

Estudio en modelo físico de los procesos de mezcla producidos en vertidos hiperdensos y corrientes de gravedad

Autor: Fernando Costa González

Tesis doctoral UDC / Año 2016

Directores: Enrique Peña González y Jose Anta Álvarez

Tutor: Enrique Peña González

Programa de doctorado en Ingeniería Civil



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

*Comienza haciendo lo necesario,
continúa haciendo lo posible;
y de repente estarás haciendo lo imposible*

-San Francisco de Asís-

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis doctoral es el resultado de parte de los trabajos desarrollados dentro del proyecto “Análisis (experimental y numérico) de los procesos físicos en campo cercano y lejano para la optimización de vertidos hiperdensos de salmuera” con referencia BIA2011-29031-C02. Este trabajo fue financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación en la convocatoria de Proyectos de Investigación Fundamental no Orientada, en el marco del Plan Nacional de I+D+i 2008-2011.

Quisiera empezar dando las gracias a todos aquellos, que en un momento u otro, me habéis ayudado a seguir con el trabajo en estos últimos 5 años. De forma particular, me gustaría agradecer a mis directores de tesis, Quique Peña y Jose Anta, todo el apoyo y confianza en mí que han mostrado siempre. Gracias Quique por darme la oportunidad de trabajar como investigador y aprender. Jose, muchas gracias por exigirme siempre, ir poco más allá.

A mis compañeros de GEAMA, muchas gracias a todos por aguantarme en los momentos de desesperación, que no fueron pocos. Inés contigo empecé en la hidráulica experimental, muchas tardes de Mero pasando frío. Gracias Andrés por ser un gran compañero y amigo, después de tantas horas en el mismo despacho, que menos que darte las gracias por calmar las aguas de vez en cuando... NOS VEMOS EN LA BODA!!

Sin los “pitis” de emergencia con José creo que no podría haber acabado la tesis, por las noches de pesca (por decir algo) y por todo lo que has hecho mil gracias. A Javier, Adrián, María, Luis, Gael, Nacho y todos los que habéis pasado por GEAMA, sólo deciros que sin vosotros esto no habría sido lo mismo, grandes momentos juntos.

A la gente del CITEEC, muchas gracias por echarme una mano, aunque a veces fuera al cuello, sé que me lo merezco. Félix, Gonzalo, Miki, Paula, Bárbara... En especial quiero agradecer a Esteban y Dani su paciencia conmigo, los conductivímetros dieron mucho trabajo.

A mis padres, que habéis sido mis guías en la vida, gracias por darme las herramientas para poder construir un futuro. Y sobre todo, gracias por inculcarme los valores de humildad y perseverancia que siempre habéis mostrado, GRACIAS. A mi hermana, que aunque eres la pequeña a veces has sido más madura que yo, gracias por aceptar, callar, apoyar, escuchar, simplemente gracias.

Gracias a mi familia política por entender mis horarios, sobre todo en la última fase de la tesis.

A mi abuela, que siempre nos enseñó a valorar más un libro que un juguete, y por hacerme ver que para entender quiénes somos, primero hay que saber y de dónde venimos.

Y por último, Espe gracias por todo tu apoyo y tu cariño, que estoy seguro, fueron indispensables para poder terminar el trabajo (AL FIN!!!!). Y sobre todo mil millones de gracias por haberme permitido disfrutar de la sensación más bonita del mundo, gracias por darnos un niño tan maravilloso.

RESUMO

Esta tese doutoral analiza o comportamento das descargas das salmoiras das plantas desaladoras en modelo físico baixo diferentes configuracións de vertido e condicións ambientais como a profundidade, a velocidade da corrente ou o sentido de descarga respecto o ambiente receptor. Estudáronse as zonas máis próximas ó difusor, campo próximo, e as zonas máis afastadas, campo distante.

A caracterización dos procesos físicos realizouse con técnicas láser comúns na hidráulica experimental (velocimetría láser de partículas (PIV) e fluorescencia inducida por láser (LIF). Ademais, desenvolveuse un sistema baseado en conductímetro para o estudo da evolución en planta dos vertidos. Cabe destacar que a última técnica de caracterización foi obxecto dunha patente de invención na OEPM, dándolle un valor engadido ó presente documento.

RESUMEN

Esta tesis doctoral analiza el comportamiento de las descargas de las salmueras de las plantas desaladoras en modelo físico bajo diferentes configuraciones de vertido y condicionantes ambientales como el calado, la velocidad de la corriente y el sentido de la descarga en el medio receptor. El análisis se ha realizado para las zonas más próximas al difusor (campo cercano), y para las zonas más alejadas (campo lejano).

La caracterización de los procesos físicos se ha realizado con técnicas láser comunes en la hidráulica experimental: velocimetría de partículas láser (PIV) y fluorescencia inducida por láser (LIF). Además, se ha desarrollado un sistema basado en conductivímetros para estudiar la evolución en planta de los vertidos. Cabe destacar que esta última técnica de caracterización ha sido objeto de una patente de invención en la OEPM, otorgando un valor añadido al presente documento.

ABSTRACT

This PhD Thesis analyses the brine spill behaviour from desalination plants in physical model with different spill configurations and ambient conditions such as water depth discharge, flow velocity and the jet orientation respect to the receiver ambient current. The closest area from the nozzle (near field) and the farther regions (far field) were analysed.

In order to characterize the physical processes Particle Image Velocimetry (PIV) and Laser Induced Fluorescence (LIF) techniques has been applied. Furthermore, to study the brine evolution on top view a system based on conductivity probes was developed. It is noteworthy that this system was registered in Spanish Office Patent (OEPM).

PRÓLOGO

El uso de plantas desaladoras como fuente de agua dulce ha crecido de una forma considerable en los últimos años. El aumento de este tipo de instalaciones se debe, en parte, a la proximidad de una fuente de recursos hídricos como es el mar. De este modo, zonas históricamente supeditadas a una gestión cuidadosa del agua pueden disponer ahora de volúmenes importantes tanto para consumo humano, como para las necesidades de las actividades socioeconómicas.

Sin embargo, el empleo de la desalación genera un producto de alta salinidad, la salmuera, que es retornado al mar como residuo. Se ha comprobado en numerosos estudios que el efecto de los vertidos hiperdensos puede ser muy perjudicial para el ecosistema marino. Para minimizar este problema es indispensable que la salmuera sufra un proceso de dilución adecuado para que los niveles de salinidad no sean letales para las especies marinas.

Los procesos físicos de los vertidos de salmuera mediante emisario submarino han sido estudiados en profundidad hasta la actualidad. Los trabajos existentes en la literatura concerniente a este fenómeno divide el vertido en dos zonas. El campo cercano es la zona más próxima al difusor, donde los fenómenos de mezcla son más elevados. El campo lejano se corresponde con las regiones más alejadas del vertido y presenta una menor capacidad de dilución.

Para estudiar el comportamiento de los vertidos de salmuera mediante modelo físico, la mayoría de los trabajos de la literatura analizan factores relacionados con la geometría y configuración del vertido (flotabilidad, ángulo de descarga, diámetro, caudal, etc.). Sin embargo, el número de investigaciones relacionadas con el análisis de otros mecanismos forzadores de la dilución como las corrientes o las mareas, o el estudio del campo lejano es mucho más reducido.

Esta tesis doctoral pretende avanzar en el conocimiento de estos factores, analizando la influencia en la hidrodinámica y los procesos de mezcla de los vertidos de salmuera, factores ambientales como la velocidad y el sentido de la corriente marina. Este documento no sólo se ha centrado en el análisis de los procesos que tienen lugar en el campo cercano. También se ha estudiado el comportamiento de la corriente de gravedad formada en campo lejano tras el impacto del vertido sobre el fondo marino. Este flujo bicapa ha sido analizado bajo los mismos forzadores ambientales que el chorro de salmuera. De esta forma es posible estudiar todo el vertido de forma conjunta, lo que por limitaciones del montaje experimental, no es común en este tipo de investigaciones.

Para la caracterización de los fenómenos de mezcla e hidrodinámicos se han empleado técnicas láser de uso común en la hidráulica experimental. Las técnicas de velocimetría láser de partículas (PIV) o la fluorescencia inducida por láser (LIF) son métodos que han permitido estudiar el flujo hiperdenso en el plano vertical central del vertido. Para el estudio en planta del campo lejano se ha desarrollado un sistema de medida basada en una malla de conductivímetros que ha sido registrada en la OEPM como patente de invención.

Los resultados de este trabajo han permitido avanzar en el estado del arte de vertidos hiperdensos en medios no estacionarios. El estudio de las componentes hidrodinámicas del vertido, para diferentes condiciones de descarga, ha puesto de manifiesto la importancia que tiene la hidrodinámica del medio receptor en el comportamiento de los flujos hiperdensos. Se ha observado que los cambios de sentido en la descarga del chorro respecto a la corriente dominante el medio receptor inducen procesos de mezcla en el campo cercano de gran relevancia. Además, se ha caracterizado el comportamiento de las corrientes de gravedad en campo lejano, tanto en alzado como en planta. Los fenómenos de mezcla, aunque mucho menores que los observados en el campo cercano también se ven influidos por el medio receptor.

ÍNDICE GENERAL DEL DOCUMENTO

INDICE DE FIGURAS.....	iii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
1 CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN, RESUMEN Y CONCLUSIONES	1.1
1.1 Introducción.....	1.1
1.2 Síntesis y resultados.....	1.5
1.2.1 Estado del arte y análisis de vertidos hiperdensos	
1.2.2 Montaje y campaña experimental	
1.2.3 Análisis dimensional del campo cercano	
1.2.4 Análisis del vertido en campo cercano	
1.2.5 Análisis del vertido en campo lejano	
1.3 Principales conclusiones y aportaciones.....	1.17
1.3.1 Metodología experimental	
1.3.2 Campo cercano	
1.3.3 Campo lejano	
1.4 Futuras líneas de trabajo propuestas	1.19
2 CAPÍTULO II. ESTADO DEL CONOCIMIENTO	2.1
2.1 Introducción.....	2.1
2.2 Descripción de los vertidos	2.3
2.2.1 Análisis dimensional del campo cercano	
2.2.2 Descripción del campo cercano a partir de la trayectoria del vertido	
2.2.3 Análisis dimensional del campo lejano	
2.3 Análisis experimental de los vertidos	2.16
2.3.1 Técnicas no intrusivas	
2.3.2 Técnicas intrusivas	
2.4 Modelización numérica de los vertidos	2.22
3 CAPÍTULO III. INSTALACIONES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	3.1
3.1 Introducción.....	3.1
3.2 Instalaciones y modelo físico	3.2
3.3 Descripción de las técnicas de medida	3.9
3.3.1 Equipo PIV	
3.3.2 Equipo LIF	
3.3.3 Sistema propio de medición de conductividad	
3.4 Descripción de la campaña experimental.....	3.21
3.5 Metodología y validación de registros.....	3.23
3.5.1 Equipo PIV	
3.5.2 Equipo LIF	
3.5.3 Sistema propio de medición de conductividad	

4 CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DIMENSIONAL DEL CAMPO CERCANO 4.1

4.1	Introducción	4.1
4.2	Definición del eje del vertido y análisis dimensional para campo cercano	4.2
4.2.1	Eje de velocidades y concentraciones	
4.2.2	Variables de estudio	
4.2.3	Influencia del número de Froude	
4.2.4	Análisis dimensional de chorro con flotabilidad negativa	
4.3	Perfiles longitudinales del chorro	4.10
4.3.1	Perfiles longitudinales campos de concentraciones	
4.3.2	Perfiles longitudinales de los campos vectoriales	
4.3.3	Análisis de parámetros de estudio	
4.4	Comparación con resultados previos.....	4.15
4.5	Conclusiones	4.18

5 CAPÍTULO V. VERTIDO HIPERDENSO EN CAMPO CERCANO. CAMPOS DE FLUJO Y SECCIONES TRANSVERSALES 5.1

5.1	Introducción	5.1
5.2	Campos estudiados. Velocidades y diluciones.....	5.2
5.2.1	Campos vectoriales	
5.2.2	Campos de diluciones	
5.3	Secciones transversales	5.14
5.3.1	Velocidades y diluciones en el eje del vertido	
5.3.2	Fluctuaciones de velocidades y diluciones	
5.4	Conclusiones	5.26

6 CAPÍTULO VI. CORRIENTE DE GRAVEDAD EN CAMPO LEJANO. ANÁLISIS DEL FLUJO HIPERSALINO EN ALZADO Y PLANTA 6.1

6.1	Introducción	6.1
6.2	Campos estudiados. Análisis integrado del vertido.....	6.3
6.2.1	Campos de velocidades (PIV)	
6.2.2	Campos de diluciones (LIF)	
6.3	Influencia de variables geométricas y ambientales en la corriente de gravedad.....	6.11
6.3.1	Análisis de la zona de transición entre campo cercano y campo lejano	
6.3.2	Análisis dimensional en la corriente de gravedad. Influencia del parámetro $u_r F_{rd}$ sobre la corriente de gravedad	
6.4	Análisis en perfil de la corriente de gravedad generada en campo lejano.....	6.18
6.5	Caracterización de la corriente de gravedad en planta	6.25
6.5.1.	Evolución de los campos de concentración	
6.5.2.	Análisis de resultados según tipologías de vertido	
6.6	Conclusiones	6.35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Distribución de las plantas desaladoras en el mundo a principios de 2000 (Torres y Medina 1999)	1.1
Figura 1.2. Zona de mayor concentración de plantas desaladoras en el mundo (rosa) y zonas de vertido más afectadas por la descarga de salmuera al medio marino (verde)	1.2
Figura 1.3. Sistemas más comunes de vertidos marinos de salmueras. Vertidos por superficie (a) y emisarios submarinos (b)	1.2
Figura 1.4. Esquema de un vertido de salmuera en medio estacionario (a) y regiones que lo conforman (b)	1.3
Figura 1.5. Esquema de vertido de salmuera en un medio marino dinámico	1.4
Figura 1.6. Técnicas de caracterización aplicadas y sus zonas de actuación	1.6
Figura 1.7. Esquema del canal de ola-corriente empleado en la ejecución de ensayos	1.6
Figura 1.8. Posición de las sondas en la malla de conductivímetros (a) y emplazamiento de la malla en el canal de experimentación (b y c)	1.7
Figura 1.9. Tipologías de vertido ensayadas en esta tesis doctoral	1.8
Figura 1.10. Ejemplo de la obtención de los ejes de concentraciones máximas (a) y velocidades máximas (b) para ensayo en medio dinámico	1.9
Figura 1.11. Evolución de la dilución en el eje, S (a), y de la velocidad total, u (b)	1.9
Figura 1.12. Comparación de resultados con investigaciones previas, para la cota máxima alcanzada por el chorro (Z_{me}), en un medio estacionario (a) y medio dinámico co-flow (b)	1.10
Figura 1.13. Campos vectoriales para ensayo C40 (Tipo V, $v=0.05$ m/s counter-flow). Velocidad media (a), tensiones Reynolds (b), fluctuaciones velocidad horizontal (c) y fluctuaciones velocidad vertical (d)	1.11
Figura 1.14. Evolución de la cota máxima alcanzada por el vertido (Z_{me}) para $\theta=45^\circ$, en co-flow (rojo) y counter-flow (azul)	1.11
Figura 1.15. Evolución del vertido para ensayo C39 (Tipo IV, medio dinámico $v=0.05$ m/s, co-flow). Secciones analizadas para la velocidad (a), dilución (b), y comparación con perfil gaussiano (c) y (d)	1.12
Figura 1.16. Campo de fluctuaciones de las concentraciones ensayo C07 (a,c) y C39 (b,d)(tipos I y IV respectivamente)	1.13
Figura 1.17. Campos de velocidades (a) y diluciones (b) obtenidas tras el montaje de las diferentes zonas de estudio (campo cercano y lejano)	1.14

Figura 1.18. Determinación de X_s para un vertido en medio dinámico comparado con la estimación propuesta por Roberts et al. (1997) (a). Evolución de X_s para diferentes ángulos y velocidades (b)	1.14
Figura 1.19. Perfiles verticales de la corriente de gravedad L14 (Tipo IV, medio dinámico $v=0.05$ m/s, co-flow) velocidad adimensionalizada (a) y diluciones (b)	1.15
Figura 1.20. Ensayo L07 (tipo II, $v=0.015$ m/s, co-flow). Campo de salinidad (a) y de fluctuaciones (b) con la evolución longitudinal de cada uno de ellos	1.16
Figura 1.21. Localización ejes de la malla de sensores (a). Comparación registros LIF y sondas de conductividad para ensayos L02 (b), L03 (c) y L08 (d)	1.17
Figura 2.1. Sistemas más comunes de vertidos marinos de salmueras. Vertidos por superficie (a) y emisarios submarinos (b)	2.2
Figura 2.2. Esquema de un vertido de salmuera mediante descarga sumergida	2.2
Figura 2.3. Esquema de las zonas de un vertido hiperdenso en campo cercano	2.4
Figura 2.4 Puntos característicos de estudio para un vertido hiperdenso en campo cercano	2.6
Figura 2.5. Comparaciones entre resultados de modelo y valores experimentales para Z_{me} (a) y X_i (b), Cipollina et al. (2004)	2.7
Figura 2.6. Esquema de vertidos en medio dinámico (Roberts y Toms 1987)	2.9
Figura 2.7. Perfiles de un vertido hiperdenso, comparación con un perfil gaussiano, nótese que las coordenadas negativas corresponden a la parte superior del vertido (Kikkert et al. 2007)	2.13
Figura 2.8. Campos de fluctuaciones de velocidad en la zona de transición (a) y campo de fluctuaciones de la concentración (b) para un vertido con 30° de inclinación (Palomar 2014)	2.14
Figura 2.9. Esquema de la corriente de gravedad	2.14
Figura 2.10. Vertido por fondo de una corriente de gravedad (Perez-Diaz et al. 2015)	2.16
Figura 2.11. Esquema básico de las técnicas PIV (LaVision, 2002)	2.17
Figura 2.12. Esquema de obtención del campo de velocidades con PIV (LaVision, 2007)	2.17
Figura 2.13. Esquema de funcionamiento de la técnica LIF (LaVision, 2013)	2.18
Figura 2.14. Vertido de un trazador en un medio dinámico (a). Sección transversal de la pluma (b), Vanderwel y Tavoularis 2014	2.19
Figura 2.15. Campo de concentraciones promediados, técnica LIF (a). Sección vertical obtenida mediante atenuación lumínica (óptica convencional), b, Kikkert, 2010	2.19
Figura 2.16. Configuraciones ensayadas para medio dinámico, (Roberts y Ozeiar 2012)	2.20

