

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Doctorado en Ciencias de la Ingeniería



Tesis doctoral

**“Evolución espacial y temporal de la
hidrodinámica en confluencias fluviales”**

Autor: MSc. Ing. Horacio Sebastián Herrero

Director: PhD. Ing. Carlos Marcelo García

Córdoba, Junio de 2014

Evolución espacial y temporal de la hidrodinámica en confluencias fluviales

Por

MSc. Ing. Horacio Sebastián Herrero

PhD. Ing. Carlos Marcelo García
Director

COMISIÓN ASESORA

PhD. Ing. Carlos Marcelo García
(Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales - UNC)

Dr. Ing. Andrés Rodríguez
(Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales - UNC)

Dr. Ing. Ricardo Szupiany
(Facultad de Ciencias Hídricas- UNL)

Esta Tesis fue desarrollada en 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
Junio de 2014

Agradecimientos

En estas líneas quiero agradecer a todas aquellas personas que me han acompañado durante este período de formación académica:

A mi director de tesis y beca, Dr. Carlos Marcelo García quien desde el primer momento me motivó y contagió su entusiasmo en la investigación, acompañándome y transmitiéndome todo su conocimiento en todas las etapas de mi formación académica.

A los miembros de la Comisión Asesora, Dr. Andrés Rodríguez y Dr. Ricardo Szupiany por sus valiosos aportes, sugerencias, y recomendaciones para este trabajo.

Al Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA) y al Laboratorio de Hidráulica, de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, a sus directores Carlos Marcelo García, Andrés Rodríguez y Gerardo Hillman por brindarme su lugar de trabajo, instalaciones, instrumental, y recursos humanos para realizar esta investigación.

Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y a la Secretaría de Ciencia y Tecnología (SeCyT-UNC) por financiar esta investigación mediante su programa de becas de posgrado y proyectos de investigación.

Al Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Universidad Nacional de la República (Uruguay), especialmente al Dr. Francisco Pedocchi y a Guillermo López, y a la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) de la Universidad Nacional del Litoral, en especial al Dr. Ricardo Szupiany y su grupo de trabajo por poner a disposición de esta investigación sus instalaciones, instrumental y recursos humanos.

A la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba y Bomberos Voluntarios de la localidad de Monte Buey (Córdoba) por el apoyo logístico durante las campañas en campo.

A mis amigos, en especial a Magalí Carro Pérez y Leticia Tarrab, con quienes he compartido día a día de momentos inolvidables. A mis compañeros de trabajo, docentes, becarios, y ayudantes de investigación por el constante apoyo.

Finalmente, a mi abuela y a mi madre por apoyarme en todo momento y acompañarme en todas mis decisiones.

Córdoba, Argentina
Junio de 2014

Evolución espacial y temporal de la hidrodinámica en confluencias fluviales

Resumen

Las confluencias son ambientes hidrodinámicos complejos presentes en sistemas fluviales que juegan un rol importante en la dinámica de dichos sistemas, regulando el transporte de masa (contaminantes, sedimentos, etc.) además de ser hábitats con alto valor ecológico. En esta tesis se presenta un análisis de la evolución espacial y temporal de la hidrodinámica en confluencias fluviales para diferentes escalas (laboratorio o campo), distintos niveles de complejidad (geometrías y flujos de aproximación sencillos y complejos), mediante el uso de modernas técnicas de medición con elevada resolución espacial y temporal y análisis de resultados de simulaciones numéricas. En primer lugar se caracterizan, mediante mediciones en laboratorio en una confluencia con geometría y configuraciones de flujos simples, los patrones hidrodinámicos en la interfase de mezcla validando el uso de modelos conceptuales para caracterizar estos patrones hidrodinámicos. Luego se realiza un análisis de sensibilidad de la evolución de los patrones hidrodinámicos en la misma confluencia, para distintas condiciones de flujo, mediante el análisis de resultados de simulaciones numéricas realizadas por el grupo de trabajo en el cual se desarrolló esta tesis de doctorado. Finalmente, se analizan para dos proyectos que requieren desarrollos tecnológicos, los patrones hidrodinámicos presentes en dos confluencias fluviales con diferentes geometrías y los efectos de esos patrones sobre distintos procesos. En el primer proyecto se analizan los efectos en los niveles y velocidades del flujo hacia aguas arriba en un modelo físico de una confluencia de dos canales en la cual uno de los tributarios es un canal de restitución de una central hidroeléctrica en una presa. En el segundo proyecto se caracterizan in situ los procesos de mezcla presentes aguas abajo de una confluencia fluvial de mediana escala con flujos de distinta densidad. Los resultados obtenidos en el presente trabajo brindan un aporte frente a un requerimiento de la comunidad científica de investigación adicional para llegar a una mejor comprensión de los patrones hidrodinámicos en confluencias cuando se modifican sus características geométricas y del flujo, además de ampliar el estudio experimental detallado de la hidrodinámica a confluencias de ríos de mediana escala.

Spatial and temporal evolution of hydrodynamic in river confluences

Abstract

River confluences are complex hydrodynamic environments that play an important role in the dynamics of river systems regulating the mass transport (contaminants, sediments, etc.), being habitats with high ecological value. This work presents an analysis of the spatial and temporal evolution of hydrodynamics in river confluences at different scales (laboratory and field) and different levels of complexity (simple and complex geometries and flows configurations). The analysis is performed using modern measurement techniques with high spatial and temporal resolution and analyzing results of numerical simulations. First, hydrodynamic patterns in stream confluences are characterized through laboratory measurements in a confluence with simple geometry and flow conditions validating the use of conceptual models characterizing the observed hydrodynamics patterns. A sensitivity analysis of the evolution of the hydrodynamic patterns is then performed in the same confluence for different flow conditions, by analyzing results of numerical simulations. Finally, hydrodynamic patterns in river confluences and their effects on different processes are analyzed for two projects with technological requirements. The first project focuses on the backwater effects (in water surface elevations and flow velocities) in a confluence of two channels downstream of a dam, including a return channel from a hydroelectric power plant. The second project focuses on mixing processes downstream of a river confluence of medium-scale flows with different densities. The results obtained in this study provide a contribution for the scientific community to reach a better understanding of the hydrodynamic processes in river confluences when geometrical and flow characteristics are changed, and expanding the study to confluences of medium scale rivers.

Evolução espacial e temporal da hidrodinâmica em confluências de rios

Resumo

As confluências de rios são ambientes hidrodinâmicos complexos presentes nos sistemas fluviais desempenham um papel importante na dinâmica de tais sistemas, que regulamenta o transporte de massa (poluentes, sedimentos, etc.), além de ser habitats com elevado valor ecológico. Uma análise da evolução espacial e temporal da hidrodinâmica em confluências de rios para diferentes escalas (de laboratório ou de campo), diferentes níveis de complexidade (geometrias simples e fluxos de abordagem e complexo), utilizando modernas técnicas apresentadas nesta tese medição com alta resolução espacial e resolução temporal e análise dos resultados de simulações numéricas. Primeira caracterizada por medidas de laboratório em uma confluência com configurações de geometria e de fluxo simples, os padrões hidrodinâmicos na mistura interface de validar o uso de modelos conceituais para caracterizar esses padrões hidrodinâmicos. Uma análise de sensibilidade da evolução dos padrões hidrodinâmicos na mesma confluência de diferentes condições de fluxo, analisando resultados de simulações numéricas realizadas pelo grupo de trabalho em que esta dissertação foi desenvolvido é então realizada. Finalmente, discutimos dois projetos que exigem a evolução tecnológica, os padrões hidrodinâmicos em duas confluências dos rios com diferentes geometrias e os efeitos desses padrões em diferentes processos. No primeiro projeto são analisados os efeitos sobre os níveis e velocidades de fluxo a montante em um modelo físico de uma confluência de dois canais em que um canal é um reembolso de imposto de uma usina hidrelétrica em uma barragem. No segundo projeto são caracterizados in situ processos de mistura presentes a jusante de uma confluência de rios com fluxos médios de densidades diferentes. Os resultados obtidos neste estudo fornecem uma contribuição contra a exigência da comunidade científica de mais pesquisas para obter uma melhor compreensão dos padrões de confluências hidrodinâmicas quando as suas características geométricas e de fluxo são alteradas, e expandir o estudo piloto detalhado hidrodinâmica em confluências de rios de média escala.

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1. Marco Referencial.....	1
1.1. Introducción	1
1.2. Motivación Tecnológica.....	2
1.2.1. Modelo Físico “Aprovechamiento Múltiple Presa Los Monos”	2
1.2.2. Caracterización hidrodinámica del Rio Carcarañá con fines ambientales	5
1.3. Motivación Científica.....	7
1.4. Objetivos.....	11
1.5. Organización de la tesis	12
Capítulo 2. Análisis experimental en laboratorio de la evolución espacial y temporal de la hidrodinámica en una confluencia	15
2.1. Introducción	15
2.2. Instalación Experimental	16
2.3. Técnicas y metodología experimentales utilizadas	18
2.4. Resultados	20
2.4.1. Visualización de la característica del flujo en la interfase de mezcla de una confluencia	20
2.4.2. Parámetros hidráulicos del flujo de aproximación	22
2.4.3. Evolución espacial de la velocidad media longitudinal en la zona de mezcla	23
2.4.4. Evolución espacial del valor medio cuadrático de las fluctuaciones de velocidad longitudinal en la zona de mezcla.....	27
2.4.5. Análisis espectral de las señales de velocidad registradas en la zona de mezcla.	31
2.4.5.1. Análisis espectral para localizaciones al centro del canal ($y/D = 0$)	31
2.4.5.2. Análisis espectral para localizaciones a $0.9D$ del centro del canal ($y/D = 0.9$)	35
2.4.6. Análisis de las frecuencias de desprendimientos de estructuras turbulentas.....	38
2.5. Conclusiones del capítulo.....	43
Capítulo 3. Análisis de sensibilidad del comportamiento de la hidrodinámica del flujo en confluencias con variables geométricas y del flujo	45
3.1. Introducción	45
3.2. Modelo Matemático y Numérico	46
3.2.1. Modelo Matemático.....	46
3.2.2. Modelo Numérico.....	48
3.2.3. Descripción del dominio y discretización	49
3.2.4. Condiciones iniciales y de borde	50

3.3.	Resultados	50
3.3.1.	Validación del esquema de simulación	51
3.3.2.	Evaluación numérica del comportamiento hidrodinámico de la confluencia para distintas condiciones de flujo	54
3.4.	Conclusiones del capítulo	59
Capítulo 4.	Estudio experimental de una confluencia fluvial en un modelo físico de un proyecto de obras hidráulicas.....	61
4.1.	Introducción	61
4.2.	Instalación Experimental	62
4.3.	Técnicas experimentales utilizadas	64
4.4.	Resultados	67
4.4.1.	Identificación del patrón hidrodinámico en la confluencia mediante el cálculo de parámetros adimensionales.....	67
4.4.1.1.	Identificación del patrón hidrodinámico en la confluencia mediante la caracterización experimental del flujo.....	68
4.4.1.2.	Caracterización experimental del flujo en la zona de estancamiento	68
4.4.1.3.	Caracterización experimental del flujo en la zona de mezcla	72
4.4.1.4.	Caracterización experimental del flujo en la zona de aguas arriba	74
4.5.	Conclusiones del capítulo	80
Capítulo 5.	Evaluación en campo de los efectos de las condiciones del flujo sobre la hidrodinámica de una confluencia fluvial.....	82
5.1.	Introducción	82
5.2.	Descripción de la zona de estudio	83
5.2.1.	Subcuenca del Río Tercero (Ctalamochita)	83
5.2.2.	Subcuenca del Río Saladillo	84
5.3.	Técnicas experimentales utilizadas	86
5.4.	Metodología	88
5.5.	Resultados	92
5.5.1.	Parámetros hidráulicos del flujo de aproximación	92
5.5.2.	Parámetros geométricos de la confluencia.....	95
5.5.3.	Pendiente de la superficie libre.....	97
5.5.4.	Resultados de la visualización con trazadores	98
5.5.5.	Procesos de mezcla aguas abajo de la confluencia	99
5.6.	Conclusiones del capítulo	105
Capítulo 6.	Conclusiones y propuesta de trabajo futuro.....	106
6.1.	Conclusiones Generales.....	106
6.2.	Propuesta de Trabajo Futuro.....	110
Capítulo 7.	Referencias.....	112

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema en planta del Aprovechamiento Múltiple Los Monos	3
Figura 1.2. Cuenca del río Carcarañá	5
Figura 1.3. Patrones hidrodinámicos presentes en confluencias, según Constantinescu et al. (2012).....	9
Figura 2.1: Tipologías analizadas	16
Figura 2.2: Localización de puntos y perfiles para mediciones con AVD y UVP para la tipología de cuerpo cilíndrico.....	19
Figura 2.3: Localización de puntos y perfiles para mediciones con AVD y UVP para la tipología de confluencia de dos flujos paralelos.....	19
Figura 2.4: Visualización (mediante el uso de trazadores) de estructuras del tipo ET en la interfase de mezcla de la confluencia para la condición 2.1.....	21
Figura 2.5: Perfil medio de la velocidad longitudinal del flujo de aproximación para la tipología del cuerpo cilíndrico sumergido para la condición 2.1.	22
Figura 2.6: Perfil medio de la velocidad longitudinal del flujo de aproximación para la tipología de confluencia de flujos paralelos para la condición 2.1.	22
Figura 2.7: Campo medio de la velocidad longitudinal del flujo aguas abajo del cuerpo cilíndrico para la condición 2.1. Q total = 80 l/s.....	24
Figura 2.8: Campo medio de la velocidad longitudinal del flujo aguas abajo de la confluencia para la condición 2.1. Q total = 80 l/s (40 l/s en cada canal) 24	
Figura 2.9: Evolución de la velocidad media longitudinal del flujo en la zona de mezcla, a lo largo de la línea central del canal para las dos tipologías analizadas, y la obtenida por Lourenco y Shih (1993).	25
Figura 2.10: Velocidad media longitudinal del flujo adimensionalizada registrada aguas abajo de la confluencia, para la condición experimental 2.1. Q total = 80 l/s.....	26
Figura 2.11: Velocidad media longitudinal del flujo adimensionalizada registrada aguas abajo del cuerpo cilíndrico, para la condición experimental 2.1. Q total = 80 l/s (40 l/s en cada canal).....	26

Figura 2.12: Campo medio cuadrático (<i>RMS</i>) de las fluctuaciones de velocidad longitudinal del flujo aguas abajo de la confluencia para la condición 2.1. Q total = 80 l/s (40 l/s en cada canal).....	27
Figura 2.13: Campo medio cuadrático (<i>RMS</i>) de las fluctuaciones de velocidad longitudinal del flujo aguas abajo del cuerpo cilíndrico para la condición 2.1. Q total = 80 l/s.....	28
Figura 2.14: Valor medio cuadrático <i>RMS</i> (adimensionalizado) de las fluctuaciones de la velocidad longitudinal del flujo registradas aguas abajo de la confluencia, para la condición experimental 2.1. Q total = 80 l/s (40 l/s en cada canal). La línea de trazos corresponde al valor <i>RMS/u*</i> según Nezu y Nakagawa (1993) para $z/H = 0.5$	29
Figura 2.15: Valor medio cuadrático <i>RMS</i> (adimensionalizado) de las fluctuaciones de la velocidad longitudinal del flujo registradas aguas abajo del cuerpo cilíndrico, para la condición experimental 2.1. Q total = 80 l/s. La línea de trazos corresponde al valor <i>RMS/u*</i> según Nezu y Nakagawa (1993) para $z/H = 0.5$	29
Figura 2.17: Espectro de energía de la señal registrada para la componente longitudinal de velocidad en las localizaciones $y/D = 0$. Tipología = Confluencia. Condición experimental 2.1. Q total = 80 l/s (40 l/s en cada canal)	31
Figura 2.18: Espectro de energía de la señal registrada para la componente longitudinal de velocidad en las localizaciones $y/D = 0$. Tipología = Cuerpo cilíndrico. Condición experimental 2.1. Q total = 80 l/s	32
Figura 2.19: Espectro de energía de la señal registrada para la componente transversal de velocidad en las localizaciones $y/D = 0$. Tipología = Confluencia. Condición experimental 2.1. Q total = 80 l/s (40 l/s en cada canal)	32
Figura 2.20: Espectro de energía de la señal registrada para la componente transversal de velocidad en las localizaciones $y/D = 0$. Tipología = Cuerpo cilíndrico. Condición experimental 2.1. Q total = 80 l/s	33
Figura 2.22: Valor máximo de la energía para las señales de las componentes longitudinal (G_{xx}) y transversal (G_{yy}) registradas en diferentes progresivas x/D ubicadas en $y/D = 0$. Tipología = Cuerpo cilíndrico. Condición experimental 2.1. Q total = 80 l/s	34

Figura 2.23: Espectro de energía de la señal registrada para la componente longitudinal de velocidad en las localizaciones $y/D = 0.9$. Tipología = Confluencia. Condición experimental 2.1. Q total = 80 l/s (40 l/s en cada canal) 35

Figura 2.25: Espectro de energía de la señal registrada para la componente transversal de velocidad en las localizaciones $y/D = 0.9$. Tipología = Confluencia. Condición experimental 2.1. Q total = 80 l/s (40 l/s en cada canal) 36

Figura 2.26: Espectro de energía de la señal registrada para la componente transversal de velocidad en las localizaciones $y/D = 0.9$. Tipología = Cuerpo cilíndrico. Condición experimental 2.1. Q total = 80 l/s 36

Figura 2.27: Valor máximo de la energía para las señales de las componentes longitudinal (G_{xx}) y transversal (G_{yy}) registradas en diferentes progresivas x/D ubicadas en $y/D = 0.9$. Tipología = Confluencia. Condición experimental 2.1. Q total = 80 l/s (40 l/s en cada canal) 37

Figura 2.29: Variación del número de Strouhal en función del número de Reynolds del obstáculo (Schewe, 1983) 39

Figura 3.1: Malla utilizada para la tipología de la confluencia de dos flujos paralelos.. 49

Figura 3.2: Resultado de simulación numérica: Campo instantáneo de velocidades de flujo en m/s (izq.). Campo medio de velocidades de flujo en m/s (der.). Diámetro del extremo de la confluencia, $D = 0.16\text{m}$. Caudales de tributarios, $Q_1 = 40\text{l/s}$; $Q_2 = 40\text{l/s}$ 51

Figura 3.3: Ubicación de perfiles transversales de velocidad media. 52

Figura 3.4: Perfiles de velocidad media longitudinal del flujo adimensionalizados.. 52

Figura 3.5: Resultado de la simulación numérica: Campo instantáneo de velocidades de flujo en m/s (izq.). Campo medio de velocidades de flujo en m/s (der.). Diámetro del extremo de la confluencia, $D = 0.16\text{m}$. Caudales de tributarios, $Q_1 = 60\text{l/s}$; $Q_2 = 20\text{l/s}$ 55

Figura 3.6: Resultado de la simulación numérica: Campo instantáneo de velocidades de flujo en m/s (izq.). Campo medio de velocidades de flujo en m/s (der.). Diámetro del extremo de la confluencia, $D = 0.16\text{m}$. Caudales de tributarios, $Q_1 = 70\text{l/s}$; $Q_2 = 10\text{l/s}$ 55

Figura 3.7: Resultado de simulación numérica: Perfiles de velocidad media longitudinal del flujo adimensionalizados. Diámetro del extremo de la confluencia, $D = 0.16\text{m}$. Caudales de tributarios, $Q_1 = 60\text{l/s}$; $Q_2 = 20\text{l/s}$ 56

Figura 3.8: Resultado de simulación numérica: Perfiles de velocidad media longitudinal del flujo adimensionalizados. Diámetro del extremo de la confluencia, $D = 0.16\text{m}$. Caudales de tributarios, $Q_1 = 70\text{l/s}$; $Q_2 = 10\text{l/s}$ 56

Figura 3.9: Frecuencias características de las fluctuaciones del flujo en cada localización para la dirección longitudinal (x). Resultados obtenidos de simulaciones numéricas para distintas condiciones de flujo..... 57

Figura 3.10: Frecuencias características de las fluctuaciones del flujo en cada localización para la dirección transversal (y). Resultados obtenidos de simulaciones numéricas para distintas condiciones de flujo..... 58

Figura 4.1: Instalación experimental 63

Figura 4.2: Localizaciones donde se realizaron mediciones de velocidad con ADV. Las progresivas están expresadas en cm 65

Figura 4.3: Visualización de patrones hidrodinámicos del flujo para la condición 4.1 (a), condición 4.2 (b) y condición 4.3 (c) 69

Figura 4.4: Serie temporal de las componentes longitudinal (u) y transversal (v) del flujo, registradas en la zona de estancamiento (localización 9), para la condición experimental 4.2..... 69

Figura 4.5: (a) Función de autocorrelación normalizada de la componente transversal de velocidad R_{yy} registrada en la zona de estancamiento (localización 9). (b) Espectro de energía de la componente transversal de velocidad G_{yy} registrada en la zona de estancamiento (localización 9). Condición experimental 4.2. 71

Figura 4.6: Ancho efectivo del flujo en una sección A-A para dos instantes de tiempo diferentes. Condición experimental 4.2..... 72

Figura 4.7: Evolución temporal de la relación B_{ef}/B en la progresiva $x=550\text{ cm}$ para la condición experimental 4.1..... 73

Figura 4.8: (a) Valores medios de la velocidad longitudinal del flujo, y (b) energía cinética turbulenta, registradas en distintas localizaciones de la zona de

mezcla para la condición experimental 4.2. La progresiva $x = 500$ corresponde a la zona de estancamiento.	74
Figura 4.9: Series temporales de velocidad longitudinal registradas en el canal 1 aguas arriba de la confluencia (localización 1). Condición experimental 4.2.	75
Figura 4.10: Evolución de la varianza para la componente longitudinal de la velocidad del flujo registrada en el canal 1 aguas arriba de la confluencia (localización 1) a medida que varía el caudal en el canal 2, para todas las condiciones experimentales analizadas.....	76
Figura 4.11: (a) Funciones de autocorrelación normalizadas y (b) espectros de energía, de las componentes de velocidad longitudinal en el canal 1 aguas arriba de la confluencia (localización 1) y transversal en la zona de estancamiento (localización 9); para la condición experimental 4.2.....	78
Figura 4.12: Evolución temporal del ancho efectivo normalizado Z_{Bef} en la progresiva $x = 250$ cm, y de la velocidad normalizada Z_u registrada aguas arriba de la confluencia sobre el canal 1 (localización 1). Condición experimental 4.1. Ambas señales se filtraron con un filtro pasa-banda con una frecuencia de corte de 0.06 Hz.	78
Figura 4.13: (a) Serie temporal de los niveles de superficie libre del flujo registrados en el canal 1 a la salida de la central hidroeléctrica. (b) Espectros de energía de los niveles de superficie libre del flujo registrados en el canal 1 a la salida de la central hidroeléctrica y de la señal de velocidad longitudinal del flujo G_{xx} registrada en la localización 1.	79
Figura 5.1: Zona de estudio	83
Figura 5.2: ADCP River Surveyor S5®	86
Figura 5.3: Sondas multiparamétricas empleadas.	87
Figura 5.4: Localización de las secciones de medición de caudal y parámetros hidráulicos con ADCP.	89
Figura 5.5: Trayectoria de la embarcación para relevamiento batimétrico de la zona en estudio con ADCP.	90
Figura 5.6: Trayectorias longitudinales en la línea central de los ríos donde se midió la elevación de la superficie libre. Verde: Río Saladillo, Rojo: Río Tercero...	91

Figura 5.7: Transectas en los tributarios para determinar los parámetros hidráulicos aguas arriba.....	92
Figura 5.8: Secciones transversales y los correspondientes campos de magnitud de la velocidad del flujo relevados en cada uno de los tributarios. Condición experimental 5.1, campaña del día 17/12/2012. Progresiva 0m corresponde a margen izquierda en cada uno de los tributarios.....	93
Figura 5.9: Secciones transversales y los correspondientes campos de magnitud de la velocidad del flujo relevados en cada uno de los tributarios. Condición experimental 5.2, campaña del día 14/05/2013. Progresiva 0m corresponde a margen izquierda en cada uno de los tributarios.....	94
Figura 5.10: Secciones transversales y los correspondientes campos de magnitud de la velocidad del flujo relevados en cada uno de los tributarios. Condición experimental 5.3, campaña del día 13/08/2013. Progresiva 0m corresponde a margen izquierda en cada uno de los tributarios.....	95
Figura 5.11: Batimetría de la zona en estudio para la tercera condición hidrológica. ..	96
Figura 5.12: Evolución de los valores de elevación de la superficie libre (y su pendiente asociada) en la línea central de los tributarios y en un tramo aguas abajo de la confluencia (Rio Carcarañá) para la condición experimental 5.2.....	97
Figura 5.13: Visualización rectificada de la zona de estancamiento mediante el uso de trazador. Condición experimental 5.2.....	98
Figura 5.14: Visualización de capas de corte y zona de estancamiento mediante el uso de trazador. Condición experimental 5.3.....	99
Figura 5.16: Perfiles verticales de conductividad y temperatura del fluido en las secciones (T) y (S) de los tributarios (Tercero y Saladillo). Condición experimental 5.3.	100
Figura 5.17: Perfiles verticales de conductividad y temperatura en diferentes localizaciones aguas abajo de la confluencia. Condición experimental 5.3.	101
Figura 5.18: Esquema que representa el radio de curvatura seleccionado para la estimación de coeficiente de mezcla transversal $\underline{\varepsilon}_t$	102

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Condiciones del flujo analizadas para la configuración de flujo que representa la confluencia de flujos paralelos. Los datos corresponden a las condiciones en cada canal de aproximación.	17
Tabla 2.2: Condiciones del flujo analizadas para la configuración de flujo que representa el flujo alrededor de un cuerpo cilíndrico sumergido.	17
Tabla 2.3: Parámetros hidráulicos del flujo de aproximación para las dos tipologías analizadas, para la condición 2.1.	23
Tabla 2.4: Números de Strouhal para las direcciones longitudinal y transversal del flujo alrededor del cuerpo cilíndrico. Condición experimental 2.1 (Q total = 80l/s).....	40
Tabla 2.5: Números de Strouhal para las direcciones longitudinal y transversal del flujo alrededor del cuerpo cilíndrico. Condición experimental 2.2 (Q total = 30l/s).....	41
Tabla 2.6: Números de Strouhal para las direcciones longitudinal y transversal del flujo para la tipología de la confluencia de flujos paralelos. Condición experimental 2.1.	42
Tabla 2.7: Números de Strouhal para las direcciones longitudinal y transversal del flujo para la tipología de la confluencia de flujos paralelos. Condición experimental 2.2.	42
Tabla 3.1: Frecuencias características de las fluctuaciones del flujo y Número de Strouhal (St) determinadas experimentalmente en cada localización para la dirección longitudinal (x) y transversal (y).	53
Tabla 3.2: Frecuencias características de las fluctuaciones del flujo y Número de Strouhal (St) determinadas numéricamente (Pozzi et al, 2013) en cada localización para la dirección longitudinal (x) y transversal (y).	53
Tabla 3.3: Distintas condiciones de flujo simuladas (Pozzi et al, 2013) y parámetros adimensionales adoptados para su caracterización.	54
Tabla 4.1: Condiciones experimentales.....	64
Tabla 4.2: Parámetros estadísticos de las señales de velocidad registradas en la zona de estancamiento (localización 9), para cada condición experimental.....	70
Tabla 4.3: Parámetros estadísticos de las series temporales de las tres componentes de la velocidad del flujo registradas en el canal 1 aguas arriba de la confluencia (localización 1), para cada condición experimental analizada.	75
Tabla 5.1: Parámetros hidráulicos medidos con ADCP en los flujos tributarios	93
Tabla 5.2: Parámetros hidráulicos medidos aguas abajo de la confluencia para la determinación de la longitud de mezcla teórica. Condición experimental 5.3.....	103

SÍMBOLOS

Símbolo	Nombre	Unidad
A	Área del flujo	[m ²]
B	Ancho del flujo	[m]
B_{ef}	Ancho efectivo del flujo en una sección transversal	[m]
B_f	Flujo boyante	[m ⁴ /s ³]
c_f	Coefficiente de fricción del fondo	adimensional
D	Longitud característica del obstáculo	[m]
f	Frecuencia característica de desprendimientos de estructuras	[Hz]
Fr	Número de Froude	adimensional
f_R	Frecuencia de registro del UVP o ADV	[Hz]
g	Aceleración de la gravedad	[m/s ²]
G_{xx}	Energía de la señal de la componente longitudinal de velocidad	[cm ² /s]
G_{yy}	Energía de la señal de la componente transversal de velocidad	[cm ² /s]
H	Profundidad del flujo	[m]
k_s	Rugosidad de Nikuradse	[m]
L	Escala de longitud de los grandes vórtices	[m]
L_{mt}	Longitud de mezcla transversal	[m]
M_R	Relación de momentos	adimensional
p	Presión	[Pa]
Q	Caudal	[m ³ /s]
R	Radio de curvatura	[m]
Re	Número de Reynolds del flujo	adimensional
Re_D	Número de Reynolds del obstáculo	adimensional
RMS	Valor medio cuadrático de las fluctuaciones de velocidad	[m/s]
R_{xx}	Función de autocorrelación normalizada la señal de la componente longitudinal de velocidad	adimensional
R_{yy}	Función de autocorrelación normalizada la señal de la componente transversal de velocidad	adimensional
S	Parámetro de estabilidad	adimensional
S_f	Pendiente de la superficie libre del flujo	[m/m]

St	Número de Strouhal	adimensional
T_f	Escala de tiempo de la turbulencia	[s]
TKE	Energía cinética turbulenta	[m ² /s ²]
T_{Se}	Período de <i>seiche</i>	[s]
u	Componente longitudinal de velocidad	[m/s]
U	Velocidad media en la dirección longitudinal	[m/s]
u'	Desvío estándar de la señal de la componente longitudinal de velocidad	[m/s]
U_{conv}	Velocidad convectiva	[m/s]
U_m	Velocidad media de aproximación en la dirección longitudinal	[m/s]
U_R	Relación de velocidades	adimensional
U_{RM}	Relación de velocidades modificada	adimensional
u^*	Velocidad de corte	[m/s]
v	Componente transversal de velocidad	[m/s]
V	Velocidad media en la dirección transversal	[m/s]
v'	Desvío estándar de la señal de la componente transversal de velocidad	[m/s]
w	Componente vertical de velocidad	[m/s]
W	Velocidad media en la dirección vertical	[m/s]
w'	Desvío estándar de la señal de la componente vertical de velocidad	[m/s]
x	Distancia en la dirección longitudinal	[m]
y	Distancia en la dirección transversal	[m]
z	Distancia en la dirección vertical	[m]
ε_t	Coficiente de mezcla transversal	[m ² /s]
κ	Constante de Von Karman	adimensional
μ	Viscosidad dinámica del fluido	[Poise]
ν	Viscosidad cinemática del fluido	[m ² /s]
ρ	Densidad del fluido	[kg/m ³]

Capítulo 1. Marco Referencial

1.1. Introducción

Las confluencias son elementos de sistemas fluviales que juegan un rol importante en la dinámica de estos sistemas, regulando el transporte de sedimentos y contaminantes, además de ser hábitats con alto valor ecológico. Estas confluencias son ambientes hidrodinámicos complejos ya que la convergencia de los flujos produce complicados patrones de movimiento de fluidos.

Estudios previos de confluencias en pequeños canales naturales y en laboratorio en condiciones estacionarias, utilizando técnicas experimentales o simulaciones numéricas, han caracterizado el flujo en confluencias en las siguientes zonas (Komura, 1973; Mosley, 1982; Ashmore y Parker, 1983; Best, 1986, 1987, 1988; Rhoads, 2005): a) zona de estancamiento aguas abajo del vértice de la confluencia; b) capa de corte y zona de mezcla; c) zona de separación del flujo; d) zona de aceleración del flujo que alcanza su máxima velocidad; e) zona de recuperación del flujo; f) zonas de celdas de circulación secundaria.

Las características hidrodinámicas del flujo en confluencias mencionadas anteriormente corresponden a observaciones basadas en el análisis de las características de flujo medio tridimensional.

Las confluencias de flujos están caracterizadas por la presencia de una variedad de estructuras coherentes del escurrimiento que pueden generar distintos patrones en la distribución del sedimento (procesos erosivos y sedimentaciones y por lo tanto características morfológicas particulares -Szupiany, 2007-) como así también distintos procesos de mezcla de contaminantes. Comprender cómo y por qué se generan estas estructuras coherentes se ha convertido en un objeto de investigación científica, y es de carácter complejo ya que se producen interacciones entre los flujos convergentes con distintas características (caudales, velocidades de flujo, densidad, presencia de sedimentos, etc.) y la morfología del cauce.

Con el desarrollo de tecnología avanzada (instrumentos de medición y procesadores de cálculo), la investigación en confluencia fluviales se ha desarrollado rápidamente en las últimas dos décadas del siglo XX a través de trabajos en laboratorio (Best y Roy, 1991; Biron et. al, 1993, 1996, 2002), modelación numérica (Kirkil y Constantinescu, 2009; Miyawaki et. al, 2009, Contantinescu et al 2011; Contantinescu et al, 2012;) y estudios de campo (Best, 1988; Mcllelland, et al., 1996; Lane et al, 2008; Sukhodolov y Rhoads, 2001; Rhoads y Sukhodolov, 2004; Rhoads y Sukhodolov, 2008).

En este marco se desarrolló esta tesis de doctorado y en las dos próximas secciones se describen las motivaciones tecnológicas y científicas que le dieron origen.

1.2. Motivación Tecnológica

Una mejor comprensión de los procesos físicos presentes en confluencias fluviales es necesaria para evaluar la evolución temporal y espacial de la hidrodinámica del flujo en confluencias. Esta información es requerida, entre otras aplicaciones, para el estudio de la interacción flujo-sedimentos-morfología y para la determinación de patrones de dilución y mezcla de contaminantes requeridos para minimizar y predecir el impacto ambiental de los mismos como así también desarrollar metodologías para la planificación y protección de los recursos hídricos superficiales para el uso sustentable de los mismos.

En el Centro de Estudios y Tecnología del Agua y el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba han sido desarrollados dos servicios tecnológicos en los cuales el autor de esta tesis ha participado activamente, que requieren el estudio de la evolución temporal y espacial de la hidrodinámica del flujo en confluencias. Los estudios mencionados, que se detallan a continuación se denominan: a) Modelo Físico “Aprovechamiento Múltiple Presa Los Monos” (AMPLM); b) Caracterización hidrodinámica del Rio Carcarañá con fines ambientales.

1.2.1. Modelo Físico “Aprovechamiento Múltiple Presa Los Monos”

El proyecto “Aprovechamiento Múltiple Presa Los Monos” (AMPLM). (Figura 1.1) es parte integrante del Programa de Aprovechamiento Integral de la Cuenca del Río Senguerr, la cual comprende buena parte de la provincia de Chubut y parte de la provincia de Santa Cruz, Argentina. Las obras hidráulicas diseñadas (en el actual proyecto) tienen por objeto la regulación de caudales con la finalidad de satisfacer las necesidades de agua potable, riego, regulación de caudales del Sistema Lacustre Muster-Colhué Huapi, atenuación de las crecidas del río Senguerr, generación y transporte de energía al Sistema Interconectado Nacional, y la preservación de la fauna íctica, recreación y turismo.

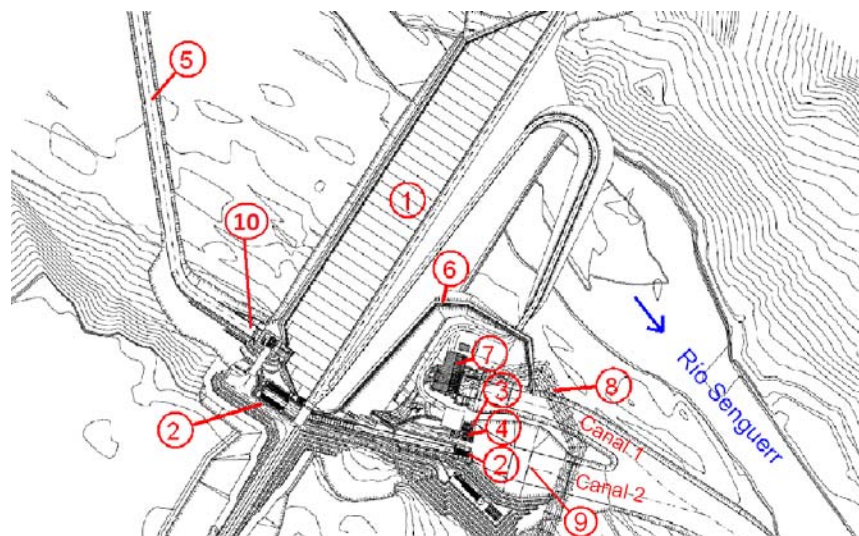


Figura 1.1. Esquema en planta del Aprovechamiento Múltiple Los Monos

El proyecto del aprovechamiento está integrado por los siguientes componentes, los cuales se identifican en la Figura 1.1 con el número correspondiente en el listado:

- 1) Presa de materiales sueltos con pantalla impermeable de hormigón;
- 2) Vertedero para evacuar crecidas (incluye rápida y salto ski);
- 3) Descarga de medio fondo;
- 4) Descarga de fondo;
- 5) Obras de Desvío del Río durante la construcción;
- 6) Escala y esclusa de peces;
- 7) Central hidroeléctrica;
- 8) Línea de alta tensión en 132 KV;
- 9) Cuenco pre-excavado para disipar energía; y
- 10) Obra de toma para descargador de fondo y central hidroeléctrica.

Como órgano principal de evacuación de excedentes hídricos, la presa “Los Monos” posee un vertedero frontal con canal lateral ubicado en su margen derecha (indicado con el número 2 en la Figura 1.1), diseñado para evacuar una crecida extrema estadística (recurrencia de 10000 años en caudal y volumen), que produciría una descarga de $527 \text{ m}^3/\text{seg}$. El vertedero posee un ancho de 30 m y su eje se ubica perpendicular al eje de la presa. Luego de pasar por el canal lateral el flujo ingresa a una rápida con una sección rectangular de 7 metros de ancho de solera. Como estructura de disipación de energía se desarrolla al final de la rápida un salto esquí.

El emplazamiento de la central hidroeléctrica (indicado con el número 7 en la Figura 1.1) está previsto en la margen derecha del río, inmediatamente aguas abajo del pie de presa. Se trata de una central hidroeléctrica convencional equipada con dos turbinas Francis de 17 MW cada una. El caudal instalado es de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ y su salto máximo es de 44 metros. El circuito hidráulico se completa por medio de tubos difusores que descargan al canal de restitución (indicado como “Canal 1” en la Figura 1.1).

