mientras que la máxima indica la orilla izquierda. La profundidad del flujo es de 0.72m.	105
Figura 5.18.- Componente transversal de velocidad registrado con ADCP en la zona de ingreso del desarenador 17 mientras la plataforma móvil se desplazaba desde la orilla derecha a la orilla izquierda. La progresiva cero, indica la orilla derecha, mientras que la máxima indica la orilla izquierda. La profundidad del flujo es de 0.72m.	105
Figura 5.19.- Componente longitudinal de la velocidad registrado con ADCP en la zona de ingreso	

del desarenador 32 mientras la plataforma móvil se desplazaba desde la orilla derecha a la orilla izquierda. Los valores positivos indican el sentido de ingreso al desarenador, las velocidades negativas indican la zona de recirculación. La progresiva cero, indica la orilla derecha, mientras que la máxima indica la orilla izquierda. La profundidad máxima del flujo es de 0.67m mientras que la mínima es de 0.28m. 106

Figura 5.20.- Componente transversal de velocidad registrado con ADCP en la zona de ingreso del desarenador 32 mientras la plataforma móvil se desplazaba desde la orilla derecha a la orilla izquierda. La progresiva cero, indica la orilla derecha, mientras que la máxima indica la orilla izquierda. La profundidad máxima del flujo es de 0.67m mientras que la mínima es de 0.28m. 106

Figura 5.21.- Campo de velocidad medio rectificado en el ingreso del desarenador 32. 107

Figura 5.22.- Líneas de trayectoria de campo de velocidad medio rectificado en el ingreso del desarenador 32. 108

Índice de Tablas

Tabla 2.1.- Características técnicas del Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADP) "RiverSurveyor S5" utilizado..... 17

Tabla 3.1.- Condiciones experimentales evaluadas. 33

Tabla 3.2.- Valores de energía cinética turbulenta k máximos observados experimentalmente y simulados numéricamente en distintas secciones de la planta para las condiciones de flujos presentes en la campaña 1. 47

Tabla 3.3.- Valores de la escala de longitud de Kolmogorov λ_{\min} mínimos observados experimentalmente y simulados numéricamente en distintas secciones de la planta para las condiciones de flujos presentes en la campaña 1..... 47

Tabla 4.1.- Frecuencias a las que operaba cada bomba y los caudales estimados que erogaba el sistema de bombeo de la estación elevadora (dos bombas) durante las tres campañas de medición..... 62

Tabla 4.2.-Principales características de las condiciones experimentales evaluadas y parámetros de configuración de registro del instrumento en cada campaña de medición. 62

Tabla 4.3.- Condiciones de borde del esquema numérico RANS, simpleFoam con modelo de cierre turbulento: a) $k-\epsilon$ estándar; y b) $k-\omega$ SST..... 66

Tabla 4.4.- Comparación de los caudales estimados experimentalmente utilizando ADCP y utilizando la estimación indirecta..... 71

Tabla 4.5.- Valores experimentales y numéricos de los valores medios de las componentes longitudinal y transversal del vector velocidad y la energía cinética turbulenta. 82

Tabla 5.1.- Condiciones experimentales evaluadas y técnicas experimentales in-situ utilizadas. 90

Tabla 5.2.- Condiciones de operación de la planta de pre-tratamiento de acuerdo a lo reportado por el sistema de aforo instalado en el canal de entrada. 93

Tabla 5.3.- Velocidades superficiales medidas (m/s) para las dos condiciones de flujo con LSPIV y el sensor FLODAR..... 99

Tabla 5.4.- Caudales de flujo determinados (m³/h) para las dos condiciones de flujo con LSPIV y el sensor FLODAR..... 99

CAPITULO I: Marco Referencial

1.1.- INTRODUCCIÓN GENERAL

Las grandes ciudades de Argentina, como Buenos Aires y Córdoba, se encuentran entre las regiones con mayor incremento poblacional, con una rápida incorporación de distintas zonas periféricas a la urbanización. Para satisfacer las necesidades de agua potable de una población en continuo crecimiento es necesaria la optimización en los procesos de tratamientos existentes para la potabilización del agua. Esto también aplica al diseño de las partes componentes de plantas de tratamiento de aguas residuales, debido a que su objetivo es eliminar o modificar los contaminantes perjudiciales para la salud humana y proteger al cuerpo receptor de la descarga.

El diseño y evaluación del correcto funcionamiento de este tipo de obras de infraestructura se realiza habitualmente siguiendo criterios definidos en ingeniería sanitaria. Sin embargo, las singularidades hidrodinámicas presentes en el flujo a lo largo del proceso de tratamiento de agua potable y aguas residuales en las distintas componentes de una planta pueden afectar en gran medida su rendimiento, resultando en un funcionamiento no compatible con el previsto en el diseño sanitario.

Para caracterizar y entender la hidrodinámica del flujo en distintas componentes de las plantas de tratamiento y poder proponer soluciones se necesitan herramientas experimentales y numéricas con suficiente resolución espacial y temporal. El diseño basado exclusivamente en criterios definidos por la ingeniería sanitaria, puede generar singularidades hidrodinámicas como inestabilidades de flujo, niveles de turbulencia y fenómenos de recirculación y estancamiento de flujo no compatibles con los procesos físicos esperados (por ejemplo floculación, coagulación, sedimentación). Esto tiene como efecto una menor eficiencia del tratamiento, y una incorrecta caracterización del flujo, incluyendo en algunos casos errores significativos en los sistemas de cuantificación de caudales tratados y en consecuencia en la dosificación para el tratamiento químico del recurso.

1.2.- PROBLEMÁTICA ESPECÍFICA

Los problemas que dan origen a esta tesis y se convierten en su motivación tecnológica han sido identificados en dos plantas de tratamientos de aguas de la ciudad de Córdoba, y una en la ciudad de Berazategui, Provincia de Buenos Aires. Una de ellas es la planta de tratamiento de agua potable (Planta Los Molinos) que la empresa Aguas Cordobesas S.A. opera en cercanías de la localidad de Bouwer (provincia de Córdoba) y que potabiliza el agua para abastecer a aproximadamente un 30 % de la población de la ciudad de Córdoba. Además la ciudad de Córdoba cuenta con una planta de tratamiento de líquidos residuales situada en la zona de Chacra de la Merced, en el extremo este de la ciudad que procesa los líquidos antes de su descarga al cuerpo receptor que es el Río Suquía. En estas plantas se observa patrones de flujos incompatibles con los procesos de tratamiento implementados. Además los patrones hidrodinámicos presentes en las estructuras de aforos de esas plantas dificultan la cuantificación del caudal tratado generando una incertidumbre en la correcta dosificación para el tratamiento químico. Problemáticas similares se

observan en la planta “Bicentenario” de tratamiento de líquidos residuales localizada en Berazategui, Provincia de Buenos Aires que opera la empresa AySA - Agua y Saneamientos Argentinos S.A. Esta planta es una de las obras de infraestructura más importantes que se ha construido en los últimos años en el país en la cual se tratan los líquidos residuales de la población de la ciudad de Buenos Aires y algunos municipios del primer cordón del conurbano bonaerense.

A continuación se sintetiza la problemática particular en cada una de las plantas de tratamiento arriba mencionadas, y las potencialidades de la aplicación de herramientas experimentales y numéricas para la caracterización en detalle del flujo de distintas componentes de esas plantas.

1.2.1.- Planta de tratamiento de agua potable “Los Molinos”

Las componentes que integran la planta de tratamiento de agua potable “Los Molinos” se enumeran a continuación y están identificadas en la Figura 1.1: a) Obra de ingreso o toma; b) Cámara de carga; c) Cámaras de coagulación y floculación; d) Canal de aforo; e) Canal de distribución transversal; f) Decantadores; g) Filtros; h) Tanque elevado; i) Cisternas; j) Estación de control y laboratorio.

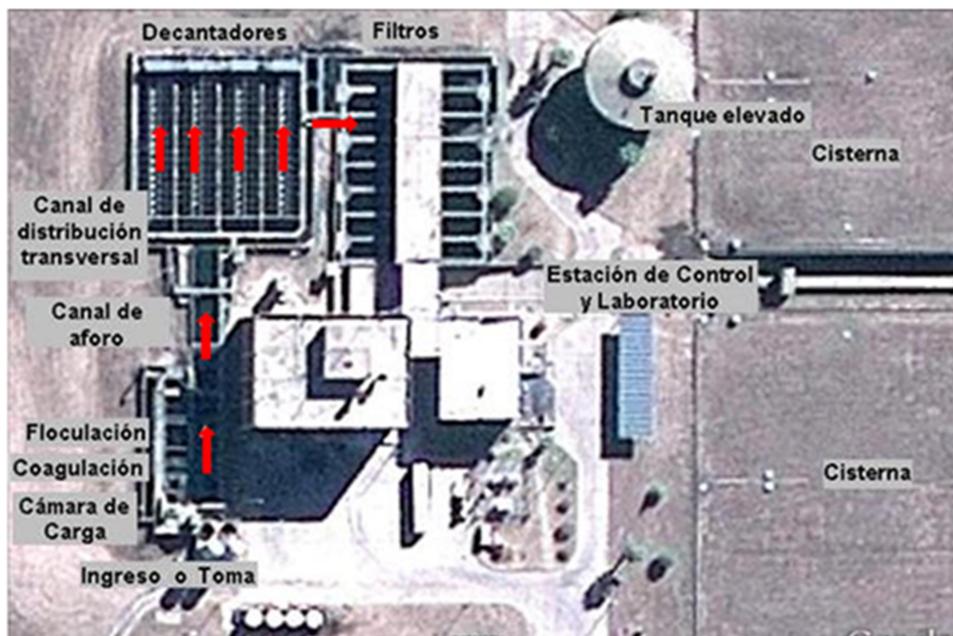


Figura 1.1.- Planta de tratamiento de agua potable “Los Molinos”. Córdoba, Argentina.

Observaciones preliminares sugieren que existen en la zona que incluye al canal de aforo y canal de distribución transversal (ver Figura 1.1 y Figura 1.2), patrones de flujo turbulentos que podrían ser incompatibles para el correcto desarrollo de los procesos de clarificación requeridos en la planta.



Figura 1.2.- Canal de Aforo y Canal de distribución transversal de la Planta de tratamiento de agua potable "Los Molinos". Córdoba, Argentina.

Entre los principales inconvenientes observados en esa zona se pueden mencionar:

a) Elevados niveles de turbulencia en el flujo en los canales de aforo y distribución transversal que podrían afectar al tamaño de las partículas aglutinadas en los procesos de coagulación y floculación previos al proceso de clarificación desarrollado en los decantadores y filtros. Los esfuerzos de cortes turbulentos presentes en el flujo podrían someter a los flóculos a cizallamiento rompiéndolos en partículas de menor tamaño lo que genera menor eficiencia de los decantadores con volúmenes de extracción de sedimentos menores a los previstos en el diseño. La menor eficiencia de los decantadores implicaría que el manto poroso de los filtros ubicados aguas abajo de los decantadores (ver Figura 1.2) se obstruyan en un tiempo mucho más corto lo cual lleva a un lavado más frecuente;

b) La localización asimétrica del canal de aforo con respecto a las unidades de coagulación y floculación existentes produciría una distribución espacial del flujo no homogénea en la sección transversal del canal de aforo;

c) La reducción brusca de la sección del canal de aforo en su transición al canal de distribución transversal (Figura 1.2) genera zonas de recirculación, que reducen la sección de paso efectiva del flujo;

d) Diferentes dimensiones de los canales de distribución transversal de margen derecha e izquierda podría generar una distribución no homogénea de los caudales en las unidades de decantación;

e) La disposición asimétrica de las compuertas de ingreso a los decantadores podría generar una distribución no homogénea de los caudales en cada unidad

de decantación.

Es necesario cuantificar los efectos de los inconvenientes citados anteriormente, utilizando en forma conjunta herramientas experimentales y numéricas disponibles en el estado del arte. Es decir una caracterización hidrodinámica detallada, para distintas condiciones de funcionamiento de la planta. La información obtenida de esta caracterización será la base para diseñar modificaciones y evaluar alternativas de operación para optimizar el funcionamiento de la planta: en la zona de ingreso de caudales al proceso de clarificación que incluye al canal de aforo y canal de distribución transversal.

1.2.2.- Planta de tratamiento de aguas residuales “Bajo Grande”

Uno de los inconvenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales “Bajo Grande” (o Estación Depuradora de Aguas Residuales, Edar) es que existen en el canal de aforo patrones hidrodinámicos que pueden generar gran incertidumbre en la cuantificación de los caudales procesados. Esto es relevante para evaluar la capacidad operativa y definir el rango de operación óptimo de la planta, condiciones que debe contemplar el diseño hidráulico. Además, la falta de un sistema de aforo no permite evaluar los potenciales efectos de la descarga sobre el cuerpo de agua receptor, objetivo principal del sistema de tratamiento.

En las evaluaciones preliminares realizadas se observó en la sección de aforo de la planta una fuerte recirculación del flujo sobre la margen izquierda, producto de una separación inducida por un cambio de curvatura abrupto (curva a 180°) a la entrada del Canal de Aforo (Figura 1.3 y Figura 1.4). En la Figura 1.5 se puede apreciar el sensor de nivel instalado en el canal de aforo.



Figura 1.3.- Canal de Aforo a la salida de la planta de tratamiento de aguas residuales "Bajo Grande", Córdoba, Argentina.

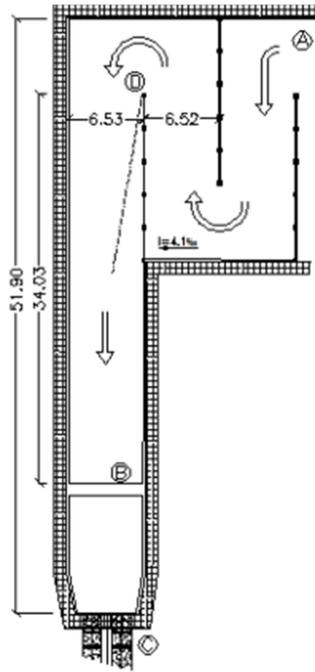


Figura 1.4.- Esquema y dimensiones (en metros) del Canal de Aforo a la salida de la planta de tratamiento de aguas residuales "Bajo Grande", Córdoba, Argentina.



Figura 1.5.- Sensor de nivel instalado en el canal de aforo de la planta de tratamiento de aguas residuales "Bajo Grande".

El fenómeno de recirculación se extiende a lo largo de Canal de Aforo y afecta el área efectiva de flujo del mismo. Es importante decir que observaciones preliminares muestran que la capa de corte que limita la zona de recirculación tiene importantes fluctuaciones de baja frecuencia. Por esta razón, es necesaria una caracterización hidrodinámica del flujo turbulento utilizando en forma conjunta herramientas experimentales y numéricas disponibles en el estado del arte.

1.2.3.- Planta "Bicentenario" de tratamiento de aguas residuales

Ubicada en la ciudad de Berazategui, Provincia de Buenos Aires, la planta "Bicentenario" de tratamiento de aguas residuales es una de la más grandes y modernas de Latinoamérica con capacidad de procesar caudales superiores a

los 30m³/s. Actualmente, presenta dificultades en el sistema de aforo ubicado en el ingreso del flujo al tratamiento. La



Figura 1.6 muestra la ubicación del canal de entrada de la planta del "Bicentenario". Este canal de entrada tiene dos sectores: el sector 1 se encuentra en el ingreso a la planta donde el flujo realiza una curva en 90°, y luego de la curva el flujo ingresa al sector 2 un canal recto de 100m, en el cual está instalado un sensor acústico para determinar la velocidad media superficial del flujo y estimar el caudal de ingreso a la planta de tratamiento.



Figura 1.6.- Canal de ingreso y Canal de Aforo de la planta de tratamiento de aguas residuales "Bicentenario", Berazategui, Argentina.

La curva a 90° del sector 1 genera una zona de recirculación e inestabilidades en

el flujo que viajan aguas abajo a lo largo del canal recto de 100m del sector 2. El sensor acústico por momentos reporta velocidades negativas indicando la presencia de una zona de recirculación por lo que la sección efectiva de flujo se ve reducida. Además, el canal tiene una sección rectangular con una profundidad importante que genera flujos con bajo números de Froude, lo que puede inducir a que las inestabilidades y zonas de recirculación sean importantes. Por las problemáticas mencionadas, es necesario una detallada caracterización hidrodinámica del comportamiento del flujo utilizando en forma conjunta herramientas experimentales y numéricas disponibles en el estado del arte para: a) validar el sistema de monitoreo de caudales instalado en el canal de ingreso de la planta; y b) cuantificar los efectos del flujo no uniforme al ingreso de los decantadores, y proponer alternativas que permitan optimizar el funcionamiento de los mismos.

1.3.- ANTECEDENTES

En los últimos 10 años se han desarrollado a nivel mundial estudios específicos y tecnología dedicados a optimizar los procesos de tratamiento de agua y aguas residuales, a partir de la caracterización experimental in-situ. El uso de Velocímetros Acústicos Doppler (ADV, por sus siglas en inglés), y Perfiladores de Corriente Acústico Doppler (ADCP, por sus siglas en inglés) comienza a ser relevante en esta área de estudio en los últimos años. Vanrolleghem et al. (2006) han utilizado un ADCP para caracterizar el flujo en un sedimentador secundario. Su contribución se enfoca en procesos claves: la hidrodinámica, la agregación de partículas y la rotura de flóculos. García (2006) ofrece un conjunto detallado de datos experimentales registrados con ADV, para cuantificar la turbulencia del flujo y la mezcla inducida por plumas de burbujas en reservorios que reciben agua servida en condiciones de no estratificación. En su trabajo Kiss y Patziger (2013), mediante una caracterización in situ, apuntan a una comprensión más profunda de los patrones de flujo en un tanque de sedimentación primaria de una planta de tratamiento de aguas residuales, realizando mediciones con un ADV.

En la actualidad la implementación de la técnica de velocimetría por imágenes digitales a gran escala tiene un importante desarrollo. Esta técnica ha sido implementada con éxito para la caracterización de flujos turbulentos en grandes instalaciones experimentales de laboratorio (por ejemplo en modelos físicos, Patalano y Garcia, 2016) y en curvas fluviales (Patalano et al. 2014).

Por otro lado, los modelos de simulación numérica utilizados en la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) pueden servir para mejorar el conocimiento de los procesos hidrodinámicos presentes en las plantas de tratamiento de agua y aguas residuales. Este conocimiento puede ser utilizado además en el proceso de optimización del diseño. Esto hace a la rentabilidad de un modelo CFD validado (a partir de la caracterización experimental in-situ) donde los resultados de la simulación pueden ser vistos como experimentos numéricos y reemplazar en parte los experimentos de campo de mayor costo (Huggins et al. 2005).

En los últimos años se ha extendido el uso de modelos numéricos para simular el flujo en tanques sedimentadores (o clarificadores) con el objetivo de mejorar su eficiencia en el tratamiento de aguas residuales y la potabilización de agua. Cabe mencionar que diversos estudios se focalizan en la posición y el tamaño de deflectores y sus efectos en el flujo y el comportamiento hidráulico de los tanques de sedimentación. En su mayoría remarcan la importancia de las condiciones de ingreso del flujo a los tanques sedimentadores/clarificadores para disipar la mayor cantidad posible de energía y disminuir la zona afectada por la recirculación. En este marco, el diseño de la planta en la zona previa al ingreso a los tanques cobra vital importancia no solo para evitar producir valores de energía cinética turbulenta incompatibles con el proceso de sedimentación, sino también para lograr un ingreso del flujo al tanque lo menos turbulento posible.

Simulaciones con CFD se utilizaron también para analizar el transporte de sedimentos para múltiples tamaños de sedimentos y estimar la eficiencia de remoción de sólidos en un tanque circular (Huggins et al. 2004). Fan et al. (2007), estudió la dinámica del flujo en un tanque sedimentador secundario y modeló las fases líquido y sólido en el tanque con un modelo tridimensional para flujo turbulento. Goula et al. (2008) realizó una simulación bidimensional de un tanque decantador de una planta de tratamiento de agua potable, con el objetivo de ajustar el diseño del deflector de entrada y disminuir la zona afectada por la recirculación del flujo en el tanque, y mejorar la eficiencia de remoción de flóculos. En su trabajo Goula et al. (2008) concluyen que CFD puede ser una poderosa herramienta para la resolución de problemas, en particular los relacionados con los patrones de flujo en un tanque sedimentador. Al-Sammaraee y Chan (2009) utilizan la simulación de grande vórtices (LES) en tanques decantadores longitudinales de una planta de tratamiento de agua potable, para estudiar el efecto que causan deflectores sobre la eficiencia de remoción de sólidos, y buscan establecer criterios específicos de diseño para proporcionar guías de diseño a los ingenieros. Shahrokhi et al (2011), investigó, utilizando herramientas numéricas, los efectos en el flujo de distintas ubicaciones de un deflector. Los resultados muestran que la correcta instalación de un deflector mejora la eficiencia del tanque de sedimentación, ya que el deflector actúa como una barrera, suprimiendo de manera efectiva las velocidades horizontales del flujo y reduciendo el tamaño de las zonas muertas. Luffy et al. (2015) indicaron que el diseño de las estructuras de entrada y salida en los sedimentadores es una cuestión fundamental para optimizar, ya que esto permite disminuir zonas muertas y mejorar la distribución del perfil de velocidad en el interior del tanque. Con este objetivo realiza una serie de simulaciones tridimensionales del flujo en un tanque rectangular para estudiar la mejora en la eficiencia por el uso de una batería de difusores como deflector a la entrada. Zhang (2014) estudió diferentes configuraciones de un deflector rectangular a la entrada, y demostró que la recirculación siempre existe en tanques de sedimentación. La recirculación ocupa una parte del volumen de sedimentación efectiva, de modo que el tanque de sedimentación tendrá menos volumen para la decantación y se reduce su eficiencia.

Utilizando en forma conjunta herramientas numéricas y experimentales, De Clercq

et al. (2002), presenta una caracterización del flujo en sedimentadores de dos plantas de tratamiento de aguas residuales. La etapa experimental se desarrolló a partir de mediciones realizadas con un ADCP. En su trabajo indica que aunque la medición de la velocidad media es fundamental para entender el comportamiento hidráulico, el cálculo de los esfuerzos de Reynolds podría ser interesante en el estudio de la transferencia de momentum. Para esto último se apoya en los trabajos de Lohrmann et al. (1990) y Gargett (1994) que han descrito técnicas matemáticas necesarias para calcular las tensiones y la energía cinética a partir de los datos de ADCP. Las velocidades registradas se utilizaron para la validación de modelos numéricos. En su trabajo concluye que procesos hidráulicos no deseados en clarificadores pueden ser perjudiciales en su eficiencia para eliminar los sólidos, y que las herramientas CFD deben incorporarse en el proceso de diseño y equipamiento, por lo que la validación y calibración del modelo es crucial. Por último, indica que estudiar los efectos de la turbulencia en tanques sedimentadores todavía requiere una gran cantidad de trabajo futuro. Dufresne et al. (2009) investiga el uso de CFD para estudiar la dinámica del flujo, sedimentación y separación de sólidos en tanques que reciben el agua de la red cloacal y pluvial. En su trabajo validaron un modelo numérico en base a mediciones realizadas en treinta y tres experimentos a escala de laboratorio. La simulación fue de tipo tridimensional, basado en las RANS, para describir las variables características del flujo: las tres componentes del vector velocidad, presión, energía cinética turbulenta y tasa de disipación de esa energía. Un modelo no acoplado fue utilizado para describir el comportamiento de la carga de contaminante. Razmi et al. (2009) realizaron un trabajo experimental y numérico para estudiar los efectos de un deflector en distintas zonas de un tanque sedimentador. Sus resultados permiten optimizar la localización del deflector, el cual puede reducir el tamaño de las zonas muertas y la energía cinética turbulenta en comparación con la condición del tanque sin deflector.

Heydari y Mehrzadegan (2014), presentan una revisión de trabajos experimentales y numéricos que estudian los efectos de los deflectores sobre la hidrodinámica del flujo en tanques sedimentadores y realizan recomendaciones. Entre las conclusiones remarca la necesidad de continuar estudiando el proceso (con herramientas experimentales y numéricas) de manera integral para lograr criterios de diseño alrededor del número de Reynolds.

1.4.- ÁREAS DE VACANCIA CIENTÍFICO-TECNOLÓGICA

Para asegurar la caracterización detallada de los flujos turbulentos requerida para cumplimentar la motivación tecnológica mencionada anteriormente, varios aspectos deben ser abordados que requieren investigación científica ya que se observaron áreas de vacancia en la revisión de antecedentes realizada.

En primer lugar es necesario optimizar las técnicas experimentales disponibles en el estado del arte (incluyendo la definición del instrumental, actividades requeridas en las etapas de configuración de las actividades experimentales, de registro de datos, y de pos-procesamiento de la información) para caracterizar

flujos turbulentos en componentes hidráulicas de las plantas de tratamiento. La caracterización experimental del flujo turbulento en las componentes de las plantas de tratamiento seleccionadas es complicada debido a las importantes variaciones espaciales y temporales en los flujos tridimensionales presentes. Por esto, se requieren instrumentos con altas resoluciones espaciales y temporales a los fines de obtener los parámetros característicos del flujo que permitan evaluar no solo los perfiles de velocidad media, las áreas de recirculación y estancamiento de flujo, sino también obtener los parámetros característicos de la turbulencia en el flujo. No hay antecedentes a nivel local, regional y nacional de estudios similares sobre este tema.

Además, nuevas técnicas basadas en el análisis de imágenes digitales está siendo desarrollada e implementada a nivel mundial para mediciones a gran escala en sistema fluviales (Patalano y Garcia, 2016, Patalano et al. 2014), pero no han sido implementadas aún para caracterizar flujos en componentes de plantas de tratamiento de agua y aguas residuales.

En segundo lugar, si bien simulaciones numéricas se han implementado en los últimos años para caracterizar la hidrodinámica del flujo en componentes de plantas de tratamiento, es importante que los modelos numéricos utilizados sean validados y calibrados en escala de prototipo. Luego, ese modelo validado puede ser utilizado en el proceso de diseño y optimización de plantas de tratamiento de agua y aguas residuales.

Generalmente, para simular el flujo en prototipo de instalaciones hidráulicas de gran escala se implementan modelos numéricos con baja resolución espacial (en algunos casos integrando los resultados en la dirección vertical – realizando una simulación bidimensional) focalizándose en la mayoría de los casos en la resolución de los parámetros medios del flujo. El avance de la capacidad de cálculo en los últimos años, hace de la simulación numérica tridimensional en la actualidad una de las principales herramientas para el cálculo en la ingeniería hidráulica, dado que permite caracterizar procesos (por ejemplo turbulencia) cuyo estudio no era posible pocas décadas atrás y, además, a lo largo de su desarrollo ha probado ser un método eficaz, preciso, robusto y sumamente flexible. En este marco una alternativa disponible para abordar la caracterización tridimensional del flujo turbulento es la simulación numérica en detalle a escala de prototipo.

Por último, utilizando los resultados de la caracterización experimental y numérica se requiere avanzar en el conocimiento acerca de la presencia y los efectos de las estructuras turbulentas tridimensionales e inestabilidades de flujo en canales de aforo, canales de distribución y zonas de ingreso a los procesos de clarificación del agua. Además, es importante evaluar en qué medida las inestabilidades del flujo generan incertidumbre en la cuantificación de caudales, y cómo la turbulencia del flujo de aproximación afecta la eficiencia de los procesos de clarificación del agua. Una comprensión científica-tecnológica más profunda permitirá abordar posibles soluciones a las problemáticas.

1.5.- OBJETIVO

El objetivo general de esta tesis es la caracterización hidrodinámica detallada del flujo en componentes hidráulicas de plantas existentes de tratamiento de aguas en escala de prototipo para optimizar sus funcionamientos, a través del uso in-situ de técnicas experimentales de alta resolución espacial y temporal optimizadas para ser usadas en estas instalaciones, y de la simulación numérica en detalle del flujo turbulento realizada con los modelos calibrados y validados. A los fines de cumplir con este objetivo se proponen los siguientes objetivos específicos:

- a) Optimizar las técnicas experimentales disponibles en el estado del arte en componentes hidráulicas de plantas de tratamiento. Además, se define como objetivo la implementación de las Técnicas de Velocimetría por Imágenes de Partículas y Seguimiento de Partículas a gran escala (LSPIV y LSPTV, por sus siglas en inglés) en plantas de tratamiento.
- b) Implementar, validar y calibrar modelos numéricos para simular la hidrodinámica tridimensional del flujo turbulento en distintas componentes de plantas de tratamiento.
- c) Avanzar en el conocimiento acerca de la presencia y los efectos de estructuras turbulentas e inestabilidades de flujo en componentes de plantas de tratamiento elaborando recomendaciones para optimizar su funcionamiento.

Estos objetivos generales y específicos son desarrollados para componentes de las plantas de tratamiento donde se originó la motivación tecnológica de estas tesis:

- ❖ Zona previa al proceso de clarificación de la planta de tratamiento de agua potable “Los Molinos” de la ciudad de Córdoba.
- ❖ Canal de aforo de la planta de tratamiento de aguas residuales “Bajo Grande” de la ciudad Córdoba.
- ❖ Canal de aforo e ingreso a los sedimentadores de la planta de tratamiento de aguas residuales “Bicentenario” de Berazategui.

1.6.- METODOLOGÍA

En esta tesis se destina el capítulo 2 a describir las técnicas experimentales y herramientas numéricas utilizadas. En la primera parte del capítulo se detallan las técnicas experimentales de alta resolución espacial y temporal utilizadas, se incluye la definición de la metodología óptima para su implementación en cada planta, las acciones requeridas durante las etapas de configuración del experimento y de registro y procesamiento de los datos. En la segunda parte del capítulo, se describe cada esquema numérico computacional utilizado para simular el flujo turbulento tridimensional en las componentes de la planta de tratamiento detallando el modelo matemático y el modelo numérico seleccionado para resolver las ecuaciones que describen el proceso.

En los capítulos siguientes (capítulos 3, 4 y 5) se describe el trabajo desarrollado en cada planta para lograr cada objetivo específico. Es este marco, en el capítulo 2 se detalla el trabajo realizado en la planta de tratamiento agua potable “Los Molinos” de la ciudad de Córdoba. En el capítulo 3 se describe el estudio para

diagnosticar la problemática de la planta de tratamiento de aguas residuales "Bajo Grande" de la ciudad Córdoba. Por último, en el capítulo 4 se describe el trabajo realizado sobre la planta de tratamiento de aguas residuales "Bicentenario" de Berazategui.

La estructura de los capítulos 3, 4 y 5 es similar, en la que se detalla el cumplimiento de cada uno de los objetivos específicos en cada planta. En la primera parte se describen la instalación y las condiciones experimentales analizadas. Luego se describe el dominio computacional (justificando las dimensiones de los volúmenes finitos que forman la malla) y las condiciones iniciales y de borde implementadas. A continuación, se presentan los resultados del análisis experimental realizado para cada una de las condiciones de flujo analizadas. Se caracteriza la evolución espacial de parámetros medios del flujo y parámetros que cuantifican la turbulencia evaluando regiones críticas como zonas de separación y recirculación, reducción de la sección efectiva del flujo, flujo a través de compuertas, entre otros. Los resultados de la caracterización experimental in-situ se complementa con los resultados de las simulaciones numéricas del flujo turbulento y se finalmente se valida el modelo computacional. Luego, se utiliza el modelo numérico para simular distintas condiciones de flujo (simulando distintas operaciones de mantenimiento) que puedan ser usadas para optimizar los procesos de tratamiento.

En el capítulo 6, se realiza una recapitulación de las conclusiones y recomendaciones logradas en cada trabajo, con el fin de sintetizar las potencialidades del uso complementario de técnicas experimentales y herramientas numéricas de detalle para lograr avances en el conocimiento de los patrones hidrodinámicos en el flujo en componentes hidráulicas de plantas existentes de tratamiento de aguas en escala de prototipo para optimizar sus funcionamientos.

CAPÍTULO II: Técnicas experimentales y simulaciones numéricas

2.1.- INTRODUCCIÓN

La caracterización experimental del flujo turbulento en componentes hidráulicas de planta de tratamiento de agua y agua residual es complicada debido a las importantes variaciones espaciales y temporales presentes en los patrones de flujo. Las escalas espacial y temporal características de las estructuras turbulentas más grandes que se esperan estén presentes en el flujo de las componentes hidráulicas de las plantas de tratamiento aquí analizadas son del orden del metro y el segundo, respectivamente, mientras que las escalas más pequeñas son del orden del milímetro y fracciones de segundos.

El amplio rango de escalas hace necesario el uso de técnicas de medición que se puedan aplicar a grandes instalaciones experimentales pero que a su vez presenten altas resoluciones espaciales y temporales a los fines de obtener los parámetros característicos del flujo (velocidades medias, fluctuaciones turbulentas, escalas características del problema, etc.). Este mismo criterio se aplica a herramientas numéricas que puedan representar en detalle la hidrodinámica del flujo turbulento a escala de prototipo.

En la primera parte de este capítulo se describen las técnicas experimentales utilizadas, la metodología utilizada para su implementación, las acciones requeridas durante las etapas de configuración del experimento y de registro y procesamiento de los datos. En la segunda parte del capítulo, se describen los esquemas numéricos utilizados, los modelos matemáticos y el modelo numérico seleccionado para resolver las ecuaciones que describen el proceso.

2.2.- TÉCNICAS EXPERIMENTALES

En esta tesis se utilizaron técnicas avanzadas de velocimetría que presentan características complementarias: un Velocímetro Acústico Doppler, un Perfilador de Corriente Acústico Doppler y la técnica de Velocimetría por Seguimiento de Partículas e Imágenes de Partículas a Gran Escala (ADV, ADCP y LSPTV/PIV, respectivamente por sus en inglés). A continuación se describen las técnicas experimentales.

2.2.1.- Velocímetro Acústico Doppler (ADV)

El ADV es un instrumento versátil de alta precisión utilizado para medir las tres componentes del vector de velocidad del agua. Específicamente el instrumento utilizado en esta tesis es un Micro ADV YSI Sontek de 16 MHz de frecuencia acústica, con una configuración "downlooking" y un volumen de medición de aproximadamente $0,1 \text{ cm}^3$ (Figura 2.1). Este instrumento utiliza la tecnología Doppler para medir velocidades de flujos en un pequeño volumen de medición localizado a 5 cm del instrumento. El rango de velocidad que el instrumento es capaz de monitorear es programable por el usuario, y varía desde ± 3 a $\pm 250 \text{ cm/s}$. Los datos pueden ser adquiridos con frecuencias de registro de hasta 50 Hz. Mediciones preliminares indicaron que las condiciones experimentales (niveles de partículas en suspensión) resultan adecuadas para el uso de tecnología acústica. Diversos artículos técnicos y científicos fueron publicados en los últimos quince

años evaluando la capacidad del ADV para caracterizar experimentalmente la turbulencia en flujos. Estos estudios están relacionados principalmente a la resolución temporal del instrumento como así también con los niveles de ruido Doppler presentes en las señales registradas con ADV (García et al., 2005).



Figura 2.1.- Velocímetro Acústico Doppler Micro ADV YSI Sontek de 16 MHz de frecuencia acústica utilizado en la caracterización experimental.

2.2.2.- Perfilado de Corriente Acústico Doppler

Los ADCP registran perfiles verticales de las tres componentes del vector de velocidad del flujo y son ampliamente utilizados para la caracterización de flujos turbulentos (mediciones de caudal y velocidad de flujo) en sistemas fluviales, canales artificiales y estuarios (Oberg et al., 2005, Oberg y Mueller, 2007 y Mueller y Wagner, 2009). El ADCP contribuyendo a una mejor caracterización de la dinámica fluvial y de los procesos hidrodinámicos asociados. Este tipo de tecnología permite realizar mediciones precisas de caudales y caracterizar el flujo medio. Además, el ADCP cuenta con una alta resolución temporal y espacial del campo tridimensional del flujo adquiriendo información que no es posible obtener por medio de métodos convencionales (por ejemplo molinetes). Así, este sistema permite caracterizar e identificar las estructuras coherentes tridimensionales en flujos naturales desde una plataforma estacionaria o en movimiento (Lipscomb, 1995).

El ADCP utilizado en esta tesis es un River Surveyour S5 YSI/Sontek (disponibles desde 2010, ver Figura 2.2) para aguas poco profundas que incluye un algoritmo "SmartPulse" el cual, en base a la profundidad, velocidad y niveles de turbulencia del flujo, adapta el esquema de pulso acústico para esas condiciones con el fin de proveer la máxima resolución de datos de velocidad, con tamaños de celda tan pequeños como 2cm. La frecuencia de registro de los perfiles de velocidad de flujo es de 1Hz. Las características técnicas de este instrumento se presentan en la Tabla 2.1.



Figura 2.2.- Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADP) "RiverSurveyor S5" utilizado en la caracterización experimental.

Tabla 2.1.- Características técnicas del Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADP) "RiverSurveyor S5" utilizado.

Medición de velocidad	
Rango de profundidad	0.06m a 5m
Rango de velocidad	+/- 20m/s
Precisión	Hasta +/- 0.25% de la medida
Tamaño de la celda	0.02m a 0.5m
Configuración del Transductor	5 transductores. 4 haces de 3 MHz. Configuración Janus inclinada a 25°. 1 haz vertical de 1MHz
Medición de profundidad	
Rango de profundidad [m]	0.20m a 15m
Precisión	1%

Además se utilizaron las guías y protocolos para la medición desarrollados por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) que utiliza estos instrumentos desde la década del 90.

2.2.3.- Velocimetría por Imágenes de Partículas y Seguimiento de Partículas a Gran Escala (LSPIV/PTV)

La velocimetría por seguimiento de partículas es una de las técnicas más recientes que permite determinar el campo de velocidad del flujo de manera no intrusiva (sin alterar el flujo) y de manera instantánea con un alto grado de resolución espacial a partir del desplazamiento de partículas debido al flujo. Los métodos conocidos basados en esta técnica son la velocimetría por imágenes de partículas (PIV, por sus siglas en ingles), y la velocimetría por seguimiento de

partículas de partículas (PTV, por sus siglas en inglés).

La diferencia entre ambas técnicas de velocimetría está en la forma en la que cada una detecta el desplazamiento de las partículas. La técnica PIV consiste en un análisis euleriano, es decir que estudia los cambios producidos en una superficie de control. Mientras que la técnica PTV analiza el flujo con un enfoque lagrangiano: detecta la posición de las partículas trazadoras en dos instantes diferentes y determina el desplazamiento y la velocidad de las partículas en función del tiempo entre imágenes consecutivas. El resultado de ambas técnicas es una imagen base con vectores que caracterizan el sentido y magnitud de la velocidad promedio de todas las imágenes.

La técnica 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 es posible conocer las velocidades en un plano que se puede materializar con un láser o una luz coherente en la superficie, en la que se siembran partículas de densidad menor al fluido.

Una suposición básica de ambas técnicas es que las partículas son capaces de seguir el movimiento del fluido, lo que es real dependiendo de las características de las partículas empleadas. Para comprender el efecto de las partículas sobre las mediciones se debe asumir que cada partícula funciona como un filtro en el flujo turbulento. El flujo contiene una serie de vórtices de distintos tamaños, los cuales contienen distintos niveles de energía. Los vórtices de grandes dimensiones (alta energía) están asociados a frecuencias bajas, mientras que los vórtices pequeños están asociados a frecuencias altas (baja energía). La partícula es un filtro que responde a un cierto nivel mínimo de energía. Por lo tanto, la dinámica de todas las frecuencias mayores a la frecuencia asociada a ese nivel de energía, no pueden ser capturadas por medio de este método de medición. En general la dinámica de todas las frecuencias bajas (grandes vórtices) puede ser capturada sin problemas y para obtener información de los pequeños vórtices, se deben usar partículas de diámetros muy pequeños (y baja inercia), lo cual trae algunas restricciones respecto al tamaño del área de flujo que se puede muestrear.

La dificultad 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. Además, otra dificultad se presenta ante la imposibilidad de que el eje perpendicular a la lente de la cámara y el plano de la superficie de medición formen un ángulo recto. En este caso es necesario utilizar técnicas de rectificación de imágenes para evitar distorsiones en los resultados.

2.2.3.1.- Instrumental requerido

A continuación se detallan los elementos necesarios para llevar a cabo la implementación de la técnica PTV (ver Figura 2.3):

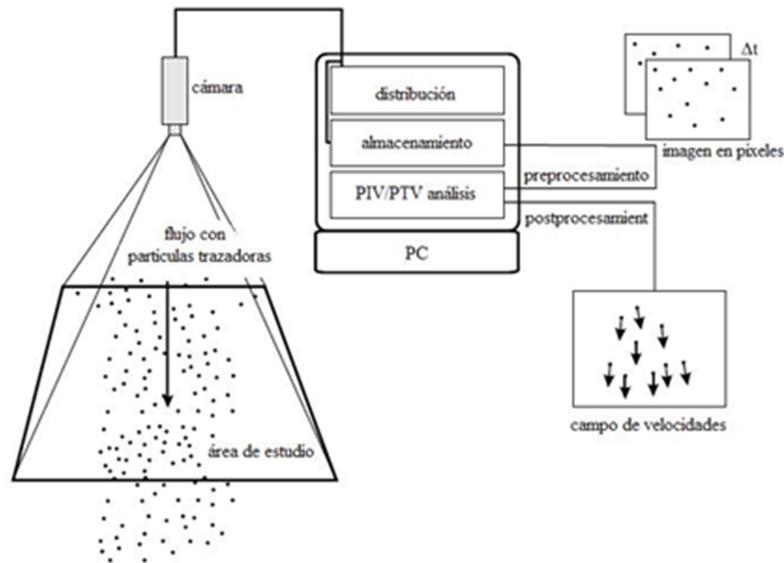


Figura 2.3.- Esquema de la técnica PTV (Weitbrecht, 2007).

a) Soporte: Es necesaria una estructura de soporte para instalar la cámara (trípode). La principal ventaja de este soporte yace en que la lente permanece en una posición fija y además simplifica el conocimiento de la posición de la cámara en el espacio (coordenadas x,y,z). Es conveniente que el ángulo entre el eje perpendicular a la lente y el plano de la superficie a filmar sea 90° , esto evita que se distorsione el valor de desplazamiento de la partícula. En caso que fuera técnicamente imposible lograr un ángulo recto entre el eje perpendicular a la lente y el plano de la superficie de medición, es necesario rectificar las imágenes capturadas (ver Figura 2.4).