Figura 2.17. Caracterización de la dispersión radial del vertido y su evolución en el plano medio, aplicando la técnica 3DLIF (Gungor y Roberts 2009)	2.20
Figura 2.18. Montaje experimental para un sistema de grabación mediante patrón geométrico (Bashitialshaaer et al. 2012)	2.20
Figura 2.19. Montaje experimental para la metodología experimental desarrollada por Kikkert et al. (2010)	2.21
Figura 2.20. Comparación de resultados experimentales, de varios autores, y modelo numérico (Gildeh et al. 2015)	2.23
Figura 2.21. Comparativa entre estimaciones y medidas in situ de la salinidad, para cuatro modelos diferentes (Loyaw-Fernández et al. 2012)	2.24
Figura 2.22. Simulación numérica de una corriente de densidad en canal abierto y en carga (Jiang 2014)	2.25
Figura 3.1. Canal de ola-corriente, CITEEC-UDC	3.1
Figura 3.2. Esquema del falso fondo instalado sobre la base del canal de ola-corriente (a y b). Imagen del montaje experimental (c)	3.2
Figura 3.3. Vectrino (Nortek, 2004), (a). Puntos de medición para $H_A=0.3$ m y $H_A=0.4$ m (b)	3.3
Figura 3.4. Localización de las secciones de control (a) y localización de los perfiles de estudio en ambas secciones (b)	3.3
Figura 3.5. Perfiles de velocidad en la sección 1, para los dos calados $H_A=0.3$ m (a-c) y $H_A=0.4$ m (d-e), para las tres velocidades ensayadas $v=0.015$ m/s, $v=0.03$ m/s y $v=0.05$ m/s	3.4
Figura 3.6. Perfiles de velocidad en la sección 2, para los dos calados $H_A=0.3$ m (a-c) y $H_A=0.4$ m (d-e), para las tres velocidades ensayadas $v=0.015$ m/s, $v=0.03$ m/s y $v=0.05$ m/s	3.4
Figura 3.7. Montaje experimental suministro de salmuera	3.7
Figura 3.8. Montaje experimental del láser en el canal de experimentación del CITEEC	3.7
Figura 3.9. Fuentes de láser (a) y brazo articulado con el sistema óptico (b)	3.8
Figura 3.10. Cámaras CCD Imager ProX 2M© utilizadas	3.8
Figura 3.11. Montaje experimental para el funcionamiento de la técnica PIV (LaVision, 2007)	3.9
Figura 3.12. Ejemplo de malla de calibración para PIV (Anta, 2009)	3.10
Figura 3.13. Zonas susceptibles de pérdida de información por el rango dinámico de velocidades	3.10
Figura 3.14. Imagen de la urna de calibración para $H_A=30$ cm (a) y $H_A=40$ cm (b)	3.12
Figura 3.15. <i>Background</i> . Corrección de luz residual, inicial (a) y final (b)	3.12

Figura 3.16. <i>Energy Correction</i> . Imagen corregida, tomando como referencia un valor por defecto de 1000 counts (LaVision, 2013)	3.13
Figura 3.17. <i>Sheet Correction</i> . Intensidad lumínica homogénea en una sección horizontal	3.13
Figura 3.18. Perfiles verticales de intensidad lumínica, en la misma posición, para diferentes concentraciones de Rodamina 6G en la urna de calibración	3.14
Figura 3.19. Curvas de calibración para $H_A=0.3$ m (a) y $H_A=0.4$ m (b)	3.14
Figura 3.20. Sonda de fabricación propia (a) y sensor comercial Hach Lange, modelo HQ40D multi (b)	3.15
Figura 3.21. Calle de Karman asociada a un obstáculo circular en un flujo (Chen y H. 1995, a). Prototipos de sondas (b)	3.15
Figura 3.22. Posición de las sondas en la malla de conductivímetros (a) y emplazamiento de la malla en el canal de experimentación (b y c)	3.16
Figura 3.23. Registros brutos de voltaje para 3 espesores (a) y variación entre el inicio y el final del registro (b)	3.17
Figura 3.24. Registros de voltaje para 3 temperaturas diferentes	3.17
Figura 3.25. Procedimiento de calibración desarrollado para el sistema de conductivímetros	3.18
Figura 3.26. Comparación de los valores de densidad obtenidos con las dos opciones de calibración, para tres densidades de referencia	3.18
Figura 3.27. Errores cometidos por las dos opciones de calibración para las $\rho=1000.7$ (a), 1001.8 (b) y 1004.9 kg/m ³ (c)	3.19
Figura 3.28. RMS para todas las sondas y las concentraciones empleadas para las calibraciones en ambas metodologías, con las 5 temperaturas de referencia: T=13.5°C (a), 15°C (b), 17°C (c), 19°C (d) y 21°C (e)	3.19
Figura 3.29. Calibración para la sonda 1 mediante el método de la conductividad, opción 2	3.20
Figura 3.30. Evolución temporal (a) y campo de salinidad para un vertido de salmuera promediado con una malla de sensores de 3 x 4 (b)	3.20
Figura 3.31. Montaje experimental de técnicas de caracterización para campo cercano y campo lejano	3.21
Figura 3.32. Corrección de la imagen original (a) mediante filtro min/max (b), procesado (c) y postproceso (d). Nótese que se han eliminado datos de la zona derecha de la ventana de visión por deficiencias de la iluminación	3.24
Figura 3.33. Localización (a) y comparación del registro original con los tres filtros empleados, $X/DF_{rd}=1, 3$ y 6 (b, c y d)	3.25

Figura 3.34. Tratamiento de las imágenes tomadas con la técnica LIF	3.25
Figura 3.35. Aplicación del filtro mediana a los campos de concentraciones con radios de aplicación $R=1 \times 1$ (a), $R=2 \times 2$ (b), $R=3 \times 3$ (c) y $R=5 \times 5$ pixeles (d), en la zona marcada en el vertido.	3.26
Figura 3.36. Comparaciones con distintos filtros de mediana para los perfiles $X/DF_{rd}=0.1, 0.5$ y 2.5 (a), señalados en la Figura 3.35. Ampliación de las zonas señaladas en rojo (b)	3.27
Figura 3.37. Zona de medidas distorsionadas por la absorción de luz de la Rodamina 6G	3.27
Figura 3.38. Determinación de la zona de registro en régimen estacionario mediante diferentes métodos	3.28
Figura 3.39. Mapa de concentraciones obtenido con malla de conductivímetros bruto (a) y tras la aplicación de un filtro de mediana (b)	3.29
Figura 4.1. Campo de concentraciones LIF (a), campo de velocidades totales PIV (b), campo vectorial de velocidades con fondo de vorticidad (c) y fluctuaciones de la velocidad PIV (d)	4.2
Figura 4.2. Tipologías de vertidos ensayados en este trabajo de investigación	4.3
Figura 4.3. Eje de concentraciones del vertido sin filtrar y tras la aplicación del filtro	4.3
Figura 4.4. Sección vertical de velocidades (a) y ajuste polinómico de grado 3 (b)	4.4
Figura 4.5. Estimación de los puntos con velocidades máximas para un vertido en medio estacionario	4.4
Figura 4.6. Ejes de fluctuaciones, velocidades y concentraciones máximas para un vertido en medio estacionario, Tipo I (a) y dinámico co-flow, Tipos II y IV (b)	4.4
Figura 4.7. Vertido sin inversión, Tipo III, (a) y con inversión, Tipo V (b)	4.5
Figura 4.8. Trayectorias para vertidos con y sin inversión Tipo III (a) y V (b) respectivamente	4.5
Figura 4.9. Esquema vertido en Campo Cercano	4.6
Figura 4.10. Variación de los parámetros de estudio respecto a F_{rd} , (a) geométricas y (b) diluciones.	4.7
Figura 4.11. Influencia del parámetro F_{rd} en la evolución de la concentración de rodamina en el punto de cota máxima del eje	4.7
Figura 4.12. Evolución del límite entre campo cercano y campo lejano para diferentes velocidades del medio	4.8
Figura 4.13. Campos LIF y PIV C07 (Tipo I, estacionario)	4.9
Figura 4.14. Campos LIF y PIV C20 (Tipo III, $v=0.015$ m/s counter-flow)	4.9
Figura 4.15. Campos LIF y PIV C39 (Tipo IV, $v=0.05$ m/s co-flow)	4.9
Figura 4.16. Campos LIF y PIV C40 (Tipo V, $v=0.05$ m/s counter-flow)	4.9

Figura 4.17. Evolución longitudinal de las variables obtenidas adimensionalizadas. Posición (X, Y) del eje de concentraciones (a) y dilución (S) en el eje del vertido (b)	4.10
Figura 4.18. Evolución longitudinal de las variables PIV adimensionalizadas. (a) Trayectoria, (b) velocidad en el eje del vertido, (c) velocidad horizontal y (d) velocidad vertical	4.11
Figura 4.19. Análisis dimensionales de variables geométricas (a) y diluciones (b) para medio estacionario, correspondientes a la cota máxima del eje (Z_m) y el punto de retorno (X_r)	4.12
Figura 4.20. Análisis dimensional de la cota máxima alcanzada por el eje del vertido, Z_m (a), y la dilución en el mismo punto, S_m (b), para vertidos en un medio receptor dinámico	4.13
Figura 4.21. Evolución variables en medio estacionario	4.15
Figura 4.22. Evolución variables geométricas (a) y diluciones (b) en medio dinámico	4.15
Figura 4.23. Comparación con resultados de trabajos previos. Panel a, cota máxima alcanzada por el eje del vertido (Z_m). Panel b, dilución alcanzada en la cota máxima del eje (S_m).	4.16
Figura 4.24. Comparación con resultados de investigaciones previas. Panel a, cota máxima alcanzada por el vertido (Z_{me}). Panel b, dilución alcanzada en la cota máxima del eje (S_{me}).	4.16
Figura 4.25. Comparación de resultados para vertidos con impacto en la lámina libre, Roberts y Abessi (2015), respecto a valores sin impacto de la literatura, cajas. Posición de la cota máxima del eje (X_m). Cada columna representa un ángulo de inclinación de vertido, 30°, 45° y 60° respectivamente (de izquierda a derecha)	4.17
Figura 4.26. Comparación medio dinámico Z_{me}/DF_{rd}	4.18
Figura 4.27. Comparación medio dinámica (S_m/F_{rd})	4.18
Figura 5.1 Campos vectoriales para ensayo C07 (45°, medio estacionario, Tipo I). Velocidad media (a), tensiones Reynolds (b), fluctuaciones de la velocidad horizontal (c) y fluctuaciones de la velocidad vertical (d)	5.3
Figura 5.2. Campos vectoriales para ensayo C20 (135°, medio dinámico counter-flow, $v=0.015$ m/s, Tipo III). Velocidad media (a), tensiones Reynolds (b), fluctuaciones de la velocidad horizontal (c) y fluctuaciones de la velocidad vertical (d)	5.4
Figura 5.3. Campos vectoriales para ensayo C39 (45°, medio dinámico co-flow, $v=0.05$ m/s, Tipo IV). Velocidad media (A), tensiones Reynolds (B), fluctuaciones de la velocidad horizontal (C) y fluctuaciones de la velocidad vertical (D)	5.4
Figura 5.4. Campos vectoriales para ensayo C40 (135°, medio dinámico counter-flow, $v=0.05$ m/s, Tipo V). Velocidad media (A), tensiones Reynolds (B), fluctuaciones de la velocidad horizontal (C) y fluctuaciones de la velocidad vertical (D)	5.5
Figura 5.5. Campos escalares para ensayo C07 (45°, medio estacionario, Tipo I). Vorticidades (a), velocidad horizontal adimensionalizada (b), velocidad vertical adimensionalizada (c) y vertido instantáneo (d)	5.5

Figura 5.6. Campos escalares para ensayo C20 (135°, counter-flow, $v=0.015$ m/s, Tipo III). Vorticidades (a), velocidad horizontal adimensionalizada (b), velocidad vertical adimensionalizada (c) y vertido instantáneo (d)	5.6
Figura 5.7. Campos escalares para ensayo C39 (45°, co-flow, $v=0.05$ m/s, Tipo IV). Vorticidades (a), velocidad horizontal adimensionalizada (b), velocidad vertical adimensionalizada (c) y vertido instantáneo (d)	5.7
Figura 5.8. Campos escalares para ensayo C40 (135°, counter-flow, $v=0.05$ m/s, Tipo V). Vorticidades (a), velocidad horizontal adimensionalizada (b), velocidad vertical adimensionalizada (c) y vertido instantáneo (d)	5.7
Figura 5.9. Vertido instantáneo (a) y promediado (b) de un campo de concentraciones	5.9
Figura 5.10. Campo de diluciones (S) para ensayo C07 (45°, medio estacionario, Tipo I)	5.9
Figura 5.11. Campo de diluciones (S) para ensayo C20 (135°, counter-flow, $v=0.015$ m/s, Tipo III)	5.10
Figura 5.12. Campo de diluciones (S) para ensayo C39 (135°, co-flow, $v=0.05$ m/s, Tipo IV)	5.10
Figura 5.13. Campo de diluciones (S) para ensayo C40 (135°, counter-flow, $v=0.05$ m/s, Tipo V)	5.10
Figura 5.14. Evolución de la cota máxima alcanzada por el vertido (Z_{me}) para $\theta=30^\circ$, en co-flow (rojo) y counter-flow (azul)	5.11
Figura 5.15. Evolución de la cota máxima alcanzada por el vertido (Z_{me}) para $\theta=45^\circ$, en co-flow (rojo) y counter-flow (azul)	5.12
Figura 5.16. Evolución de la cota máxima alcanzada por el vertido (Z_{me}) para $\theta=60^\circ$, en co-flow (rojo) y counter-flow (azul)	5.12
Figura 5.17. Evolución de la dilución en la cota máxima del eje para diferentes ángulos de descarga y velocidades del medio receptor. Global (a), $\theta=30^\circ$ y 150° (b), $\theta=45^\circ$ y 135° (c), $\theta=60^\circ$ y 120° (d)	5.14
Figura 5.18. Sistema de referencia para vertidos en co-flow, tipos I, II y IV (a) y counter-flow, tipos III y V (b).	5.15
Figura 5.19. Evolución del vertido para ensayo C07 (45°, medio estacionario, Tipo I). Localización de los perfiles (a), velocidad media (b), dilución (c) y comparación con perfil gaussiano (d) y (e)	5.17
Figura 5.20. Evolución del vertido para ensayo C20 (45°, medio dinámico $v=0.015$ m/s, counter-flow, Tipo III). Localización de los perfiles (a), velocidad media (b), dilución (c) y comparación con perfil gaussiano (d) y (e)	5.18
Figura 5.21. Evolución del vertido para ensayo C39 (45°, medio dinámico $v=0.05$ m/s, co-flow, Tipo IV). Localización de los perfiles (a), velocidad media (b), dilución (c) y comparación con perfil gaussiano (d) y (e)	5.20

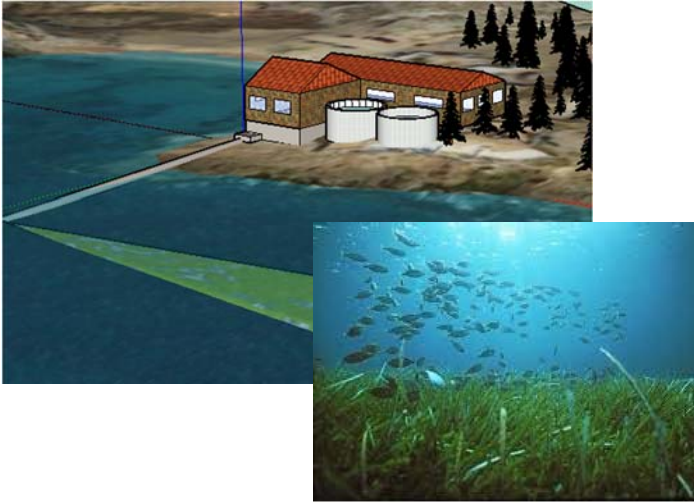
Figura 5.22. Evolución del vertido para ensayo C40 (45°, medio dinámico $v=0.05$ m/s, counter-flow, Tipo V). Localización de los perfiles (A), velocidad media (B), dilución (C) y comparación con perfil gaussiano (D) y (C)	5.21
Figura 5.23. Campo de fluctuaciones del módulo de la velocidad (a) y concentraciones (b) ensayo C07 (45°, medio estacionario, Tipo I). Secciones transversales de la velocidad total (c) y concentraciones (d)	5.22
Figura 5.24. Campo de fluctuaciones del módulo de la velocidad (a) y concentraciones (b) ensayo C20 (45°, counter-flow, $v=0.015$ m/s, Tipo III). Secciones transversales de la velocidad total (c) y concentraciones (d)	5.23
Figura 5.25. Campo de fluctuaciones del módulo de la velocidad (a) y concentraciones (b) ensayo C39 (45°, co-flow, $v=0.05$ m/s, Tipo IV). Secciones transversales de la velocidad total (c) y concentraciones (d)	5.24
Figura 5.26. Campo de fluctuaciones de velocidades (a) y concentraciones (b) ensayo C40 (45°, counter-flow, $v=0.05$ m/s, Tipo V). Secciones transversales de fluctuaciones de la velocidad (c) y concentraciones (d)	5.25
Figura 6.1. Tipologías de vertido analizadas: $u_r F_{rd} = 0$, (Tipo I). Vertido co-flow $0.5 < u_r F_{rd} < 0.8$ (Tipo II). Vertido counter-flow, $0.5 < u_r F_{rd} < 0.8$ (Tipo III). Vertido co-flow, $0.8 < u_r F_{rd} < 2.5$ (Tipo IV). Vertido counter-flow, $0.8 < u_r F_{rd} < 2.5$ (Tipo V)	6.2
Figura 6.2. Montaje experimental de las técnicas PIV/LIF y conductivímetros para campo cercano (a), y dos fases de medida en campo lejano (b y c). Caracterización de conjunta de ambos campos (d)	6.3
Figura 6.3. L03 (60°, medio estacionario, Tipo I). Módulo de la velocidad (a). Velocidad horizontal (u_x , b). Velocidad vertical (u_z , c)	6.4
Figura 6.4. L06 (60°, co-flow, $v=0.015$ m/s, Tipo II). Módulo de la velocidad (a). Velocidad horizontal (u_x , b). Velocidad vertical (u_z , c)	6.5
Figura 6.5. L07 (120°, counter-flow, $v=0.03$ m/s, Tipo III). Módulo de la velocidad (a). Velocidad horizontal (u_x , b). Velocidad vertical (u_z , c)	6.6
Figura 6.6. L14 (60°, co-flow, $v=0.05$ m/s, Tipo IV). Módulo de la velocidad (a). Velocidad horizontal (u_x , b). Velocidad vertical (u_z , c)	6.7
Figura 6.7. L15 (120°, co-flow, $v=0.05$ m/s, Tipo IV). Módulo de la velocidad (a). Velocidad horizontal (u_x , b). Velocidad vertical (u_z , c)	6.9
Figura 6.8. Campos de dilución obtenidos para los ensayos L03 Tipo I (a), L06, Tipo II (b), L07 Tipo III (c), L14 Tipo IV (d) y L15 Tipo V (e)	6.10
Figura 6.9. Ubicación de perfiles para ensayos L03 (60°, estacionario, Tipo I) y L14 (60°, co-flow, $v=0.05$ m/s, Tipo V) (a, b) y evolución de perfiles de dilución para ensayo (c, d)	6.12
Figura 6.10. Eje velocidades máximas Ensayos L03 (60°, estacionario, Tipo I)	6.13