Este canal de restitución junto con el canal de restitución del vertedero (indicado como “Canal 2” en la Figura 1.1), los cuales tienen una profundidad de aproximadamente 5 metros, convergen en un punto en común, formando una confluencia. La presencia de esta confluencia sumada a la poca profundidad del flujo en los canales de restitución, dan origen a procesos físicos que se manifiestan por la presencia de estructuras coherentes en la zona de estancamiento e interfase de mezcla que podrían generar fluctuaciones temporales en los flujos convergentes. La presencia de fluctuaciones en el flujo (velocidades y profundidad del canal de descarga de la central hidroeléctrica (indicado como “Canal 1” en la Figura 1.1) pueden generar efectos relevantes debido a que podría perturbar los niveles de restitución y por lo tanto también la altura de carga, con la implicancia que esto tiene en lo que se refiere al correcto funcionamiento de las máquinas generadoras.

La motivación tecnológica en este servicio consiste en cuantificar, a partir de datos experimentales registrados en un modelo físico y con modernas técnicas de medición,

los procesos físicos en la zona de la confluencia de los canales 1 y 2 (Figura 1.1) y sus efectos sobre los flujos convergentes.

1.2.2. Caracterización hidrodinámica del Río Carcarañá con fines ambientales

El río Carcarañá nace en la provincia de Córdoba, Argentina por la confluencia de los ríos Tercero o Ctalamochita (del cual es de directa continuación) y Saladillo (nombre del curso inferior del río Cuarto). Luego, este río ingresa en la provincia de Santa Fe, a la que cruza desembocando en la localidad de Gaboto en el río Coronda, que a su vez lo hace en el río Paraná (Figura 1.2). El río Tercero (Ctalamochita) por su caudal, es uno de los ríos más importantes de la región, por lo que es necesario asegurar la calidad de este recurso como fuente de agua para consumo de las poblaciones que actualmente abastece, considerando además al mismo como fuente potencial de agua para otras poblaciones en el futuro. En su primer tramo aguas abajo del embalse Piedras Moras, en la ciudad de Río Tercero, se ubica un polo industrial, constituyendo éste un punto de riesgo para el río, por lo que es importante realizar un seguimiento detallado del recurso con un enfoque integral, con el objetivo de detectar cambios tanto hidrodinámicos como ambientales para elaborar un plan de acción a implementar en la cuenca de aporte.

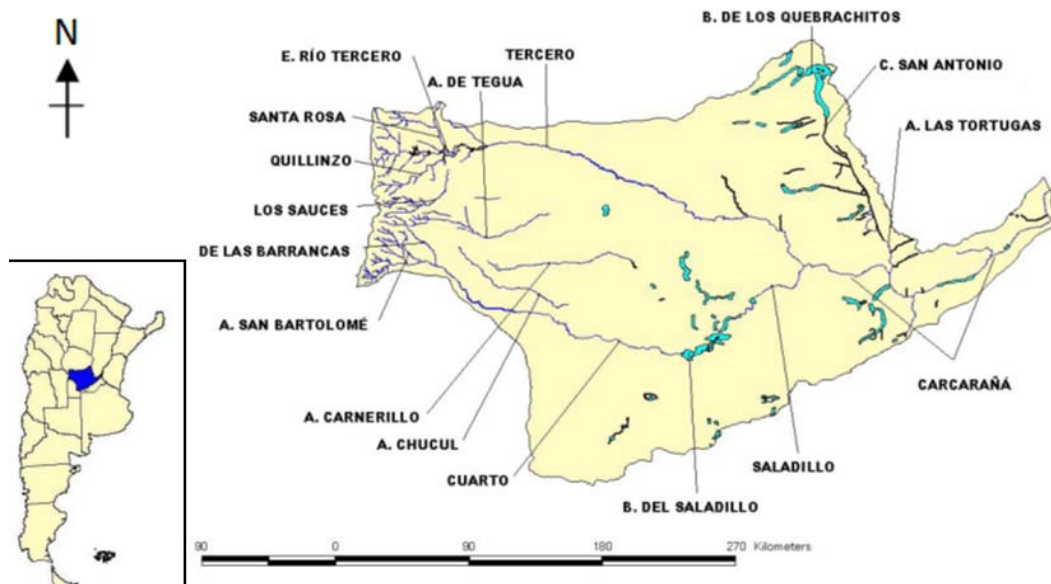


Figura 1.2. Cuenca del río Carcarañá

Uno de los nodos más importantes de este sistema fluvial es la confluencia de los ríos Tercero (Ctalamochita) y Saladillo (ver Figura 1.2). La confluencia se localiza a 10 km al este de la localidad de Monte Buey, al sur-este de la provincia de Córdoba (Argentina). En esta zona ambos ríos son de baja pendiente, presentando características de ríos de llanura. Una característica importante de esta confluencia es que los tributarios presentan una relación de caudales muy variables a lo largo del año ya que uno de los tributarios (Río Tercero) se encuentra regulado con una serie de embalses en su cuenca alta, mientras que el otro tributario no se encuentra regulado. Así en épocas de lluvias el Río Saladillo es dominante mientras que en el estiaje el tributario dominante es el río Tercero. Además el río Saladillo, presenta generalmente mayor densidad que el río Tercero debido a elevados contenidos de sal presentes en la zona drenada hacia este tributario (Barchiesi et. al, 2013). La confluencia de flujos de diferente densidad genera una mayor complejidad en los patrones hidrodinámicos y de mezcla no reportados en estudios de campo previos donde se evaluaron los patrones hidrodinámicos en confluencia fluviales (Lane et al, 2008; Sukhodolov y Rhoads, 2001; Rhoads y Sukhodolov, 2004; Rhoads y Sukhodolov, 2008).

Un parámetro importante requerido en este servicio tecnológico es la longitud de mezcla necesaria para alcanzar una desviación máxima del 5% en el valor de la concentración de sal. Este parámetro se puede predecir utilizando ecuaciones propuestas por Fischer et. al (1979) que utilizan variables hidráulicas globales (por ejemplo la velocidad y profundidad medias y ancho del río aguas abajo de la confluencia, respectivamente). Sin embargo el uso de estas ecuaciones requiere que no exista estratificación en la región de la confluencia generada por la diferencia de densidad de los flujos convergentes por lo que no se puede utilizar en este caso de estudio. Además, la presencia de distintos patrones hidrodinámicos puede modificar significativamente el resultado.

1.3. Motivación Científica

Para dar respuestas a las motivaciones tecnológicas citadas anteriormente se requiere investigación científica en distintas áreas de vacancia que serán analizadas a continuación.

Una característica hidrodinámica relevante de las confluencias fluviales es la formación de una interfase de mezcla (IM) entre los flujos convergentes y el desarrollo de estructuras coherentes de gran escala dentro de esta interfase (Constantinescu et al. 2011). Rhoads y Sukhodolov (2008) argumentan que generalmente las interfases de mezcla en confluencias fluviales han sido analizadas como capas de mezcla poco profundas en la que los intercambios laterales de cantidad de movimiento generalmente son despreciables, aun cuando esta suposición no es siempre válida. Por ello, es importante lograr una completa comprensión de la evolución espacial y temporal del flujo en las interfases de mezcla en confluencias fluviales para verificar las hipótesis que subyacen a los modelos numéricos hidrodinámicos que se utilizan para simular flujos en esos ambientes fluviales, como por ejemplo la verificación de la relación existente entre la energía cinética de la turbulencia (TKE), la tasa de disipación de esa energía y la escala de longitud característica de los procesos turbulentos presentes que podría no ser única (Rhoads y Sukhodolov 2008).

Los principales parámetros que gobiernan los procesos hidrodinámicos en las interfases de mezcla en confluencias fluviales y que definen la posición y la alineación de esa interfase son las relaciones de caudales (Hsu et al. 1998), cantidad de movimiento y de velocidad entre los dos flujos convergentes (Rhoads y Sukhodolov, 2008), la magnitud de los ángulos entre los flujos de entrada y el canal aguas abajo (Rhoads y Sukhodolov, 2001), y los cambios en la morfología en la entrada a la confluencia si son graduales (fondo concordantes) o bruscos (fondo no concordante) (Biron et al 1996). La estructura del flujo en las interfases de mezcla en confluencias naturales es aún más complicada por los efectos topográficos sobre el flujo inducidos por las formas de fondo en el lecho del canal, por la rugosidades de fondo de gran escala y por las irregularidades a gran escala en las márgenes de los cursos fluviales (Rhoads y Sukhodolov, 2001). Además, las diferencias de densidades de los flujos de

aproximación (definidos por la temperatura, concentraciones de sedimentos y contaminantes, etc.) afectan en gran medida los procesos en la interfase de mezcla.

Una alternativa para analizar en forma simplificada las características hidrodinámicas de las interfases de mezcla en confluencias que podría ser utilizada en los proyectos que generan la motivación tecnológica de esta tesis es realizar consideraciones teóricas de la mecánica de fluidos sobre cómo las interfases de mezcla que se desarrollan en flujos de corte poco profundos. En ese marco, Constantinescu et al. (2012) determinaron, utilizando simulaciones numéricas del flujo turbulento en una pequeña confluencia fluvial en el Estado de Illinois de EE.UU. para la cual se encuentran disponibles mediciones de campo (Rhoads y Sukhodolov 2004), que dependiendo de la geometría en planta y del ángulo entre los flujos convergentes así como la relación de velocidades a través de la interfase de mezcla, esta interfase puede estar descrita de acuerdo a sus características hidrodinámicas utilizando dos patrones: Kelvin-Helmholtz (KH) o estela turbulenta (ET). Ambos esquemas conceptuales se presentan en la Figura 1.3.

En el primer caso (patrón KH), se observa una reducida zona de estancamiento (zona de recirculación del flujo y velocidades medias longitudinales cercanas a cero o negativas), y luego la interfase de mezcla incluye estructuras predominantemente cuasi bidimensionales de gran escala con el mismo sentido de rotación, cuyo crecimiento están impulsados por la inestabilidad KH y por el agrupamiento de estas estructuras. En el caso de patrones de ET, la zona de estancamiento es mayor que para el caso KH, y la interfase de mezcla incluye estructuras cuasi bidimensionales con sentidos de rotación opuestos.

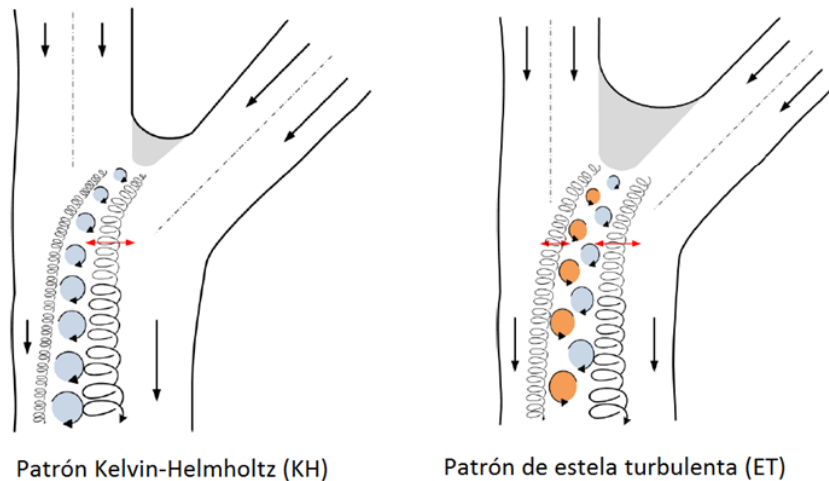


Figura 1.3. Patrones hidrodinámicos presentes en confluencias, según Constantinescu et al. (2012)

Constantinescu et al. (2012) argumentan que en confluencias fluviales naturales ambos patrones naturales pueden estar presentes simultáneamente influyendo en los patrones hidrodinámicos dentro de la interfase de mezcla, pero que a menudo un patrón dominará sobre el otro siendo las condiciones de flujo, la geometría de la confluencia y la batimetría las que determinarán cuál es el patrón dominante.

Constantinescu et al. (2011), utilizando también simulaciones numéricas, afirman que los patrones hidrodinámicos Kelvin Helmholtz (KH) y estela turbulenta (ET) estarán presentes en la interfase de mezcla cuando las relaciones de cantidad de movimiento y de velocidad entre los flujos convergentes sean mucho mayores que la unidad o se encuentren cerca de la unidad, respectivamente.

Rhoads y Sukhodolov (2004) observaron en una pequeña confluencia fluvial natural una zona de estancamiento con recirculación de fluido y que está limitada en cada lado por capas de corte más pequeñas. La formación de estructuras 2D dentro de las dos capas de corte que limitan la zona de estancamiento es impulsada por el patrón de KH. En el extremo aguas abajo de la zona de estancamiento, las dos capas de corte pequeñas se fusionan formando una gran capa de corte y estas estructuras alternadas se unen para formar otras de mayor tamaño que giran en direcciones opuestas (vorticidad alterna). Por su parte Constantinescu et al. (2012) esquematiza en la Figura 1.3 estructuras que, en lugar de unirse, se separan a medida que se avanzan sobre la

zona de mezcla. De todas formas en ambos casos, el mecanismo para la formación de estructuras cuasi 2D es similar al desarrollo de la calle de vórtices de Von Karman detrás de un obstáculo (patrón de ET).

Ingram y Chu (1987) caracterizan las estructuras 2D observadas en un patrón de estelas turbulentas a partir de un parámetro que tiene en cuenta, además de las características geométricas del obstáculo, la turbulencia 3D generada por la fricción del fondo. En este sentido, definieron un parámetro de estabilidad, S , como:

$$S = c_f \frac{D}{H} \quad (1.1)$$

donde c_f es un coeficiente de fricción, D es una longitud característica del obstáculo y H es la profundidad de flujo. Para las estructuras 2D, dependiendo del valor del parámetro de estabilidad, es posible identificar tres patrones hidrodinámicos diferentes: a) si $S < 0.2$, corresponde a un patrón típico con desarrollo de calle de vórtices (CV) con un mecanismo de desprendimiento de vórtices de manera oscilatoria que se asemeja a las estructuras turbulentas von Kármán, a diferencia de que en este caso las estructuras son 2D, b) si $0.2 \leq S < 0.5$ el patrón se denomina "burbuja inestable" (BI) y es el caso de una estela con recirculaciones unidas al obstáculo pero que se vuelven inestables aguas abajo, provocando oscilaciones sin desprendimientos, debido a que es mayor el efecto amortiguador de la fricción del fondo que la producción de energía cinética turbulenta del flujo; c) finalmente, si $S \geq 0.5$ la estela turbulenta no tiene oscilaciones, debido a que el efecto de la fricción con el fondo es dominante, lo que evita la presencia de desprendimientos como en los casos anteriores. Este caso se conoce como "burbuja estable" (BE).

Aun con los antecedentes mencionados en la caracterización hidrodinámica de confluencias fluviales, Constantinescu et al. (2011) definen un área de vacancia ya que ellos entienden que se necesita investigación adicional centrándose especialmente en confluencias fluviales en el que uno de los mecanismos o características que definen los procesos físicos presentes sea dominante para entender completamente los cambios en las características hidrodinámicas cuando cambian parámetros representativos de la geometría de la confluencia y de las condiciones de flujo. Este tipo de investigaciones que se logra simplificando el dominio (geometría y condiciones

de flujo) podría definir las bases de un modelo general de la hidrodinámica en confluencias fluviales que podrían ser utilizados en los proyectos que dieron origen a esta investigación.

Los antecedentes recopilados sobre la caracterización de los mencionados procesos hidrodinámicos en confluencias se focalizan a la zona de estancamiento y a la zona de la interfase de mezcla aguas abajo de la zona de estancamiento. Sin embargo estos patrones podrían afectar la hidrodinámica del flujo hacia los tributarios aguas arriba de la confluencia. Este aspecto no ha sido analizado en estudios previos, y por lo tanto será un objeto de estudio en la presente tesis doctoral.

Otra área de vacancia está relacionada a que los trabajos experimentales en campo existentes en los cuales se caracteriza los procesos hidrodinámicos en confluencia (Lane et al, 2008; Sukhodolov y Rhoads, 2001; Rhoads y Sukhodolov, 2004; Rhoads y Sukhodolov, 2008), han sido realizados en una confluencia fluvial natural de escala pequeña (caudales del orden $1\text{m}^3/\text{seg}$, profundidades menores a 0.5m y anchos de tributarios menores a 10 m) lo que permitió la medición de variables por métodos de vadeo. Sin embargo no existe evidencia de trabajos de campo que evalúen en detalle la evolución temporal y espacial de los patrones hidrodinámicos y los procesos de mezcla en confluencias fluviales de escalas mayores donde el desarrollo de nuevas metodologías experimentales es requerido. Además en los estudios de campo disponibles los flujos de aproximación no presentaban diferencias significativas en sus densidades como se espera en la confluencia de los Ríos Tercero y Saladillo.

1.4. Objetivos

Sobre la base de la motivación tecnológica y de las áreas de vacancia existentes (motivación científica), el objetivo general de la presente tesis es realizar un estudio de la evolución espacial y temporal de la hidrodinámica en confluencias fluviales de diferentes escalas (laboratorio, modelos físicos y cauces naturales con dimensiones mayores a las analizadas en la literatura) y nivel de complejidad (variando las relaciones de caudales, momento, velocidades y densidades de los flujos de

aproximación). Para alcanzar el objetivo general, la presente tesis contempla los siguientes objetivos específicos:

- Analizar experimentalmente, en una instalación de laboratorio que representa una confluencia fluvial con geometría simple, fondo concordante y sin diferencia de densidad de los flujos convergentes, la evolución espacial y temporal de las características hidrodinámicas presentes en la interfase de mezcla utilizando modernas técnicas de medición de velocidad. A partir de los resultados obtenidos se valida el uso de modelos conceptuales para caracterizar los patrones hidrodinámicos observados.
- Extender el estudio experimental previo realizando un análisis de sensibilidad del comportamiento hidrodinámico en la misma confluencia para diferentes condiciones del flujo. Para ello se analizarán los campos de velocidad de flujo generados a través de una simulación numérica del flujo con alta resolución espacial y temporal calibrado con los datos experimentales registrados previamente.
- Analizar la evolución espacial y temporal de la hidrodinámica del flujo en una instalación experimental de laboratorio que consiste de un modelo físico del “Aprovechamiento Múltiple Presa Los Monos” que representa con similitud de Froude, una confluencia fluvial sin diferencia de densidad de los flujos de aproximación, con sus características geométricas y de flujo particulares. Se dedicará especial interés en los efectos sobre los flujos convergentes.
- Evaluar en campo la hidrodinámica y los procesos de mezcla en una confluencia de mediana escala (con dimensiones mayores a las analizadas hasta el momento en la literatura) del sistema fluvial del Rio Carcarañá con diferencias de densidad de los flujos convergentes.

1.5. Organización de la tesis

En relación al primer objetivo específico, en el Capítulo 2 se presenta una investigación experimental de laboratorio sobre confluencias fluviales con geometría

simple, fondo concordante y sin diferencias de densidad de los flujos convergentes, en la cual se evalúan las características hidrodinámicas en la interfase de mezcla. A partir de ello se define el modelo conceptual más conveniente para caracterizar el patrón hidrodinámico en la interfase de mezcla para las condiciones simuladas (Kelvin-Helmholtz – KH o estela turbulenta – ET) incluyendo el contraste de patrones medios de flujo, escalas temporales y espaciales de las estructuras coherentes presentes en la interfase de mezcla y otros parámetros turbulentos como por ejemplo energía cinética turbulenta, esfuerzos de Reynolds y disipación energía turbulenta. En este estudio experimental se utilizaron modernas técnicas de medición de velocidad como el velocímetro acústico Doppler (ADV) y el perfilador de velocidad ultrasónico (UVP).

En relación al segundo objetivo específico, en el Capítulo 3 se analiza la sensibilidad a distintas condiciones del flujo de las características hidrodinámicas en la interfase de mezcla observadas experimentalmente en el Capítulo 2. Para ello, en primer lugar se analizan los campos de velocidades simulados a través de una modelación matemática en volúmenes finitos. En la simulación se ha utilizado el código PisoFoam perteneciente al código libre y abierto OpenFOAM® que resuelve las ecuaciones completas de Navier Stokes y Continuidad para flujo incompresible, con discretización temporal y espacial óptima para caracterizar las mayores estructuras del flujo. El modelo ha sido calibrado y validado utilizando los datos experimentales que se reportan en el Capítulo 2. Luego se analizaron estadísticamente los campos de velocidad de flujo simulados para otras configuraciones de flujo y se evaluaron tendencias en las escalas espaciales y temporales de los procesos físicos presentes en la confluencia.

En relación al tercer objetivo específico, en el Capítulo 4 se presenta un estudio experimental en un modelo físico del “Aprovechamiento Múltiple Presa Los Monos”, evaluando los principales procesos físicos presentes en la confluencia de dos canales de descarga ubicados aguas abajo de un aprovechamiento hidroeléctrico haciendo hincapié en la caracterización de los procesos físicos observados en la zona de estancamiento, interfase de mezcla y sus efectos sobre los flujos de aproximación aguas arriba.

En el Capítulo 5 se presenta la caracterización experimental in situ de la hidrodinámica y patrones de mezcla de una confluencia natural de flujos de diferente densidad en el sistema fluvial del Rio Carcarañá (mediana escala). Para evaluar la evolución espacial y temporal de los patrones hidrodinámicos en estas escalas, fue necesario implementar y optimizar modernas técnicas experimentales de medición de velocidad de flujo (Perfiladores de corriente acústicos Doppler – ADCP), visualización del flujo, y medición de conductividad del agua.

Finalmente, en el Capítulo 6 se presentan las conclusiones generales de la tesis, recomendaciones y las perspectivas de investigación futuras.

Capítulo 2. Análisis experimental en laboratorio de la evolución espacial y temporal de la hidrodinámica en una confluencia

2.1. Introducción

En este capítulo se presenta una investigación relacionada al área de vacancia citada en la sección 1.3 en relación a que se necesita investigación experimental adicional centrándose especialmente en confluencias fluviales en el que uno de los mecanismos o características que definen los procesos físicos presentes sea dominante para entender completamente los cambios en las características hidrodinámicas cuando cambian parámetros representativos de la geometría de la confluencia y de las condiciones de flujo (Constantinescu et al. 2011).

La investigación experimental descrita en este capítulo se desarrolló en una instalación de laboratorio que representa una confluencia fluvial con geometría simple y fondo concordante sin diferencia de densidad de los flujos convergentes, en la cual se evalúan las características hidrodinámicas en la interfase de mezcla. Las relaciones de velocidad media y cantidad de movimiento de los dos flujos convergentes cercanos a la unidad han sido analizadas en forma experimental, y por ello patrones hidrodinámicos de estela turbulenta se esperan en la interfase de mezcla (Constantinescu et al. 2012). Para ello, luego de evaluar experimentalmente la configuración que representa la confluencia de dos flujos paralelos, y con el fin de validar el uso de consideraciones de los patrones hidrodinámicos de estelas turbulentas detrás de un cuerpo sumergido para caracterizar los patrones hidrodinámicos en la interfase de mezcla de una confluencia, se transformó la configuración original a otra que representa un flujo alrededor de un cuerpo cilíndrico sumergido. La caracterización hidrodinámica experimental (tanto para la configuración experimental del flujo en confluencias como para el cuerpo cilíndrico sumergido) incluye visualización de flujo, cálculo de campos medios de flujo y la intensidad de la

turbulencia, estimaciones de las escalas temporales y espaciales de las estructuras coherentes presentes en la interfase de mezcla, y otros parámetros de turbulencia tales como energía cinética turbulenta, tensiones de Reynolds y la disipación de energía turbulenta.

2.2. Instalación Experimental

Los experimentos se realizaron en un canal abierto de laboratorio con sección rectangular construido en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de la República, Montevideo, Uruguay. Las dimensiones del canal son 18 m de largo y 1.5 m de ancho. El lecho del canal se materializó con arena de grano cuasi-uniforme, con un diámetro nominal de 0.8 mm.

Como se mencionó anteriormente, en este estudio se han evaluado experimentalmente dos configuraciones de flujo (ver Figura 2.1): confluencia de dos flujos paralelos y flujo alrededor de un cuerpo cilíndrico sumergido, donde el vértice de la confluencia fue el mismo cilindro y el caudal se repartió en partes iguales entre los dos canales de aproximación. El cilindro de 16 cm de diámetro se ubicó a una distancia de 8 m aguas abajo de la entrada del canal.

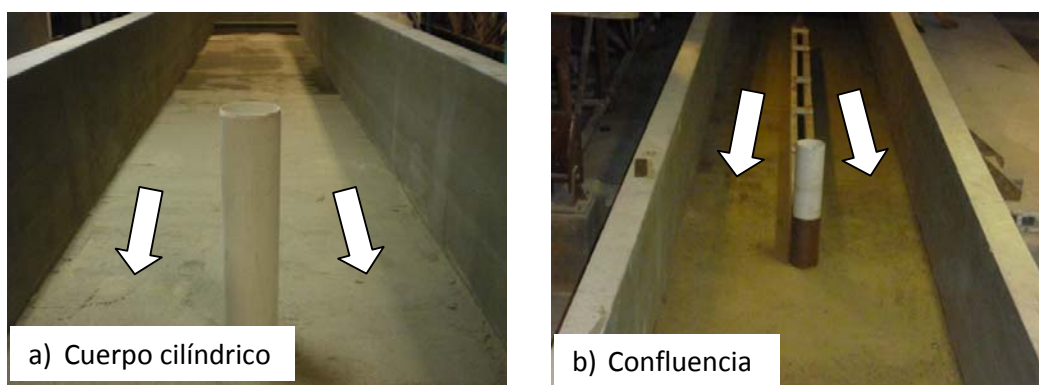


Figura 2.1: Tipologías analizadas

Se analizaron dos condiciones experimentales para cada configuración de flujo: caudal total de 80 l/s y 30 l/s. Los principales parámetros hidráulicos se resumen en la Tabla 2.1 y Tabla 2.2.

Tabla 2.1: Condiciones del flujo analizadas para la configuración de flujo que representa la confluencia de flujos paralelos. Los datos corresponden a las condiciones en cada canal de aproximación.

Parámetro	Unidad	Valor	
		Cond. 2.1	Cond. 2.2
Caudal Total (Q_{total})	[m ³ /s]	0.08	0.03
Caudal en cada canal (Q)	[m ³ /s]	0.04	0.015
Profundidad en cada canal (H)	[m]	0.26	0.15
Ancho de cada canal (B)	[m]	0.67	0.67
Área de cada canal ($A = B.H$)	[m ²]	0.17	0.10
Vel. media del flujo de aproximación ($U_m = Q/A$)	[m/s]	0.23	0.15
Número de Reynolds ($Re = U_m.H/\nu$)	-	6.0×10^4	2.2×10^4
Número de Froude ($Fr = U_m/(g.H)^{0.5}$)	-	0.14	0.12
Número de Reynolds del obstáculo ($Re_D = U_m.D/\nu$)	-	3.7×10^4	2.4×10^4

Tabla 2.2: Condiciones del flujo analizadas para la configuración de flujo que representa el flujo alrededor de un cuerpo cilíndrico sumergido.

Parámetro	Unidad	Valor	
		Cond. 2.1	Cond. 2.2
Caudal Total (Q_{total})	[m ³ /s]	0.08	0.03
Profundidad (H)	[m]	0.26	0.15
Ancho (B)	[m]	1.5	1.5
Área ($A = B.H$)	[m ²]	0.39	0.225
Vel. media del flujo de aproximación ($U_m = Q/A$)	[m/s]	0.21	0.13
Número de Reynolds ($Re = U_m.H/\nu$)	-	5.3×10^4	2.0×10^4
Número de Froude ($Fr = U_m/(g.H)^{0.5}$)	-	0.13	0.11
Número de Reynolds del obstáculo ($Re_D = U_m.D/\nu$)	-	3.3×10^4	2.1×10^4

Las diferencias mostradas entre las velocidades medias de los flujos de aproximación para el caso de la confluencia y del cuerpo cilíndrico sumergido (con mismos valores de caudal total y profundidad) se deben a que el ancho efectivo del flujo para la confluencia es 16 cm (igual a D) menor que para el cuerpo cilíndrico. Sin embargo, los valores de los parámetros característicos del flujo aguas abajo de la confluencia y el obstáculo son iguales para ambas configuraciones.

Durante el desarrollo de cada experimento se utilizó un sistema de bombeo que consta de una bomba (caudal máximo mayor a 200 l/s) con un caudalímetro electromagnético para medir el caudal. Antes de cada ensayo, el lecho del canal fue aplanado y rigidizado en la zona de estudio. Con el fin de evitar cualquier perturbación del material del lecho, durante cada experimento, se abrió la válvula aguas arriba

lentamente hasta que obtener la condición deseada de flujo uniforme en el canal. La profundidad del flujo en el canal, se ajustó utilizando una válvula situada en el extremo aguas abajo del canal.

2.3. Técnicas y metodología experimentales utilizadas

Se ha implementado una técnica de visualización de flujo para la identificación de las estructuras turbulentas del flujo en la zona de mezcla. Para la visualización fueron utilizados una cámara digital marca Panasonic® modelo DMC-ZR1 de 12 megapíxeles, y dos trazadores de colores diferentes (azul de metileno y caolinita).

Además, se registraron las velocidades de flujo utilizando dos técnicas de velocimetría con alta resolución espacial y temporal, como son la del velocímetro acústico Doppler (ADV por sus siglas en inglés) y la del perfilador de velocidad ultrasónico (UVP por sus siglas en inglés). Se registraron series de tiempo de las tres componentes del vector velocidad de flujo utilizando un ADV Vectrino Lab de 10MHz con el firmware Plus® en distintos puntos localizados aguas abajo del obstáculo, incluyendo la zona de estancamiento y zona de mezcla (ver Figura 2.2 para la configuración de flujo de cuerpo cilíndrico y Figura 2.3 para tipología de confluencia de dos flujos paralelos). Las series de tiempo se registraron a una profundidad $z=H/2$ para las dos condiciones. La frecuencia de registro (f_R) fue de 25 Hz, que satisface la condición $F = f_R \cdot T_f > 20$ (García et al., 2005), donde T_f es la escala de tiempo de la turbulencia del flujo generado por fricción con el fondo, que se estima como $T_f = L/U_{conv}$, L es la escala de longitud de los grandes vórtices (del orden de la profundidad H del flujo) y U_{conv} es la velocidad convectiva (del orden de la velocidad media del flujo U_m en la dirección longitudinal).

Con UVP se registraron series de tiempo de perfiles de velocidad en diferentes localizaciones aguas arriba y aguas abajo del obstáculo, utilizando un perfilador de velocidad ultrasónico Met-Flow®. Este instrumento registra la velocidad del flujo en la dirección del haz acústico emitido por el sensor. Más detalles de esta técnica se pueden encontrar en Pedocchi y García (2009).

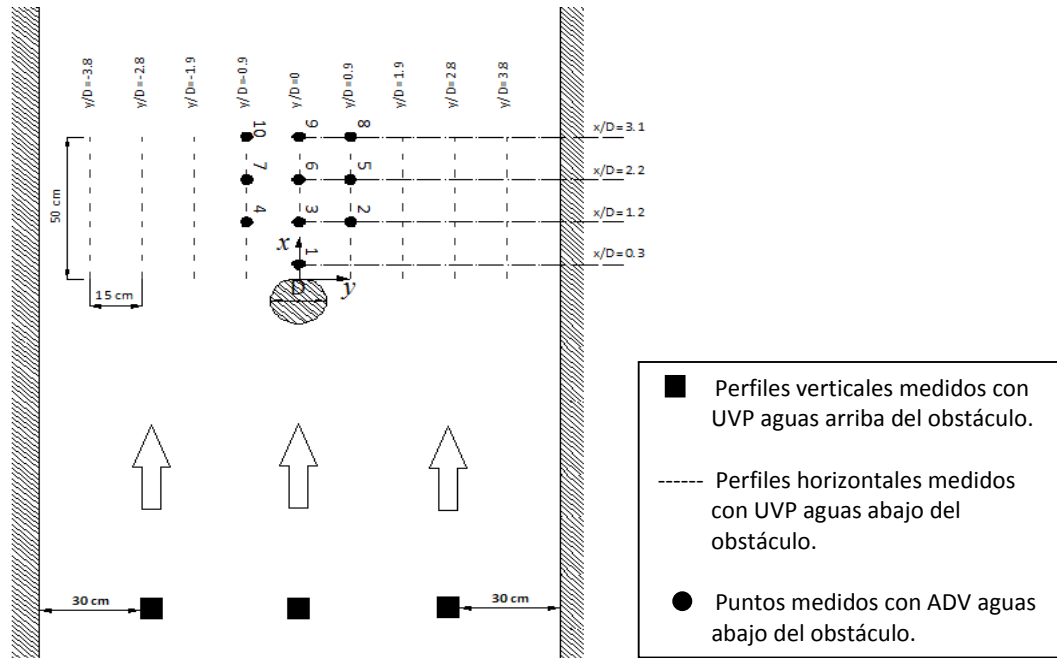


Figura 2.2: Localización de puntos y perfiles para mediciones con ADV y UVP para la tipología de cuerpo cilíndrico.

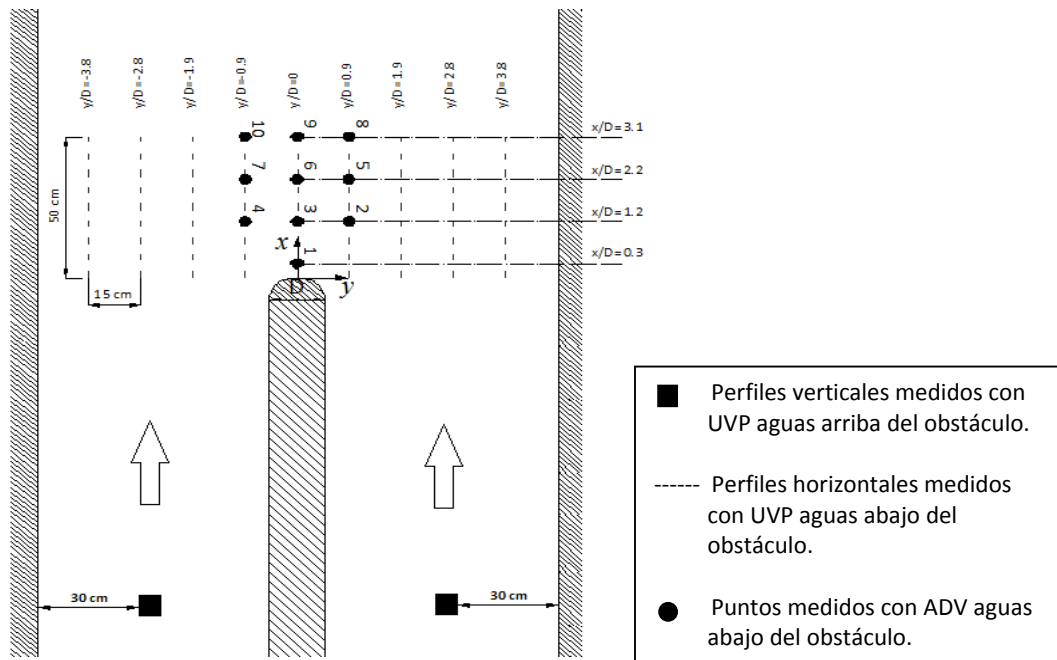


Figura 2.3: Localización de puntos y perfiles para mediciones con ADV y UVP para la tipología de confluencia de dos flujos paralelos.

Para la tipología del cuerpo cilíndrico se registraron series de tiempo de las componentes longitudinal y vertical de la velocidad del flujo en tres perfiles localizados 1 metro aguas arriba del obstáculo (uno ubicado al centro y los otros dos a 30 cm de

cada pared lateral del canal como se muestra en la Figura 2.2). Para la tipología de la confluencia de dos flujos paralelos no se midió el perfil en la línea central (ver Figura 2.3). Para evaluar las dos componentes de la velocidad del flujo (longitudinal y vertical) se utilizaron tres sensores de 4MHz (uno orientado en dirección vertical y dos en un ángulo de 30°). Se midió con una frecuencia de registro (f_R) de 40 Hz, durante un tiempo de muestreo de 410s equivalente a $(2)^{14}$ muestras. Aguas abajo, en la zona de mezcla, se registraron 9 perfiles horizontales de velocidad longitudinal del flujo con sensores de 2 MHz, que se ubicaron 50 cm aguas abajo del obstáculo, en dirección horizontal, a una profundidad $z=H/2$, orientados hacia aguas arriba. Se midió con una frecuencia de registro (f_R) de 25 Hz, durante un tiempo de muestreo de 328 seg, equivalente a $(2)^{13}$ muestras.

2.4. Resultados

En esta sección se describen los resultados obtenidos a través del uso de las técnicas experimentales descritas y aplicando la metodología propuesta anteriormente. Debido a la similitud de los resultados obtenidos para las dos condiciones experimentales en relación a la caracterización del flujo medio, velocidad *RMS*, y características de los espectros de energía, se muestran los resultados obtenidos para la condición de mayor caudal (Condición experimental 2.1). El análisis de frecuencias de desprendimientos de estructuras turbulentas se describe para las dos condiciones experimentales.

2.4.1. Visualización de la característica del flujo en la interfase de mezcla de una confluencia

La Figura 2.4 muestra una representación instantánea de las estructuras coherentes generadas en la interfase de mezcla utilizando para su visualización trazadores inyectados aguas arriba en ambos tributarios.



Figura 2.4: Visualización (mediante el uso de trazadores) de estructuras del tipo ET en la interfase de mezcla de la confluencia para la condición 2.1.

La figura muestra la presencia de estructuras coherentes bidimensionales en la zona de mezcla, que se generan en la zona de separación de flujo en el vértice de la confluencia, produciendo desprendimientos alternados con dirección opuesta de rotación de manera similar a los que ocurre en el flujo alrededor de un cuerpo cilíndrico sumergido. Fueron observadas estructuras coherentes similares por Rhoads y Sukhodolov (2004) en una confluencia de ríos de pequeña escala.

Con las variables mostradas en la Tabla 2.1 y Tabla 2.2 es posible calcular el parámetro adimensional S (ver ecuación 1.1) y predecir a qué tipo de inestabilidad definida por Ingram y Chu (1987) se asemejan las estructuras coherentes presentes en la interfase de mezcla. El coeficiente de fricción se determinó utilizando la siguiente fórmula de Manning-Stricker propuesta por Parker, 1990:

$$c_f = \left[8.1 \cdot \left(\frac{H}{k_s} \right)^{1/6} \right]^{-2} \quad (2.1)$$

donde H es la profundidad del flujo y k_s es la rugosidad Nikuradse equivalente, igual a 0.8 mm (d_{50} del sedimento utilizado). Los valores de c_f para cada condición y tipología analizada varían entre 0.0022 y 0.0027. Por lo tanto, según la expresión del parámetro de estabilidad, para una longitud característica del obstáculo $D = 16$ cm y con las profundidades y velocidades mostradas en la Tabla 2.1 y Tabla 2.2, el parámetro de estabilidad varía entre 0.0015 y 0.0033. Este valor para todos los casos es inferior a 0.2, por lo tanto el patrón hidrodinámico de ET presente en el flujo analizado debería ser del tipo calle de vórtices (CV).