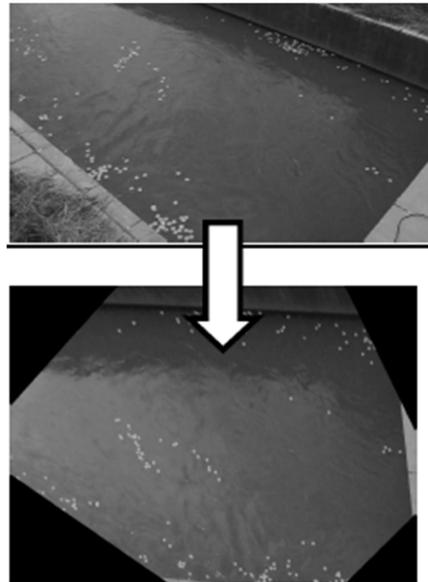


Figura 2.4.- Imagen rectifica del canal de aforo de la planta depuradora de aguas residuales "Bajo Grande".

b) Cámara Digital: Con una resolución de video (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 captura de imágenes acorde con la velocidad del fluido, al área de medición y tamaño de las partículas.

c) 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 resultados adecuados con el algoritmo de identificación de las partículas.

d) Puntos de Referencia: Para obtener el desplazamiento real de la partícula y su velocidad es fundamental disponer de un sistema de referencia que permita establecer la equivalencia entre la distancia en pixeles sobre la imagen y la distancia en metros en prototipo. En ambientes controlados, como un laboratorio o instalaciones experimentales, se puede usar una placa graduada o grilla para obtener una correspondencia entre el tamaño del pixel en la imagen y la distancia real (ver Figura 2.5). En canales de dimensiones menores se puede utilizar una mira topográfica graduada.

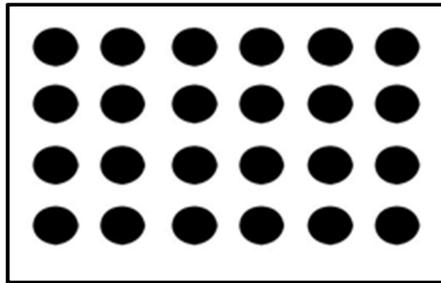


Figura 2.5.- Esquema de una grilla de dimensiones conocidas.

e) Partículas: Las características a tener en cuenta en la selección de las partículas se desarrollan a continuación:

Forma: es conveniente una forma uniforme para el fácil reconocimiento de las partículas. La forma aproximadamente circular es la ideal.

Densidad: las partículas deben flotar en el agua pero, tener la densidad suficiente para no ser arrastradas por agentes externos como el viento.

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. Se recomienda que las partículas tenga un tamaño de 3 a 4 pixeles para ser detectadas por el algoritmo de detección.

Visibilidad: deben ser perfectamente visibles, con color uniforme, que contraste con el fondo y fluorescentes o refractivas.

Material: un problema que presentan las partículas sembradas es la tendencia a formar aglomeraciones debido a la fuerza de la tensión

superficial del fluido. Por ello es importante la elección del material que en conjunto con el tamaño de las partículas permita que las fuerzas inerciales prevalezcan por sobre las de tensión superficial.

Dispositivo para sembrado de partículas: una distribución homogénea y una buena densidad de partículas dispersas en la superficie del flujo son necesarias para obtener 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. Además, la técnica PTV no logra buenos resultados en los casos en que el sembrado de partículas es muy denso, ya que la distribución de partículas son muy similares entre sí.

2.2.3.2.- Programa de análisis de imágenes digitales

Para el análisis de las imágenes se utilizó el programa PTVlab desarrollado en Matlab por Patalano et al, (2013). El programa realiza el pre-procesamiento, detección de partículas, determinación por correlación cruzada, aplica filtros y realiza el post-procesamiento de forma muy sencilla gracias a su interfaz gráfica (ver Figura 2.6).

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 invíscido (es decir, sin fricción) alrededor de un cilindro, y usando imágenes estándar.

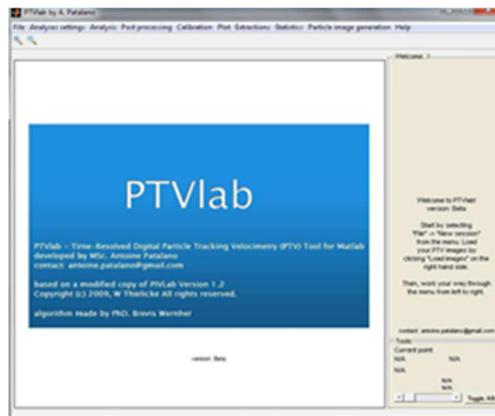


Figura 2.6.- Interfaz gráfica del programa PTVlab (Patalano et al. 2013).

El algoritmo se divide básicamente en 4 etapas principales (ver Figura 2.7):

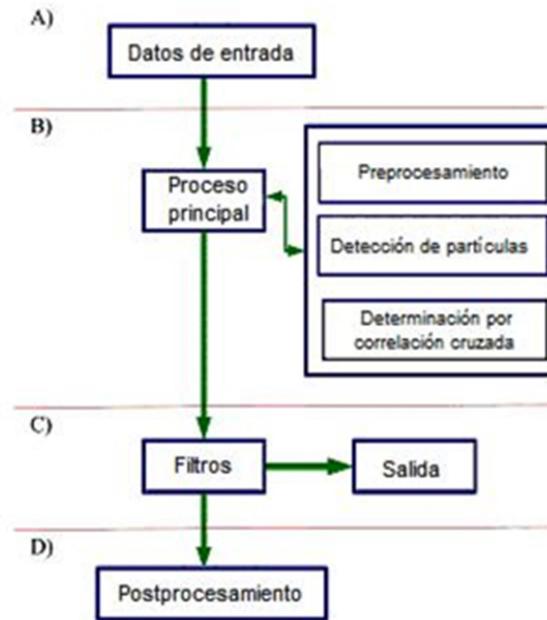


Figura 2.7.- Esquema del algoritmo del PTVlab.

- a) Datos de entrada (imágenes, coeficientes de correlación mínimos permitidos, tamaños de las ventanas de interrogación, etc.)
- b) Proceso principal. En esta etapa, se realiza el pre-procesamiento de la imagen (eliminación ruido, mejoramiento de imágenes, etc.), la detección de las partículas y la aplicación de la técnica de correlación para determinar el vector velocidad correspondiente a cada partícula.
- c) Aplicación de filtros y salida de datos.
- d) Post-procesamiento de los datos de salida, los cuales pueden ser utilizados para generar gráficos de campo de velocidad media, vorticidad, líneas de corriente, secuencias de imágenes, entre otros.

2.3.- SIMULACIONES NUMÉRICAS (CFD)

El desarrollo de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) cuenta en la actualidad principalmente con tres enfoques para resolver problemas que involucran flujos turbulentos. Por un lado, los modelos de la turbulencia más utilizados se basan en las Ecuaciones de Navier-Stokes promediadas según Reynolds (RANS) y por otro, dos alternativas que logran una mayor exactitud en la descripción de la turbulencias, a saber, la Simulación de los Grande Vórtices y la Simulación Numérica Directa (LES y DNS, respectivamente por sus siglas en inglés). Estas últimas han ganado terreno en la caracterización del flujo turbulento en los últimos años, debido al gran desarrollo de la capacidad de cálculo computacional.

En este marco es posible pensar LES como una alternativa entre dos extremos de

CFD, RANS resolviendo el flujo medio y con un relativo bajo costo computacional y DNS que resuelve todas las escalas (espaciales y temporales) de la turbulencia, pero con tal alto costo computacional que solo es viable para geometrías simples o para el estudio de los fundamentos de la turbulencia. En cambio LES tiene como principal objetivo resolver las escalas turbulentas más grandes presentes en el flujo que son afectadas por la geometría y las paredes, y modelar las escalas más pequeñas de la turbulencia. Por esta razón, LES ofrece un incremento sustancial en exactitud comparado con RANS especialmente cuando los procesos de transferencia de momento están dominados por las estructuras turbulentas más grandes (Rogallo y Moin, 1984) a un costo computacional mucho menor que DNS. Además, dada la relativamente alta resolución espacial y temporal requerida, LES ofrece una gran cantidad de información sobre el campo de flujo medio e instantáneo.

En las dos secciones a continuación se describe brevemente los modelos RANS y LES implementados en esta tesis. En ambos casos los sistemas de ecuaciones se resolvieron numéricamente con el código computacional que pertenece al paquete libre y abierto OpenFOAM(R) (Open Field Operation and Manipulation, OpenCFD Ltd. 2005) (OpenCFD. <http://www.opencfd.co.uk/openfoam/>).

2.3.1.- Modelo de simulación basado en las ecuaciones de Navier Stokes promediadas según Reynolds (RANS).

En la implementación de los modelos RANS se utilizó el esquema de simulación "Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations" (simpleFoam en OpenFOAM(R)), que permite acoplar las ecuaciones de Navier-Stokes con un procedimiento iterativo, para una malla de volúmenes finitos. Este se aplica para flujo estacionario, de una sola fase para densidad y viscosidad constantes (Versteeg and Malalasekera, 2007).

En esta tesis se utilizaron dos modelos de cierre para la turbulencia: **a)** El modelo de dos ecuaciones $k-\epsilon$ estandar (Launder y Sharma, 1974); y **b)** El modelo $k-\omega$ SST cuya formulación permite utilizarlo directamente hasta la zona de la pared sin ningún tipo de funciones de amortiguamiento. La formulación SST cambia a un comportamiento $k-\epsilon$ en las zonas centrales del canal. El modelo implementado en openFoam2.3.1 (R), es el descrito por Menter y Esch (2001), con la actualizaciones de los coeficientes realizadas por Menter et al, (2003), y el término adicional F3 que evita se active la limitación SST en paredes rugosas (Hellsten, 1998). En este estudio el término opcional F3, se consideró nulo.

A continuación se describe el sistema de siete ecuaciones a resolver para las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas según Reynolds considerando régimen permanente, flujo incompresible y utilizando un modelo de cierre $k-\epsilon$ estándar:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad [1]$$

$$\rho \left(\bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_T \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \right] \quad [2]$$

$$\mu_T = \rho \nu_T = C \rho \vartheta L = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad [3]$$

$$\rho \left(\bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_T}{\sigma_k} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \mu_t \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \rho \epsilon \quad [4]$$

$$\rho \left(\bar{u}_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \mu_t \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad [5]$$

en donde:

\bar{u}_i : es la velocidad local media (promediado en el tiempo o en el número de realizaciones) del flujo en la dirección i.

\bar{p} : es la presión media.

μ_T : es la viscosidad turbulenta.

ρ : es la densidad.

ν_T : es la viscosidad turbulenta por unidad de masa.

C : es una constante de proporcionalidad.

ϑ : es una escala de velocidades.

L : es una escala de longitudes.

k : es la energía cinética turbulenta por unidad de masa.

ϵ : es la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta por unidad de masa.

σ_k y σ_ϵ : son números de Prandtl que vinculan la difusividad de k- ϵ con la viscosidad turbulenta μ_T .

La ecuación [1] corresponde a la ecuación de continuidad promediada para flujo incompresible. La ecuación [2] corresponde a las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas según Reynolds e incorporando la hipótesis de Boussinesq. Esta hipótesis agrega una nueva incógnita μ_T (viscosidad turbulenta) que se calcula según la ecuación [3]. Por último, las ecuaciones [4] y [5] son las ecuaciones de transporte de k y ϵ para cerrar el sistema, y que permiten determinar el valor de μ_T . Las 7 incógnitas son: \bar{u}_i , \bar{p} , k , ϵ , μ_T .

El sistema de ecuaciones del modelo $k-\epsilon$ estándar contienen una serie de cinco valores constantes que han sido evaluados experimentalmente. Los valores constantes fueron ajustados de manera completa mediante datos experimentales correspondientes a una amplia gama de flujos turbulentos (Versteeg y Malalasekera, 2007). Los coeficientes toman los siguientes valores: $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.00$, $\sigma_\epsilon = 1.30$, $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$.

Por su parte, en el modelo de cierre $k-\omega$ SST las dos ecuaciones de transporte [4] y [5] se reemplazan por las ecuaciones [6] y [7], respectivamente:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_j k)}{\partial x_j} = \tilde{P}_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad [6]$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_j \omega)}{\partial x_j} = \alpha \rho S^2 - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad [7]$$

en donde:

\bar{u}_i : es la velocidad local media (promediado en el tiempo o en el número de realizaciones) del flujo en la dirección i .

μ_T : es la viscosidad turbulenta.

ρ : es la densidad.

k : es la energía cinética turbulenta por unidad de masa.

ω : es la tasa específica de disipación de la energía cinética turbulenta.

F_1 es una función de combinación definida por:

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right\}^4 \right\} \quad [8]$$

con $CD_{k\omega} = \max \left(2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right)$, e y es la distancia a la pared más cercana.

La función F_1 es igual a cero fuera de la capa límite (y tiene un comportamiento similar al modelo $k-\epsilon$ estándar), y cambia a un valor igual a uno dentro de la capa límite (modelo $k-\omega$).

La viscosidad turbulenta se define según la ecuación [9]:

$$v_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)} \quad [9]$$

donde S es una medida invariante del esfuerzo de corte y F_2 es una segunda función de combinación definida por:

$$F_2 = \tanh \left[\left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right] \quad [10]$$

En el modelo SST un limitador en el término de producción es utilizado para prevenir el aumento y acumulación de turbulencia en las regiones de estancamiento:

$$P_k = \mu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \rightarrow \tilde{P}_k = \min(P_k, 10 \cdot \beta^* \rho k \omega) \quad [11]$$

Todas las constantes se calculan por una combinación de las constantes correspondientes a los modelos $k-\epsilon$ y $k-\omega$ por medio de $\alpha = \alpha_1 F_1 + \alpha_2 (1 - F_1)$. Las constantes para este modelo son: $\beta^* = 0.09$, $\sigma_{k1} = 0.85$, $\sigma_{k2} = 1$, $\sigma_{\omega 1} = 0.5$, $\sigma_{\omega 2} = 0.856$, $\alpha_1 = 5/9$ y $\alpha_2 = 0.44$.

2.3.2.- Modelo de simulación de Grande Vórtices (LES)

En este caso se utilizó un esquema temporal para obtener mayor información sobre el campo de flujo medio e instantáneo. En particular, se utilizó el algoritmo PIMPLE (pimpleFoam en OpenFoam®) que fusiona los esquemas PISO (Issa, 1986) y SIMPLE (Patankar, 1980) para flujos no estacionarios, para densidad y viscosidad constantes. En este trabajo se utilizó el algoritmo en un modelo de una sola fase.

El algoritmo PIMPLE además de realizar la corrección de la presión y la turbulencia en el bucle del algoritmo PISO, incorpora un bucle que permite corregir las ecuaciones de cantidad de movimiento, masa y energía hasta lograr la convergencia en cada paso de tiempo. Este bucle extra permite disminuir los residuales y aumentar el paso de tiempo asegurando la condición de Courant. Esta ventaja se traduce en un relativo menor costo computacional comparado en problemas que involucran fenómenos pseudo-periódicos, como es el caso del canal de aforo de la planta "Bajo Grande" en donde las estructuras turbulentas más grandes tienen escalas temporales mayores a los 2 minutos.

El esquema descrito arriba se utilizó para resolver las ecuaciones filtradas de Navier-Stokes. Cabe aclarar que en esta tesis se describe brevemente el sistema de ecuaciones y para una explicación desarrollada de las ecuaciones de Navier-Stokes filtradas para flujo incompresibles y los modelos para aproximar la viscosidad turbulenta se puede encontrar en Márquez Damián y Nigro (2010).

La ecuación [12] representa la ecuación de cantidad de movimiento filtradas, para flujo incompresible y para las tres direcciones. Es necesario aclarar que a continuación el operador \bar{u}_i , \bar{p} , $\bar{\tau}_{ij}$ indica las variables filtradas.

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} \right) + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{2}{3} \mu \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_l} \delta_{ij} - \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} \quad [12]$$

en donde el tensor de tensiones τ_{ij} se atribuye al intercambio de cantidad de movimiento debido a las interacciones entre las escalas turbulentas más pequeñas no resueltas, por lo que se denominan tensiones SGS (por sus siglas en ingles de sub-grid-scale). El tensor de tensiones se define como:

$$\tau_{ij} = \rho \bar{u}_i \bar{u}_j - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \quad [13]$$

Las tensiones SGS que resultan de la operación de filtrado no tienen solución y necesitan ser modeladas. Las estructuras turbulentas más pequeñas tienden a ser isotrópicas y al igual que en los modelos basados en RANS la mayoría de los modelos SGS se basan en la hipótesis de Boussinesq. Por esto, las tensiones SGS se computan con la ecuación [13]

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\mu_t \bar{S}_{ij} \quad [14]$$

en μ_{SGS} es la viscosidad de las escalas turbulentas más pequeñas modeladas. El término $\frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij}$ de la ecuación [13] representa la componente isotrópica debido a las escalas más pequeñas de la turbulencia, y no se modela pero se incorpora al término de la presión estática filtrada (\bar{p}). \bar{S}_{ij} es el tensor de la tasa de deformación para las escalas que son resueltas y se define en la ecuación [15]

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad [15]$$

En síntesis el sistema de cinco ecuaciones a resolver en el modelo LES, flujo incompresible y utilizando un modelo Smagorinsky-Lilly:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad [16]$$

La ecuación [12] se puede escribir

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} \right) + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu + \mu_{SGS} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{2}{3} \mu \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \quad [17]$$

La formulación del modelo Smagorinsky-Lilly en OpenFoam® para aproximar el valor de la viscosidad de las escalas más pequeñas que no se resuelven es:

$$\mu_{SGS} = \rho L_S^2 C_S^2 |\bar{S}| \quad [18]$$

L_S representa

$$L_S = \min \left[\frac{\kappa y}{C_\Delta} \left(1 - e^{-\frac{y^+}{A^+}} \right), V^{1/3} \right] \quad [19]$$

en donde κ es la constante de Von Karmen, y es la distancia a la pared más cercana, C_Δ y A^+ son constantes del modelo que por defecto son iguales a 0.158 y 26 en OpenFoam®, respectivamente, y V es el volumen de la celda de cálculo. Este enfoque se basa en la función de amortiguamiento de Van Driest para μ_{SGS} (De Villiers, 2006).

En la ecuación [18] la constante C_S se determina por

$$C_S = \sqrt{C_K \sqrt{\frac{C_K}{C_\epsilon}}} \quad [20]$$

por defecto en OpenFoam® $C_K = 0.07$ y $C_\epsilon = 1.05$, y por lo tanto $C_S = 0.13$.

2.3.3.- Implementación de los modelos numéricos

En el método de los volúmenes finitos, el dominio que se pretende resolver se subdivide en un número finito de pequeños volúmenes de control (poliedros) y las ecuaciones de conservación se aplican a cada volumen de control. El método de volúmenes finitos (FVM por sus siglas en inglés) utiliza la integral de una ecuación general de convección-difusión para una cantidad como punto de partida que se describe como:

$$\frac{d}{dt} \int \phi dV + \int \phi \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dS = \int \Gamma (\nabla \phi) \cdot \mathbf{n} dS + \int q dV \quad [21]$$

En la ecuación [22], ϕ es una variable del flujo (por ejemplo la energía cinética turbulenta k), V es el volumen de control, S su superficie de contorno, \mathbf{n} vector normal unitario, Γ el coeficiente de difusión y q algún término externo.

El centroide de cada volumen de control es asignado para ser el nodo computacional en el que los valores de las variables se han de calcular. La interpolación se utiliza para expresar los valores de variables en la superficie del volumen de control en términos de los valores nodales. Las integrales de superficie y volumen se aproximan utilizando métodos adecuados de discretización. Como resultado, se obtiene una ecuación algebraica para cada volumen de control, en la que un número de valores de los nodos vecinos aparecen. Una ventaja con FVM es que puede manejar geometrías complejas, sin embargo, una desventaja en comparación con otros métodos computacionales es que los métodos de orden superior al segundo, son más difíciles de desarrollar en tres dimensiones.

La implementación de los modelos numéricos fue del tipo tridimensional para simular las condiciones del flujo en la zona de estudio y detectar zonas de conflicto como zonas de recirculación. En los capítulos 3, 4 y 5 se describen las características de los modelos: resolución espacial del mallado, condiciones

iniciales y de borde, paso de cálculo y el costo computacional.

CAPÍTULO III:
Caracterización de los patrones de flujos
turbulentos en componentes de la planta de
tratamiento de agua potable “Los Molinos”

3.1.- INTRODUCCIÓN

La Ciudad de Córdoba se encuentra entre las regiones con mayor incremento poblacional en la República Argentina. A este incremento poblacional se le suma la rápida incorporación de los ambientes semi-rurales periféricos a la urbanización. Para satisfacer las necesidades de agua potable de una población en continuo crecimiento es necesaria la optimización en los procesos de tratamiento para la potabilización del agua. En este marco surge la necesidad de caracterizar el flujo en distintas componentes hidráulicas de las plantas de tratamientos de agua potable existentes para el abastecimiento de la ciudad de Córdoba. No existen antecedentes a nivel local, regional y nacional de estudios similares en esta problemática. En este capítulo, el estudio se focaliza en la planta de tratamiento de agua potable (Planta Los Molinos) que la empresa Aguas Cordobesas S.A. opera en cercanías de la localidad de Bouwer en la provincia de Córdoba (ver Figura 1.1). Esta planta es la encargada de abastecer a aproximadamente un 30 % de la población de la ciudad de Córdoba.

En general, siguiendo el criterio sanitarista para el diseño de plantas de tratamiento de agua es necesario tener en cuenta la carga necesaria para permitir que el agua fluya a través de los procesos de tratamiento y sea entregada a la red de transporte/distribución con los caudales y las presiones requerida para la entrega a los usuarios (Mays, 1999). Sobre la base de la demanda media anual, se establece las demandas máxima y mínima de caudales y la capacidad de operación de la planta de tratamiento. Dependiendo de la capacidad, el diseño hidráulico debe permitir a lo largo del proceso de tratamiento: 1) una buena mezcla en el proceso de colagulación/floculación con valores recomendados de gradiente medio de velocidad; 2) valores mínimos de turbulencia en los tanques sedimentadores; y 3) una transición suave entre los dos procesos para lograr que los flóculos no se destruyan y sedimenten. En la planta de tratamiento de agua potable "Los Molinos", observaciones preliminares sugieren que existen patrones de flujo turbulento que pueden resultar incompatibles para el correcto desarrollo de los procesos necesarios para la clarificación. Los principales inconvenientes observados en el área de estudio y analizados en este capítulo incluyen: altos niveles de turbulencia que podrían afectar el tamaño de los flóculos y disminuir la eficiencia de los clarificadores y filtros, y un diseño hidráulico inadecuada produciría una distribución espacial no homogénea del flujo, zonas de recirculación y estancamiento del flujo, y una distribución no uniforme del flujo entre las unidades de decantación (Ragessi et al., 2012).

Debido a esta problemática es necesario cuantificar los efectos de los inconvenientes citados anteriormente, mediante una caracterización espacial y temporal detallada, para distintas condiciones de funcionamiento de la planta y de los flujos turbulentos en la zona de ingreso de caudales al proceso de clarificación que incluye al canal de aforo y canal de distribución transversal (Figura 3.1). Esto permitiría diseñar modificaciones y evaluar alternativas de operación para optimizar el funcionamiento de la planta de tratamiento.

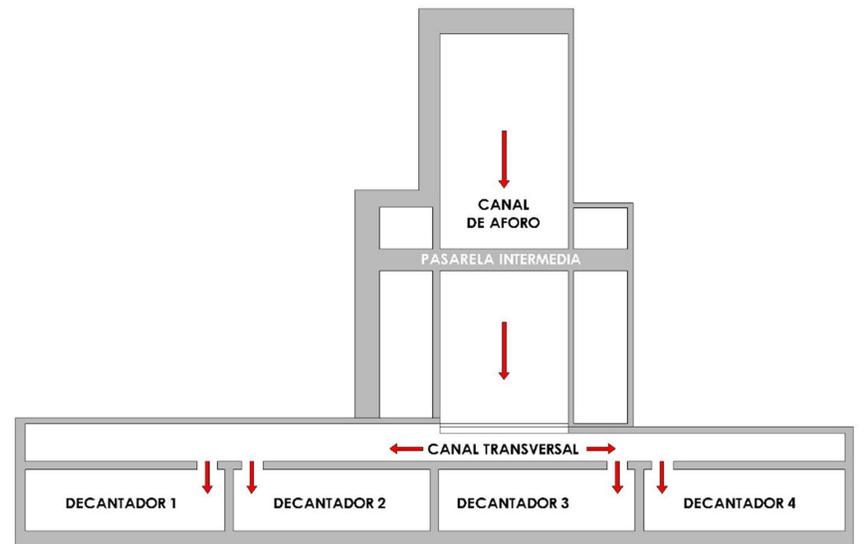


Figura 3.1.- Esquema de la zona que incluye al canal de aforo, canal de distribución transversal e ingreso a los decantadores. Planta de tratamiento de agua potable "Los Molinos". Las flechas indican la dirección y sentido del flujo.

En la Sección 3.2 de esta tesis, se presenta la caracterización experimental in situ del flujo para diferentes condiciones de operación de la planta de tratamiento "Los Molinos", cuyos resultados a continuación se utilizan para validar un modelo numérico. En las campañas, las mediciones de velocidad se realizaron en la zona de entrada del proceso de clarificación mediante AVD que registra las series de tiempo de los componentes del vector de velocidad con frecuencias de registro de hasta 50 Hz; un ADCP que registra los perfiles de velocidad en tres dimensiones en la columna de agua; y la técnica LSPTV para representar el campo de velocidad media superficial en la región de estudio. Estas tres técnicas experimentales no sólo permiten obtener, los perfiles de velocidad media, las áreas de recirculación y el estancamiento de flujo, sino también obtener los parámetros característicos de la turbulencia en el flujo. No hay antecedente a nivel local, regional y nacional de estudios similares sobre este tema. Y es la primera vez que se implementa LSPTV en una planta de tratamiento de agua.

En la sección 3.3 se describe el esquema numérico computacional utilizado para simular el flujo turbulento tridimensional en las componentes de la planta de tratamiento detallando el modelo matemático y el modelo numérico seleccionado para resolver las ecuaciones que describen el proceso. Luego se describe el dominio computacional (justificando las dimensiones de los volúmenes finitos que forman la malla) y las condiciones iniciales y de borde implementadas.

En la sección 3.4 se contrastan los resultados de la caracterización experimental in-situ y la simulación numérica, para validar el modelo numérico. Se caracteriza la evolución espacial de parámetros medios del flujo y parámetros que cuantifican la turbulencia evaluando regiones críticas como zonas de separación y recirculación, reducción de la sección efectiva del flujo, flujo a través de compuertas, etc. Además, se utiliza el modelo numérico para simular distintas condiciones de flujo (simulando distintas operaciones de mantenimiento no caracterizadas experimentalmente) en la planta que puedan ser usadas para

optimizar su funcionamiento. Al final de esta sección se presenta como ejemplo una simulación numérica realizada para optimizar su funcionamiento en diferentes condiciones de operación.

3.2.- ESTUDIO EXPERIMENTAL

En total se realizaron cinco campañas de mediciones en la instalación experimental con el fin de realizar una caracterización experimental del flujo al ingreso del proceso de clarificación. Los caudales de agua cruda reportados por el equipo de aforo existente en la planta variaron desde 1.33m³/s a 2.10 m³/s (del orden del caudal de diseño de la planta) debido a las variaciones estacionales existentes en el consumo de agua potable en la ciudad de Córdoba. Las principales características de las condiciones experimentales evaluadas (incluyendo la configuración de los decantadores en funcionamiento) se reportan en la Tabla 3.1, ordenando las campañas de medición cronológicamente.

Tabla 3.1.- Condiciones experimentales evaluadas.

Campaña de medición	Fecha	Decantadores en funcionamiento	Profundidad de flujo [m]	Caudal reportado por sistema de aforo instalado [m³/s]
1	1/07/2009	4	0.94	1.55
2	23/09/2010	4	0.95	1.33
3	15/02/2011	4	0.94	1.67
4	08/07/2011	4	0.94	1.87
5	27/12/2011	4	0.99	2.10

A continuación se describen los métodos experimentales utilizados.

3.2.1.- Mediciones con el Velocímetro Acústico Doppler (ADV)

En este estudio se realizaron mediciones con ADV en una sección transversal del canal de aforo y cuatro zonas del canal de distribución transversal. En la sección A-A (Figura 3.2) se relevaron (durante la campaña de medición 1) diez localizaciones: cinco puntos a una distancia de 25cm del fondo del canal y otros cinco a 75cm desde el fondo del canal, distribuidos a lo ancho del canal de aforo a 75cm, 150cm, 250cm, 350cm y 450cm desde la margen derecha. En las secciones B-B y C-C (ver canal de distribución transversal en Figura 3.2) el número de puntos de medición se densificó en planta y en profundidad. Se registraron señales en cuatro puntos distribuidos a lo ancho de cada sección en el canal de distribución transversal y para tres niveles de profundidad medidos desde la superficie libre: 7cm, 27cm y 67cm. Esto permitió evaluar y cuantificar: los patrones de flujo tridimensionales (corrientes secundarias, etc.), niveles de turbulencia; presencia de zonas muertas; etc. Finalmente en las compuertas D y E (ver Figura 3.2) se realizaron mediciones en la línea central de cada compuerta a 15 cm de la sección de las compuertas y para tres niveles de profundidad medidos desde la superficie libre: 7cm, 27cm y 67cm. Esto permitió evaluar y cuantificar: caudales, patrones de flujo tridimensionales (corrientes secundarias, etc.), niveles

de turbulencia; presencia de zonas muertas; etc.

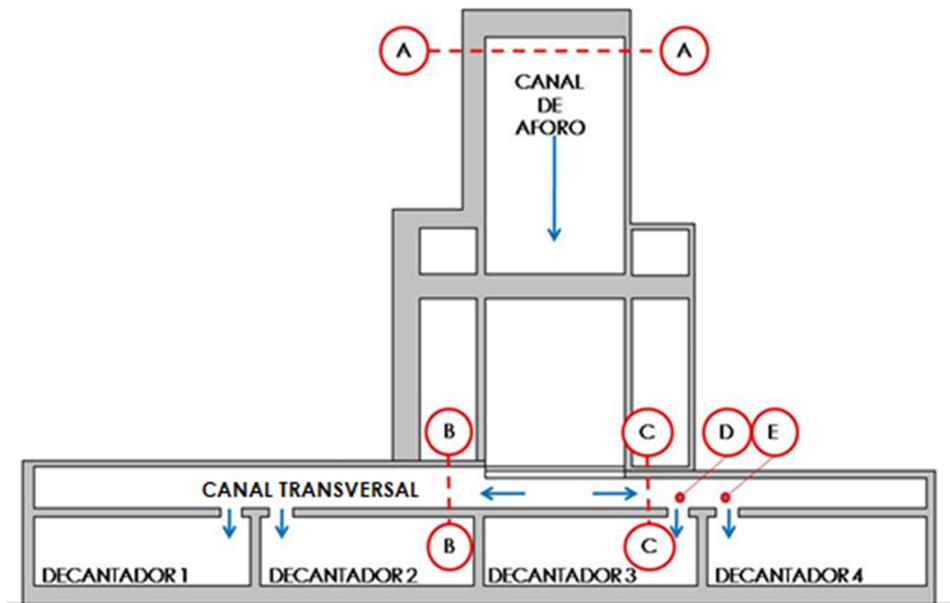


Figura 3.2.- Esquema de la zona de estudio y ubicación de las secciones de medición con velocímetro Acústico Doppler- ADV. Las flechas azules indican la dirección del flujo.

3.2.2.- Mediciones con el Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP)

En las campañas 2, 3, 4 y 5 se registraron perfiles de velocidad con ADCP en las secciones G-G (sección longitudinal del canal de aforo, ver Figura 3.3) y H-H (perfil longitudinal en canal de distribución transversal, ver Figura 3.3). En estas secciones se evaluaron y cuantificaron los campos de flujo tridimensionales (corrientes secundarias, presencia de zonas de recirculación etc.). Finalmente la caracterización del flujo de entrada en las compuertas 1, 2, 3 y 4 (Figura 3.3) permitió caracterizar, entre otras cosas, la distribución de los flujos que ingresan a los respectivos decantadores, y las magnitudes y direcciones de los vectores velocidad.

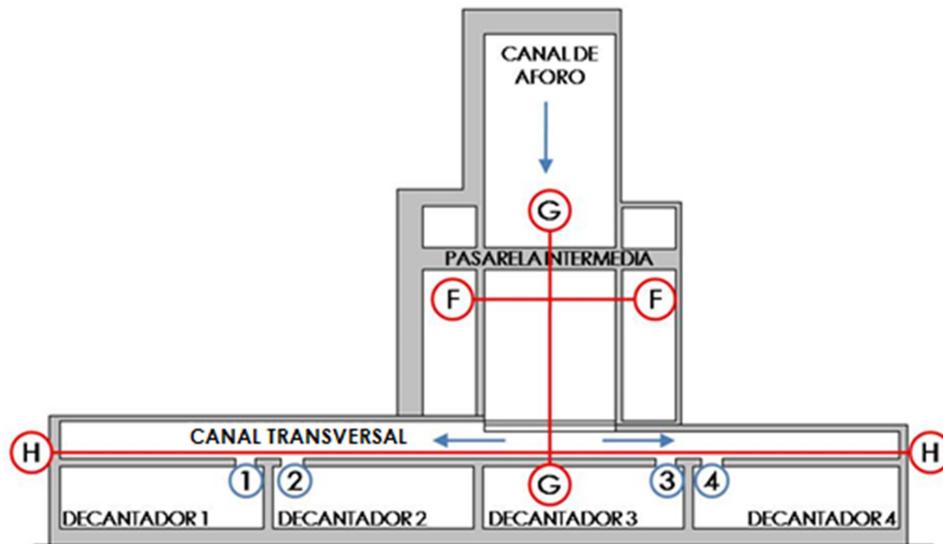


Figura 3.3.- Ubicación de las secciones de medición con Perfilador de Corriente Acústico Doppler – ADCP. Las flechas azules indican la dirección del flujo.

3.2.3.- Mediciones con la técnica de Velocimetría por Seguimiento de Partículas Implementada a Gran Escala (LSPTV)

En la campaña de medición 3 se utilizó la técnica LSPTV para analizar, en un sistema de referencia Lagrangiano, la evolución en el tiempo de partículas sembradas en la superficie del flujo por medio de imágenes adquiridas a intervalos regulares de tiempo por una cámara digital. Esta técnica permite determinar campos instantáneos y medios de velocidad, líneas de corriente, etc. A partir de esta información es posible evaluar la localización de las regiones de máxima velocidad de flujo y la redistribución lateral del flujo para una configuración ensayada del mismo. En la campaña de medición 3 se realizó una filmación de 60 segundos para caracterizar el flujo superficial en el canal de aforo y en la transición al canal de distribución transversal y se distribuyeron 1400 partículas. En este trabajo se adoptaron como trazadores elementos formados por dos tapas plásticas abrochadas entre sí cuyo diámetro comercial es 63mm logrando un peso tal que la acción del viento no modifique su velocidad, manteniendo la flotabilidad y constituyendo partículas simétricas respecto de sus dos caras. Los motivos de la elección son fundamentalmente su visibilidad y bajo costo (ver Figura 3.4a) sobre la superficie del flujo. La cámara digital utilizada es una "Sony H20 10.1-megapixel Super HAD CCD image sensor" con 10x zoom óptico; lentes Carl Zeiss Vario-Tessar y modo de VIDEO HD (High Definition) 1280 x 720 (30 fps).

Debido a la ubicación de la cámara (ver Figura 3.4b) fue necesario orto-rectificar las imágenes extraídas del video para trabajar con las imágenes sobre el plano superior del perfil del flujo (Patalano et al., 2013a). Luego el procesamiento de las imágenes rectificadas se hizo mediante la herramienta de "PTVlab" (Patalano et al., 2013b). Para la rectificación fue fundamental realizar un relevamiento de puntos en el terreno para reducir los errores por deformaciones ópticas y también para obtener una correspondencia entre el tamaño de los pixeles y la distancia

real. Los puntos relevados se indican en la Figura 3.4c.



Figura 3.4.- a) Partículas trazadoras adoptados en este estudio; b) Ubicación de la Cámara digital en la implementación de la técnica PTV en la campaña 5; c) Marcas de referencia utilizadas en el proceso de rectificación.

3.3.- SIMULACIÓN DEL FLUJO TURBULENTO

3.3.1.- Generación de la malla de volúmenes finitos

La geometría del dominio es relativamente simple, se trata de dos canales rectangulares: el canal de aforo y el canal distribuidor. La aplicación blockMesh de OpenFoam® permitió resolver el mallado del dominio sin mayores complicaciones.

La malla finalmente seleccionada se compone de hexaedros de tamaño variable. En los bordes (fondo y paredes de los canales) los volúmenes tienen una dimensión de 5 cm de lado, aumentando a 7 cm, 10 cm, y 12 cm hacia la zona media del dominio, en la zona central se completa con volúmenes de igual tamaño (ver Figura 3.5). Además se densificó la malla en la zona donde el flujo hace una transición desde el canal de aforo hacia el canal distribuidor (ver Figura 3.6).

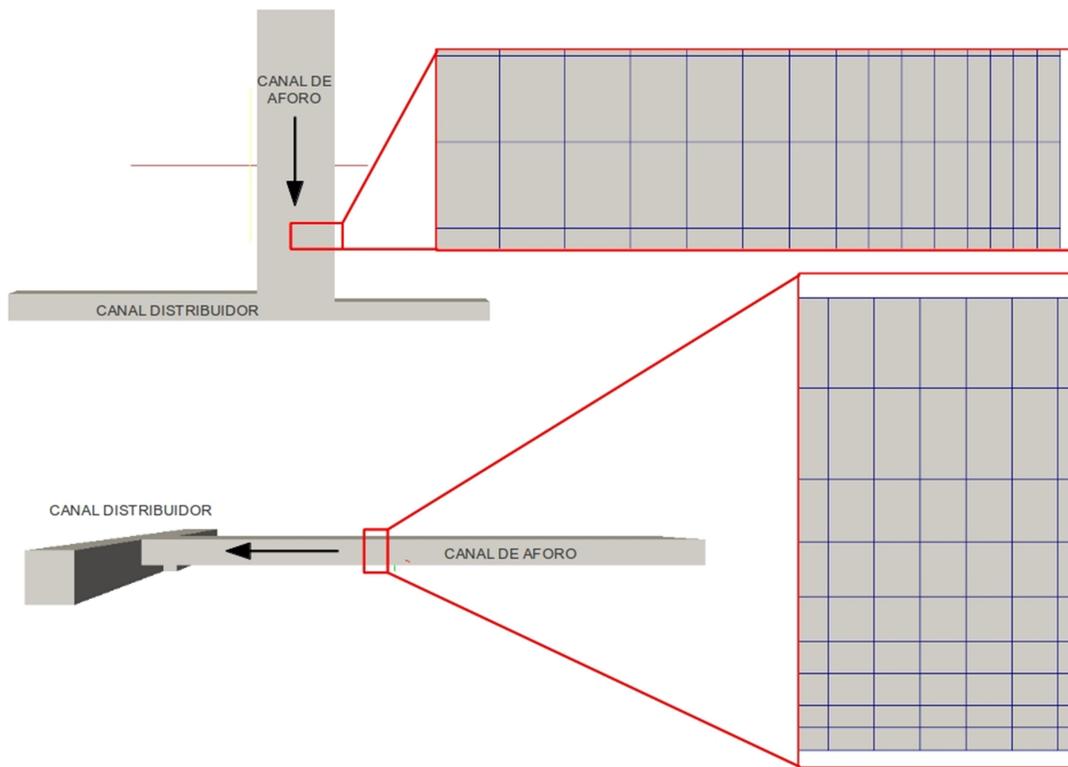


Figura 3.5.- Vista superior y lateral de la malla implementada para el modelo tridimensional.

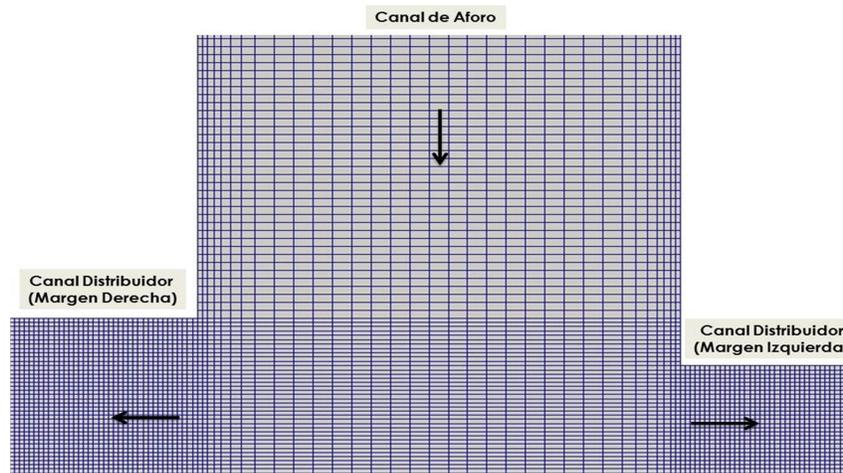


Figura 3.6.- Detalle mallado en la zona de encuentro entre el canal de aforo y el canal distribuidor. Las flechas indican el sentido del flujo.

La malla de volúmenes óptima seleccionada para el modelo tridimensional es el resultado de un proceso de aproximación a partir del análisis de la sensibilidad de las variables del flujo medio y la energía cinética turbulenta a medida que aumenta la resolución del mallado del dominio. A continuación se detalla el comportamiento de la velocidad media del flujo y la energía cinética turbulenta ante el cambio en la resolución del mallado (Análisis de Sensibilidad a la Malla).