Figura 6.11. Campos de fluctuaciones de velocidad (a) y concentraciones (b)	6.13
Figura 6.12. Metodología de cálculo para X_s , para el campo de fluctuaciones de velocidades (a) y de concentraciones (b). Las figuras representan la evolución de las fluctuaciones a lo largo del eje del vertido	6.14
Figura 6.13. Evolución del límite X_s respecto a la velocidad del medio receptor ($u_r F_{rd}$)	6.15
Figura 6.14. Evolución del espesor de la corriente de gravedad para la Spreading Layer y el campo lejano.	6.16
Figura 6.15. Esquema vertido en campo cercano	6.16
Figura 6.16 Evolución X_s para $u_r F_{rd}$ crecientes	6.17
Figura 6.17. Evolución R_i en X_s para diferentes velocidades del medio receptor	6.18
Figura 6.18. Perfiles verticales de la corriente de gravedad L03 (60°, medio estacionario, Tipo I) velocidad adimensionalizada (a) y diluciones (b)	6.19
Figura 6.19. Perfiles verticales de la corriente de gravedad L06 (60°, co-flow, $v=0.015$ m/s, Tipo II) velocidad adimensionalizada (a) y diluciones (b)	6.20
Figura 6.20. Perfiles verticales de la corriente de gravedad L07 (120°, counter-flow, $v=0.015$ m/s, Tipo III) velocidad adimensionalizada (a) y diluciones (b)	6.21
Figura 6.21. Perfiles verticales de la corriente de gravedad L14 (60°, co-flow, $v=0.05$ m/s, Tipo IV) velocidad adimensionalizada (a) y diluciones (b)	6.22
Figura 6.22. Perfiles verticales de la corriente de gravedad L15 (120°, counter-flow, $v=0.05$ m/s, Tipo V) velocidad adimensionalizada (a) y diluciones (b)	6.23
Figura 6.23. Evolución del número de Richardson respecto a la velocidad del medio receptor	6.24
Figura 6.24. Disposición de los sensores de conductividad en el canal de experimentación	6.25
Figura 6.25. Posición de las sondas de conductividad.	6.25
Figura 6.26 Ensayo L03 (60°, medio estacionario, Tipo I). Campo de salinidad una vez se ha alcanzado el medio estacionario (a). Evolución temporal del eje inferior (b). Evolución temporal del eje medio (c). Evolución temporal del eje superior (d)	6.26
Figura 6.27. Ensayo L06 (60°, co-flow, $v=0.015$ m/s, Tipo II). Campo de salinidad una vez se ha alcanzado el medio estacionario (a). Evolución temporal del eje inferior (b). Evolución temporal del eje medio (c). Evolución temporal del eje superior (d)	6.27
Figura 6.28. Ensayo L07 (120°, counter-flow, $v=0.015$ m/s, Tipo III). Campo de salinidad una vez se ha alcanzado el medio estacionario (a). Evolución temporal del eje inferior (b). Evolución temporal del eje medio (c). Evolución temporal del eje superior (d)	6.28

- Figura 6.29. Ensayo L14 (60°, co-flow, $v=0.05$ m/s, Tipo IV). Campo de salinidad una vez se ha alcanzado el medio estacionario (a). Evolución temporal del eje inferior (b). Evolución temporal del eje medio (c). Evolución temporal del eje superior (d) 6.29
- Figura 6.30. Ensayo L15 (120°, counter-flow, $v=0.05$ m/s, Tipo V). Campo de salinidad una vez se ha alcanzado el medio estacionario (a). Evolución temporal del eje inferior (b). Evolución temporal del eje medio (c). Evolución temporal del eje superior (d) 6.29
- Figura 6.31. Ensayo L03 (60°, medio estacionario, Tipo I). Campo de la fluctuación una vez alcanzado el medio estacionario (a). Evolución de la fluctuación del eje inferior (b). Evolución de la fluctuación del eje medio (c). Evolución de la fluctuación del eje superior (d) 6.30
- Figura 6.32 Ensayo L06 (60°, co-flow, $v=0.015$ m/s, Tipo II). Campo de la fluctuación una vez alcanzado el medio estacionario (a). Evolución de la fluctuación del eje inferior (b). Evolución de la fluctuación del eje medio (c). Evolución de la fluctuación del eje superior (d) 6.31
- Figura 6.33. Ensayo L07 (120°, counter-flow, $v=0.015$ m/s, Tipo III). Campo de la fluctuación una vez alcanzado el medio estacionario (a). Evolución de la fluctuación del eje inferior (b). Evolución de la fluctuación del eje medio (c). Evolución de la fluctuación del eje superior (d) 6.32
- Figura 6.34. Ensayo L15 (60°, co-flow, $v=0.05$ m/s, Tipo IV). Campo de la fluctuación una vez alcanzado el medio estacionario (a). Evolución de la fluctuación del eje inferior (b). Evolución de la fluctuación del eje medio (c). Evolución de la fluctuación del eje superior (d) 6.32
- Figura 6.35. Ensayo L16 (120°, counter-flow, $v=0.05$ m/s, Tipo V). Campo de la fluctuación una vez alcanzado el medio estacionario (a). Evolución de la fluctuación del eje inferior (b). Evolución de la fluctuación del eje medio (c). Evolución de la fluctuación del eje superior (d) 6.33
- Figura 6.36. Variación del número de Richardson respecto a la velocidad del medio y la configuración de descarga, promediado de sondas S19, S20 y S21 6.34
- Figura 6.37. Evolución de las diluciones para vertidos con $\theta=45^\circ$ (a) y 60° (b), para los distintos tipos de descargas analizadas en este trabajo 6.35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Campaña experimental para campo cercano	1.8
Tabla 1.2. Campaña experimental para campo lejano	1.8
Tabla 2.1. Valores críticos de supervivencia para diferentes tipos de fanerógamas marinas, (Palomar, 2014)	2.1
Tabla 2.2. Valores de los coeficientes adimensionales para: cota máxima del vertido (Z_{me}) y dilución y posición de la cota máxima de la trayectoria (S_m, X_m, Z_m)	2.8
Tabla 2.3. Rangos del número de Froude densimétrico empleado por las investigaciones analizadas, y las metodologías empleadas para el estudio	2.9
Tabla 2.4. Coeficientes experimentales para medio dinámico	2.11
Tabla 2.5. Error promedio cometido de los modelos comerciales respecto a valores experimentales. < Infravaloran, > Sobrevaloran (Palomar et al. 2012b)	2.24
Tabla 3.1. Parámetros fijados para técnica PIV	3.11
Tabla 3.2. Campaña experimental para campo cercano	3.22
Tabla 3.3. Campaña experimental para campo lejano	3.23
Tabla 4.1. Incrementos de la dilución en la cota máxima del eje (S_m) para las velocidades ensayadas, respecto a vertidos en medio estacionario	4.14
Tabla 4.2. Resultados experimentales en medio estacionario	4.14
Tabla 4.3. Resultados experimentales en medio dinámico	4.14
Tabla 6.1. Valores para inicio (X_i) y final (X_s) para la zona de transición adimensionalizadas	6.14
Tabla 6.2. Valores de R_i para la corriente de gravedad totalmente desarrollada.	6.24
Tabla 6.3. Valores de dilución y R_i alcanzado en la última posición analizada por la malla de conductivímetros, sondas S19, S20 y S21	6.33



CAPITULO I.

INTRODUCCIÓN, RESUMEN Y CONCLUSIONES

RESUMEN

En este capítulo se realiza una síntesis de los principales resultados y conclusiones de esta tesis doctoral. Se comienza con una introducción del fenómeno físico del vertido hipersalino de las plantas desaladoras en el medio marino.

Posteriormente se presentan los objetivos del trabajo. Dado que la metodología de caracterización de la descarga es de especial importancia en este documento, se detallan las principales técnicas de medida empleadas. En particular, se hace especial referencia al sistema de conductivímetros diseñado para la medición de la concentración del vertido en campo lejano, que ha sido objeto de una patente de invención.

A continuación, se presenta una síntesis de los principales resultados obtenidos en este trabajo, resaltando aquellos que suponen un avance significativo respecto a la literatura. En este sentido se mencionan específicamente los resultados del campo cercano en medio dinámico, en ambos sentidos de la corriente, y el análisis integrado campo cercano – campo lejano, así como la caracterización de la zona de transición.

Por último, se expondrán las principales conclusiones obtenidas y futuras líneas investigación que permitan completar este trabajo.

ÍNDICE

1	CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN, RESUMEN Y CONCLUSIONES	1.1
1.1	Introducción	1.1
1.2	Síntesis y resultados	1.5
1.2.1	Estado del arte y análisis de vertidos hiperdensos	1.5
1.2.2	Montaje y campaña experimental	1.6
1.2.3	Análisis dimensional del campo cercano	1.9
1.2.4	Análisis del vertido en campo cercano	1.10
1.2.5	Análisis del vertido en campo lejano	1.13
1.3	Principales conclusiones y aportaciones.....	1.17
1.3.1	Metodología experimental	1.17
1.3.2	Campo cercano	1.18
1.3.3	Campo lejano	1.18
1.4	Futuras líneas de trabajo propuestas	1.19

1 CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN, RESUMEN Y CONCLUSIONES

1.1 Introducción

El aumento demográfico en algunas áreas del planeta, y la creciente limitación de las reservas de agua potable por falta de medios o por sequías prolongadas, está generando la necesidad de fuentes alternativas de recursos hídricos que no se vean afectadas por estos factores. Un ejemplo cercano es el de las Islas Canarias, donde la situación deficitaria de recursos hídricos es objeto de crecientes actuaciones. En esta región, el crecimiento de volumen de agua potable producido por plantas desaladoras ha sido exponencial desde la primera planta ejecutada en 1964. Sólo en el periodo de 2010 a 2013 el aumento fue de un 30 %, con el que se cubrió el 100 % de las necesidades de las actividades económicas de las áreas más desarrolladas (www.gobiernodecanarias.org).

Esta tendencia es similar a la experimentada en muchas otras áreas, especialmente cerca de la costa donde la concentración poblacional es mayor. En estas zonas las plantas de desalación han cobrado una especial relevancia para la producción de agua apta para consumo humano, o para el desarrollo de actividades productivas. Actualmente se cree que más de 300 millones de personas dependen diariamente del agua desalada para una o varias de sus actividades (www.idadesal.org). Torres y Medina (1999) presentaron un estudio sobre la distribución de las plantas desaladoras en el mundo (Figura 1.1).

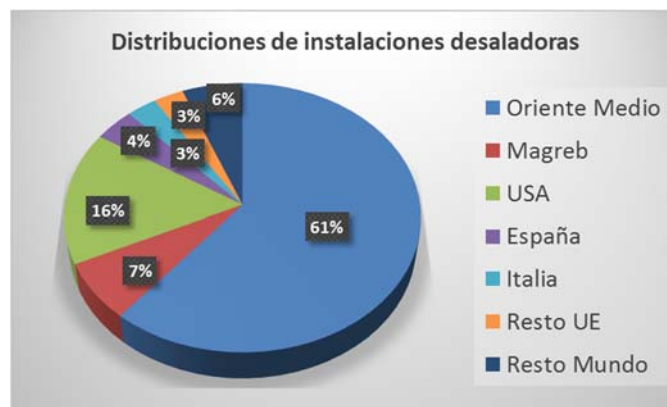


Figura 1.1. Distribución de las plantas desaladoras en el mundo a principios de 2000 (Torres y Medina 1999)

Como se puede observar gran parte de la producción mundial de agua potable proveniente de desaladoras, se localiza en la región de Oriente Medio (Figura 1.2). El mayor inconveniente de la producción de agua potable mediante la desalación, es la obtención en el proceso de un producto residuo de alta salinidad (salmuera), que es devuelto al medio marino. Las características de esta salmuera dependen mucho de las técnicas empleadas en la desalación, así como del proceso de eliminación de este producto, que es devuelto al medio marino.

Los métodos más comunes para la obtención de agua potable a partir de agua marina son de dos tipos. En primer lugar la evaporación en el que se trata agua de mar para posteriormente ser condensada y producir agua apta para el consumo. En segundo lugar la ósmosis inversa, más común, y en la que el agua salada es forzada a atravesar membranas por medio de la presión osmótica. De esta forma, las sales minerales quedan atrapadas en los sucesivos filtrados obteniendo el agua potable como resultado de la parte que pasa a través de estos filtros.

Los rendimientos de ambas técnicas son muy dispares. En el caso de la evaporación, la producción de agua respecto a la cantidad inicial tomada del medio marino es de aproximadamente el 15 %. El rendimiento de la ósmosis inversa alcanza el 45 % (Bleninger, 2012), aunque es energéticamente más cara

con residuos generados de mayor densidad, llegando a doblar la concentración inicial del agua bruta (agua marina).

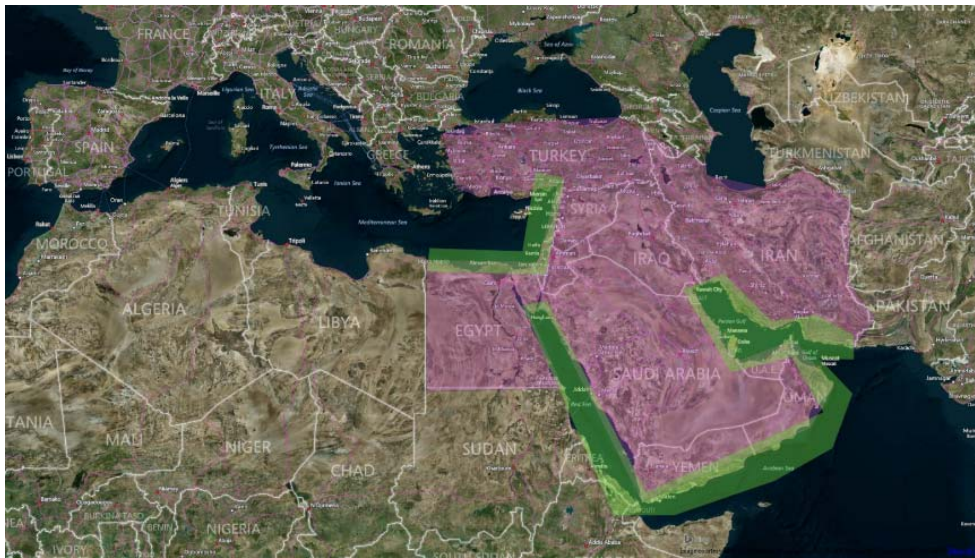


Figura 1.2. Zona de mayor concentración de plantas desaladoras en el mundo (rosa) y zonas de vertido más afectadas por la descarga de salmuera al medio marino (verde)

El otro factor a tener en cuenta para la estimación de la densidad del flujo vertido al mar es el sistema de eliminación, que suele ser de dos tipos: descargas superficiales y descargas sumergidas (Figura 1.3). Aunque no es objeto de esta tesis doctoral, es conocido que el vertido de las salmueras en ambos casos supone un riesgo medioambiental en potencia, sobre todo para las especies bentónicas que son el primer eslabón de la cadena trófica (Fernandez-Torquemada y Sanchez-Lizaso, 2005).

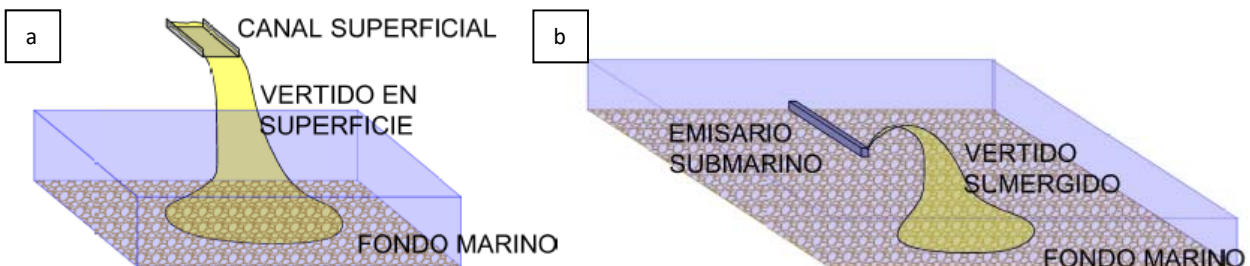


Figura 1.3. Sistemas más comunes de vertidos marinos de salmueras. Vertidos por superficie (a) y emisarios submarinos (b)

El objetivo perseguido para una eliminación más eficaz de la salmuera es lograr la mayor dilución posible, a fin de minimizar el impacto del vertido en el ecosistema. Esta dilución está relacionada con la hidrodinámica presente en el medio, de forma que, cuanto mayor sea la turbulencia en el proceso de retorno de la salmuera al medio marino, mayor será la mezcla entre el medio receptor y el efluente. Estos fenómenos de mezcla dependen en gran medida de las condiciones físicas del sistema de descarga (caudal del efluente, velocidad inicial, etc.) y de los factores ambientales del medio receptor (corrientes, oleaje, profundidad de vertido, etc.).

La fuente de dilución de los sistemas de descargas reside en los procesos de mezcla del vertido al precipitarse sobre el fondo del medio marino, por lo que a mayor profundidad en el punto de descarga mayor será la efectividad de este sistema de eliminación (Bleninger y Jirka, 2008). Se ha comprobado que, aumentando la trayectoria recorrida por el vertido se potencia su dilución en el medio receptor, lo que se consigue de forma más eficiente mediante una descarga sumergida con chorro inclinado. Sin embargo, en este caso la fuente de dilución del efluente reside en la velocidad de salida del flujo hiperdenso en la boca del difusor. Una vez que se ha producido el chorro inicial, la energía cinética se transforma en energía

potencial durante la fase ascendente. A continuación, alcanzada la cota máxima del efluente, la salmuera desciende de nuevo debido a la flotabilidad negativa. Por esta razón, cuanto mayor sea la profundidad de descarga, mayor será la energía cinética en el difusor y mayor potencial de dilución a lo largo de su trayectoria (Roberts et al., 1997).