2.4.2. Parámetros hidráulicos del flujo de aproximación

La Figura 2.5 y Figura 2.6 se muestran los perfiles medios de velocidad longitudinal del flujo para la condición de mayor caudal (condición 2.1), obtenidos a partir de los las mediciones con UVP aguas arriba del obstáculo (para la tipología del cuerpo cilíndrico) y del vértice de la confluencia (para la tipología de confluencia de flujos paralelos).

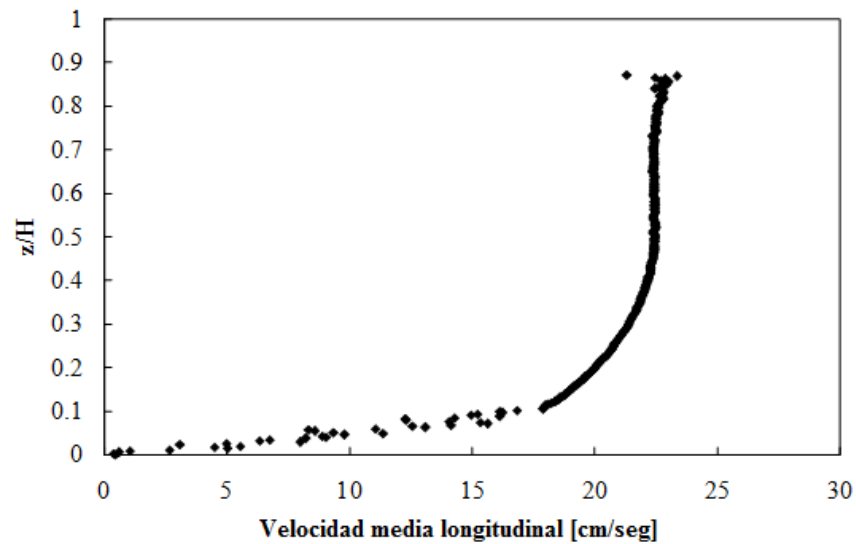


Figura 2.5: Perfil medio de la velocidad longitudinal del flujo de aproximación para la tipología del cuerpo cilíndrico sumergido para la condición 2.1.

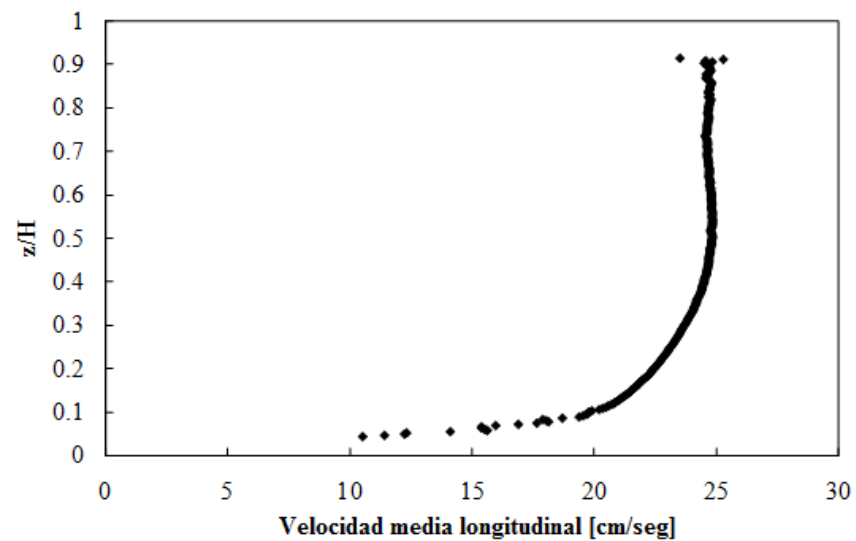


Figura 2.6: Perfil medio de la velocidad longitudinal del flujo de aproximación para la tipología de confluencia de flujos paralelos para la condición 2.1.

Las figuras de los perfiles obtenidos para ambas tipologías muestran la evidencia de que la velocidad longitudinal media para la configuración de la confluencia de flujos paralelos es mayor que para el caso del cuerpo cilíndrico. Esta característica es debido a la diferencia en el ancho efectivo del flujo comentada anteriormente.

Logrando el mejor ajuste de los perfiles medidos a un perfil logarítmico de la forma:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln z + B \quad 2.2$$

donde,

z = distancia desde el fondo

u = velocidad media a la distancia z del fondo

u_* = velocidad de corte

$k = 0.41$ = constante de von Karman

se estimó para el flujo de aproximación la velocidad de corte (u_*) Tabla 2.3.

Tabla 2.3: Parámetros hidráulicos del flujo de aproximación para las dos tipologías analizadas, para la condición 2.1.

Configuración	Ubicación	u_* [cm/s]
Confluencia	Izquierda	1.21
	Derecha	1.24
Cuerpo cilíndrico	Centro	1.09

2.4.3. Evolución espacial de la velocidad media longitudinal en la zona de mezcla

En la Figura 2.7 y Figura 2.8 se observan los campos medios de velocidad longitudinal del flujo para la condición de 80 l/s (condición 2.1), obtenidos a partir de las mediciones con UVP en la zona de mezcla, para la tipología de cuerpo cilíndrico y la de confluencia de flujos paralelos, respectivamente.

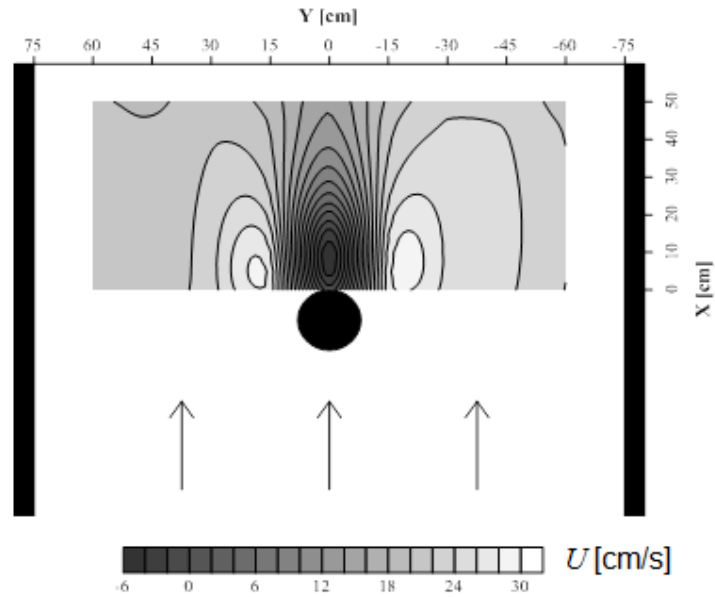


Figura 2.7: Campo medio de la velocidad longitudinal del flujo aguas abajo del cuerpo cilíndrico para la condición 2.1. $Q_{\text{total}} = 80 \text{ l/s}$

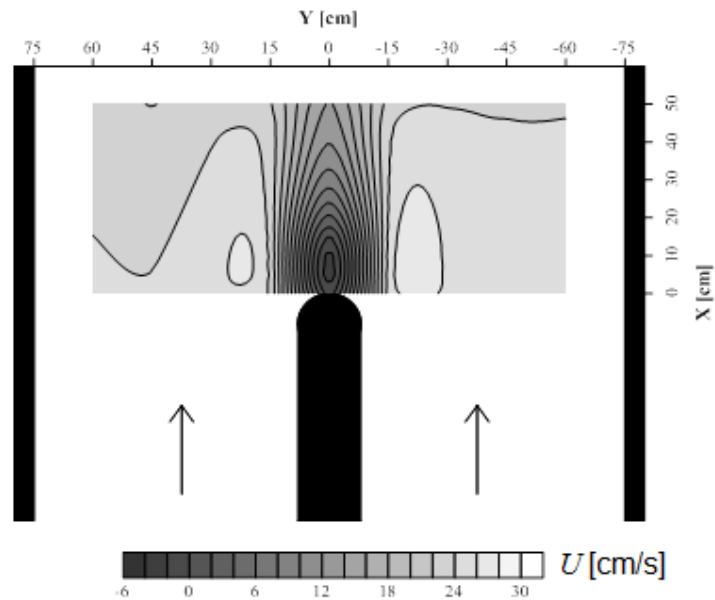


Figura 2.8: Campo medio de la velocidad longitudinal del flujo aguas abajo de la confluencia para la condición 2.1. $Q_{\text{total}} = 80 \text{ l/s}$ (40 l/s en cada canal)

Se observa en ambas tipologías (cuerpo cilíndrico y confluencia) un déficit de velocidad longitudinal en la zona de mezcla aguas abajo del obstáculo debido a la presencia de una zona de estancamiento. Para la tipología del cuerpo cilíndrico, la velocidad longitudinal del flujo alrededor del obstáculo es mayor que para la tipología de la confluencia, debido a las aceleraciones experimentadas por el flujo que pasa a

través del cuerpo cilíndrico. Cada valor medio de velocidad longitudinal (U_{ij}) registrado en la localización "i" según la dirección x y "j" según la dirección y , se adimensionalizaron mediante la siguiente expresión:

$$\frac{U_{ij}}{U_m} \quad 2.4$$

donde $U_m = Q/A$ (ver Tabla 2.1 y Tabla 2.2). También se adimensionalizaron las distancias en las direcciones x e y utilizando el diámetro del obstáculo D . En la Figura 2.9 se observa la evolución de la velocidad media longitudinal a lo largo de la línea central del canal ($y=0$) desde el vértice del obstáculo ($x/D=0.5$ ya que $x/D=0$ corresponde al centro del cilindro) hacia aguas abajo en la zona de mezcla, a partir de las mediciones con UVP en la zona de mezcla para las dos tipologías y para la condición experimental 2.1, comparado con datos experimentales obtenidos por Lourenco y Shih (1993).

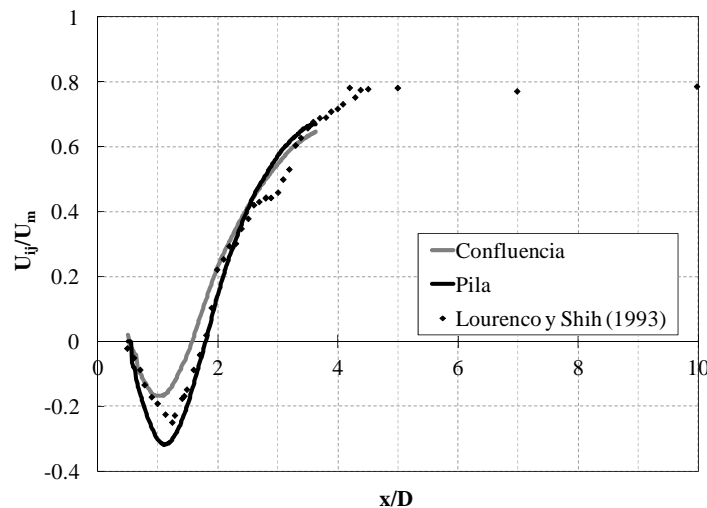


Figura 2.9: Evolución de la velocidad media longitudinal del flujo en la zona de mezcla, a lo largo de la línea central del canal para las dos tipologías analizadas, y la obtenida por Lourenco y Shih (1993).

Se observa una zona de velocidades negativas en las proximidades del obstáculo. Estos resultados indican la presencia de una zona de estancamiento aguas abajo del obstáculo con velocidades nulas o negativas debido a la recirculación del flujo en esa zona. La influencia de la zona de estancamiento en los valores de velocidades medias longitudinales es aproximadamente hasta una distancia de $1.8D$ con el obstáculo

cilíndrico, siendo mayor que para el caso de la confluencia donde esa zona de influencia se extiende hasta $1.4D$. Asimismo, los valores mínimos de velocidad longitudinal en la zona de estancamiento son menores para la tipología del obstáculo cilíndrico ($-0.3U_m$) comparado con la mínima velocidad para la tipología de la confluencia ($-0.17U_m$). La Figura 2.10 y Figura 2.11 muestran los valores de velocidad media longitudinal adimensional para la condición experimental 2.1, correspondientes a la tipología de cuerpo cilíndrico y la de confluencia de flujos paralelos, respectivamente. Los resultados corresponden a la condición experimental 2.1 ($0.08 \text{ m}^3/\text{seg}$).

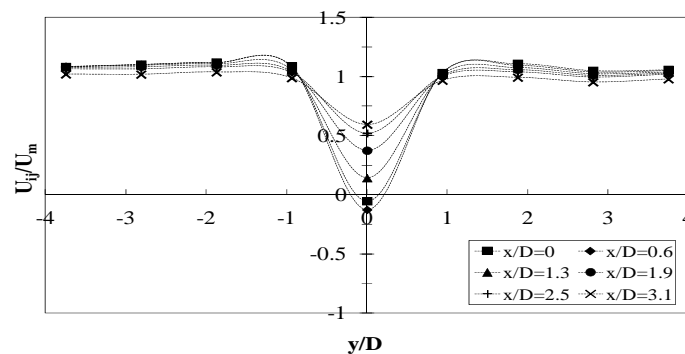


Figura 2.10: Velocidad media longitudinal del flujo adimensionalizada registrada aguas abajo de la confluencia, para la condición experimental 2.1. $Q_{\text{total}} = 80 \text{ l/s}$

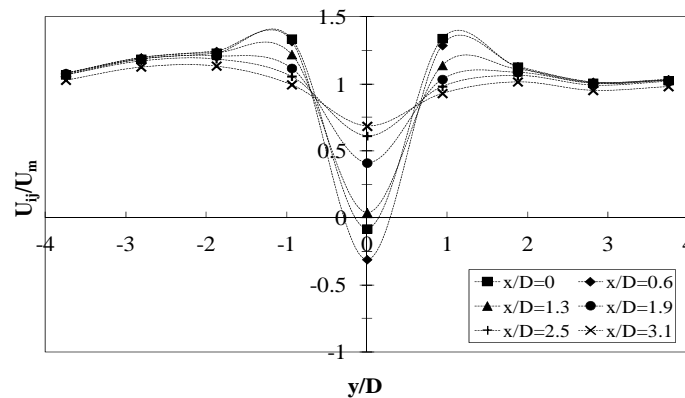


Figura 2.11: Velocidad media longitudinal del flujo adimensionalizada registrada aguas abajo del cuerpo cilíndrico, para la condición experimental 2.1. $Q_{\text{total}} = 80 \text{ l/s}$ (40 l/s en cada canal)

Se observa que para ambos tipos el perfil de velocidad longitudinal media a lo largo de la dirección transversal tiene un déficit de velocidad como una consecuencia de lo que se ha descrito anteriormente. La diferencia entre las dos configuraciones es la presencia de una aceleración del flujo observada para la tipología del cuerpo cilíndrico,

como consecuencia del paso del flujo alrededor del obstáculo. Esta característica no se observó en la tipología de la confluencia de flujos paralelos.

2.4.4. Evolución espacial del valor medio cuadrático de las fluctuaciones de velocidad longitudinal en la zona de mezcla.

Se observa en la Figura 2.12 y Figura 2.13 los campos de los valores medios cuadráticos (RMS) de las fluctuaciones de velocidad longitudinal del flujo para la condición 2.1, obtenidos a partir de las mediciones con UVP en la zona de mezcla, para la tipología de cuerpo cilíndrico y la de confluencia de flujos paralelos, respectivamente.

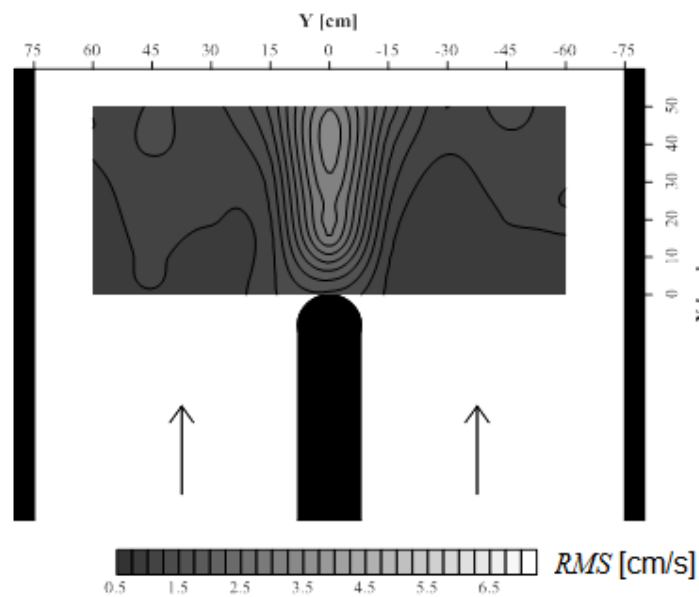


Figura 2.12: Campo medio cuadrático (RMS) de las fluctuaciones de velocidad longitudinal del flujo aguas abajo de la confluencia para la condición 2.1. Q total = 80 l/s (40 l/s en cada canal)

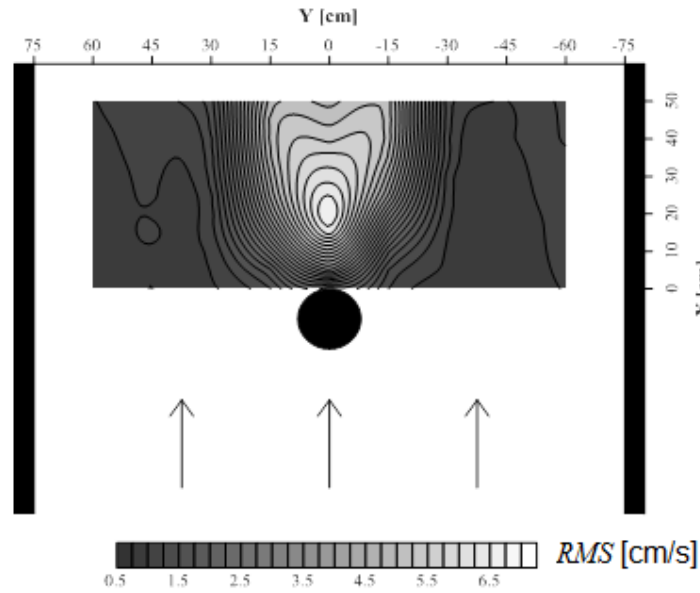


Figura 2.13: Campo medio cuadrático (RMS) de las fluctuaciones de velocidad longitudinal del flujo aguas abajo del cuerpo cilíndrico para la condición 2.1. Q total = 80 l/s

Los valores RMS de las fluctuaciones de velocidad longitudinal del flujo registrados en cada localización " i " de la zona de mezcla aguas abajo del obstáculo, fue escrito en forma adimensional como:

$$\frac{RMS_i}{u^*} \quad 2.5$$

Donde u^* es la velocidad de corte del flujo de aproximación estimada a partir de un ajuste logarítmico del perfil de velocidad registrado con UVP aguas arriba del obstáculo (Ver Tabla 2.3). En la Figura 2.14 y Figura 2.15 se muestran, para la condición experimental 2.1, los valores adimensionales de RMS de las fluctuaciones de velocidad longitudinal registrados con ADV y UVP en la zona de mezcla de cada tipología.

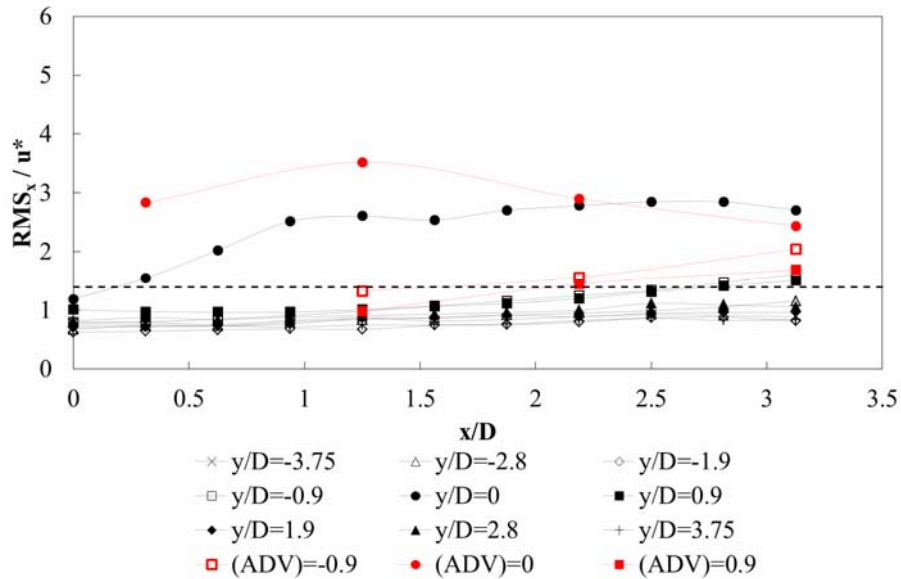


Figura 2.14: Valor medio cuadrático RMS (adimensionalizado) de las fluctuaciones de la velocidad longitudinal del flujo registradas aguas abajo de la confluencia, para la condición experimental 2.1. Q total = 80 l/s (40 l/s en cada canal). La línea de trazos corresponde al valor RMS/u_* según Nezu y Nakagawa (1993) para $z/H = 0.5$.

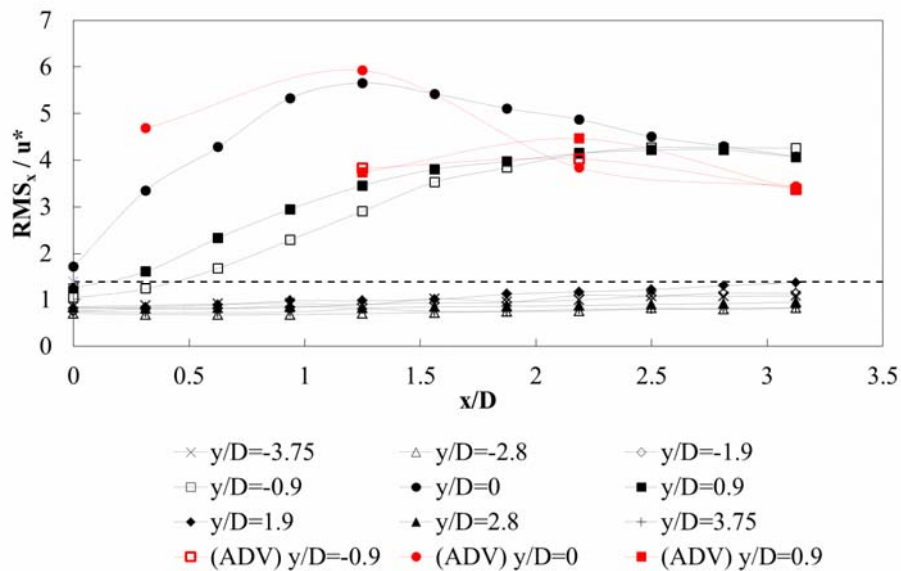


Figura 2.15: Valor medio cuadrático RMS (adimensionalizado) de las fluctuaciones de la velocidad longitudinal del flujo registradas aguas abajo del cuerpo cilíndrico, para la condición experimental 2.1. Q total = 80 l/s. La línea de trazos corresponde al valor RMS/u_* según Nezu y Nakagawa (1993) para $z/H = 0.5$.

En las figuras se distingue la diferencia entre los valores RMS de las fluctuaciones de velocidad longitudinal registrados a lo largo del centro del canal, y los valores de RMS para aquellos puntos situados fuera del eje central.

Para la tipología del cuerpo cilíndrico, se observaron elevados valores de RMS no sólo en los puntos situados sobre el eje central, sino también en puntos situados $0.94D$ a cada lado del eje de canal. El valor máximo de RMS se registró a una distancia $x = 1.2D$ aguas abajo del obstáculo.

Para la tipología de la confluencia de flujos paralelos, los valores RMS más elevados de la velocidad longitudinal del flujo se observaron sólo en los puntos situados en el centro del canal, registrando el valor máximo a una distancia aguas abajo del obstáculo $x = 1.2D$ con ADV, y a una distancia $x = 2.8D$ con UVP.

Estos resultados proporcionan información sobre la región aguas abajo del obstáculo en la que existen estructuras turbulentas resultantes de la presencia del obstáculo propiamente dicho (cuerpo cilíndrico o confluencia). En la Figura 2.16 se observa que la presencia de estructuras turbulentas abarca una región más ancha transversalmente para el caso del cuerpo cilíndrico.

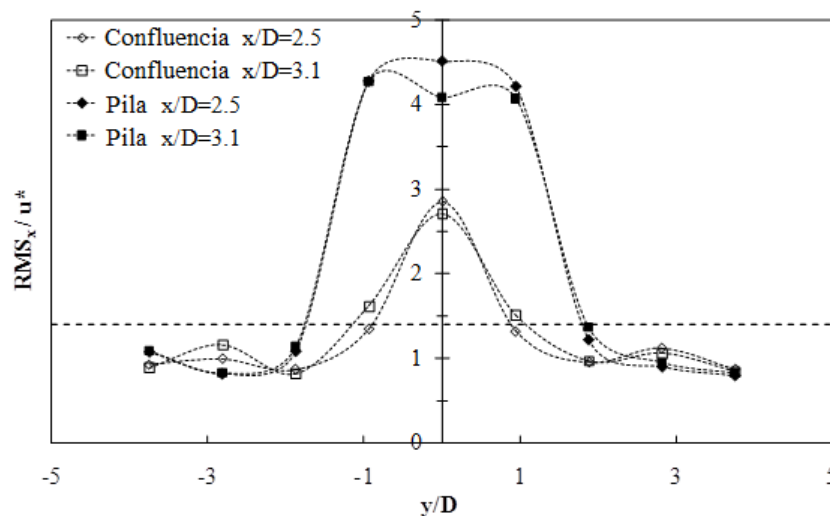


Figura 2.16: Variación del valor medio cuadrático RMS (adimensionalizado) de las fluctuaciones de la velocidad longitudinal del flujo registradas aguas abajo de la confluencia, para la condición experimental 2.1. Q total = 80 l/s (40 l/s en cada canal). La línea de trazos corresponde al valor RMS/u^* según Nezu y Nakagawa (1993) para $z/H = 0.5$.

2.4.5. Análisis espectral de las señales de velocidad registradas en la zona de mezcla.

En esta sección se presentan los espectros de energía correspondientes a las señales de las componentes longitudinal y transversal de velocidad del flujo registradas con ADV en la zona de mezcla aguas abajo del obstáculo, para las dos tipologías analizadas. En los espectros que se muestran a continuación, la energía debido al ruido Doppler ha sido sustraída.

2.4.5.1. Análisis espectral para localizaciones al centro del canal ($y/D = 0$)

En la Figura 2.17 y Figura 2.18 se muestran los espectros de energía de la componente longitudinal del vector velocidad, correspondientes a localizaciones al centro del canal ($y/D = 0$) para las tipologías de confluencia y cuerpo cilíndrico, respectivamente, para la condición experimental 2.1.

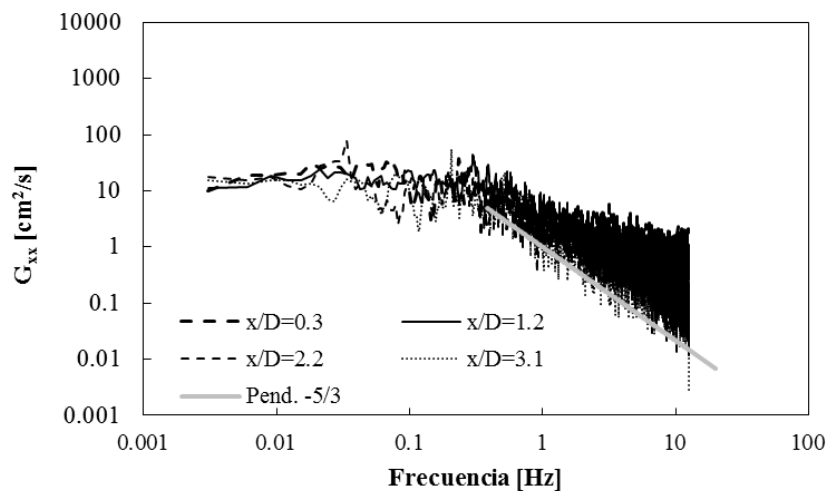


Figura 2.17: Espectro de energía de la señal registrada para la componente longitudinal de velocidad en las localizaciones $y/D = 0$. Tipología = Confluencia. Condición experimental 2.1. Q total = 80 l/s (40 l/s en cada canal)

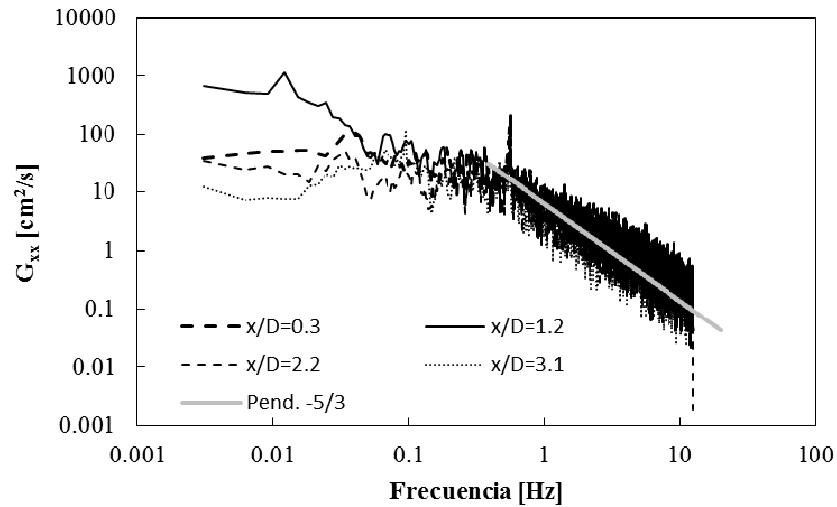


Figura 2.18: Espectro de energía de la señal registrada para la componente longitudinal de velocidad en las localizaciones $y/D = 0$. Tipología = Cuerpo cilíndrico. Condición experimental 2.1. Q total = 80 l/s

En la Figura 2.19 y Figura 2.20 se muestran los espectros de energía de la componente transversal del vector velocidad, correspondientes a localizaciones al centro del canal ($y/D = 0$) para las tipologías de confluencia y cuerpo cilíndrico, respectivamente, para la condición experimental 2.1.

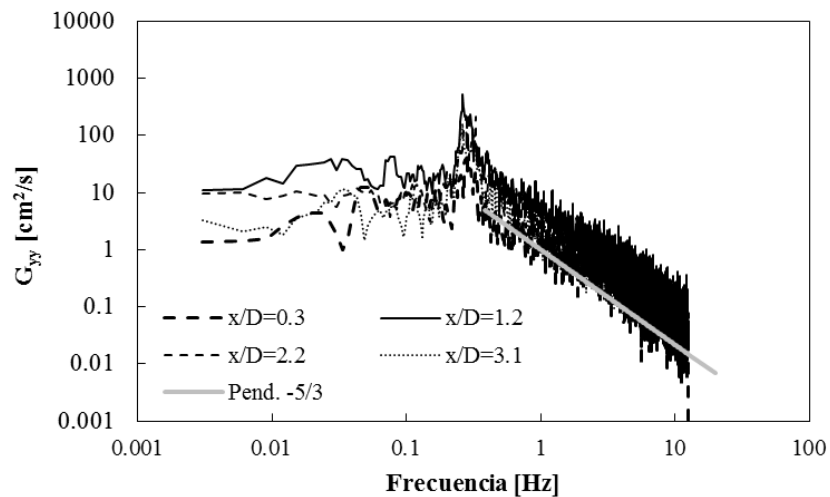


Figura 2.19: Espectro de energía de la señal registrada para la componente transversal de velocidad en las localizaciones $y/D = 0$. Tipología = Confluencia. Condición experimental 2.1. Q total = 80 l/s (40 l/s en cada canal)

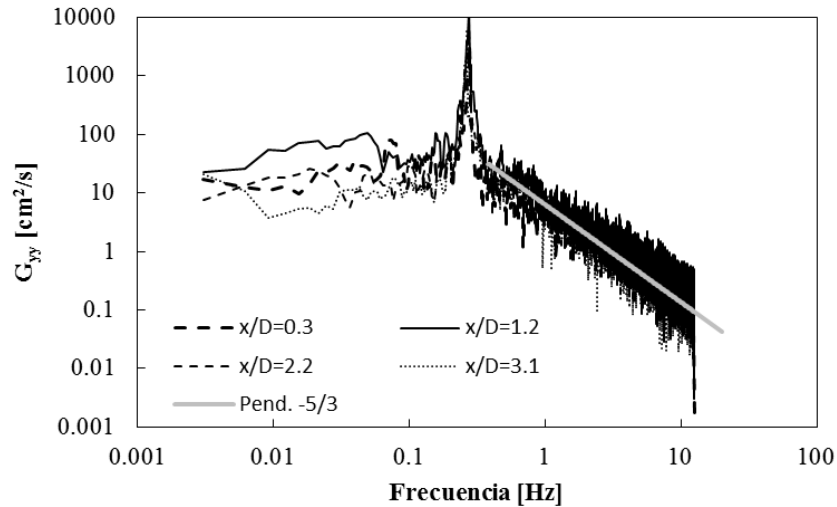


Figura 2.20: Espectro de energía de la señal registrada para la componente transversal de velocidad en las localizaciones $y/D = 0$. Tipología = Cuerpo cilíndrico. Condición experimental 2.1. Q total = 80 l/s

En la Figura 2.21 y Figura 2.22 se muestran los valores de los picos máximos de energía para las señales de las componentes longitudinal (G_{xx}) y transversal (G_{yy}) registradas para las dos tipologías analizadas, para la condición experimental 2.1, en diferentes progresivas x/D a lo largo de la línea central del canal ($y/D = 0$).

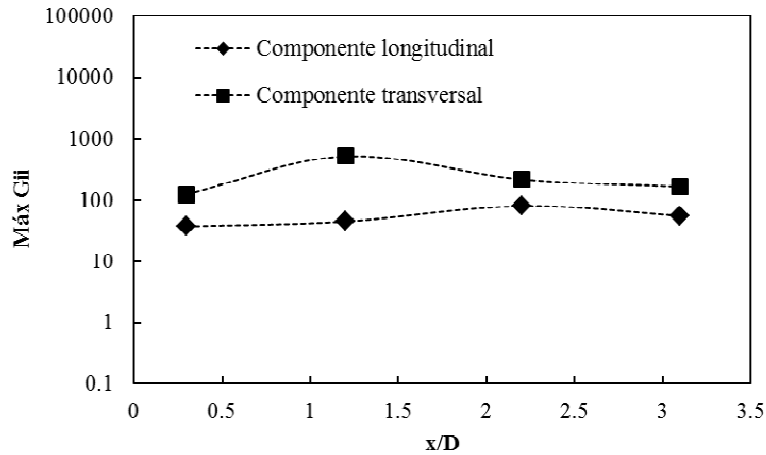


Figura 2.21: Valor máximo de la energía para las señales de las componentes longitudinal (G_{xx}) y transversal (G_{yy}) registradas en diferentes progresivas x/D ubicadas en $y/D = 0$. Tipología = Confluencia. Condición experimental 2.1. Q total = 80 l/s (40 l/s en cada canal)

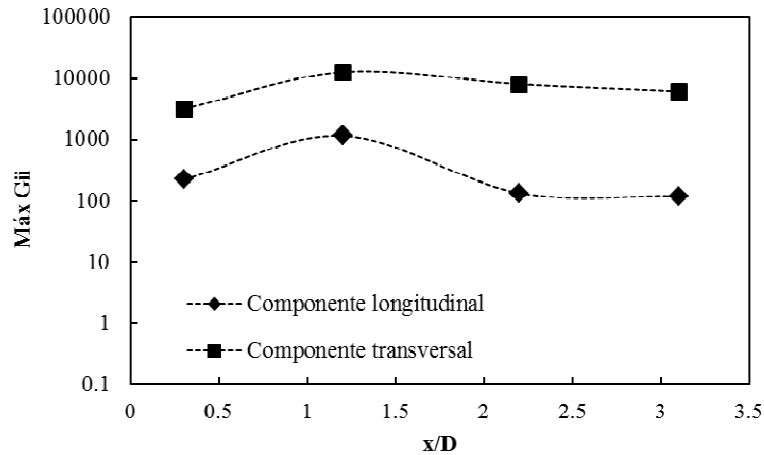


Figura 2.22: Valor máximo de la energía para las señales de las componentes longitudinal (G_{xx}) y transversal (G_{yy}) registradas en diferentes progresivas x/D ubicadas en $y/D = 0$. Tipología = Cuerpo cilíndrico. Condición experimental 2.1. Q total = 80 l/s

Para la componente longitudinal del vector velocidad no se aprecia evidencia de procesos periódicos, mientras se observa la presencia de un pico de energía para frecuencias que oscilan entre 0.27 y 0.3 Hz en los espectros de energía de las señales de la componente de transversal de la velocidad, tanto para la tipología del cuerpo cilíndrico como para la confluencia de flujos paralelos.

Se observa en las figuras que los valores máximos de energía (asociados a fluctuaciones de baja frecuencia) se dan para la componente transversal de velocidad. La diferencia entre la tipología de la confluencia y cuerpo cilíndrico, radica en que para esta última se registraron los mayores valores de energía (mas de un orden de magnitud mayor que para el caso de la confluencia). Para la tipología de la confluencia, la energía correspondiente al pico máximo es igual a 521 cm^2/seg , y 12814 cm^2/seg para la tipología del cuerpo cilíndrico. Coincide para las dos tipologías la ubicación del punto donde se registró la máxima energía, siendo esta distancia $x=1.2D$ aguas abajo del obstáculo mientras que los valores mínimos se registraron en la ubicación $x=3.1D$ aguas abajo del obstáculo.

2.4.5.2. Análisis espectral para localizaciones a $0.9D$ del centro del canal ($y/D = 0.9$)

En la Figura 2.23 y Figura 2.24 se muestran los espectros de energía de la componente longitudinal del vector velocidad, correspondientes a localizaciones desplazadas aproximadamente un diámetro del centro del canal ($y/D = 0.9$) para las tipologías de confluencia y cuerpo cilíndrico, respectivamente y para la condición experimental 2.1.