Inicialmente se utilizó una malla elemental (malla M4) cuya geometría se

conformó por medio de poliedros. En particular se utilizaron elementos rectangulares para conformar cada lado. La malla estuvo formada por celdas con una longitud mínima de 0.50m y una longitud máxima de 1.50m. Los resultados obtenidos a partir de la malla elemental no fueron satisfactorios, por lo cual, en primera instancia se modificó la definición de la malla de volúmenes finitos aumentando su resolución. Se trabajó con tres mallas más: 1) la malla M5 se compone de elementos en los borde de 5 cm de lado, aumentando a 7 cm, 10 cm, y 12 cm hacia la zona media del dominio, para distribuirse de manera uniforme en el campo restante; 2) la segunda malla M4b se compone de elementos cuyo tamaño es el doble de los de la malla M5; y por último 3) la malla M6 con elementos de la mitad del tamaño de los elementos que componen la malla M5. La Figura 3.7 siguiente muestra una sección transversal del canal de aforo a 2 metros aguas arriba de la pasarela para las distintas mallas arriba mencionadas.

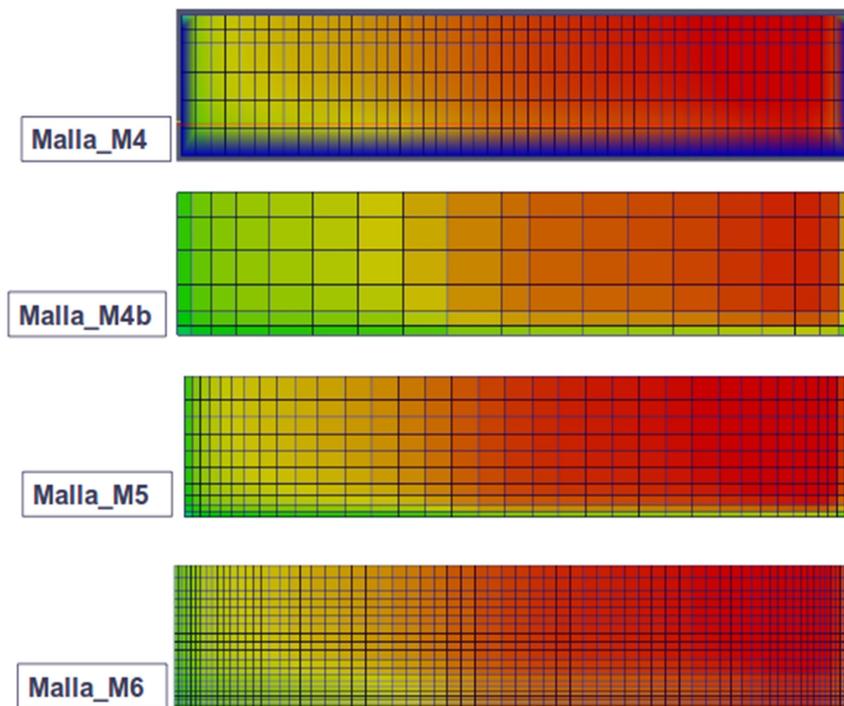


Figura 3.7.- Sección transversal del canal de aforo a 2 metros aguas arriba de la pasarela. Vista de las mallas para implementar el modelo numérico en tres dimensiones.

La Figura 3.8 y Figura 3.9 comparan los perfiles verticales de la velocidad longitudinal del flujo en la línea central y la velocidad longitudinal del flujo a lo ancho del canal de aforo respectivamente, para las simulaciones numéricas realizadas con las condiciones experimentales de la campaña 2. La similitud del comportamiento del flujo entre las mallas M5 y M6 indica que ya no es necesario continuar refinando la malla.

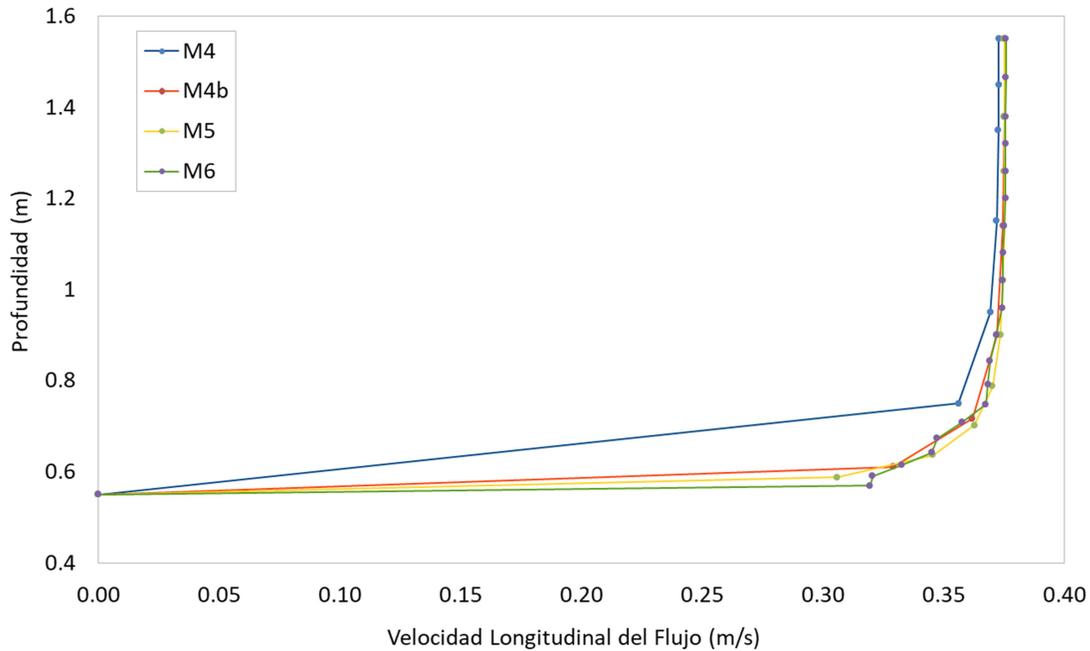


Figura 3.8.- Perfil vertical de la velocidad longitudinal del flujo en el centro del canal de aforo para una sección ubicada 2 metros aguas arriba de la pasarela. La cota de fondo está a cota 0.58m. Condiciones de flujo presentes en la campaña de medición 2.

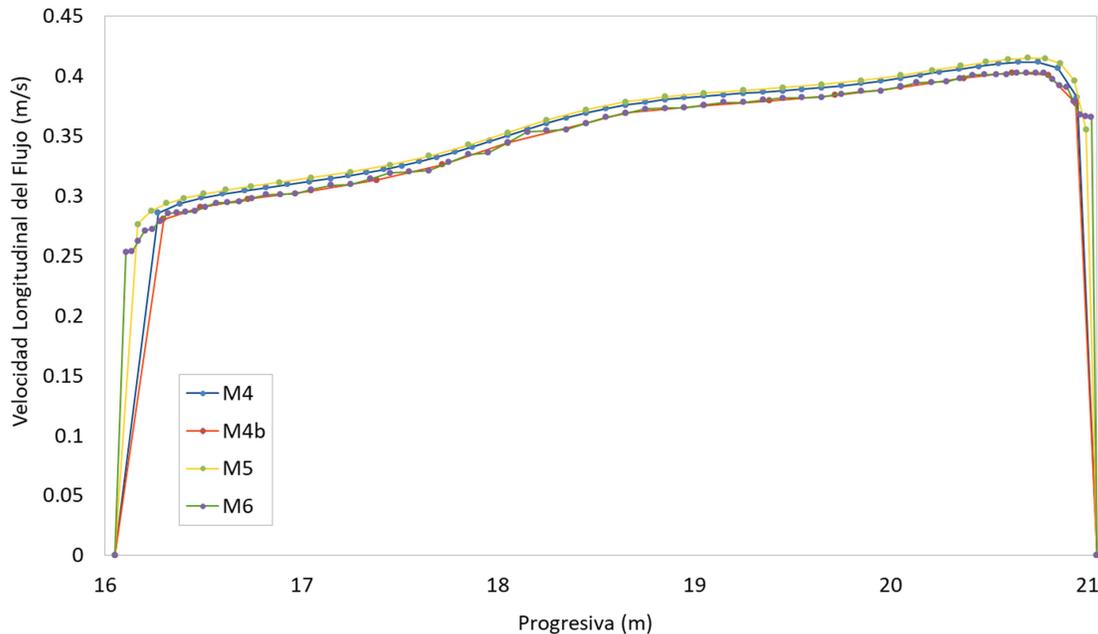


Figura 3.9.- Perfil transversal de la velocidad longitudinal del flujo en el de canal de aforo para una sección ubicada 2 metros aguas arriba de la pasarela y a una profundidad de 0.60 m de la superficie. Condiciones de flujo presentes en la campaña de medición 2.

La Figura 3.10 y la Figura 3.11 comparan los valores obtenidos energía cinética turbulenta de las simulaciones realizadas en tres dimensiones para las condiciones

de flujo presentes en la campaña 2, tanto en profundidad como a lo ancho del canal de aforo respectivamente. Los valores de energía cinética turbulenta a lo alto de la columna de agua (Figura 3.10) difieren un poco entre las simulaciones de la malla básica M4 y el resto de las mallas (M4b, M5 y M6). Al igual que en el análisis de la velocidad longitudinal del flujo, la similitud del comportamiento del flujo entre las mallas M5 y M6 indica que ya no es necesario continuar refinando la malla. La Figura 3.11 indica el mismo comportamiento a lo ancho del canal de aforo.

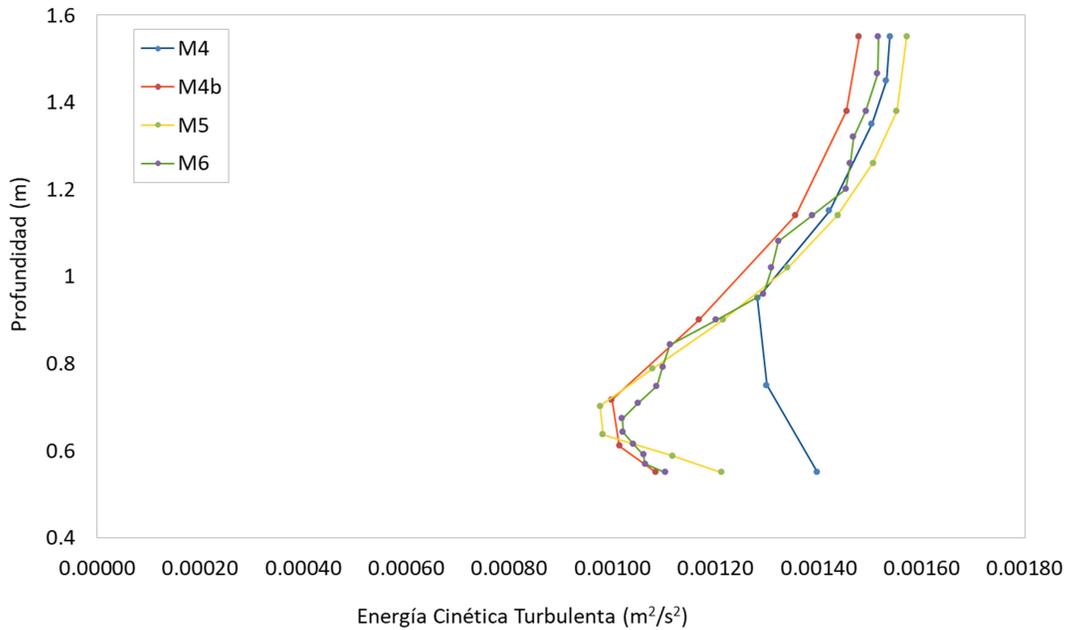


Figura 3.10.- Perfil vertical de la energía cinética turbulenta del flujo en el centro del canal de aforo para una sección ubicada 2 metros aguas arriba de la pasarela. La cota de fondo está a 0.58 m. Condiciones de flujo presentes en la campaña de medición 2.

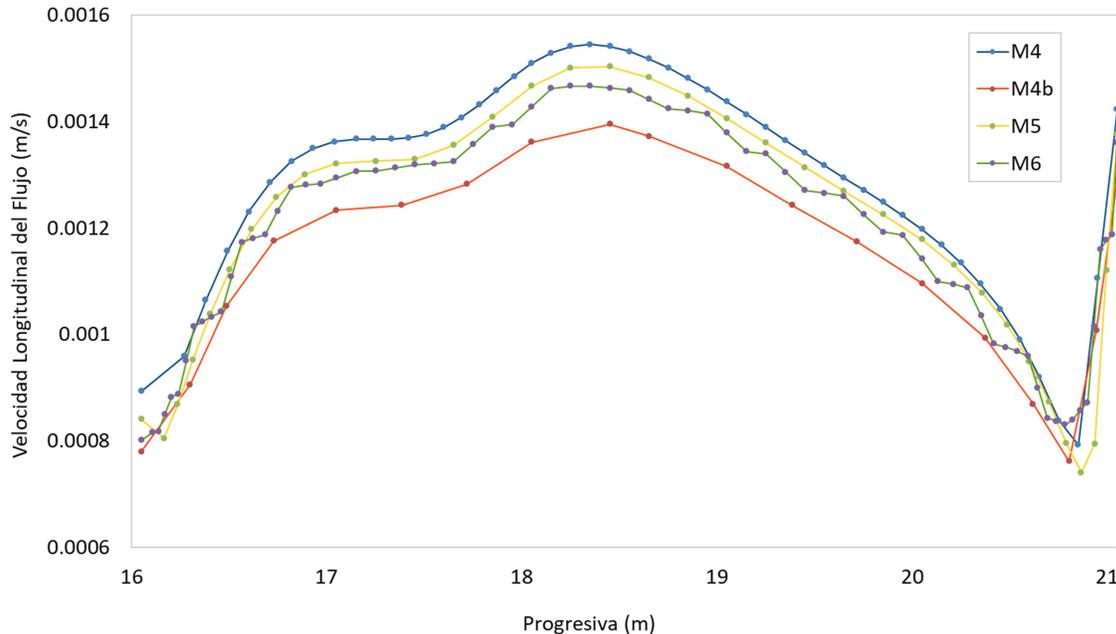


Figura 3.11.- Perfil transversal de la energía cinética turbulenta del flujo en el de canal de aforo a una profundidad de 0.6 m para una sección ubicada 2 metros aguas arriba de la pasarela. Condiciones de flujo presentes en la campaña de medición 2.

El análisis de sensibilidad de las variables medias del flujo a medida que aumenta la resolución de la malla permitió definir el mallado M5 como óptimo del dominio cuya resolución es la necesaria para la caracterización numérica del flujo objeto de este trabajo.

La malla finalmente utilizada se conformaba por 339376 hexaedros. La convergencia a la solución del flujo demoró 6605 segundos. El cálculo se realizó paralelizado en 4 cores de un procesador Intel® Core™ i3 de primera generación.

3.3.2.- Condiciones iniciales y de borde

El esquema de simulación utilizado requiere establecer condiciones de iniciales y de borde para las variables fundamentales: presión (p), velocidad (U), Energía cinética turbulenta (k) y Disipación de Energía cinética turbulenta (ϵ). Se estableció como valores iniciales iguales a cero para todas las variables en todo el dominio salvo las zonas donde se estableció condiciones de borde específicas. A continuación se detallan las condiciones de borde adoptadas en distintas regiones del dominio:

Condiciones de borde a la entrada:

- p : gradiente de presión nulo,
- U : se emplearon los valores de velocidad media medidos experimentalmente en la sección A-A del canal de aforo (ver Figura 3.2) con ADV. La discretización de la malla en la entrada se realizó para que coincida con los puntos medidos con ADV.
- k y ϵ : calculados en base a los datos medidos experimentalmente en el

canal de aforo (sección A-A en Figura 3.2).

Condiciones de borde a la salida:

- p : se calculó la presión estática media en las caras de los volúmenes correspondientes a la salida del modelo (compuertas),
- U : se estableció gradiente de velocidades igual a cero para la zona de las compuertas,
- k y ϵ : se impuso en las compuertas gradientes nulos de energía cinética turbulenta y disipación de dicha energía para las compuertas.

Condiciones de borde en paredes y fondo:

- p : gradiente de presión nulo,
- U : se estableció que las velocidades sean igual a cero,
- k y ϵ : se utilizó las funciones `kqRWallFunction` y `epsilonWallFunction` para k y ϵ respectivamente. Estas son funciones estándar de la librería de `openfoam` que establecen la ley con la cual varía la energía cinética turbulenta y la disipación a medida que se aproxima a la pared y al fondo.

Condiciones de borde en superficie libre:

- p : gradiente de presión nulo,
- U : debido a que en prototipo la superficie libre no presenta variaciones de nivel, en modelo se impuso una superficie rígida sin esfuerzos de corte para que no afecte al flujo interno (la condición `slip` en inglés). De esta manera es posible simplificar el esquema de modelación de dos fases (agua-aire) simulando la superficie libre a otro a simple fase (agua). Esta simplificación permite reducir el esfuerzo computacional necesario y trabajar con un esquema de modelación menos complejo respecto a las condiciones de borde, parámetros físicos y ecuaciones a resolver.
- k y ϵ : gradiente nulo.

3.4.- RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la caracterización experimental in-situ y la simulación numérica tridimensional del flujo. En primer lugar se presenta una validación del modelo en base a los datos experimentales registrados (sección 3.4.1). Para esto se realizó un análisis de la distribución espacial de la velocidad media del flujo y la energía cinética turbulenta. Este mismo análisis, permite especificar la problemática existente en la planta de tratamiento. En segundo lugar, y una vez validado el modelo se avanzó sobre la explotación del mismo en el proceso de optimización del funcionamiento de la planta de tratamiento (sección 3.4.2).

3.4.1.- Validación del esquema de modelación

A continuación se contrastan los resultados de la caracterización experimental del flujo en la zona de estudio y los resultados obtenidos mediante el uso del modelo numérico tridimensional con el fin de validar el esquema de simulación adoptado. Los valores observados experimentalmente y simulados numéricamente en el canal de aforo (sección A-A) no se contrastan en esta

sección porque ambos coinciden, ya que los valores experimentales fueron utilizados como condición de borde del modelo.

3.4.1.1.- Evolución espacial de parámetros turbulentos

En primer lugar se realiza una comparación de los resultados obtenidos del estudio experimental y la simulación numérica en las secciones B-B y C-C, rama izquierda y derecha del canal distribuidor, respectivamente (Figura 3.2). En las Figura 3.12 a Figura 3.17, se presenta la distribución espacial de la componente longitudinal de la velocidad en las ramas izquierda y derecha del canal distribuidor, respectivamente. Estos resultados corresponden a la campaña de medición 1. Para evaluar si las diferencias observadas son estadísticamente significativas, en las todas las figuras se incluyen los intervalos de confianza de los valores medios estimados con la metodología propuesta por García et al. (2006), quienes proponen aplicar la técnica de remuestreo estadístico con bloques móviles (Moving Block Bootstrap, MBB por sus siglas en inglés), que estima con buena precisión los intervalos de confianza para los parámetros turbulentos, calculando las desviaciones debido a los errores estadísticos de la turbulencia cuando se generan mediciones repetidas de los parámetros, con una misma configuración experimental, con el mismo instrumento y aplicando la misma metodología. En las Figura 3.12 a Figura 3.17 se observa que en ambas ramas del canal de distribución transversal la evolución espacial de los valores de la velocidad longitudinal media del flujo resultantes del modelo numérico y los registrados con ADV en la planta durante la campaña 1 son similares para las tres profundidades relevadas aunque se observan mayores diferencias para localizaciones más profundas en la sección C-C.

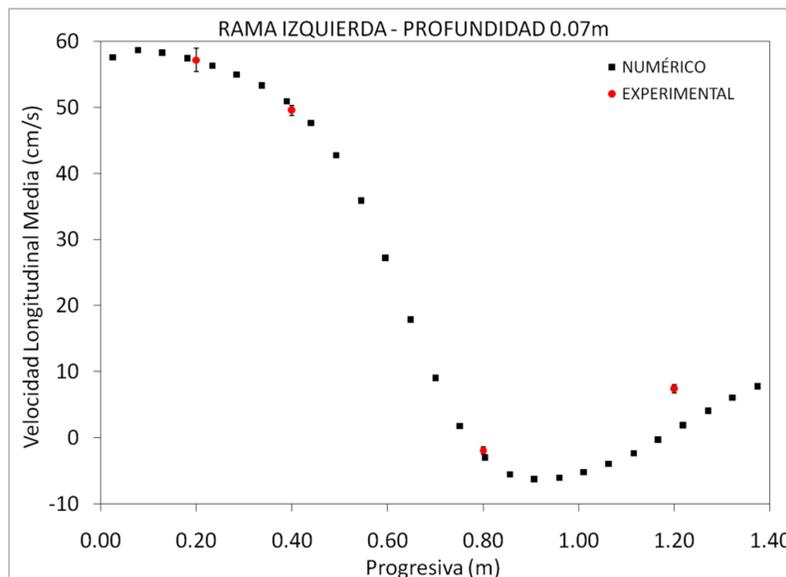


Figura 3.12.- Comparación de los valores de la velocidad longitudinal media del flujo resultantes del modelo numérico y los experimentales registrados con ADV en la sección C-C en el canal de distribución transversal de la planta para una profundidad de 0.07m. Con

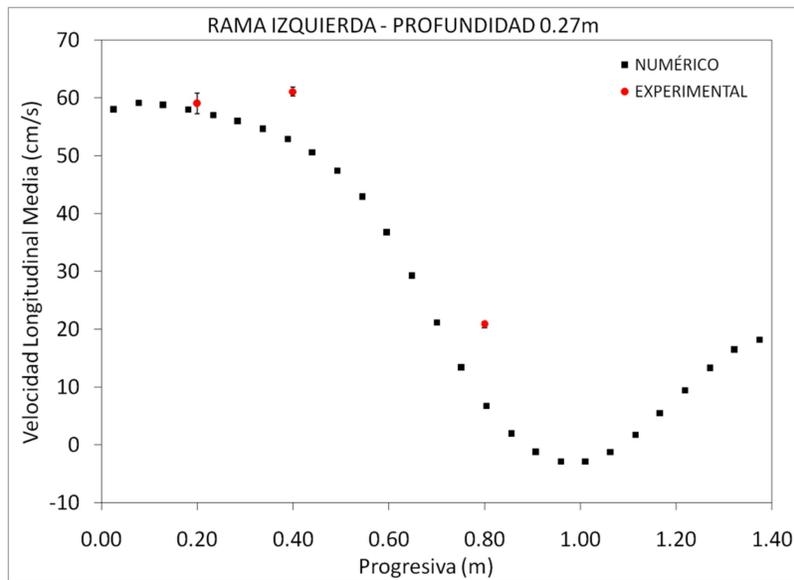


Figura 3.13.- Comparación de los valores de la velocidad longitudinal media del flujo resultantes del modelo numérico y los experimentales registrados con ADV en la sección C-C en el canal de distribución transversal de la planta para una profundidad de 0.27m. Condiciones de flujos presentes en la campaña 1. La Progresiva 0 indica la margen derecha.

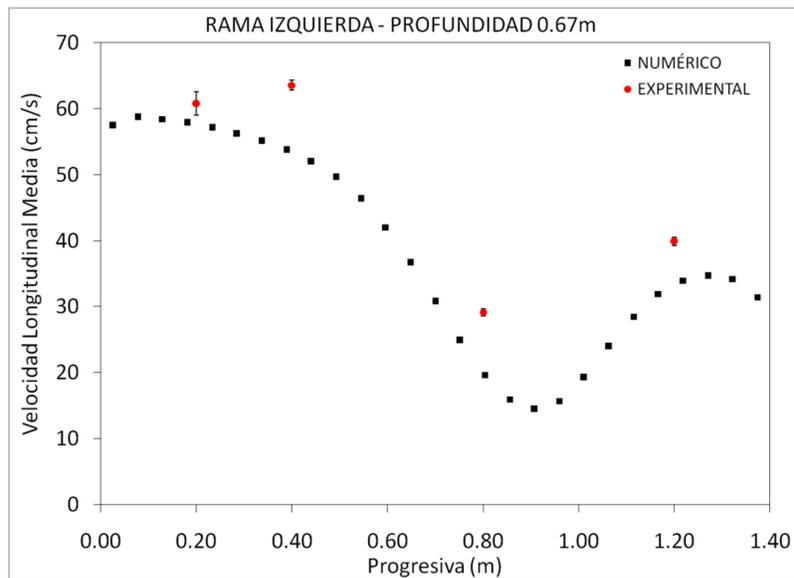


Figura 3.14.- Comparación de los valores de la velocidad longitudinal media del flujo resultantes del modelo numérico y los experimentales registrados con ADV en la sección C-C en el canal de distribución transversal de la planta para una profundidad de 0.67m. Condiciones de flujos presentes en la campaña 1. La Progresiva 0 indica la margen derecha.

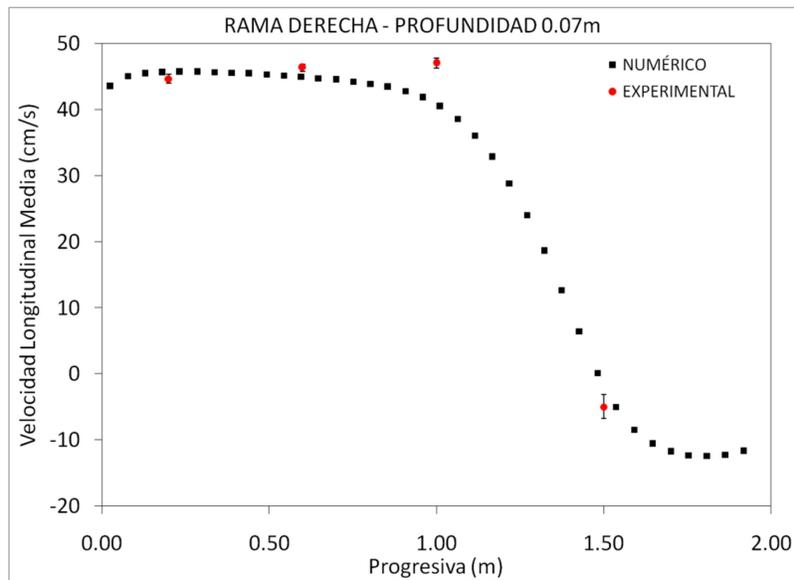


Figura 3.15.- Comparación de los valores de la velocidad longitudinal media del flujo resultantes del modelo numérico y los experimentales registrados con ADV en la sección B-B en el canal de distribución transversal de la planta para una profundidad de 0.07m. Condiciones de flujos presentes en la campaña 1. La Progresiva 0 indica la margen izquierda.

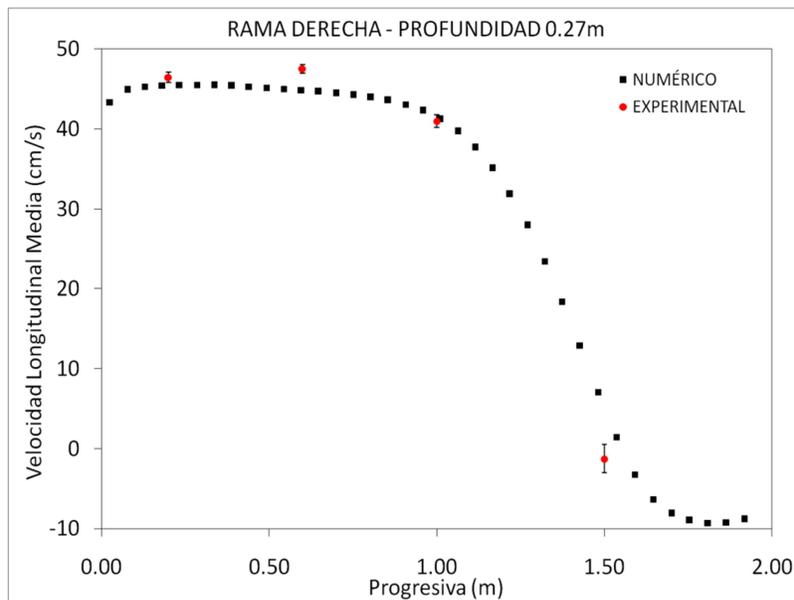


Figura 3.16.- Comparación de los valores de la velocidad longitudinal media del flujo resultantes del modelo numérico y los experimentales registrados con ADV en la sección B-B en el canal de distribución transversal de la planta para una profundidad de 0.27m. Condiciones de flujos presentes en la campaña 1. La Progresiva 0 indica la margen izquierda.

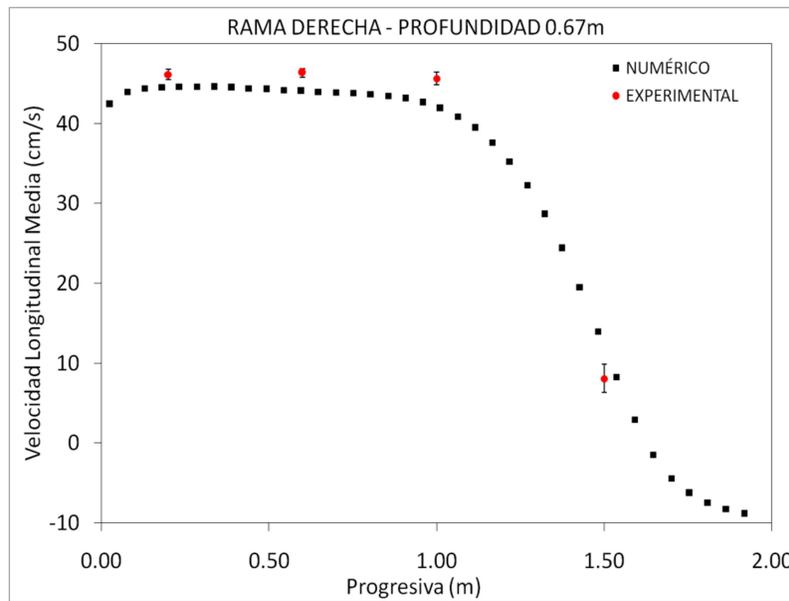


Figura 3.17.- Comparación de los valores de la velocidad longitudinal media del flujo resultantes del modelo numérico y los experimentales registrados con ADV en la sección B-B en el canal de distribución transversal de la planta para una profundidad de 0.67m. Condiciones de flujos presentes en la campaña 1. La Progresiva 0 indica la margen izquierda.

La Figura 3.18 muestra los valores de la componente longitudinal de la velocidad en la zona de ingreso (compuertas) a los decantadores 3 y 4 (puntos D y E, ver Figura 3.2). En esta figura se observa que la evolución espacial de los valores de la velocidad longitudinal media del flujo (entrante hacia cada compuerta) resultantes del modelo numérico y los registrados con ADV en la planta son similares.

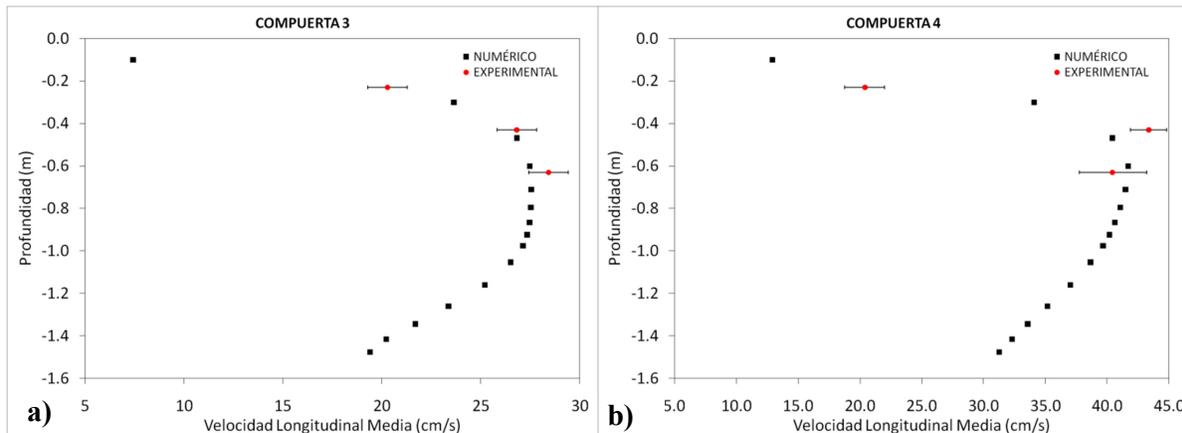


Figura 3.18.- Comparación de los valores de la velocidad longitudinal media del flujo resultantes de modelo numérico y los registrados con ADV en la zona cercana a las compuertas 3 (a) y 4 (b) de la planta (puntos D y E en Figura 2. 2). Condiciones de flujos presentes en la campaña 1.

La Tabla 3.2 resume los máximos valores de energía cinética turbulenta k observados y simulados numéricamente para distintas secciones en la zona de estudio para las condiciones de flujos presentes en la campaña 1. En esta Tabla se incluyen además los intervalos de confianza de los valores de k estimados con la técnica MBB propuesta por García et al. (2006). Los resultados experimentales y

numéricos muestran un comportamiento similar con valores de k un orden de magnitud superior en los flujos en la aproximación a las compuertas de ingreso a los decantadores 3 y 4, y en la sección C-C cuando se los compara con los valores de k en el Canal de Aforo (Sección A-A). Estos elevados niveles de turbulencia en las localizaciones mencionadas podrían afectar al tamaño de las partículas aglutinadas en los procesos de coagulación y floculación, previo ingreso al proceso de clarificación. Continuando con la caracterización del flujo en las secciones B-B, C-C y las compuertas de ingreso 3 y 4, la Tabla 3.3 muestra valores de las escalas de las estructuras coherentes más pequeñas presentes en flujo turbulento (escala de Kolmogorov η), obtenidos de los resultados experimentales y la simulación numérica. Los órdenes de magnitud de estas escalas se estimaron utilizando una relación adimensional entre la tasa de disipación de energía cinética turbulenta ε y la viscosidad del fluido ν : ($\eta = \nu^3/\varepsilon$, García y García, 2006). Los valores de ε fueron a su vez estimados utilizando los valores de k y de las escalas L de los grandes vórtices presentes en el flujo, $\varepsilon = k^3/2L$ (García y García, 2006). Las escalas L fueron estimadas a partir del análisis de correlación de las señales temporales de velocidad de flujo en cada localización. No se incluyen intervalos de confianza en los valores experimentales reportados en la Tabla 3.2 y Tabla 3.3 ya que las relaciones utilizadas para su estimación a partir de datos experimentales proveen solo un orden de magnitud de estos valores.

Tabla 3.2.- Valores de energía cinética turbulenta k máximos observados experimentalmente y simulados numéricamente en distintas secciones de la planta para las condiciones de flujos presentes en la campaña 1.

Sección	Valor experimental de k (cm ² /s ²)	Valor numérico de k (cm ² /s ²)
Canal de Aforo Sección A-A	50±5	50
Sección B-B	128±13	126
Sección C-C	494±44	227
Compuerta 3	369±37	239
Compuerta 4	339±51	476

Tabla 3.3.- Valores de la escala de longitud de Kolmogorov η mínimos observados experimentalmente y simulados numéricamente en distintas secciones de la planta para las condiciones de flujos presentes en la campaña 1.

Sección	Valor experimental de η (mm)	Valor numérico de η (mm)
Canal de Aforo Sección A-A	0.26	0.19
Sección B-B	0.12	0.12
Sección C-C	0.07	0.10
Punto D	0.09	0.11
Punto E	0.15	0.09

Los valores de las escalas de Kolmogorov aquí presentados pueden utilizarse para describir los procesos de agregación y rotura de flóculos cuando las características de los sedimentos en suspensión son conocidos (Tambo y François 1991). Thomas et al. (1999) indican que la relación entre el tamaño de las partículas y la microescala de Kolmogorov también puede utilizarse como un método para determinar los mecanismos de rotura de flóculos. Para flóculos más pequeños que la escala de Kolmogorov, la erosión es predominante mientras que la fractura es más probable para flóculos más grandes que la microescala. En este estudio los valores de η más pequeñas se observan en las secciones B-B y C-C que indica que los flóculos formados en los agitadores mecánicos al ingreso de la planta de tratamiento se romperían en esas secciones. Esta región es crítica y es necesario optimizar su diseño. Esto también puede ser verificado a partir del valor del gradiente medio de velocidad G_{av} , que puede ser estimado en base a los valores de ϵ y la viscosidad cinemática del fluido ν , de la siguiente forma: $G_{av}=(\epsilon/\nu)^{1/2}$. En las secciones A-A y B-B, los valores de G_{av} están en el orden de 20 - 80 Hz, que es aceptable para la floculación de acuerdo a Tambo y François (1991). Sin embargo en la sección C-C, G_{av} muestra valores significativamente mayores. Esto significa que la mezcla turbulencia es muy agresiva y produce la rotura de los flóculos generados en la cámara de mezcla lenta. Spicer et al. (1998) muestra cómo el tamaño de los flóculos formados en el proceso de floculación con un G_{av} medio igual a 50 Hz, decae inmediatamente a un valor mínimo después de 1 minuto cuando las partículas son sometidas a valores de G_{av} de 100, 300 y 500 Hz. Estos últimos, valores similares a los encontrados en las secciones B-B, C-C y las compuertas 3 y 4 de la planta. Por último, la presencia de partículas de menor tamaño y peso genera una baja eficiencia de los decantadores con volúmenes de extracción de flóculos por debajo de los previstos en el diseño.

3.4.1.2.- Campo de velocidad

El análisis de la magnitud de la velocidad superficial del flujo indica que tienen un comportamiento similar en tanto en prototipo como en la simulación numérica. La Figura 3.19 compara los campos de la magnitud de velocidad superficial del flujo obtenidos con la técnica LSPTV y el campo de la magnitud de velocidad del flujo resultante de la simulación numérica para la campaña 3. En ambos caso el dominio corresponde al canal de aforo aguas abajo de la pasarela intermedia y la transición a las dos ramas del canal distribuidor (ver Figura 3.2). Se observa que la magnitud de la velocidad superficial del flujo en prototipo y simulada numéricamente si bien no son del todo similares, presentan rasgos coincidentes: las zonas de estancamiento de flujo (en color azul) y las zonas de aceleración del flujo (en color rojo) se corresponden en las imágenes. Los órdenes de magnitud observados en ambas imágenes son similares.

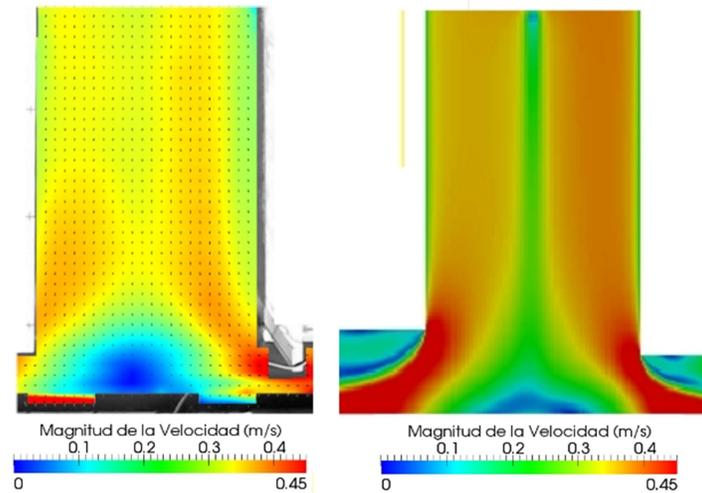


Figura 3.19.- Campos de la magnitud de velocidad superficial obtenidos con la técnica PTV y resultante de la simulación numérica para la campaña 3.

En la campaña 4 se registraron perfiles de velocidad con ADCP. Estos perfiles permiten reconstruir el campo de la magnitud de la velocidad del flujo. La Figura 3.20 muestra el valor de la componente longitudinal de la velocidad del flujo a lo largo del canal de aforo (sección G-G, en la Figura 3.3) obtenida con ADCP y resultados de la simulación numérica.

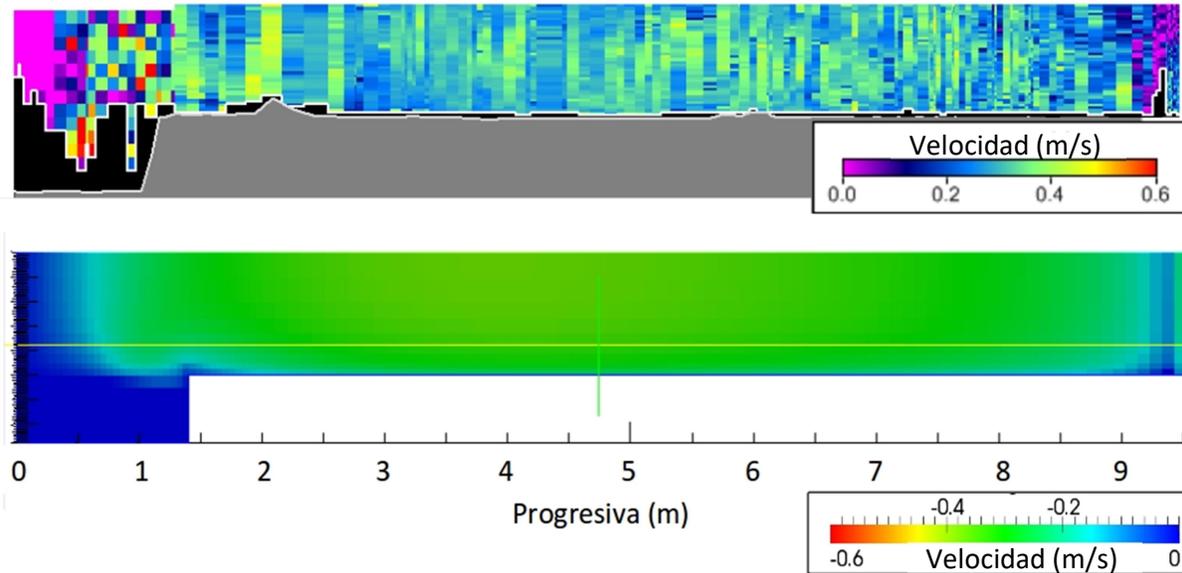


Figura 3.20.- Campo de velocidad longitudinal media del flujo observado y el resultante de la simulación numérica a lo largo de la sección G-G para la campaña 4. Para el modelo numérico los valores negativos corresponden a la dirección predominante del flujo. El cero en el eje "Progresiva" corresponde a la pared del canal distribuidor.

La evolución espacial de los valores de la velocidad longitudinal del flujo observada en el canal de aforo y resultante de la simulación numérica es similar. Entre las progresivas 0 (pared del canal distribuidor) y 0.5m la velocidad observada en la planta tiende a cero, de manera similar se observa en los resultados de la simulación numérica. Esto indica que el modelo numérico

representa correctamente las zonas de estancamiento de flujo. Algo similar ocurre aguas debajo de la pila central de la pasarela (progresiva 9.5m). El ADCP registró perfiles con una frecuencia de 1HZ y el instrumento se movió a una velocidad media de 7cm/s.