Los vertidos de salmuera se estructuran en dos zonas bien diferenciadas, campo cercano y campo lejano. El campo cercano, área próxima al difusor, presenta zonas de elevada fluctuación de la velocidad y grandes potenciales de dilución, con procesos físicos de escalas temporales de minutos y espaciales de metros. Por otro lado, en el campo lejano (zonas más alejadas del difusor) se acaba formando una corriente de gravedad por el fondo, donde la fuente de dilución se debe sobre todo a la rugosidad del fondo, pendiente y naturaleza (densidad) del flujo (Palomar, 2014). La Figura 1.4 muestra un esquema de vertido y las zonas que lo comprenden.

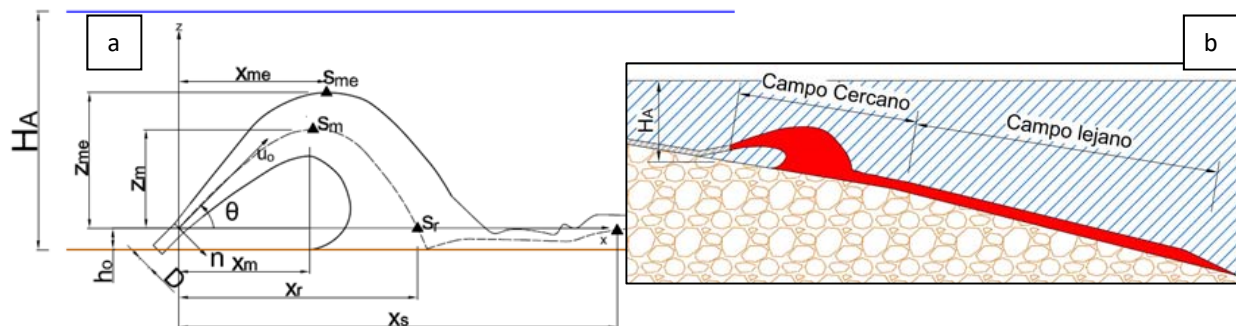


Figura 1.4. Esquema de un vertido de salmuera en medio estacionario (a) y regiones que lo conforman (b)

Donde:

Z_{me} : cota máxima del vertido.

Z_m, X_m : cota máxima del eje del vertido y su posición horizontal.

X_r : punto de retorno, que es la posición a la que el eje del vertido pasa por la cota vertical (h_0) del difusor (origen).

X_i : punto de impacto del vertido.

S_i : dilución alcanzada en los puntos mencionados. $S_i=C_i/C_0$, donde C_i es la concentración en un punto cualquiera del vertido, y C_0 la concentración inicial.

H_A : profundidad de descarga.

u_0 : velocidad inicial del chorro.

D : diámetro del difusor.

h : espesor de la corriente de gravedad.

θ : ángulo de descarga del vertido.

Entrando en el análisis paramétrico de los vertidos hipersalinos, y recordando el objetivo de minimizar el impacto negativo de las salmueras sobre el ambiente marino, los sistemas de descarga son diseñados para potenciar la dilución del efluente dentro del ambiente receptor. Por lo tanto, para realizar el diseño del emisario se tiene en cuenta la geometría del sistema de vertido, que ha sido objeto de numerosas investigaciones entre las que cabe destacar Roberts et al. (1997) o Jirka (2004). También se debe contemplar la ubicación de la descarga para aprovechar los condicionantes ambientales y mejorar así la dilución del vertido. Gungor y Roberts (2009), entre otros, llevaron a cabo un trabajo en el que se obtuvieron leyes experimentales para el diseño de una descarga vertical de salmueras en un medio receptor dinámico, sentando las bases de futuros trabajos como la presente tesis doctoral.

Una vez que el vertido impacta sobre el fondo marino, la dispersión de la salmuera provoca la formación de una corriente de gravedad que ha sido estudiada por Chowdhury y Testik (2014), o más recientemente por Perez-Diaz et al. (2015), aunque no de manera tan profusa como el campo cercano. Este flujo

densimétrico es el responsable de la mayor acumulación de salmuera en el fondo, debido a su escaso potencial de dilución. Por tanto, la falta de estudios centrados en este campo genera cierto desconocimiento de los procesos físicos que tienen lugar en las zonas más alejadas del difusor. Esta laguna del conocimiento se complementa, en parte, con los trabajos que tienen como objetivo caracterizar las corrientes de gravedad originadas, no sólo por diferencias de densidad, sino también por corrientes de turbidez con una alta concentración de sólidos en suspensión (ver por ejemplo Altinakar et al., 1996).

Históricamente, el estudio de los vertidos de salmuera en medios marinos se ha restringido al campo cercano y casi siempre en un medio receptor estacionario. De este modo se han obtenido valores de diluciones conservadoras, al no existir un forzador externo que potencie la mezcla (corrientes, oleaje). Este hecho provoca que, en general, se pueda asumir que las recomendaciones de estos estudios pueden aumentar innecesariamente los costes de construcción de los emisarios.

Finalmente, para alcanzar un equilibrio entre los aspectos prácticos y medioambientales, se hace necesario el estudio de las descargas de salmuera abarcando campo cercano y lejano. Además, este análisis se debe realizar con diferentes condicionantes ambientales para definir correctamente la influencia del entorno sobre el comportamiento del vertido. Por ello, se deberán tener en cuenta factores como el calado, la velocidad de la corriente del medio y su sentido respecto al chorro inicial (mareas). La Figura 1.5 muestra el esquema de un vertido de desaladora y las variables ambientales mencionadas.



Figura 1.5. Esquema de vertido de salmuera en un medio marino dinámico

Como resultado del análisis del estado del conocimiento realizado en este campo, se identificó la posibilidad de estudiar con mayor detalle algunos aspectos del fenómeno físico de los vertidos hipersalinos en el medio marino, y que son presentados a continuación.

El **objetivo principal** de esta investigación es el **estudio del comportamiento de las descargas de salmuera**, mediante emisario submarino, **bajo diferentes condiciones ambientales tanto en campo cercano como en campo lejano**. Como parte novedosa de los resultados obtenidos en esta investigación, se plantean formulaciones empíricas para determinar el comportamiento de las salmueras en ambientes receptores estacionarios y dinámicos (cotas, diluciones, alcances, etc.). Los resultados del campo cercano en medio dinámico, caracterización en planta y perfil del campo lejano, y análisis de la zona de transición, son considerados novedosos y de gran relevancia científica.

La ejecución de los ensayos de la investigación ha involucrado varias técnicas experimentales, entre las que destaca el desarrollo de una metodología innovadora basada en sensores de conductividad. Este sistema ha sido registrado como **patente de invención** en la Oficina Española de Patentes y Marcas (OEPM), con fecha 22/01/2016 y **número de solicitud P20160006**. La patente ha servido para la caracterización de la corriente de gravedad formada en campo lejano, y supone también un avance en el

estado del arte para este tipo de investigaciones, que puede ser extrapolado a vertidos con flotabilidad positiva.

1.2 Síntesis y resultados

En este apartado se presenta una síntesis de los resultados más relevantes de la tesis doctoral. Para mantener la coherencia con el resto del documento, se presentan cuatro subapartados que se corresponden con los Capítulos 2 a 6 del texto completo.

1.2.1 Estado del arte y análisis de vertidos hiperdensos

En el Capítulo 2 se realiza una revisión del estado del arte de vertidos de desaladoras en medio marino, así como de las técnicas empleadas para la caracterización de la descarga. Esta revisión de la literatura se centra en primer lugar en el análisis de las dos zonas de estudio de los vertidos hiperdensos, campo cercano y campo lejano. La aproximación al fenómeno físico se ha realizado a través de las leyes que rigen los vertidos sumergidos de flotabilidad negativa, mediante el análisis dimensional de los parámetros de estudio.

A continuación, se determina la influencia de éstos sobre el proceso físico que experimentan los vertidos de salmueras. Los principales parámetros adimensionales empleados en la literatura son el número densimétrico de Froude (F_{rd}) y el número de Reynolds (R_e) para campo cercano, mientras que en campo lejano se emplea el número de Richardson (R_i) (Ecuaciones 1.1 a 1.4).

$$F_{rd} = \frac{u_o}{\sqrt{Dg'_o}} \quad [1.1]$$

$$g'_o = \frac{(\rho_o - \rho_a)g}{\rho_a} \quad [1.2]$$

$$R_e = \frac{\rho_o u_o D}{\nu_o} \quad [1.3]$$

$$R_i = \frac{g'h}{u^2} \cos(\alpha) \quad [1.4]$$

Donde:

u_o : velocidad inicial del chorro.

D : diámetro del difusor.

g'_o : gravedad reducida calculada al inicio del vertido

ρ_a : densidad del ambiente receptor.

ρ_o : densidad inicial del vertido.

g' : gravedad reducida en una posición cualquiera de la corriente de gravedad.

h : espesor de la corriente de gravedad.

u : velocidad de avance de la corriente de gravedad.

α : pendiente del fondo del medio receptor.

ν_o : viscosidad dinámica del vertido.

Para describir la relación entre el vertido y la hidrodinámica del medio receptor se emplea el parámetro adimensional $u_r F_{rd}$ (Roberts y Toms, 1987), que relaciona la velocidad del medio y la velocidad del efluente ($u_r = v/u_o$) con las propiedades físicas de la descarga (F_{rd}).

Otro de los aspectos principales de la revisión del estado del arte es el análisis de los sistemas de caracterización de vertidos hiperdensos. En primer lugar se desarrolla el principio de funcionamiento de

las técnicas láser empleadas en este y otros estudios: PIV (Particle Image Velocimetry) y LIF (Laser Induced Fluorescence). Con esta tecnología se puede caracterizar simultáneamente velocidades y concentraciones. La aplicación de estas técnicas, aunque no es novedosa, se ha realizado de forma que se pueda analizar la mayor longitud posible de vertido. Para ello, se solaparon los campos de visión tanto para PIV como para LIF, lo que permitió analizar de forma conjunta el campo cercano y lejano.

Por otro lado, la caracterización del campo lejano se ha realizado mediante la aplicación de un sistema de conductivímetros de diseño y calibración propia en el marco de esta tesis doctoral. Este sistema permite analizar la dispersión de la corriente de gravedad en planta y, dado su emplazamiento, completa la información obtenida en alzado por la técnica LIF. La Figura 1.6 muestra las diferentes zonas del vertido y la metodología empleada para la caracterización de cada una de ellas.

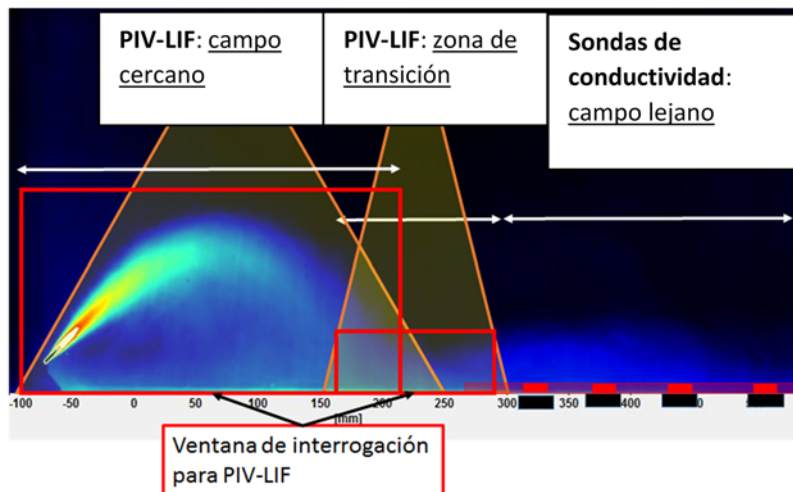


Figura 1.6. Técnicas de caracterización aplicadas y sus zonas de actuación

Por último, el Capítulo 2 hace una pequeña descripción de los métodos numéricos empleados para estimar el alcance y el comportamiento de las descargas de salmuera. Un buen análisis de varios modelos numéricos fue realizado por Palomar et al. (2012b).

1.2.2 Montaje y campaña experimental

El Capítulo 3 de este documento se centra en la descripción de las instalaciones y las metodologías de ensayo usadas, además del montaje experimental. Las instalaciones empleadas en este trabajo se encuentran en el Centro de Innovación Tecnológica da Edificación e Enxeñaría Civil (CITEEC) de la Universidade da Coruña (UDC). Concretamente se ha empleado el canal de ola-corriente de dimensiones (0.6 m x 0.8 m x 25 m), cuyo esquema se muestra en la Figura 1.7.



Figura 1.7. Esquema del canal de ola-corriente empleado en la ejecución de ensayos

El sistema de caracterización desarrollado por el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente GEAMA, al que pertenece el doctorando, para la medición de los campos de concentración en campo lejano, se describe en detalle con especial atención a la metodología de calibración y validación del mismo. Este sistema permite obtener y analizar la evolución de los campos de salinidad en planta, de forma que

junto con el estudio en perfil completa el análisis de la corriente de gravedad. La Figura 1.8 muestra un esquema del montaje experimental de esta herramienta y su posición respecto al vertido.

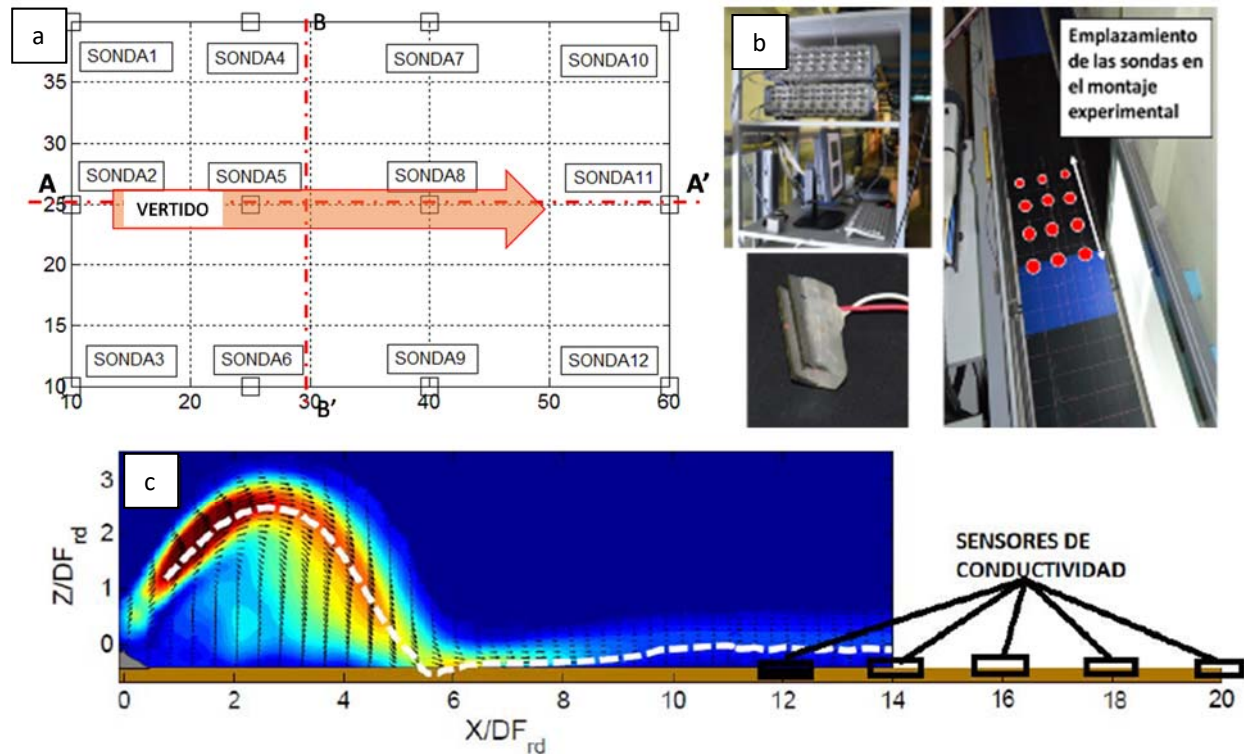


Figura 1.8. Posición de las sondas en la malla de conductivímetros (a) y emplazamiento de la malla en el canal de experimentación (b y c)

La campaña experimental realizada en esta tesis doctoral consta de dos baterías de ensayo correspondientes a campo cercano y campo lejano. Para la caracterización del campo cercano se han empleado exclusivamente técnicas láser, a fin de registrar los campos vectoriales y de concentraciones (PIV y LIF respectivamente) en un plano vertical. En total se ejecutaron 42 ensayos en campo cercano (Tabla 1.1), los cuales se separan en 4 bloques diferentes correspondientes a las 4 velocidades del medio ensayadas ($v=0, 0.015, 0.03$ y 0.05 m/s).

Por otro lado, la batería de ensayo para campo lejano contempla la ejecución de 15 vertidos, en los que el objetivo fue caracterizar la zona de transición entre campo cercano y lejano, y la corriente de gravedad del campo lejano. En este caso se han empleado las mismas técnicas láser usadas en campo cercano, y además se registraron los campos de salinidad en planta mediante la malla de conductivímetros de fabricación propia. La Tabla 1.2 muestra de forma resumida las variaciones en los parámetros geométricos y ambientales, haciendo referencia especial a la velocidad del medio, calado y sentido de la corriente respecto a la salida del efluente, simulando así el cambio de marea. En este sentido, los valores del ángulo de descarga de $120^\circ, 135^\circ$ y 160° corresponden al vertido en sentido inverso al de la corriente (counter-flow).

Tabla 1.1. Campaña experimental para campo cercano

	Ensayo	Ángulo θ (°)	Diámetro del difusor D (mm)	Velocidad de descarga U_o (m/s)	Profundidad de descarga H_A (m)	Número de Reynolds Re	Número Froude dendimétrico F_{rd}	Velocidad del medio v (m/s)	$u_r = u_o/v$ $u_r F_{rd}$
V=0 (m/s)	C01-C12	30, 45 y 60	2 y 4	0.55 a 1.2	0.3 y 0.4	903 a 2500	22 a 61	0	0
V=0.015 (m/s)	C13-C22	30-150 45-135 60-120						0.015	0.5 a 0.8
V=0.03 (m/s)	C23-C32							0.03	1 a 1.55
V=0.05 (m/s)	C33-C42							0.05	1.7a 2.55

Tabla 1.2. Campaña experimental para campo lejano

	Ensayo	Ángulo θ (°)	Diámetro del difusor D (mm)	Velocidad de descarga U_o (m/s)	Profundidad de descarga H_A (m)	Número de Reynolds Re	Número Froude dendimétrico F_{rd}	Velocidad del medio v (m/s)	$u_r = u_o/v$ $u_r F_{rd}$
V=0 (m/s)	L01-L03	30, 45 y 60	2 y 4	0.55 a 1.2	0.3 y 0.4	1000 a 2000	20 a 58	0	0
V=0.015 (m/s)	L04-L07	45-135 60-120						0.015	0.51 y 0.72
V=0.03 (m/s)	L08-L11							0.03	1 y 1.44
V=0.05 (m/s)	L12-L15							0.05	1.67 y 2.4

Se puede comprobar que se han ensayado varias configuraciones geométricas del sistema de descarga para diferentes condiciones ambientales, constituyendo uno de los trabajos integrados con mayor casuística respecto a la literatura existente.