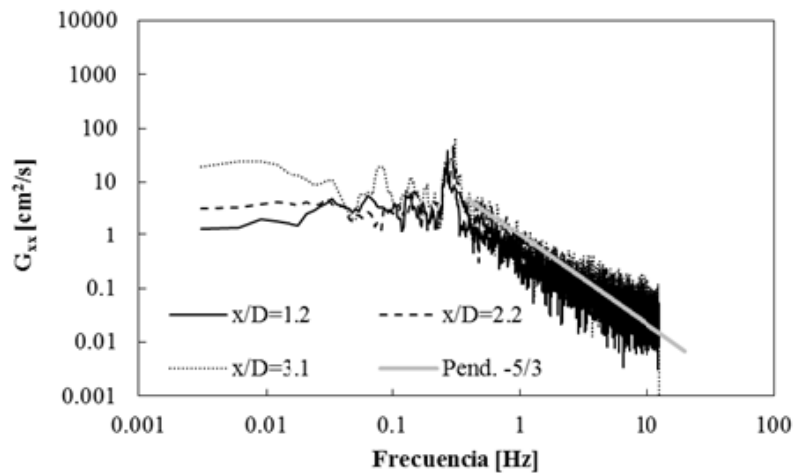


Figura 2.23: Espectro de energía de la señal registrada para la componente longitudinal de velocidad en las localizaciones $y/D = 0.9$. Tipología = Confluencia. Condición experimental 2.1. Q total = 80 l/s (40 l/s en cada canal)

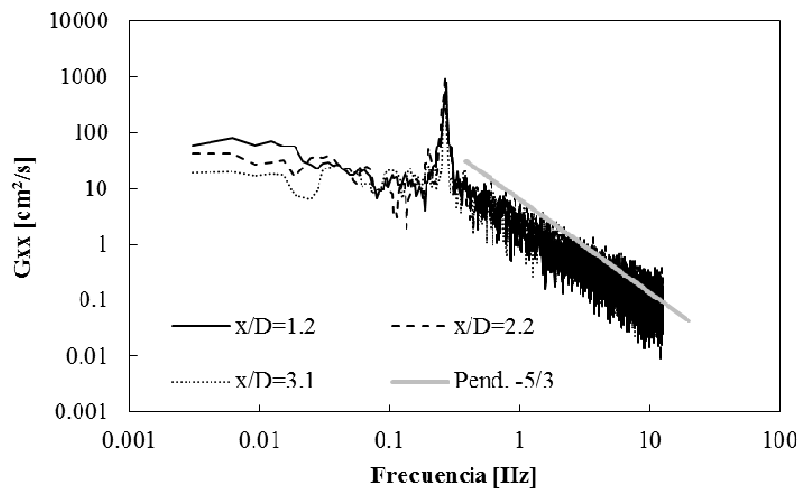


Figura 2.24: Espectro de energía de la señal registrada para la componente longitudinal de velocidad en las localizaciones $y/D = 0.9$. Tipología = Cuerpo cilíndrico. Condición experimental 2.1. Q total = 80 l/s

En la Figura 2.25 y Figura 2.26 se muestran los espectros de energía de la componente transversal del vector velocidad, correspondientes a localizaciones desplazadas aproximadamente un diámetro del centro del canal ($y/D = 0.9$) para las tipologías de confluencia y cuerpo cilíndrico, respectivamente, y para las condición experimental 2.1.

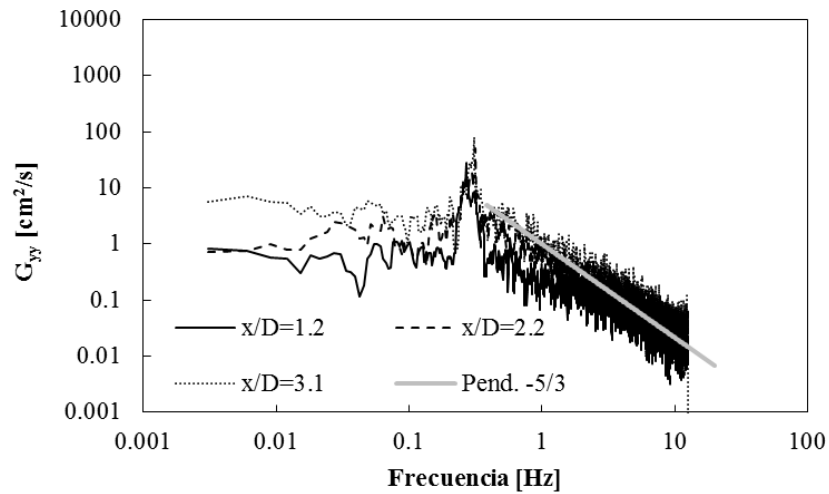


Figura 2.25: Espectro de energía de la señal registrada para la componente transversal de velocidad en las localizaciones $y/D = 0.9$. Tipología = Confluencia. Condición experimental 2.1. Q total = 80 l/s (40 l/s en cada canal)

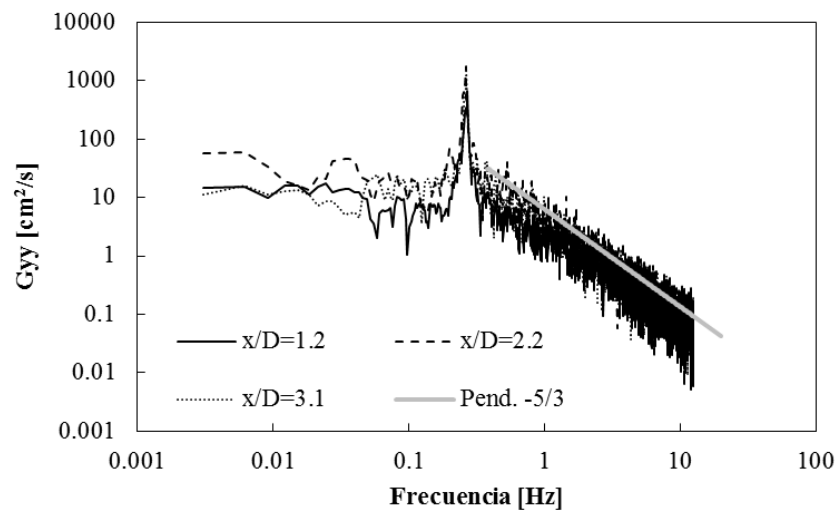


Figura 2.26: Espectro de energía de la señal registrada para la componente transversal de velocidad en las localizaciones $y/D = 0.9$. Tipología = Cuerpo cilíndrico. Condición experimental 2.1. Q total = 80 l/s

A diferencia de los puntos ubicados al centro del canal, en este caso se observa en los espectros de energía de la señal de la componente longitudinal de velocidad, un pico de energía tanto para la tipología del cuerpo cilíndrico como para la confluencia, asociado a frecuencias que oscilan entre 0.27 y 0.31 Hz. Para la tipología de la confluencia el valor de la energía máxima es igual a $66 \text{ cm}^2/\text{seg}$, registrándose a una distancia $x=3.1D$ aguas abajo del vértice de la confluencia. Para la tipología del cuerpo cilíndrico el pico de energía es igual a $1082 \text{ cm}^2/\text{seg}$, registrado en la progresiva $x=2.2D$ aguas abajo del obstáculo.

En los espectros de energía que corresponden a las señales de la componente transversal de la velocidad del flujo, también se puede observar la presencia de picos de energía para las dos tipologías analizadas, asociados a frecuencias que oscilan entre 0.27 y 0.31 Hz. Para la tipología de la confluencia, la energía máxima es igual a $80 \text{ cm}^2/\text{seg}$, y para la tipología del cuerpo cilíndrico se registró un valor máximo de energía igual a $1755 \text{ cm}^2/\text{seg}$. En todas las dos configuraciones el valor máximo de energía se registró a una distancia $x=2.2D$ aguas abajo del obstáculo.

En la Figura 2.27 y Figura 2.28 se muestran los valores de los picos máximos de energía para las señales de las componentes longitudinal (G_{xx}) y transversal (G_{yy}) registradas para las dos tipologías analizadas, para la condición experimental 2.1, en diferentes progresivas x/D a lo largo de la línea central del canal ($y/D = 0.9$).

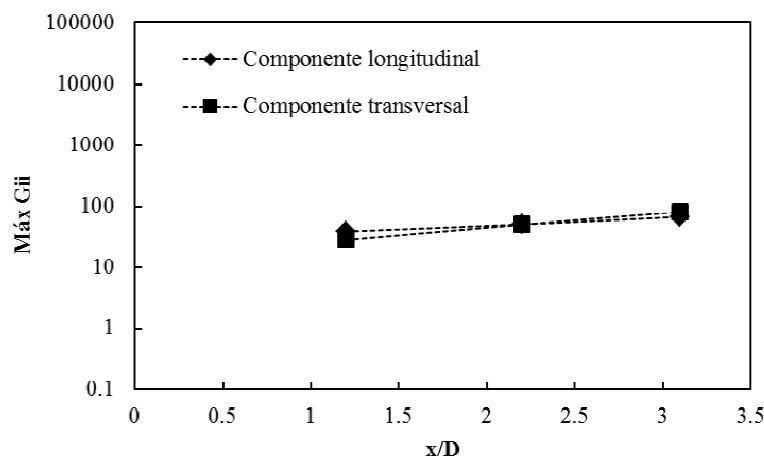


Figura 2.27: Valor máximo de la energía para las señales de las componentes longitudinal (G_{xx}) y transversal (G_{yy}) registradas en diferentes progresivas x/D ubicadas en $y/D = 0.9$. Tipología = Confluencia. Condición experimental 2.1 .Q total = 80 l/s (40 l/s en cada canal)

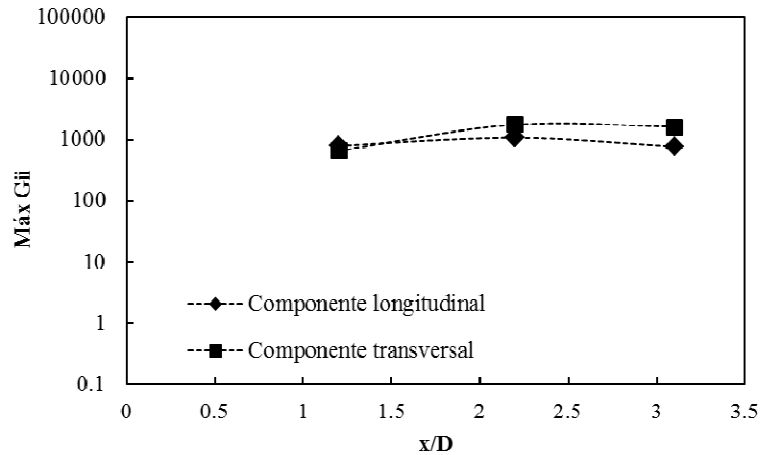


Figura 2.28: Valor máximo de la energía para las señales de las componentes longitudinal (G_{xx}) y transversal (G_{yy}) registradas en diferentes progresivas x/D ubicadas en $y/D = 0.9$. Tipología = Cuerpo cilíndrico. Condición experimental 2.1. Q total = 80 l/s

Se observa que en los puntos ubicados a $y/D = 0.9$ los valores máximos de energía para las componentes longitudinal y transversal son similares, a diferencia de los puntos ubicados en la línea central del canal donde los picos máximos se observaron sólo para la componente transversal.

2.4.6. Análisis de las frecuencias de desprendimientos de estructuras turbulentas.

En la sección anterior se pudo observar en los espectros de energía de las señales de velocidad registradas en la zona de mezcla, la existencia de picos de energía vinculadas a una frecuencia. Esta es la frecuencia de desprendimiento de estructuras 2D, y se la relaciona a un número adimensional llamado “número de Strouhal” que es proporcional a la frecuencia de los desprendimientos, adimensionalizada con una longitud característica (en este caso es el diámetro del obstáculo) y con la velocidad del flujo de aproximación. La expresión del número de Strouhal es la siguiente:

$$St = f \frac{D}{U_m} \quad 2.5$$

donde

f = frecuencia de desprendimiento de las estructuras

D = diámetro del obstáculo

U_m = velocidad media del flujo de aproximación

La Figura 2.29 muestra la variación del número de Strouhal (St) en función del número de Reynolds del obstáculo (Re_D).

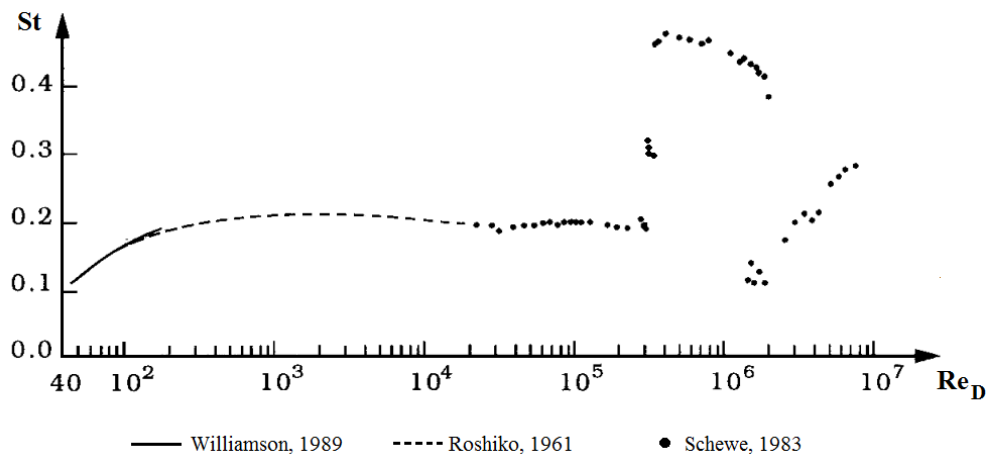


Figura 2.29: Variación del número de Strouhal en función del número de Reynolds del obstáculo (Schewe, 1983)

Los desprendimientos de estructuras 2D aparecen para un valor de número de Reynolds del obstáculo de 40 y con un valor del número de Strouhal de aproximadamente 0.1, luego el número de Strouhal aumenta a medida que aumenta el número de Reynolds del obstáculo hasta alcanzar un valor aproximadamente constante de 0.2 para un $Re_D \approx 300$. Este primer rango comprendido entre $Re_D \approx 40$ y $Re_D \approx 300$ se denomina “laminar”. Este valor de $St = 0.2$ luego se mantiene constante en un rango definido como “subcrítico” hasta $Re_D \approx 3 \times 10^5$, donde experimenta un salto abrupto hasta un valor de 0.45 aproximadamente. Este valor de Re_D se denomina “número de Reynolds crítico”. Luego en el rango denominado “supercrítico” el número de Strouhal se mantiene en valores elevados, pero subsecuentemente comienza a decrecer a medida que aumenta el Re_D .

Los experimentos realizados para las dos condiciones del flujo en la tipología del cuerpo cilíndrico están comprendidos en el rango subcrítico del número del Reynolds. Por lo tanto de acuerdo a lo comentado anteriormente, el número de Strouhal debe tener un valor aproximado a 0.2.

En la Tabla 2.4 se muestran los valores obtenidos del número de Strouhal para las dos componentes analizadas (longitudinal y transversal) correspondientes a la condición experimental 2.1, y en la Tabla 2.5 para la condición experimental 2.2. Los valores del número de Strouhal se calcularon con el valor de la frecuencia asociada al pico máximo de energía obtenido del análisis espectral para cada componente de la velocidad registrada en los con ADV en los 10 puntos de la zona de mezcla. Para la velocidad del flujo de aproximación se utilizó el valor medio $U_m=Q/A$ (ver Tabla 2.3), y el diámetro del obstáculo $D = 0.16\text{m}$.

Tabla 2.4: Números de Strouhal para las direcciones longitudinal y transversal del flujo alrededor del cuerpo cilíndrico. Condición experimental 2.1 (Q total = 80l/s)

Punto	Componente longitudinal		Componente transversal	
	f	St	f	St
1	-	-	0.278	0.22
2	0.272	0.21	0.272	0.21
3	-	-	0.275	0.21
4	0.275	0.21	0.275	0.21
5	0.262	0.20	0.262	0.20
6	-	-	0.275	0.21
7	0.269	0.21	0.269	0.21
8	0.266	0.21	0.266	0.21
9	-	-	0.266	0.21
10	0.269	0.21	0.269	0.21

Tabla 2.5: Números de Strouhal para las direcciones longitudinal y transversal del flujo alrededor del cuerpo cilíndrico. Condición experimental 2.2 (Q total = 30l/s)

Punto	Componente longitudinal		Componente transversal	
	f	St	f	St
1	-	-	0.204	0.25
2	0.189	0.23	0.201	0.24
3	-	-	0.195	0.23
4	0.195	0.23	0.195	0.23
5	0.195	0.23	0.195	0.23
6	-	-	0.198	0.24
7	0.198	0.24	0.198	0.24
8	0.186	0.22	0.186	0.22
9	-	-	0.201	0.24
10	0.198	0.24	0.192	0.23

Se observa que para la tipología del cuerpo cilíndrico se verifica el valor empírico del número de Strouhal para las dos condiciones analizadas. Para la componente longitudinal de velocidad no se realizó la verificación en los puntos ubicados en el eje central del canal (puntos 1, 3, 6 y 9) ya que no se observaron picos de energía para esa componente de velocidad en el análisis espectral.

Para determinar la validez de la analogía del flujo alrededor del cuerpo cilíndrico con la confluencia de flujos paralelos en relación a los períodos de desprendimientos de estructuras 2D, se calcularon los números de Strouhal a partir del análisis espectral realizado para la tipología de la confluencia. En la Tabla 2.6 se muestran los valores obtenidos del número de Strouhal para las dos componentes analizadas (longitudinal y transversal) correspondientes a la condición experimental 2.1 de la tipología de confluencia de flujos paralelos, y en la Tabla 2.7 para la condición experimental 2.2 de la misma tipología.

Tabla 2.6: Números de Strouhal para las direcciones longitudinal y transversal del flujo para la tipología de la confluencia de flujos paralelos. Condición experimental 2.1.

Punto	Componente longitudinal		Componente transversal	
	f	St	f	St
1	-	-	0.284	0.22
2	0.269	0.21	0.269	0.21
3	-	-	0.262	0.20
4	0.281	0.22	0.275	0.21
5	0.299	0.23	0.317	0.25
6	-	-	0.327	0.25
7	0.299	0.23	0.299	0.23
8	0.308	0.24	0.308	0.24
9	-	-	0.262	0.20
10	0.262	0.20	0.296	0.23

Tabla 2.7: Números de Strouhal para las direcciones longitudinal y transversal del flujo para la tipología de la confluencia de flujos paralelos. Condición experimental 2.2.

Punto	Componente longitudinal		Componente transversal	
	f	St	f	St
1	-	-	0.159	0.19
2	0.165	0.20	0.180	0.22
3	-	-	0.168	0.20
4	0.180	0.22	0.180	0.22
5	0.211	0.25	0.226	0.27
6	-	-	0.183	0.22
7	0.217	0.26	0.189	0.23
8	0.156	0.19	0.180	0.22
9	-	-	0.192	0.23
10	0.223	0.27	0.183	0.22

Se observa que para las dos condiciones del flujo en la tipología de la confluencia de flujos paralelos, los valores de número de Strouhal obtenidos en los 10 puntos de la zona de mezcla se aproximan al valor empírico de 0.2 relacionado al flujo alrededor de un cilindro, y además son similares a los valores obtenidos para la tipología del cuerpo cilíndrico.

2.5. Conclusiones del capítulo

Este capítulo presenta una caracterización experimental de la hidrodinámica en la interfase de la mezcla en confluencia de flujos en canal abierto construido en una instalación de laboratorio con lecho fijo concordante y sin diferencia de densidad de los flujos convergentes. La relación de momento y de velocidad de flujo entre los flujos convergentes es cercana a la unidad, y patrones de estela turbulenta (ET) se observaron en la interfase de mezcla. Por ello, la tipología experimental de la confluencia fue modificada a una configuración de flujo alrededor de un cuerpo cilíndrico sumergido (con longitud característica similar) con el fin de validar el uso de consideraciones teóricas de la mecánica de fluidos (es decir, la estela turbulenta detrás de un obstáculo) para la caracterización de la hidrodinámica en la interfase de mezcla de confluencias.

La comparación entre las dos configuraciones de flujo (confluencia y cuerpo cilíndrico sumergido) muestra que a pesar de que se observaron patrones hidrodinámicos similares, existen algunas diferencias. Para ambas configuraciones se observó un déficit de velocidad de flujo longitudinal (incluyendo la zona de estancamiento) en la línea central de la zona de mezcla. Para la configuración de flujo alrededor de un cuerpo cilíndrico, la velocidad longitudinal a los lados del obstáculo es mayor que para la configuración de confluencia. Esto es debido a las aceleraciones experimentadas por el flujo que pasa a través del obstáculo. Además, el déficit de la velocidad del flujo es mayor en la configuración de flujo alrededor del cuerpo cilíndrico y la zona de estancamiento se extiende aún más para dicha configuración. Valores similares de velocidad media longitudinal se observaron para ambas configuraciones para distancias mayores a 5 veces la longitud característica del obstáculo aguas abajo del mismo, con valores de aproximadamente el 80% de la velocidad media de flujo de aproximación.

Aunque patrones similares de los valores *RMS* se observaron para las configuraciones analizadas, la configuración de flujo alrededor del cuerpo cilíndrico presenta valores mayores de *RMS* para la velocidad longitudinal, deduciendo que procesos son más intensos en la estela turbulenta detrás de un obstáculo.

La escala temporal de las estructuras observadas en la interfase de mezcla se estimó mediante un análisis espectral (frecuencia asociada a un pico de energía) de las series temporales de velocidad registradas en la interfase de mezcla para las dos configuraciones experimentales analizadas. Los valores del número de Strouhal calculados para las componentes longitudinal y transversal de la velocidad registradas con ADV en diferentes localizaciones para la configuración de flujo alrededor de un cuerpo cilíndrico, están en concordancia con antecedentes de estudios previos. Los valores del número de Strouhal calculados en la zona de mezcla para las componentes longitudinal y transversal de la velocidad registradas con ADV en diferentes localizaciones para la configuración de confluencia están cerca del valor empírico de 0.2 en relación con la frecuencia de desprendimiento de estructuras 2D (f) flujo observados en el caso del flujo alrededor del cuerpo cilíndrico.

Capítulo 3. Análisis de sensibilidad del comportamiento de la hidrodinámica del flujo en confluencias con variables geométricas y del flujo

3.1. Introducción

Como se comentó anteriormente, la complejidad de la caracterización del flujo en confluencias ha llevado a que su análisis requiera el uso de modelos conceptuales de casos estudiados con mayor detalle en la mecánica de los fluidos. Constantinescu et al. (2012) determinaron, utilizando simulaciones numéricas del flujo turbulento en una pequeña confluencia fluvial en el Estado de Illinois de EE.UU. para la cual se encuentran disponibles mediciones de campo (Rhoads y Sukhodolov 2004), que dependiendo de la geometría en planta y del ángulo entre los flujos convergentes así como la relación de velocidades de los flujos convergentes, las interfases de mezcla pueden ser modeladas conceptualmente de acuerdo a sus características hidrodinámicas utilizando dos patrones diferentes que presentan distintas capacidades de mezcla de los flujos convergentes: Kelvin-Helmholtz (KH) o estela turbulenta (ET). En el primer caso, la interfase de mezcla incluye estructuras predominantemente cuasi bidimensionales de gran escala con el mismo sentido de rotación, cuyo crecimiento está impulsado por la inestabilidad KH y por el agrupamiento de estructuras 2D. Diversas publicaciones han evaluado la conveniencia de caracterizar interfases de mezcla en confluencias fluviales naturales utilizando patrones hidrodinámicos de KH. En el caso del modelo conceptual de estelas turbulentas (análogo al flujo detrás de un obstáculo), la interfase de mezcla incluye estructuras cuasi bidimensionales con sentidos de rotación opuestos. Este modelo conceptual fue observado experimentalmente en laboratorio los ensayos detallados en el capítulo anterior para una configuración geométrica simple y para dos condiciones de flujo, mientras que en campo Rhoads y Sukhodolov (2008) evaluaron la conveniencia de adoptar este modelo conceptual (estelas turbulentas) a partir de observaciones en una pequeña confluencia

fluvial con determinadas condiciones flujo. Sin embargo, es necesario extender el mencionado estudio para evaluar la conveniencia del uso del modelo conceptual de estelas turbulentas en confluencias con diferentes condiciones geométricas y del flujo (Chang et al, 2011).

En este capítulo se presenta una evaluación, a partir del análisis de campos de flujo generados mediante simulaciones numéricas por el grupo de trabajo donde se desarrolló esta tesis, del comportamiento de la hidrodinámica del flujo combinando distintas alternativas de flujos convergentes. Así se busca extender el estudio experimental detallado en el Capítulo 2, realizando un análisis de sensibilidad del comportamiento hidrodinámico en la misma confluencia para diferentes condiciones del flujo. Para ello se analizarán los campos de velocidad de flujo generados a través de una simulación numérica del flujo con alta resolución espacial y temporal calibrado con los datos experimentales analizados en el Capítulo 2 y presentados en Herrero et al. (2013).

El modelo numérico utilizado permitió resolver las ecuaciones que caracterizan el flujo incompresible en un dominio simplificado (flujos de aproximación paralelos) y está implementado en el código libre y abierto OpenFOAM® (Open Field Operation and Manipulation). En la próxima sección se detalla este modelo numérico.

3.2. Modelo Matemático y Numérico

3.2.1. Modelo Matemático

Las ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento o de Navier-Stokes describen el movimiento de un fluido en cualquier geometría. Para un flujo incompresible de un fluido newtoniano, en donde se tienen en cuenta fuerzas de presión, gravedad y viscosas, la ecuación se expresa de la siguiente forma:

$$\rho \frac{DV}{Dt} = \rho g - \nabla p + \mu \nabla^2 V \quad (3.1)$$

Donde ρ es la densidad del fluido; g la aceleración de la gravedad; p la presión en ese punto; μ la viscosidad dinámica del fluido; V la velocidad del flujo. Expandiendo esta ecuación para cada una de las tres direcciones cartesianas:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \quad (3.2)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 v \quad (3.3)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla^2 w \quad (3.4)$$

Donde

$$\frac{D()}{Dt} = \frac{d()}{dt} + u \frac{d()}{dx} + v \frac{d()}{dy} + w \frac{d()}{dz} \quad (3.5)$$

Por otra parte, la ecuación de continuidad para un medio continuo en un flujo incompresible es:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.6)$$

En un fluido de propiedades conocidas (ρ, μ) , el sistema de ecuaciones está compuesto de 4 ecuaciones con 4 incógnitas $(u, v, w$ y $\rho)$. Este sistema de ecuaciones solo presenta solución analítica para algunas condiciones de flujo y geometría muy simplificados, donde los términos no lineales pueden ser cantidades despreciables.

Por ello, una metodología habitual utilizada para caracterizar el flujo turbulento es mediante la simulación numérica discreta de las ecuaciones de gobierno (Ecuaciones 3.1 a 3.6). A continuación se presenta un programa computacional que tiene incorporado el modelo numérico necesario para la simulación de las ecuaciones de gobierno.

3.2.2. Modelo Numérico

El programa utilizado es OpenFOAM (Open Source Field Operation and Manipulation) versión 1.6.

Algunas de las principales ventajas y razones para la utilización de este programa por el grupo de trabajo son:

- Es un programa escrito en código libre;
- Es un programa de CFD (Computational Fluid Dynamics) reconocido por la comunidad científica;
- La calidad de resultados y programación es muy buena;
- Tiene casi todos los métodos estándar ya implementados;
- No tiene licencia de uso paga;
- La industria lo emplea.

El usuario de OpenFOAM posee total libertad para crear o modificar un algoritmo o código de resolución específico. Otro beneficio es que al estar programado en C++, lenguaje de programación altamente extendido, proporciona gran flexibilidad para ser editado. Por otra parte cabe destacar la rapidez de cálculo de este código frente a otros y además, se pueden llevar a cabo procesos de resolución en paralelo con un determinado número de procesadores, lo cual aumenta la rapidez de cálculo. Para más información consultar en <http://www.openfoam.org/features/>. La generación de mallas, en las cuales se discretizó el dominio, se realizó utilizando una aplicación suministrada con OpenFOAM: blockMesh. También se utilizaron herramientas del programa para verificar su buen diseño, adecuada forma de las celdas y su continuidad. El método de resolución utilizado por el programa es mediante volúmenes finitos y se ha utilizado el esquema de simulación “ pisoFoam ” que resuelve la ecuaciones completas de Navier Stokes y Continuidad para flujo incompresible a una sola fase en condiciones de densidad y viscosidad constantes, sin modelo de cierre de turbulencia, con discretizaciones en espacio y tiempo pequeñas de manera de simular los procesos físicos presentes (por ejemplo, desprendimiento de estructuras). La implementación del modelo numérico fue del tipo bidimensional (Pozzi et al, 2013).

3.2.3. Descripción del dominio y discretización

El dominio de la simulación realizada por Pozzi et al, 2013 fue una malla de puntos (denominados nodos) definidos por tres coordenadas, que sirven a su vez de base para la discretización del dominio en volúmenes finitos. Cada nodo es a su vez parte de bloques, los cuales son fundamentales para definir el ingreso y egreso del fluido, condiciones de borde, etcétera. La discretización de la malla se realizó en una etapa previa a los cálculos con una aplicación del programa llamada “blockMesh”, en función de los requerimientos del cálculo. En la Figura 3.1 se muestra la discretización del dominio empleada para la configuración de la confluencia de dos flujos paralelos descrita en el Capítulo 2. Se han utilizado elementos de un tamaño mínimo de 2 mm de lado a un máximo de 2 cm. Los elementos de menores dimensiones se utilizaron en las áreas de mallado ubicadas aguas abajo de la confluencia. Se trabajó incrementando el tamaño de los elementos en las zonas de menor interés del dominio. La malla de volúmenes finitos empleada está conformada por 308920 elementos y se arribó a esta configuración luego de un largo proceso de mejoras en el mallado.

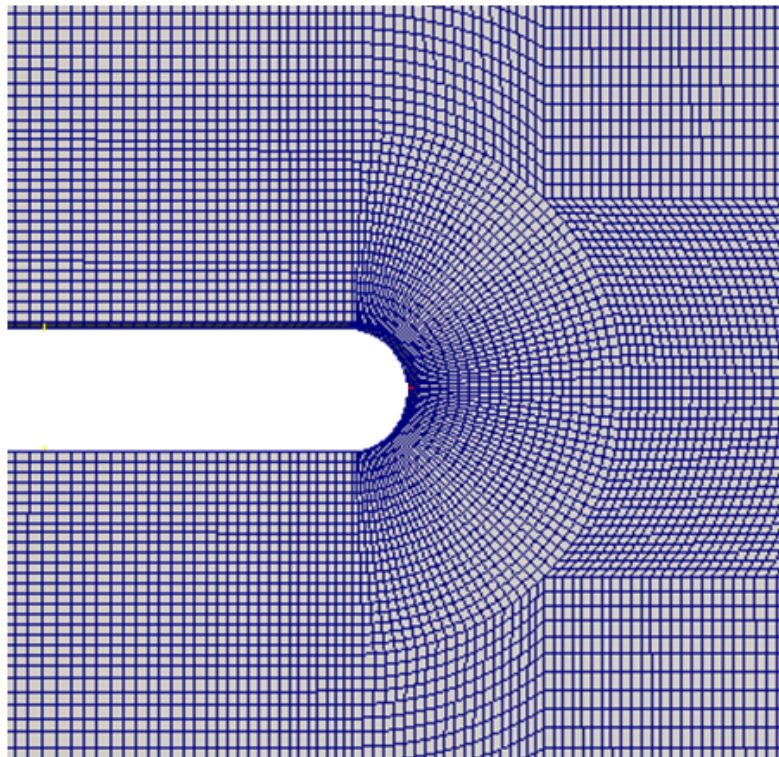


Figura 3.1: Malla utilizada para la tipología de la confluencia de dos flujos paralelos. Pozzi et al, 2013.

3.2.4. Condiciones iniciales y de borde

Pozzi et al., 2013 establecieron condiciones de iniciales y de borde para las variables: presión (p) y velocidad instantánea (u). Se impuso un valor inicial de las variables igual a cero en todo el dominio, excepto en las zonas donde se establecieron condiciones de borde específicas, que se detallan a continuación:

- a) Condiciones de borde a la entrada: gradiente de presión nulo y valores de velocidad media medidos experimentalmente en el canal experimental (Capítulo 2)
- b) Condiciones de borde a la salida: se calculó la presión estática media para la zona correspondiente a la salida del modelo y se estableció gradiente de velocidades igual a cero
- c) Condiciones de borde en paredes: gradiente de presión y velocidades nulas.

La simulación es de tipo bidimensional, simplificando el problema debido a que en las mediciones experimentales se observaron velocidades muy pequeñas en la dirección vertical en relación a las registradas para las componentes longitudinal y transversal. Para todas las condiciones ensayadas, el tiempo de simulación fue de 400 segundos con un paso de tiempo Δt de 0.005 seg. El paso de cálculo Δt se eligió en función de las frecuencias de los desprendimientos de estructuras observados en la etapa experimental de laboratorio (800 Δt por cada desprendimiento) y el tiempo total de simulación se definió de manera tal de lograr visualizar al menos 30 de las mayores estructuras turbulentas en el dominio (escala temporal característica del orden de 4 segundos).

3.3. Resultados

Los resultados obtenidos de la simulación numérica (Pozzi et al, 2013) que se muestran a continuación corresponden en primer lugar a una validación del esquema de simulación numérico utilizando los datos experimentales reportados en el Capítulo

2, y luego con el esquema validado se realiza una evaluación numérica del comportamiento hidrodinámico para distintas condiciones de flujo.

3.3.1. Validación del esquema de simulación

En la Figura 3.2 se muestran los resultados de la simulación numérica realizada para una condición de flujo que reproduce la condición experimental 2.1 descrita en el capítulo anterior (caudal total de 80 l/s repartido en 40 l/s para cada tributario). Se observa que la simulación realizada reproduce los principales procesos físicos observados durante los experimentos (ver también Figura 2.4), entre los que se destacan la zona de estancamiento y los patrones hidrodinámicos de estela turbulenta (ET) en la interfase de mezcla.

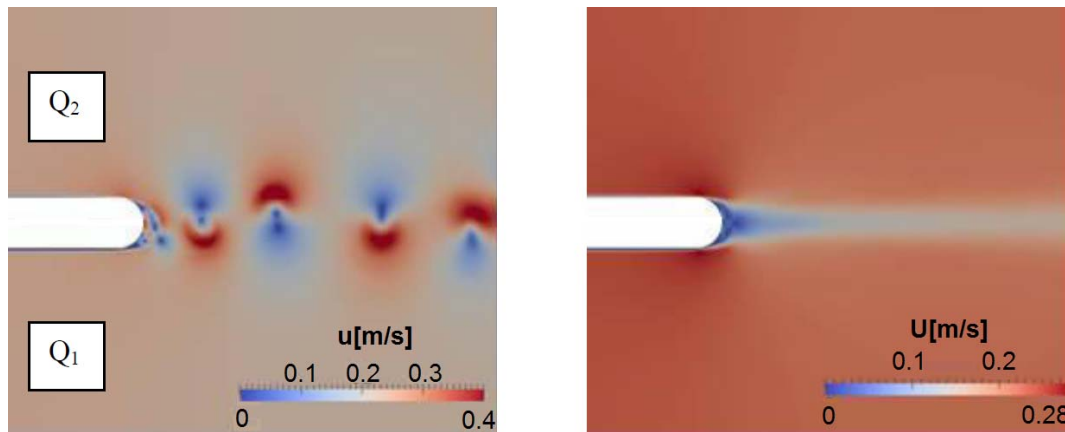


Figura 3.2: Resultado de simulación numérica (Pozzi et al, 2013): Campo instantáneo de velocidades de flujo en m/s (izq.). Campo medio de velocidades de flujo en m/s (der.). Diámetro del extremo de la confluencia, $D = 0.16\text{m}$. Caudales de tributarios, $Q_1 = 40\text{l/s}$; $Q_2 = 40\text{l/s}$.

Para validar objetivamente los campos velocidad media longitudinal se extrajeron cuatro perfiles transversales a la dirección del flujo. La ubicación de los perfiles en el dominio de simulación se presenta en el esquema de la Figura 3.3. Luego, en la Figura 3.4 se presentan los perfiles de velocidad media longitudinal (U) adimensionalizados respecto a la velocidad de aproximación (U_m) obtenidos experimentalmente en forma conjunta con los obtenidos a través de la simulación numérica para las mismas condiciones de flujo (caudales iguales a 40 l/s en cada tributario).

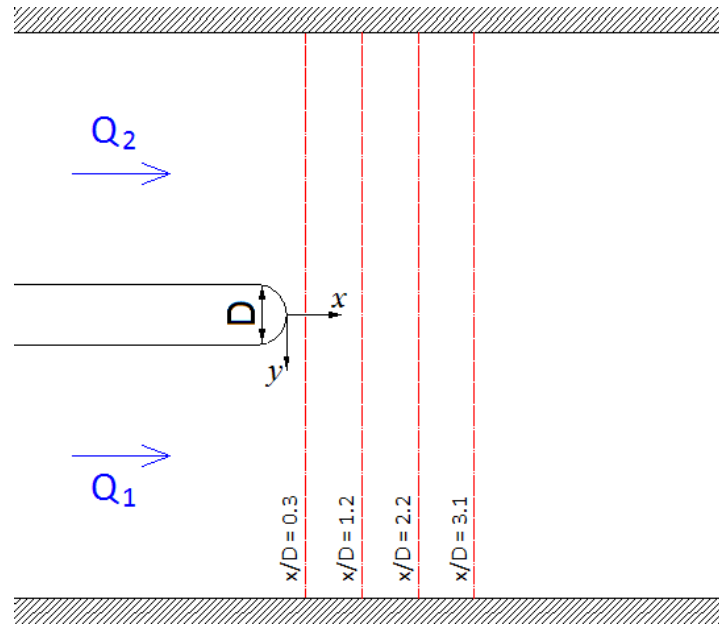


Figura 3.3: Ubicación de perfiles transversales de velocidad media.

La línea punteada en la figura representa la proyección de la posición de la nariz de la confluencia. En la figura se han contrastado los resultados numéricos (representados en línea continua) con los relevados experimentalmente (representados con puntos, ver Capítulo 2).