En el canal distribuidor se registraron, durante la campaña de medición 3, datos con ADCP a lo largo del canal distribuidor (sección H-H, ver Figura 3.3). La Figura 3.21 compara el campo de la magnitud de velocidad de flujo para toda la rama izquierda (progresivas 0 a 9m) y parte de la rama derecha (progresivas 14m a 20m) del canal distribuidor, y la Figura 3.22 muestra el campo de la magnitud de velocidad de flujo para la rama derecha del canal distribuidor en los 10m restantes. El ADCP registró perfiles con una frecuencia de 1HZ y el instrumento se movió a una velocidad media de 14cm/s.

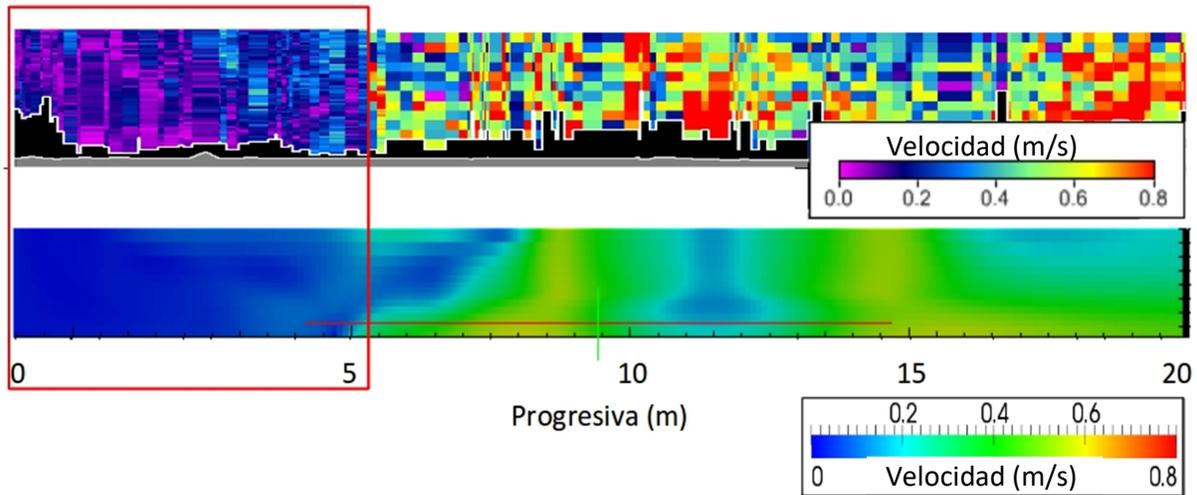


Figura 3.21.- Campo de la magnitud de velocidad de flujo para toda la rama izquierda (progresivas 0 a 9 m) y parte de la rama derecha (progresivas 14 m a 20 m) del canal distribuidor. El cero en el eje "Progresiva" corresponde a la pared final de la rama izquierda del canal distribuidor. Condiciones de flujo presentes en la campaña 3. El recuadro indica las zonas de estancamiento de flujo observadas y simuladas.

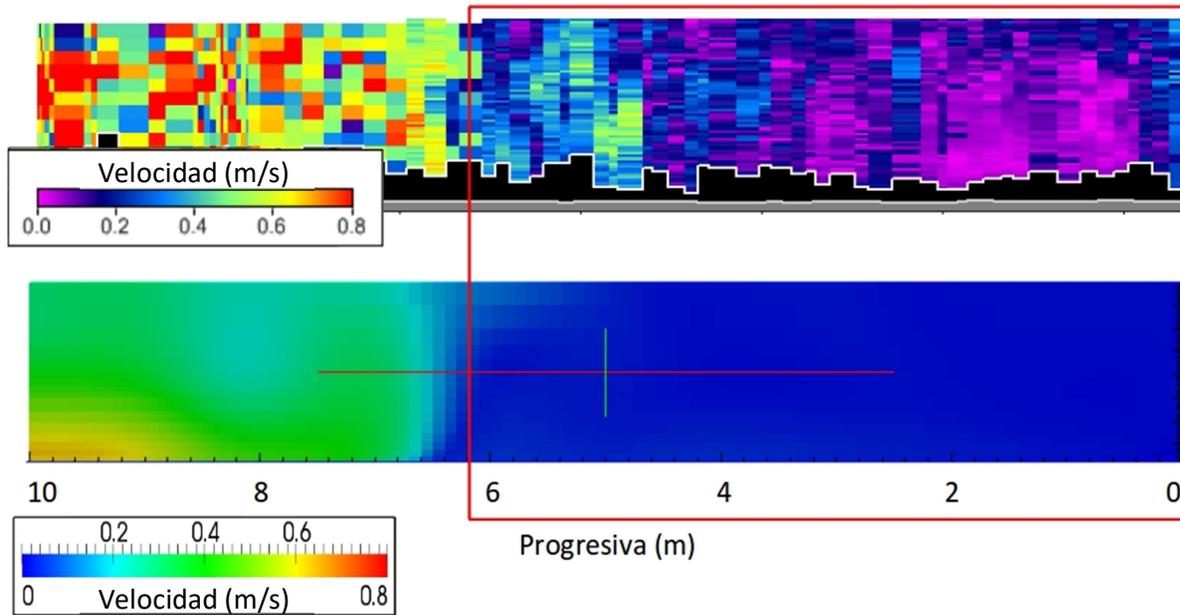


Figura 3.22.- Campo de la magnitud de velocidad de flujo para los 10 m restantes de la rama derecha del canal distribuidor. En ambos casos la escala está en m/s. El cero en el eje "Progresiva" corresponde a la pared final de la rama derecha del canal distribuidor. Condiciones de flujo presentes en la campaña 3. El recuadro indica las zonas de estancamiento de flujo observadas y simuladas.

En las últimas dos figuras se observa un comportamiento similar del campo de flujo observado en la planta y el resultante de la simulación numérica. Las zonas de máxima velocidad (zonas con color verde, amarillo y rojo) y las zonas de estancamiento de flujo (zonas de color azul, ver recuadros rojos en las Figura 3.21 y Figura 3.22) se corresponden. Hay que destacar que las ramas del canal distribuidor tienen una gran región en la que el flujo se estanca (magnitud de velocidad de flujo cercano a cero), 5 m para la rama izquierda (ver Figura 3.21) y 6 m para la rama derecha (ver Figura 3.22).

3.4.2.- Explotación del modelo numérico

La comparación de los resultados experimentales y numéricos desarrollada en la sección anterior, indica que el modelo numérico está validado. A continuación se propone la explotación del modelo numérico evaluando el comportamiento del flujo para diferentes alternativas de operación de la planta, con el fin de optimizar su funcionamiento.

La Planta "Los Molinos" presenta dos formas de operación, alternativas a la habitual. Una de ellas es que la planta opere con 3 decantadores mientras se realiza la limpieza de uno de ellos. La otra alternativa, es que la planta puede operar solamente con los decantadores de la rama izquierda (decantadores 3 y 4, ver Figura 3.1), cerrando las compuertas de los decantadores 1 y 2, y abriendo una compuerta al final de la rama derecha de canal distribuidor transversal como muestra el esquema de la Figura 3.23. El flujo que sale de la rama derecha del canal distribuidor (Compuerta Derecha, en Figura 3.23) se mezcla nuevamente con coagulante para formar flóculos y pasa directamente al proceso de filtrado

sin realizar decantación.

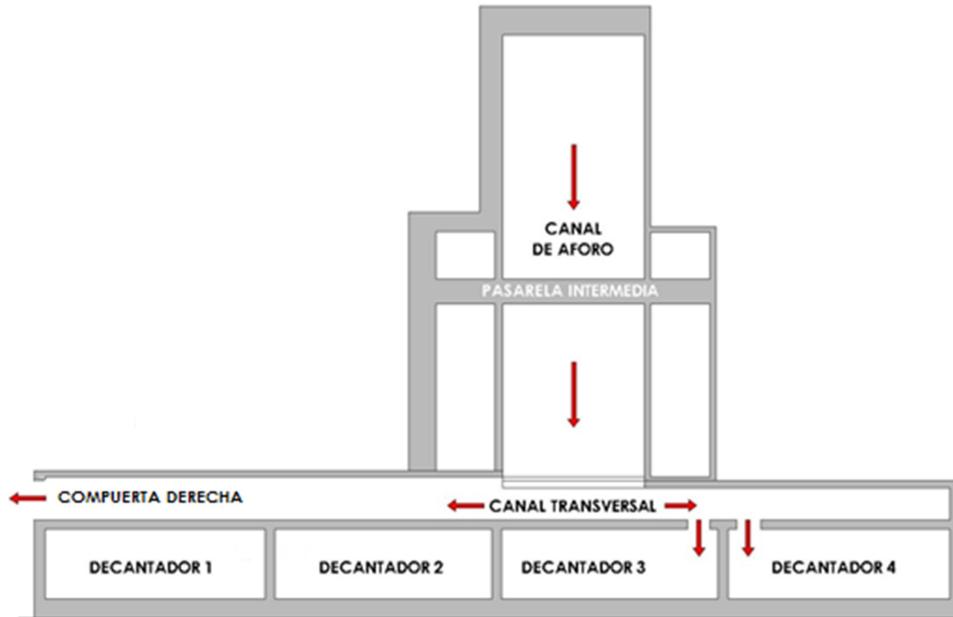


Figura 3.23.- Esquema de la zona que incluye al canal de aforo, canal de distribución transversal, ingreso a los decantadores 3 y 4, y compuerta al final de la rama derecha de canal distribuidor transversal. Planta de tratamiento de agua potable "Los Molinos". Las flechas indican la dirección y sentido del flujo.

En primer lugar se realizaron las simulaciones para la condición de funcionamiento en que la planta opera con tres decantadores y un decantador está fuera de operación (en limpieza). En todas las simulaciones se utilizaron los valores de velocidad, energía cinética turbulenta, tasa de disipación de la energía, y presión observadas en la sección A-A durante la campaña de medición 1 como condiciones de borde para el modelo numérico. Las Figura 3.24, Figura 3.25 y Figura 3.26 muestra los resultados de las simulaciones. En comparación con el comportamiento del flujo cuando la planta opera con los cuatro decantadores, se observa que la magnitud de la velocidad del flujo aumenta y se acentúa la separación del flujo en la rama contraria a la del decantador en mantenimiento. Para las condiciones simuladas, se obtuvieron valores de energía cinética turbulenta del orden de $600 \text{ m}^2/\text{s}^2$ en las ramas del canal distribuidor y del orden de $1000 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ en las compuertas. Estos valores son mayores a los máximos obtenidos en la modelación de la planta operando con los cuatro decantadores (ver Tabla 3.2). En ambas condiciones de operación los valores de energía cinética turbulenta indican que los flóculos alcanzan su menor tamaño en las dos ramas del canal distribuidor y en las compuertas. En base a los resultados, se recomienda realizar las tareas de mantenimiento sobre los decantadores de la misma rama de manera consecutiva.

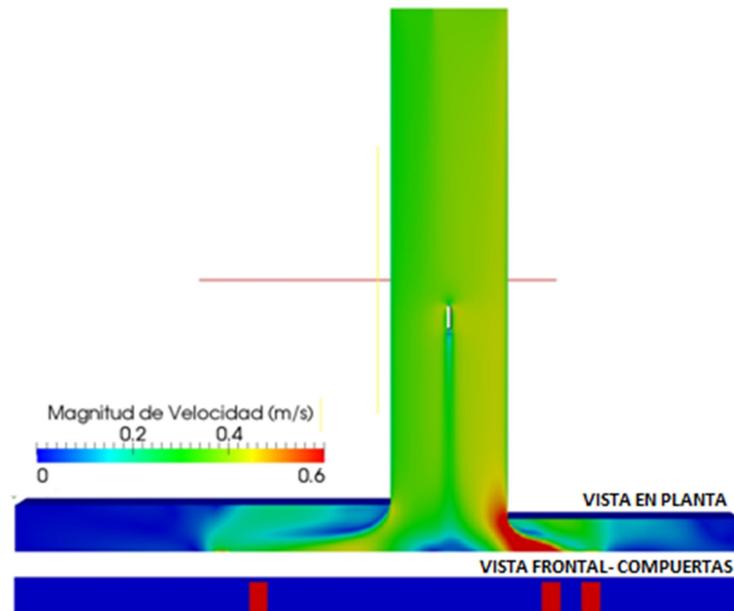


Figura 3.24.- Simulación numérica del flujo cuando el decantador 1 está fuera de operación. VISTA EN PLANTA: Magnitud de la velocidad media del flujo superficial. VISTA FRONTAL-COMPUERTAS: Magnitud de la velocidad media del flujo en las compuertas.

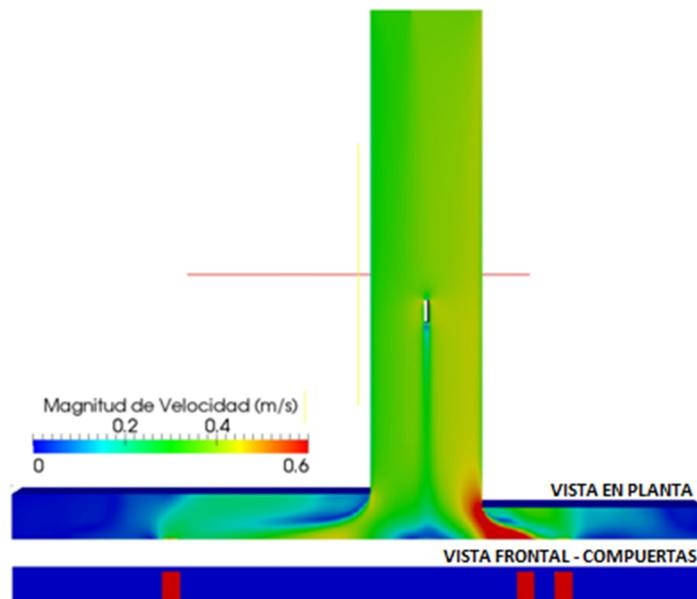


Figura 3.25.- Simulación numérica del flujo cuando el decantador 2 está fuera de operación. VISTA EN PLANTA: Magnitud de la velocidad media del flujo superficial. VISTA FRONTAL-COMPUERTAS: Magnitud de la velocidad media del flujo en las compuertas.

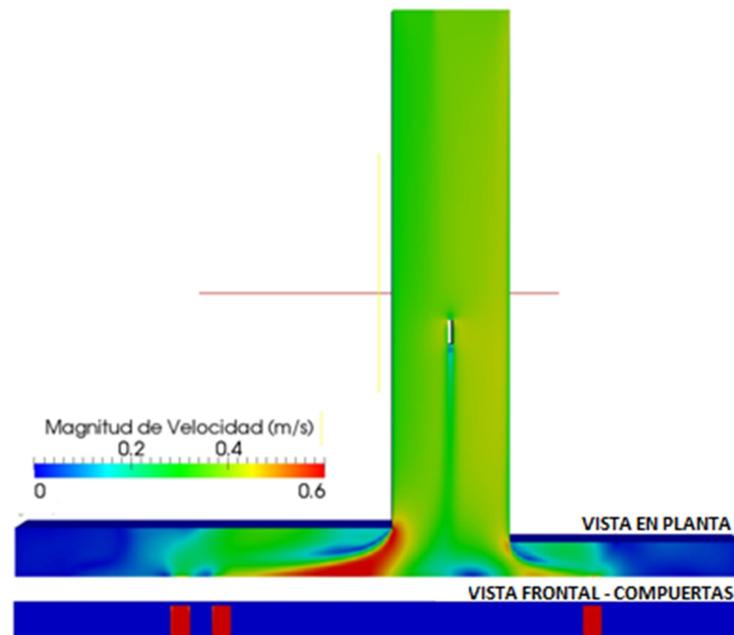


Figura 3.26.- Simulación numérica del flujo cuando el decantador 3 está fuera de operación. VISTA EN PLANTA: Magnitud de la velocidad media del flujo superficial. VISTA FRONTAL-COMPUERTAS: Magnitud de la velocidad media del flujo en las compuertas.

En segundo lugar, se realizó la simulación para la condición en la cual los decantadores de la rama izquierda continúan operando, las compuertas de los decantadores 1 y 2 son cerradas y el flujo sale por una compuerta al final de la rama derecha de canal distribuidor (Compuerta Derecha, en Figura 3.23). La Figura 3.27 muestra el campo de velocidad de flujo resultante de la simulación. Se observa que se acentúa la magnitud de la velocidad y la separación del flujo en la rama derecha del canal distribuidor (sección B-B, en Figura 3.2), la magnitud de la velocidad del flujo tiene valores máximos del orden de 75cm/s, mientras que en la modelación de la planta operando con los cuatro decantadores se obtiene valores máximos de 45cm/s (ver Figura 3.15 a Figura 3.18). Para las condiciones hipotéticas de funcionamiento simuladas, se obtuvieron valores de energía cinética turbulenta del orden de 300 cm²/s² y 350 cm²/s² en las ramas izquierda y derecha del canal distribuidor, respectivamente. En las compuertas 3 y 4 (ver Figura 3.23) se observaron valores de energía cinética turbulenta del orden de 500cm²/s² y 450cm²/s², respectivamente. Y en la compuerta derecha (ver Figura 3.23) se observaron valores de energía cinética turbulenta del orden de 200cm²/s². Comparado con los valores obtenidos en la modelación de la planta operando con los cuatro decantadores (ver Tabla 3.2), se observa una disminución de la de energía cinética turbulenta en la rama izquierda y un aumento en la rama derecha. Las compuertas 3 y 4 operan con el mismo orden de magnitud según se observa en ambas situaciones simuladas. En esta condición de operación los valores de energía cinética turbulenta indican que los flóculos alcanzarían su menor tamaño en las compuertas de ingreso a los decantadores 3 y 4.

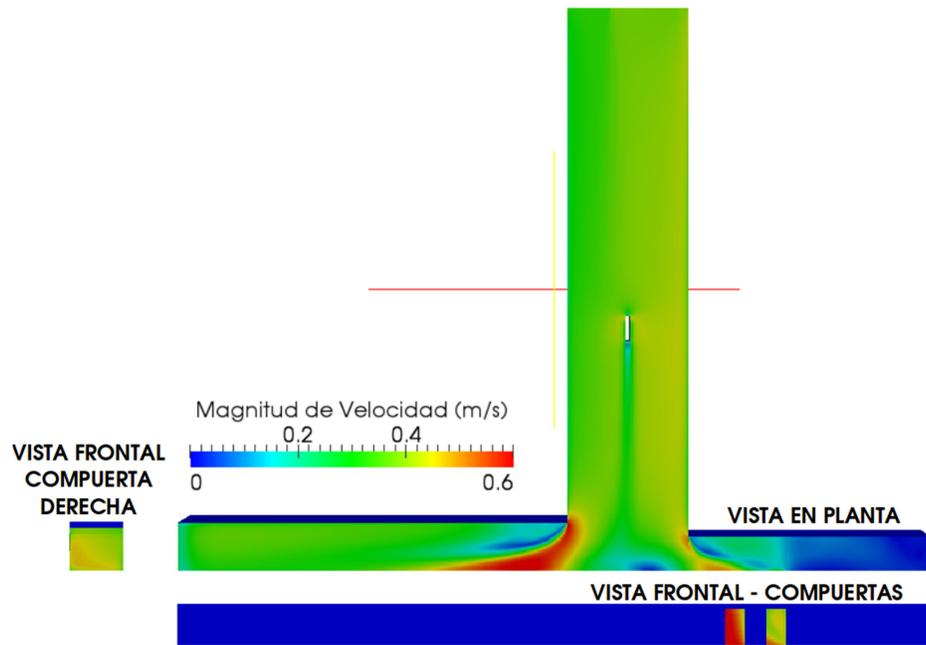


Figura 3.27.- Simulación numérica del flujo con los decantadores 3 y 4 en operación y habilitada la compuerta al final de la rama derecha del canal distribuidor. VISTA EN PLANTA: Magnitud de la velocidad media del flujo superficial. VISTA FRONTAL-COMPUERTAS: Magnitud de la velocidad media del flujo en las compuertas 3 y 4. VISTA FRONTAL-COMPUERTA DERECHA: Magnitud de la velocidad media del flujo en la compuerta al final de la rama derecha del canal distribuidor.

CAPÍTULO IV:
Caracterización hidrodinámica del flujo
turbulento en componentes de la planta de
tratamiento de líquidos residuales de la ciudad
de Córdoba “Bajo grande”.

4.1.- INTRODUCCIÓN

Las obras sanitarias de tratamiento de efluentes son relevantes en las grandes aglomeraciones urbanas. El diseño y evaluación del correcto funcionamiento de este tipo de obras de infraestructura se realiza habitualmente siguiendo criterios definidos en ingeniería sanitaria. Sin embargo, las singularidades hidrodinámicas presentes en el flujo a lo largo del proceso de tratamiento en las distintas estructuras componentes de una planta pueden afectar en gran medida su rendimiento, resultando en un funcionamiento no compatible con el previsto en el diseño sanitarista.

El objetivo primordial del tratamiento de aguas residuales de usos residenciales consiste en eliminar o modificar los contaminantes perjudiciales para la salud humana o en el entorno acuático, terrestre o aéreo. Para proteger el cuerpo receptor se debe controlar la descarga de contaminantes en los mismos, fijando requisitos en cuanto a la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Sólidos en Suspensión (SS) y coliformes. Cuando las aguas receptoras tienen una capacidad asimilativa limitada, contienen nutrientes en exceso, proveen un uso indispensable del agua o sustentan vida acuática valiosa, entonces se hacen necesarios requisitos más estrictos respecto a los afluentes.

En el tratamiento de aguas residuales, la sedimentación primaria elimina solo un tercio de la materia orgánica, por lo cual pocas veces es suficiente por sí sola. Es necesario, agregar un tratamiento secundario que consiste en la oxidación biológica y sedimentación final para eliminar un 80% o 90% de la DBO. Además, el tratamiento químico suele ser necesario para residuos que no son susceptibles de tratamiento por medios biológicos. La desinfección del efluente de las plantas de tratamiento de aguas residuales, generalmente por cloración, es deseable cuando existe un riesgo potencial para la salud. Suele especificarse un remanente de 0.5 mg/L después de tiempo de contacto de 15 a 30 minutos. En ciertas áreas, esta definición empírica de la cloración ha sido reemplazada por el requisito de que los coliformes totales no sean más de 100/mL o 200/mL en el efluente final. Estos estándares de calidad del agua residual a la salida del tratamiento, plantean la necesidad de conocer con exactitud el caudal con el que opera la planta para realizar la correcta dosificación del cloro.

Por otro lado, el requerimiento hidráulico general a tener en cuenta en el diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales es proveer la carga requerida para elevar el flujo de agua residual desde el sistema servido al nivel que permita al flujo moverse por el proceso de tratamiento y ser llevado al cuerpo de agua receptor (Mays, 1999). Por ello el rango de caudales para las plantas de tratamiento es establecido por el diseño hidráulico de la planta de tratamiento. Este diseño debe permitir: 1) la normal operación de la planta cuando el caudal sea significativamente menor que el de diseño, sin que se produzcan la deposición indeseable de sólidos en la cadena de tratamiento; y 2) que las unidades de procesamiento de la planta puedan conducir el máximo caudal sin que se provoque la rotura hidráulica y sin que las características del flujo turbulento afecte los procesos físicos que se desarrollan en la planta. En el marco de que el rango de caudales es variable por el continuo crecimiento de las

ciudades, esta última condición no es tenida en cuenta y flujos turbulentos incompatibles se observan en componentes del tratamiento.

La ciudad de Córdoba, que presenta uno de los mayores crecimientos del país en los últimos años, cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales situada en la zona de Chacra de la Merced, en el extremo este de la ciudad. El cuerpo receptor de los efluentes de esta planta es el Río Suquía. La Figura 4.1 y la Figura 4.2 presentan una imagen y un esquema general de la planta, respectivamente. En las mismas se distinguen dos etapas de procesamiento bien diferenciadas: 1) La etapa de procesamiento de líquidos y 2) La etapa de procesamiento de barros. Las componentes de la planta de tratamiento involucradas en la etapa de procesamiento de líquidos son (ordenados de acuerdo a la secuencia de procesamiento): a) cámara de ingreso; b) nueva unidad de cámara de rejillas y desarenador; c) estación elevadora; d) sedimentadores primarios; e) percoladores primarios; f) percoladores secundarios; g) sedimentadores secundarios; h) cámara de cloración; i) cámara de contacto; j) canal de salida donde está previsto realizar el aforo de los acaudales efluentes. El caudal líquido de diseño de la planta a procesar por las componentes mencionadas anteriormente es de $10000\text{m}^3/\text{h}$ ($2.78\text{m}^3/\text{s}$). Está previsto un bypass en caso de accidentes o imprevistos en la planta que une la cámara de ingreso con la cámara de cloración cuyo caudal de diseño es de $16500\text{m}^3/\text{h}$ ($4.58\text{m}^3/\text{s}$). Las componentes involucradas en la etapa de procesamiento de barros (no analizada en este trabajo) son: digestores, concentradores de barro y playa de secado.



Figura 4.1.- Vista superior de la planta de tratamiento de aguas residuales "Bajo Grande".

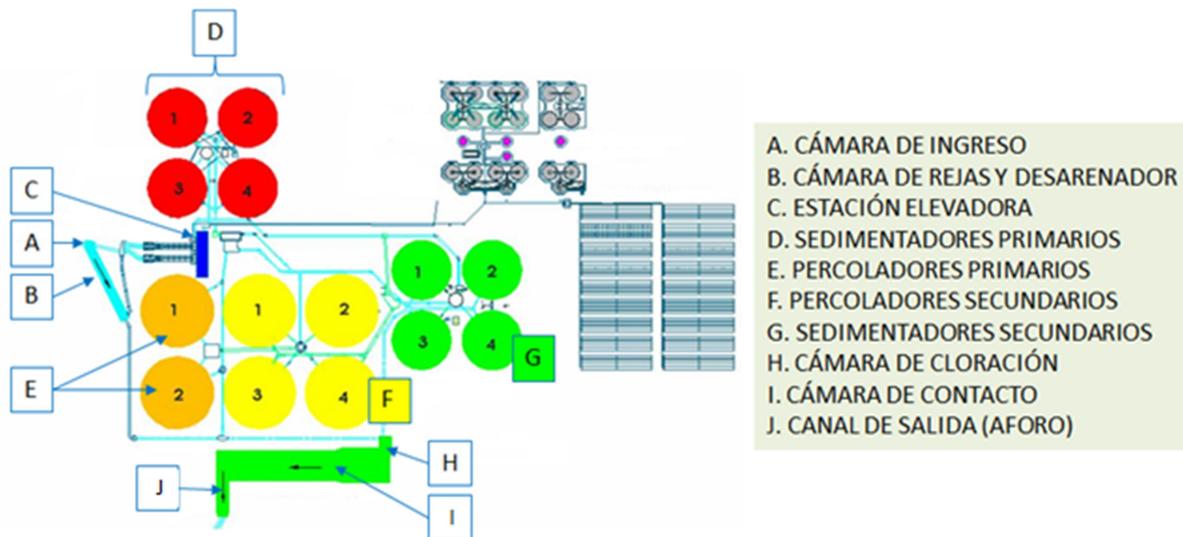


Figura 4.2.- Esquema general de la planta de tratamiento de aguas residuales "Bajo Grande".

Uno de los inconvenientes que tiene esta planta de tratamiento de aguas residuales "Bajo Grande" (o Estación Depuradora de Aguas Residuales, Edar) es que carece de un sistema preciso de aforo de los caudales procesados. Esto es relevante para evaluar la capacidad operativa y definir el rango de operación óptimo de la planta, condiciones que debe contemplar el diseño hidráulico. Además, la falta de un sistema de aforo no permite cuantificar los efluentes y así evaluar los potenciales efectos de la descarga sobre el cuerpo de agua receptor, objetivo principal del sistema de tratamiento.

Esta problemática plantea la necesidad de validar los sistemas de monitoreo indirecto de caudales presentes en la planta. Con este objetivo se realizaron una serie de campañas de medición sobre el canal de aforo en la salida de la planta. Es de destacar, que en todas las campañas de medición se observó la presencia de una fuerte recirculación del flujo sobre la margen izquierda, producto de una separación inducida por un cambio de curvatura abrupto (curva a 180°) a la entrada del canal de aforo (ver Figura 1.3 y Figura 1.4). Además, la capa de corte que limita esta recirculación presenta inestabilidades que se manifiestan como fluctuaciones de baja frecuencia en las velocidades de flujo.

El fenómeno de recirculación se extiende a lo largo de canal de aforo y afecta el área efectiva de flujo del mismo. Por esta razón, fue necesaria una caracterización hidrodinámica del flujo turbulento. En este caso, se utilizó de manera complementaria dos modernas técnicas experimentales: 1) un ADCP que registra perfiles de velocidad en las tres direcciones para toda la columna de agua; y 2) la técnica LSPTV que permite obtener la velocidad media de la superficie del agua. La aplicación complementaria de estas técnicas de velocimetría (las cuales no fueron inicialmente diseñadas para ser utilizadas en plantas de tratamiento) permitió registrar datos de velocidades de flujo con buena resolución espacial y temporal. Los resultados de esta caracterización experimental in-situ del comportamiento del flujo a lo largo del canal de aforo y que incluye los caudales líquidos erogados por la planta se presenta en la sección 4.2.

Por otro lado, la simulación numérica es en la actualidad una de las principales herramientas para el cálculo en la ingeniería hidráulica, dado que permite abordar problemas cuyo estudio no era posible pocas décadas atrás y, además, a lo largo de su desarrollo ha probado ser un método eficaz, preciso, robusto y sumamente flexible. Una alternativa disponible para abordar la caracterización del flujo turbulento es la simulación numérica, y el paquete libre y abierto OpenFoam (OpenCFD, 2014) presenta una gran variedad de esquemas de discretización y solución de problemas relacionados con la Mecánica de los Fluidos Computacional (CFD).

En la sección 4.3 de este capítulo se describe el esquema numérico computacional utilizado para simular el flujo en la zona del Canal de Aforo (incluyendo la caracterización de la zona de recirculación y las inestabilidades de flujo), detallando el modelo matemático y el modelo numérico seleccionado para resolver las ecuaciones que describen el proceso. Se utilizaron tres modelos tridimensionales, dos se basan en las ecuaciones promediadas de Navier-Stokes (RANS, por sus siglas en inglés), y un tercer modelo se basa en la Simulación de Grandes Vórtices (LES).

Por último, las conclusiones son presentadas en la sección 4.4, en base a los resultados de la caracterización hidrodinámica lograda con la aplicación in-situ de modernas técnicas experimentales y de la simulación del flujo turbulento.

4.2.- ESTUDIO EXPERIMENTAL

En total se realizaron tres campañas de medición con el objeto de cuantificar la descargar y caracterizar experimentalmente el flujo de salida en el Canal de Aforo, a la salida del tratamiento. Las tres campañas de medición representan tres condiciones de operación distintas de la planta, la cual carece de un sistema estándar (y preciso) para el continuo monitoreo los caudales de ingreso y egreso en la planta. Esta información es requerida para definir los valores de caudales mínimos, normales y máximos con los que opera la planta. Actualmente, los operadores de la planta realizan una estimación indirecta de caudales procesados por la planta utilizando los valores de frecuencias con las que trabajan las bombas de frecuencia variables de la estación elevadora indicada en la Figura 4.3.

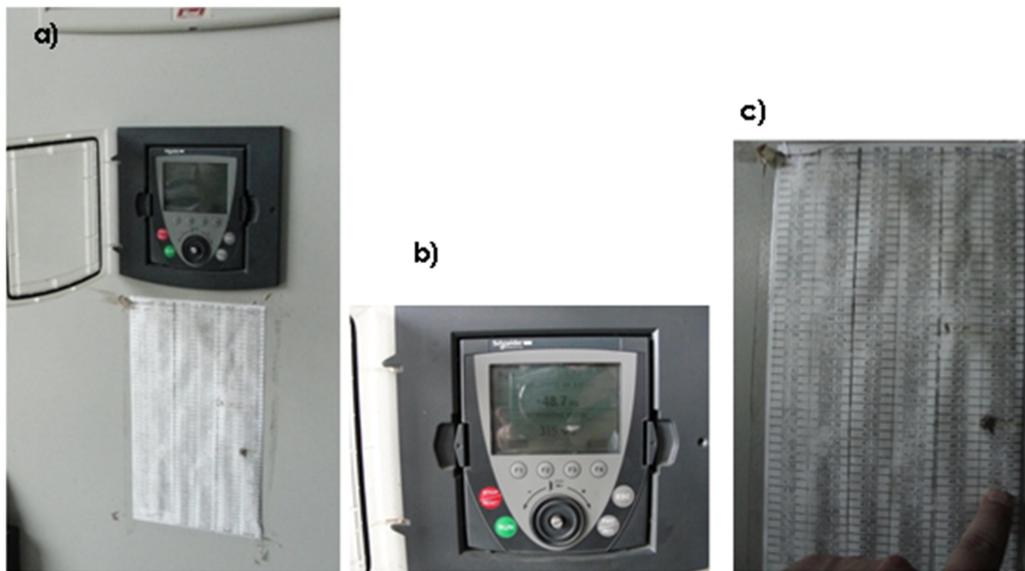


Figura 4.3.- a) Bomba en la estación elevadora; b) Panel digital de la estación elevadora; c) Tabla que vincula la frecuencia de cada bomba con el caudal elevado.

La información disponible para los operadores en forma tabular se muestra en la Figura 4.3c y para esta tesis se ajustó con una función cuadrática que permite evaluar el comportamiento del caudal procesado en función de la frecuencia a la que trabaja cada bomba de frecuencia variable. La ecuación resultante es:

$$Q = 5.42f^2 + 666.2f - 15231 \quad [23]$$

En la ecuación [23] Q es el caudal elevado por cada bomba (en m^3/s) y f la frecuencia (en Hz) con la que trabaja cada bomba de frecuencia variable. Utilizando esta ecuación y los valores de frecuencia monitoreados en la planta durante las tres campañas (dos bombas estaban en funcionamiento con el mismo caudal erogado por cada una de ellas) fue posible determinar la evolución temporal de los caudales estimados durante las tres campañas que se muestra en la Tabla 4.1.

Para validar estas herramientas disponibles en la planta de tratamiento se realizó la cuantificación de caudales durante las tres campañas de medición usando técnicas experimentales avanzadas.

Las mediciones se realizaron en el canal de aforo hacia la salida de la planta de tratamiento de aguas residuales "Bajo Grande" (ver Figura 1.4). El canal que fluye de Sur a Norte aproximadamente tiene un ancho de 6.53m, presenta paredes laterales verticales y está revestido en hormigón. La sección de medición está situada aguas abajo de la Cámara de Contacto, a la altura de la Pasarela B. La Figura 1.4 presenta un esquema en planta (con las dimensiones en metros) del canal de salida y la sección de medición.

Tabla 4.1.- Frecuencias a las que operaba cada bomba y los caudales estimados que erogaba el sistema de bombeo de la estación elevadora (dos bombas) durante las tres campañas de medición.

Campaña	Fecha	Hora	Frecuencia	Q_{bomba}	Q_{sistema} (2 bombas)	Q_{sistema}
			Bomba [Hz]	[m ³ /hora]	[m ³ /hora]	[m ³ /s]
1	15/02/12	09:57:00	41.5	3075.6	6151.2	1.71
		10:15:00	44.0	3584.9	7169.7	1.99
		10:37:00	46.0	3941.3	7882.5	2.19
		11:20:00	45.0	3768.5	7536.9	2.09
		11:35:00	45.0	3768.5	7536.9	2.09
		12:16:00	44.0	3584.9	7169.7	1.99
		12:31:00	44.0	3584.9	7169.7	1.99
2	26/03/12	11:10:00	46.0	3941.27	7882.54	2.19
		12:20:00	47.5	4180.23	8360.46	2.32
		13:40:00	48.7	4353.9	8707.8	2.42
3	23/04/12	11:10:00	47.0	4103.28	8206.56	2.28
		12:00:00	47.0	4103.28	8206.56	2.28
		13:00:00	47.0	4103.28	8206.56	2.28

4.2.1.- Mediciones con el Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP)

La Tabla 4.2 muestra las principales características de las condiciones experimentales evaluadas en el canal de aforo y los parámetros de configuración de registro del ADCP en cada campaña de medición.

Tabla 4.2.-Principales características de las condiciones experimentales evaluadas y parámetros de configuración de registro del instrumento en cada campaña de medición.

Campaña	Fecha	Profundidad del flujo [m]	Frecuencia de registro [Hz]	Máximo nro. de celdas en la vertical	Nro. medio de perfiles registrados en c/transecta	Cantidad de cruces (transectas)
1	15/02/12	0.63	1	21	102	20
2	26/03/12	0.77	1	28	97	12
3	23/04/12	0.81	1	30	109	16

En las campañas se actualizó el software (RiverSurveyour Live v.2.00) y firmware (RiverSurveyour firmware v1.0) del instrumental de acuerdo a las recomendaciones sugeridas por YSI/Sontek. Una de las principales mejoras incluidas en la mencionada actualización es la incorporación del algoritmo "SmartPulse" el cual, en base a la profundidad, velocidad y niveles de turbulencia del flujo, adapta el esquema de pulso acústico para esas condiciones con el fin de proveer la máxima resolución de datos de velocidad, con tamaños de celda tan pequeños como 2cm. La selección del esquema óptimo se realiza automáticamente. Así el máximo número de celdas muestreadas en la vertical fue 30 para la campaña 3, que presentó la mayor profundidad de flujo. En todos los casos se utilizó como sistema de referencia para evaluar la posición de la plataforma móvil el método de seguimiento del fondo ("BottomTrack"). Además en todos los casos se descartó el 10% más profundo del cada perfil para evitar considerar efectos del fondo en el pulso acústico. Para estimar los caudales en la regiones no medidas del flujo en la parte superior (debido a la sumergencia del

instrumento) e inferior (citada anteriormente) se ajustó una ley potencial de velocidades sobre todo el perfil de velocidades (exponente = 1/6). Por otra parte, los caudales no medidos en la margen derecha e izquierda se estimaron utilizando el método recomendado por el software para márgenes verticales.

Un análisis preliminar de las transectas muestreadas en el canal de aforo indica que el ancho efectivo de flujo es variable entre una transecta y otra. Se observó que la localización del punto de velocidad nula con respecto a la margen izquierda del canal varía su posición más de un metro entre transectas, mostrando de esta forma la fluctuación de la capa de corte entre el flujo efectivo y la zona de recirculación. Esta fluctuación genera incertidumbres en la determinación del caudal desde plataformas móviles (Tarrab et al. 2012) y es por ello que se realizaron múltiples transectas en lugar de las 4 generalmente recomendadas para estimar caudal. Finalmente, el caudal es calculado como el promedio de los caudales de las múltiples transectas: 20, 12 y 16 en las campañas 1, 2 y 3 respectivamente. El caudal se determinó como un valor promedio de esos cruces y minimizar la incertidumbre asociada a la determinación experimental.

El ADCP tiene la capacidad de registrar un perfil de velocidad con una frecuencia de 1Hz. En las campañas 2 y 3, se utilizó el ADCP ubicado a la altura de la pasarela B en el centro del canal de aforo sobre una plataforma fija (Figura 1.4) para registrar una señal de velocidad de larga duración, en cada campaña. Estas señales de velocidad permiten completar la caracterización del flujo turbulento en el canal de aforo. En base a esto, se realizó un análisis de las dos series temporales con el programa TUDE, desarrollada por el grupo de trabajo (García et al. 2006). Este permite caracteriza un flujo turbulento mediante parámetros representativos. TUDE son las siglas en inglés de Descripción de la Turbulencia, incluyendo análisis de Incertidumbre de los parámetros. Este programa calcula para las tres componentes de velocidad: 1) Parámetros estadísticos (velocidad media, desvío estándar, varianza, covarianza, y los coeficientes de asimetría, kurtosis, etc); 2) Espectro de energía en el dominio de la frecuencia a partir de la función periodogram; 4) Función de Autocorrelación para cada componente de velocidad usando productos y usando Transformada Rápida de Fourier inversa a partir del espectro corregido por ruido; entre otros.

4.2.2.- Mediciones con la técnica de Velocimetría por Impágenes de Partículas y Seguimiento de Partículas

En los ensayos realizados sobre el canal de aforo de "Bajo Grande", se utilizó una cámara cuya resolución de video es de 640x480 pixeles y frecuencia de captura de imágenes de 30 Hz (30 fps).

En la implementación de la técnica fue imposible lograr un ángulo recto entre el eje perpendicular a la lente y el plano de la superficie de medición, por lo que fue necesario rectificar las imágenes (ver Figura 4.4). Para la rectificación se relevaron una serie de puntos fijos sobre las márgenes del canal de aforo dentro del área de filmación que se utilizaron como referencia (ver Figura 4.5).

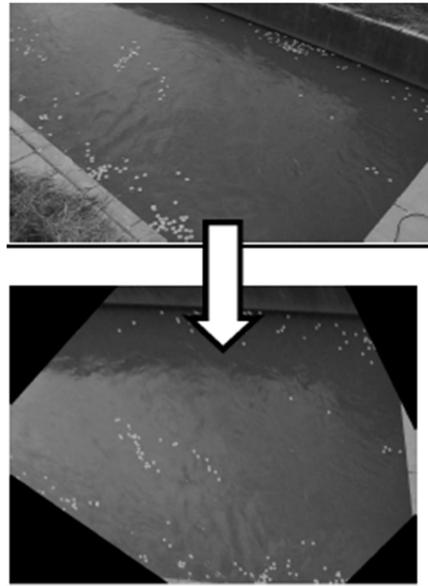


Figura 4.4.- Imagen rectifica del canal de aforo de la planta depuradora de aguas residuales "Bajo Grande".



Figura 4.5.- Imagen de Bajo Grande con los puntos de referencia reales marcados.