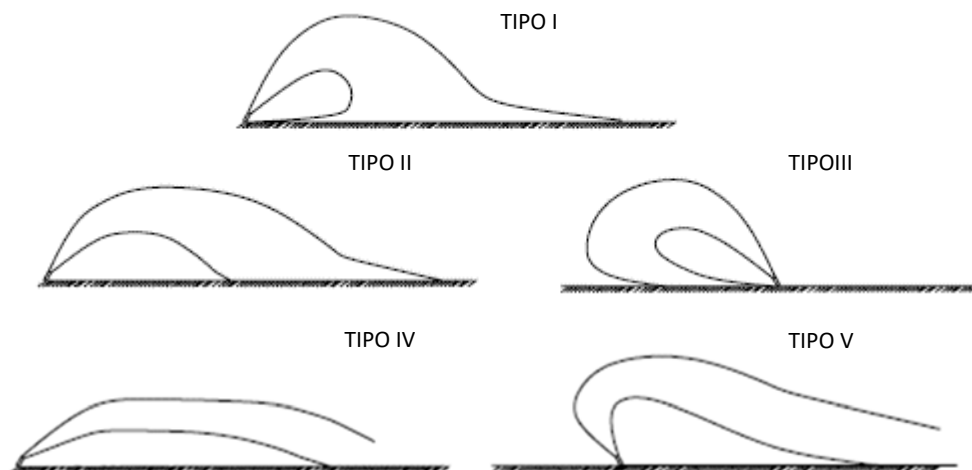


Figura 1.9. Tipologías de vertido ensayadas en esta tesis doctoral

La Figura 1.9 detalla las tipologías de vertido ensayadas:

- Tipo I: Descarga en medio estacionario ($u_r F_{rd}=0$), tipología más ensayada en la literatura.
- Tipo II: Descarga en el mismo sentido que la corriente del medio, co-flow. Velocidad de la corriente reducida, $0.5 < u_r F_{rd} < 0.75$.

- Tipo III: Descarga en medio estacionario con sentido contrario a la corriente del medio. Velocidad de la corriente reducida $0.5 < u_r F_{rd} < 0.75$.
- Tipo IV: Descarga en medio dinámico en co-flow, con alta energía cinética del medio $1.5 < u_r F_{rd} < 2.5$.
- Tipo V: Descarga en medio dinámico con descarga contraria a la corriente del medio, counter-flow, con alta energía cinética del medio $1.5 < u_r F_{rd} < 2.5$.

1.2.3 Análisis dimensional del campo cercano

El análisis de los parámetros relacionados con el comportamiento del campo cercano se presenta en el Capítulo 4. Se han determinado las principales variables adimensionales que caracterizan el proceso físico. Como aspecto inicial de este capítulo se presenta un sistema de referencia que permite estudiar el comportamiento de la descarga respecto al eje del vertido. Este eje ha sido estimado a partir de las concentraciones máximas de los campos aplicando la técnica LIF (Figura 1.10a), obteniendo también las velocidades máximas registradas para los campos vectoriales (Figura 1.10b).

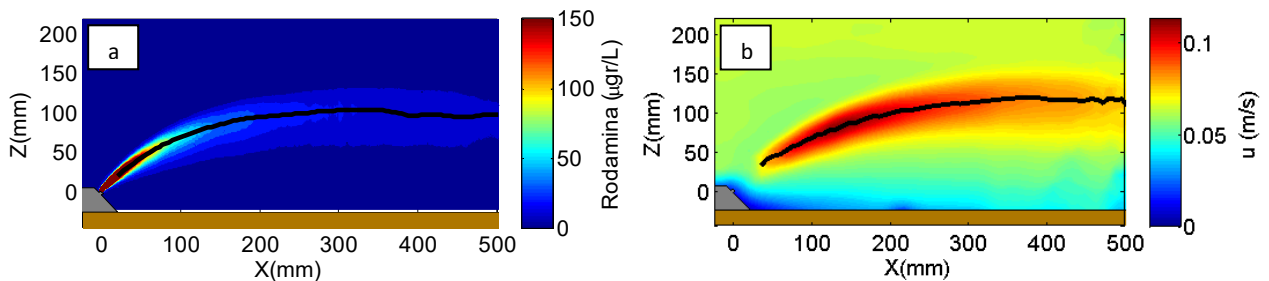


Figura 1.10. Ejemplo de la obtención de los ejes de concentraciones máximas (a) y velocidades máximas (b) para ensayo en medio dinámico

Tras obtener los ejes principales del vertido, tanto para las concentraciones como para los campos de velocidad, se realizó un análisis del comportamiento de las descargas bajo diferentes condicionantes hidrodinámicos. Para ello se estudió el comportamiento de algunos parámetros de estudio, como la dilución ya comentada a lo largo del eje, la velocidad total y sus componentes (Figura 1.11). Se obtuvieron patrones similares a los presentados por Shao y Law (2010) o Palomar et al. (2012b). Como resultado más importante de dichas se validó la metodología experimental en medio estacionario, para proceder a la realización de ensayos en medio dinámico.

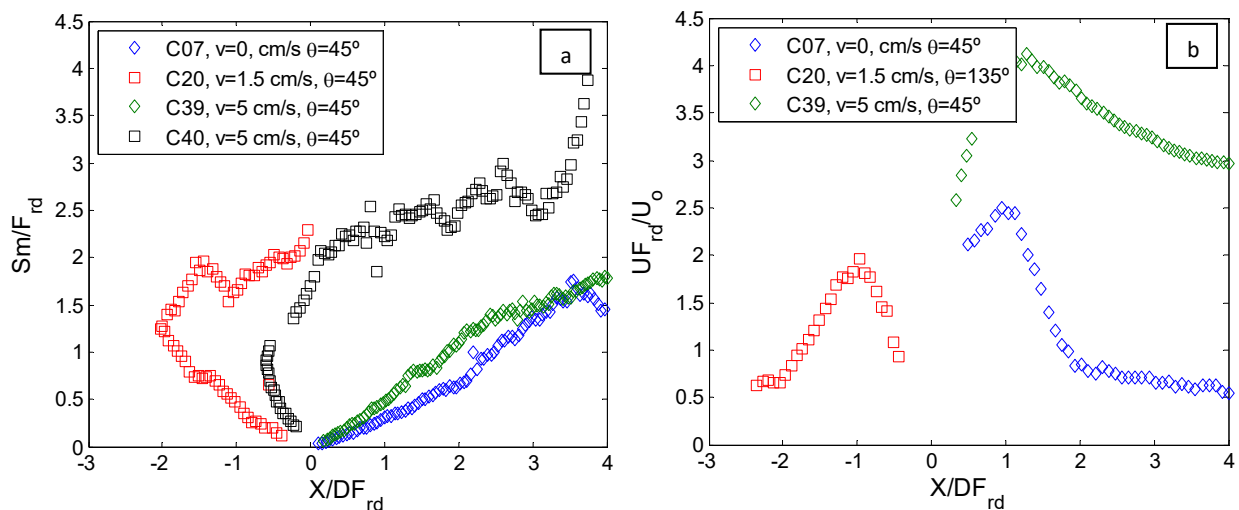


Figura 1.11. Evolución de la dilución en el eje, S (a), y de la velocidad total, u (b)

La Figura 1.12 muestra la comparación de los resultados obtenidos en este trabajo con los presentados por diversos autores para la cota máxima alcanzada por el vertido (Z_{me}), para diferentes condiciones del ambiente receptor.

Como se puede observar (panel a), el ajuste de los resultados obtenidos a las investigaciones previas es similar para ángulos de salida de $\theta=30^\circ$ y 45° . Para $\theta=60^\circ$ se aprecian mayores diferencias, no sólo en los resultados obtenidos en este estudio, sino en el conjunto de valores hallados en la literatura.

Por otro lado, la comparación con resultados en medio dinámico (panel b) sigue la misma tendencia que los valores presentados en los primeros trabajos de Tong y Stolzenbach (1979), o más recientemente por Gungor y Roberts (2009). Se destaca que el punto marcado por ambos autores para detallar el límite hidrodinámico en el que el medio comienza a afectar al comportamiento del vertido ($u_r F_{rd}=0.8$), coincide con el obtenido en esta tesis doctoral.

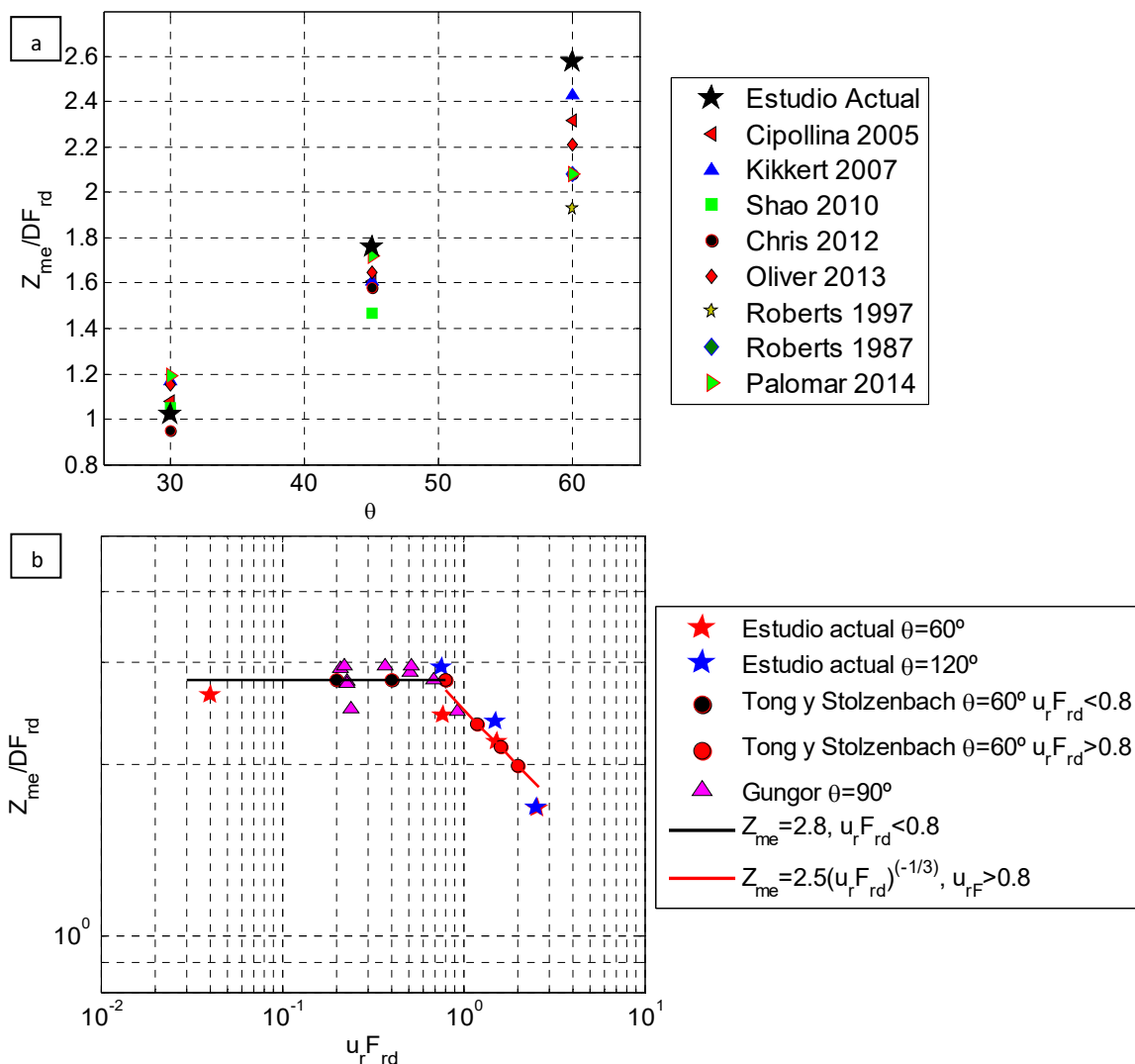


Figura 1.12. Comparación de resultados con investigaciones previas, para la cota máxima alcanzada por el chorro (Z_{me}), en un medio estacionario (a) y medio dinámico co-flow (b)

1.2.4 Análisis del vertido en campo cercano

El Capítulo 5 presenta la descripción de los campos de velocidades y diluciones en campo cercano. Estos resultados se presentan ordenados conforme a la variación de la velocidad del medio y el sentido de descarga, manteniendo las mismas características geométricas, a fin de asegurar que el número de Froude

densimétrico (F_{rd}) no varíe entre ensayos. La figura 1.13 muestra los campos vectoriales analizados para un tipo de vertido que por su naturaleza y novedad científica (counter-flow, medio dinámico, Tipo V) presenta gran interés de estudio.

Los procesos de mezcla e hidrodinámicos de los ensayos en medio receptor no estacionario fueron estudiados con gran detalle, dada la innovación que suponen en el campo de vertidos hipersalinos. De esta forma, se presenta el comportamiento de las variables geométricas para diferentes ambientes receptores ($u_r F_{rd}$), como por ejemplo la cota máxima alcanzada por el eje (Z_{me}) (Figura 1.14). Se obtuvieron patrones de comportamiento para vertidos en co-flow (tipos I, II y IV) y counter-flow (tipos III y V). Como se observa en dicha figura, las descargas co-flow presentan tendencias claras. Sin embargo, el comportamiento de los vertidos en counter-flow siguen un patrón diferente, en el que el máximo indica el punto en el que el vertido pasa de counter-flow (tipo III) a invertirse completamente, caracterizándose el vertido como tipo V (Figura 1.9).

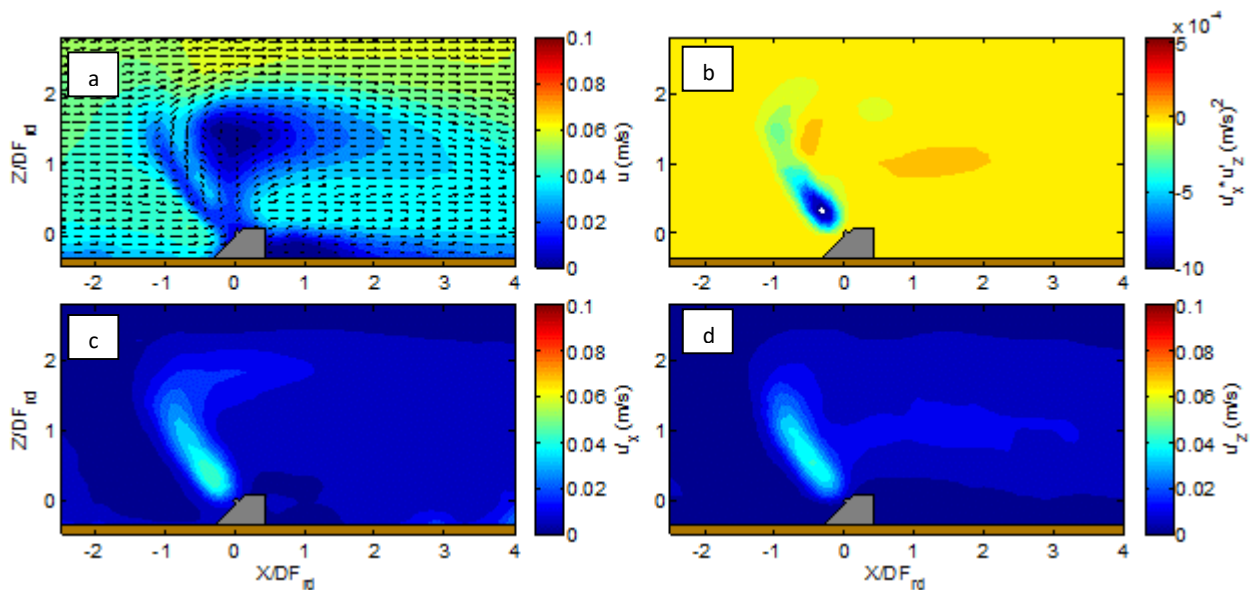


Figura 1.13. Campos vectoriales para ensayo C40 (Tipo V, $v=0.05$ m/s counter-flow). Velocidad media (a), tensiones Reynolds (b), fluctuaciones velocidad horizontal (c) y fluctuaciones velocidad vertical (d)

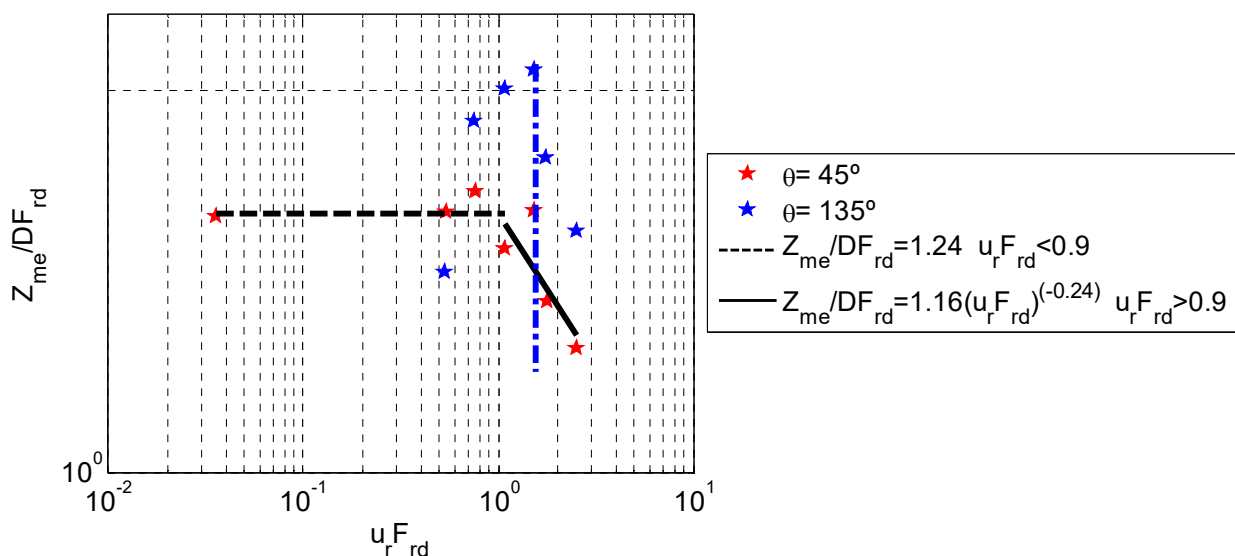


Figura 1.14. Evolución de la cota máxima alcanzada por el vertido (Z_{me}) para $\theta=45^\circ$, en co-flow (rojo) y counter-flow (azul)

Del mismo modo que en trabajos previos, se han analizado las secciones de velocidades y de concentraciones a lo largo del eje del vertido hasta el punto de impacto (X_i). Este análisis trata de explicar el comportamiento de los flujos hiperdensos, asumiendo que siguen una distribución gaussiana (Jirka, 2004), que es la hipótesis asumida por varios modelos numéricos (Figura 1.15).