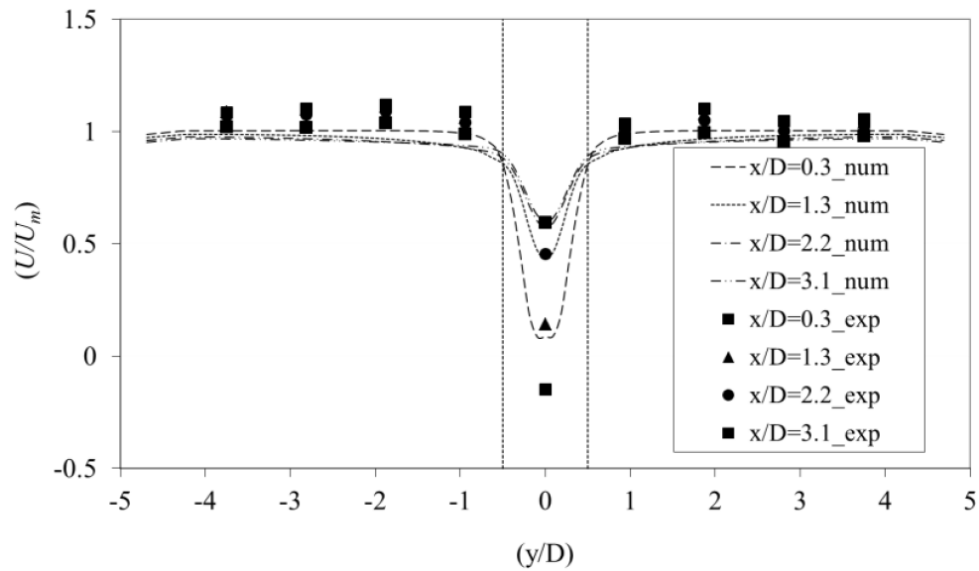


Figura 3.4: Perfiles de velocidad media longitudinal del flujo adimensionalizados. Los resultados numéricos (Pozzi et al, 2013) se representan en línea continua y los experimentales con símbolo.

Del contraste de las caracterizaciones de flujo medio representadas en la Figura 3.4 se deduce que los campos medios simulados numéricamente para la confluencia de flujos paralelos presentan valores similares a los experimentales en distancias mayores de 2 diámetros aguas abajo de la confluencia. En el centro de la interfase de mezcla (zona de estancamiento) el flujo presenta un mayor déficit de la velocidad longitudinal relevada experimentalmente respecto de los valores simulados.

La validación del esquema de simulación incluyó además el análisis de la evolución temporal del flujo aguas abajo de la confluencia. Para ello se calcularon las frecuencias características de las fluctuaciones del flujo y Número de Strouhal (St) en algunas de las localizaciones donde se realizaron las estimaciones experimentales (Ver Figura 2.3) para la dirección longitudinal (x) y transversal (y). Se observa un buen acuerdo entre los valores tabulados en la Tabla 3.1 y Tabla 3.2.

Tabla 3.1: Frecuencias características de las fluctuaciones del flujo y Número de Strouhal (St) determinadas experimentalmente en cada localización para la dirección longitudinal (x) y transversal (y). $Q_1 = Q_2 = 40\text{l/s}$.

Localización	Resultados EXPERIMENTALES			
	Frecuencia característica		Número de Strouhal	
	Dirección "x"	Dirección "y"	Dirección "x"	Dirección "y"
1		0.28		0.20
2	0.30	0.27	0.19	0.19
3		0.26		0.18
8	0.31	0.31	0.22	0.22
9		0.26		0.18

Tabla 3.2: Frecuencias características de las fluctuaciones del flujo y Número de Strouhal (St) determinadas numéricamente (Pozzi et al, 2013) en cada localización para la dirección longitudinal (x) y transversal (y). $Q_1 = Q_2 = 40\text{l/s}$.

Localización	Resultados de SIMULACIÓN NUMÉRICA			
	Frecuencia característica		Número de Strouhal	
	Dirección "x"	Dirección "y"	Dirección "x"	Dirección "y"
1		0.36		0.25
2	0.36	0.36	0.25	0.25
3		0.36		0.25
8	0.36	0.36	0.25	0.25
9		0.36		0.25

3.3.2. Evaluación numérica del comportamiento hidrodinámico de la confluencia para distintas condiciones de flujo

Una vez validado el esquema de simulación numérica, se realizaron simulaciones numéricas para distintas condiciones de flujo que incluyen diferentes relaciones en la cantidad de movimiento de los flujos convergentes manteniendo constante el caudal total escurrido de 80 l/s y las condiciones medias de flujo aguas abajo de la confluencia, con distintas distribuciones. En la Tabla 3.3 se presentan las condiciones simuladas. La relación adimensional de cantidad de movimiento detallada en dicha tabla se obtiene según la siguiente expresión:

$$M_R = \frac{(\rho \cdot Q \cdot U)_1}{(\rho \cdot Q \cdot U)_2} \quad (3.7)$$

La relación de velocidades de aproximación de los tributarios se calcula como:

$$U_R = \frac{U_1}{U_2} \quad (3.8)$$

Y la relación de velocidad modificada propuesta por (Laizet et al. 2010) es:

$$U_{RM} = \frac{(U_1 - U_2)}{(U_1 + U_2)} \quad (3.9)$$

Para las condiciones analizadas en esta tesis donde los anchos y profundidades del flujo de aproximación son iguales, las relaciones anteriores se pueden expresar como:

$$U_R = \frac{Q_1}{Q_2} \quad (3.10)$$

$$U_{RM} = \frac{(Q_1 - Q_2)}{Q_T} \quad (3.11)$$

Tabla 3.3: Distintas condiciones de flujo simuladas (Pozzi et al, 2013) y parámetros adimensionales adoptados para su caracterización.

Condición	Q_1 [l/s]	Q_2 [l/s]	Distribución del Q total [%]	M_R	U_R	U_{RM}
3.1	40	40	50% / 50%	1	1	0
3.2	60	20	75% / 25%	9	3	0.50
3.3	70	10	87.5% / 12.5%	49	7	0.75

El contraste de los campos de velocidad media e instantáneos mostrados en la Figura 3.2, Figura 3.5 y Figura 3.6 muestra que en los campos de velocidad media simulados no se observan desvíos significativos de la posición de la capa de corte para las distintas condiciones, mientras que en los campos instantáneos de velocidades existe una relación inversa entre relación de velocidades y el tamaño de las estructuras coherentes que se forman en la interfase de mezcla.

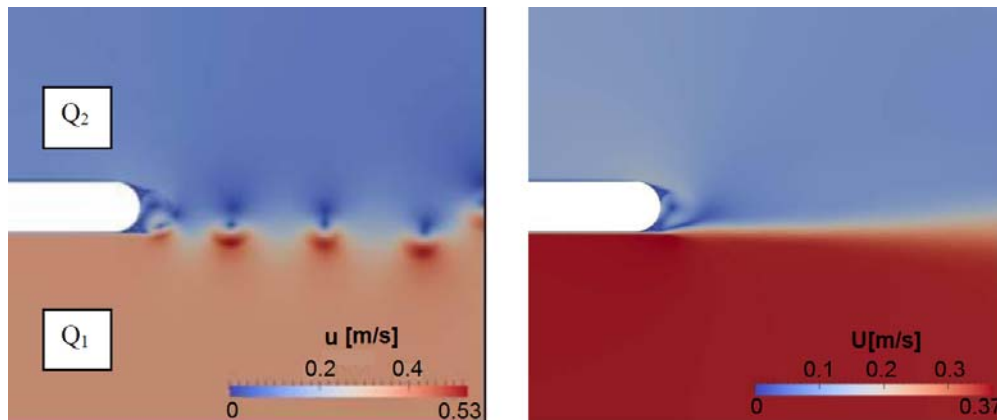


Figura 3.5: Resultado de la simulación numérica (Pozzi et al, 2013): Campo instantáneo de velocidades de flujo en m/s (izq.). Campo medio de velocidades de flujo en m/s (der.). Diámetro del extremo de la confluencia, $D = 0.16\text{m}$. Caudales de tributarios, $Q_1 = 60\text{l/s}$; $Q_2 = 20\text{l/s}$.

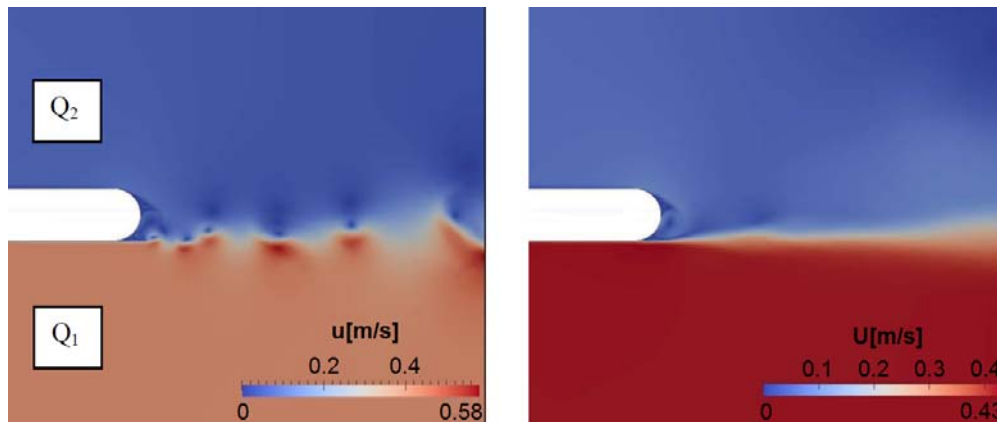


Figura 3.6: Resultado de la simulación numérica (Pozzi et al, 2013): Campo instantáneo de velocidades de flujo en m/s (izq.). Campo medio de velocidades de flujo en m/s (der.). Diámetro del extremo de la confluencia, $D = 0.16\text{m}$. Caudales de tributarios, $Q_1 = 70\text{l/s}$; $Q_2 = 10\text{l/s}$.

En la Figura 3.7 y Figura 3.8 se muestran los perfiles transversales de velocidad media longitudinal del flujo U , adimensionalizados respecto a la velocidad de aproximación U_m para diferentes localizaciones en el eje longitudinal del canal adimensionalizadas respecto al diámetro de la confluencia D .

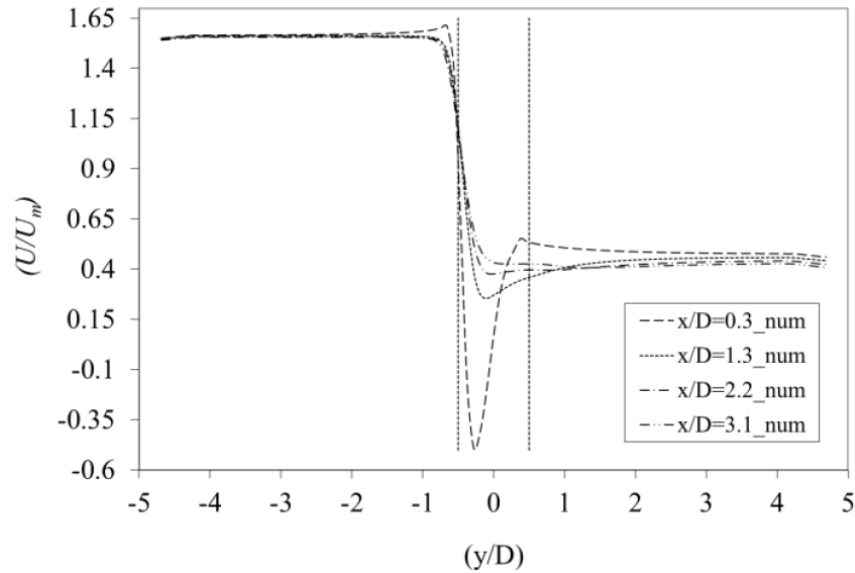


Figura 3.7: Resultado de simulación numérica (Pozzi et al, 2013): Perfiles de velocidad media longitudinal del flujo adimensionalizados. Diámetro del extremo de la confluencia, $D = 0.16\text{m}$. Caudales de tributarios, $Q_1 = 60\text{l/s}$; $Q_2 = 20\text{l/s}$.

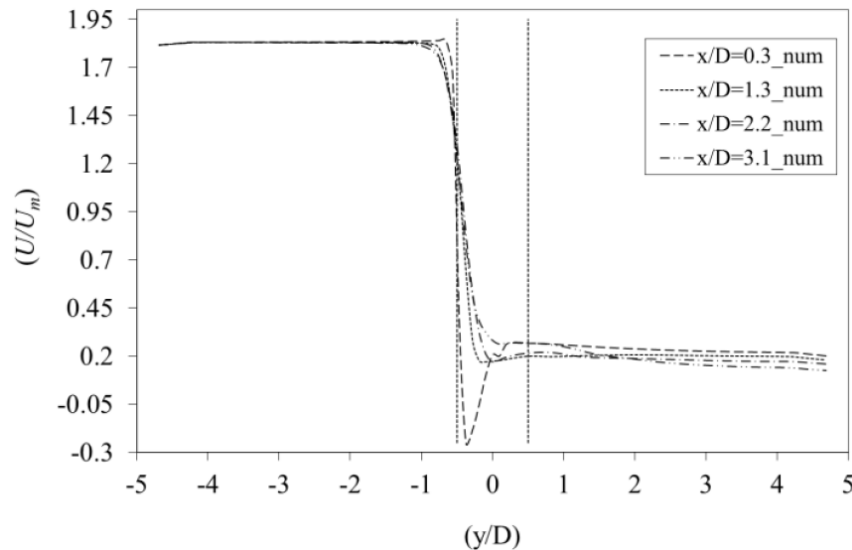


Figura 3.8: Resultado de simulación numérica (Pozzi et al, 2013): Perfiles de velocidad media longitudinal del flujo adimensionalizados. Diámetro del extremo de la confluencia, $D = 0.16\text{m}$. Caudales de tributarios, $Q_1 = 70\text{l/s}$; $Q_2 = 10\text{l/s}$.

Los perfiles presentados corresponden a las secciones representadas en la Figura 3.5 y Figura 3.6. La línea punteada en las figuras representa la proyección del extremo de la confluencia. Como se mencionó anteriormente, no se observa un desvío significativo de la interfase de mezcla. En la Figura 3.9 y Figura 3.10 se muestran las evoluciones, para las distintas condiciones de flujo simuladas (representadas por el parámetro U_{RM}), de las frecuencias de desprendimientos de estructuras coherentes según las componentes transversal y longitudinal de velocidad, respectivamente. Las condiciones de flujo simuladas se definen por medio de la relación de velocidad modificada U_{RM} propuesta por (Lazet et al. 2010) y las frecuencias de desprendimientos se obtuvieron mediante análisis espectral.

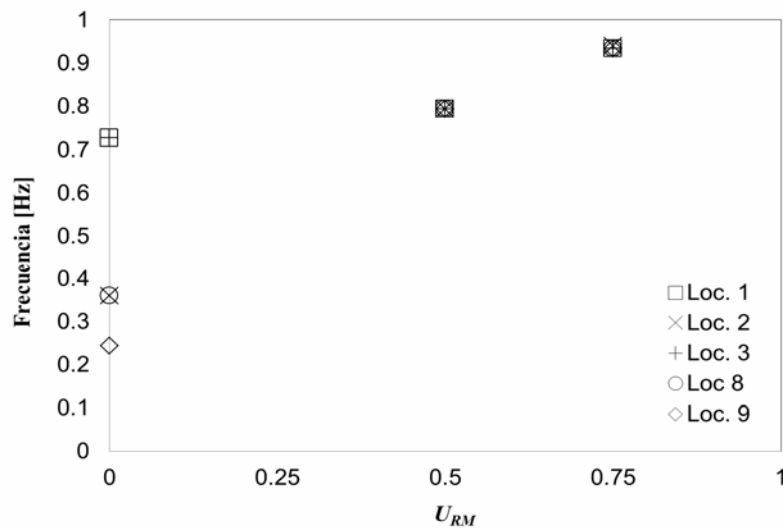


Figura 3.9: Frecuencias características de las fluctuaciones del flujo en cada localización para la dirección longitudinal (x). Resultados obtenidos de simulaciones numéricas para distintas condiciones de flujo.

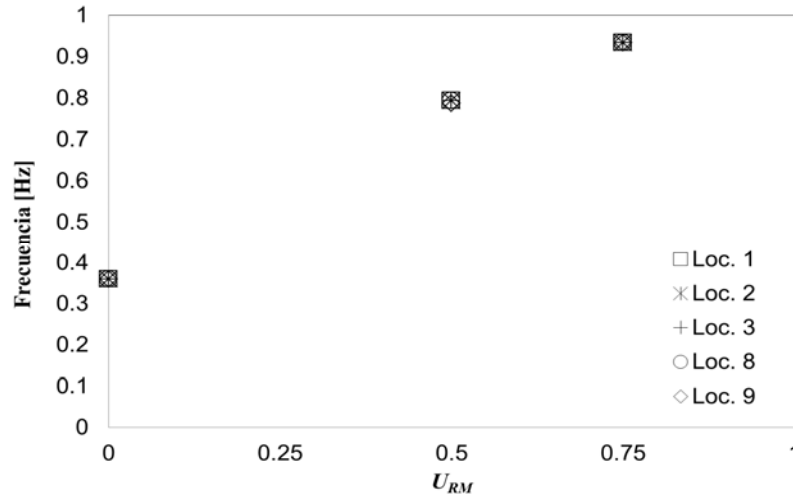


Figura 3.10: Frecuencias características de las fluctuaciones del flujo en cada localización para la dirección transversal (y). Resultados obtenidos de simulaciones numéricas para distintas condiciones de flujo.

En general, se observa que a medida que aumenta la relación de velocidad normalizada, también aumenta la frecuencia de desprendimientos de estructuras coherentes, en coincidencia con lo observado en los campos de velocidades instantáneos reportados anteriormente. Para la componente transversal de velocidad de flujo, todas las localizaciones presentan similares períodos de fluctuaciones de velocidad para las mismas condiciones de flujo.

La escala de velocidad U que permite obtener valores del número de Strouhal $St = 0.2$ (asumiendo una escala característica de longitud constante $D = 0.16\text{m}$) se puede expresar utilizando una relación funcional φ de la relación de velocidad modificada como $U = U_m + \varphi(U_{RM})$. El análisis de resultados de un mayor número de condiciones de flujo ayudará a definir esta relación funcional.

Para la componente longitudinal del flujo se observan altas frecuencias (aproximadamente el doble) en las localizaciones 1 y 3 (cercanas a la zona de estancamiento) comparadas con el resto de las localizaciones para la condición de flujo con igual valor de caudal en cada tributario. Una simulación numérica 3D con mayor resolución espacial en la zona de estancamiento debería ser analizada para evaluar esta particularidad. En el resto de las localizaciones y condiciones de flujo, los valores de frecuencia son similares para la misma condición de flujo.

3.4. Conclusiones del capítulo

En este capítulo se presentó una evaluación numérica, para distintas condiciones de flujo de aproximación, del comportamiento hidrodinámico de una confluencia de dos flujos paralelos en la cual se esperan patrones hidrodinámicos de estelas turbulentas (ET). El esquema numérico computacional utilizado en la evaluación (implementado en el código libre y abierto OpenFOAM, Open Field Operation and Manipulation) el cual fue validado con los datos experimentales registrados en la instalación experimental del presentada en el capítulo 2. El modelo numérico implementado reproduce los principales procesos físicos observados durante los experimentos, logrando representar adecuadamente los patrones hidrodinámicos en la interfase de mezcla caracterizados como patrones de estela turbulenta (ET).

El análisis espectral de las series temporales de velocidades de flujo medidas y simuladas para la condición de flujo con relación de velocidades de aproximación de los tributarios igual a 1, muestra valores de frecuencias características de las fluctuaciones del flujo del orden a los observados experimentlamente (número de Strouhal = 0.2).

El análisis de los resultados de simulaciones realizadas para distintas condiciones de flujo muestra que los campos de velocidad media simulados no presentan un desvío significativo de la posición de la capa de corte para las distintas condiciones y los campos instantáneos de velocidades muestran menores estructuras coherentes a medida que la relación de velocidades aumenta. Esta última conclusión se confirmó a través del análisis espectral realizado sobre las series temporales de dos de las componentes del vector velocidad de flujo, ya que se observó que a medida que aumenta la relación de velocidad normalizada se produce un aumento en las frecuencias características de las fluctuaciones del flujo indicando menores tiempos característicos de las estructuras turbulentas.

La escala de velocidad U que permite obtener valores del número de Strouhal $St=0.2$ para condiciones de flujo con diferentes relación de velocidad de flujo de aproximación U_m (asumiendo una escala característica de longitud constante $D=0.16m$) se puede expresar utilizando una relación funcional de la relación de

velocidad modificada U_{RM} como $U = U_m + \varphi(U_{RM})$. Una simulación numérica complementaria ayudará a definir esta relación funcional φ .

Capítulo 4. Estudio experimental de una confluencia fluvial en un modelo físico de un proyecto de obras hidráulicas.

4.1. Introducción

La primera motivación tecnológica presentada en el Capítulo 1 consiste en cuantificar, a partir de datos experimentales registrados en un modelo físico, los patrones hidrodinámicos que ocurren en la zona de la confluencia de los canales del proyecto "Aprovechamiento Múltiple Presa Los Monos" (Figura 1.1) y sus efectos sobre los flujos convergente. El proyecto "Aprovechamiento Múltiple Presa Los Monos" es parte del Programa de Manejo de la Cuenca del Río Senguerr, ubicado al sur de la provincia de Chubut, Argentina (Universidad Nacional de Córdoba, 2008). El proyecto de la presa incluye un vertedero de canal lateral ubicado a la margen derecha de la presa y una central hidroeléctrica en la margen izquierda. La estructura de disipación del vertedero es un salto de esquí al final de una rápida, cayendo en un cuenco pre-excavado en roca, que es compartido con la salida del descargador de fondo de la presa. El canal de restitución del flujo excedente que pasa por el vertedero, se une en un punto común con un canal situado sobre la margen izquierda procedente de la central hidroeléctrica. La presencia de esta confluencia, junto con la relativa poca profundidad del flujo esperado en los canales, puede generar patrones hidrodinámicos en la región de confluencia, que afecta los flujos convergentes. Para evaluar esta hipótesis, se ha realizado una caracterización experimental en un modelo físico que representa a escala reducida la presa "Los Monos".

Con el fin de caracterizar los procesos hidrodinámicos presentes en el modelo físico de la confluencia estudiada (de característica compleja), resulta necesaria la verificación del tipo de patrón hidrodinámico a la que están asociados o que se asemejan los procesos hidrodinámicos observados, y el análisis de los efectos que estos procesos le generan a los flujos convergentes, en especial al canal de restitución

de la central hidroeléctrica. Ingram y Chu (1987) caracterizan las estructuras 2D a partir de un parámetro de estabilidad, S , que tiene en cuenta, además de las características geométricas del obstáculo y la profundidad del flujo, H , la turbulencia 3D generada por la fricción del fondo a través del coeficiente de fricción c_f . (Ver ecuación 1.1. Chen y Jirka, 1995 identificaron, dependiendo del valor del parámetro de estabilidad S , tres patrones hidrodinámicos diferentes: "calle de vórtices" (CV) si $S < 0.2$, "burbuja inestable" (BI) si $0.2 \leq S < 0.5$, y "burbuja estable" (BE) si $S \geq 0.5$.

En este capítulo se presenta una caracterización experimental, en laboratorio, de los procesos hidrodinámicos en una confluencia específica, mediante el uso de técnicas experimentales con elevada resolución espacial y temporal. El patrón hidrodinámico al que se asemeja el patrón presente en la confluencia se determina analíticamente de antemano, y luego se verifica experimentalmente. Los efectos de los procesos hidrodinámicos que ocurren en la confluencia sobre los flujos convergentes se evalúan utilizando series temporales de la velocidad del flujo y de la elevación de la superficie libre del agua registradas aguas arriba de la confluencia.

4.2. Instalación Experimental

La instalación experimental utilizada para este estudio consistió en un modelo físico a escala con similitud de Froude (escala de longitud sin distorsiones igual $\lambda_L=50$) de la Presa Los Monos y su infraestructura hidráulica proyectada. Este modelo se ha construido en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina (Universidad Nacional de Córdoba, 2008). La topografía del embalse aguas arriba de la presa se representó mediante fondo fijo, mientras que la topografía de la zona aguas abajo de la presa fue representada principalmente con fondo móvil, excepto la zona del cuenco pre-excavado aguas abajo del vertedero. El área de estudio para este capítulo (ver Figura 4.1) incluye el canal aguas abajo de la central hidroeléctrica (Canal 1), el canal de aguas abajo del cuenco disipador pre-excavado (Canal 2), y la región de la confluencia. El sedimento seleccionado fue arena natural (lavada y filtrada) con un tamaño cuasi-uniforme de 0.50 mm (que garantiza la no

aparición de efectos de escala por el aumento de la rugosidad por formas de fondo), y una densidad relativa de 2.65.

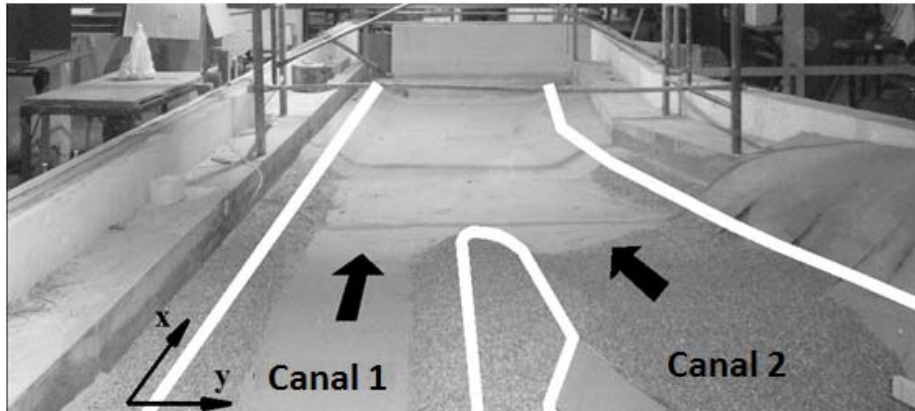


Figura 4.1: Instalación experimental

Fueron ensayadas experimentalmente diferentes condiciones del flujo, caracterizando el desarrollo y evolución de las estructuras 2D en los canales de la confluencia. La geometría de los canales, el ángulo entre los canales convergentes ($\alpha = 18^\circ$), la profundidad de flujo ($H = 10$ cm), la relación de aspecto ancho/profundidad de los dos canales ($B_1/H = 6.3$ y $B_2/H = 9.5$), el tamaño del sedimento ($d_{50} = 0.5$ mm), y por lo tanto el coeficiente de fricción c_f y el parámetro de estabilidad S , se mantuvieron constantes para todas las condiciones experimentales analizadas. Cada condición del flujo estuvo definida por los caudales en el canal 1, Q_1 , y el canal 2, Q_2 , diferentes números de Reynolds de flujo (ecuación 4.2) para cada canal, Re_1 y Re_2 respectivamente, número de Reynolds del obstáculo Re_D (ecuación 4.3), y diferentes relaciones de momento de los flujos convergentes M_R . (ecuación 4.4), donde:

$$Re_i = \frac{U_i \cdot H}{\nu} \quad (4.2)$$

$$Re_D = \frac{U_m \cdot D}{\nu} \quad (4.3)$$

$$M_R = \frac{U_2 \cdot Q_2}{U_1 \cdot Q_1} \quad (4.4)$$

U_i es la velocidad media del flujo en el canal i , $U_m = \frac{U_1 + U_2}{2}$, H es la profundidad de flujo ($H = H_1 = H_2$), D es la longitud transversal característica del obstáculo, que se asumió igual al diámetro del vértice de la confluencia a la mitad de su altura ($D = 35$ cm), debido a que el diámetro del obstáculo es variable en altura (ya que tiene un talud de 1v: 1.5 h). Finalmente, ν es la viscosidad cinemática del fluido. Se impuso la condición de frontera en el extremo de aguas abajo (que definió la profundidad del flujo H) mediante una compuerta al final del modelo físico. La Tabla 4.1 resume las condiciones experimentales ensayadas, cuyos resultados se analizan en este capítulo. Las condiciones experimentales hidro-sedimentológicas se verificaron utilizando el diagrama de Shields (García, 2008) que dio como resultado una condición de “no movimiento” para todas las condiciones experimentales.

Tabla 4.1: Condiciones experimentales

Condición experimental	Q_1 [l/s]	Q_2 [l/s]	Q_T [l/s]	H [cm]	U_1 [cm/s]	U_2 [cm/s]	U_m [cm/s]	Re_D	Re_1	Re_2	M_R
4.1	4.0	6.0	10.0	10	6.3	6.3	6.3	2.2×10^4	6349	6316	1.6
4.2	5.2	8.1	13.3	10	8.3	8.5	8.4	2.9×10^4	8254	8526	1.6
4.3	2.3	11.3	13.6	10	3.7	11.9	7.8	2.7×10^4	3651	11895	4.9
4.4	0	9.3	9.3	10	0	9.8	4.9	1.7×10^4	0	9789	infinito
4.5	0.6	11.6	12.2	10	0.6	12.2	6.4	2.2×10^4	952	12211	18.3

4.3. Técnicas experimentales utilizadas

Para la caracterización de flujo se utilizaron las siguientes técnicas experimentales: a) visualización de flujo, b) medición de la velocidad del flujo, y c) medición de elevación de la superficie del agua.

Para la visualización de flujo se utilizaron trazadores (fluoresceína y partículas sólidas), junto con el procesamiento de imágenes digitales. La fluoresceína se inyectó en el flujo en la zona de estancamiento de la confluencia, y se grabaron videos con una cámara digital con una resolución de 640x480 píxeles y una frecuencia de adquisición de 30 fotogramas por segundo. Además se emplearon partículas cuasi-esféricas de polipropileno con una densidad relativa de 0.9 y un diámetro aproximado de 3 mm.

Estas partículas se sembraron manualmente en el extremo aguas arriba del canal 1, y el vídeo fue grabado desde la misma ubicación que en el caso con fluoresceína y utilizando la misma cámara digital. Estas dos técnicas de visualización se realizaron en forma simultánea con mediciones de velocidad del flujo durante un tiempo de dos minutos, en una localización aguas arriba de la confluencia en el canal 1.

Para las mediciones del flujo, se utilizaron técnicas de alta resolución espacial y temporal, tales como el velocímetro acústico Doppler (ADV), y la velocimetría por seguimiento de partículas (PTV). Para la aplicación técnica de ADV, se registraron series temporales de velocidad del flujo utilizando un MicroADV Sontek® de 16 MHz y siguiendo la metodología experimental recomendada por García et al. (2005) para la caracterización de la turbulencia mediante ADV en varias localizaciones, incluyendo los dos canales tributarios (relevante para este capítulo), y las zonas de estancamiento y de mezcla (ver Figura 4.2).

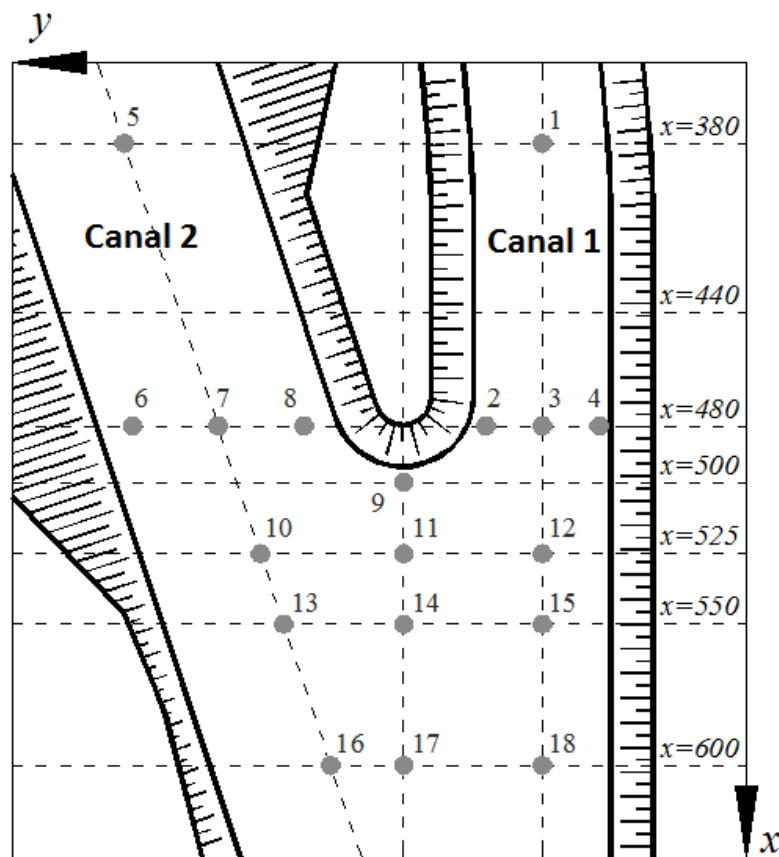


Figura 4.2: Localizaciones donde se realizaron mediciones de velocidad con ADV. Las progresivas están expresadas en cm

En cada localización detallada en la Figura 4.2, las series temporales de velocidad se registraron aproximadamente a 4 cm del fondo del canal con una frecuencia de muestreo f_R de 25 Hz, que satisface la condición $F = f_R \cdot T_f > 20$ (García et al., 2005), donde T_f es la escala de tiempo de la turbulencia del flujo generada por la fricción con el fondo, que se calcula como $T_f = L / U_{conv}$, en donde L es la escala de longitud de los grandes vórtices (del orden de la profundidad de flujo H) y U_{conv} es la velocidad convectiva del orden de la velocidad media de flujo en la dirección longitudinal, U . Para establecer las condiciones óptimas de muestreo, se realizó un análisis de sensibilidad basado en parámetros de la calidad de la señal (correlación y la relación señal/ruido). Mediciones preliminares de la velocidad del flujo con ADV en la localización 1 de la Figura 4.2, mostraron una fluctuación cuasi-periódica de la componente longitudinal de la velocidad del flujo, con un período cercano a 20 segundos. De acuerdo con estos resultados, el tiempo de medición en cada localización fue de 600 segundos (10 minutos). Así, este tiempo de medición es 30 veces más grande que la mayor escala de tiempo en el flujo.

Para la técnica PTV, antes de la siembra de partículas se registró una imagen de una grilla situada horizontalmente en el nivel de la superficie libre de agua con el fin de obtener una correspondencia entre el tamaño del píxel de la imagen y la distancia real. La frecuencia de muestreo de imágenes digitales fue de 30 fotogramas por segundo durante un tiempo de medición de 2 minutos, simultáneamente con los primeros 2 minutos de medición de la velocidad de flujo con ADV en la ubicación 1 (ver Figura 4.2). El área de estudio para la técnica de PTV fue el extremo aguas abajo del canal 1, la zona de estancamiento, y la zona de mezcla aguas abajo de la confluencia. La técnica PTV fue implementada para las tres primeras condiciones experimentales (Tabla 4.1).

Para evaluar la evolución temporal de las elevaciones de la superficie del flujo se utilizó un sensor resistivo HR Wallingford®. El instrumento se ubicó en la salida de la central hidroeléctrica sobre el canal 1 aguas arriba de la confluencia. Se realizó una calibración del instrumento con antelación, registrando tres valores de voltaje en correspondencia con tres elevaciones de la superficie de agua previamente definidas, ajustando una función lineal. El tiempo de medición fue de 10 minutos, y con una frecuencia de muestreo de 100 Hz. Series temporales de velocidad del flujo se

registraron con ADV en la localización 1 (Figura 4.2) en forma simultánea con las mediciones de elevación de la superficie libre del flujo para las condiciones experimentales 4 y 5 (Tabla 4.1).

4.4. Resultados

En esta sección se presentan los principales resultados relacionados con la caracterización de la hidrodinámica en la confluencia de este capítulo, para las condiciones experimentales descritas anteriormente. En primer lugar, se utilizan los parámetros adimensionales presentados anteriormente para identificar a priori los patrones hidrodinámicos en la interfase de mezcla, adoptando el modelo conceptual con un flujo somero detrás de un obstáculo. Luego, el comportamiento predicho se valida con la caracterización experimental a través de las mediciones de laboratorio.

4.4.1. Identificación del patrón hidrodinámico en la confluencia mediante el cálculo de parámetros adimensionales.

Con el fin de calcular el parámetro adimensional S que define el tipo de inestabilidad, el coeficiente de fricción se determinó utilizando la siguiente fórmula de Manning-Stricker propuesta por Parker (1990):

$$c_f = \left[8.1 \cdot \left(\frac{H}{k_s} \right)^{1/6} \right]^{-2} \quad (4.5)$$

donde k_s es la rugosidad Nikuradse equivalente, igual a 0.5 mm (adoptado igual al d_{50} del sedimento utilizado). Debido al hecho de que la profundidad del flujo y las características del sedimento se mantienen constantes para todas las condiciones experimentales analizadas, c_f es también constante e igual a 0.0026. Por lo tanto, según la expresión del parámetro de estabilidad, para una profundidad del flujo $H = 10$ cm y una longitud característica del obstáculo $D = 35$ cm, el parámetro de estabilidad es igual a 0.009 Este valor es inferior a 0.2, por lo que el patrón hidrodinámico del flujo

predicho corresponde al de calle de vórtices (CV), y por lo tanto las estructuras presentes en el flujo analizado deberían ser similares a ese tipo de inestabilidad.

La frecuencia de desprendimiento de estas estructuras turbulentas se puede estimar a partir del número de Strouhal (ver ecuación 2.5). Debido a que para todas las condiciones experimentales el número de Reynolds del obstáculo se encuentra en el rango subcrítico, el valor del número de Strouhal se asume igual a 0.20 para todas las condiciones analizadas, al igual que el valor de la longitud característica del obstáculo $D = 35$ cm. Luego, de acuerdo a los valores de velocidad del flujo de aproximación U_m para cada condición, se predice que las frecuencias características de la estela turbulenta oscilan entre 0.03 y 0.05 Hz (períodos entre 20 y 30 segundos).

4.4.1.1. Identificación del patrón hidrodinámico en la confluencia mediante la caracterización experimental del flujo.

En esta sección, se identificó el patrón hidrodinámico en la confluencia en estudio a partir de la caracterización experimental de las estructuras coherentes presentes en la zona de estancamiento y zona de mezcla. Los resultados se muestran de acuerdo a la zona en la que se han registrado los datos (zona de estancamiento, zona de mezcla, y zona aguas arriba de la confluencia) mediante el empleo de las técnicas experimentales mencionadas anteriormente (visualización del flujo, medición de la velocidad del flujo, y medición de la elevación de la superficie libre del flujo).

4.4.1.2. Caracterización experimental del flujo en la zona de estancamiento

La Figura 4.3(a), (b), y (c) muestran los resultados de la visualización de los patrones hidrodinámicos del flujo en la zona de estancamiento, para las primeras tres condiciones experimentales.

Para todas las condiciones experimentales el patrón hidrodinámico de ET observado es del tipo calle de vórtices (CV), con desprendimientos de estructuras en sentidos de rotación opuestos de manera alternada.