En esta tesis se realizaron pruebas en laboratorio para determinar la configuración y material óptimos que conformen las partículas trazadoras utilizadas en la implementación de la técnica LSPIV. Luego de ensayos, se optó por elementos formados por dos tapas de plástico abrochadas entre sí de 63 mm diámetro (ver Figura 4.6), logrando cierto peso de forma tal que la acción del viento no modifique su velocidad, y al mismo tiempo manteniendo la flotabilidad y constituyendo partículas simétricas respecto de sus dos caras. Los motivos de la elección fueron fundamentalmente su visibilidad y bajo costo.

Las partículas trazadoras fueron sembradas manualmente desde aguas arriba a la sección de medición para lograr una distribución homogénea en la superficie del flujo.

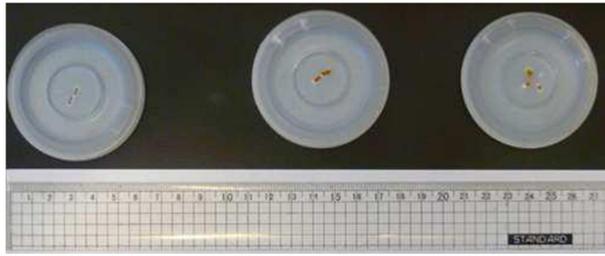


Figura 4.6.- Partículas utilizadas en el flujo durante los experimentos en la planta de tratamiento de líquidos cloacales de Bajo Grande. Diámetro de 65 mm.

4.3.- SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL FLUJO TURBULENTO

La implementación del modelo numérico fue del tipo tridimensional para simular las condiciones del flujo en la zona de estudio y detectar zonas de conflicto como zonas de recirculación, y su interacción con la zona de flujo efectivo. Se utilizó un modelo RANS y los cierres para la turbulencia $k-\epsilon$ estándar y $k-\omega$ SST.

Se realizó una primera simulación para el dominio que comprende la totalidad de la Cámara de Contacto y el Canal de Aforo. Esta simulación se realizó con una malla de volúmenes de tamaño uniforme del orden de 5 cm. Una vez lograda la solución del estado estacionario, se procedió a recortar el dominio para refinar la malla en la zona de interés y se modeló el tramo final de la Cámara de Contacto y el Canal de Aforo. Los resultados de la primera simulación se utilizaron como condición de borde a la entrada de la simulación de detalle. Esta última simulación utiliza una malla de volúmenes de tamaño variable. Lejos de la zona de separación y recirculación del flujo se utilizaron volúmenes de 2cm de lado, y en la zona con mayores gradientes de velocidad se utilizaron volúmenes de 3mm de lado. En la Figura 4.7, se muestra el dominio y el detalle de la resolución en la zona cercana a la curva de 180°. Se utilizó la aplicación blockMesh de OpenFoam® para resolver el mallado del dominio.

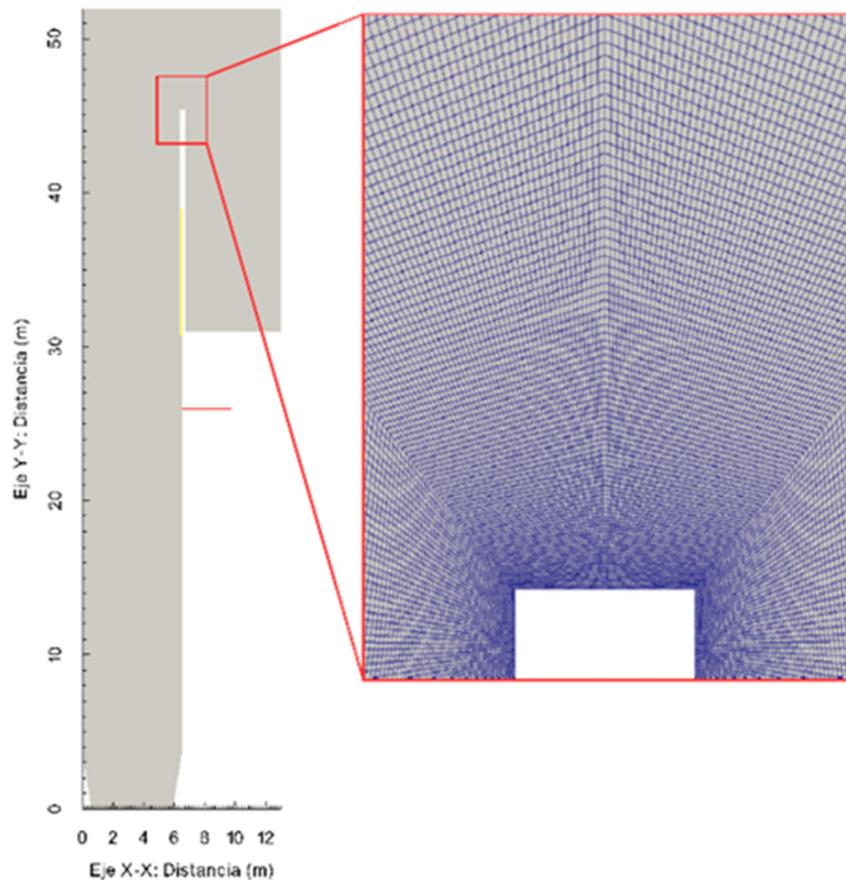


Figura 4.7.- Dominio de la simulación y detalle de la resolución de la malla.

El esquema numérico, para ambos modelos de cierre, requiere establecer condiciones iniciales y de borde para las variables fundamentales: presión (p), velocidad media (U en sus tres componentes), Energía cinética turbulenta (k), Disipación de Energía cinética turbulenta (ϵ) y viscosidad turbulenta (ν_t). Se establecieron con valores iniciales iguales a cero las variables en todo el dominio salvo las zonas donde se establecieron condiciones de borde específicas (ver Tabla 4.3).

Tabla 4.3.- Condiciones de borde del esquema numérico RANS, simpleFoam con modelo de cierre turbulento: a) k - ϵ estándar; y b) k - ω SST.

Superficie	U	p	$k, \epsilon, \omega, \nu_t$
Entrada	Velocidad media. Calculada con la relación caudal/área de la sección	Gradiente nulo	Valores estimados en función de la velocidad media, y las características geométricas de la sección
Salida	Gradiente nulo	presión estática media	Gradiente nulo
Paredes/Fondo	Cero	Gradiente nulo	$kqRWallFunction^{a,b}$ \epsilonWallFunction^a \omegaWallFunction^b $\nuWallFunction^{a,b}$
Superficie Libre	Superficie rígida sin esfuerzos de corte (slip)	Gradiente nulo	Gradiente nulo

Es necesario aclarar la elección de la condición del borde en la superficie libre. En prototipo la superficie libre no presenta variaciones de nivel y en modelo numérico se impuso una superficie rígida sin esfuerzos de corte para que no afecte al flujo interno (la condición slip en inglés). De esta manera es posible simplificar el esquema de modelación de dos fases (agua-aire) simulando la superficie libre a otro a simple fase (agua). Esta simplificación permite reducir el esfuerzo computacional necesario y trabajar con un esquema de modelación menos complejo respecto a las condiciones de borde, parámetros físicos y ecuaciones a resolver.

4.3.1.- Simulación de los Grandes Vórtices (LES)

Al igual que en el caso anterior el código computacional utilizado para resolver numéricamente las ecuaciones de Navier-Stokes pertenece al paquete libre y abierto OpenFOAM®. El modelo LES se implementó sobre el mismo dominio pero con una malla en la que se densificó la resolución en la zona de separación del flujo (ver Figura 4.8).

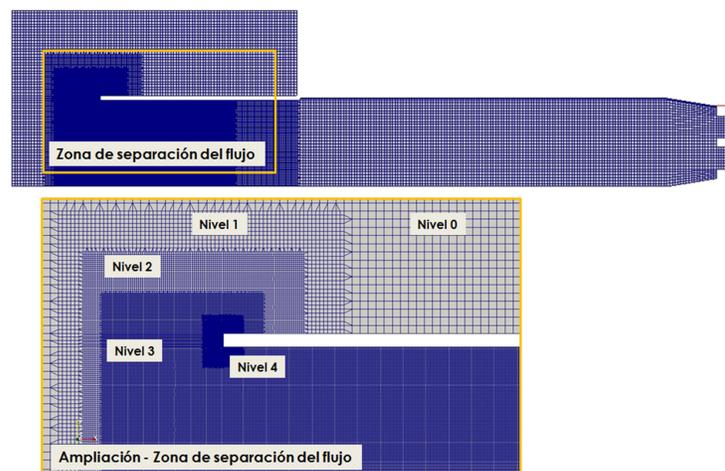


Figura 4.8.- Resolución del mallado. Acercamiento y detalle de la zona de separación del flujo.

En la imagen de acercamiento a la zona de separación del flujo se distinguen cinco niveles de resolución de la malla: el nivel 0 corresponde a hexaedros de 20cm de lado y cada incremento de nivel subdivide al hexaedro en 8 volúmenes iguales, hasta llegar al nivel 4 que corresponde a un hexaedro de 1.125cm de lado. Además, se subdividieron los elementos cercanos a la pared donde se produce la separación del flujo logrando capas de hasta 3mm aproximadamente. Se utilizaron las aplicaciones blockMesh y snappyHexMesh de OpenFoam® para resolver el mallado del dominio.

La malla finalmente utilizada se conformaba por 4.653.352 hexaedros y 14.488 poliedros. Luego de inicializado el flujo una simulación de 4 minutos demoró 55.5 horas. El cálculo se paralelizó en 32 cores de procesadores disponibles en el Cluster Mendieta del Centro de Computación de Alto Desempeño (CCAD) de la Universidad Nacional de Córdoba.

Por último, es necesario aclarar que las condiciones de borde empleadas con similares a las presentadas en la Tabla 4.3.

4.4.- RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.4.1.- Resultados experimentales

En primera instancia se validó el sistema de estimación indirecta de caudales utilizado actualmente en la planta (basado en la frecuencia con la que trabajan las bombas de frecuencia variable de la estación elevadora) a partir del contraste con los resultados del trabajo experimental realizado in situ en el cual se cuantificaron los caudales líquidos erogados por la planta durante las campañas de aforo.

Las Figura 4.9.- Campo de velocidad longitudinal resultante del promediado de las 20 transectas realizadas en la campaña 1. La progresiva 0 corresponde a la margen izquierda. Figura 4.9, Figura 4.10 y Figura 4.11 muestran la distribución en la sección transversal de las velocidades de flujo como resultado del promediado de las transectas realizadas en cada campaña (ver Tabla 4.2). En todas las campañas, se nota un importante cambio en la velocidad longitudinal a lo ancho de la sección. En la margen derecha la velocidad toma valores del orden de 1m/s, el valor positivo es en el sentido de la descarga al Río Suquia, mientras que sobre la margen izquierda existen valores negativos y del orden de 0.4m/s. Esto último, indica una fuerte recirculación en el canal de aforo.

En las campañas 1 y 2 la recirculación se extiende desde la margen izquierda del canal hasta las progresivas 2m y 1.8m, respectivamente. En la campaña 3 la recirculación llega hasta la progresiva 1.5m. Es decir, para las condiciones monitoreadas solo entre un 70% y 80% de la sección aporta al caudal de salida.

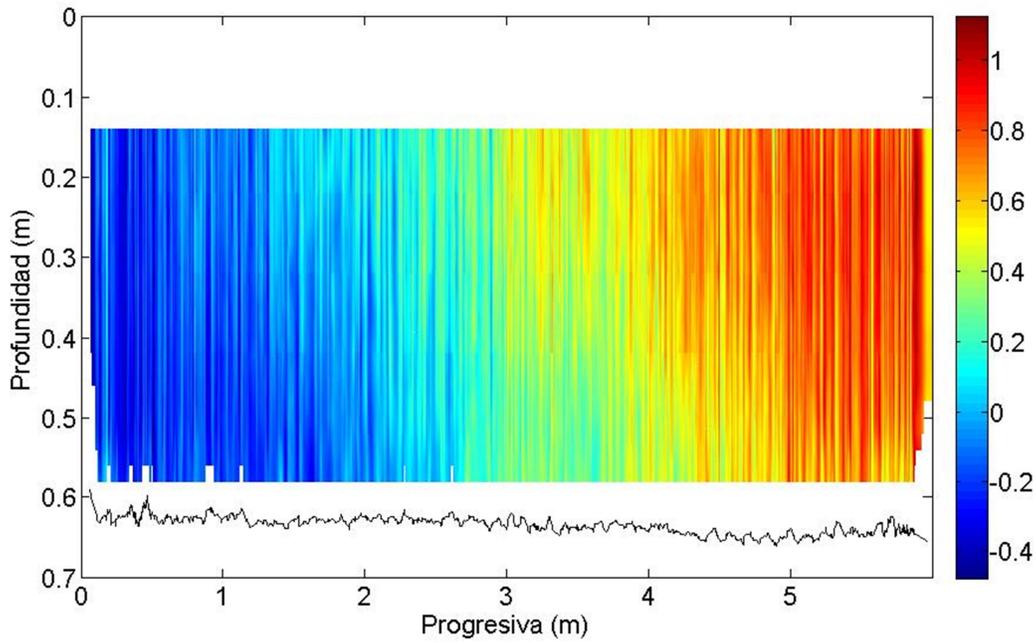


Figura 4.9.- Campo de velocidad longitudinal resultante del promediado de las 20 transectas realizadas en la campaña 1. La progresiva 0 corresponde a la margen izquierda.

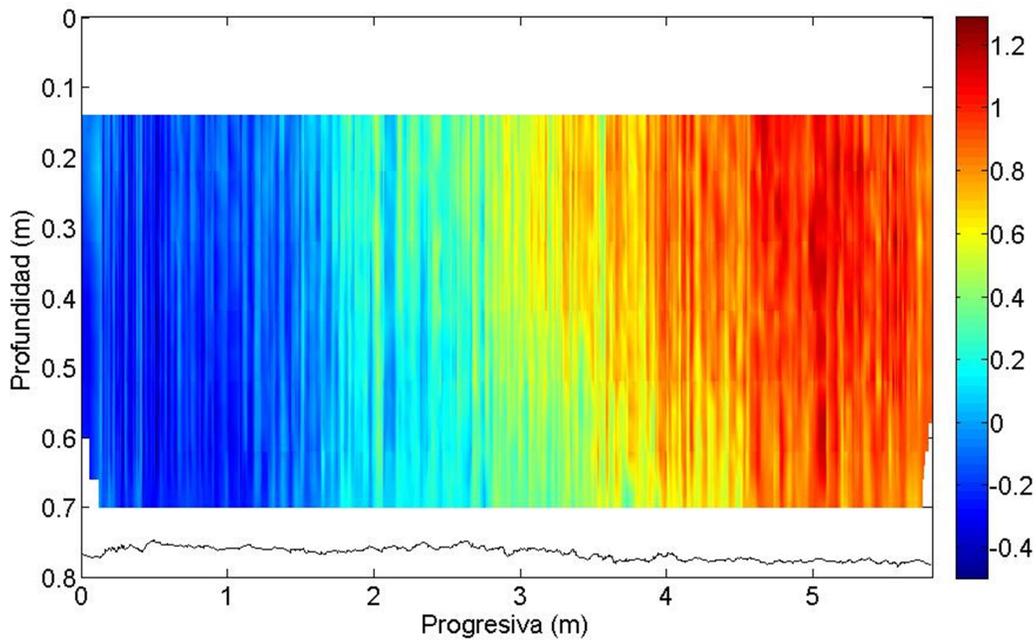


Figura 4.10.- Campo de velocidad longitudinal resultante del promediado de las 12 transectas realizadas en la campaña 2. La progresiva 0 corresponde a la margen izquierda.

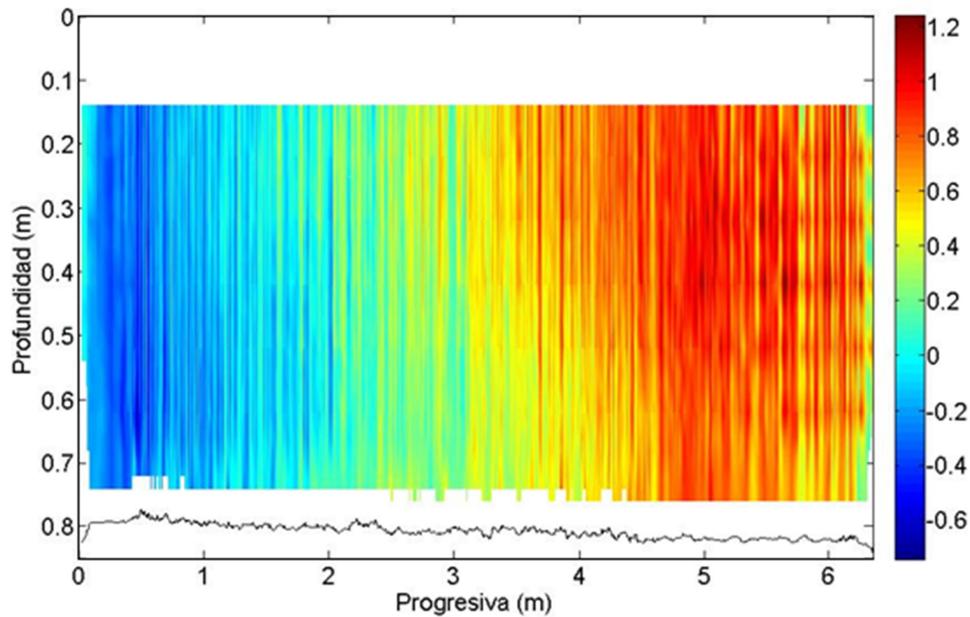


Figura 4.11.- Campo de velocidad longitudinal resultante del promediado de las 16 transectas realizadas en la campaña 3. La progresiva 0 corresponde a la margen izquierda.

La Figura 4.12 muestra la variación del ancho efectivo de flujo en el canal de aforo en función del caudal registrado para las tres campañas de medición. En la figura se puede observar que el ancho efectivo de flujo aumenta con el caudal. En la campaña 3 el caudal registrado es cercano a la condición de diseño y se observa que el 80% de la sección aporta caudal a la salida.

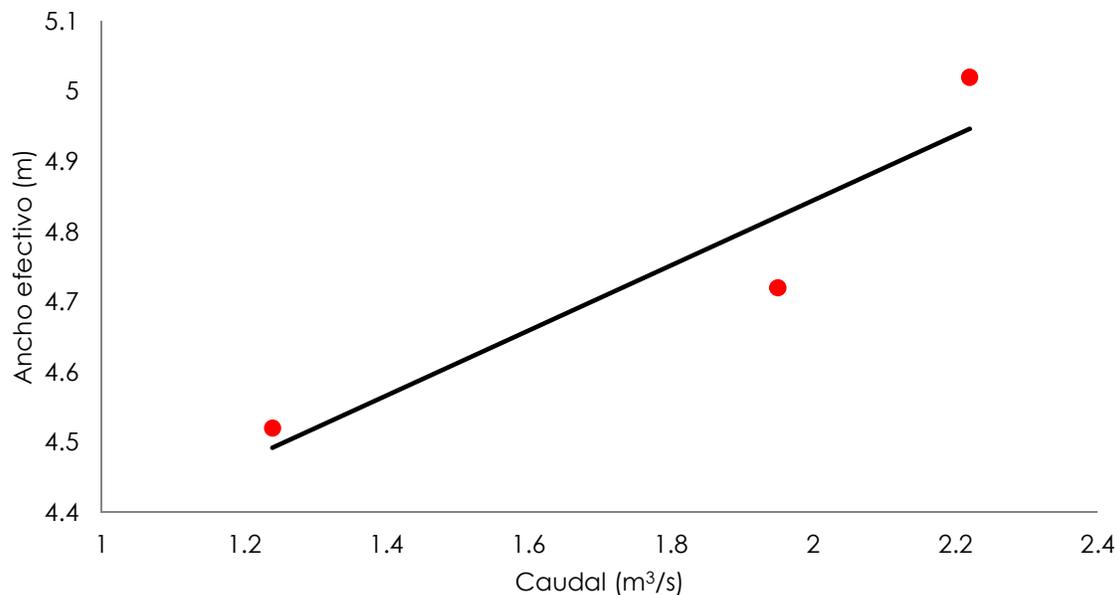


Figura 4.12.- Variación del ancho efectivo de flujo en el canal de aforo en función del caudal registrado para las tres campañas de medición.

Los resultados hasta aquí presentados indicarían que cuando la planta opera con caudales menores a la condición de diseño las velocidades en el canal de aforo son menores y el efecto de inestabilidades en el flujo es mayor. Mientras que

cerca de la condición de diseño aumentan las velocidades de flujo y las fuerzas inerciales, y el efecto de las inestabilidades en el flujo es menor.

Por otro lado, la Tabla 4.4 muestra la correspondencia entre los caudales procesados por la planta estimados experimentalmente utilizando ADCP y utilizando la estimación indirecta realizada por los operadores de la planta utilizando la frecuencia con la que trabajan las bombas del sistema de bombeo de la estación elevadora.

Debido a la presencia de la zona de recirculación y a las inestabilidades (fluctuaciones de baja frecuencia) es que fue necesario aumentar significativamente el número de transectas o cruces con el instrumento. Los coeficientes de variación de los caudales reportados (que representan la incertidumbre de los caudales observados) están incluidos en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4.- Comparación de los caudales estimados experimentalmente utilizando ADCP y utilizando la estimación indirecta.

Campaña de medición	Fecha	Profundidad de Flujo [m]	Q sistema de Bombeo [m ³ /s]	Q _{adcp} [m ³ /s]	Error relativo [%]
1	15/02/12	0.63	2.06	1.24	67
2	26/03/12	0.77	2.31	1.95	19
3	23/04/12	0.81	2.28	2.22	3

En general el uso de información reportada por el sistema de bombeo en la planta durante las tres campañas de medición sobrestima los caudales procesados por la planta. Sin embargo se observa un buen acuerdo entre los valores de caudal estimados durante la campaña 3 por ambos sistemas de monitoreo (sistema de bombeo y ADCP). Las diferencias relativas observadas (tomando como referencia los caudales medidos con ADCP) en esa campaña fueron menores al 3%. Se observa una mayor diferencia para los caudales de flujo más bajos ya que las mayores diferencias se observaron para las campañas 1 (alrededor del 67%) mientras que para la campaña 2 la diferencia relativa fue alrededor del 19%. Los caudales reportados por el sistema de bombeo presentan una incompatibilidad con la evolución de las profundidades de flujo: La campaña 2 que de acuerdo al sistema de bombeo presenta el mayor caudal, presenta menor profundidad de flujo que las condiciones experimentales observadas en la campaña 3.

Adoptando como válidos los caudales obtenidos experimentalmente utilizando ADCP y teniendo en cuenta que el caudal líquido de diseño de la planta a procesar por las distintas componentes involucradas en el procesamiento de líquidos es de 10000m³/h (2.78m³/s), se puede afirmar que la planta estuvo trabajando a 44%, 70% y 80% de su capacidad durante las campañas 1, 2 y 3 respectivamente.

Cerca de la sección de aforo con ADCP (Pasarela B) se implementó la técnica LSPTV y se obtuvieron campos de velocidad superficial del flujo: con el procesamiento de imágenes mediante el programa PTVlab. La Figura 4.13 muestra la componente longitudinal del vector velocidad de flujo en el plano de la superficie libre del canal de aforo, para dos instantes.

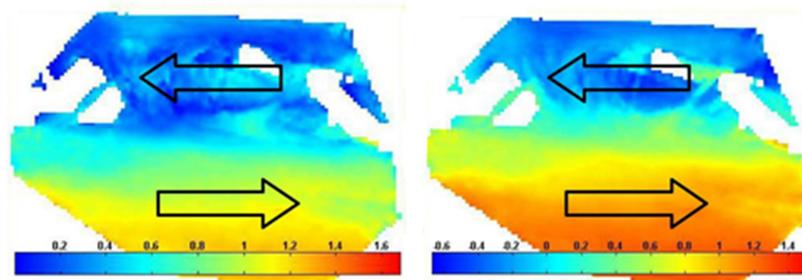


Figura 4.13.- Componente longitudinal del vector velocidad de flujo en el plano de la superficie libre del canal de aforo, para dos instantes. Campaña 2. Velocidades en m/s.

En las imágenes de la Figura 4.13 el sentido principal del flujo es de izquierda a derecha. Se observa que un sector del canal de aforo presenta velocidades negativas (color azul) del orden de 20cm/s a 60cm/s. Esto es consistente con los resultados reportados por el ADCP en la sección de aforo (ver Figura 4.9, Figura 4.10 y Figura 4.11).

Además, el post-procesamiento de las imágenes rectificadas permitió obtener las líneas de corriente (líneas en color amarillo en Figura 4.14). Es posible observar que las líneas próximas a la margen derecha del canal (margen superior en la imagen en planta de la Figura 4.14) tienden a ser rectas, mientras que hacia el centro del canal comienzan a curvarse. En el centro de la sección del canal se produce una recirculación del flujo hacia aguas arriba y en el extremo de la margen derecha las líneas de corriente de nuevo tienden a rectificarse pero en sentido contrario (valores negativos en la Figura 4.13).

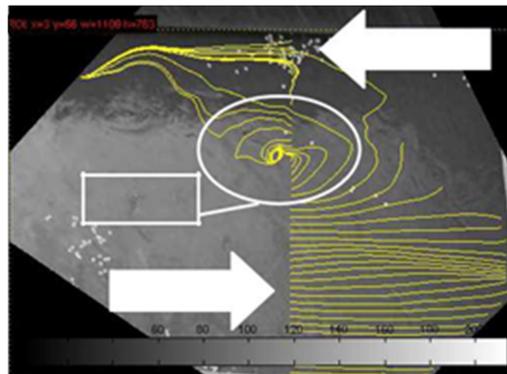


Figura 4.14.- Líneas de corriente obtenidas con el software PTVLab.

Lo anterior hasta aquí presentados indican la validez de la técnica LSPIV y el programa PTVlab para la caracterización del flujo superficial. Esto es importante ya que es la primera vez que se aplica LSPTV en el canal de aforo de una planta de tratamiento. Además, es necesario destacar que el desarrollo de una interfaz gráfica (PTVlab) ha facilitado y reducido significativamente el tiempo de procesamiento digital de las imágenes en la técnica LSPTV.

En las campañas de medición 2 y 3, se realizaron mediciones con el ADCP en un punto fijo situado en el centro del canal de aforo, aguas abajo de la pasarela B (Figura 1.4). Las Figura 4.15 y Figura 4.16 muestran la serie temporal de la velocidad longitudinal obtenida para las dos campañas. Es necesario aclarar que

en ambos casos la velocidad corresponde al valor medio del perfil vertical. En las figuras se muestra solo un periodo de 600 segundos.

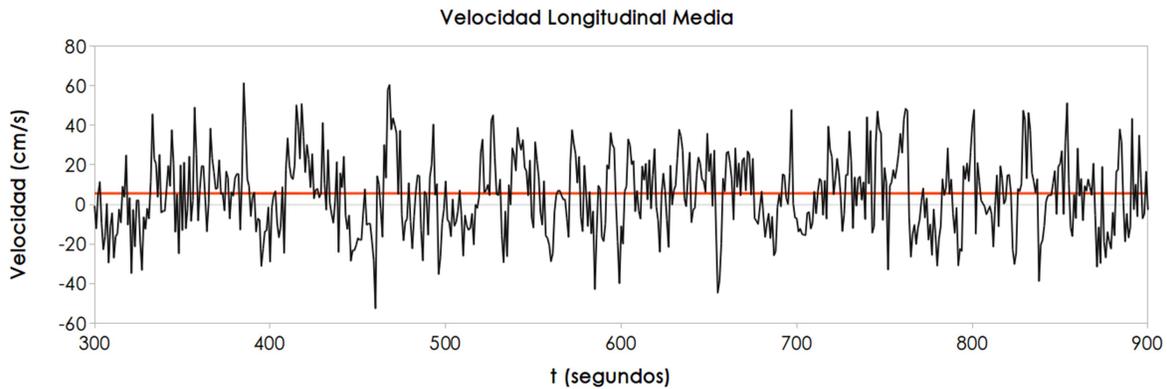


Figura 4.15.- Serie temporal de velocidad longitudinal media en la vertical para $t = [300-900]$. Medición realizada en la campaña 2, en el centro del canal de aforo en la Pasarela B.

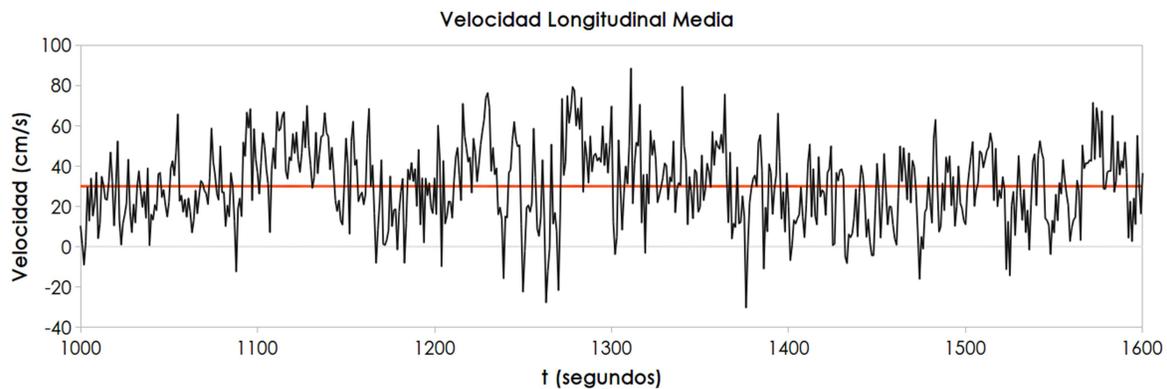


Figura 4.16.- Serie temporal de velocidad longitudinal media en la vertical para $t = [1000-1600]$. Medición realizada en la campaña 3, en el centro del canal de aforo en la Pasarela B.

En las Figura 4.15 y Figura 4.16, la línea roja indica el valor promedio de la serie y la línea gris indica el valor de velocidad igual a cero. Ambas series muestran fluctuaciones significativas y la oscilación de la capa de corte ya que en esa localización los valores de velocidad longitudinal media presentan valores positivos y negativos. Ese fenómeno de oscilación de la velocidad longitudinal media entre valores positivos y negativos se extiende a todo el perfil vertical de velocidad. Las Figura 4.17 y Figura 4.18 muestran las fluctuaciones de la velocidad longitudinal en los perfiles registrados con ADCP para las campañas 2 y 3 a lo largo del tiempo. La velocidad transversal tiene un comportamiento similar, que se muestran en las Figura 4.19 y Figura 4.20 (que corresponden a las campañas 2 y 3, respectivamente) donde se puede apreciar el cambio de signo de la velocidad transversal en toda la profundidad del canal de aforo.

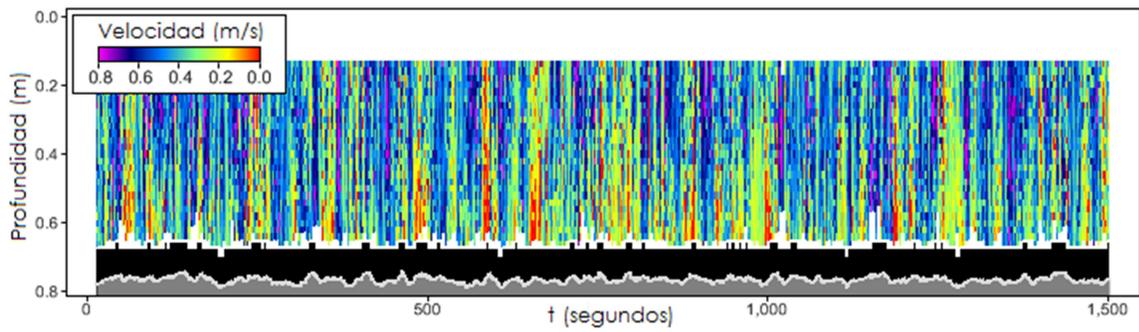


Figura 4.17.- Velocidad longitudinal. Serie temporal de perfiles registrados con ADCP durante la campaña 2 en el centro del canal de aforo en la Pasarela B.

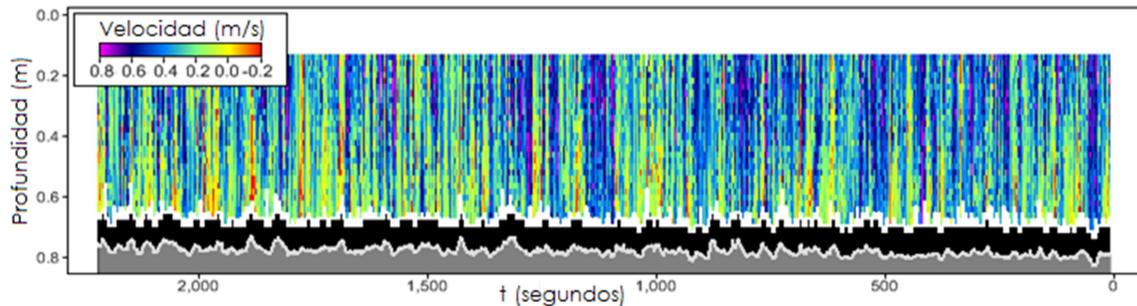


Figura 4.18.- Velocidad longitudinal. Serie temporal de perfiles registrados con ADCP durante la campaña 3 en el centro del canal de aforo en la Pasarela B.

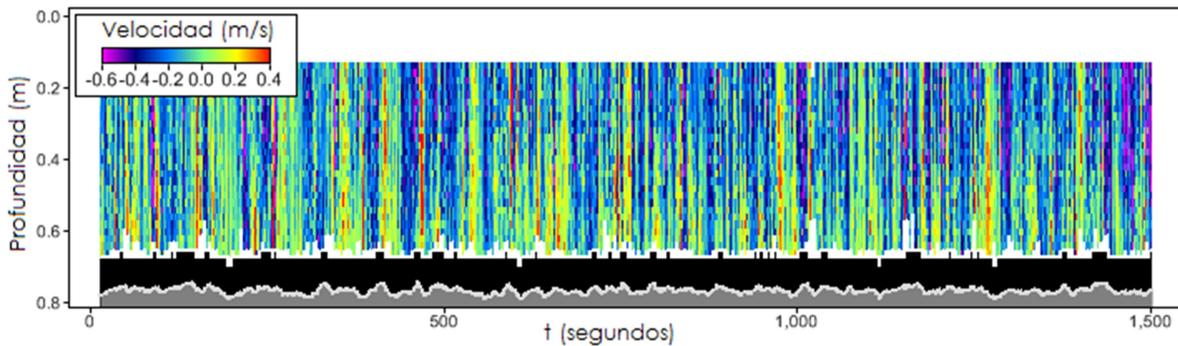


Figura 4.19.- Velocidad transversal. Serie temporal de perfiles registrados con ADCP durante la campaña 2 en el centro del canal de aforo en la Pasarela B.

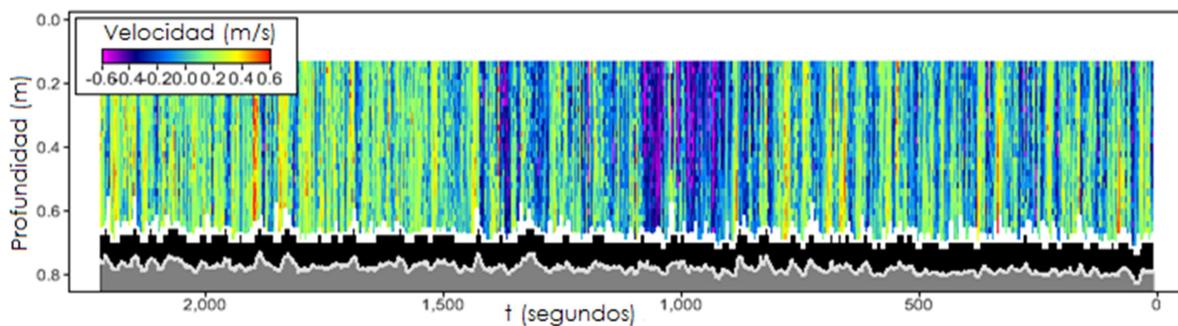


Figura 4.20.- Velocidad transversal. Serie temporal de perfiles registrados con ADCP durante la campaña 3 en el centro del canal de aforo en la Pasarela B.

Los resultados del análisis estadístico realizado de las series temporales de la velocidad media en la vertical registradas en las campañas 2 y 3 con el

programa TUDE son presentados en las Figura 4.21 a Figura 4.24.

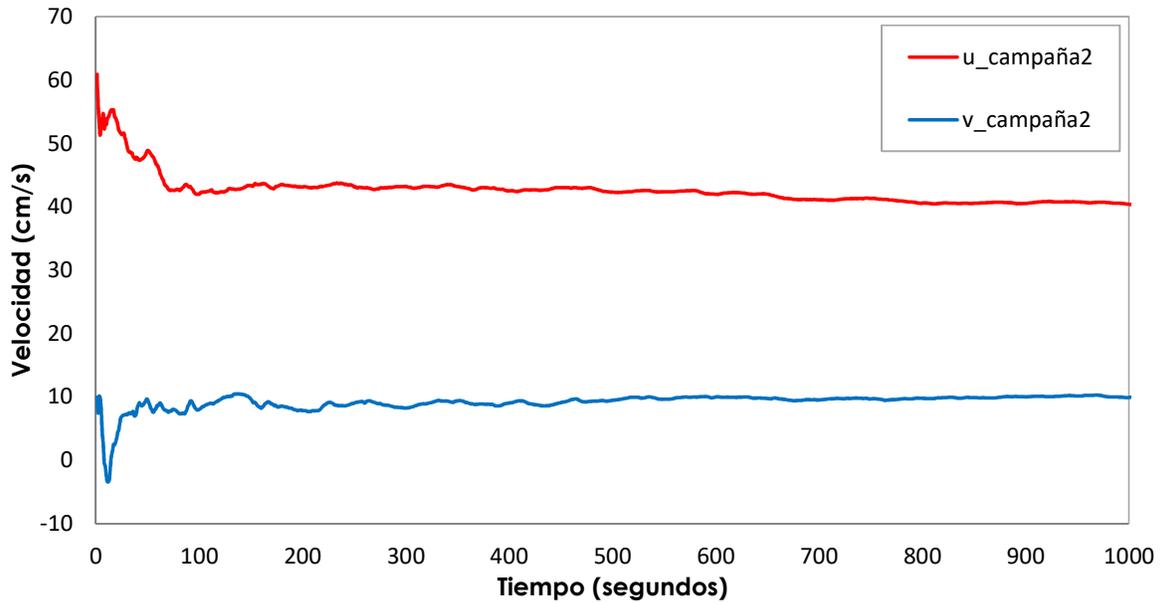


Figura 4.21.- Evolución del valor medio de la componente longitudinal (línea roja) y transversal (línea azul) del vector velocidad para las campañas campaña 2.

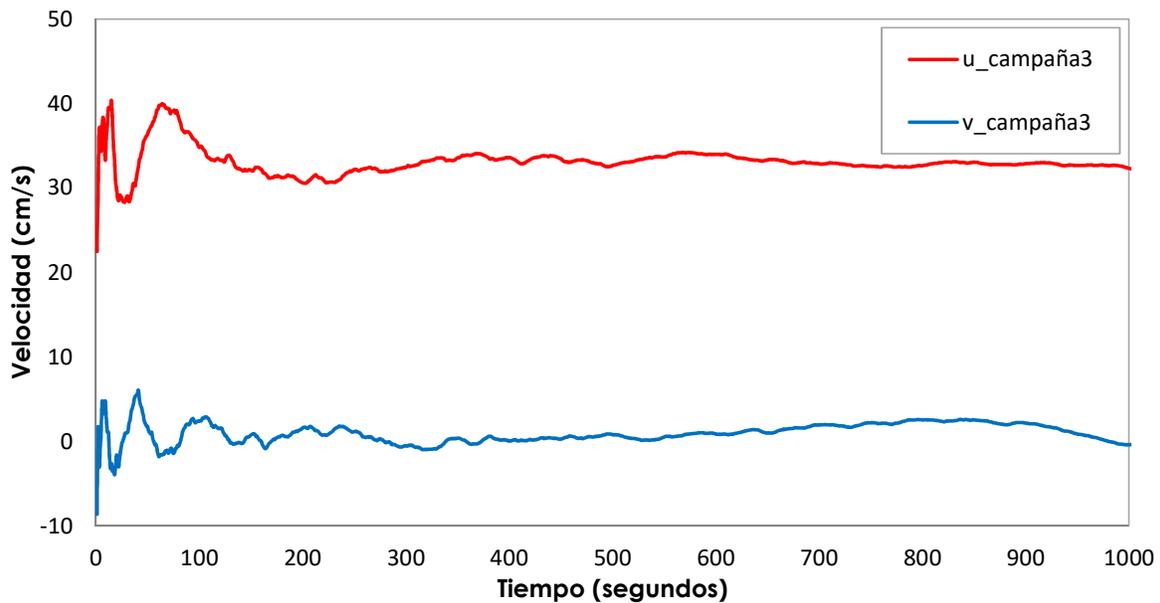


Figura 4.22.- Evolución del valor medio de la componente longitudinal (línea roja) y transversal (línea azul) del vector velocidad para las campañas campaña 3.

El espectro de energía para la componente longitudinal del vector velocidad (de ambas campañas, Figura 4.23) muestra una serie de picos dentro de un rango de frecuencias que van desde 0.035Hz hasta 0.0035Hz. Esto indica que existen procesos cuasi-periódicos de un periodo de 28.5 a 285 segundos. Dentro de este rango, los picos de energía en la campaña 2 oscilan entre 10000cm²/s a 15000cm²/s, mientras que en la campaña 3 existen picos del orden de 20000cm²/s. Los espectros de energía para la componente transversal del vector

velocidad, (Figura 4.24) muestran un comportamiento similar a los espectro de la componente longitudinal.