Cada tipo de ensayo analizado mostró un patrón distinto, aunque se puede establecer que a mayor velocidad del medio más simetría existe en las secciones analizadas, y una mayor autosemejanza entre ellas. Por otro lado, el estudio de las secciones transversales al eje permitió definir los procesos de mezcla que tienen lugar a ambos lados del vertido, y analizar su evolución para las diferentes velocidades y configuraciones de descarga.

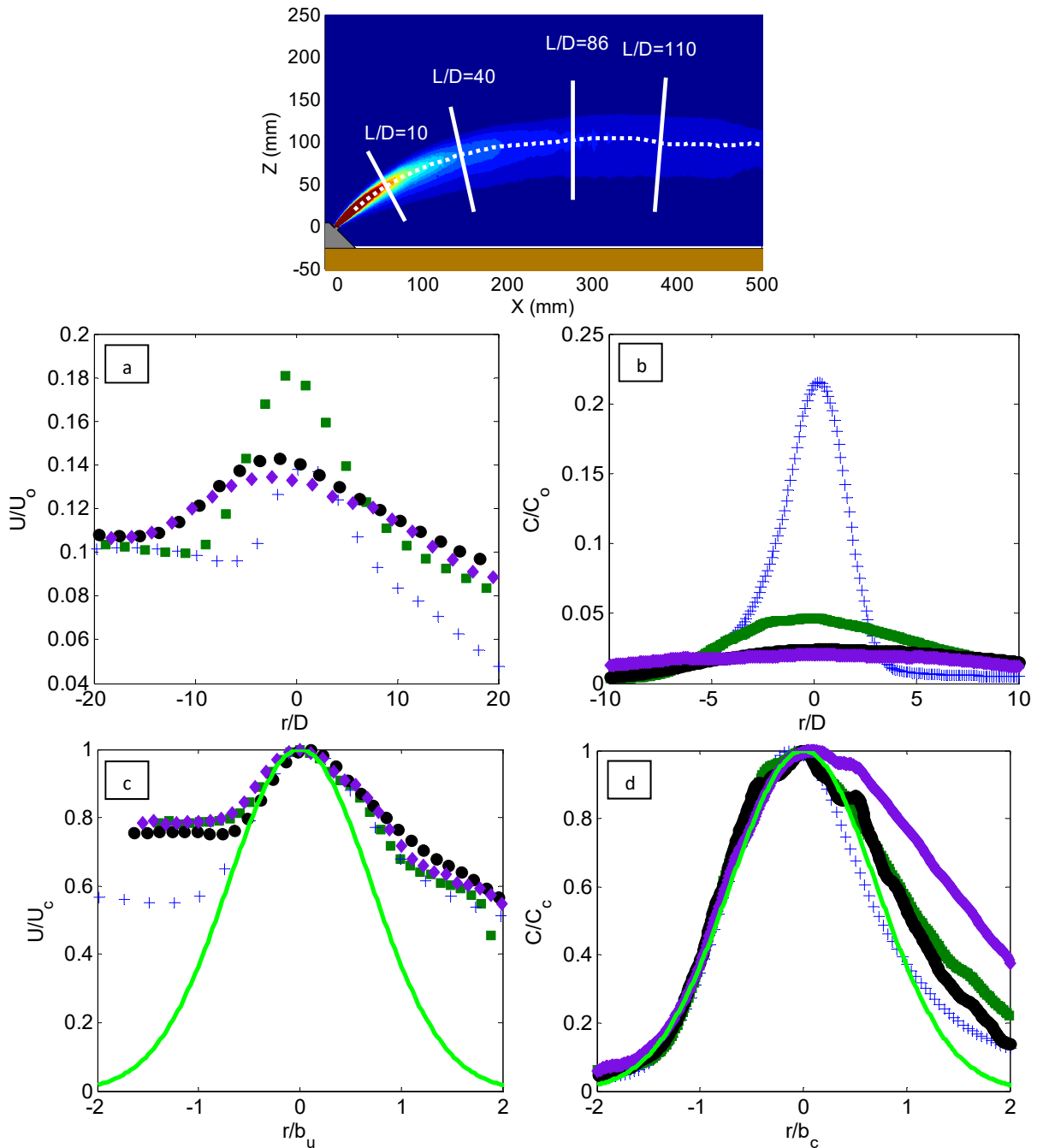


Figura 1.15. Evolución del vertido para ensayo C39 (Tipo IV, medio dinámico $v=0.05$ m/s, co-flow). Secciones analizadas para la velocidad (a), dilución (b), y comparación con perfil gaussiano (c) y (d)

Se puede decir que, en todas las tipologías analizadas, y en las secciones alejadas del difusor ($L/D > 80$), existe una clara convergencia entre ellas (Figura 1.16).

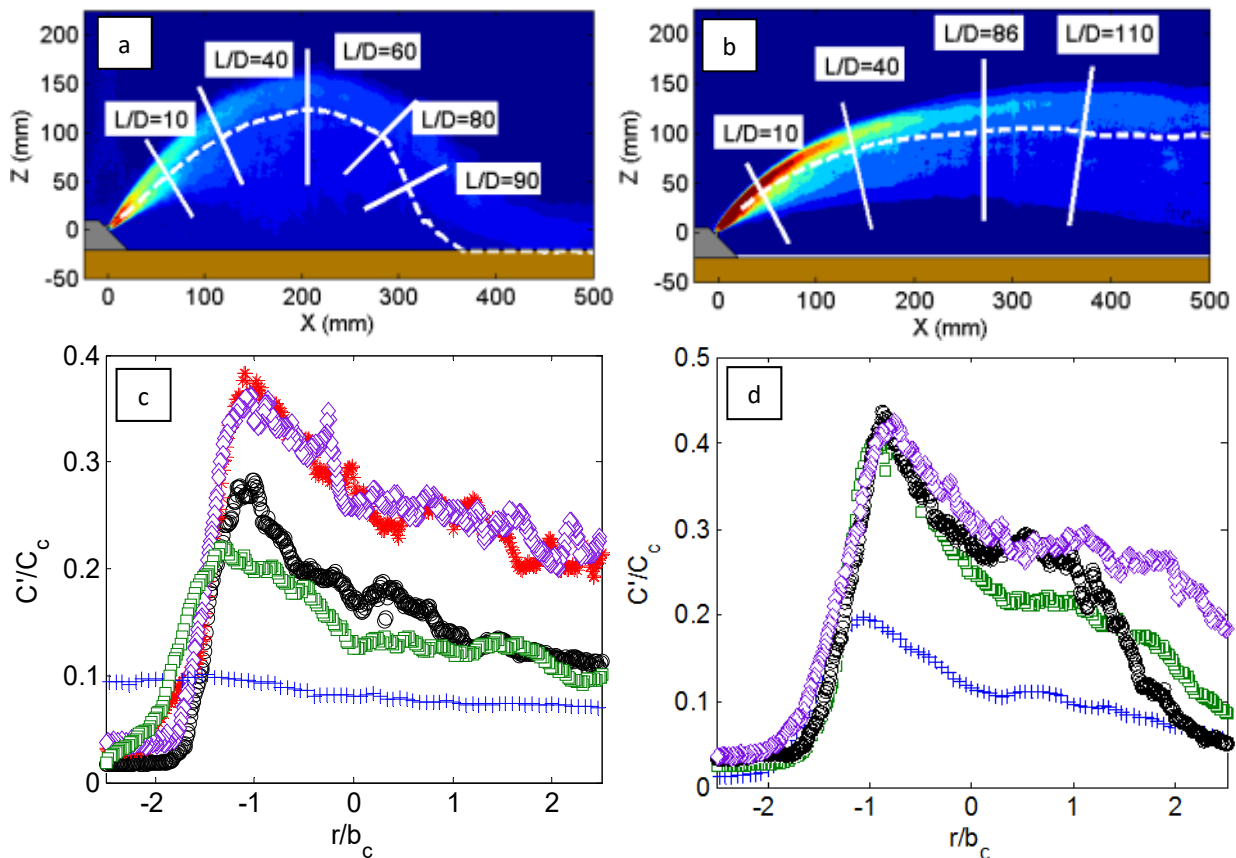


Figura 1.16. Campo de fluctuaciones de las concentraciones ensayo C07 (a, c) y C39 (b, d) (tipos I y IV respectivamente)

1.2.5 Análisis del vertido en campo lejano

Por último, en el Capítulo 6 de esta tesis doctoral se presentan los resultados de la zona de transición entre campo cercano y campo lejano, y la corriente de gravedad que se desarrolla lejos del difusor. Al igual que en el Capítulo 4, se plantea un análisis dimensional para explicar el comportamiento de la corriente de gravedad en función de las diferentes condiciones hidrodinámicas y ambientales. De este modo, es posible evaluar el potencial de dilución y el comportamiento esperado de una salmuera en función de parámetros específicos de este tipo de estudios, como el número adimensional de Richardson.

Un resultado novedoso y relevante de este estudio es la presentación de los campos conjuntos de velocidades (además de sus componentes horizontal y vertical) y concentraciones. Este análisis integrado de campo cercano y lejano es un avance en el estado del arte, ya que la tendencia seguida por investigadores previos es presentar resultados diferenciando entre campo cercano y lejano. Gracias a las instalaciones y metodologías empleadas en este trabajo es posible caracterizar todo el desarrollo del efluente hasta la formación de la corriente de gravedad (Figura 1.17).

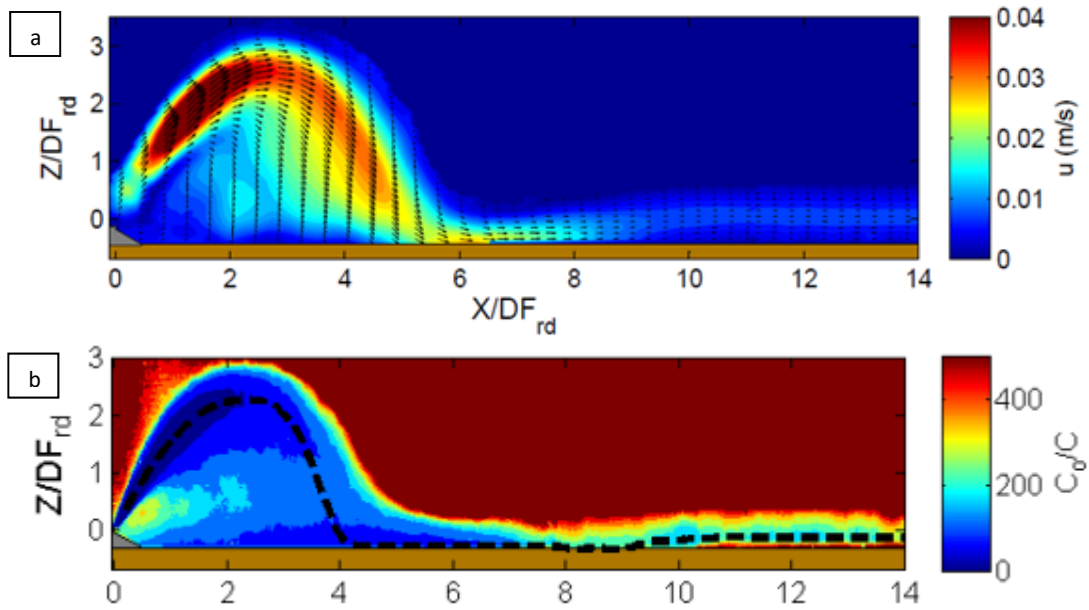


Figura 1.17. Campos de velocidades (a) y diluciones (b) obtenidas tras el montaje de las diferentes zonas de estudio (campo cercano y lejano)

En primer lugar se presentan resultados detallados de la zona de transición. En esta zona las fluctuaciones de la velocidad tienden a disminuir, tal y como han estudiado otros autores previamente, empezando por Roberts (1997). En esta publicación se estableció un límite entre zonas (campo cercano y lejano) en $X/DF_{rd}=9$. Sin embargo, este valor sólo es aplicable en principio a vertidos en medio estacionario y con $\theta=60^\circ$. En esta tesis doctoral se ha desarrollado una metodología similar para determinar el final del campo cercano (X_s), y se estudió su variación para las diferentes tipologías de vertido ensayadas (Figura 1.18).

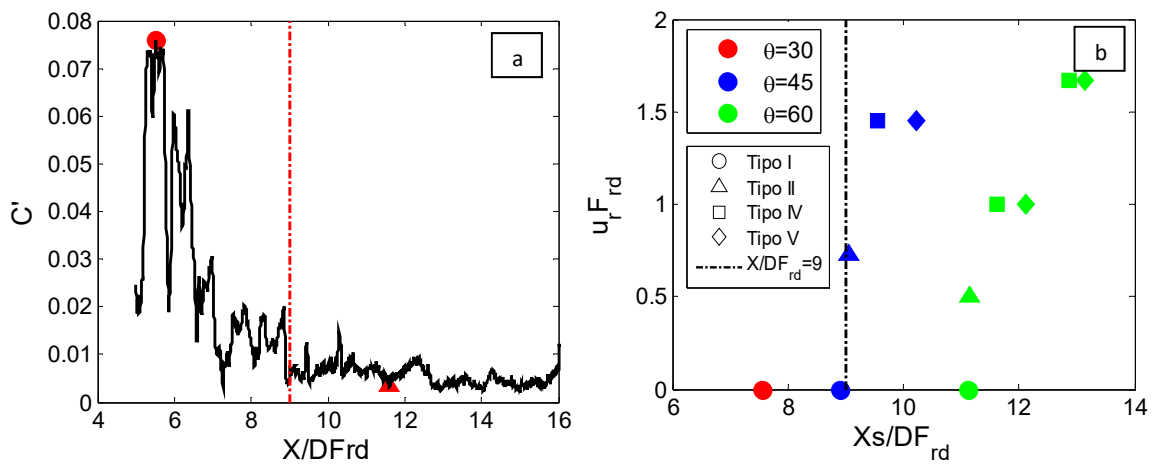


Figura 1.18. Determinación de X_s para un vertido en medio dinámico comparado con la estimación propuesta por Roberts et al. (1997) (a). Evolución de X_s para diferentes ángulos y velocidades (b)

Tras la determinación del comienzo del campo lejano, en este Capítulo 6 se procede a analizar dicha zona mediante dos perspectivas diferentes. En primer lugar con el estudio de los perfiles verticales de los campos de dilución y velocidades (Figura 1.19). Esto permite presentar la evolución de la corriente de gravedad y la afección del medio sobre su comportamiento. Se comprobó que, dependiendo de la orientación del sistema de descarga y la velocidad del medio, la evolución de la corriente varía. Sin embargo, en todos los casos existe una convergencia de perfiles para las posiciones más alejadas del difusor, lo que evidencia el desarrollo completo de la corriente de gravedad.

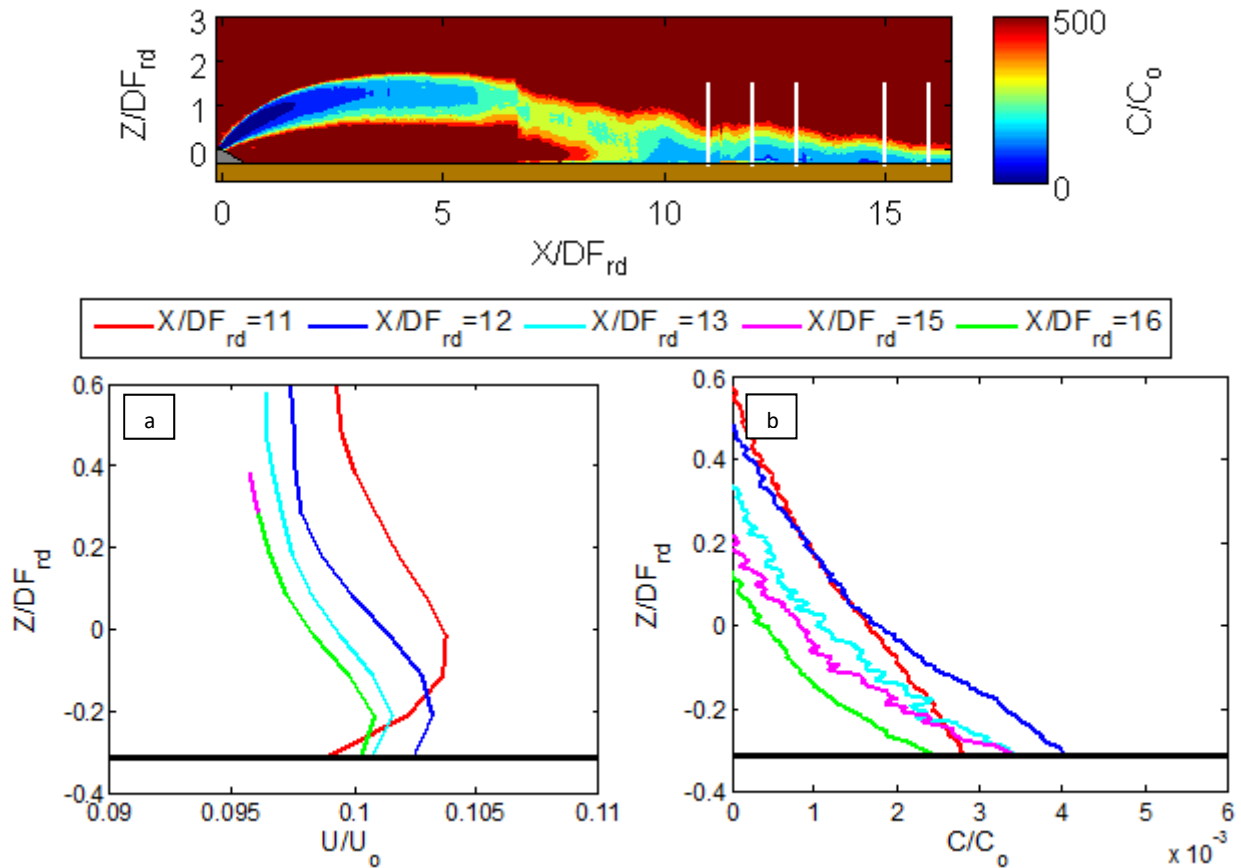


Figura 1.19. Perfiles verticales de la corriente de gravedad L14 (Tipo IV, medio dinámico $v=0.05$ m/s, co-flow) velocidad adimensionalizada (a) y diluciones (b)

Como parte fundamental del trabajo se presenta el estudio del campo lejano en planta, a través del sistema de conductivímetros desarrollado en el marco de esta tesis doctoral. De esta forma se caracterizó la evolución de los campos de salinidad y de sus fluctuaciones presentes en la corriente de gravedad para los diferentes tipos característicos de vertido. La Figura 1.20 muestra un ejemplo de mapa de salinidad, fluctuaciones y la evolución longitudinal de los dos campos.