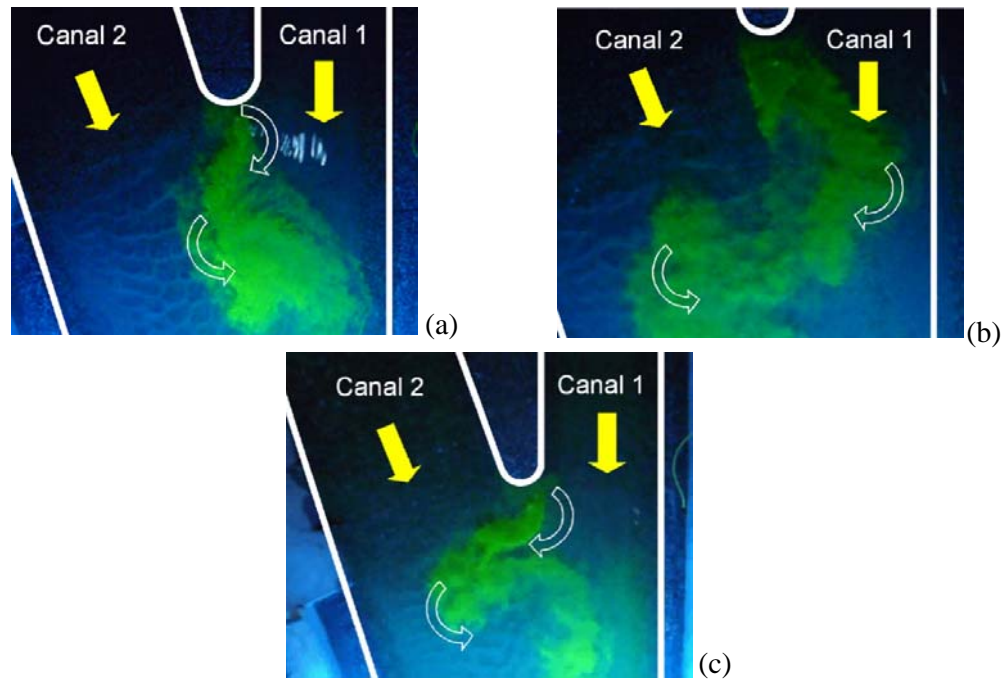


Figura 4.3: Visualización de patrones hidrodinámicos del flujo para la condición 4.1 (a), condición 4.2 (b) y condición 4.3 (c)

Las series temporales de velocidad del flujo registradas con ADV en la zona de estancamiento para las tres condiciones experimentales, muestran fluctuaciones de las componentes longitudinal y transversal de la velocidad del flujo, oscilando entre valores positivos y valores negativos (como se observa en la Figura 4.4 para la condición experimental 4.2). Ya se observó en el capítulo 2 que este comportamiento es típico de la zona de estancamiento para el modelo conceptual de una estela turbulenta (ET) detrás de un obstáculo.

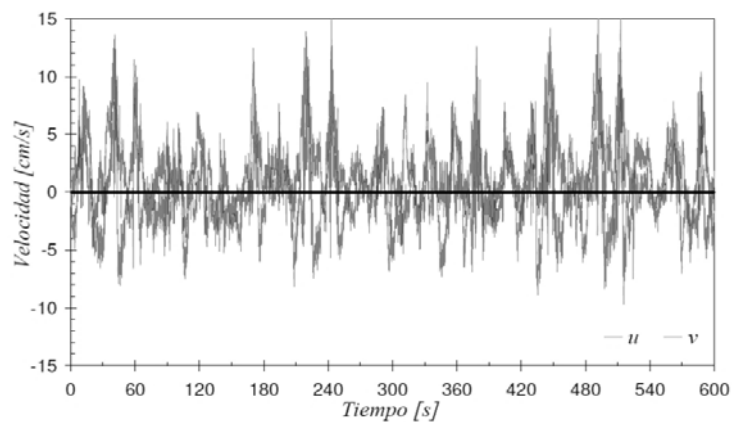


Figura 4.4: Serie temporal de las componentes longitudinal (u) y transversal (v) del flujo, registradas en la zona de estancamiento (localización 9), para la condición experimental 4.2.

La Tabla 4.2 resume los parámetros estadísticos correspondientes a las series temporales de la velocidad del flujo registradas para las tres condiciones experimentales en la zona de estancamiento (localización 9 en la Figura 4.2). Los resultados corresponden a los valores medios de las componentes longitudinal, transversal y vertical de la velocidad del flujo U , V y W , las varianzas para las tres componentes u'^2 , v'^2 y w'^2 , los esfuerzos de Reynolds $u'v'$, $v'w'$ y $u'w'$, y el valor de la energía cinética turbulenta (TKE).

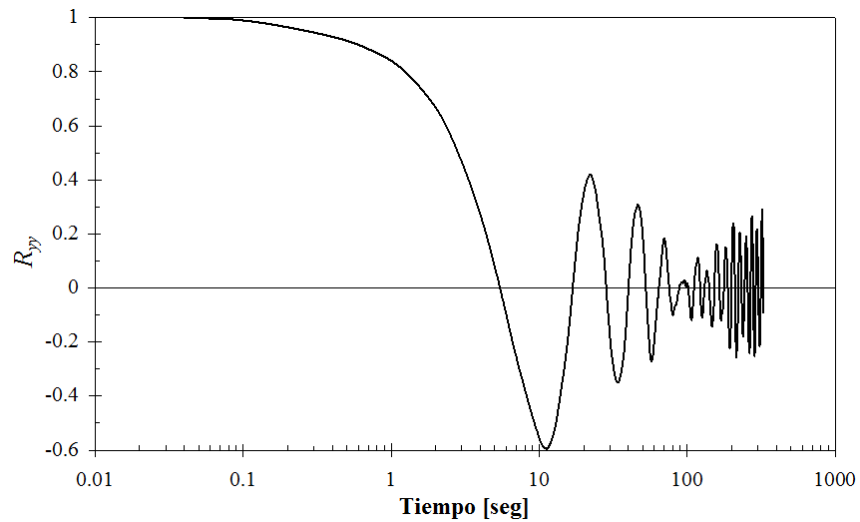
Tabla 4.2: Parámetros estadísticos de las señales de velocidad registradas en la zona de estancamiento (localización 9), para cada condición experimental.

	Q_1 [m ² /s]	Q_2 [m ² /s]	U [cm/s]	V [cm/s]	W [cm/s]	u'^2 [cm ² /s ²]	v'^2 [cm ² /s ²]	w'^2 [cm ² /s ²]	TKE [cm ² /s ²]	$u'v'$ [cm ² /s ²]	$u'w'$ [cm ² /s ²]	$v'w'$ [cm ² /s ²]
4.1	4.0	6.0	1.02	-0.61	-0.09	4.21	12.88	0.88	8.99	1.86	-0.43	0.38
4.2	5.2	8.1	0.84	0.63	-0.07	6.22	15.41	0.80	11.22	2.29	-0.25	0.22
4.3	2.3	11.3	1.43	-0.93	-0.24	6.71	22.88	1.39	15.48	2.34	-0.40	1.71

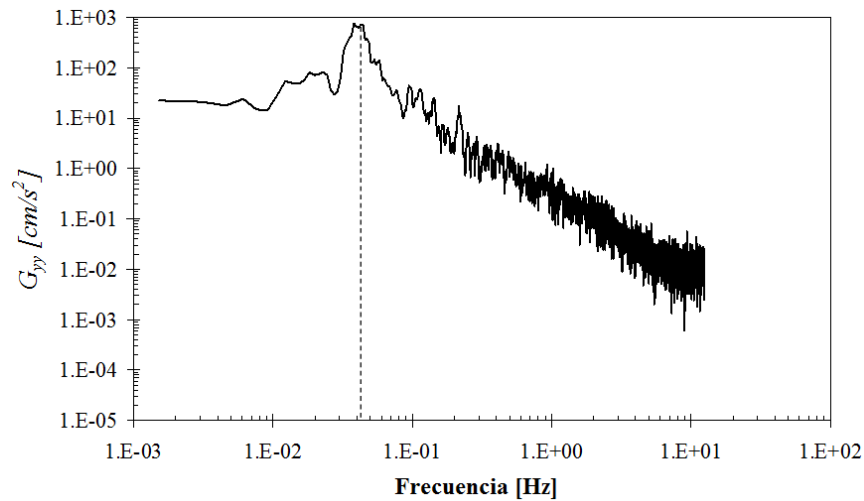
Los valores de varianza, a los que se les sustrajo la energía debido a la presencia de ruido Doppler (García et al., 2005), para la componente transversal de la velocidad son más grandes que los valores para la componente longitudinal. Esto indica que la transferencia de momento en la dirección transversal es considerable.

Por otra parte, la varianza de las señales de las tres componentes de la velocidad (y por lo tanto la energía cinética turbulenta), y los esfuerzos de Reynolds $u'v'$ aumentan a medida que caudal en el canal 2 (Q_2) aumenta. Los valores negativos para $v'w'$ coinciden con los resultados obtenidos por Nezu y Nakagawa (1993) para flujos turbulentos en canales abiertos, mostrando que los procesos turbulentos verticales están dominados por la fricción con el fondo.

La Figura 4.5(a) muestra la función de autocorrelación normalizada obtenida a partir del análisis de las series temporales de la componente transversal de la velocidad del flujo en la zona de estancamiento para la condición experimental 4.2. Se observa un comportamiento cuasi-periódico del flujo con períodos de aproximadamente 20 seg. Esta periodicidad se observa también en el análisis espectral de las señales de velocidad (ver Figura 4.5(b)), a partir de un pico de energía en los espectros para frecuencias de alrededor de 0.05 Hz.



(a)



(b)

Figura 4.5: (a) Función de autocorrelación normalizada de la componente transversal de velocidad R_{yy} registrada en la zona de estancamiento (localización 9). (b) Espectro de energía de la componente transversal de velocidad G_{yy} registrada en la zona de estancamiento (localización 9). Condición experimental 4.2.

Así, las escalas temporales características de los procesos observados, para cada condición de flujo analizada, se determinaron mediante la detección de las frecuencias correspondientes a los picos de energía observados en los espectros de las señales de velocidad. Las escalas de tiempo fueron: 23.4 seg para la condición 4.1, 22.6 seg para la condición 4.2, y 24.7 seg para la condición 4.3. No se detectó una tendencia estadísticamente significativa en la evolución de los valores de las escalas de tiempo

para las distintas condiciones experimentales analizadas, concluyendo que el período de las fluctuaciones del flujo no depende de las condiciones experimentales analizadas en este capítulo, pero sí podría estar relacionado con las variables que permanecieron constantes en este análisis, tales como la geometría de la sección.

4.4.1.3. Caracterización experimental del flujo en la zona de mezcla

Mediante la aplicación de la técnica de visualización utilizando partículas trazadoras fue posible determinar las escalas de tiempo de estos procesos hidrodinámicos presentes en el flujo. La Figura 4.6(a) y (b) muestran dos imágenes instantáneas capturadas en dos momentos diferentes para la condición experimental 4.2, en la que se determinó para una sección A-A el ancho efectivo de flujo ocupado por las partículas sembradas (definido como B_{ef}).

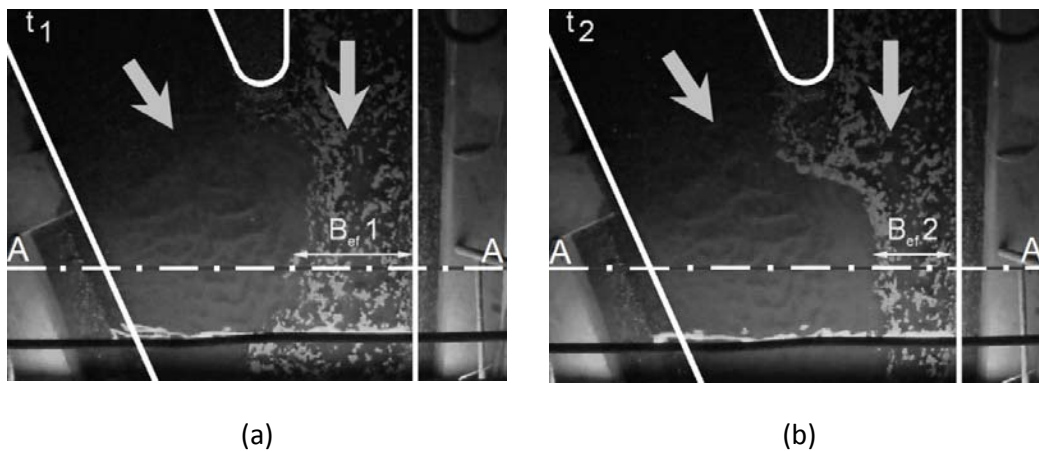


Figura 4.6: Ancho efectivo del flujo en una sección A-A para dos instantes de tiempo diferentes. Condición experimental 4.2.

El ancho efectivo B_{ef} se calculó utilizando los algoritmos de detección de partículas utilizadas para la técnica PTV, detectando la posición de la partícula más alejada de la margen izquierda. La Figura 4.7 muestra la evolución temporal de la relación ancho efectivo con respecto al ancho total B_{ef}/B , (donde B es el ancho del canal en la sección A-A) para la condición experimental 4.2. El ancho efectivo del flujo varía a través de un comportamiento cuasi-periódico, con un período similar al de la señal de la componente transversal de la velocidad del flujo registrada en la zona de

estancamiento. El período de las fluctuaciones mencionadas es de aproximadamente 22 seg.

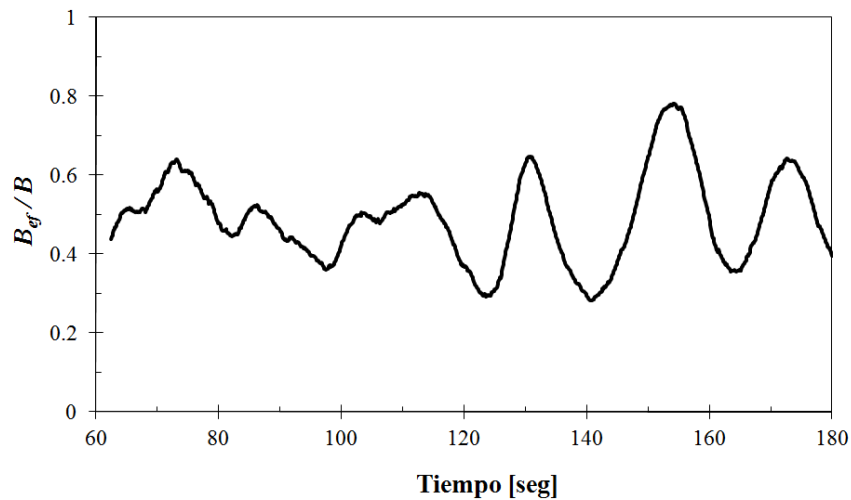
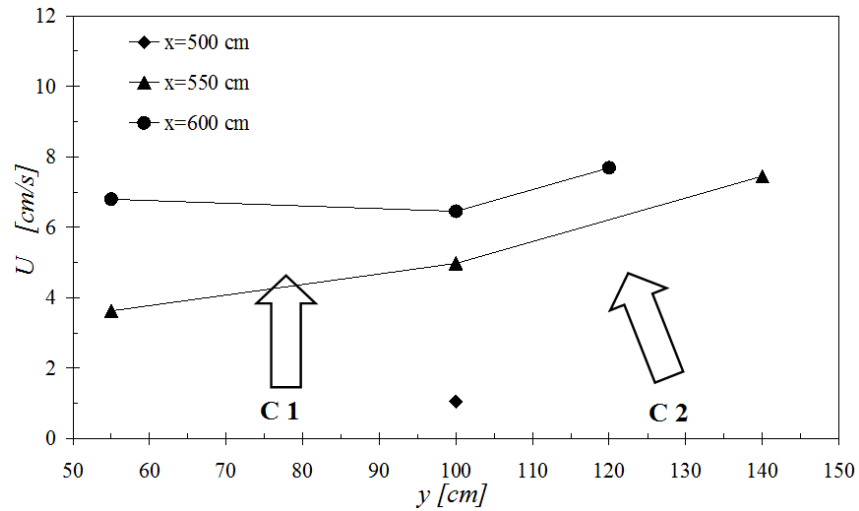


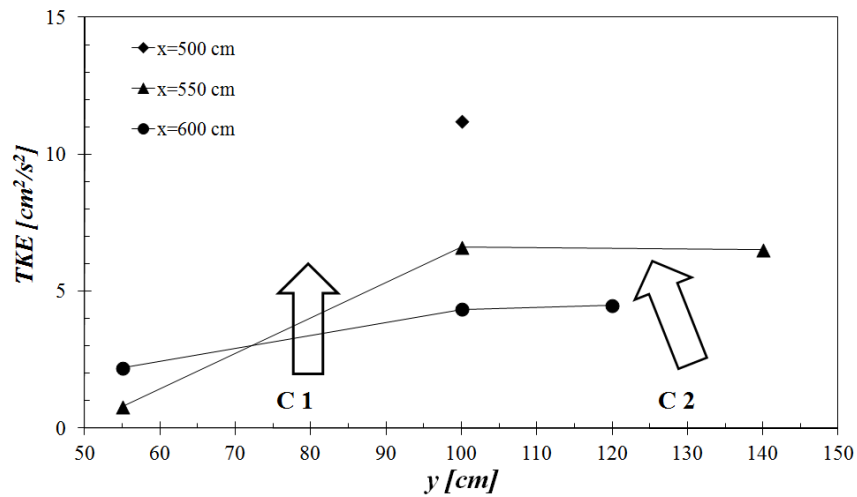
Figura 4.7: Evolución temporal de la relación B_{ef}/B en la progresiva $x=550$ cm para la condición experimental 4.1.

La Figura 4.8(a) muestra los valores medios de la velocidad longitudinal del flujo en diferentes localizaciones aguas abajo de la confluencia para la condición experimental 4.2. Para poder comparar los resultados, los valores reportados incluyen aquellos registrados en la localización de la zona de estancamiento que se ha descrito anteriormente. La figura muestra la diferencia de velocidad entre los dos flujos convergentes, y cómo la velocidad media longitudinal varía desde una condición de velocidad cero cerca de la zona de estancamiento, hasta valores mayores de 8 cm/seg aguas abajo en la zona de mezcla.

La Figura 4.8(b) muestra los valores de la energía cinética turbulenta calculados para las diferentes localizaciones. Los valores más altos de TKE se observó en la zona de estancamiento, y disminuyen a medida que se avanza hacia aguas abajo en la zona de mezcla. Para todas las condiciones del flujo analizadas, la TKE aumenta aguas abajo cerca de la margen izquierda debido a la advección hacia esa margen causada por el desprendimiento de estructuras, como se ve en la Figura 4.3(a), (b), y (c).



(a)



(b)

Figura 4.8: (a) Valores medios de la velocidad longitudinal del flujo, y (b) energía cinética turbulenta, registradas en distintas localizaciones de la zona de mezcla para la condición experimental 4.2. La progresiva $x = 500$ corresponde a la zona de estancamiento.

4.4.1.4. Caracterización experimental del flujo en la zona de aguas arriba

La Figura 4.9 muestra la serie temporal de la velocidad longitudinal del flujo registrada con ADV en la localización 1 para la condición experimental 4.2. Se registraron también con ADV señales de velocidad longitudinal en la misma localización para todas las condiciones experimentales analizadas.

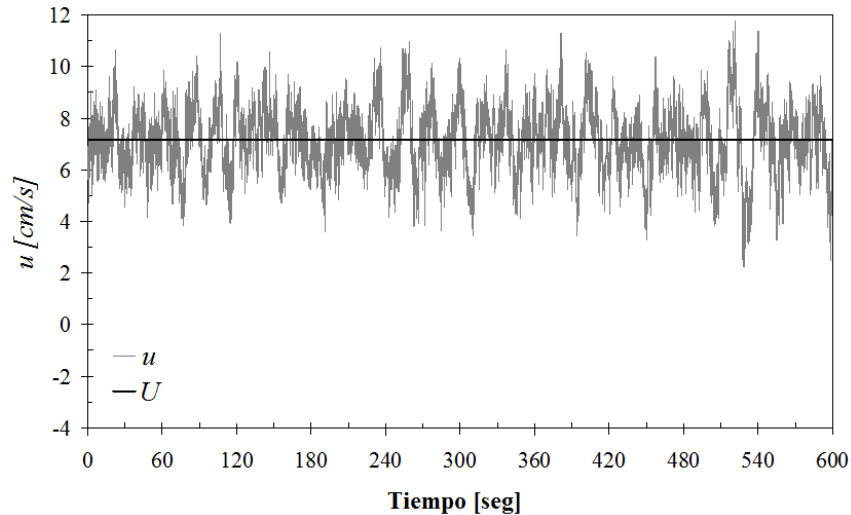


Figura 4.9: Series temporales de velocidad longitudinal registradas en el canal 1 aguas arriba de la confluencia (localización 1). Condición experimental 4.2.

En la figura se muestran las fluctuaciones observadas en las señales de velocidad registradas en el canal 1 para todas las condiciones experimentales analizadas. Se observa que estas fluctuaciones tienen dos componentes: una componente cuasi-periódica o de baja frecuencia, con velocidades máximas de aproximadamente 4 cm/seg y 10 cm/seg, y valores mínimos entre 4 cm/seg y cero (o incluso valores negativos, dependiendo de las condiciones de flujo analizadas), y una componente de alta frecuencia debido a la turbulencia del flujo generada por la fricción del fondo. La Tabla 4.3 y Tabla 4.4 resumen los parámetros estadísticos de las series de tiempo para las tres componentes de la velocidad del flujo registradas en los canales 1 y 2, respectivamente (localizaciones 1 y 5 en la Figura 4.2), para todas las condiciones experimentales.

Tabla 4.3: Parámetros estadísticos de las series temporales de las tres componentes de la velocidad del flujo registradas en el canal 1 aguas arriba de la confluencia (localización 1), para cada condición experimental analizada.

	Q_1	Q_2	U	V	W	u'^2	v'^2	w'^2	TKE	$u'v'$	$u'w'$	$v'w'$
	[m ² /s]	[m ² /s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm/s]	[cm ² /s ²]	[cm ² /s ²]	[cm ² /s ²]	[cm ² /s ²]	[cm ² /s ²]	[cm ² /s ²]	[cm ² /s ²]
4.1	4.0	6.0	5.00	0.54	0.05	1.33	0.63	0.24	1.10	0.17	-0.10	-0.004
4.2	5.2	8.1	7.19	-0.33	-0.25	1.57	0.43	0.16	1.09	0.09	-0.14	-0.020
4.3	2.3	11.3	2.14	-0.27	-0.16	2.17	0.13	0.05	1.18	-0.10	-0.07	-0.0002
4.4	0	9.3	0.31	-0.005	-0.06	1.81	0.01	0.003	0.91	-0.08	-0.04	0.001
4.5	0.6	11.6	2.72	-0.26	-0.09	2.89	0.18	0.07	1.57	-0.15	-0.14	0.002

Tabla 4.4: Parámetros estadísticos de las series temporales de las tres componentes de la velocidad del flujo registradas en el canal 2 aguas arriba de la confluencia (localización 5), para cada condición experimental analizada.

	Q_1 [m ² /s]	Q_2 [m ² /s]	U [cm/s]	V [cm/s]	W [cm/s]	u'^2 [cm ² /s ²]	v'^2 [cm ² /s ²]	w'^2 [cm ² /s ²]	TKE [cm ² /s ²]	$u'v'$ [cm ² /s ²]	$u'w'$ [cm ² /s ²]	$v'w'$ [cm ² /s ²]
4.1	4.0	6.0	6.44	2.78	-0.23	17.86	15.82	3.12	18.40	1.81	-1.56	-0.68
4.2	5.2	8.1	7.28	2.63	0.03	17.70	15.17	3.52	18.19	1.33	-1.80	-1.07
4.3	2.3	11.3	10.98	4.36	-0.33	31.94	30.79	5.30	34.01	2.57	-3.23	-1.58

Se observa que los valores medios de las componentes de velocidad en las direcciones vertical y transversal en el Canal 1 son muy bajos. Los valores del desvío estándar (calculado como la raíz cuadrada de la varianza) en la dirección longitudinal están en el mismo orden de magnitud (o en algunos casos más altos) que la velocidad longitudinal media, lo que indica la importancia relativa de las fluctuaciones. Para la condición experimental 4.4, en el que no hay flujo sobre el canal 1 y la velocidad longitudinal media fluctuó en torno a 0, los valores de la varianza en la dirección longitudinal son aún mayores que en los casos donde hay flujo sobre ese canal. Este resultado proporciona evidencia de que el proceso físico que genera las fluctuaciones de velocidad en el canal 1 no se genera por el flujo que pasa a través de este canal, sino por otros procesos en el sistema. El uso de valores de caudales en el canal 2 explica de mejor manera el comportamiento de las fluctuaciones de baja frecuencia en el canal 1 (ver Figura 4.10).

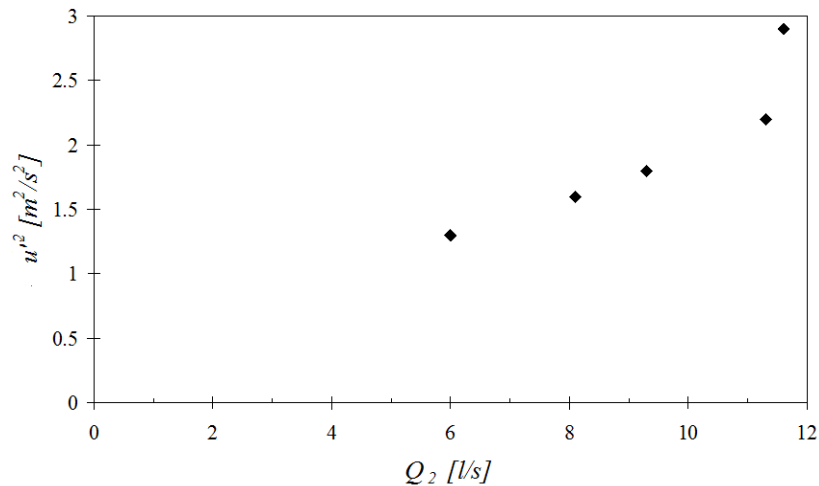


Figura 4.10: Evolución de la varianza para la componente longitudinal de la velocidad del flujo registrada en el canal 1 aguas arriba de la confluencia (localización 1) a medida que varía el caudal en el canal 2, para todas las condiciones experimentales analizadas.

Las señales de velocidad registradas aguas arriba de la confluencia del canal 2 (localización 5) para todas las condiciones experimentales analizadas, no mostraron evidencia de la existencia de fluctuaciones de baja frecuencia. Mediante la comparación de estos valores con las variables que definen las condiciones de flujo se concluye que los parámetros estadísticos de las series de velocidad de flujo registradas en el canal 2 están directamente influenciadas por las características de flujo en ese mismo canal y no por procesos presentes en la zona de estancamiento de la confluencia. La Figura 4.11(a) y Figura 4.11(b) muestran las funciones de autocorrelación normalizada y el espectro de energía, respectivamente, correspondientes a las señales de la componente transversal de la velocidad en la zona de estancamiento (localización 9) y la componente longitudinal de la velocidad registrada en el canal 1, aguas arriba de la confluencia (localización 1), para la condición experimental 4.2.

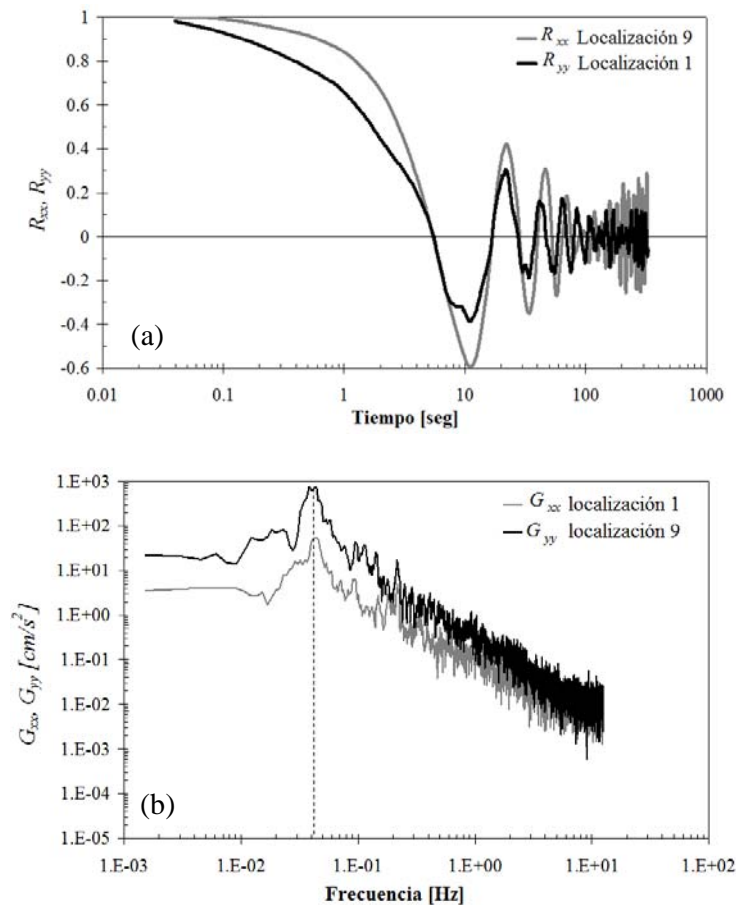


Figura 4.11: (a) Funciones de autocorrelación normalizadas y (b) espectros de energía, de las componentes de velocidad longitudinal en el canal 1 aguas arriba de la confluencia (localización 1) y transversal en la zona de estancamiento (localización 9); para la condición experimental 4.2.

Las figuras muestran una buena concordancia tanto para las funciones de autocorrelación como en los espectros de energía. Este acuerdo valida la hipótesis de que las fluctuaciones de la velocidad observadas aguas arriba de la confluencia se generan por el efecto de remanso de las estructuras coherentes 2D observadas en la zona de estancamiento.

La Figura 4.12 compara la evolución temporal del ancho efectivo B_{ef} con la serie de tiempo de la componente longitudinal de la velocidad del flujo registrada con ADV simultáneamente en la localización 1, para la condición experimental 4.1. La comparación es entre las variables normalizadas (media igual a 0 y una desviación estándar igual a 1) obtenidos a partir de la siguiente expresión:

$$Z_{B_{ef}} = \frac{B_{ef} - \overline{B_{ef}}}{\sigma_{B_{ef}}}; Z_u = \frac{u - \overline{U}}{\sigma_u} \quad (4.5)$$

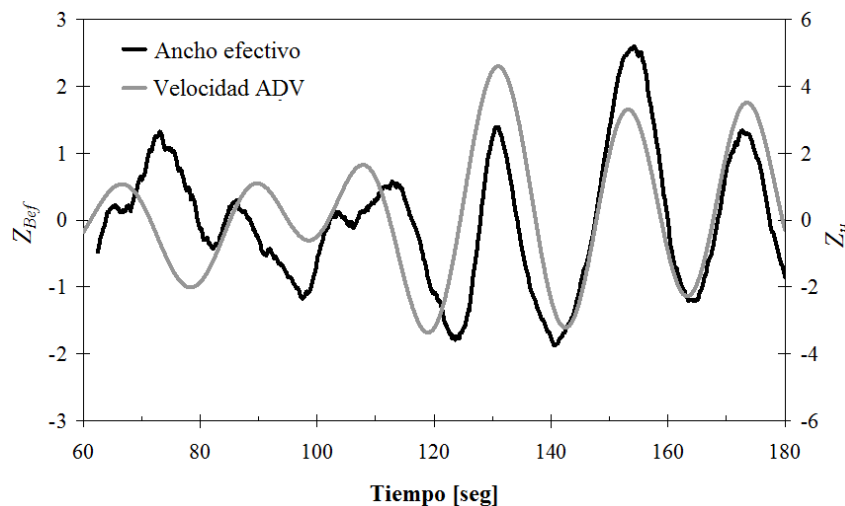
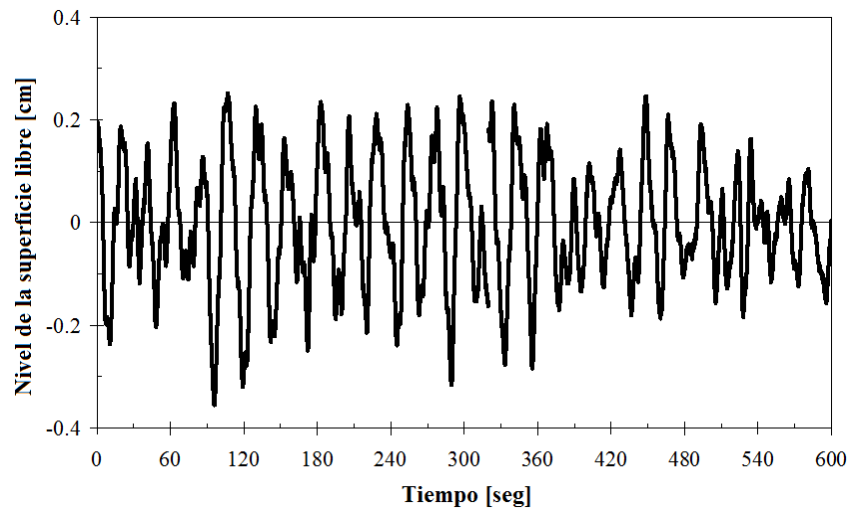


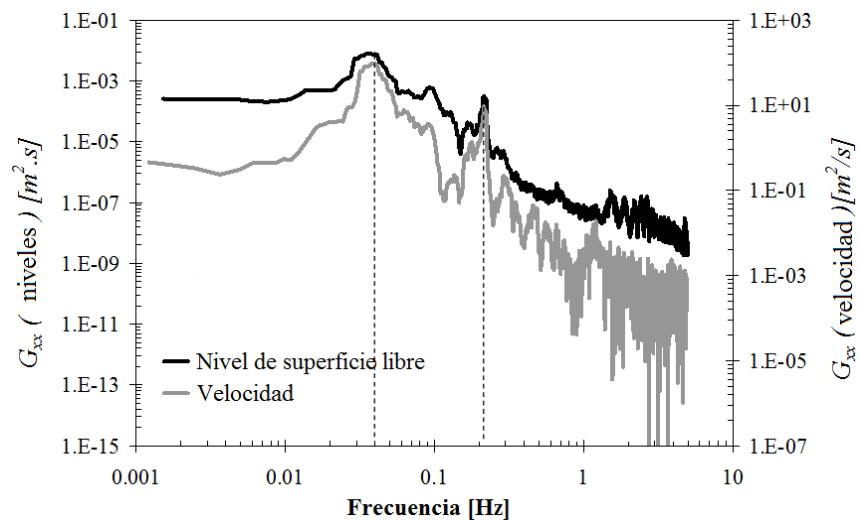
Figura 4.12: Evolución temporal del ancho efectivo normalizado $Z_{B_{ef}}$ en la progresiva $x = 250$ cm, y de la velocidad normalizada Z_u registrada aguas arriba de la confluencia sobre el canal 1 (localización 1). Condición experimental 4.1. Ambas señales se filtraron con un filtro pasa-banda con una frecuencia de corte de 0.06 Hz.

Se puede apreciar que ambas series de tiempo muestran claramente un comportamiento similar. Las fluctuaciones de baja frecuencia de la velocidad del flujo descritas anteriormente, generan variaciones de la elevación de la superficie libre del flujo (teniendo en cuenta que el caudal es constante). Las fluctuaciones del nivel de la superficie libre del flujo se registraron en el canal de salida de la central hidroeléctrica

(Canal 1) para las condiciones experimentales 4 y 5. La Figura 4.13(a) muestra los resultados experimentales para la condición 4. El espectro de energía de la Figura 4.13(b) muestra que la fluctuación del nivel de la superficie libre del flujo tiene un comportamiento cuasi-periódico con un periodo similar a las fluctuaciones de las señales de velocidad registradas simultáneamente con ADV en la localización 1. La máxima diferencia de niveles registrada en las condiciones experimentales 4 y 5 fue de 10 mm.



(a)



(b)

Figura 4.13: (a) Serie temporal de los niveles de superficie libre del flujo registrados en el canal 1 a la salida de la central hidroeléctrica. (b) Espectros de energía de los niveles de superficie libre del flujo registrados en el canal 1 a la salida de la central hidroeléctrica y de la señal de velocidad longitudinal del flujo G_{xx} registrada en la localización 1.

La presencia de un segundo pico en el espectro de energía de ambas señales, detectado para las frecuencias del orden de 0.2 Hz, se explica a partir de la teoría de ondas de superficie o "seiches" generadas en el canal 1 por la variación del ancho efectivo del flujo causado por la presencia de inestabilidades de aguas someras. Hay varios modos de seiching, que corresponden a la respuesta de frecuencia natural de la masa de agua. Se estimó período de seiching (T_{se}), sobre la base de la teoría lineal de ondas de agua, mediante la búsqueda de la longitud de onda correcta en el cuerpo de agua. De acuerdo con la teoría de aguas poco profundas, el período seiching está dado por dos veces la longitud de la piscina L_c (igual a 5 m para la instalación experimental utilizada en este estudio) dividido por el número modal n , y la velocidad de la onda superficial (\sqrt{gH}) (Dean y Dalrymple, 1991).

$$T_{se} = \frac{2L_c}{n\sqrt{gH}} \quad (4.6)$$

Por las características geométricas y del flujo en el canal 1, utilizando el modo 2, el período seiching resultante es 5 seg (0.2 Hz).

4.5. Conclusiones del capítulo

Se presentó un estudio experimental en laboratorio para analizar la hidrodinámica en una confluencia específica de característica compleja (confluencia de canales de restitución del proyecto Aprovechamiento Múltiple Presa Los Monos) mediante el uso de técnicas experimentales con elevada resolución espacial y temporal, y para diferentes condiciones de flujo, representadas por números de Reynolds de hasta 12221, y con relación de momento entre los flujos convergentes que varían entre 1.6 y 18.3. En todos los casos analizados el estudio experimental se realizó con un coeficiente de fricción constante $c_f = 0.0026$ en relación con el tamaño del sedimento.

Mediante técnicas de visualización se identificaron, para todas las condiciones experimentales analizadas, patrones hidrodinámicos del tipo calle de vórtices (CV) en la zona de estancamiento aguas abajo del vértice de la confluencia y zona de mezcla.

Se registraron con ADV series de tiempo la velocidad de flujo 3D en la zona de estancamiento, permitiendo caracterizar la evolución temporal de estos patrones hidrodinámicos que generan fluctuaciones en las componentes longitudinal y transversal de la velocidad en torno a un valor medio cercano a cero.