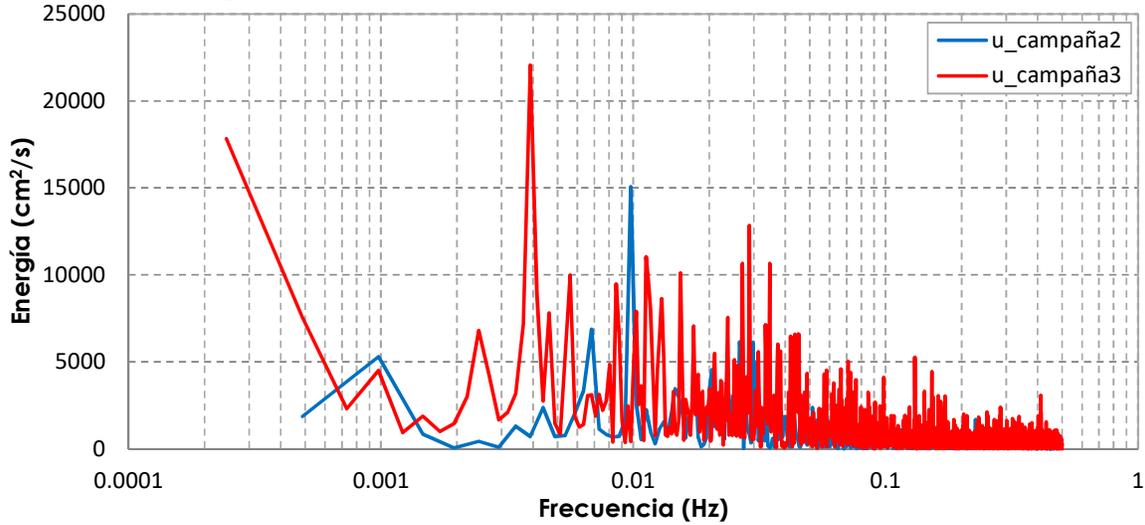


Figura 4.23.- Espectro de energía de las señales registradas para la componente longitudinal de velocidad en las campañas 2 (línea color azul) y 3 (línea color rojo).

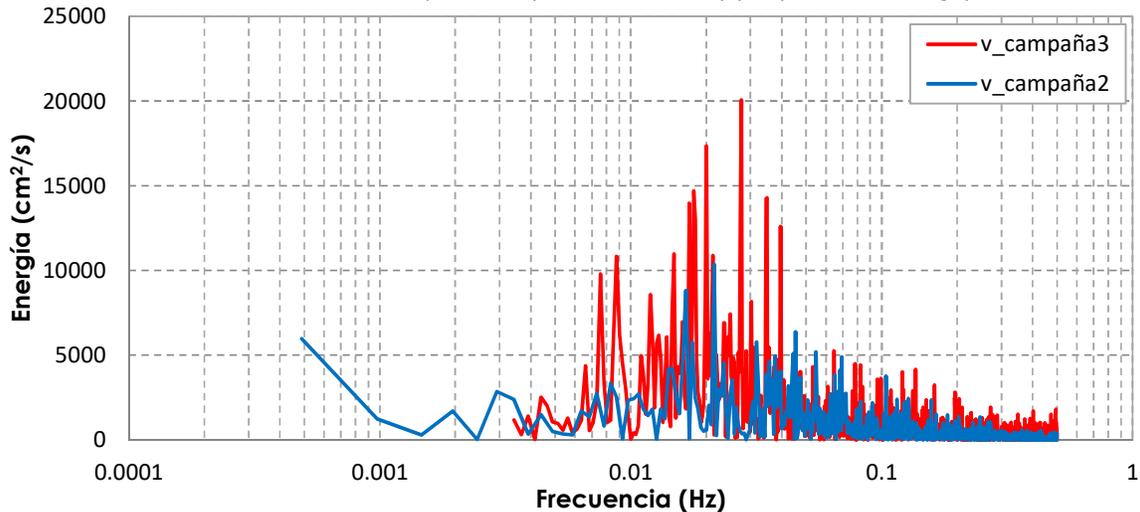


Figura 4.24.- Espectro de energía de la señal registrada para la componente transversal de velocidad en las campañas 2 (línea color azul) y 3 (línea color rojo).

4.4.2.- Resultados de la simulación numérica

Las Figura 4.25 y Figura 4.26 muestran el campo medio de la magnitud de la velocidad resultante de la simulación numérica en detalle. Ambas simulaciones representan correctamente de manera cualitativa la zona de separación y recirculación del flujo en la zona de entrada al canal de aforo. La fuerte recirculación que muestran ambas simulaciones, y las magnitudes de la velocidad se corresponden con lo observado en los resultados del análisis de los datos registrados con ADCP en el canal de aforo. En la Figura 4.27 se compara los resultados de la simulación con los datos experimentales para misma sección transversal en la que se realizaron las transectas con ADCP. Es de destacar, que la simulación con el modelo de cierre para la turbulencia k-Omega SST representa mejor la zona de recirculación a lo largo del canal de aforo.

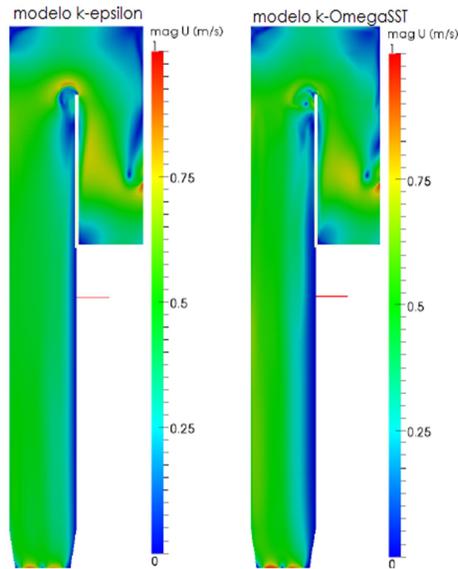


Figura 4.25.- Campo medio de la magnitud de velocidad para la simulación en detalle con los modelos de cierre k-e y k-omega SST. Campaña 3.

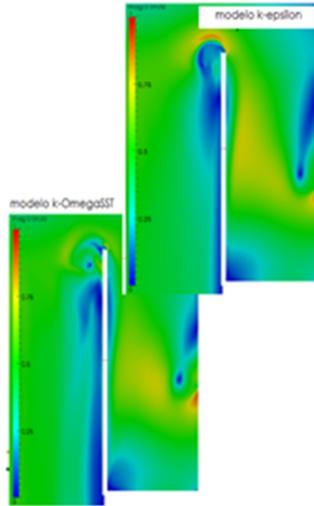


Figura 4.26.- Acercamiento a la zona de separación y recirculación. Campo medio de la magnitud de velocidad para la simulación en detalle con los modelos de cierre k-e y k-omega SST. Campaña 3.

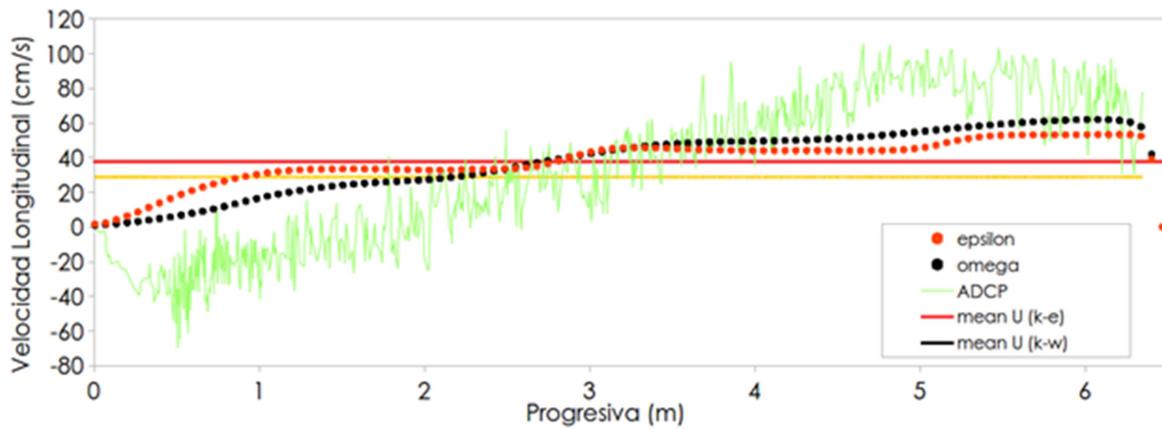


Figura 4.27.- Velocidad longitudinal. Comparación de los resultados de la simulación con los datos

experimentales. La progresiva 0 corresponde en la margen izquierda. Los valores positivos de la velocidad son en dirección a la salida del canal.

En puntos rojos y negros se representa la velocidad longitudinal para la simulación con los modelos de cierre $k-\epsilon$ estandar y $k-\omega$ SST, respectivamente. Para los mismos colores las líneas llenas representan el valor medio de la velocidad longitudinal para la sección. La línea negra no se ve porque coincide con la roja, con un valor medio de 0.38m/s. La línea verde representa la velocidad longitudinal como resultado del promedio de las 16 transectas realizadas con ADCP en la campaña de medición 3. La línea de color amarillo indica un valor medio de 0.3m/s para la velocidad en la sección calculada con los datos de ADCP.

Se puede observar que las simulaciones numéricas realizadas con los modelos $k-\epsilon$ estandar y $k-\omega$ SST, representan una zona de estancamiento (con velocidades muy bajas) en la margen izquierda pero no recirculación (con velocidades negativas significativas).

Los resultados experimentales presentados en la sección 4.4.1 dan cuenta de la fuerte recirculación y la presencia de inestabilidades en el flujo. Por esto y para complementar y mejorar el análisis numérico hasta aquí desarrollado, se realizó una última simulación tridimensional con una estrategia de Simulación de los Grandes Vórtices (LES, por sus siglas en inglés) con un esquema que incluye la derivada temporal. Los resultados de esta última simulación se presentan en las Figura 4.28 a Figura 4.30.

La secuencia de imágenes presentada en la Figura 4.28 muestran el valor de la componente longitudinal del vector velocidad en distintos instantes para la sección de aforo aguas abajo de la pasarela (ver Figura 1.4). En la Figura 4.28 los valores negativos indican la dirección principal del flujo, mientras los valores positivos indican recirculación. Se observa claramente que hay momentos donde la recirculación afecta al 60% de la sección (c), y en el otro instante toda la sección del canal de aforo aporta al caudal de salida (d).

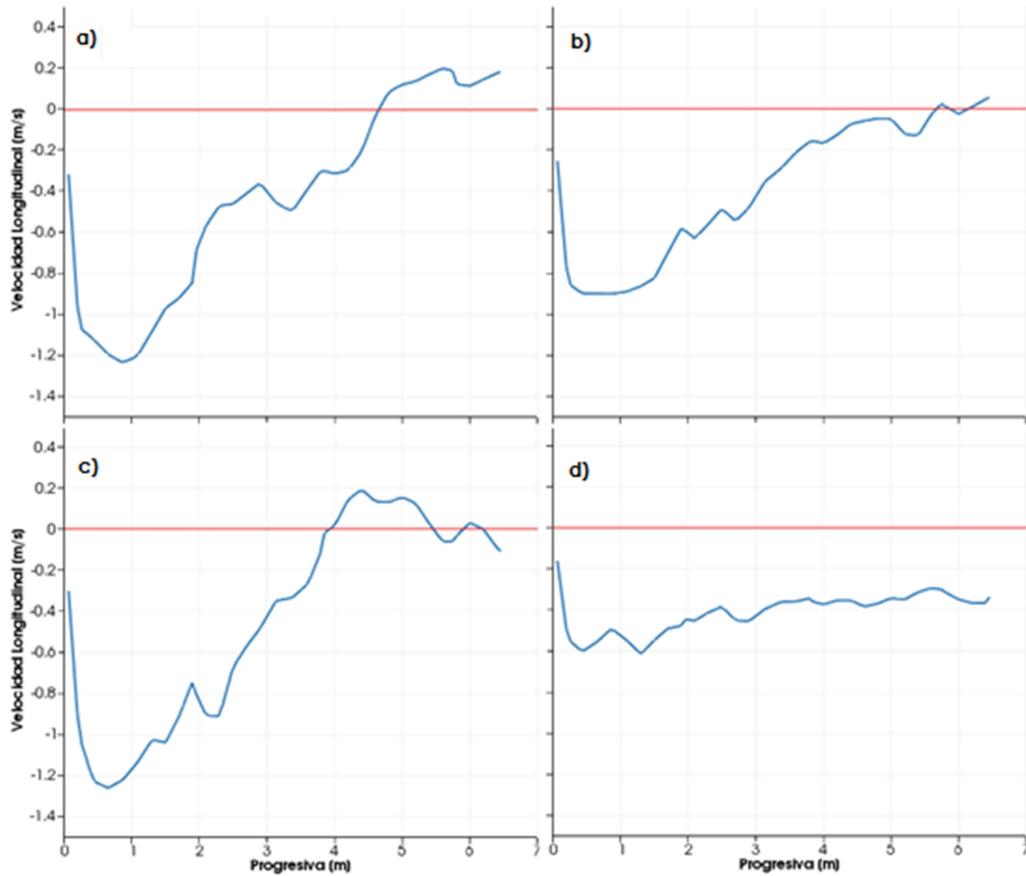


Figura 4.28.- Componente longitudinal del vector velocidad en la sección de aforo para los instantes 3, 18, 62 y 241 segundos. Los valores negativos de indican la dirección principal del flujo, mientras los valores positivos indican recirculación. La progresiva cero corresponde a la margen derecha.

El promedio temporal de la componente longitudinal del vector velocidad para en la sección de aforo se puede observar en la Figura 4.29. En esta figura, se compara además los resultado logrados con la simulación LES, $k-\epsilon$ estandar, $k-\omega$ SST y los datos registrados con ADCP en la planta. La simulación tridimensional LES es la que mejor se aproxima cualitativamente al comportamiento registrado con ADCP. Si bien en el promediado temporal el modelo indica valores cercanos a cero sobre la margen izquierda del canal donde el ADCP indica recirculación, los resultados de la simulación indican que la recirculación afecta el 30% de la sección del canal. Esto es similar a lo reportado por el promedio de las transectas registradas con ADCP en la campaña 3 (ver Figura 4.12).

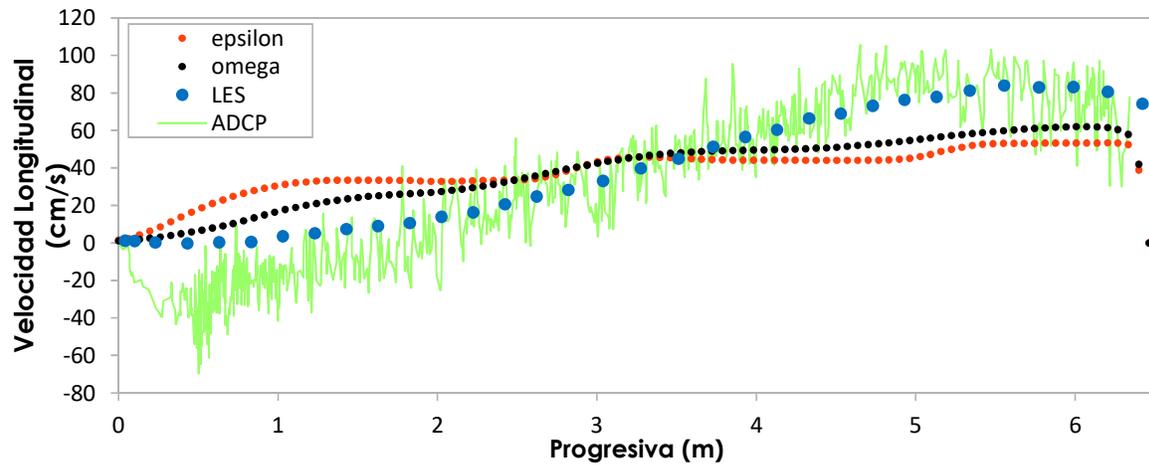


Figura 4.29.- Promedio temporal de la componente longitudinal del vector velocidad en la sección de aforo. Comparación de los resultados de los modelos LES, k- ϵ estándar, k- ω SST y resultados reportados por el ADCP.

El análisis realizado en la Figura 4.29 se puede extender a todo el canal de aforo. En la Figura 4.30 se observa una secuencia de imágenes instantáneas del campo de la magnitud de la velocidad. Se puede concluir de esta figura que el fenómeno de recirculación afecta el comportamiento de todo el canal de aforo.

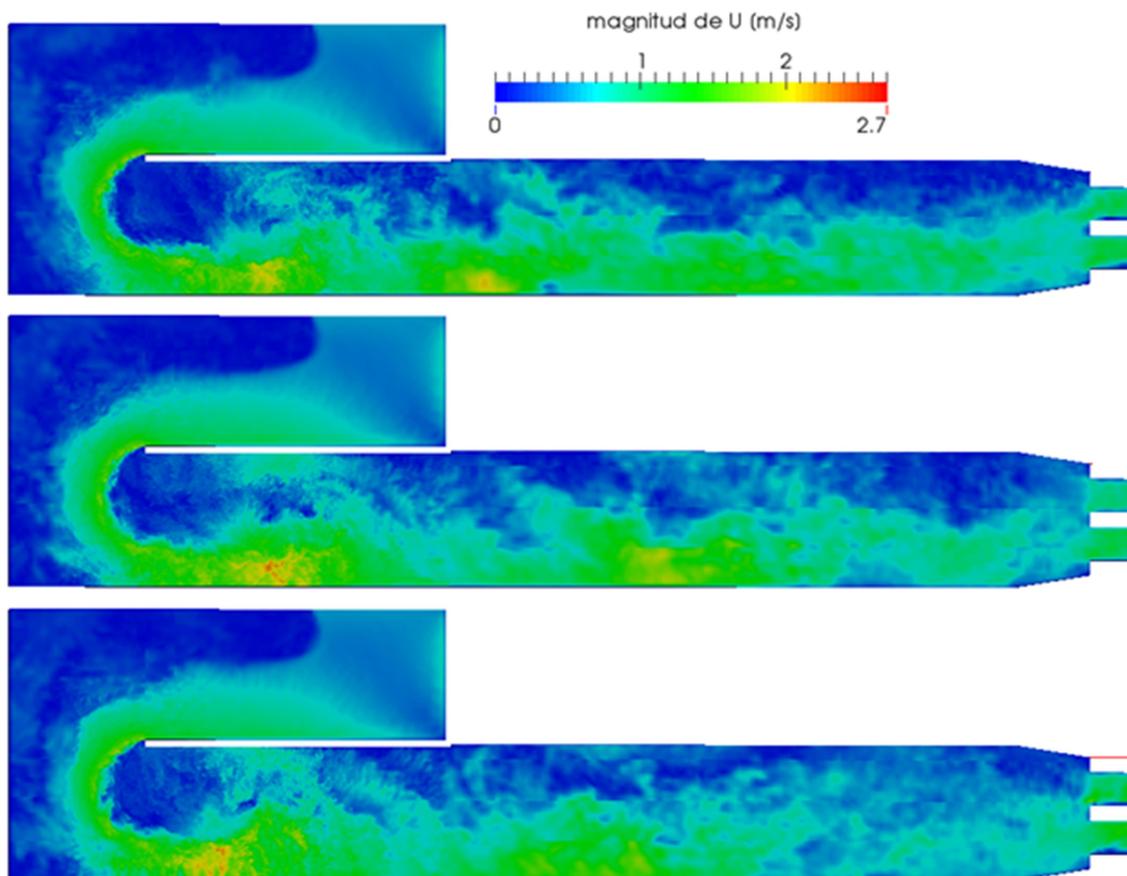


Figura 4.30.- Campos instantáneos de la magnitud de la velocidad para el canal de aforo.

Es posible analizar la serie temporal de velocidad del modelo numérico simuladas en el mismo punto en el que se registraron datos con ADCP (ver punto B en Figura 1.4), y realizar una comparación de los espectros de energía resultantes. Esta comparación permite evaluar si el modelo numérico logra representar los mismos procesos cuasi-periódicos que fueron identificados en el canal de aforo.

Las Figura 4.31 y Figura 4.32 corresponden a los espectros en el dominio de la frecuencia de las series temporales experimentales (ADCP) y numérica (LES), respectivamente. Los resultados indican que en ambas direcciones el espectro de energía del modelo numérico tiene un comportamiento similar al observado con los datos experimentales. El modelo numérico logra captar fenómenos en el rango de frecuencias que va de 0.015Hz 0.04Hz: en el dominio del tiempo son periodos de 25 y 70 segundos. Esto está comprendido dentro del rango que detectó el ADCP de 40 a 140 segundos (ver Figura 4.23 y Figura 4.24).

Es posible apreciar en ambos espectros que para frecuencias menores a 0.01Hz hay un menor nivel de energía que el reportado por la serie temporal experimental. Esto indica que el modelo numérico no logra representar los fenómenos con frecuencias menores a 0.01Hz. Esto equivale a periodos iguales o superiores a 100 segundos, y para lograr representarlos es necesaria una serie de datos con una longitud igual o superior al periodo que se intenta representar. La simulación presentada en este trabajo cuenta con 350 segundos de corrida, y por lo cual no va a brindar información para las frecuencias menores.

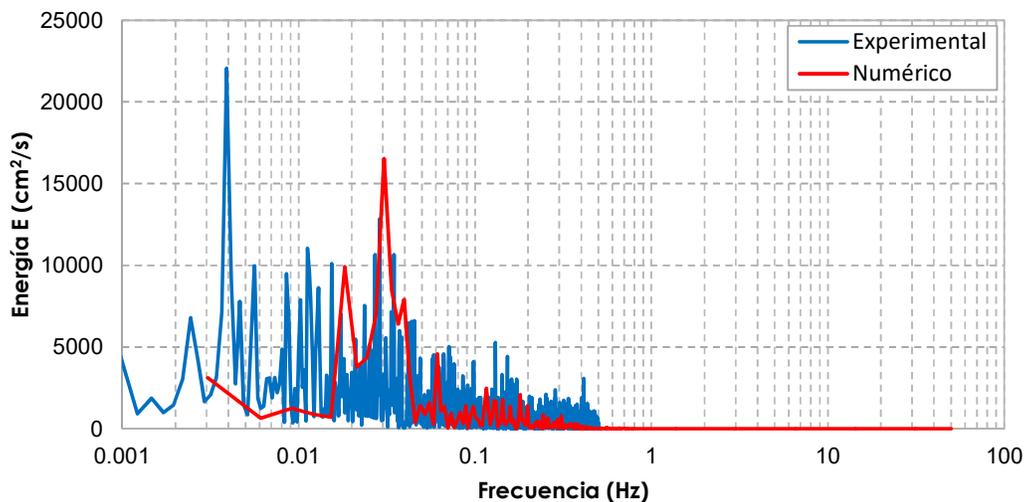


Figura 4.31.- Espectro de energía de la componente longitudinal de la velocidad de la serie temporal registrada con ADCP (línea color azul) y obtenida de la simulación con LES (línea color rojo).

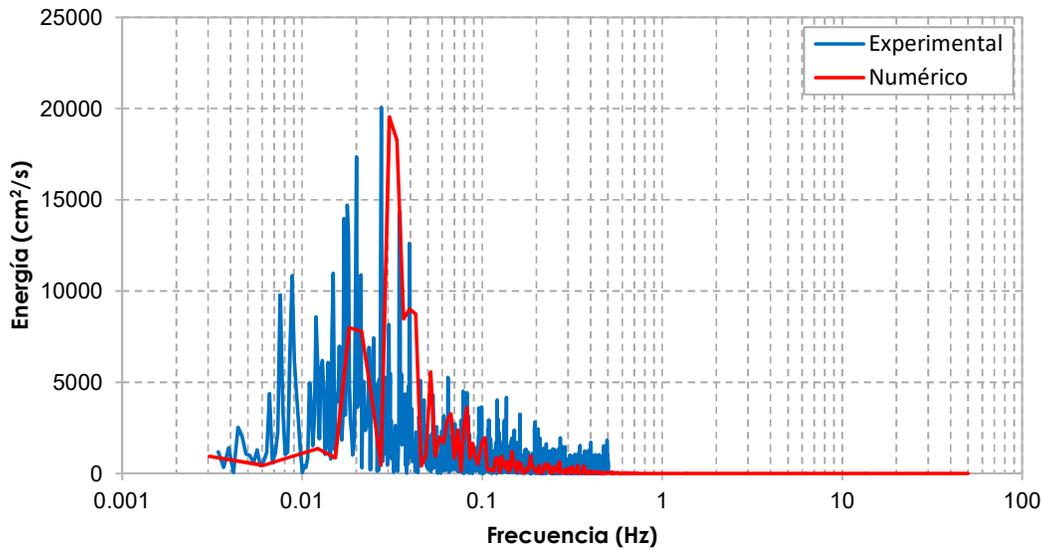


Figura 4.32.- Espectro de energía de la componente transversal de la velocidad de la serie temporal registrada con ADCP (línea color azul) y obtenida de la simulación con LES (línea color rojo).

La Tabla 4.5 resume los valores medios experimentales y numéricos de las componentes longitudinal y transversal del vector velocidad y la energía cinética turbulenta del flujo. Los valores corresponden a las series temporales registradas en el punto B aguas debajo de la pasarela del canal de aforo. En todos los casos las diferencias relativas no superan el 10% lo que indica un muy buen ajuste del modelo numérico.

Tabla 4.5.- Valores experimentales y numéricos de los valores medios de las componentes longitudinal y transversal del vector velocidad y la energía cinética turbulenta.

Técnica	U [cm/s]	V [cm/s]	TKE [cm²/s²]
ADCP	30,07	1,95	425,12
LES	27,30	2,00	465,14
Diferencia Relativa	9,21%	-2,46%	9,41%

Finalmente se evaluó el desempeño de modelo LES al analizar los espectros de energía de las fluctuaciones de velocidad para evaluar si en el rango inercial del flujo la transferencia de energía turbulenta fue resuelta de manera adecuada. Si el decaimiento de energía simulado ajusta a la pendiente de Kolmogorov (-5/3, cuando el espectro se grafica en escala logarítmica) confirma que la transferencia de energía desde las escalas más grandes a las escalas más pequeñas es simulado correctamente. La Figura 4.33 muestra el espectro de energía de las fluctuaciones de velocidad para las tres componentes del vector velocidad y el ajuste de la pendiente del espectro de Kolmogorov.

El espectro de Kolmogorov tiene la forma: $Energía = Cf^{-5/3}\epsilon^{3/2}$ y donde f es la frecuencia, ϵ es la disipación de la energía cinética turbulenta y C es una constante que depende de la dirección del flujo seleccionada. En el gráfico doble logaritmo Energía vs Frecuencia, esta relación se observa lineal.

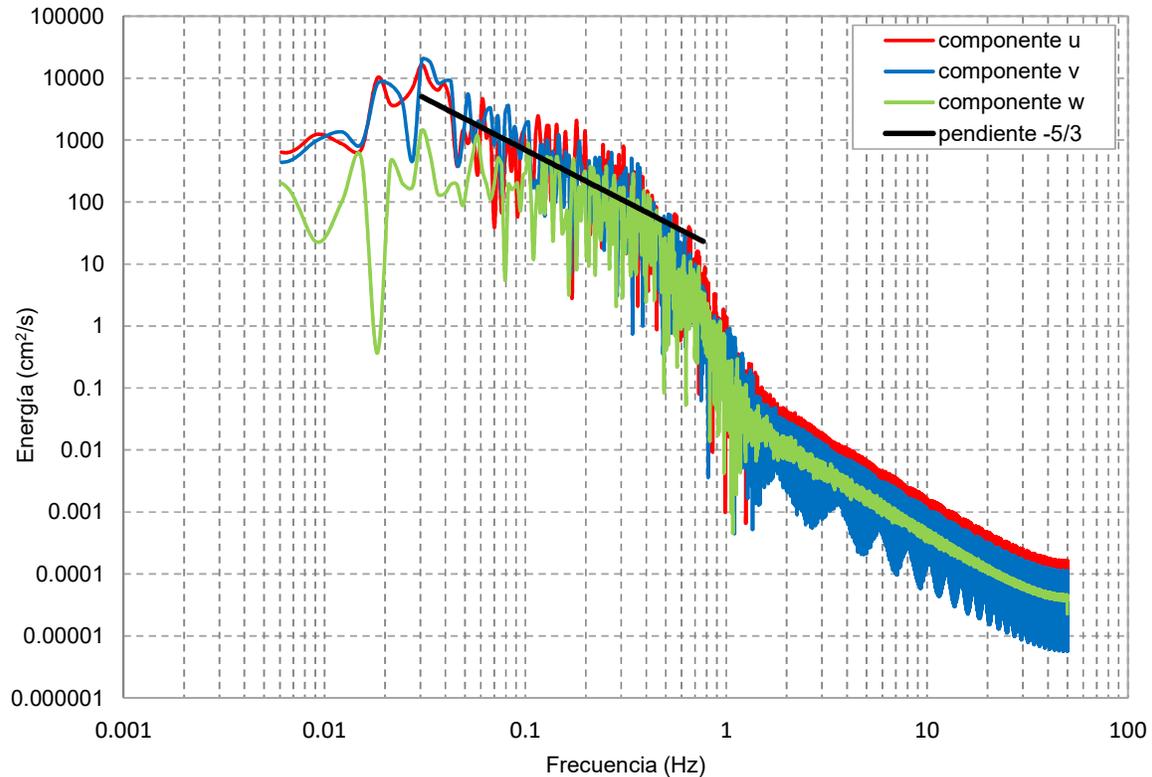


Figura 4.33.- Espectro de energía de las fluctuaciones de velocidad en el dominio de la frecuencia, registradas en el centro del canal de aforo en la misma sección de la Pasarela B para las mismas condiciones de la campaña de medición 3.

En la Figura 4.33 se observa que los espectros de cada componente ajustan a la pendiente de Kolmogorov (línea negra, pendiente $-5/3$) en el rango que va desde una frecuencia de 0.02 Hz hasta 0.7 Hz. Esto indica que el modelo permite representar transferencia de energía para las escalas temporales de va desde 50 hasta 1.4 segundos. Luego de los 0.7 Hz se observa un cambio abrupto de la pendiente en los espectros como consecuencia de la disipación de la energía remanente por el modelo de cálculo para μ_{SGS} . Esto último indica que para representar escalas temporales del orden del segundo es necesario un pequeño aumento de la resolución temporal del proceso de cálculo.

Además, para frecuencias mayores a 1 Hz se observa el efecto de la resolución espacial como un filtro pasa bajo. Esto sucede porque la condición de Courant requiere mayor resolución temporal que espacial.

En base a los resultados experimentales y numéricos aquí presentados se puede concluir que si bien los modelos basados en RANS permiten identificar la zona de estancamiento, el modelo LES logra una mayor precisión en los resultados y aproxima mejor el comportamiento del flujo medio como se presentó en la Figura 4.29 y en la Tabla 4.5.

La mayor precisión del modelo LES permitiría aproximar mejor el fenómeno de transporte de un escalar y ser utilizado para simular el tiempo de residencia de la

cámara de contacto aguas arriba del canal de aforo. La subestimación de las zonas de recirculación por parte de los modelos RANS podría resultar en una subestimación del tiempo de residencia en la cámara de contacto. Esta variable se utiliza para acreditar la correcta desinfección de efluente.

Lo expuesto arriba indica que LES es una herramienta importante y útil para el diseño de nuevas plantas y para el re-equipamiento (optimizar el funcionamiento) de las ya existentes, ya que permite evaluar en detalle el comportamiento hidrodinámico del flujo y evitar que se aleje de las condiciones de diseño.

4.5.- RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentó una caracterización hidrodinámica detallada del flujo turbulento en base a técnicas experimentales in-situ y modelos numéricos. En función de los resultados logrados se pueden elaborar recomendaciones que permitan resolver la problemática en el canal de aforo de Bajo Grande.

En primer lugar es posible utilizar técnicas sinópticas para la cuantificación del caudal en el canal de aforo. La técnica LSPIS/PTV, de bajo costo de implementación y calibración, es un alternativa rentable que permitiría controlar el caudal de descarga con un incertidumbre menor. Esta alternativa cuenta con la ventaja de que no sería necesario modificar la geometría actual de la cámara de contacto y el canal de aforo de la planta de tratamiento.

En segundo lugar se puede optar por mejorar la geometría de la descarga de la cámara de contacto al canal de aforo con el objeto de reducir la zona de recirculación y eliminar las fluctuaciones de baja frecuencia debido a las inestabilidades presentes en el canal.

En posible utilizar deflectores o estructuras disipadoras al ingreso del canal de aforo que permitan alinear el flujo (verFigura 4.34.- Esquema de alternativas para incorporar deflectores al ingreso del Canal de Aforo. Figura 4.34), reducir las fluctuaciones de baja frecuencia y que el flujo logre desarrollar un perfil de velocidades uniforme en la sección de aforo.

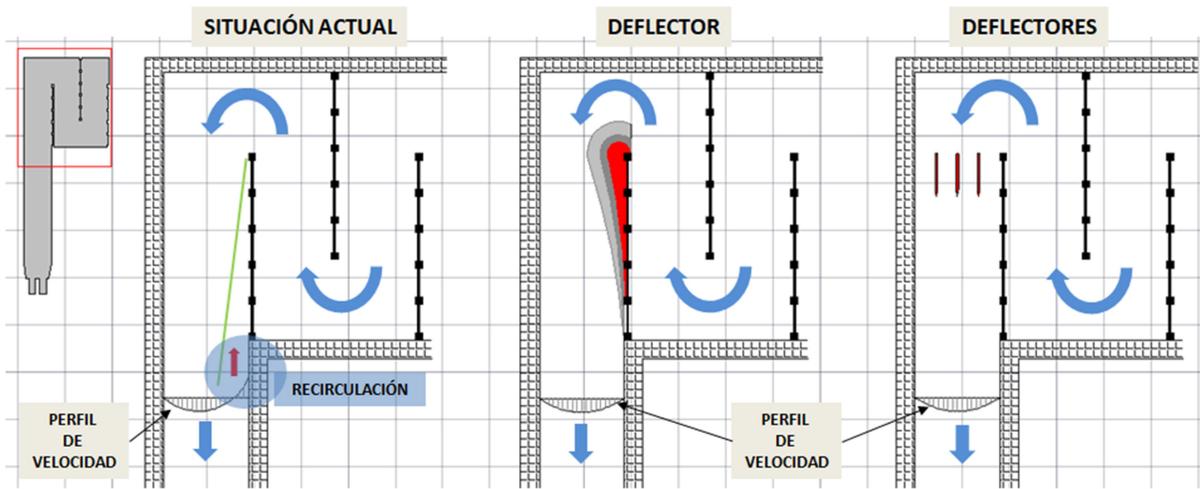


Figura 4.34.- Esquema de alternativas para incorporar deflectores al ingreso del Canal de Aforo.

Por otro lado, se puede diseñar una curva suave al ingreso del canal de aforo para evitar la separación del flujo y que se desarrolle la recirculación. Esta alternativa también permitiría que el flujo desarrolle un perfil de velocidades uniforme en la sección de aforo.

Por último, es posible ajustar el diseño de las alternativas para mejorar el flujo de ingreso al canal de aforo utilizando el modelo numérico tridimensional presentado y validado en este capítulo.

CAPITULO V:
Evaluación del comportamiento del flujo
turbulento en componentes de la planta de
tratamiento de líquidos residuales “Bicentenario”.

5.1.- INTRODUCCIÓN

En los capítulos anteriores ya se ha resaltado la importancia de conocer con exactitud el caudal con el que opera una planta de tratamiento de aguas residuales. Esta importancia radica no solo en establecer las condiciones de operación de las componentes de una planta y las dosificaciones en el tratamiento químico que elimina los contaminantes perjudiciales para la salud humana, sino también para evaluar el impacto que tendrá la descarga sobre el cuerpo receptor.

La planta de tratamiento de aguas residuales de Berazategui, Provincia de Buenos Aires, presenta dificultades en el sistema de aforo ubicado en el ingreso del flujo al tratamiento. La



Figura 1.6 muestra la ubicación del canal de entrada de la planta del "Bicentenario". Este canal de entrada tiene dos sectores. El sector 1 se encuentra en el ingreso a la planta donde el flujo realiza una curva en 90°, y luego de la curva el flujo ingresa a un canal recto de 100m, en el cual está instalado un sensor acústico para determinar la velocidad media superficial del flujo y estimar el caudal de ingreso a la planta de tratamiento. Al final del canal de aforo se encuentra una cámara de bombeo que cuenta con ocho Tornillos de Arquímedes que elevan el flujo hacia los desarenadores.



Observaciones preliminares muestran que la curva a 90° genera una zona de recirculación e inestabilidades en el flujo que viajan aguas abajo a lo largo del canal recto de 100m. El sensor acústico instalado para medir velocidades, por momentos reporta velocidades negativas indicando la presencia de una zona de recirculación por lo que la sección efectiva de flujo se ve reducida. El canal tiene una sección rectangular con una profundidad mucho mayor que el ancho ($H/B \gg 1$) que generan flujos con números de Froude bajos, lo que puede inducir a que las inestabilidades no se atenúen y zonas de recirculación tengan características fuertemente tridimensionales. Esto puede afectar la distribución del flujo en la zona de bombeo. Además, al ingreso de los desarenadores de la planta se observaron patrones de flujo no compatibles con el proceso físico realizado.

La planta cuenta con un total de 32 unidades desarenadoras que se dividen en dos grupos de 16. Las primeras 16 unidades se encuentran a la derecha, y el segundo grupo a la izquierda (la numeración de las unidades aumenta hacia aguas abajo, ver Figura 5.1). Ambos grupos de unidades desarenadoras son alimentados por sus respectivos canales de distribución del flujo.



Figura 5.1.- Distribución de las unidades desarenadoras en la Planta de Pre-tratamiento de líquidos cloacales del Bicentenario.

Profesionales y técnicos de Aysa manifestaron su preocupación por el desigual funcionamiento de las distintas unidades desarenadoras de la planta de pre-tratamiento estudiada. Se observó que los últimos desarenadores de cada grupo, en particular los desarenadores 16 y 32, presentan una mayor cantidad de sólidos retenidos en comparación a las primeras unidades. Se plantean las siguientes hipótesis para explicar la mencionada desigualdad: 1) El diseño del canal distribuidor genera una distribución no uniforme de los caudales líquidos y sólidos entre las unidades desarenadoras, con mayores valores de caudales líquidos de ingreso en los primeros desarenadores lo que implica un menor tiempo de permanencia del fluido en la unidad desarenadora y una disminución en la eficiencia para extracción de sólidos también; 2) El diseño del canal distribuidor genera una distribución no uniforme de los caudales sólidos (aun con caudales líquidos uniformes) y como consecuencia las últimas unidades de cada grupo reciben mayor cantidad de sólidos y están más exigidas que las primeras.

Por las problemáticas mencionadas, es necesario una detallada caracterización hidrodinámica del comportamiento del flujo utilizando en forma conjunta herramientas experimentales y numéricas disponibles en el estado del arte para: 1) validar el sistema de monitoreo de caudales instalado en el canal de ingreso de la planta; 2) evaluar la distribución de caudales al ingreso a la cámara de bombeo; y 3) cuantificar los efectos del flujo no uniforme al ingreso de los decantadores, y proponer alternativas que permitan optimizar el funcionamiento de los mismos.

Para ello se realizaron estudios experimentales detallados con modernas técnicas de velocimetría de flujo en relación a las tres problemáticas mencionadas.

Sobre la base de los datos experimentales se implementó un modelo numérico

tridimensional en el canal de ingreso para distintas condiciones de flujo. El modelo comprende el canal de ingreso, el canal de aforo y el ingreso a los tornillos de arquímedes de la cámara de bombeo. El modelo numérico tridimensional se basa en las ecuaciones de Navier Stokes promediadas según Reynolds (RANS). El código computacional utilizado para resolver numéricamente las ecuaciones RANS pertenece al paquete libre y abierto OpenFOAM® (Open Field Operación y manipulación, OpenCFD Ltd. 2005) (OpenCFD. [Http://www.opencfd.co.uk/openfoam/.](http://www.opencfd.co.uk/openfoam/)).

5.2.- ESTUDIO EXPERIMENTAL

El flujo en el canal de ingreso presenta importantes variaciones espaciales y temporales. Las escalas espacial y temporal características de las estructuras turbulentas más grandes que se esperan estén presentes en el flujo son del orden de 5m y 5seg, respectivamente, mientras que las escalas más pequeñas son del orden del milímetro y fracciones de segundos. Debido a este amplio rango de escalas es que se requieren técnicas de medición que se puedan aplicar a grandes instalaciones experimentales pero que a su vez presenten altas resoluciones espaciales y temporales a los fines de obtener los parámetros característicos del flujo.

En este trabajo se implementaron de manera complementarias dos técnicas experimentales: a) Velocimetría por Imágenes de Partículas a gran escala (LSPIV por sus siglas en ingles), ya utilizada en campañas anteriores; y b) un Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP, por sus siglas en inglés) que permite registrar perfiles de velocidad en la columna de agua.

Las mediciones se focalizaron en dos sectores de la Planta de Pre-tratamiento del Bicentenario. En primer lugar, se realizaron mediciones de velocidad del flujo en el canal de entrada para tres condiciones de operación distintas para analizar el comportamiento hidrodinámico del canal.

Además, se realizaron mediciones en los ingresos de dos unidades de decantación (o desarenadores), para evaluar las diferencias en el comportamiento del flujo de las unidades. Profesionales y técnicos de Aysa manifestaron su preocupación por el desigual funcionamiento de las distintas unidades desarenadoras de la planta de pre-tratamiento estudiada. Se observó que los últimos desarenadores de cada grupo, presentan una mayor cantidad de sólidos retenidos en comparación a las primeras unidades.

Las principales características de las condiciones experimentales evaluadas (incluyendo la configuración de los decantadores en funcionamiento) se reportan en la Tabla 5.1, ordenando las campañas de medición cronológicamente.

Tabla 5.1.- Condiciones experimentales evaluadas y técnicas experimentales in-situ utilizadas.

Campaña de medición	Fecha	Condición de funcionamiento	Técnica Experimental	Caudal reportado por sistema de aforo instalado [m³/h]
----------------------------	--------------	------------------------------------	-----------------------------	--------------------------------------------------------------------------

1	5 al 7 de Agosto 2015	2 Tornillos elevadores	LSPIV	46570
		1 Tornillo elevador	LSPIV	38030
2	26 de Octubre 2015	6 Tornillos elevadores	ADCP, LSPIV	87000

A continuación se detallan los instrumentos y técnicas experimentales utilizadas.

5.2.1.- Velocimetría por imágenes de particular a gran escala (LSPIV)

En la implementación de la técnica LSPIV se utilizó una cámara digital modelo Sony RX100 con una resolución espacial de 1920x1080 pixeles y una frecuencia de 30 cuadros por segundos para grabar los videos digitales.