Como se puede observar, para un vertido Tipo II, con un medio receptor poco energético, el patrón de las salinidades sigue una tendencia decreciente. En este caso en particular, la corriente de gravedad arroja valores muy altos de Richardson (R_i). Por tanto, la componente cinética de este flujo bicapa tiene poca importancia, por lo que se espera una baja capacidad de dilución. Por otro lado, las fluctuaciones registradas muestran un descenso progresivo a medida que el vertido se aleja del punto de impacto, salvo para el eje longitudinal inferior (sensores S3-S21). Este fenómeno ha sido registrado en ensayos con poca energía cinética del medio, y podría evidenciar un defecto de montaje en el falso fondo del canal de experimentación.

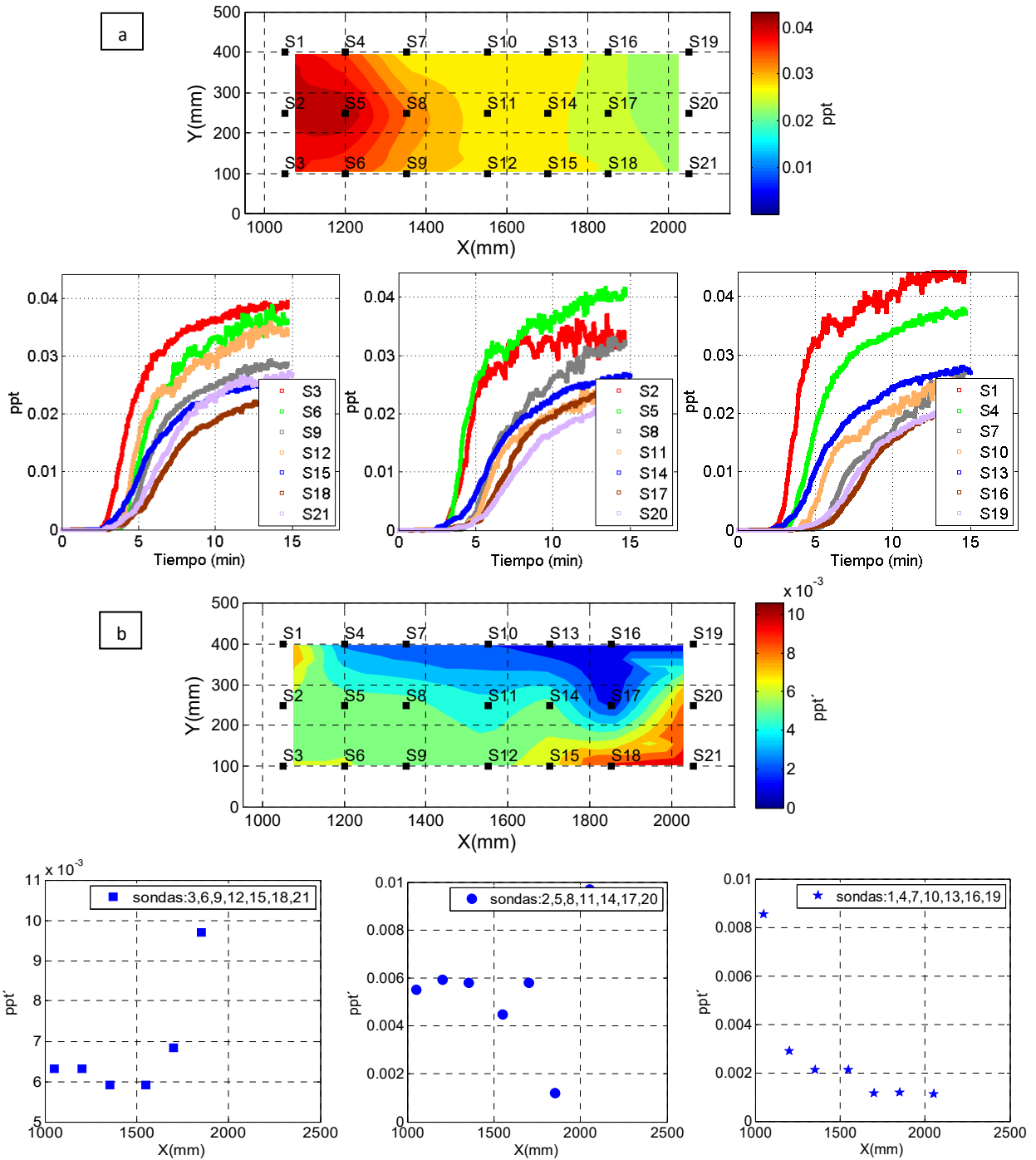


Figura 1.20. Ensayo L07 (tipo II, $v=0.015$ m/s, co-flow). Campo de salinidad (a) y de fluctuaciones (b) con la evolución longitudinal de cada uno de ellos

Como último análisis, se presentan los resultados combinados de conductivímetros y LIF en planta y perfil, respectivamente, en el eje medio del flujo hiperdenso (Figura 1.21). Como se puede observar, aunque existen puntos LIF con mayor dispersión respecto a las medidas de los sensores, en general el patrón de la salinidad en las sondas S2 a S20 coincide con la obtenida con la metodología LIF.

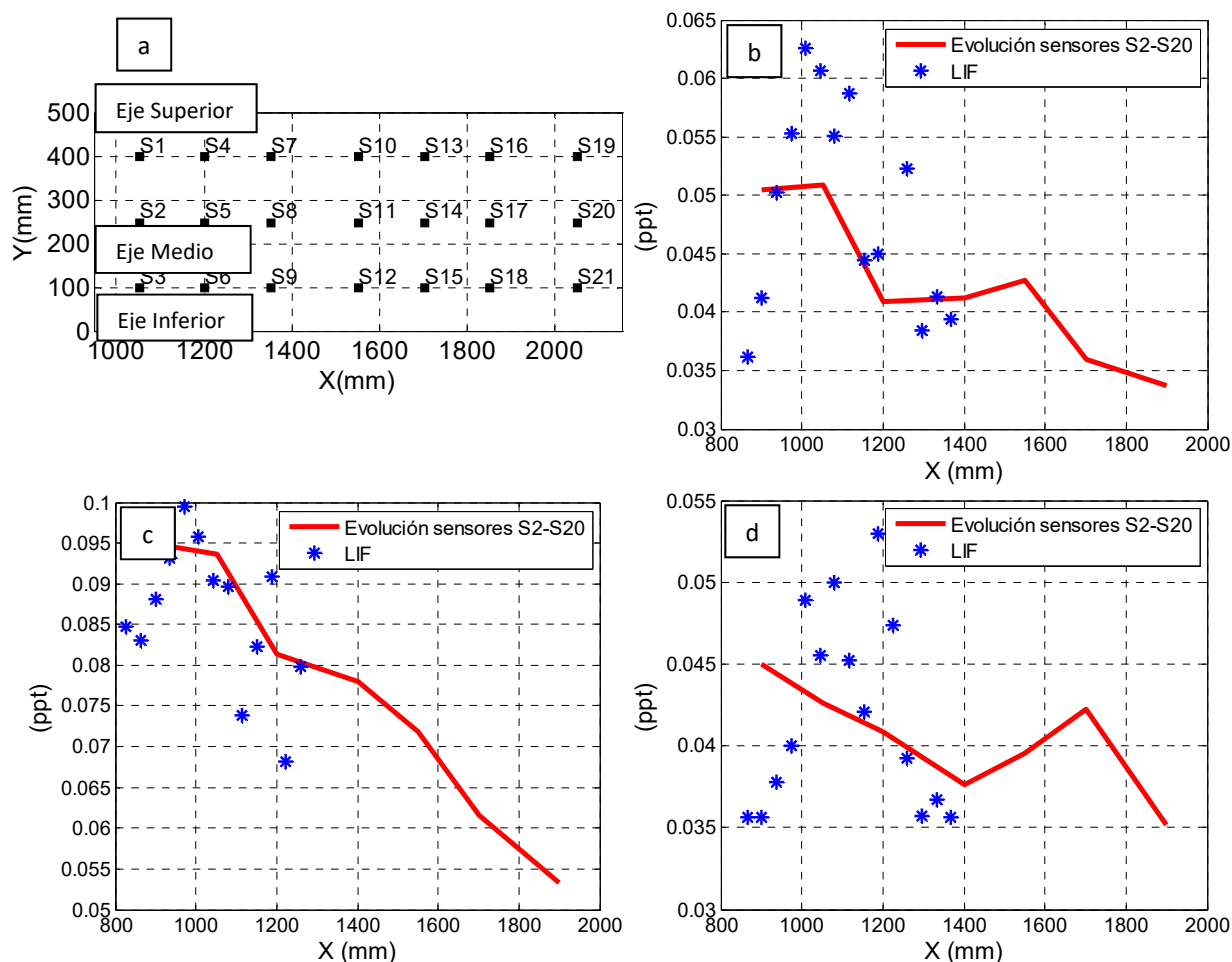


Figura 1.21. Localización ejes de la malla de sensores (a). Comparación registros LIF y sondas de conductividad para ensayos L02 (b), L03 (c) y L08 (d)

1.3 Principales conclusiones y aportaciones

A continuación se exponen las principales conclusiones obtenidas en esta tesis doctoral sobre el estudio de descargas de salmuera mediante chorro sumergido. También se detalla la innovación desarrollada para la ejecución de la campaña experimental. Por ello se dividirán las conclusiones en 3 subgrupos: metodología experimental, campo cercano y campo lejano.

1.3.1 Metodología experimental

El empleo de las técnicas de caracterización láser en las campañas de campo cercano y lejano, no suponen en sí mismo una innovación. Sin embargo, el **estudio integrado** de las dos zonas del vertido se considera una aportación importante para el estudio conjunto del fenómeno físico, que ha sido posible gracias al solapamiento de los campos de velocidades vectoriales (PIV) y de concentraciones escalares (LIF) obtenidos.

El campo lejano fue caracterizado con la mencionada técnica LIF (perfil), junto con un sistema de conductivímetros desarrollado por el grupo GEAMA (planta), utilizando en este estudio de una malla de 3x7 sensores.

La aplicación a este campo de la ingeniería hidráulica del novedoso sistema de conductivímetros ha sido registrada como patente de invención en la Oficina Española de Patentes y Marcas con número de solicitud P201600064 con fecha (22/01/2016). La técnica y metodología pueden ser aplicadas a corrientes de gravedad en vertidos con flotabilidad negativa o positiva, y para caracterizar corrientes de turbidez

(sólidos en suspensión), siempre que la presencia de estos materiales modifique la conductividad del medio.

1.3.2 Campo cercano

La aportación más relevante y en cierta parte novedosa del análisis del campo cercano son los resultados obtenidos para **vertidos en medio dinámico, con cuatro velocidades diferentes de la corriente del medio receptor**. De esta forma se hace un análisis del proceso con una mayor aproximación a la realidad en el ámbito marino, que puede servir incluso para el diseño ingenieril de emisarios submarinos de plantas desaladoras.

Otro resultado innovador es el **estudio del vertido con ambos sentidos de la corriente (co-flow y counter-flow) lo que permite caracterizar un ciclo de marea, obteniendo de nuevo resultados con una vertiente más realista del complejo fenómeno físico estudiado**.

Un tercer campo novedoso y de interés práctico es el **trabajo realizado con tres diferentes ángulos de descarga del vertido en ambos sentidos de la corriente (co-flow y counter-flow) $\theta=30^\circ$, 45° y 60°** . En el estado del arte, no se ha encontrado un análisis con tantos ángulos y tipologías de vertidos hipersalinos en emisarios sumergidos.

Tras el análisis de las secciones transversales de los campos de velocidades y diluciones, se observó que cuanto mayor es la hidrodinámica del medio, mayor es la simetría de las secciones respecto al eje del vertido. Por el contrario, cuanto menor es la velocidad del medio, más evidentes son las estructuras de mezcla que surgen por la caída de vórtices.

Por último, se ha obtenido un comportamiento bimodal en los extremos superior e inferior del vertido, que se corresponde con dos máximos en las zonas de mayor turbulencia. Además, a medida que las secciones están más alejadas del difusor, la intensidad de las fluctuaciones se va atenuando debido al colapso de la turbulencia.

1.3.3 Campo lejano

El estudio combinado de las corrientes de gravedad con las técnicas PIV y LIF, y el sistema de conductivímetros desarrollado en el marco de esta tesis, ha permitido caracterizar el campo lejano tanto en perfil como en planta. Se han observado distintos comportamientos de las corrientes de gravedad, dependiendo de la tipología de vertido ensayada. Este análisis es totalmente novedoso y complementa el trabajo previo de otros autores en este campo.

La zona de transición entre campo cercano y campo lejano se ha caracterizado con detalle, proponiendo resultados cuantitativos para las diferentes configuraciones de descarga estudiadas, suponiendo de nuevo un avance relevante en el estado del arte.

Para **representar el comportamiento de la corriente de gravedad del campo lejano se ha trabajado con parámetros adimensionales como el número de Richardson (R_i)**. Se ha obtenido por ejemplo que, para valores de $R_i \ll 1$, la cinética de la corriente de gravedad tiene mayor influencia que las fuerzas de flotación, por lo que ésta tiende a mezclarse con el ambiente receptor. Para corrientes con $R_i \gg 1$, la flotabilidad tienen mayor peso, por lo que la escasa dilución sólo se produce por la turbulencia generada en la interfaz de la salmuera con el medio, y al rozamiento con el fondo.

El análisis combinado de técnicas PIV, LIF y sistema de conductivímetros en la parte final del campo lejano caracterizado, tanto en medio estacionario como dinámico, ha permitido analizar la evolución longitudinal. De esta forma se ha obtenido resultados con la **reducción de la concentración de salmuera**

en los diferentes escenarios. Estos resultados pueden tener especial importancia tanto en los aspectos medioambientales como en el diseño ingenieril de las obras relacionadas.

1.4 Futuras líneas de trabajo propuestas

Por último, en este apartado se proponen algunas líneas de investigación futuras, tomando como referencia los resultados obtenidos en esta investigación.

Una primera línea de trabajo con los resultados experimentales de esta tesis doctoral, es la comparación con los modelos numéricos existentes, tanto con los característicos de este tipo de vertidos (Cormix, IH Brine, VisJet, etc.), como aquellos más genéricos en el ámbito hidráulico (CFD, SPH,...). Un resultado esperado es la mejor calibración de dichos modelos, y su posible extensión para la caracterización completa (campo cercano, campo lejano) de vertidos con flotabilidad negativa.

En segundo lugar, los datos obtenidos con la técnica LIF en campo lejano han sido de una calidad inferior a los obtenidos en campo cercano, debido sobre todo a limitaciones de escala (concentraciones muy bajas en las zonas más alejadas de la fuente láser). Por ello, uno de los trabajos propuestos sería el de optimizar la técnica LIF para mediciones en corrientes de gravedad, con escalas de trabajo pequeñas.

Otra de las posibles líneas de avance sería realizar una batería de ensayos incluyendo otros forzadores hidrodinámicos en el apartado de las variables ambientales, como por ejemplo el oleaje. En la batería de pruebas que se ejecutó en el comienzo de esta investigación se planteó la inclusión de ensayos incluyendo el oleaje. Sin embargo, debido al montaje experimental en el que el láser incide en el medio atravesando la superficie libre, se obtenían desviaciones del haz láser imposibilitando la obtención de buenos resultados. Modificando la entrada del haz, por ejemplo desde el fondo o un lateral a través de una superficie de cristal, este problema podría solventarse.

Inciendo de nuevo en el montaje experimental, para obtener una mejor caracterización del vertido se propone estudiar la descarga mediante planos transversales al eje longitudinal, con técnicas PIV y LIF. De esta forma, se obtendrían campos de velocidad en el plano perpendicular al estudiado aquí, permitiendo analizar las estructuras turbulentas, y los mapas de dilución con la dispersión radial del vertido.

Por otro lado, siguiendo la línea de investigación de otros autores (Abessi y Roberts, 2015), en la que los vertidos de salmuera son afectados por calados bajos, sería interesante conocer cómo se comportará un vertido en aguas someras y además afectado por la velocidad del medio. Para ello se sugiere realizar ensayos en los que los ángulos de vertidos sean $\theta \geq 60^\circ$, y la profundidad sea tal que el chorro impacte con la lámina libre.

Por último, se sugiere la realización de más experimentos introduciendo diferencias geométricas en el difusor (tamaño, forma, etc.). Esta línea de investigación permitiría avanzar en un diseño más eficiente del sistema de vertido de la planta desaladora, orientando el estudio hacia una vertiente más comercial del trabajo con emisarios sumergidos de plantas desaladoras.

BIBLIOGRAFÍA

- Abessi, O. y Roberts, P.J.W., 2015. Effect of nozzle orientation on dense jets in stagnant environments. *Journal of Hydraulic Engineering*, (2013), pp.1–8.
- Altinakar, M.S., Graf, W.H. y Hopfinger, E.J., 1996. Flow structure in turbidity currents. *Journal of Hydraulic Research*, 34(February), pp.713–718.
- Bleninger, T. y Jirka, G.H., 2008. Modelling and environmentally sound management of brine discharges from desalination plants. *Desalination*, 221(1-3), pp.585–597.