Los períodos de las fluctuaciones de velocidad registradas en la zona de estancamiento son similares a los períodos de velocidad de flujo y a la elevación de la superficie del agua registrada aguas arriba de la confluencia en el canal con menor momento. La comparación entre la escala de tiempo de la turbulencia debido a la fricción del fondo ($T_f \approx 2$ seg) con la escala de tiempo debido a los desprendimientos de estructuras 2D (del orden de 20 seg), dio como resultado que el último es un orden de magnitud mayor que la T_f .

Las fluctuaciones de nivel de la superficie del flujo observadas a la salida de la central hidroeléctrica en el modelo físico (con una escala de tiempo de aproximadamente 2.4 minutos y un rango de las fluctuaciones de la superficie de agua de 50 cm esperadas en prototipo) podrían afectar el funcionamiento óptimo de la central. Para evitar la presencia de estos procesos hidrodinámicos, se recomienda un nuevo diseño de la geometría de la confluencia, modificando los parámetros relacionados con el parámetro de estabilidad (c_f , D y H) para evitar la evolución de las estructuras coherentes bidimensionales (similares al tipo calle de vórtices). Si no es posible realizar estas modificaciones, se recomienda restricciones en la operación manual de la central hidroeléctrica cuando el flujo de canal del vertedero posea un momento dominante en comparación con el flujo en el canal de la central.

Además del objetivo tecnológico del proyecto que motivó la realización de este estudio, los resultados presentados en este capítulo proporcionan una contribución a la comprensión de la hidrodinámica del flujo en confluencias (motivación científica) y brindan un conjunto útil de datos experimentales necesarios para validar modelos numéricos utilizados para la caracterización de flujo en confluencias con diferentes condiciones geométricas.

Capítulo 5. Evaluación en campo de los efectos de las condiciones del flujo sobre la hidrodinámica de una confluencia fluvial.

5.1. Introducción

La segunda motivación tecnológica que dio origen a uno de los objetivos específicos de esta tesis es llevar a cabo una caracterización de la hidrodinámica en una confluencia fluvial de mediana escala, refiriéndose en este caso a ríos en los que el caudal que escurre superficialmente supera los $10 \text{ m}^3/\text{seg}$, y con profundidades que superan 1 metro; a diferencia de los estudios en campo previos recopilados como antecedentes en los cuales los caudales y las profundidades eran al menos un orden de magnitud menos.

Trabajos previos sugieren que las estructuras turbulentas del flujo en ríos de mayor escala están directamente influenciadas por efectos topográficos inducidos por formas de fondo como por ejemplo la formación de barras en el fondo del río, rugosidad de gran escala, y por irregularidades en las márgenes del río (Hardy et al., 2009, 2010; Rhoads and Sukhodolov, 2001). Por lo tanto muchas confluencias presentan características hidrodinámicas propias del lugar debido a condiciones topográficas locales que no permiten generalizar los resultados que se obtengan. Esto hace necesario seleccionar una confluencia que no presente irregularidades significativas (formas de fondo, erosiones locales), para poder abordar a resultados en los que influyan sólo las variables hidrodinámicas, y no las morfológicas.

Con respecto a las condiciones hidrológicas de los cursos, es importante tener la posibilidad de caracterizar distintos escenarios, refiriéndose principalmente a la relación de momentos entre los tributarios.

Por último, existen modernas técnicas de medición en ríos de gran escala como por ejemplo el perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP) y la velocimetría por

seguimiento de partículas, o PTV por sus siglas en inglés (Patalano, 2013) pero sólo se utilizan para determinar caudales y no para caracterizar la hidrodinámica.

5.2. Descripción de la zona de estudio

La confluencia que fue objeto de estudio del presente trabajo es la formada por los ríos Tercero (Ctalamochita) y Saladillo (Figura 5.1). Está localizada en la Provincia de Córdoba, en la región sureste ($32^{\circ}54'55''\text{Sur}$ - $62^{\circ}19'29''\text{Oeste}$), perteneciente a la cuenca del Río Carcarañá (marcada en color azul en el mapa del país). A continuación se realiza una breve descripción de las cuencas de aporte.



Figura 5.1: Zona de estudio

5.2.1. Subcuenca del Río Tercero (Ctalamochita)

La subcuenca del río Tercero (Ctalamochita) tiene una superficie aproximada de 3.300 Km^2 y un módulo de $27 \text{ m}^3/\text{s}$. Tiene su origen en las sierras de Comechingones, y

en su cuenca alta se encuentra regulado por una cadena de reservorios artificiales. Desde aguas arriba se encuentra primero el “Complejo de Río Grande” formado por el Embalse Cerro Pelado y Contra-embalse Arroyo Corto; y luego el sistema Río Tercero formado por el Embalse N°1 Río Tercero, Embalse N°2 Ingeniero Cassaffousth, Embalse N°3 Benjamín Reolin y, finalmente, Embalse Compensador de Piedras Moras.

Estos sistemas cumplen en conjunto con una serie de condicionantes de funcionamiento:

- Suministro de agua para riego y agua potable.
- Cota mínima que requiere el embalse de Río Tercero, debido a la presencia de la Central Nuclear.
- Normas de operación del Complejo Río Grande.

En el Embalse Piedras Moras, los caudales erogados, satisfacen los siguientes usos:

- Caudales ecológicos
- Agua potable
- Riego

La Cuenca Baja está emplazada en la zona pampeana de la provincia de Córdoba. En partes de su trazado se tienen una gran cantidad de meandros, alcanzando en el tramo de Río Tercero-Villa María, el máximo ancho. En gran parte de la cuenca, se pueden detectar suelos aptos para la agricultura y ganadería. Además, la influencia de las industrias (de la rama de la química, petroquímica, y lechera) en el estudio de la cuenca es de suma importancia en la calidad de agua del río Tercero (Ctalamochita), ya que muchas de ellas inciden como fuentes puntuales y/o difusas de contaminación del río.

5.2.2. Subcuenca del Río Saladillo

La subcuenca del río Saladillo es la segunda más importante dentro de la cuenca del Carcarañá. Posee una superficie aproximada de 875 Km² y tiene su nacimiento, al igual que el río Tercero, en la sierra de Comechingones.

El río Cuarto (Chocancharava), al atravesar la ciudad homónima, sufre cambios importantes al recibir aportes de diferente naturaleza (efluentes cloacales, domésticos y basurales, como así también los provenientes de zonas de actividad agrícola) y por efecto de la erosión (Rodríguez et al, 2002).

Al salir de las sierras fluye por la llanura de la Pampa Húmeda, en dirección sureste hasta llegar a una zona de hundimiento tectónico en la que forma los humedales llamados Bañados del Saladillo o Bañados de Loboy, allí su curso cambia hacia la dirección noreste, tras salir de los mencionados bañados el río recibe el nombre de Saladillo. Se estima que históricamente los Bañados del Río Saladillo poseían más de 40 lagunas con una superficie cubierta por agua de aproximadamente de 30.000 ha. En general estas lagunas son poco profundas y están caracterizadas por una gran variabilidad en concentración y tipo de sales (desde 2 a 45 gr/l). (López, 2012).

Aguas abajo de los bañados, el río Cuarto (Chocancharava) recibe el nombre de Saladillo para, finalmente unirse con el río Tercero (Ctalamochita) en la confluencia en estudio.

El régimen de caudales presenta un periodo de estiaje de mayo a septiembre y de aguas altas de octubre a abril, con ciclos hidrológicos muy variables, ya que posee un caudal promedio en estiaje de $7,2 \text{ m}^3/\text{s}$, pasando a tener un caudal de $70 \text{ m}^3/\text{s}$ durante las crecidas. A diferencia del río Tercero, no se han construido embalses en su recorrido, motivo por el cual presenta crecientes muy importantes (Rodríguez et al, 2002).

La diferencia en los regímenes de escurrimientos de los dos tributarios a la confluencia en estudio (ríos Tercero y Cuarto) genera que en la confluencia estén presentes distintas relaciones de momento y velocidades (ver ecuaciones 3.7 y 3.8) a lo largo del año variando incluso el tributario dominante. En épocas de estiaje el caudal que escurre por el río Tercero es mayor que por el río Saladillo, mientras que en épocas de crecidas sobre la subcuenca del río Cuarto se invierten las relaciones, pasando a ser el Saladillo el tributario dominante. Además, la diferencia de salinidad entre los dos cursos confluentes, permite analizar, utilizando este parámetro como trazador, el estudio de patrones de mezcla en la confluencia.

5.3. Técnicas experimentales utilizadas

Como se mencionó en la motivación científica, las variables que gobiernan la hidrodinámica en las confluencias y que interesan ser medidas se dividen en variables del flujo (caudales, velocidades, relación de momentos), variables geométricas (ángulo de la confluencia, concordancia de los tributarios), y variables del fluido (temperatura, salinidad).

Para realizar la medición de las variables del flujo, además de la batimetría de la zona de estudio para determinar la concordancia de los tributarios, se utilizó un perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP por sus siglas en inglés). Este instrumento se emplea en todo el mundo para medir el flujo en cuerpos de agua tales como ríos, canales y estuarios (Obergh et al., 2005; Obergh y Mueller, 2007) contribuyendo a una mejor caracterización de la dinámica fluvial y de los procesos hidrodinámicos asociados. El instrumento utilizado en este trabajo es un ADCP River Surveyor S5 (ver Figura 5.2), fabricado por la compañía Sontek/YSI, y pertenece al Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA-UNC).



Figura 5.2: ADCP River Surveyor S5®. Fuente: www.sontek.com/riversurveyor-s5-m9.php

Además se implementó la técnica de velocimetría por seguimiento de partículas (PTV) para obtener campos de velocidad en la zona de estancamiento y líneas de trayectoria en las capas de corte. PTV es una técnica no intrusiva basada en análisis de imágenes utilizada para determinar la velocidad asociada a las partículas trazadoras individuales en los flujos laminares y turbulentos. El método funciona en un marco de referencia lagrangiano, permitiendo la determinación de la velocidad asociada a trayectorias de partículas individuales. Más información sobre la técnica PTV puede obtenerse en Patalano et. al, 2013.

Para realizar la medición de las variables del fluido se utilizó una sonda multiparamétrica Horiba U-10[®]. Este instrumento mide 6 variables: pH, temperatura, oxígeno disuelto, conductividad, turbidez y salinidad. La variable de interés en este caso es la conductividad, y el rango de medición del instrumento utilizado es de 0 a 100 mS/cm. Además se empleó una sonda CTD Castaway[®], el cual mide perfiles de conductividad y temperatura del agua. Ambas sondas multiparamétricas se muestran en la Figura 5.3.



Sonda multiparamétrica Horiba U-10[®]

[www.http://horiba.com](http://horiba.com)

Sonda CTD Castaway[®]

[www.http://ysi.com/castaway](http://ysi.com/castaway)

Figura 5.3: Sondas multiparamétricas empleadas.

Además, para una mejor comprensión de los procesos hidrodinámicos que ocurren en la zona de estancamiento y en la interfase de mezcla, se implementó una técnica de visualización del flujo en el campo cercano a la zona de estancamiento utilizando una cámara digital convencional y empleando como trazador fluoresceína.

5.4. Metodología

Se realizaron tres campañas de mediciones en campo en el lugar de estudio, en diferentes épocas del año para lograr caracterizar los procesos que ocurren en la confluencia en distintas condiciones hidrológicas. La primera campaña se realizó el 17/12/2012, la segunda campaña fue el 14/05/2013 y la última el 13/08/2013.

Para cuantificar los caudales de aporte de cada uno de los tributarios como así también los principales parámetros hidráulicos en la aproximación a la confluencia se realizaron cuatro cruces (o transectas) siguiendo la metodología propuesta por Tarrab (2013) en las dos secciones ubicadas aguas arriba de la confluencia (sección “T” en el río Tercero y sección “S” en el río Saladillo mostradas en la Figura 5.4). Luego, se calcularon los parámetros hidráulicos de cada sección (caudal, área, velocidad media en la sección, etc.) como el promedio de los valores obtenidos en las cada transecta. La misma metodología se realizó para cinco secciones ubicadas aguas abajo de la confluencia en la zona de mezcla (Ver Figura 5.4).

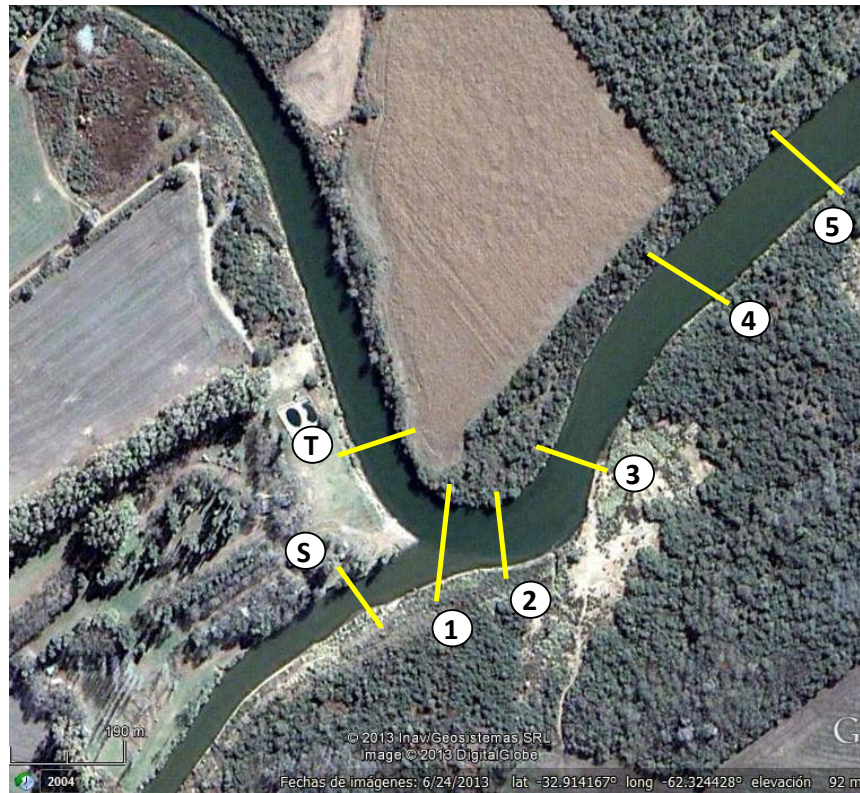


Figura 5.4: Localización de las secciones de medición de caudal y parámetros hidráulicos con ADCP.

Para la determinación experimental de la batimetría en la zona de estudio se realizó un registro continuo de valores de profundidad a lo largo de una trayectoria zigzagueante que abarcó gran parte del área de interés, incluyendo las zonas aguas arriba y aguas abajo de la confluencia (línea amarilla mostrada en la Figura 5.5). Luego, los valores de profundidad del flujo registrados se interpolaron en una grilla que abarca la zona de estudio. Durante la adquisición de datos de profundidad, el instrumento registró además valores de las tres componentes de velocidad del flujo, que se emplearon para obtener un campo de la magnitud de la velocidad en la zona de estudio.

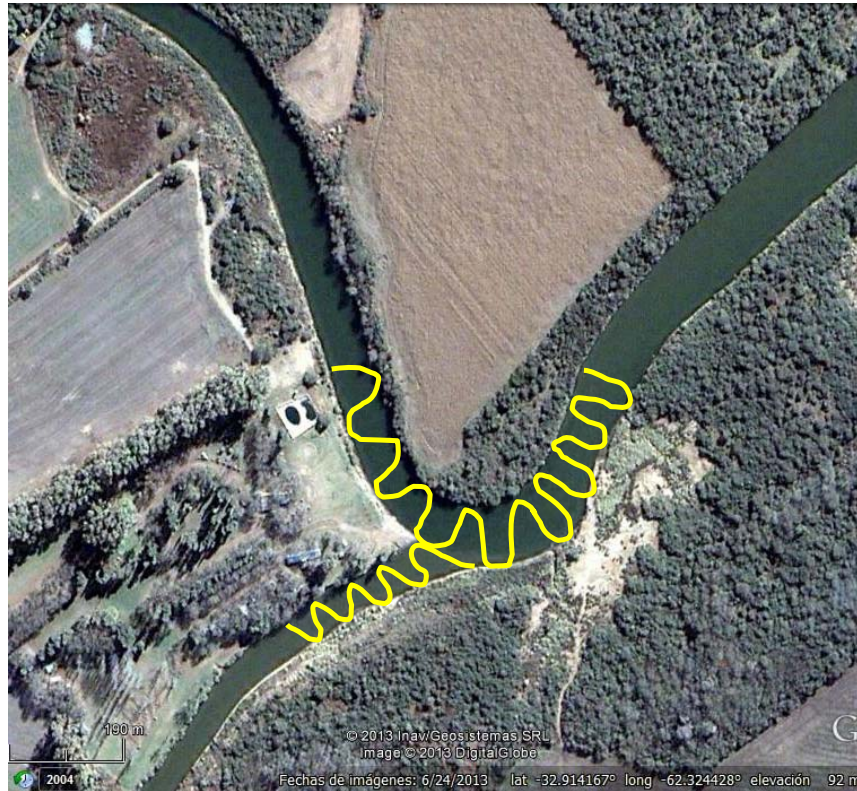


Figura 5.5: Trayectoria de la embarcación para relevamiento batimétrico de la zona en estudio con ADCP.

Para determinar la pendiente de la superficie libre en tramos de los flujos convergentes (Ríos Tercero y Saladillo) y en un tramo aguas abajo de la confluencia (Río Carcarañá) se realizaron perfiles longitudinales en la línea central de los cursos de agua (ver líneas continuas roja y verde en la Figura 5.6) con una embarcación en la cual se encuentra instalado un sistema de posicionamiento global en forma diferencial (DGPS) con precisiones en la ubicación horizontal de ± 2 cm y en la vertical del orden de 1mm a una frecuencia de registro de aproximadamente 1 Hz. El sistema DGPS se referenció a la estación base (sistema RTK) ubicada en la costa.

Perfiles verticales de temperatura y conductividad eléctrica (corregida por temperatura) del agua, se midieron en distintos puntos sobre las márgenes y al centro de las secciones aguas arriba de la confluencia en cada tributario y en las 5 secciones aguas localizadas abajo de la confluencia (Figura 5.4) con la sonda YSI/Castaway CTD y con la sonda multiparamétrica Horiba U-10 (más información en <http://www.ysi.com/productsdetail.php?CastAway-CTD-49> y http://www.globalw.com/downloads/WQ/U_10.pdf)



Figura 5.6: Trayectorias longitudinales en la línea central de los ríos donde se midió la elevación de la superficie libre. Verde: Río Saladillo, Rojo: Río Tercero.

Para la visualización del flujo en el campo cercano a la zona de estancamiento se grabó una película de video de una duración aproximada de 2 minutos, sembrando el flujo con partículas trazadoras desde la zona de aguas arriba. Se utilizaron naranjas por ser biodegradables, de buen contraste con el flujo y tamaño relativamente uniforme. Luego, con la ayuda de algoritmos de detección utilizados para la técnica de velocimetría por seguimiento de partículas (Patalano et al., 2013) se obtuvieron a partir de los videos resultados de trayectorias (líneas de corriente) y campos de velocidad superficial. Otro trazador empleado fue la fluoresceína, agregada desde aguas arriba en cada tributario y también inyectada en la propia zona de estancamiento.

Para medir las variables del flujo con la sonda multiparamétrica, las mediciones se realizaron aguas arriba de la confluencia en una localización de cada tributario, y aguas abajo de la confluencia en diferentes localizaciones sobre las márgenes y al centro. En todos los casos para la determinación del valor de los parámetros, la sonda se sumergió a una profundidad de 1 metro.

5.5. Resultados

5.5.1. Parámetros hidráulicos del flujo de aproximación

En la Figura 5.7 se observan las trayectorias de la plataforma móvil con el ADCP a lo largo de las transectas realizadas en los dos tributarios para obtener los parámetros hidráulicos del flujo aguas arriba de la confluencia.



Figura 5.7: Transectas en los tributarios para determinar los parámetros hidráulicos aguas arriba.

En la Tabla 5.1 se resumen los valores de los principales parámetros hidráulicos obtenidos de la medición en las secciones de los ríos Saladillo, Tercero y Carcarañá, para las tres campañas de medición realizadas: La condición 5.1 corresponde a la campaña del día 17/12/2012, la condición 5.2 a la segunda campaña del día 14/05/2013 y la condición 5.3 a la última campaña del día 13/08/2013. En la Figura 5.8, Figura 5.9 y Figura 5.10 se observan las secciones transversales y los correspondientes campos de magnitud de la velocidad del flujo relevados en cada uno de los tributarios, durante cada campaña de medición.

Tabla 5.1: Parámetros hidráulicos medidos con ADCP en los flujos tributarios durante cada campaña de medición.

Parámetro	Unidad	Tributario	Condición	Condición	Condición
			5.1	5.2	5.3
Caudal (Q)	[m ³ /seg]	Tercero	43.7	26.9	19.9
		Saladillo	90.6	17.7	10.5
Ancho (B)	[m]	Tercero	44	40	40
		Saladillo	35	34	33
Área (A)	[m ²]	Tercero	91	47	38
		Saladillo	89	52	42
Prof. media ($H=A/B$)	[m]	Tercero	2.1	1.2	0.9
		Saladillo	2.6	1.6	1.3
Velocidad media (U)	[m/s]	Tercero	0.48	0.57	0.52
		Saladillo	1.01	0.34	0.25
$Re = U \cdot H/\nu$	Adim	Tercero	1.0×10^6	6.8×10^5	4.7×10^5
		Saladillo	2.6×10^6	5.4×10^5	3.3×10^5
$Fr = U/(g \cdot H)^{0.5}$	Adim	Tercero	0.11	0.17	0.18
		Saladillo	0.20	0.09	0.07
Dimensión del obstáculo (D)	[m]		16	16	16
Velocidad media de los tributarios $U_m = \frac{U_{Ter} + U_{Sal}}{2}$	[m/s]		0.75	0.46	0.39
Relación de momentos $M_R = \frac{U_{Ter} \cdot Q_{Ter}}{U_{Sal} \cdot Q_{Sal}}$	Adim		0.2	2.5	3.9

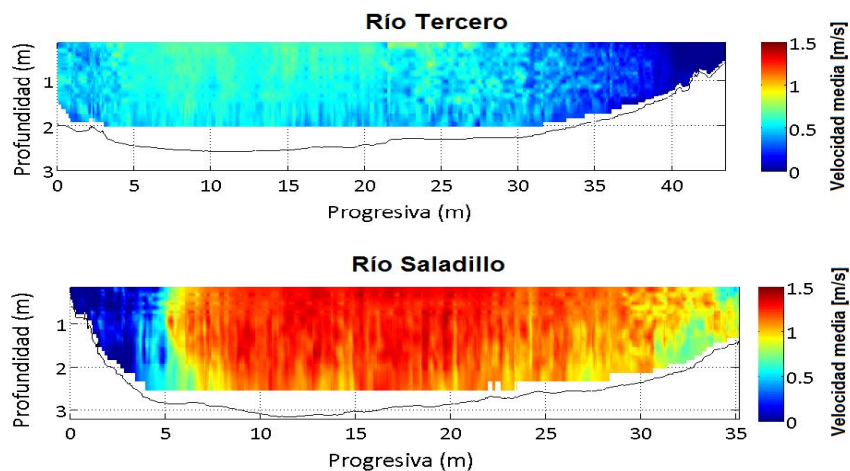


Figura 5.8: Secciones transversales y los correspondientes campos de magnitud de la velocidad del flujo relevados en cada uno de los tributarios. Condición experimental 5.1, campaña del día 17/12/2012.

Progresiva 0m corresponde a margen izquierda en cada uno de los tributarios.

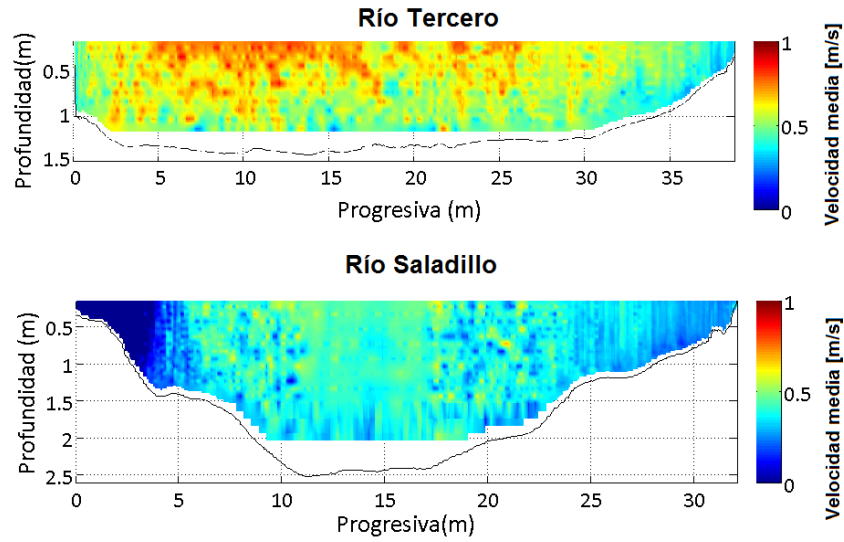


Figura 5.9: Secciones transversales y los correspondientes campos de magnitud de la velocidad del flujo relevados en cada uno de los tributarios. Condición experimental 5.2, campaña del día 14/05/2013.

Progresiva 0m corresponde a margen izquierda en cada uno de los tributarios.

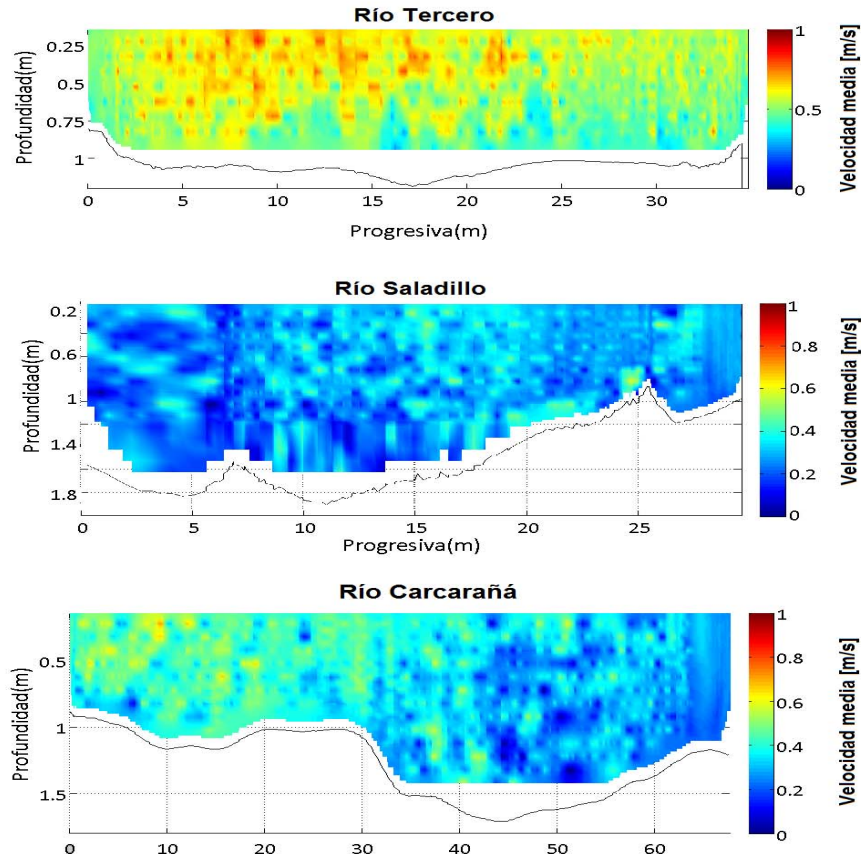


Figura 5.10: Secciones transversales y los correspondientes campos de magnitud de la velocidad del flujo relevados en cada uno de los tributarios. Condición experimental 5.3, campaña del día 13/08/2013.

Progresiva 0m corresponde a margen izquierda en cada uno de los tributarios.

En la primera condición hidrológica, se observa que el tributario dominante es el Río Saladillo con un caudal de $90.6 \text{ m}^3/\text{seg}$ (más del doble que el Río Tercero). Esta diferencia también se aprecia en las velocidades medias registradas en cada sección, donde nuevamente la velocidad media del Río Saladillo duplica a la velocidad media del Río Tercero. En el valor del número de Reynolds y número de Froude también se observa que el Río Saladillo es el tributario dominante en la primera condición hidrológica, siendo la relación de momentos de 0.2 (el momento del Río Saladillo es igual a 5 veces mayor que el momento del río Tercero).

La tercera condición hidrológica corresponde a un caso totalmente opuesto a la primera condición. En este caso el tributario dominante es el Río Tercero quien duplica el caudal del Río Saladillo, y lo mismo ocurre con las velocidades medias registradas en cada sección. En esta condición hidrológica el momento del Río Tercero es aproximadamente 4 veces mayor que el momento del Río Saladillo.

La segunda condición hidrológica es un caso intermedio, siendo el Río Tercero el tributario dominante con una relación de momentos de 2.5 con respecto al Río Saladillo.

En los campos de magnitud de la velocidad del flujo se distinguen en cada sección los núcleos de máximas velocidades. En el río Saladillo las máximas velocidades se registraron al centro de la sección transversal, mientras que en el río Tercero están sobre la margen izquierda. Esta distribución y magnitud de las velocidades en los tributarios condiciona la ubicación de la capa de corte, que será determinada a partir de la visualización del flujo.

5.5.2. Parámetros geométricos de la confluencia

En la Figura 5.11 se muestra la batimetría de la zona de estudio obtenida a partir de la interpolación de datos de profundidad del flujo registrados con ADCP siguiendo la

trayectoria de embarcación indicada en la Figura 5.5 Figura, para la primera condición hidrológica de acuerdo a la Tabla 5.1.

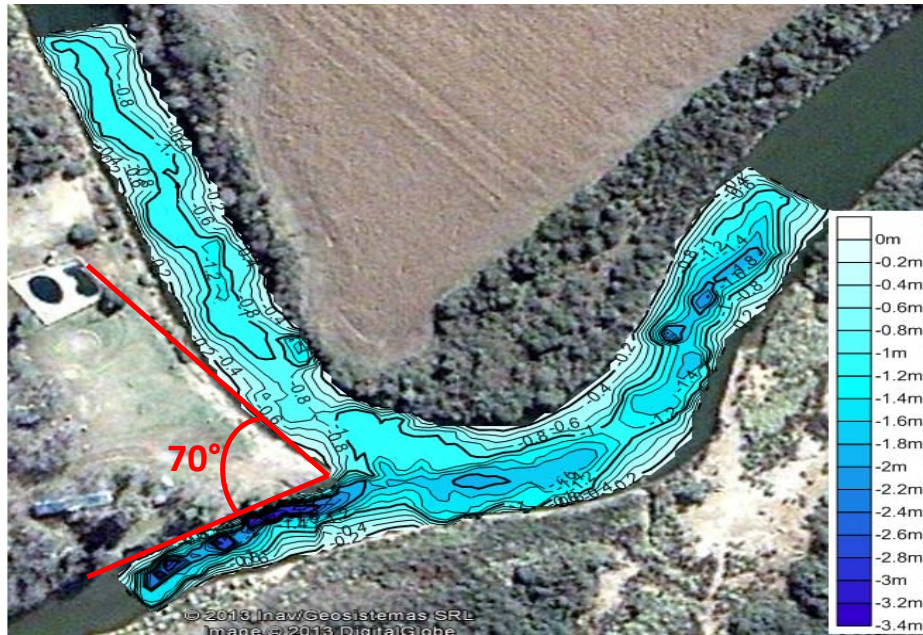


Figura 5.11: Batimetría de la zona en estudio para la tercera condición hidrológica.

La batimetría de la zona de estudio muestra que para ambos tributarios el fondo del cauce no presenta irregularidades de gran importancia en su morfología. Las margen izquierda del Río Tercero y margen derecha del Río Saladillo presentan barrancas, y el resto de las márgenes son en pendientes pronunciadas, esto se puede apreciar mediante la escasa variación que presenta el ancho de los tributarios (entre 40 y 44 metros para el Río Tercero, y entre 33 y 35 metros para el Río Saladillo) aun frente grandes variaciones de las condiciones hidrológicas.

La batimetría y parámetros geométricos resultantes, implican que, además de ser un río de mayores escalas a las analizadas en estudios previos, existe concordancia entre los flujos confluentes sin la presencia de discontinuidades significativas; por lo tanto los procesos hidrodinámicos que se observen no estarán influenciados por las irregularidades del fondo de los cauces. Otro parámetro geométrico que se determinó mediante la ayuda de imágenes satelitales fue el ángulo de la confluencia, que para este caso en estudio es igual a 70°.

5.5.3. Pendiente de la superficie libre

La Figura 5.12 muestra la evolución de los valores de elevación de la superficie libre (y su pendiente asociada) en la línea central de los flujos de los tributarios (Ríos Tercero y Saladillo) y en un tramo aguas abajo de la confluencia (Río Carcarañá) en las trayectorias longitudinales indicadas en la Figura 5.6 para la condición experimental 5.2. Como consecuencia de la relación de momentos de los tributarios (ver Tabla 5.1) se genera una curva de remanso desde la localización de la capa de corte hacia aguas arriba sobre el tributario de menor momento, en este caso (segunda condición hidrológica) sobre el Río Saladillo.

Sobre el tributario de mayor momento (Río Tercero en este caso) se puede observar que la pendiente de la superficie libre del mismo tiene un valor de 0.18 ‰ ($r^2=0.96$), y se mantiene constante hacia aguas abajo de la confluencia. Este efecto de la curva de remanso se puede apreciar también en los bajos valores de velocidades medias, número de Froude y Reynolds registrados en el Río Saladillo (tributario de menor momento).

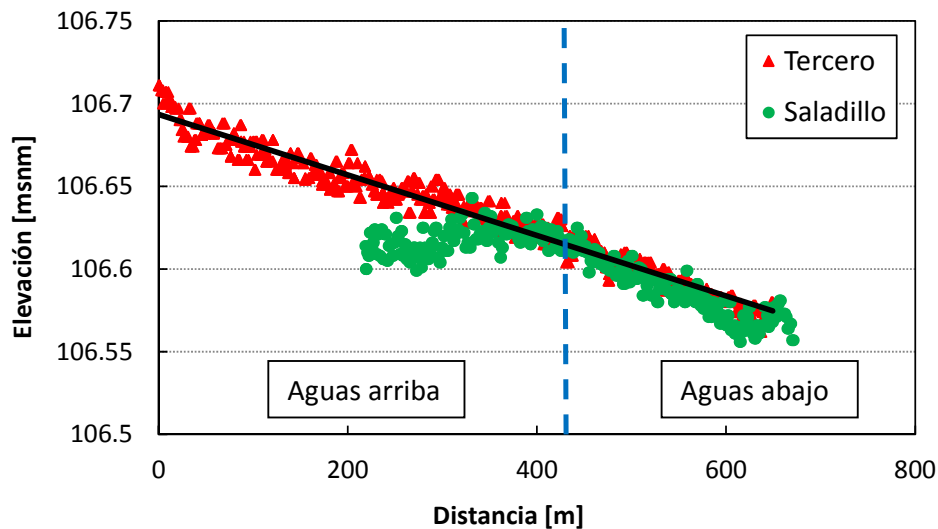


Figura 5.12: Evolución de los valores de elevación de la superficie libre (y su pendiente asociada) en la línea central de los tributarios y en un tramo aguas abajo de la confluencia (Río Carcarañá) para la condición experimental 5.2.

5.5.4. Resultados de la visualización con trazadores

Mediante la visualización del flujo con trazador se observó para la segunda condición experimental (Figura 5.13) una zona de estancamiento delimitada a cada lado por capas de corte. En cada capa de corte se observaron estructuras coherentes bidimensionales con sentidos de rotación opuestos: sentidos horarios en la capa de corte de la izquierda (Río Tercero), mientras que en la capa de corte de la derecha (Río Saladillo) el sentido de rotación de las estructuras coherentes es antihorario. Aguas abajo estas capas interactúan formando una única capa de corte. Estos procesos observados mediante técnicas de visualización son análogos a lo que ocurre en el caso de un flujo detrás de un obstáculo, modelo conceptual de estela turbulenta que ya ha sido estudiado y observado en instalaciones de laboratorio, simulaciones numéricas y estudios de campo de pequeña escala.

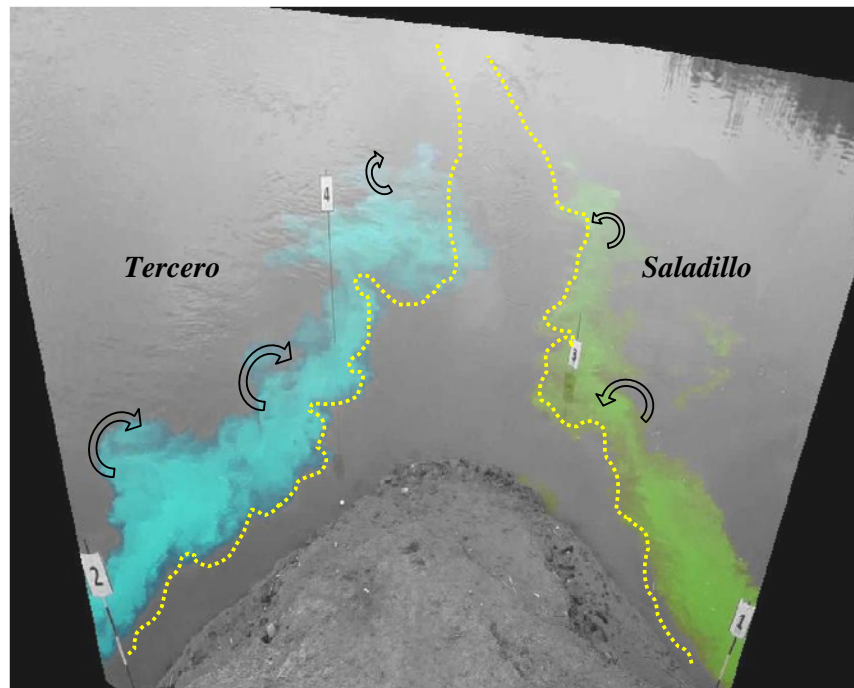


Figura 5.13: Visualización rectificada de la zona de estancamiento mediante el uso de trazador.

Condición experimental 5.2.

La visualización de la zona de estancamiento y capa de corte para la condición 3 (Figura 5.14) muestra resultados similares a los comentados para la condición 2.