La secuencia metodológica adoptada en el procesamiento de imágenes digitales en LSPIV se detalla a continuación:

- a) Pre-procesamiento de las imágenes, para transformarlas a escala de grises y mejorar el histograma de intensidad para un mejor procesamiento (ver Figura 5.2a).
- b) Procesamiento de las imágenes y extracción del desplazamiento del flujo en el espacio (pixel, o intervalo de imagen) y tiempo.
- c) Post-Procesamiento (Figura 5.2b), que consiste en rectificar los resultados y transformar los valores de velocidad en escala de pixel (o intervalo de imagen) a m/s, utilizando distancias entre cuatro Puntos de Control (PCs, ver Figura 5.2a) y el intervalo de tiempo entre dos imágenes consecutivas.
- d) Estimación del caudal: La técnica de LSPIV permite estimar la velocidad superficial de un canal, pero el valor necesario para estimar el caudal es la velocidad media. Asumiendo un perfil logarítmico en la columna de agua, la velocidad media V_m puede expresarse de la siguiente manera: $V_m = \alpha \times V_s$, donde el coeficiente α relaciona la velocidad media V_m y la velocidad superficial V_s , y tiene un valor teórico 0.85. El caudal Q escurrido en el canal se estima con la siguiente relación: $Q = A \times V_m$ en donde A es el área de sección transversal del flujo en el canal. El valor exacto de α depende de cada sección y se determina experimentalmente. En este informe se adopta por defecto $\alpha = 0.85$ pero se indicará también los valores de caudal calculados con $\alpha = 1$.

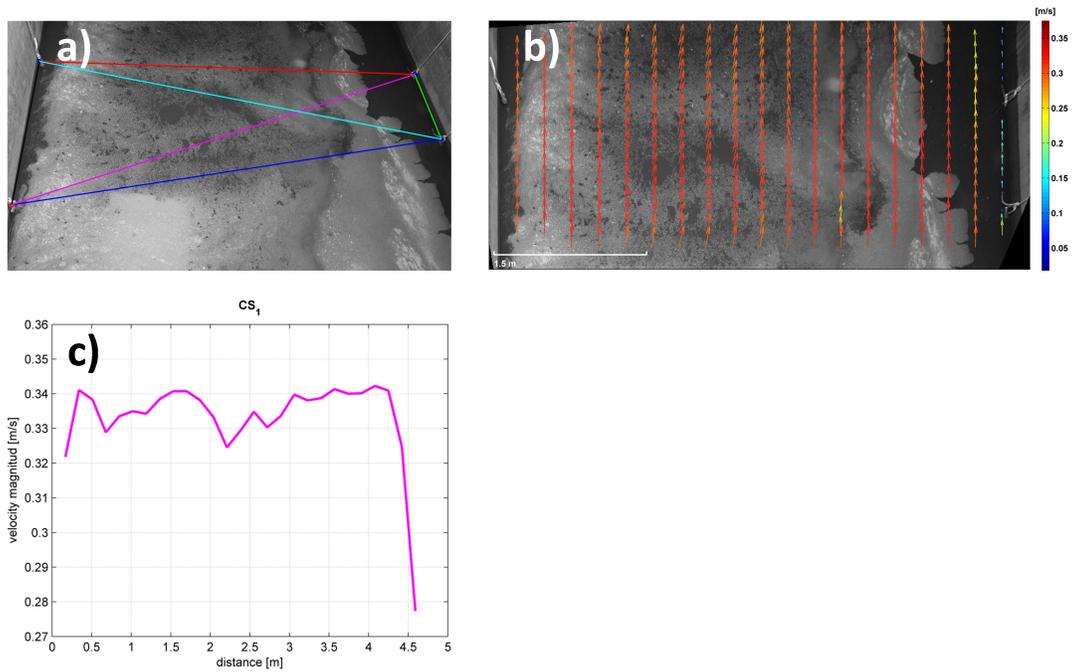


Figura 5.2.- Ejemplo de procesamiento de LSPIV en el canal aforador de la planta del Bicentenario
a) imagen instantánea con los 4 Puntos de control visibles al pelo de agua. b) campo de velocidad superficial medio rectificado del sector 2. c) perfil de transversal de velocidad superficial media.

La técnica LSPIV se utilizó en tres sectores de la Planta “Bicentenario”: 1) **Sector 1**: en el ingreso del flujo al canal de aforo; 2) **Sector 2**: ubicado en la progresiva 30m sobre el canal de aforo de la planta cuyas dimensiones son 5m de ancho y 10m de profundidad; 3) **Sector 3**: ubicado en la sección de aforo del canal de aforo y 4) **Sector 4**: zona de ingreso de los decantadores (o desarenadores) (ver Figura 5.3).



Figura 5.3.- Sectores donde se realizaron los trabajos experimentales en la Planta del Bicentenario en Berazategui. También se indica la estación elevadora que define los caudales procesados.

4.2.3.- Mediciones con el Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP)

Se realizaron mediciones en dos secciones del canal de ingreso de caudales a la planta de pre-tratamiento, para tres condiciones de funcionamiento. En la Tabla 5.2 se resumen los principales parámetros del flujo medio (velocidad, tirante, caudal) que describen las condiciones de operación de la planta durante las cuales se realizaron mediciones. Estos parámetros se determinaron a partir de los datos registrados por el sistema de aforo existente en la planta.

Tabla 5.2.- Condiciones de operación de la planta de pre-tratamiento de acuerdo a lo reportado por el sistema de aforo instalado en el canal de entrada.

Condición	Velocidad U (FLODAR) (m/s)	Tirante H (m)	Caudal Q (m ³ /h)	Número de tornillos en operación
3	0.84	5.70	87000	6

La Figura 5.4 indica los sectores en los cuales se registraron perfiles de velocidad con ADCP sobre la línea central del canal de aforo: 1) El sector 2 ubicado 12 metros aguas abajo de la curva de ingreso; y 2) El sector 3 ubicado en la sección de aforo del canal. En ambos puntos se realizaron mediciones con el ADCP fijo para registrar perfiles verticales de velocidad con una frecuencia de 1Hz. El promediado temporal de estos perfiles permitirá aproximar un perfil medio de velocidad para los sectores 2 y 3.

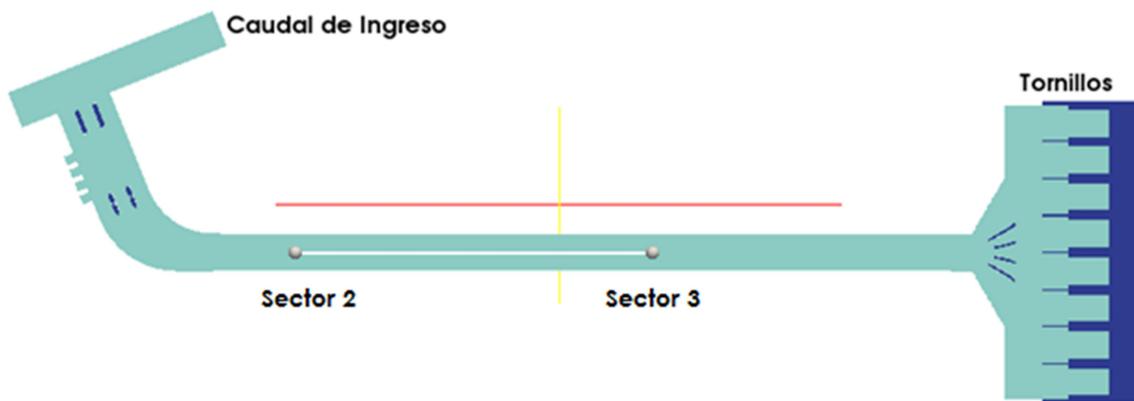


Figura 5.4.- Canal de entrada de la planta de pre-tratamiento. Secciones de medición con ADCP.

Por otro lado, se realizaron mediciones con ADCP sobre el ingreso a dos desarenadores con el fin de evaluar el comportamiento hidrodinámico del flujo en el ingreso.

El ADCP releva la batimetría de la sección a medida que registra los perfiles de velocidad. La batimetría relevada proporciona información de la sedimentación de sólidos (arenas) en la zona de estudio. Estos datos complementan las mediciones realizadas con LSPIV.

5.3.- SIMULACIÓN NUMÉRICA

La implementación del modelo numérico fue del tipo tridimensional para simular las condiciones del flujo en la zona de estudio y detectar zonas de conflicto como zonas de recirculación, y su interacción con la zona de flujo efectivo. Se utilizó un modelo RANS con un cierre para la turbulencia $k-\epsilon$ estándar.

La discretización espacial del dominio se realizó mediante un mallado estructurado. La malla utilizada en las simulaciones se compone de volúmenes de tamaño de 10cm de lado, lo que resulta en aproximadamente 7.3 millones de hexaedros en todo el dominio (ver Figura 5.5). La malla se resolvió utilizando la aplicación blockMesh de OpenFOAM®.

El esquema de simulación utilizado requiere establecer en el dominio condiciones iniciales y de borde para las variables fundamentales: presión (p), velocidad (U), Energía cinética turbulenta (k) y Disipación de Energía cinética turbulenta (ϵ), y viscosidad turbulenta (ν_t).

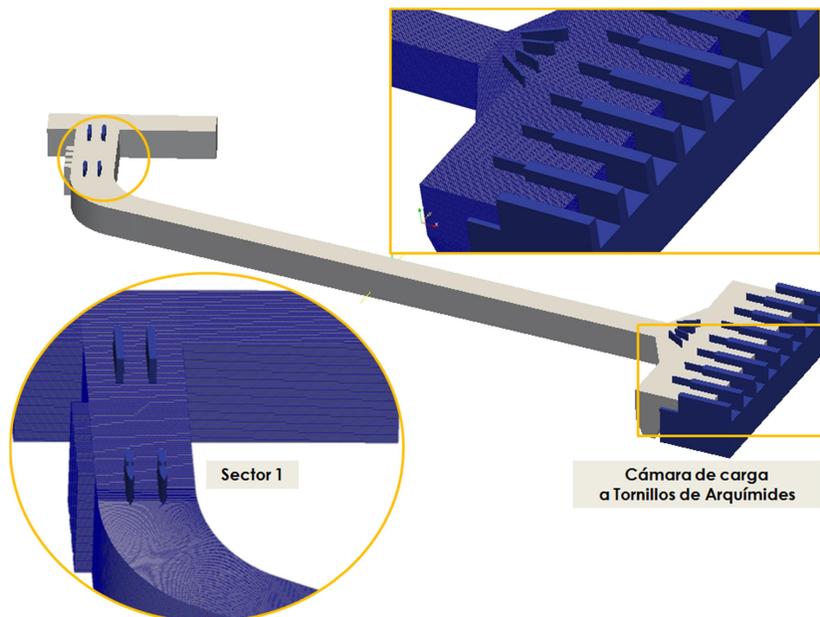


Figura 5.5.- Dominio computacional del modelo. Detalle del sector 1 y de la cámara de carga de los tornillos de Arquímedes.

En las paredes y fondo del modelo las variables U , k y ϵ son cero y se utiliza una función de pared para aproximar el comportamiento del flujo cerca de esta zona. Además, debido a que en prototipo la superficie libre no presenta variaciones de nivel, en modelo se impuso una superficie rígida sin esfuerzos de corte para que no afecte al flujo interno (la condición free-slip en inglés). De esta manera es posible simplificar el esquema de modelación de dos fases (agua-aire) simulando la superficie libre a otro a simple fase (agua). Esta simplificación permite reducir el esfuerzo computacional necesario y trabajar con un esquema de modelación menos complejo respecto a las condiciones de borde, parámetros físicos y ecuaciones a resolver.

La malla finalmente utilizada se conformaba por 3.010.099 hexaedros y 360.290 poliedros. La convergencia a la solución estacionaria del flujo demoró aproximadamente 29.7 horas en un procesador Intel® Core™ i7 3770 CPU @ 3.40GHz x 8 de primera generación. El cálculo se paralelizo en 8 cores.

5.4.- RESULTADOS

5.4.1.- Caracterización del flujo en el canal de ingreso

5.4.1.1.- Resultados experimentales

En esta sección se presentan los resultados del trabajo experimental realizado in situ en el cual se realizó una caracterización de la hidrodinámica del flujo en el canal de ingreso. La caracterización además permite aproximar los caudales de operación para las condiciones experimentales estudiadas y por lo tanto validar el sistema de aforo instalado en la planta.

El sector 1 se encuentra en el ingreso a la planta de pre-procesamiento entre 2 curvas. Aguas abajo de este punto de medición el flujo ingresa al canal de aforo de 100m de longitud (ver Figura 5.3). Aguas abajo del sector 2 se encuentra instalado un sensor acústico (sector 3) para determinar el nivel de líquido para realizar una primera estimación del caudal de ingreso a la planta de tratamiento.

La Figura 5.6 muestra en detalle la curva de ingreso al canal de aforo, y la zona en la cual se realizaron mediciones con la técnica LSPIV. Se realizaron mediciones para las condiciones en la que la planta funciona con 1 y 2 tornillos.

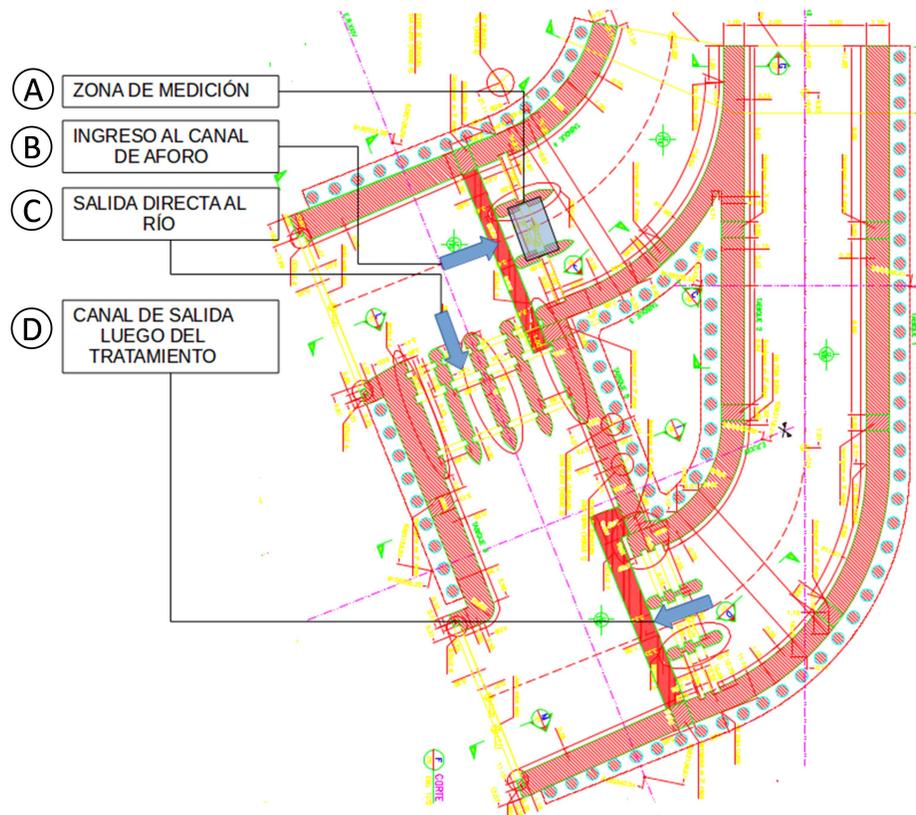


Figura 5.6.- Detalle Sector 1. Zona de ingreso del flujo al canal de aforo. Zona de medición con la técnica LSPIV. Descargar directa al río y canal de salida luego del tratamiento.

Luego de mediciones preliminares diversos inconvenientes se observan en ese sector que se enumeran a continuación: a) el sector presenta una geometría compleja en el ingreso del flujo; b) la apertura de las compuertas para la descarga directa genera una influencia del nivel del río; c) la planta está operando por fuera de las condiciones de diseño; y d) se observan fenómenos de separación y recirculación del flujo, por lo que la velocidad presenta fluctuaciones relevantes en el tiempo. En consecuencia, el caudal de ingreso al canal de aforo puede presentar variaciones temporales.

A continuación se ilustra este comportamiento irregular con señales temporales de la componente longitudinal del vector velocidad. Las señales son resultado de la aplicación de la técnica LSPIV. Las Figura 5.7 y Figura 5.8 muestran la evolución temporal de la componente principal del vector velocidad superficial del flujo en el sector 1, para la planta funcionando con 1 y 2 tornillos elevadores (Tornillos de Arquímedes), respectivamente. Sobre las señales temporales (líneas de color rojo) se aplicó un filtro para bandas que permite identificar las frecuencias (o períodos) de procesos cuasi-periódicos presentes en el flujo. La línea de color azul representa la señal filtrada con un filtro pasa bajo, y se pueden apreciar que los picos de mayor magnitud se repiten en un rango de períodos que va desde los 20s a los 50s.

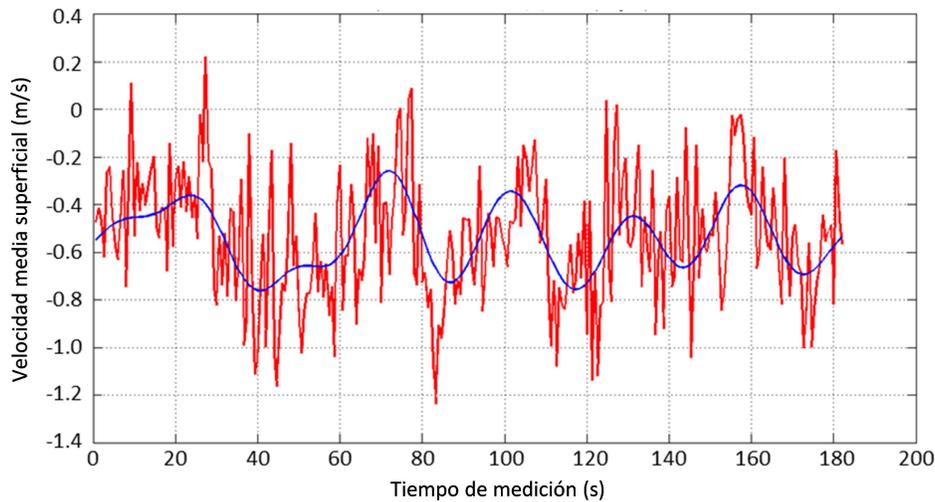


Figura 5.7.- Señal temporal de la componente longitudinal del vector velocidad superficial para la planta funcionando con 1 tornillo. Se incluye además las fluctuaciones de baja frecuencia presentes en la señal. Medición en el Sector 1.

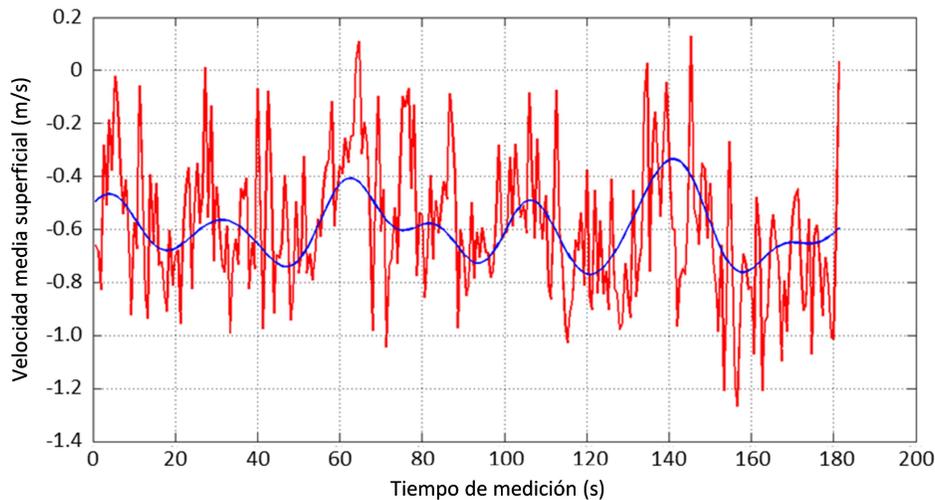


Figura 5.8.- Señal temporal de la componente longitudinal del vector velocidad superficial para la planta funcionando con 2 tornillos. Se incluye además las fluctuaciones de baja frecuencia presentes en la señal. Medición en el Sector 1.

La presencia de estas fluctuaciones dificulta tanto la estimación de valores medios de velocidad como caudales con un mínimo error. La Figura 5.9 y la Figura 5.10 muestran la evolución del valor medio de las señales en función del tiempo de medición, para la planta funcionando con 1 y 2 tornillos respectivamente. En estas figuras la línea roja representa la componente longitudinal del vector velocidad superficial del flujo, y la línea azul representa su componente transversal. La señal obtenida para la planta funcionando con 1 tornillo (Figura 5.9), indica que el valor medio de velocidad superficial tiende a converger con tiempos de medición mayores a 100s. Sin embargo, cuando la planta opera con dos tornillos la señal registrada en el sector 1 no muestra una clara convergencia del valor medio.

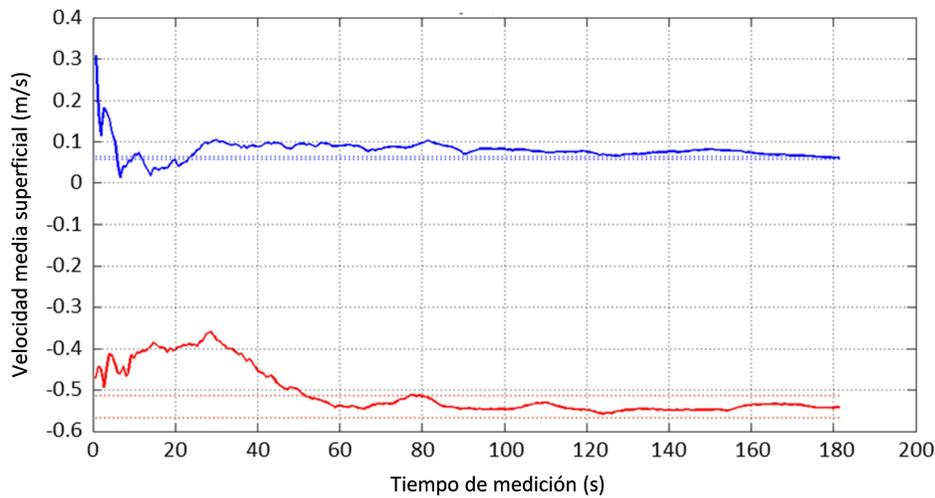


Figura 5.9.- Evolución del valore medio de las componentes del vector velocidad para la planta funcionando con 1 tornillo. Línea color rojo: componente longitudinal. Línea color azul: componente transversal. Se indican con líneas de punto los intervalos +/- 5% del valor medio.

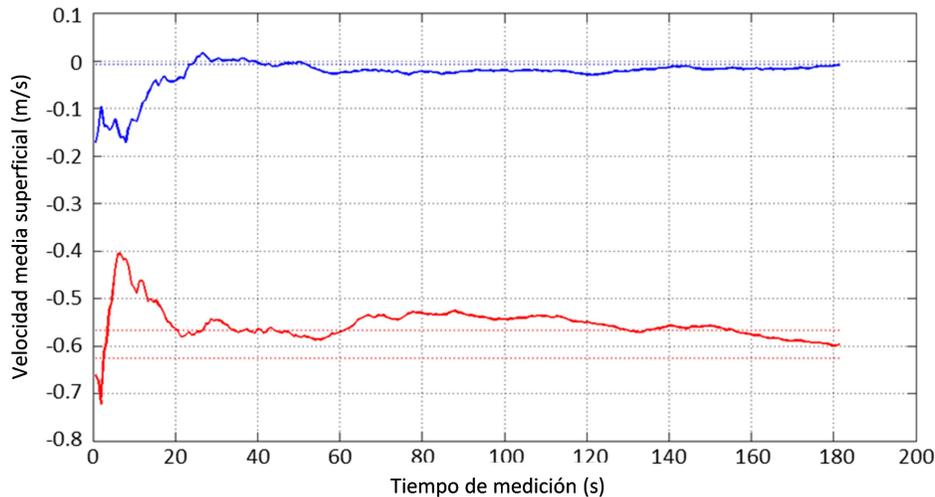


Figura 5.10.- Evolución del valore medio de las componentes del vector velocidad para la planta funcionando con 2 tornillo. Línea color rojo: componente longitudinal. Línea color azul: componente transversal. Se indican con líneas de punto los intervalos +/- 5% del valor medio.

A partir del presente análisis, no se recomienda realizar estimaciones de caudales a partir de mediciones de velocidad y nivel en el sector 1, debido a complejidad del comportamiento espacial y temporal del flujo en este sector.

Aguas debajo del canal de ingreso sobre el sector 2 ubicado en la progresiva 30m sobre el canal de aforo (Figura 5.3) se encuentra instalado un sensor FLODAR, que mide cuasi-localmente el nivel y la velocidad superficial del flujo. Este sensor reporta ocasionalmente valores de velocidad media del flujo y caudal incoherentes con las actuales condiciones de operación de la planta. A continuación se compara los resultados de velocidades superficiales medidas y caudales estimados por medio de la técnica de LSPIV en este sector, con los valores reportados por el sensor.

En Tabla 5.3 se indican los valores de velocidad superficial medidos por las dos técnicas (FLODAR y LSPIV) para las dos condiciones de operación. En la condición en la que los tornillos 2 y 6 están operando (mayores valores de caudal), los valores de velocidad superficial medidos por las dos técnicas son muy similares (-3% de diferencia). Sin embargo, cuando solo el tornillo 2 está operando, la diferencia entre los dos valores es relativamente alta (-76.5%). En consecuencia, para esta condición, los valores de caudales también difieren (-129.5%, en la Tabla 5.4).

Si bien es necesario calibrar el valor del coeficiente α para la técnica LSPIV, los valores de caudal que reporta tienen coherencia con la condición de operación de la planta. En la Tabla 5.4 el caudal reportado cuando la planta opera con un tornillo se reduce prácticamente a la mitad, en relación al caudal con el que opera la planta con dos tornillos funcionando. El sensor FLODAR no reporta casi variación en el caudal para las dos condiciones de operación.

Tabla 5.3.- Velocidades superficiales medidas (m/s) para las dos condiciones de flujo con LSPIV y el sensor FLODAR.

Técnica	1 Tornillo	2 Tornillos
FLODAR	0.3	0.34
LSPIV	0.17	0.33
Diferencia	-76.5%	-3.0%

Tabla 5.4.- Caudales de flujo determinados (m³/h) para las dos condiciones de flujo con LSPIV y el sensor FLODAR.

Técnica	1 Tornillo	2 Tornillos
FLODAR	38030	46570
LSPIV ($\alpha=1$)	19259	42952
Diferencia ($\alpha=1$)	-97.5%	-8.4%
LSPIV ($\alpha=0.85$)	16570	36509
Diferencia ($\alpha=0.85$)	-129.5%	-27.6%

La Figura 5.11 muestra la evolución temporal del caudal determinado con FLODAR en el sector 2 del canal de aforo y los caudales estimados con la técnica LSPIV en para el mismo sector. El sensor FLODAR no logra reportar el cambio en el caudal de operación de la planta, sino hasta dos horas después del cambio en la condición. Esta dificultad para reportar el cambio de caudal se debe a que el sensor está operando por fuera de los límites de diseño. Las especificaciones técnicas del fabricante indican que el valor mínimo de velocidad con el que recomiendan operar es 0.23 m/s. Este valor es superior al medido en el canal con la técnica LSPIV cuando solo un tornillo está en funcionamiento. Esto puede explicar la diferencia de valores de velocidad de flujo determinadas con las dos técnicas y los errores en los caudales reportados.

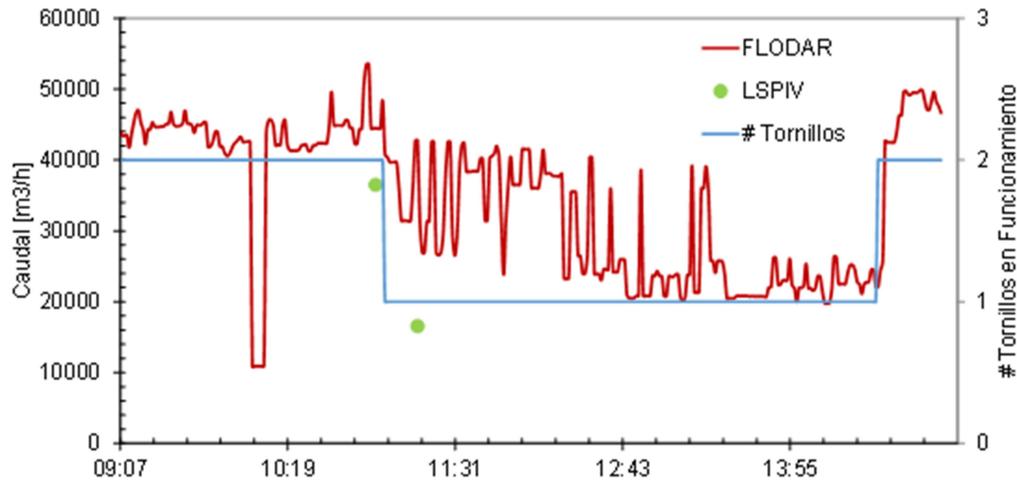


Figura 5.11.- Evolución temporal del caudal del flujo en el sector 2 del canal de aforo para las distintas condiciones de flujo determinados por el número de tornillos en funcionamiento.

Los resultados arriba presentados son para condiciones de operación fuera las condiciones de diseño de la planta de pre-tratamiento. Esto motivó a realizar una segunda campaña de medición con el ADCP para completar la caracterización del flujo de ingreso. En esta segunda oportunidad la planta operaba con seis tornillos y un caudal de $87000\text{m}^3/\text{h}$ más próximo a la condición de normal funcionamiento de la planta. A continuación se presentan los resultados obtenidos de esta segunda campaña en las cuales se usó preferentemente la técnica ADCP.

En la Figura 5.13 se observa una secuencia de perfiles verticales de velocidad en la sección central del canal de entrada. Los perfiles corresponden a una medición realizada con ADCP sobre el sector 2 del canal de entrada (ver Figura 5.4). Los perfiles verticales de velocidad que se presentan en la figura es el resultado del promedio de 30 perfiles instantáneos (el ADCP permite capturar un perfil por segundo).

Las variaciones temporales en los perfiles de la Figura 5.13 indican que el perfil medio de velocidad en esta sección está cambiando en el tiempo y su forma no coincide con un perfil logarítmico creciente de velocidades del flujo en condiciones uniforme totalmente desarrollado.

En la sección de aforo del canal (sector 3 en Figura 5.4) el perfil medio de velocidad en la vertical se asemeja al comportamiento de un perfil teórico (ver Figura 5.12). Sin embargo, fluctuaciones están presentes y los perfiles de velocidad promediados en 30 segundos difieren de un perfil teórico como se presenta en la secuencia de la Figura 5.13.

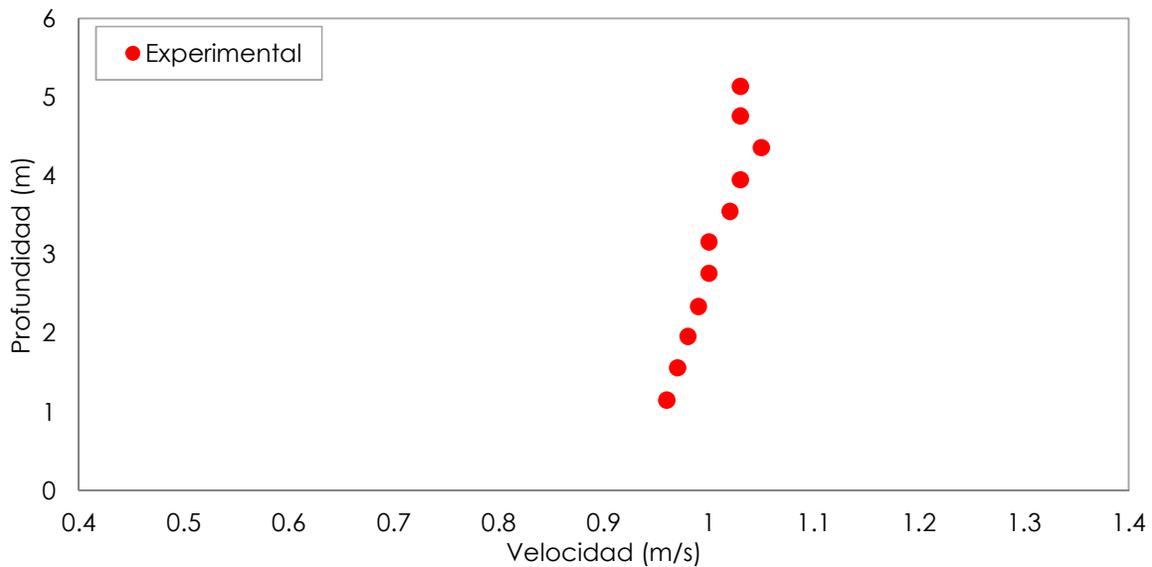


Figura 5.12.- perfil medio de velocidad en la vertical en la sección de aforo del canal (sector 3 en Figura 5.4).

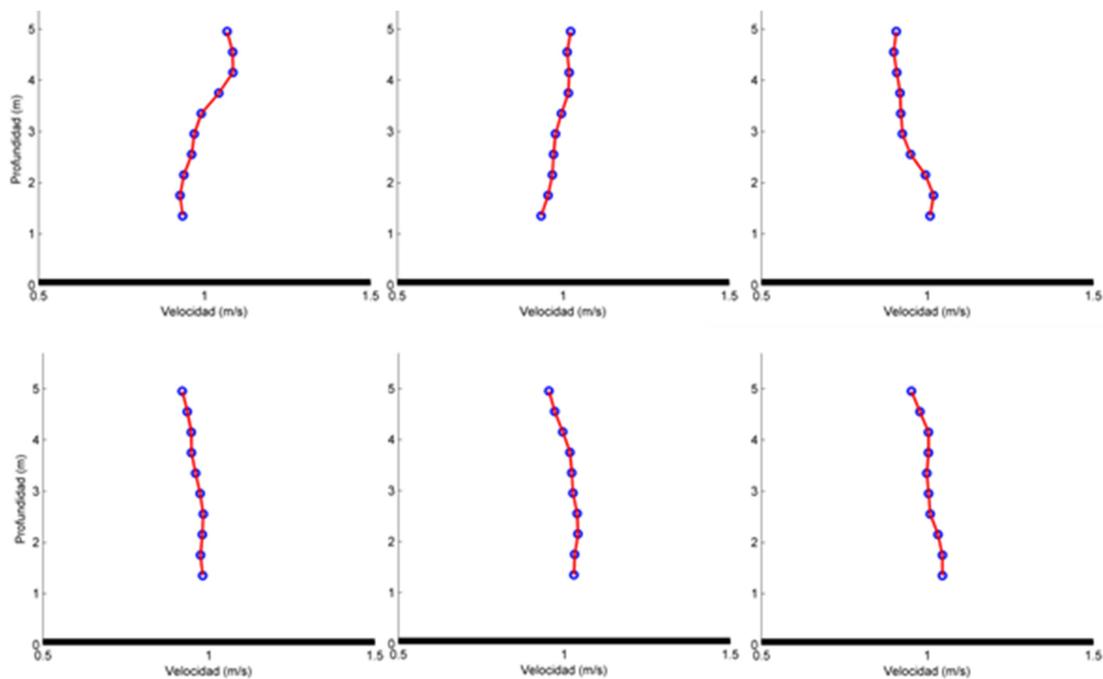


Figura 5.13.- Perfiles de velocidad obtenidos con ADCP sobre el sector 2 del canal de entrada.

5.4.1.2.- Resultados de la simulación numérica

A los resultados arriba presentados se los complementa con los resultados de la simulación numérica realizada. El modelo numérico tridimensional representa la misma condición de operación en la cual se realizaron las mediciones con ADCP: caudal 87000m³/s y los tornillos 3 al 8 en operación. En la Figura 5.14 se compara el perfil vertical medio de velocidad como resultado de la simulación numérica con el perfil medio obtenido de las mediciones con ADCP en el sector 3. Ambos perfiles tienen un comportamiento similar, aunque presenta leves diferencias en el

valor medio. Los perfiles obtenidos con ADCP en el sector 1 tienen una velocidad media de 1m/s, mientras que el modelo numérico reporta un valor de 0.88m/s aproximadamente.

La diferencia en los valores medios puede deberse a que la simulación numérica es representativa del estado estacionario del flujo con condiciones de borde que no cambian en el tiempo, mientras que en el canal de entrada los perfiles instantáneos de velocidad indican importantes fluctuaciones del flujo.

La Figura 5.15 compara los perfiles medios de velocidad obtenidos con ADCP y como resultado del promedio de 5 minutos de medición en la línea central del canal en el sector 3 al ingreso a la planta, con el perfil medio resultante de la simulación numérica tridimensional para la misma localización. Los resultados muestran un comportamiento similar del flujo en la planta y en el modelo numérico. El valor medio de velocidad de los perfiles obtenidos con ADCP en la sección central es de 1m/s, mientras que el modelo numérico reporta un valor de 0.9m/s aproximadamente. Las diferencias observadas se explican por las variaciones presentes en la transversal de los perfiles de velocidad en esa sección 2 (ver Figura 5.16) y un pequeño desplazamiento en esa dirección genera variaciones importantes de los perfiles.

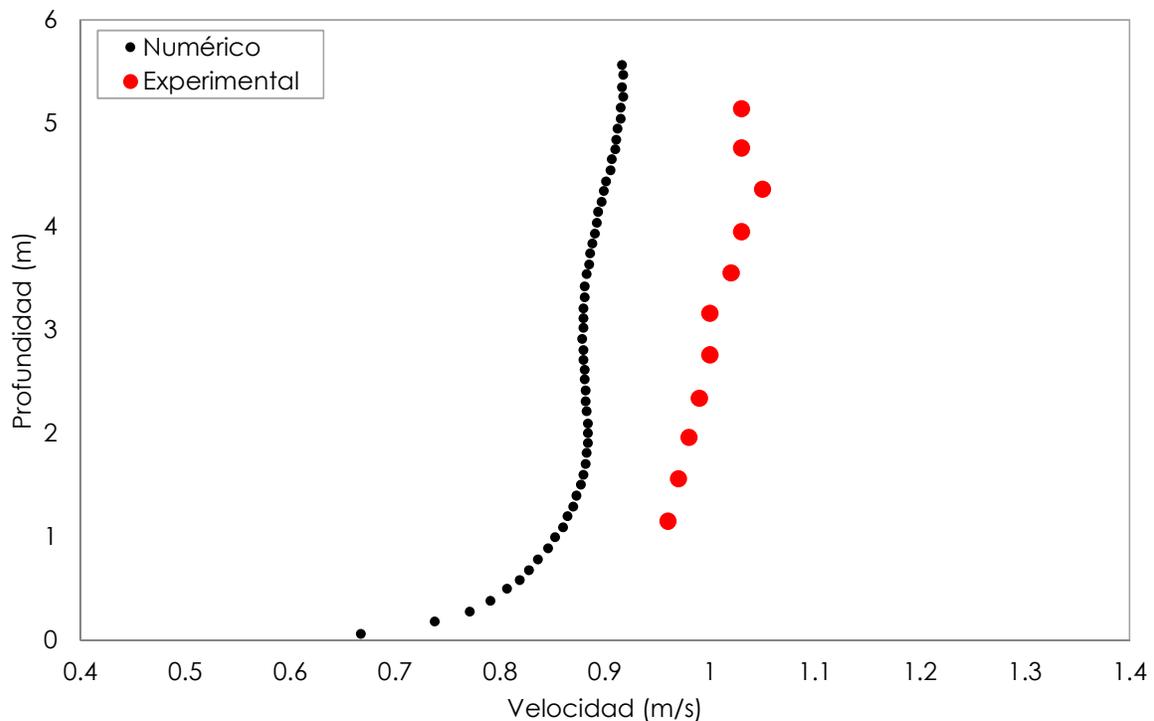


Figura 5.14.- Comparación perfiles medios de velocidad obtenidos con ADCP (en rojo) y el perfil resultante de la simulación numérica tridimensional (en negro) para el sector 3 del canal de entrada de la planta.

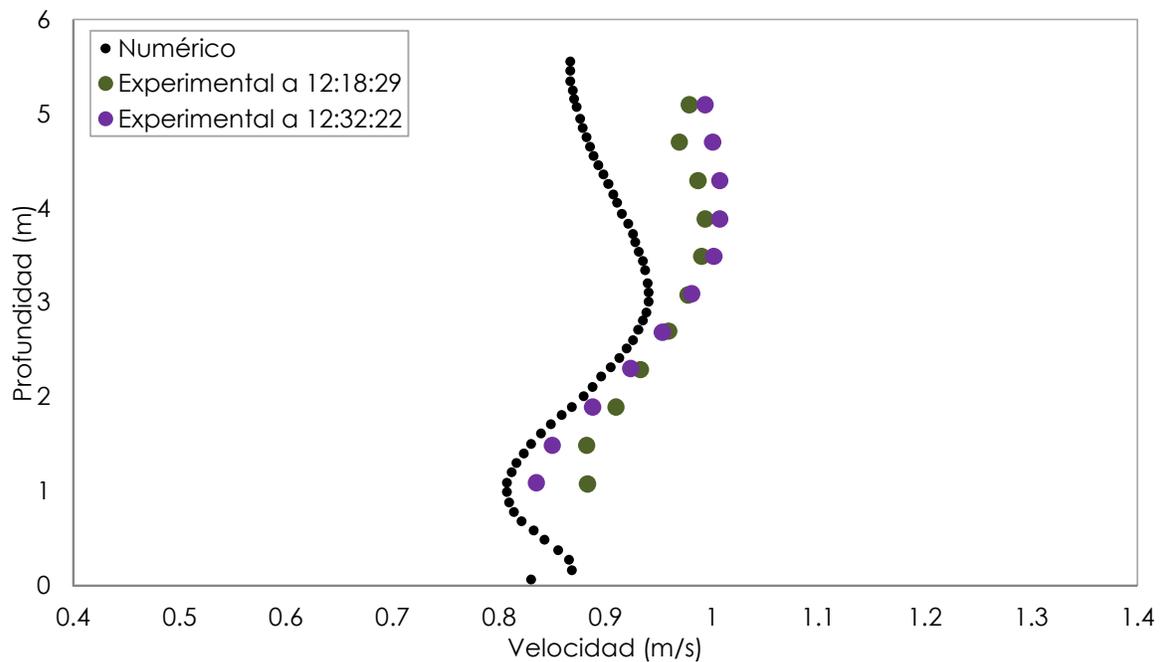


Figura 5.15.- Comparación perfiles medios de velocidad obtenidos con ADCP (en colores) y el perfil resultante de la simulación numérica tridimensional (en negro) para el sector 2 del canal de entrada de la planta.

Por último, la Figura 5.16 muestra la magnitud de la velocidad del flujo a lo largo del canal de entrada y los canales de salida que alimentan los tornillos de arquímedes. Los resultados del modelo indican que, en el canal de entrada se observa una distribución no uniforme del flujo. En el sector 1 del canal las velocidades son un poco mayores sobre la margen derecha como consecuencia de la disminución de la sección efectiva del flujo debido a la separación del flujo en la curva. El efecto de la curva sobre la distribución del flujo disminuye a lo largo del canal. Sin embargo, en el sector 3 el flujo presenta mayores velocidades en la margen derecha debido a la condición de operación de la planta (tornillos del 3 al 8 en funcionamiento), en la que cuatro de los seis tornillos en operación se encuentra a la derecha del eje central del canal.

La velocidad media del perfil transversal en la sección de aforo (sector 2) es aproximadamente 0.88m/s, similar a la que reporta el instrumento instalado en la planta (0.84m/s para la Condición 1, ver Tabla 5.2). Este mismo valor medio se puede observar en el perfil vertical de la Figura 5.15 que resulta de la simulación numérica. La diferencia es menor al 5%, lo que representa un buen ajuste del modelo numérico.

Además, las velocidades a la salida del dominio son similares en todos los canales que alimentan los tornillos, aproximadamente 0.5m/s. Integrando la velocidad en el área correspondiente resulta un caudal de salida de 4.03m³/s, con diferencias de un 1% entre las distintas áreas de salida.

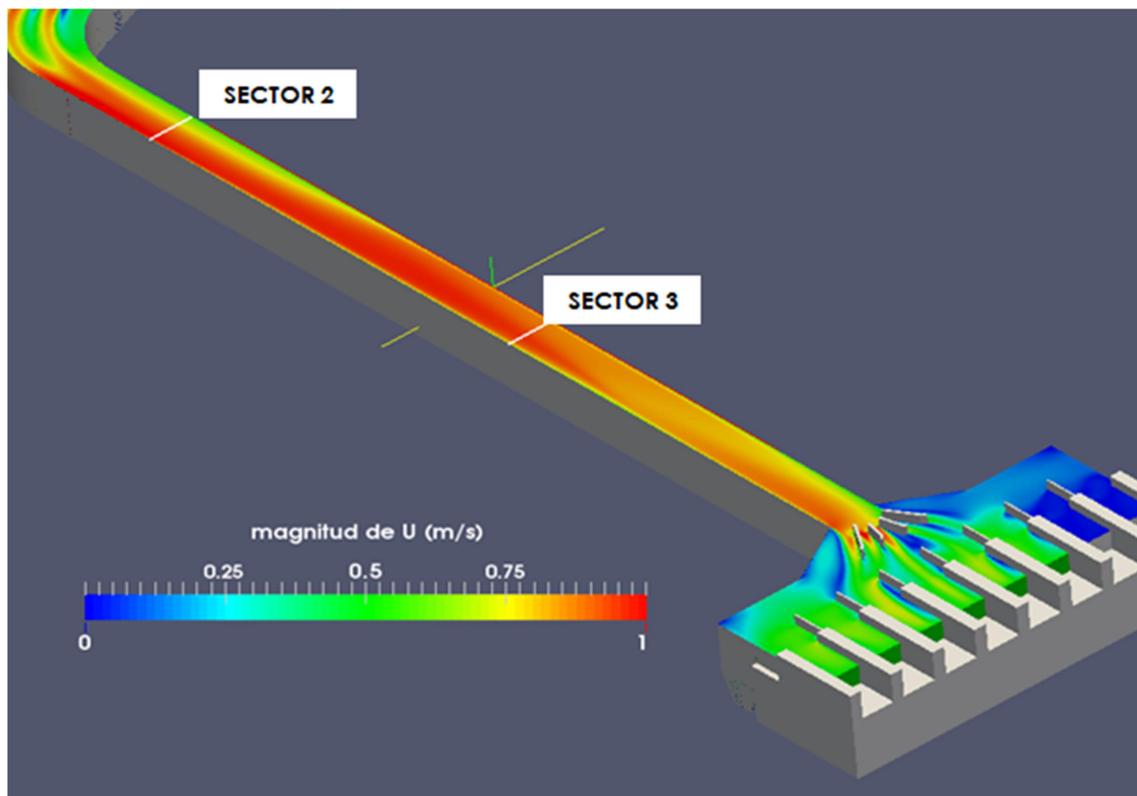


Figura 5.16.- Magnitud de la velocidad del flujo a lo largo del canal de aforo y los canales de salida que alimentan los tornillos de arquímedes.

5.4.2.- Caracterización del flujo en la zona de decantación

En esta sección del informe se presentan los resultados experimentales alcanzados a partir de mediciones realizadas in-situ con ADCP y LSPIV en la zona de entrada del flujo a los desarenadores 17 y 32 de la planta de pre-tratamiento (ver Figura 5.1). En primer lugar se muestra los resultados obtenidos de las mediciones en el desarenador 17, y luego los resultados del desarenador 32.

Las Figura 5.17 y Figura 5.18 muestran resultados de mediciones realizadas con ADCP en la entrada del flujo al desarenador 17 mientras la plataforma móvil se desplazaba desde la orilla derecha a la orilla izquierda. La Figura 5.17 muestra los valores de la componente longitudinal del vector velocidad con valores máximos del orden de 1m/s. En la figura los valores positivos están en el sentido de ingreso del flujo al desarenador, y los valores negativos indican las zonas de recirculación. Los valores en el eje de abscisas en las figuras indica el recorrido realizado por el ADCP. La progresiva cero, indica la orilla derecha, mientras que la máxima indica la orilla izquierda. La Figura 5.18 muestra los valores de la componente transversal de la velocidad que se encuentran en el orden de 0.5m/s. No se observan recirculaciones importantes en la zona ingreso de caudales del desarenador 17.

No se observa deposición de sólidos (arena) en el fondo de la zona de ingreso ya que la batimetría relevada por el ADCP es uniforme, como fue originalmente construida, con una profundidad de 0.72m en todo el recorrido.

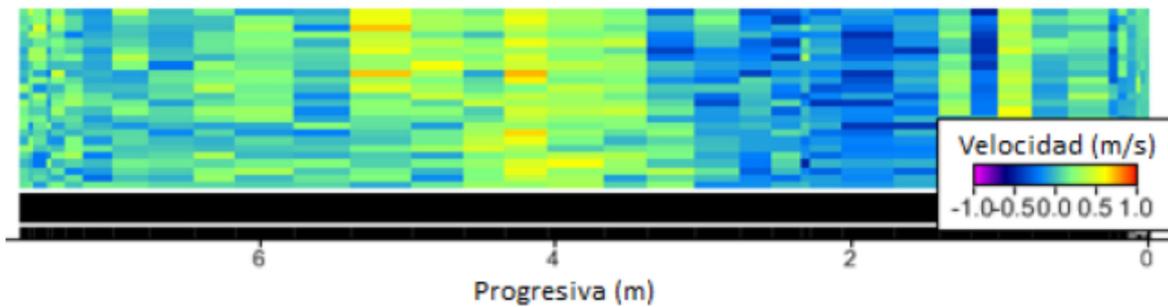


Figura 5.17.- Componente longitudinal de la velocidad registrado con ADCP en la zona de ingreso del desarenador 17 mientras la plataforma móvil se desplazaba desde la orilla derecha a la orilla izquierda. Los valores positivos indican el sentido de ingreso al desarenador, las velocidades negativas indican la zona de recirculación. La progresiva cero, indica la orilla derecha, mientras que la máxima indica la orilla izquierda. La profundidad del flujo es de 0.72m.

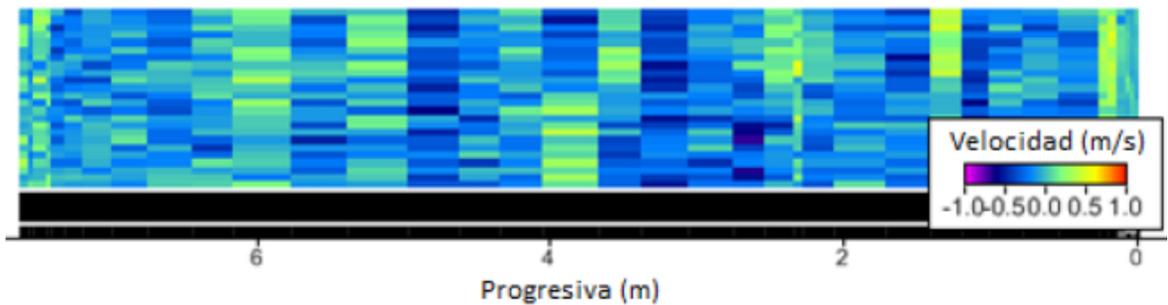


Figura 5.18.- Componente transversal de velocidad registrado con ADCP en la zona de ingreso del desarenador 17 mientras la plataforma móvil se desplazaba desde la orilla derecha a la orilla izquierda. La progresiva cero, indica la orilla derecha, mientras que la máxima indica la orilla izquierda. La profundidad del flujo es de 0.72m.

En la zona de ingreso al desarenador 17 no fue posible implementar LSPIV ya que no se observaban en superficie patrones de flujos que puedan ser analizados con esta técnica.

Las Figura 5.17 y Figura 5.18 muestran los campos de velocidad de flujo registrados con ADCP en el ingreso del desarenador 32. La Figura 5.17 muestra los valores de la componente longitudinal del vector velocidad, y la Figura 5.18 muestra los valores de la componente trasversal. En Figura 5.17, los valores positivos están en el sentido de ingreso del flujo al desarenador, y los valores negativos indican las zonas de recirculación. Los valores en el eje de abscisas en las figuras indica el recorrido realizado por el ADCP. La progresiva cero, indica la orilla derecha, mientras que la máxima indica la orilla izquierda.

En las Figura 5.19 y Figura 5.20 se observan valores de velocidad del mismo orden de magnitud que las velocidades observadas en la zona de ingreso al desarenador 17 (ver Figura 5.17 y Figura 5.18). En ambos casos las componentes longitudinal y transversal tienen valores máximos del orden de 1m/s. Esta similitud en la velocidad de entrada del flujo indica que el caudal que tratan es similar en ambas unidades desarenadoras por lo que se descartaría la hipótesis planteada para justificar el funcionamiento desigual de los decantadores que el *diseño del canal distribuidor genera una distribución no uniforme de los caudales líquidos entre las unidades desarenadoras, con mayores valores de caudales líquidos de*

ingreso en los primeros desarenadores lo que implica un menor tiempo de permanencia del fluido en la unidad desarenadora y una disminución en la eficiencia para extracción de sólidos también.

Por otro lado, en las Figura 5.19 y Figura 5.20 se observa que el ADCP registró un cambio significativo en el fondo del ingreso al decantador: con profundidades máximas del orden de 0.67m y mínimas del orden de 0.28m, situación no observada en las figuras del desarenador 17. El cambio en la profundidad es indicador de la deposición de sólidos (alrededor de 0.40m) en la zona de ingreso del desarenador 32. La profundidad mínima se registró en la región derecha del flujo donde se detecta una importante deposición, al punto tal que la profundidad del flujo (menor a 0.3m) no es suficiente para que el ADCP continúe registrando perfiles de velocidad. La deposición de sólidos coincide con la zona de menores valores de velocidad longitudinal y transversal del flujo.

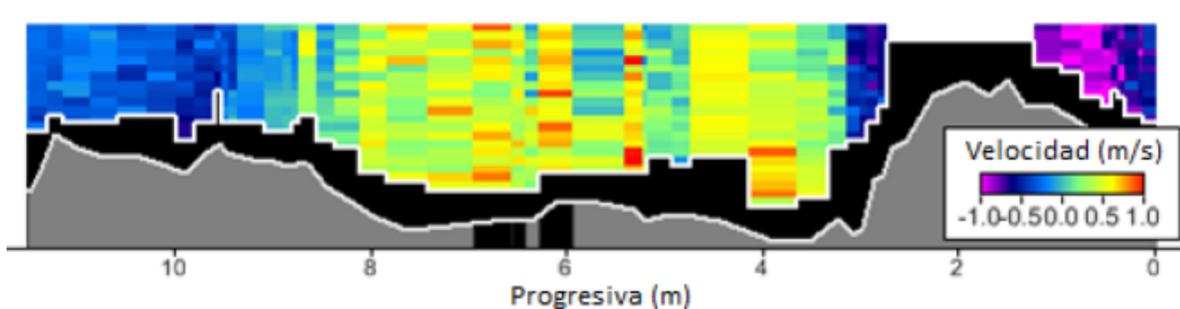


Figura 5.19.- Componente longitudinal de la velocidad registrado con ADCP en la zona de ingreso del desarenador 32 mientras la plataforma móvil se desplazaba desde la orilla derecha a la orilla izquierda. Los valores positivos indican el sentido de ingreso al desarenador, las velocidades negativas indican la zona de recirculación. La progresiva cero, indica la orilla derecha, mientras que la máxima indica la orilla izquierda. La profundidad máxima del flujo es de 0.67m mientras que la mínima es de 0.28m.

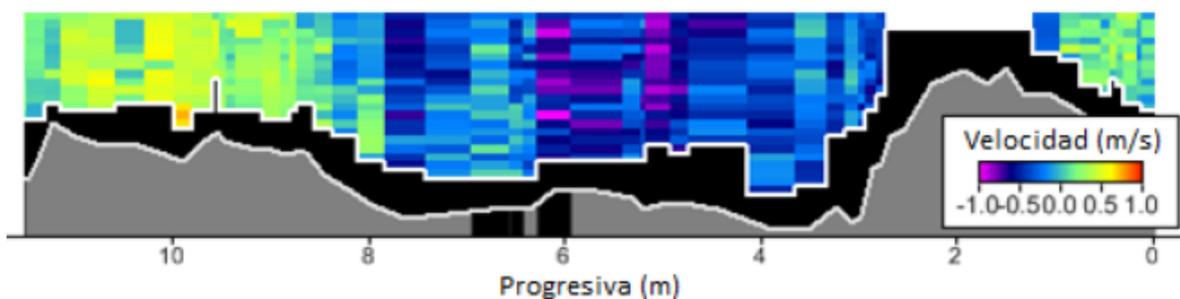


Figura 5.20.- Componente transversal de velocidad registrado con ADCP en la zona de ingreso del desarenador 32 mientras la plataforma móvil se desplazaba desde la orilla derecha a la orilla izquierda. La progresiva cero, indica la orilla derecha, mientras que la máxima indica la orilla izquierda. La profundidad máxima del flujo es de 0.67m mientras que la mínima es de 0.28m.

Las Figura 5.21 y Figura 5.22 son el resultado del post-procesamiento de los videos registrados en el ingreso al desarenador 32 para su análisis con la técnica LSPIV. Ambas figuras detectan las recirculaciones en el ingreso del desarenador 32 a nivel de la superficie del flujo. En la Figura 5.21 se observa una mayor magnitud de velocidad en la región izquierda del flujo y menores valores en la región derecha llegando en algunos puntos a velocidades casi nulas. Además, las líneas de trayectoria de la Figura 5.22 permiten caracterizar la recirculación que se

desarrolla en la región derecha del flujo. En el centro de esta zona de recirculación es el lugar donde se deposita una importante cantidad de la fracción sólida. El análisis de los resultados obtenidos con ADCP y LSPIV da cuenta del mismo fenómeno de recirculación en la entrada del desarenador 32.

El análisis conjunto de los resultados alcanzados en las dos unidades desarenadoras (17 y 32) muestran que en la entrada de las dos unidades de decantación las velocidades del flujo presentan magnitudes similares. Sin embargo la presencia de sólidos depositados en la zona de ingreso al desarenador 32 es significativamente superior. Esto último, sugiere que la problemática observada en el funcionamiento desigual de las unidades desarenadoras no está generada por una distribución no uniforme de caudales líquidos (hipótesis a), sino en que el canal distribuidor del flujo a los desarenadores no logra realizar una distribución uniforme de la fracción sólida recibiendo la última unidad desarenadora de cada grupo la mayor parte de esa fracción sólida (hipótesis b). En consecuencia, los últimos desarenadores de cada grupo de unidades se ven más exigidos en la remoción de sólidos.

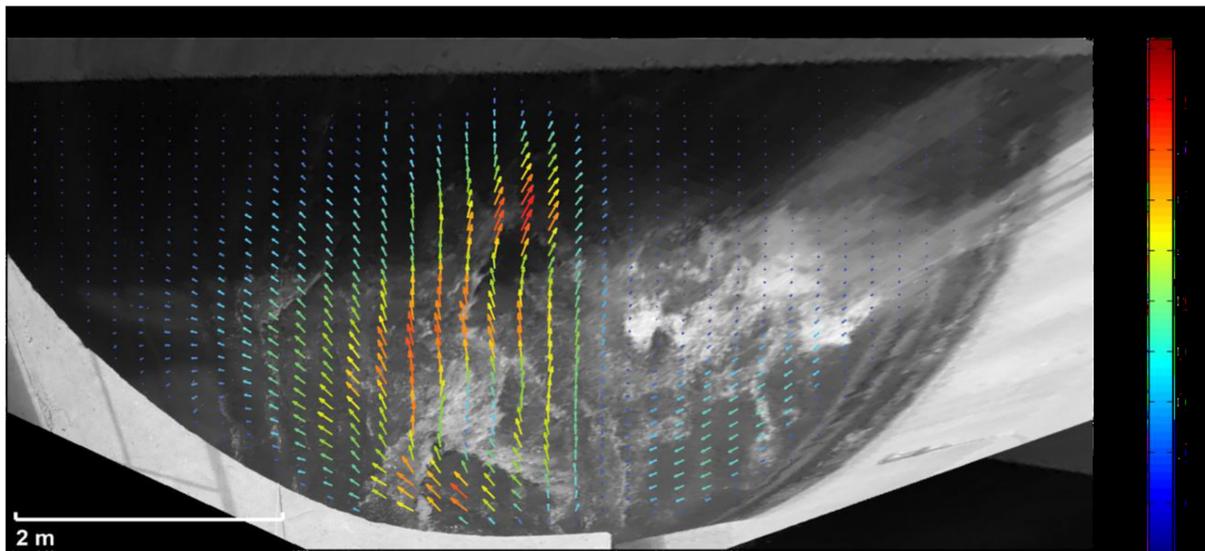


Figura 5.21.- Campo de velocidad medio rectificado en el ingreso del desarenador 32.

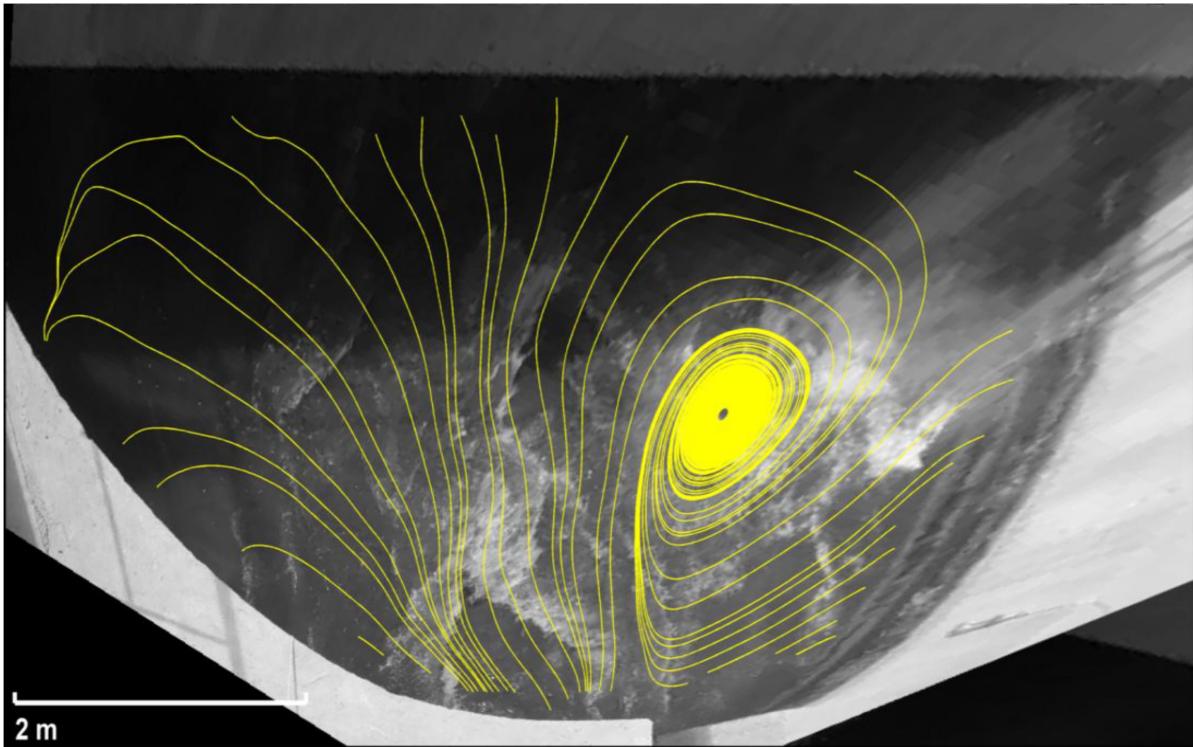


Figura 5.22.- Líneas de trayectoria de campo de velocidad medio rectificado en el ingreso del desarenador 32.

CAPITULO VI: Conclusiones y Recomendaciones

6.1.- CONCLUSIONES

En esta tesis se presentó la caracterización hidrodinámica detallada del flujo en componentes hidráulicas de plantas existentes de tratamiento de agua y aguas residuales en escala de prototipo a través del uso in-situ de técnicas experimentales de alta resolución espacial y temporal optimizadas para ser usadas en estas instalaciones, y de la simulación numérica en detalle del flujo turbulento realizada con los modelos calibrados y validados.

En primer lugar se optimizaron e implementaron modernas técnicas experimentales disponibles en el estado del arte:

- ❖ Un Velocímetro Acústico Doppler (ADV) en la zona de ingreso al proceso de clarificación de la planta de tratamiento de agua potable “Los Molinos”.
- ❖ Un Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP) en componentes hidráulicas de tres plantas de tratamiento. En la zona de ingreso al proceso de clarificación de la planta de tratamiento de agua potable “Los Molinos”; en el canal de aforo a la salida de los efluentes de la planta de tratamiento de aguas residuales “Bajo Grande; y en el canal de aforo y la zona de ingreso del flujo a decantadores de la planta de pre-tratamiento de aguas residuales “Bicentenario”.
- ❖ La técnica de Velocimetría por Imágenes de Partículas y por Seguimiento de Partículas (LSPIV/LSPTV) se utilizó en la caracterización del flujo en componentes hidráulicas de las tres plantas de tratamiento que fueron presentadas en esta tesis.

Estas técnicas proporcionaron información fundamental: validación de los sistemas de aforo instalados, parámetros característicos de la turbulencia como k , ϵ y ν ; distribución de caudales entre las unidades de decantación; campos de velocidad de flujo en la vertical; evolución temporal de perfiles verticales de velocidad; campos de velocidad superficial de flujo mediante la técnica LSPIV/LSPTV. Esta técnica es la primera vez que se aplica en plantas de tratamiento.

En segundo lugar se implementaron y validaron modelos numéricos para simular la hidrodinámica tridimensional del flujo turbulento en distintas componentes de plantas de tratamiento. En esta tesis se utilizaron dos estrategias de simulación con sus respectivos modelos de cierre para la turbulencia:

- ❖ En la planta de tratamiento de agua potable “Los Molinos” se validó un modelo basado en las RANS con un modelo de cierre para la turbulencia K-epsilon estándar.
- ❖ En la planta de tratamiento de aguas residuales “Bajo Grande” se implementaron tres modelos. En primera instancia se implementaron modelos basado en las RANS con modelos de cierres k-epsilon y k-omega

SST. En una segunda instancia se implementó un modelo LES con el modelo Smagorinsky para el cierre de la turbulencia.

- ❖ En la planta de tratamiento de aguas residuales “Bicentenario” se validó un modelo basado en las RANS con un modelo de cierre para la turbulencia K-epsilon.

Los modelos numéricos permitieron evaluar zonas de recirculación y estancamiento de flujo, detectar las zonas de mayor nivel de turbulencia, representar fluctuaciones de baja frecuencia, todos fenómenos incompatible con los procesos de tratamiento requeridos.

Las técnicas experimentales aplicadas in-situ y las simulaciones numéricas permitieron avanzar en el conocimiento acerca de la presencia y los efectos de estructuras turbulentas e inestabilidades de flujo en componentes de plantas de tratamiento. Esta información es la base para elaborar recomendaciones de diseño y optimizar la operación y el funcionamiento de las plantas de tratamientos.

- ❖ Planta de tratamiento de agua potable “Los Molinos”: Se recomiendan modificaciones en la geometría en la zona del canal distribuidor y las compuertas de ingreso a los decantadores. Específicamente para aumentar la eficiencia de los decantadores las modificaciones a realizar en la planta se deben concentrar en la zona de mayor nivel de turbulencia (rama izquierda del canal de distribución transversal y compuertas) puesto que aquí es donde se produce la rotura de los flocs en partículas más pequeñas disminuyendo la eficiencia de los decantadores.
- ❖ Planta de tratamiento de aguas residuales “Bajo Grande”: En base a los resultados experimentales y numéricos se puede concluir que la mayor precisión del modelo LES permitiría aproximar mejor el fenómeno de transporte de un escalón y predecir el tiempo de residencia de la cámara de contacto aguas arriba del canal de aforo. La subestimación de las zonas de recirculación por parte de los modelos RANS podría resultar en una subestimación del tiempo de residencia en la cámara de contacto. Esta variable se utiliza para acreditar la correcta desinfección de efluente. Esto indica que LES es una herramienta importante y útil para el diseño de nuevas plantas y para el re-equipamiento (optimizar el funcionamiento) de las ya existentes, ya que permite evaluar en detalle el comportamiento hidrodinámico del flujo y evitar que se aleje de las condiciones de diseño.
- ❖ En la planta de tratamiento de aguas residuales “Bicentenario”: La caracterización experimental y numérica indica que en la zona de ingreso al canal de aforo el perfil medio de velocidad en está cambiando en el tiempo y su forma no coincide con un perfil logarítmico creciente de velocidades del flujo en condiciones uniforme totalmente desarrollado. En la sección de aforo del canal el perfil medio de velocidad en la vertical se

asemeja al comportamiento de un perfil teórico pero existen fluctuaciones y los perfiles instantáneos difieren de un perfil teórico.

La caracterización del flujo en los desarenadoras muestran que en la entrada de las dos unidades las velocidades presentan magnitudes similares. Sin embargo la presencia de sólidos depositados en la zona de ingreso al desarenador 32 es significativamente superior. Esto sugiere que la problemática observada en el funcionamiento desigual de las unidades desarenadoras no está generada por una distribución no uniforme de caudales líquidos, sino en que el canal distribuidor del flujo a los desarenadores no logra realizar una distribución uniforme de la fracción sólida recibiendo la última unidad desarenadora de cada grupo la mayor parte de esa fracción sólida. En consecuencia, los últimos desarenadores de cada grupo de unidades se ven más exigidos en la remoción de sólidos.

6.2.- TRABAJOS FUTUROS

Se recomienda incorporar las simulaciones numéricas modelos de transporte de sedimentos para complementar el estudio de las problemáticas observadas en zona de sedimentadores: por ejemplo en la zona de ingreso a los decantadores en la planta de Berazategui.

Además, es necesario continuar el estudio para cuantificar la evolución de las inestabilidades del flujo para distintos números de Reynolds y de Froude en componentes de planta de tratamiento de agua y agua residual.

Por último, en función en función de la caracterización detallada del flujo turbulento sintetizar recomendaciones para el diseño estandarizado de plantas de tratamiento de agua y aguas residuales que tengan en cuenta, además de los criterios definidos en ingeniería sanitaria, el comportamiento hidrodinámico flujo.

CAPITULO VII: Referencias Bibliográficas

7.1.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adams, Jr. et al. (1999). "Wastewater Treatment, Environmental Engineers' Handbook". CRC Press LLC, pp. 7.17.
- Al-Sammaraee M., y Chan A. (2009). "Large-Eddy Simulation of Particle Sedimentation in a Longitudinal Sedimentation Basin of Water Treatment Plant". Part 2: The Effects of Baffles. *Chem. Eng. J.*, 152, 315–321.
- De Clercq B., Kinnear D. J. y Vanrolleghem P. A. (2002). "Hydraulic characterization of a wastewater treatment clarifier by an acoustic doppler current profiler". *Advances in Fluid Mechanics IV*, Rahman, M., Verhoeven, R. and Brebbia, C.A. (eds), WIT Press, Southampton, United Kingdom, ISBN 1-85312-910-0 pp. 451 – 462.
- Dinehart, R. L., Burau, J. R. (2005). "Averaged indicators of secondary flow in repeated acoustic Doppler current profiler crossing of bends". *Water Resources Research*, 41, 1-18.
- Droz, C. J., López, F., Prendes, H. (1998). "Mediciones de velocidades y caudales con un ADCP en el Río Paraná". *Proc., 17th Congreso Nacional del Agua y II Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur*, Santa Fé, Argentina.
- Dufresne M. V., Vazquez J., Terfous A., Ghenaim A., y Poulet J. B. (2009). "Experimental investigation and CFD modelling of flow, sedimentation, and solids separation in a combined sewer detention tank, Comput". *Fluids* 38, 1042–1049.
- Fan L., Xu N., Ke X., y Shi H. (2007). "Numerical simulation of secondary sedimentation tank for urban wastewater". *J. Chin. Inst. Chem. Eng.* 38, pp. 425–433.
- García C., Cantero M., Niño Y., and García M. (2005). "Turbulence measurements with Acoustic Doppler Velocimeters". *J. Hydr. Engrg. ASCE*. 131, 1062-1073.
- García C.M y Herrero, H. (2009). "Metodología Experimental Para Caracterizar Flujos Turbulentos Con Velocímetros Acústicos Doppler". I Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica. Carlos Paz, Córdoba, Argentina.
- García, Carlos Marcelo. (2006). "Characterization of flow turbulence induce by a bubble-plume in large scale experiments". PhD. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- García C., Jackson P., y García M. (2006). "Confidence intervals in the determination of turbulence parameters". *Experiment in Fluids*. 40, 514 – 522.
- Gargett, A. (1994). "Observing Turbulence with a Modified Acoustic Doppler Current Profiler". *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 11, pp.

1592- 1610.

González-Castro, J. A., Melching, C. S., Oberg, K. A. (1996). "Analysis of open-channel velocity measurements collected with an acoustic Doppler current profiler." *Proc., RIVERTECH 96*, 1st. Int. Conf. on New/Emerging Concepts for Rivers, IWRA, 2, Chicago, 838–845.

Goula A. M., Kostoglou M., Karapantsios T. D., y Zouboulis A. I. (2008). "A CFD methodology for the design of sedimentation tanks in potable water treatment case study: the influence of a feed flow control baffle". *Chem. Eng. J.* 140, pp. 110–121.

Huggins D. L., Piedrahita R. H., Rumsey T. (2005). "Use of computational fluid dynamics (CFD) for aquaculture raceway design to increase settling effectiveness". *Aquacult. Eng.* 33, pp. 167-180.

Huggins D. L., Piedrahita R. H., Rumsey T. (2004). "Analysis of sediment transport modeling using computational fluid dynamics (CFD) for aquaculture raceways". *Aquacult. Eng.* 31, pp. 277–293.

Hellsten, A. "Some Improvements in Menter's k-omega-SST turbulence model" 29th AIAA Fluid Dynamics Conference, AIAA-98-2554, June 1998.

Howarth, M. J. (2002). "Estimates of Reynolds and bottom stress from fast sample ADCPs deployed in continental shelf seas", *Proc., Hydraulic Measurements & Experimental Methods 2002* (CD-ROM), ASCE, Reston, Va.

Kawanisi, K. (2004). "Structure of turbulent flow in a shallow tidal estuary", *J. Hydraul. Eng.*, 130(4), 360–370.

Kiss Katalin y Patziger Miklós. (2013). "Novel measurements in primary settling tanks of large municipal wastewater treatment plants". *YBL Journal of built environment*. Vol 1. Issue 1.

Kostaschuk, R., Villard, P., Best, J. (2004). "Measuring velocity and shear stress over dunes with acoustic Doppler profiler". *J. Hydraul. Eng.*, 130(9), 932–936.

Larry W. Mays . (1999). "Hydraulic Design Handbook". The McGraw-Hill Companies, Inc. Arizona, EE.UU.

Launder, B. E., y Sharma, B. I. (1974). "Application of the Energy Dissipation Model of Turbulence to the Calculation of Flow Near a Spinning Disc", *Letters in Heat and Mass Transfer*, vol. 1, no. 2, pp. 131-138.

Lohrmann A., Hackett B., y Roed, L. P. (1990). "High Resolution Measurement of Turbulence, Velocity and Stress using a Pulse-to-Pulse Coherent Sonar". *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 166 , pp. 3-21.

- Lu, Y., Lueck, R. G. (1999a). "Using broadband ADCP in a tidal channel. Part I: Mean flow and shear". *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 16, 1556–1567.
- Lu, Y., Lueck, R. G. (1999b). "Using broadband ADCP in a tidal channel. Part II: Turbulence". *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 16, 1568– 1579.
- Luffy Mahmoud, El-Nahas Kamal, y Safwat Mohamed (2015). "Performance optimization of rectangular settling tanks in small water treatment plants by numerical approach". Eighteenth International Water Technology Conference, IWTC18 . Sharm El Sheikh, pp. 12-14.
- Marqu ez Damián S., Nigro N. M. (2010). "Comparison of single phase laminar and large eddy simulation (LES) solvers using the OpenFOAM suite". Asociación Argentina de Mec nica Computacional. (Volume XXIX. Number 37. Fluid Mechanics)
- Mays, Larry W. (1999). "Hydraulic Design Handbook". McGraw-Hill Education: New York. McGraw-Hill Education.
- Menter, F., Esch, T., "Elements of Industrial Heat Transfer Prediction", 16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering (COBEM), Nov. 2001.
- Menter, F. R., Kuntz, M., and Langtry, R., "Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model", *Turbulence, Heat and Mass Transfer* 4, 2003, pp. 625 – 632.
- Mohammad Mehdi Heydary y Hamid Reza Mehrzadegan. (2014). "Effect of baffles on the flow and hydrodynamics of settling basins: a review". *J. Agric. Res.*, pp 52(1).
- Mueller, D. S., y Wagner, C. R. (2009). "Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat". *U.S. Geological Survey Techniques and Methods* 3A-22, 72 p.
- Muste, M. Vermeyen, T., Hotchkiss, R., Oberg, K. (2007). "Acoustic Velocimetry for Riverine Environments". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 133, No. 12, p. 1297 – 1298.
- Muste, M., Yu, K. Spasojevic (2004). "Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics; Part I: moving-vessel measurements", *Flow Measurement and Instrumentation*, 15, 17-28.
- Nystrom, E. A., Oberg, K. A., Rehmann, C. R. (2002). "Measurement of turbulence with acoustic Doppler current profilers—Sources of error and laboratory results". *Proc., Hydraulic Measurements & Experimental Methods 2002 (CD-ROM)*, ASCE, Reston, Va
- Oberg, K., y Mueller, D. (2007). "Validation of Streamflow Measurements Made with Acoustic Doppler Current Profilers". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 133,

No. 12, 1421 – 1432. Lipscomb, 1995.

Oberg, K., S. Morlock, W. Caldwell, (2005). "Quality-Assurance Plan for Discharge Measurements Using Acoustic Doppler Current Profilers". U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5183.

OpenCFD. (<http://www.opencfd.co.uk/openfoam/>).

OpenCFD Ltd. (2005). Derivation, modelling and solution of the conditionally averaged two-phase flow equations. Tech. Rep. TR/HGW/02, 2005.

Parsons, D. R., Best, J. L., Lane, S. N., Orfeo, O., Hardy, R. J, Kostaschuk, R. (2007). "Form roughness and the absence of secondary flow in a large confluence-diffuence, Rio Paraná, Argentina". *Earth Surf. Processes Landforms*, 32, 155–162, doi:10.1002/esp.1457.

Patalano A., Brevis W., Guillén N., Alvarez J., García C. M., Bleninger T. y Rodríguez A. (2013). "Rectificación digital para mediciones de velocidad de flujo a gran escala utilizando velocimetría por imágenes de partículas". III Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica. Santa Fe, Argentina.

Patalano, A., García, C. M., Guillén, N., García, C., Díaz, É., Rodriguez, A., y Ravelo, A. (2014). "Evaluación Experimental De La Técnica De Velocimetría Por Seguimiento De Partículas A Gran Escala Para La Determinación De Caudales En Ríos Serranos". *Aqua-LAC UNESCO*, 6, 17-24.

Patalano, A., y García, C. M. (2016). "RIVEr - Towards affordable , practical and user-friendly toolbox for Large Scale PIV and PTV techniques". *River Flow*, St. Louis.

Patankar, S. V. (1980). "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow". Hemisphere publishing corporation, Taylor and Francis Group, New York.

Ragessi, I.; Haisama, M.; Garcia, C.; Herrero, H.; Balderrama, C.; Tarrab, L. y Cantero, M. (2009). "Caracterización experimental del Flujo Turbulento en componentes hidráulicas de una planta de tratamiento de agua potable para optimizar su funcionamiento". III Foro de Extensión Universitaria. Universidad Nacional de Córdoba.

Ragessi, I.M., Márquez Damián, S., García, C.M., Pozzi Piacenza, C., Romagnoli, M., Hillman, G. (2012). "Simulación Numérica del Flujo Turbulento en la Zona de Ingreso de Caudales al Proceso de Clarificación en una Planta de Tratamiento de Agua Potable". X Congreso Argentino de Mecánica Computacional. Salta, Argentina del 13 al 16 de Noviembre de 2012. Organizado por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Salta y la Asociación Argentina de Mecánica Computacional (AMCA).

Razmi, A. et al. (2009). "Experimental and Numerical Approach to Enlargement of

- Performance of Primary Settling Tanks". *Journal of Applied Fluid Mechanics*, Vol. 2, No. 1, pp. 1-12.
- Rogallo, R. S. y Moin P. (1984). "Numerical Simulation of Turbulent Flows". *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 16: 99-137.
- Schemper, T. J., Admiraal, D. M. (2002). "An examination of the application of acoustic Doppler current profiler measurements in a wide channel of uniform depth for turbulence calculations." *Proc., Hydraulic Measurements & Experimental Methods 2002 (CD-ROM)*, ASCE, Reston, Va.
- Shahrokhi, M. et al. (2011). "Numerical Investigation of Baffle Effect on the Flow in a Rectangular Primary Sedimentation Tank". *World Academy of Science, Engineering and Technology*.
- Spicer P.T., Pratsinis S.E., Raper J., Amal R., Bushell G., Meesters G.. (1998). "Effect of shear schedule on particle size, density, and structure during flocculation in stirred tanks". *Powder Technology*, 97 (1) (1998), pp. 26–34.
- Stacey, M. T., Monismith, S. G., Burau, J. R. (1999). "Observations of turbulence in partially stratified estuary". *J. Phys. Oceanogr.*, 29, 1950–1970.
- Szupiany R. N., Amsler M. L., Parsons D. R., Best J. L. (2009). "Morphology, flow structure, and suspended bed sediment transport at two large braid-bar confluences". *Water Resources Research*, VOL. 45, W05415, doi:10.1029/2008WR007428, 2009.
- Szupiany, R. N. (2013). "Técnicas de velocimetría y sus aplicaciones en Hidráulica", Monografía IAHR, en preparación.
- Szupiany, R. N., Amsler, M. L., Hernandez, J., Parsons, D. R., Best, J., Fornari, E., Trento, A. E. (2012). "Flow fields, bed shear stresses and suspended bed sediment dynamics in bifurcations of a large river". *Water Resour. Res.*, doi:10.1029/2011WR011677, in press.
- Tambo, N. y François, R. (1991). "Mixing, Breakup, and flocccharacteristics", in *Mixing in coagulation and flocculation*, Ed.Amirtharajah, A., Clark, M. and Trussell R., AWWA.Cap. 5.
- Tarrab, Leticia. (2013). "Incertidumbres en Mediciones de Caudal con Perfiladores de Corriente Acústicos Doppler desde Plataformas Móviles". Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Córdoba.
- Tarrab L., Brevis W., Savid C., Wierzbicki P., García C. M., Rodriguez A. (2009). "Caracterización de flujos complejos en laboratorio mediante la técnica PTV". I Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica. Carlos Paz, Córdoba, Argentina.

- Tarrab, L., Garcia, C. M., Cantero, M. I., Oberg, K. (2012). "Role of turbulence fluctuations on uncertainties of acoustic Doppler current profiler discharge measurements". *Water Resour. Res.*, 48, W06507, doi:10.1029/2011WR011185
- Thomas D.N., Judd S.J., Fawcett N. (1999). "Flocculation modelling: a review". *Water Research*, Volume 33, Issue 7, May 1999, Pages 1579–1592.
- USGS. (2006). Availability of the report "Application of the Loop Method for Correcting Acoustic Doppler Current Profiler Discharge Measurements Biased by Sediment Transport" by David S. Mueller and Chad R. Wagner (Scientific Investigations Report 2006-5079) and guidance on the application of the Loop Method. USGS, Office of Surface Water Technical Memorandum 2006.04, accessed January 23, 2012, at <http://water.usgs.gov/admin/memo/SW/sw11.08.html>
- Vanrolleghem, P.A., De Clercq, B., De Clercq, J., Devisscher, M., Kinnear, D.J. and Nopens, I. (2006). "New measurement techniques for secondary settlers: A review". *Water Science and Technology*, 53, 419-429.
- Versteeg H. K. and Malalasekera W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics. The Finite Volume Method*. Pearson Education Limited, Second Edition, 2007.
- Zhang, D. (2014). "Optimize Sedimentation Tank and Lab Flocculation Unit by CFD". Department of Mathematical Science and Technology (IMT), Norwegian University.