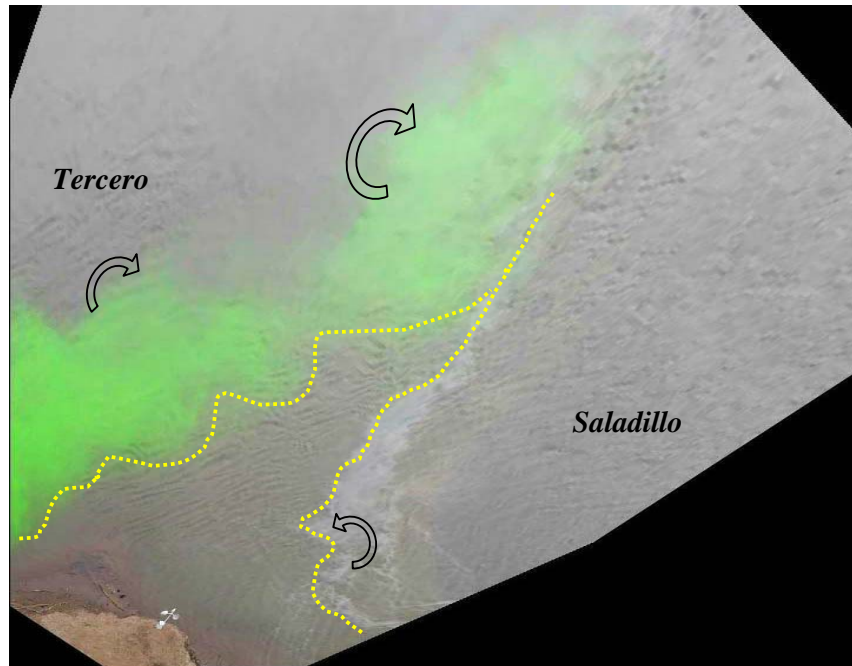


Figura 5.14: Visualización de capas de corte y zona de estancamiento mediante el uso de trazador.
Condición experimental 5.3.

5.5.5. Procesos de mezcla aguas abajo de la confluencia

Para cuantificar los procesos de mezcla presentes en la confluencia se evaluó la evolución espacial de dos escalares: la conductividad eléctrica y la temperatura del fluido que definen su densidad. El Río Saladillo presenta mayor densidad que el Río Tercero debido al contenido de sal presente en los flujos del primer tributario (Barchiesi et. al, 2013). La presencia de flujos de diferente densidad genera una mayor complejidad en los patrones hidrodinámicos y de mezcla, que no han sido reportados en estudios previos donde se evaluó la conveniencia del uso de un modelo conceptual específico para confluencias fluviales basado en la analogía con la interfase de mezcla generada aguas abajo del flujo alrededor de un obstáculo.

Los valores de temperatura del agua y conductividad eléctrica, corregida por la temperatura del agua, registrados con las sondas multiparamétricas en los flujos de aproximación de los ríos Tercero y Saladillo (ver localización en la Figura 5.4) para la tercera condición experimental fueron de 1.8 mS/cm 7.7 mS/cm, respectivamente (ver

Figura 5.15). La conductividad del río Saladillo es más de cuatro veces mayor que la conductividad del río Tercero.

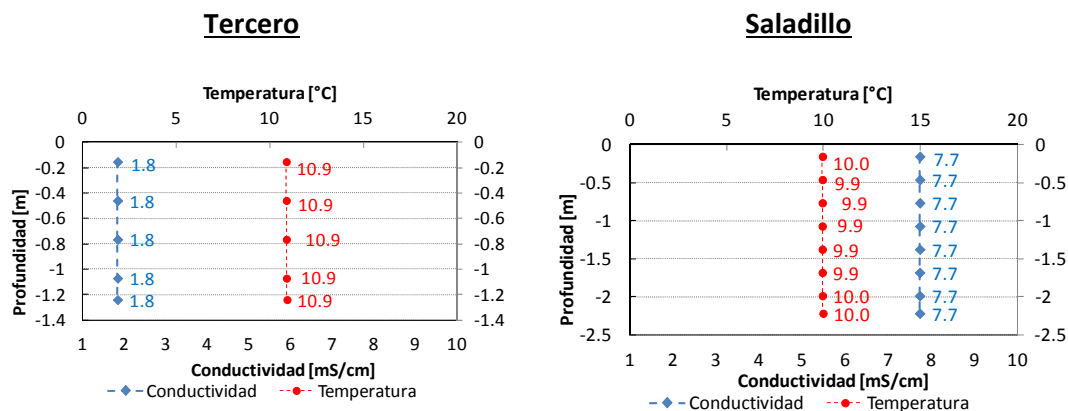


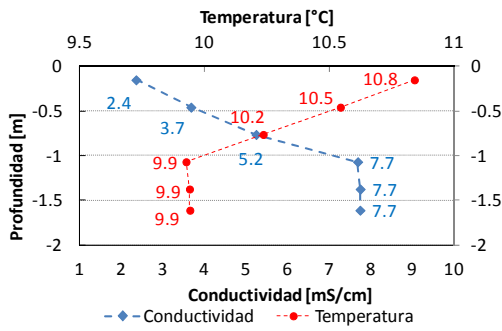
Figura 5.15: Perfiles verticales de conductividad y temperatura del fluido en las secciones (T) y (S) de los tributarios (Tercero y Saladillo). Condición experimental 5.3.

Para determinar la longitud en que se alcanza la mezcla completa de los flujos de los tributarios en la dirección transversal aguas abajo de la confluencia se presentan en la Figura 5.16 los perfiles de temperatura y de conductividad del fluido corregida por temperatura en las 5 secciones mostradas en la Figura 5.4.

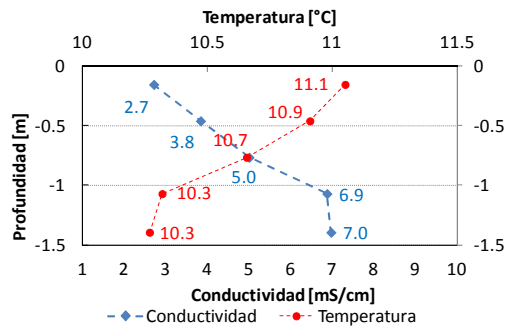
En la Figura 5.16(a) se observa que los tres puntos inferiores de la sección 1 poseen un valor de conductividad igual a la del Río Saladillo (7.7 mS/cm) y este parámetro disminuye al acercarse a la superficie libre hasta un valor de 2.4 mS/cm. Algo similar ocurre en la margen derecha de la sección 2, y esto se debe a la intrusión del flujo de mayor densidad proveniente del Río Saladillo por debajo del flujo de menor densidad proveniente del Río Tercero.

En la sección 4 que se muestra en las Figura 5.16(a) y (f) se observa que se ha alcanzado una mezcla vertical en ambas márgenes debido a la similitud de los valores de conductividad en cada perfil vertical, pero aún no se alcanzó a mezclarse en la dirección transversal debido a que existe una diferencia entre los valores de conductividad de ambos perfiles.

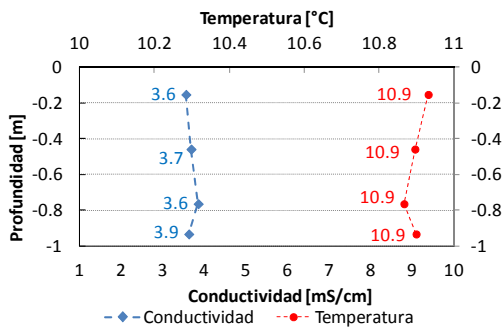
a) Sección 1 (margen derecha)



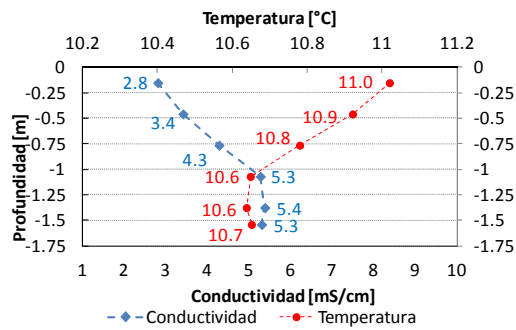
b) Sección 2 (margen derecha)



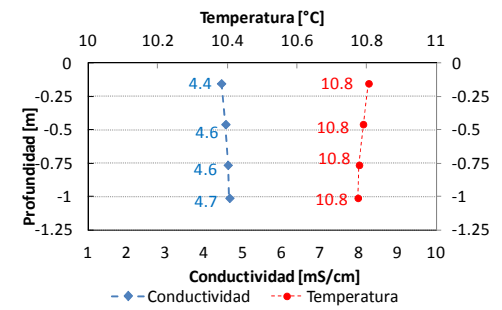
c) Sección 3 (margen derecha)



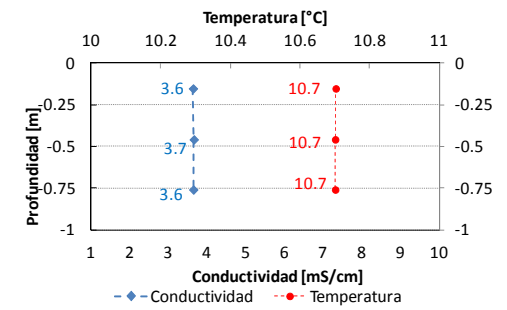
d) Sección 3 (margen izquierda)



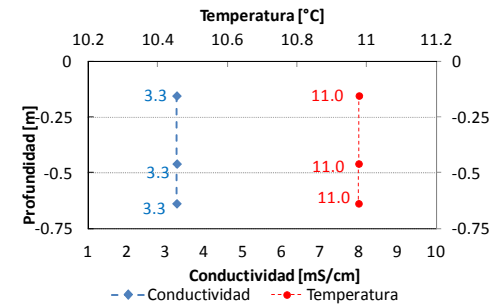
e) Sección 4 (margen derecha)



f) Sección 4 (margen izquierda)



g) Sección 5 (margen derecha)



h) Sección 5 (margen izquierda)

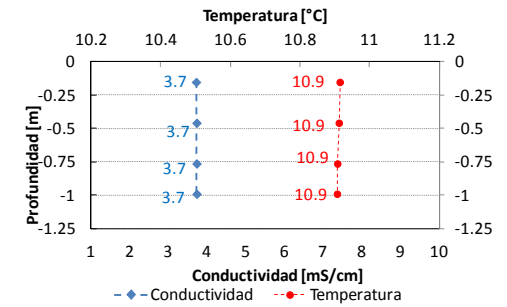


Figura 5.16: Perfiles verticales de conductividad y temperatura en diferentes localizaciones aguas abajo de la confluencia. Condición experimental 5.3.

Finalmente se observa en los dos perfiles de la sección 5 que los valores de conductividad y temperatura son uniformes en la vertical y similares en las dos posiciones en la dirección transversal, por lo tanto para este estudio se asume que en esta progresiva (ubicada aproximadamente a 450 metros aguas abajo del vértice de la confluencia) se ha alcanzado la mezcla completa.

La longitud de mezcla necesaria para alcanzar una desviación máxima del 5% en el valor de la concentración de un escalar (temperatura, conductividad) en una confluencia de dos flujos se determina según Fischer et. al (1979) como:

$$L_{mt} = 0.3 \frac{U \cdot B^2}{\varepsilon_t} \quad (5.1)$$

Donde U y W es la velocidad media y ancho del río aguas abajo de la confluencia, respectivamente. El coeficiente de mezcla transversal ε_t se calcula para un canal de curvatura continua (ver Figura 5.18) según Fischer et. al (1979) como:

$$\varepsilon_t = 25 \frac{U^2 \cdot H^3}{R^2 \cdot u^*} \quad (5.2)$$

Donde H es la profundidad media aguas abajo de la confluencia, R es el radio de curvatura de la confluencia (ver Figura 5.18) y u^* es la velocidad de corte $u^* = \sqrt{g \cdot H \cdot S_f}$.

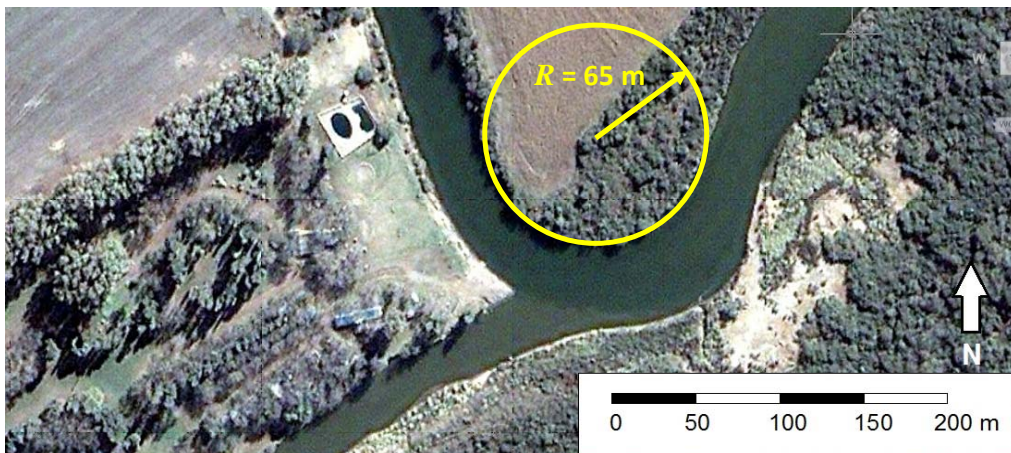


Figura 5.17: Esquema que representa el radio de curvatura seleccionado para la estimación de coeficiente de mezcla transversal ε_t

En la Tabla 5.2 se resumen los valores de todos los parámetros utilizados para determinar la longitud de mezcla en base a las observaciones realizadas en la sección transversal 5 para la condición 5.3 (ver Figura 5.18). La pendiente de superficie libre se asumió igual a la relevada aguas abajo de la confluencia como se muestra en la Figura 5.12.

Tabla 5.2: Parámetros hidráulicos medidos aguas abajo de la confluencia para la determinación de la longitud de mezcla teórica. Condición experimental 5.3.

R	Radio de curvatura	[m]	65
U	Velocidad media aguas abajo	[m/s]	0.55
H	Profundidad media aguas abajo	[m]	1.1
B	Ancho	[m]	49
S_f	Pendiente		0.00018
G	Gravedad	[m/s ²]	9.81
u^*	velocidad de corte	[m/s]	0.044
ε_t	Coefficiente de mezcla transversal	[m ² /s]	0.055
L_{mt}	Long de mezcla	[m]	7278

La longitud necesaria para alcanzar la mezcla completa estimada utilizando las ecuaciones 2 y 3 es un orden de magnitud mayor a la observada. Esto se debe a que las ecuaciones propuestas por Fischer et. al (1979) se asume flujo uniforme con velocidades constantes en todo el dominio y mezcla completa en la vertical. Esta última hipótesis no se cumple aguas abajo de la confluencia debido que el río Saladillo por su mayor densidad escurre por debajo del río Tercero y se produce en primer lugar una mezcla vertical (con tiempos característicos mucho menores a la mezcla transversal), y por lo tanto la mezcla a lo largo de la dirección transversal se alcanza en una longitud menor a la estimada con la ecuación 5.2.

Fischer et. al (1979) afirman que no existe información suficiente que permita obtener estimaciones confiables de mezcla en ríos con diferencia de densidad inicial pero ellos definen parámetros que determinan los efectos de la diferencia de densidad en la mezcla de dos tributarios : el ancho (B), la profundidad (H), velocidad de corte (u^*), y el flujo boyante (B_f) definido como:

$$B_f = \frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot g \cdot Q_e \quad (5.3)$$

siendo ρ la densidad del cuerpo receptor (río Tercero para esta condición hidrológica), $\Delta\rho$ la diferencia de densidad entre los tributarios, g la aceleración de la gravedad, y Q_e el caudal del efluente, considerado para esta condición hidrológica el caudal escurrido por el río Saladillo.

Estos parámetros dan origen a dos grupos adimensionales $\frac{B_f}{H \cdot u^{*3}}$ y $\frac{B_f}{B \cdot u^{*3}}$ los cuales expresan, respectivamente, la relación entre la influencia estabilizante del efluente (río Saladillo) por unidad de profundidad y de ancho, y la capacidad de mezcla disponible en el cuerpo receptor. Resultados de mediciones en laboratorio de Prych (1970) muestran que si $\frac{B_f}{H \cdot u^{*3}} < 5$, los efectos de la diferencia de densidad son despreciables para describir la mezcla transversal. Los resultados obtenidos por Schiller y Sayre (1973) para mezcla vertical a partir de mediciones de laboratorio, indican que si $\frac{B_f}{B \cdot u^{*3}} < 1$, la mezcla vertical será independiente de los efectos de la diferencia de densidad.

Para el caso de la condición 5.3, (ver Tabla 5.2) y para una diferencia de densidad de 5.9 kg/m^3 entre los tributarios (calculada a partir de los valores de conductividad y temperatura relevados experimentalmente), el valor de los grupos adimensionales son

$$\frac{B_f}{H \cdot u^{*3}} = 6476 > 5, \text{ y } \frac{B_f}{B \cdot u^{*3}} = 145 > 1.$$

Por tal motivo, los efectos de diferencia de densidad no son despreciables, y la mezcla vertical depende de la diferencia de densidad explicando así la diferencia entre los valores de longitud de mezcla calculados con la ecuación 5.2 y los observados experimentalmente.

5.6. Conclusiones del capítulo

En este capítulo se realizó una evaluación experimental en campo de la hidrodinámica y los procesos de mezcla de una confluencia fluvial de mediana escala, para tres condiciones hidrológicas diferentes (relaciones de momento 0.2, 2.5 y 3.9).

Para las condiciones de flujo analizadas se observó aguas abajo de la confluencia la presencia de una zona de estancamiento en la cual se produce la recirculación del fluido y que está limitada a cada lado por capas de corte con estructuras coherentes bidimensionales con sentidos de rotación opuestos y características similares al caso de estela turbulenta generada aguas abajo de un obstáculo sumergido observadas en instalaciones experimentales de laboratorio o modelación numérica. Aguas abajo de esta zona de estancamiento, estas capas interactúan formando una única capa de corte.

Se verificó, mediante la medición de la elevación de la superficie libre del flujo para una condición de escurrimiento en la que el tributario dominante era el río Tercero, que la pendiente de superficie libre de dicho tributario es del 0.18 %, observándose que aguas abajo de la confluencia esa pendiente se mantiene. En el tributario de menor momento (río Saladillo) se observó una curva de remanso aguas arriba de la capa de corte.

Los patrones hidrodinámicos observados en la confluencia, sumados a la intrusión del flujo del Río Saladillo por debajo del flujo proveniente del Río Tercero debido a la diferencia de densidad, afectan los patrones de mezcla aguas abajo de la confluencia hasta una distancia de 450 metros en la cual se determinó experimentalmente que se alcanza una mezcla cuasi uniforme en la dirección transversal. Esta longitud de mezcla es un orden de magnitud menor que la estimada usando ecuaciones empíricas para flujos convergentes de igual densidad. Esta diferencia se genera ya que los efectos de diferencia de densidad no son despreciables al describir la mezcla transversal entre los tributarios.

Capítulo 6. Conclusiones y propuesta de trabajo futuro

6.1. Conclusiones Generales

En la presente tesis, se realizó una contribución en lo que respecta al estudio de la evolución espacial y temporal de la hidrodinámica en confluencias fluviales de diferentes escalas y niveles de complejidad. Las escalas incluyen canales de laboratorio, modelos físicos a escala reducida y cauces naturales de mediana escala, y la complejidad está dada por diferentes geometrías, relaciones de momento y densidades de los flujos convergentes.

En primer lugar se realizó un análisis experimental de la evolución espacial y temporal de la hidrodinámica en una confluencia de geometría sencilla, fondo concordante, flujos paralelos, relación de velocidad igual a la unidad y sin diferencia de densidad entre ambos flujos tributarios, construida en una instalación de laboratorio, utilizando modernas técnicas de medición de velocidad (ADV y UVP). Del análisis realizado se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Las estructuras coherentes observadas en la interfase de mezcla son bidimensionales de eje vertical y corresponden al patrón hidrodinámico de estela turbulenta (ET) con desprendimientos alternados de estructuras 2D que poseen sentidos de rotación opuestos.
- Mediante una modificación de la tipología de la confluencia a una configuración de flujo alrededor de un cuerpo cilíndrico sumergido (con longitud característica similar) se validó el uso del modelo conceptual de estela turbulenta detrás de un obstáculo (ampliamente estudiado en la mecánica de fluidos) para la caracterización de la hidrodinámica en la interfase de mezcla de confluencias.
- Para ambas configuraciones se observó un déficit de velocidad de flujo longitudinal (incluyendo la zona de estancamiento) en la línea central de la zona de mezcla. Este déficit de velocidad es mayor en la configuración de flujo

alrededor del cuerpo cilíndrico, y la zona de estancamiento se extiende aún más para dicha configuración. Para distancias mayores a 5 veces la longitud característica del obstáculo aguas abajo del mismo, se observaron para ambas configuraciones valores similares de velocidad media longitudinal, y corresponde a aproximadamente el 80% de la velocidad media de flujo de aproximación.

- La configuración de flujo alrededor del cuerpo cilíndrico presenta valores mayores de desvío de las fluctuaciones (*RMS*) para la velocidad longitudinal, deduciendo que los procesos son más intensos en la estela turbulenta detrás de un obstáculo.
- Los valores del número de Strouhal calculados para las componentes longitudinal y transversal de velocidad registradas en diferentes localizaciones para la configuración de flujo alrededor de un cuerpo cilíndrico, están en concordancia con antecedentes de estudios previos. Para la configuración de la confluencia los números de Strouhal son similares a los obtenidos en el caso del flujo alrededor del cuerpo cilíndrico.

Luego se extendió el estudio experimental mencionado realizando un análisis de sensibilidad del comportamiento hidrodinámico en la misma confluencia para diferentes condiciones del flujo, a través de una simulación numérica (implementado en el código libre y abierto OpenFOAM) del flujo con alta resolución espacial y temporal calibrado con los datos experimentales registrados previamente, obteniendo las siguientes conclusiones:

- El modelo numérico implementado reprodujo los principales procesos físicos observados durante los experimentos, logrando representar adecuadamente la formación de estructuras coherentes y la posición de la capa de corte.
- Para la condición de flujo con relación de velocidades de aproximación de los tributarios igual a 1, el análisis espectral de la series temporales de velocidades de flujo medidas y simuladas mostró valores de frecuencias características del

orden a los esperados en el flujo aguas abajo de un obstáculo (número de Strouhal = 0.2).

- Los campos de velocidad media simulados para distintas condiciones de flujo no presentan un desvío significativo de la posición de la capa de corte para las distintas condiciones, mientras que los campos instantáneos de velocidad muestran menores estructuras coherentes a medida que la relación de velocidades entre los tributarios aumenta (aumentó la frecuencia de las fluctuaciones del flujo indicando menores tiempos característicos de las estructuras turbulentas).
- La escala de velocidad U que permite obtener valores del número de Strouhal $St=0.2$ para condiciones de flujo con diferentes relación de velocidad de flujo de aproximación U_R (asumiendo una escala característica de longitud constante $D=0.16\text{m}$) se puede expresar utilizando una relación funcional de la relación de velocidad modificada U_{RM} como $U = U_m + \varphi(U_{RM})$.

Este análisis de la evolución espacial y temporal de la hidrodinámica se aplicó luego una configuración de mayor complejidad en su geometría, correspondiente a la confluencia de los canales de restitución del “Aprovechamiento Múltiple Presa Los Monos”, representada en un modelo físico con similitud de Froude, sin diferencia de densidad de los flujos de aproximación, mediante el uso de técnicas experimentales con elevada resolución espacial y temporal, y para diferentes condiciones de flujo, obteniendo las siguientes conclusiones:

- Mediante técnicas de visualización se identificaron, para todas las condiciones experimentales analizadas, patrones hidrodinámicos de estela turbulenta (ET) en la zona de estancamiento e interfase de mezcla de la confluencia.
- Se registraron series de tiempo la velocidad de flujo 3D en la zona de estancamiento, permitiendo caracterizar la evolución temporal de estos procesos hidrodinámicos que generan fluctuaciones en las componentes longitudinal y transversal de la velocidad en torno a un valor medio cercano a

cero. La evolución espacial de TKE en la zona aguas abajo mostró una advección de energía hacia la margen izquierda.

- Se observaron efectos cuasi-periódicos en los flujos convergentes tanto en la velocidad como en los niveles de la superficie libre del flujo en el canal de menor momento. Este aspecto no fue analizado en publicaciones previas.
- Los períodos de las fluctuaciones de velocidad registradas en la zona de estancamiento son similares a los períodos de velocidad de flujo y a la elevación de la superficie del agua registrada aguas arriba de la confluencia en el canal con menor momento (del orden de 20 seg).
- Las fluctuaciones de nivel de la superficie del flujo observadas a la salida de la central hidroeléctrica en el modelo físico (con una escala de tiempo de aproximadamente 2.4 minutos y un rango de las fluctuaciones de la superficie de agua de 50 cm esperadas en prototipo) podrían afectar el funcionamiento óptimo de la central. Para evitar estos efectos se recomienda modificar los parámetros que definen el parámetro de estabilidad $S (c_f, D, H)$ para las condiciones hidrológicas de diseño.

Finalmente, se realizó una evaluación en campo de la hidrodinámica y los procesos de mezcla en una confluencia de mediana escala de gran complejidad (con dimensiones mayores a las analizadas hasta el momento en la literatura) del sistema fluvial del Rio Carcarañá con diferencias de densidad de los flujos convergentes, y distintas condiciones hidrológicas (incluyendo alternancia de los tributarios dominantes). Para este estudio se utilizó un perfilador acústico Doppler (ADCP), una sonda multiparamétrica, y técnicas de visualización. De este estudio se llegó a las siguientes conclusiones:

- Para las condiciones de flujo analizadas se observó la presencia de una zona de estancamiento en la cual se produce la recirculación del flujo y que está limitada a cada lado por capas de corte con estructuras coherentes bidimensionales con sentidos de rotación opuestos y características similares al caso de estela turbulenta generada aguas abajo de un obstáculo sumergido

observadas en instalaciones experimentales de laboratorio o modelación numérica.

- Se verificó, mediante la medición de la elevación de la superficie libre del flujo para una condición en la que el tributario dominante era el río Tercero, que la pendiente de dicho tributario es del 0.18 ‰, observándose que aguas abajo de la confluencia esa pendiente se mantiene. En el tributario de menor momento (río Saladillo) se observó una curva de remanso aguas arriba de la capa de corte.
- Los procesos observados, sumados a la intrusión del flujo del Río Saladillo por debajo del flujo proveniente del Río Tercero afectan los patrones de mezcla aguas abajo de la confluencia hasta una distancia de 450 metros en la cual se determinó experimentalmente que se alcanza una mezcla cuasi uniforme en la dirección transversal. Esta longitud de mezcla es un orden de magnitud menor que la estimada usando ecuaciones empíricas para flujos convergentes de igual densidad. Esta diferencia se genera ya que los efectos de diferencia de densidad no son despreciables al describir la mezcla transversal entre los tributarios.

6.2. Propuesta de Trabajo Futuro

- En la instalación experimental simplificada descrita en el Capítulo 2, resta definir hasta qué condiciones límite de flujo ocurre el patrón hidrodinámico de estela turbulenta. Además, es importante evaluar efectos morfológicos (erosión y sedimentación) sobre los patrones hidrodinámicos representando un fondo móvil en la instalación experimental.
- Con respecto al análisis de sensibilidad que se realizó en el Capítulo 3 a partir del análisis de los resultados obtenidos mediante simulación numérica para tres condiciones de flujo diferentes, se propone extender el análisis modificando parámetros geométricos como por ejemplo el ángulo entre los tributarios α . Además se propone, para la geometría analizada en esta tesis,

aumentar el número de condiciones de flujo analizadas (en particular se recomienda variar la relación de velocidad modificada U_{RM} y las velocidades de aproximación) para caracterizar mejor la relación funcional que describe la evolución de la frecuencia característica de las fluctuaciones $f(U_{RM})$.

- Con respecto a la evaluación de los efectos hacia aguas arriba sobre los flujos tributarios que producen los procesos hidrodinámicos presentes en una confluencia, se propone extender este estudio (realizado en un modelo físico a escala en laboratorio y detallado en el Capítulo 4) a flujos en escala de prototipo (cauces naturales y/o artificiales).
- Para completar la caracterización de los procesos hidrodinámicos en confluencias de ríos de mediana escala descrita en el Capítulo 5, se propone como trabajo futuro aplicar técnicas de velocimetría por imágenes de partículas a gran escala (LSPIV) desarrolladas por el grupo de trabajo para cuantificar estructuras coherentes (tamaño, frecuencia, velocidades convectivas etc.) y las fluctuaciones de velocidad de flujo asociadas. Además se propone estudiar las consecuencias morfológicas de estos patrones hidrodinámicos presentes.

Capítulo 7. Referencias

- Ashmore, P. E. y Parker, G. (1983). "Confluence scour in coarse braided streams". *Water Resources Research*, Vol. 19, pp. 392-402.
- Anderson, S. y Lohrmann, A. (1995). "Open water test of the Sontek Acoustic Doppler Velocimeter". Proceeding IEEE 5th Working Conference on Current Measurements, St. Petersburg. FL. IEEE Oceanic Engineering Society, pp. 188-192.
- Barchiesi, G.; Díaz Lozada, J. M.; Caminal, F.; Herrero, H; García, C. M.; Cossavella, A.; Castelló, E.; Romagnoli, M. y Portapila, M. (2013). "Cuantificación y caracterización del escurrimiento en la cuenca del río Carcarañá". *VI Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Santa Fe, Argentina*.
- Best, J. L. (1986). "The morphology of river channel confluences". *Progress in Physical Geography*, Vol. 10, pp. 157-174.
- Best, J. L. (1987). "Flow dynamics at river channel confluences: implications for sediment transport and bed morphology". *The Society of Economic Paleontologists and Mineralogists*.
- Best, J. L. (1988). "Sediment transport and bed morphology at river channel confluences". *Sedimentology*, 35, 481-498.
- Best, J.L. y Roy, A.G. (1991). "Mixing-layer distortion at the confluence of channels of different depth". *Nature*, 350, 6317, 411-413.
- Biron P., Roy A. G., Best J. L., y Boyer C.J. (1993). "Bed morphology and sedimentology at the confluence of unequal depth channels". *Geomorphology*, 8, 115–129.

Biron, P.; Best, J. L. y Roy, A. G. (1996). "Effects of bed discordance on flow dynamics at river channel confluences". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 122(12), pp. 676-682.

Biron P. M., Richer A., Kirkbride A. D., Roy A. G., y Han S. (2002). "Spatial patterns of water surface topography at a river confluence". *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, 913-928.

Constantinescu, G.; Miyawaki, S.; Rhoads, B.; Sukhodolov, A.; y Kirkil, G. (2011). "Structure of turbulent flow at a river confluence with momentum and velocity ratios close to 1: Insight provided by an eddy resolving numerical simulation". *Water Resources Research*, 47, W05507, doi:10.1029/2010WR010018.

Constantinescu, G.; Miyawaki, S.; Rhoads, B.; Sukhodolov, A.; y Kirkil, G. (2012). "Numerical analysis of the effect of momentum ratio on the dynamics and sediment-entrainment capacity of coherent flow structures at a stream confluence". *Journal of Geophysics Research*, 117, F04028, doi:10.1029/2012JF002452.

Chang, W. Y.; Constantinescu, G.; Tsai, W. F. y Lien, H. C. (2011). "Coherent structure dynamics and sediment erosion mechanisms around an in-stream rectangular cylinder at low and moderate angles of attack". *Water Resources Research*, 47, W12532, doi: 10.1029/2011WR010586.

Chen, D. y Jirka, G. H. (1995). "Experimental study of plane turbulent wakes in a shallow waterlayer". *Fluid Dynamics Research*, Vol. 16, pp. 11-41.

Dean, R. G. y Dalrymple R. A. (1991). "Water wave mechanics for engineers and scientists". World Scientific Publishing Co., ISBN 981-02-0420-5.

Fischer, H.; List, E. J.; Koh, R.; Imberger, J. y Brooks, N. (1979). "Mixing in inland and coastal waters". Academic Press, San Diego, California. ISBN 0-12-258150-4

- García, M. H. (2008). "Sediment transport and morphodynamics". Chapter 2 in ASCE Manual of Practice 110, Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modelling and Practice. Edited by M.H. García, ASCE, Reston, Va
- García, C. M.; Cantero, M. I.; Niño, Y. y García, M. H. (2005). "Turbulence measurements with acoustic Doppler velocimeters". *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(12), 1062-1073.
- Hardy, R. J.; Best, J. L.; Lane, S. N. y Carbonneau, P. E. (2009). "Coherent flow structures in a depth-limited flow over a gravel surface: The role of near-bed turbulence and influence of Reynolds number". *Journal of Geophysics Research*, 114, F01003, doi:10.1029/2007JF000970.
- Hardy, R. J.; Best, J. L.; Lane, S. N. y Carbonneau, P. E. (2010). "Coherent flow structures in a depth-limited flow over a gravel surface: The influence of surface roughness". *Journal of Geophysics Research*, 115, F03006, doi:10.1029/2009JF001416.
- Herrero, H.; García, C. M.; López, G. y Pedocchi, F. (2013). "Evaluación experimental de una analogía para la caracterización del flujo turbulento en confluencias" *III Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica, Santa Fe, Argentina*.
- Hsu, C. C.; Wu, F. S. y Lee, W. J. (1998). "Flow at 90° equal-width open-channel junction" *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(2), 186–191.
- Huang, J.; Weber, L. J. y Lai, Y. G. (2002). "Three-dimensional numerical study of flows in open-channel junctions". *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(3), 268–280.
- Ingram, R. G. y Chu, V. H. (1987). Flow around islands in Rupert Bay: An investigation of the bottom friction effect, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 92(C13), pp. 14521-14533.

- Kirkil, G. y Constantinescu, G. (2009). "Mean Flow and Coherent Structures in a Shallow Mixing Layer Developing Between Parallel Streams". Proceedings of 33rd IAHR Congress, Vancouver, August 2009.
- Komura, S. (1973). River-bed variations at confluences, *Proceeding of the Symposium on River Mechanics, Bangkok, 9-12 January, Paper A66, pp. 773-784*.
- Laizet, S.; Lardeau, S. y Lamballais, E. (2010). "Direct Numerical Simulation of a mixing-layer downstream a thick splitter plate". *Phys Fluids*, Vol. 22, 015104.
- Lane, S. N.; Parsons, D. R.; Best, J. L.; Orfeo, O.; Kostaschuk, R. A. y Hardy, R. J. (2008). "Causes of rapid mixing at a junction of two large rivers: Río Paraná and Río Paraguay, Argentina". *Journal of Geophysical Research*, VOL. 113, F02019, doi:10.1029/2006JF000745.
- López, M. (2012). "Condición histórica y presente de los bañados del río Saladillo y su composición de aves acuáticas". Trabajo Final de Licenciatura en Ciencias Biológicas, Facultad de Ciencias Exactas, Físico-Químicas y Naturales, Universidad Nacional de Río Cuarto.
- Lourenco, L. M. y Shih, C. (1993). "Characteristics of the plane turbulent near wake of a circular cylinder". A particle image velocimetry study. (data taken from Beaudan, Moin).
- McLelland, S.J., Ashworth P.J. y Best J.L. (1996). "The Origin and Downstream Development of Coherent Flow Structures at Channel Junction". *In Coherent flow structures in open channels*, Ashworth, Bennett, Best and McLelland (eds), Wiley and Sons, 491-519.
- Miyawaki, S.; Constantinescu, S. G.; Kirkil, G.; Rhoads, B. y Sukhodolov, A. (2009), "Numerical investigation of three-dimensional flow structure at a river

confluence". Paper presented at 33rd International Association Hydraulic Research Congress, Vancouver, B. C., Canada.

Mosley, M. P. (1982). "Scour depths in branch channel confluences: Ohau River, Otago, New Zealand", Proceedings of New Zealand Institute of Professional Engineers, Vol. 9, pp. 17-24.

Nezu, I. y Nakagawa, H. (1993). "Turbulence in open-channel flows". IAHR. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.

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

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.

Patalano, A.; Brevis, W.; García, C. M.; Bleninger, T. y Rodríguez, A. (2013) "PTVlab, una herramienta grafica para el procesamiento digital en Velocimetría por Seguimiento de Partículas". III Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica, Santa Fe, Argentina.

Parker, G. (1990), Surface-based bedload transport relation for gravel rivers. *Journal of Hydraulic Research*, 28(4), 417-436.

Pozzi, C.; Herrero, H.; Furlan, P.; Ragessi, M.; Márquez Damián, S.; López, G.; Pedocchi, F. y García, C. M. (2013). "Simulación numérica y experimental del flujo en una confluencia". *Mecánica Computacional*, Publicación de AMCA, Vol. XXXII, pgs.3727-3741, Santa Fe, Argentina, ISSN 1666-6070.

Pedocchi, F. y García, M. H. (2009). "Application of an Ultrasonic Velocity Profiler for velocity and suspended sediment measurements in an oscillatory boundary layer". Civil Engineering Studies, Hydraulic Engineering Series No. 83, ISSN: 0442-1744, UILU-ENG-2009-2003. VTCHL, USA.

Rhoads, B. L. (2005) "Scaling of confluence dynamics in river systems: some general considerations". 4th IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Urbana, Illinois, USA.

Rhoads, B. L. y Sukhodolov, A. N. (2004). "Spatial and temporal structure of shear layer turbulence at a stream confluence". *Water Resources Research*, 40(6), W06304.

Rhoads, B. L. y Sukhodolov, A. N. (2008). "Lateral momentum flux and the spatial evolution of flow within a confluence mixing interfase". *Water Resources Research*, 44(8).

Rodríguez, C.; Mancini, M.; Prospero, C; Weyers, A.; Alcantú, G. y Ferrero, S. (2002). "Variaciones estacionales de la calidad del agua del río Chocancharava (río Cuarto), Córdoba, Argentina". *Ecología Austral* 12; 65-72. Asociación Argentina de Ecología.

Schewe, G. (1983). "On the force fluctuations acting on a circular cylinder in cross-flow from subcritical up to transcritical Reynolds numbers". *Journal of Fluid Mechanics*, 133:265-285.

Sukhodolov, A. N. y Rhoads, B. L. (2001). "Field investigation of three-dimensional flow structure at stream confluences: 2. Turbulence". *Water Resources Research*, 37(9), 2411-2424.

Szupiany, R. N.; Amsler, M. L.; Parsons, D. R.; Best, J. L. y Haydel, R. (2007). Estructura del flujo y morfología en dos confluencias aguas abajo de islas en el Río Paraná. *Tercer Simposio Regional Sobre Hidráulica de Ríos, Córdoba, Argentina*.

Tarrab, L. (2013). Incertidumbres en Mediciones de Caudal con Perfiladores de Corriente Acústicos Doppler desde Plataformas Móviles, Tesis Doctoral, FCEyN-UNC; Córdoba, Argentina..

Universidad Nacional de Córdoba (2008). “Modelación física de las obras de evacuación y canal de restitución de la presa Los Monos”. Informe Final, Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.