- Bleninger, T., 2012. Desalination and water-reuse. Demand for hydro-environment engineering and research. *Seawater Desalination*.
- Chowdhury, M.R. y Testik, F.Y., 2014. A review of gravity currents formed by submerged single-port discharges in inland and coastal waters. *Environmental Fluid Mechanics*, 14(2), pp.265–293.
- Fernandez-Torquemada, Y. y Sanchez-Lizaso, J.L., 2005. Effects of salinity on leaf growth and survival of the Mediterranean seagrass (*L. Delile*). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 320, pp.57–63.
- Gobierno de Canarias, 2016. Disponible en <http://www.gobiernodecanarias.org/noticias>
- Gungor, E. y Roberts, P., 2009. Experimental studies on vertical dense jets in a flowing current. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(11), pp.935–948.
- Jirka, G.H., 2004. Integral model for turbulent buoyant jets in unbounded stratified flows. Part I: single round jet. *Environmental Fluid Mechanics*, 4(1), pp.1–56.
- International Desalination Association (IDA), 2016. Disponible en <http://www.idadesal.org>.
- Palomar, P. et al., 2010. MEDVSA: a methodology for design of brine discharges into seawater. *Desalination and Water Reuse*, 20(1), pp.21–25.
- Palomar, P. et al., 2012b. Near field brine discharge modelling part 2: Validation of commercial tools. *Desalination*, 290, pp.14–27.
- Palomar Herrero, P., 2014. *Optimización experimental y numérica de vertidos hipersalinos en el medio marino*. Universidad de Cantabria, Tesis doctoral.
- Perez-Diaz, B. et al., 2015. Caracterización experimental del campo lejano de los vertidos de salmuera al mar. *Revista Iberoamericana del Agua*, 3, pp.66–75.
- Roberts, P.J.W. y Toms, G., 1987. Inclined dense jets in flowing current. *Journal of Hydraulic Engineering*, 113(3), pp.323–340.
- Roberts, P.J.W., Ferrier, A. y Daviero, G., 1997. Mixing in inclined dense jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(8), pp.693–699.
- Shao, D. y Law, A.W.K., 2010. Mixing and boundary interactions of 30° and 45° inclined dense jets. *Environmental Fluid Mechanics*, 10(5), pp.521–553.
- Tong, S.S. y Stolzenbach, K.D., 1979. *Submerged discharges of dense effluent* Massachusetts Institute of Technology, Ralph M. Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics, Department of Civil Engineering.
- Torres, M. y Medina, J.A., 1999. Desalination in Spain, a race for lowering power consumption. In *IDA World Congress on Desalination and Water Reuse*. San Diego, USA.



CAPITULO II.

ESTADO DEL CONOCIMIENTO

RESUMEN

Este capítulo presenta una revisión de los trabajos publicados más importantes sobre los vertidos hiperdensos y las corrientes de gravedad formadas por estratificación de fluidos, bajo diferentes condiciones hidrodinámicas del medio receptor. Se realiza un análisis de las formulaciones y aproximaciones desarrolladas hasta la actualidad, para la descripción física del vertido y su estimación (trayectoria, diluciones, etc.).

A continuación, se presenta una revisión de las técnicas de medición empleadas en las diferentes investigaciones para la caracterización del vertido en laboratorio. Sobre este aspecto se hará especial hincapié en las técnicas PIV y LIF, además del sistema basado en conductivímetros, desarrollado por el grupo GEAMA (Grupo da Enxeñaría da Auga e do Medio Ambiente) de la UDC (Universidade da Coruña).

Finalmente, se hará una breve reseña de los modelos numéricos más comunes empleados para el diseño y estimación del alcance de vertidos.

ÍNDICE

2	CAPÍTULO II. ESTADO DEL CONOCIMIENTO.....	2.1
2.1	Introducción.....	2.1
2.2	Descripción de los vertidos.....	2.3
2.2.1	Análisis dimensional del campo cercano.....	2.3
2.2.2	Descripción del campo cercano a partir de la trayectoria del vertido.....	2.11
2.2.3	Análisis dimensional del campo lejano.....	2.13
2.3	Análisis experimental de los vertidos.....	2.16
2.3.1	Técnicas no intrusivas.....	2.16
2.3.2	Técnicas intrusivas.....	2.21
2.4	Modelización numérica de los vertidos.....	2.22

2 CAPÍTULO II. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1 Introducción

Como se ha comentado en el Capítulo 1, la tecnología de desalación es a día de hoy una fuente importante de obtención de agua dulce. De hecho, según los últimos datos de la IDA (International Desalination Association), a mediados del 2015 en el mundo había 18.426 plantas desaladoras en funcionamiento, de las cuales el 53 % se situaban en países de Oriente Próximo (www.idadesal.org, 2016). Esto significa que se producen 87 millones de m³ por día de agua potable, generando un residuo (salmuera) de 39 millones de m³ por día que se vierten al medio marino. Los efectos de la salmuera sobre dicho fondo marino han sido estudiados en profundidad por varios autores, debido al peligro medioambiental que supone este producto. Las consecuencias más relevantes de la descarga de salmueras en aguas costeras son las siguientes:

- Anoxia en las zonas más alejadas del difusor. La estratificación del flujo dificulta la mezcla y renovación de las aguas del fondo, produciendo fenómenos de anoxia que afectan a los organismos bentónicos (Hodges 2006).
- Caída de la presión osmótica que ocasiona cambios en el plancton, vital para la supervivencia de muchas especies marinas, además de afección a la capacidad de fotosíntesis debido a la menor entrada de luz en la columna de agua (Einav y Lokiec 2003).
- Menor potencial para la formación de bosques marinos, como los creados por las praderas de Posidonia oceánica, especie con gran valor ecológico en el Mar Mediterráneo (Palomar et al. 2010).

Para minimizar el impacto de las salmueras sobre el ecosistema marino es necesario un sistema de vertido adecuado. Esto implica que el potencial de dilución del efluente debe de ser suficiente para cumplir con la legislación vigente. Estos límites legales vienen impuestos por valores críticos de salinidad que aseguren la supervivencia de las especies más sensibles, como por ejemplo la Posidonia oceánica. Palomar (2014) realizó una síntesis de límites de salinidad para varios ecosistemas marinos que se recoge en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Valores críticos de supervivencia para diferentes tipos de fanerógamas marinas, (Palomar, 2014)

ECOSISTEMAS	LÍMITE CRÍTICO DE SALINIDAD	FUENTE
Posidonia oceánica	Salinidad inferior a 38.5 psu en más del 25 % de las medidas: $S_{25,lim} = 38.5$ psu Salinidad inferior a 40 psu en más del 5 % de las medidas: $S_{5,lim} = 40$ psu	Sánchez-Lizaso et al. (2008)
Cymodea nodosa	Salinidad inferior a 39.5 psu en más del 25 % de las medidas: $S_{25,lim} = 39.5$ psu Salinidad inferior a 41 psu en más del 5 % de las medidas: $S_{5,lim} = 41$ psu	Ministerio de Medioamte
Zostera nolti	Alrededor de 41 psu	Fernández-Torquemada et al. (2006)

Las tecnologías más usuales de desalación son la evaporación y la ósmosis inversa, cuyas tasas de rendimiento son un 15 % y 49 % respectivamente (www.idadesal.org, 2016). Esto significa que un 85% y un 51% del agua marina empleada por las técnicas mencionadas son retornadas al mar. Dado que la sal remanente de los métodos de desalación se mantiene en el volumen de agua retornado, la salinidad de dicho volumen es mucho mayor que la inicial. Para el caso más desfavorable, la salinidad de la salmuera

es cercana al doble que la del medio receptor. Por ello se necesita un buen sistema de descarga que induzca la mayor dilución posible. La Figura 2.1 muestra las dos tipologías más comunes de vertido, vertidos por superficie (a) y vertidos mediante emisarios sumergidos (b).

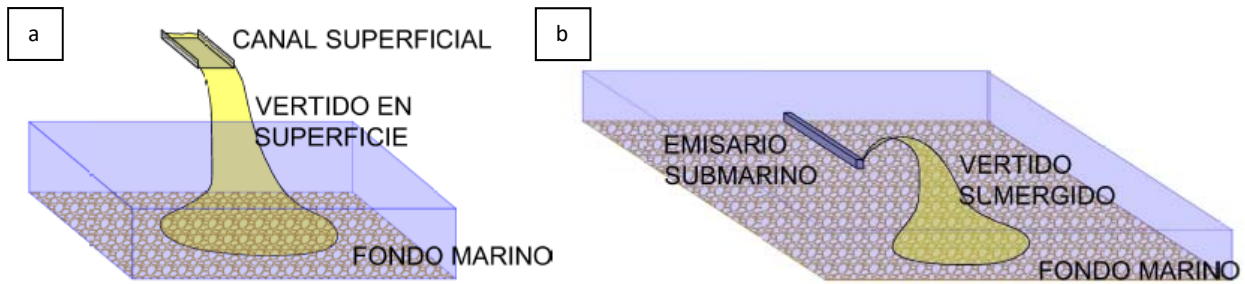


Figura 2.1. Sistemas más comunes de vertidos marinos de salmuera. Vertidos por superficie (a) y emisarios submarinos (b)

Las descargas mediante canales superficiales están compuestas por un canal abierto que conduce la salmuera hasta el punto de vertido. Constructivamente este tipo de vertido es económicamente más viable (Bleninger y Jirka 2008). Sin embargo, la fuente de dilución reside en la diferencia de energía potencial entre la superficie de la lámina libre y la cota del fondo marino. Por tanto a mayor profundidad, mayor dilución alcanzada en el proceso de caída de la salmuera sobre el fondo, y más coste de ejecución de la obra.

Los vertidos sumergidos se basan en un emisario que descarga a una profundidad determinada. El potencial de dilución del vertido reside en la velocidad de descarga del efluente en el difusor. A diferencia de los chorros verticales, en los que el flujo hiperdenso cae directamente sobre el orificio de salida limitando la dilución, en los vertidos inclinados se aumenta la trayectoria recorrida por el efluente. De esta manera se potencia la mezcla con el medio receptor en una región mayor, incrementando la dilución respecto a descargas verticales. Una vez que se ha producido el chorro inclinado inicial, la energía cinética se transforma en energía potencial durante la fase ascendente. A continuación, alcanzada la cota máxima del efluente, la salmuera desciende de nuevo debido a la flotabilidad negativa. Por esta razón, cuanto mayor sea la profundidad de descarga, mayor será la energía cinética en el difusor y mayor potencial de dilución a lo largo de su trayectoria se obtiene (Roberts et al. 1997).

Dado que el coste de ejecución de las conducciones sumergidas es más elevado, la optimización del sistema de descarga (propiedades geométricas y físicas del emisario) frente a las condiciones hidrodinámicas del punto escogido del vertido, será clave a fin de maximizar la dilución del efluente. Habitualmente, para definir correctamente los procesos físicos que se producen en la mezcla del efluente hipersalino con el medio receptor, se estudian de manera desacoplada los dos ámbitos de acción de la salmuera, denominados campo cercano y campo lejano (ver Figura 2.2).

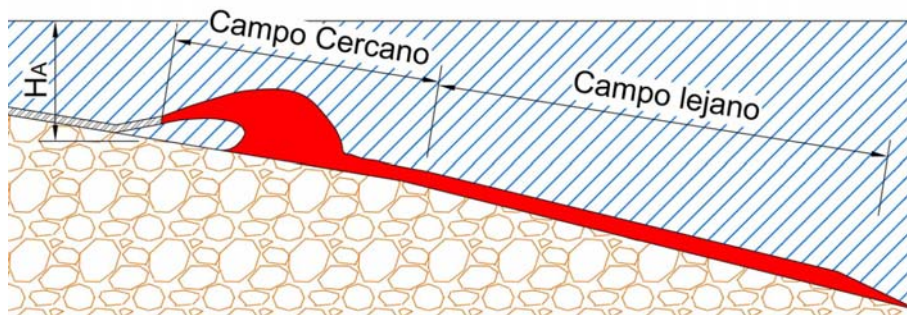


Figura 2.2. Esquema de un vertido de salmuera mediante descarga sumergida

El campo cercano corresponde al área próxima al difusor del emisario submarino, y abarca la zona donde el flujo presenta mayor turbulencia. La mayor parte de la dilución del vertido se da en esta región. El tiempo de duración de estos procesos de mezcla y turbulencia, y su radio de actuación, abarca minutos y metros respectivamente (escala temporal y espacial del campo cercano).

El campo lejano es la zona del vertido en la que la salmuera se desplaza sobre el fondo como una corriente de gravedad. En esta zona, se produce un colapso de la turbulencia asociada al vertido. A diferencia del campo cercano, en la que la cinética y geometría de flujo son determinantes, en este caso los factores responsables de la dilución son la pendiente, la rugosidad del fondo marino y la mezcla que se produce en la interfaz entre la propia corriente de gravedad y el medio marino. En el campo lejano los procesos físicos pueden tener una escala de funcionamiento espacial del orden de kilómetros, y una escala temporal de horas e incluso días.

A continuación, se presentará una descripción física de los vertidos de salmuera producidos desde emisarios submarinos, realizando en primer lugar un análisis dimensional de los mismos. También se presentarán las aproximaciones basadas en estimaciones experimentales empleadas para definir las variables geométricas más importantes de un chorro sumergido, y su comportamiento. Este proceso se repetirá también para las variables de estudio del campo lejano, aplicando un análisis dimensional similar al empleado para un chorro de flotabilidad negativa.

Seguidamente, se realizará una revisión de las técnicas más comunes de caracterización de los vertidos sumergidos de salmuera en laboratorio, diferenciando entre las técnicas de caracterización que no distorsionan el flujo del vertido (no intrusivas), y las que sí pueden afectarlo (intrusivas). Por último, se presentarán brevemente las principales aproximaciones mediante modelización numérica empleadas para el diseño del sistema de vertidos de salmueras.

2.2 Descripción de los vertidos

2.2.1 Análisis dimensional del campo cercano

En este apartado se presenta el análisis de las ecuaciones adimensionales que rigen el comportamiento de las descargas de salmuera mediante chorro inclinado sumergido. En el campo cercano tienen lugar los procesos de mezcla turbulenta y dilución más importantes del vertido. Sin embargo, no todos los fenómenos físicos tienen el mismo origen y tienen lugar al mismo tiempo.

Como muestra la Figura 2.3, el campo cercano se puede dividir en tres subzonas denominadas chorro, pluma y zona de transición. En el chorro, la velocidad de salida del efluente proporciona la energía cinética que induce la dilución inicial del vertido. Una vez que el chorro sumergido alcanza su máxima cota de elevación, donde la velocidad vertical es nula, el vertido comienza a caer por flotabilidad. En esta fase del vertido (pluma), la fuente de dilución viene proporcionada por la diferencia de potencial entre la cota máxima alcanzada y el punto de impacto del vertido sobre el fondo marino.

Por último, una vez que la pluma ha impactado sobre el fondo, se genera una zona de fuerte turbulencia coincidiendo con el esparcimiento del vertido. A continuación, la salmuera tiende a estratificarse y a comportarse como una corriente de gravedad. Es en esta última fase, o zona de transición, donde el flujo de salmuera experimenta un colapso de las estructuras turbulentas y el flujo se tiende a uniformizar antes de entrar en el campo lejano.

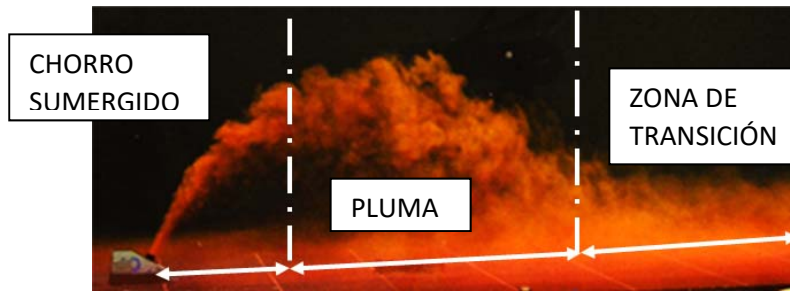


Figura 2.3. Esquema de las zonas de un vertido hiperdenso en campo cercano

Para la descripción del campo cercano se emplean las escalas espaciales l_q y l_m , que son las longitudes de influencia de la flotabilidad del chorro y su momento inicial respectivamente, sobre el vertido (Pincince y List, 1973). Las variables empleadas para definir dichas escalas son los flujos cinemáticos de volumen (Q), momento (M) y flotabilidad (B), definidos en las ecuaciones 2.1 a 2.3.

$$Q = \frac{\pi}{4} D^2 u_o \quad [2.1]$$

$$M = u_o Q = \frac{\pi}{4} D^2 u_o^2 \quad [2.2]$$

$$B = \frac{\pi}{4} D^2 u_o g_o' \quad [2.3]$$

Donde:

D : diámetro del difusor.

u_o : velocidad inicial del vertido.

Q : caudal de salida del vertido.

M : es el momento del chorro en el difusor.

B : flotabilidad del vertido en el punto de descarga.

g_o' : gravedad reducida que depende de la diferencia de salinidad entre el medio receptor y el efluente, Ecuación 2.4.

$$g_o' = \frac{(\rho_o - \rho_a)g}{\rho_a} \quad [2.4]$$

Donde ρ_o es la densidad inicial del vertido y ρ_a es la densidad en el medio receptor.

Las escalas espaciales empleadas para caracterizar los vertidos, l_q y l_m , relacionan las características del efluente con las propiedades físicas del medio receptor como indican las ecuaciones 2.5 y 2.6:

$$l_q = \frac{Q}{M^{1/2}} \quad [2.5]$$

$$l_m = \frac{M^{3/4}}{B^{1/2}} \quad [2.6]$$

La escala l_q representa la distancia a la que el volumen de flujo incorporado al vertido, proveniente del medio receptor, es aproximadamente igual al del caudal inicial de descarga (Q). Por este motivo para distancias mayores de l_q , el efecto de Q sobre el comportamiento del chorro es despreciable. La escala l_m representa la distancia a la que la flotabilidad del vertido es aproximadamente igual al momento generado por el chorro en el difusor (M).

Si se asume un comportamiento totalmente turbulento y se desprecian los efectos de la viscosidad, se puede establecer un análisis dimensional en el que cualquier variable de interés depende de B , M y Q . A modo de ejemplo se presenta el análisis dimensional llevada a cabo por Roberts et al. (1997) para la cota máxima del vertido (Z_{me}). Este análisis es tomado como referencia en numerosos estudios, como por ejemplo Bashitialshaer et al. (2012), entre otros. Expresando esta magnitud en términos de las dos escalas de longitud:

$$\frac{Z_{me}}{l_m} = f\left(\frac{l_m}{l_Q}\right) \quad [2.7]$$

Para la determinación de la dilución en el límite inferior de la zona de vertido, se asume que la hipótesis de Boussinesq se mantiene, es decir, las diferencias de densidad son mucho más pequeñas que en otro punto cualquiera del vertido. De esta forma la aceleración modificada en un punto cualquiera (g') puede ser definida como una variable dependiente, tal y como indica la Ecuación 2.8.

$$g' = \frac{(\rho - \rho_a)g}{\rho_a} = f(Q, M, B, x) \quad [2.8]$$

Donde ρ es la densidad del vertido a una distancia x desde el origen (difusor). Aplicando el análisis dimensional a esta variable, se obtiene la Ecuación 2.9.

$$\frac{B^{3/2}}{g' M^{5/4}} = f\left(\frac{l_m}{l_Q}, \frac{x}{l_m}\right) \quad [2.9]$$

Teniendo en cuenta que la dilución en un punto cualquiera se define como $S = g'_o/g'$, la Ecuación 2.9 puede reescribirse como:

$$S \frac{l_Q}{l_m} = f\left(\frac{l_m}{l_Q}, \frac{x}{l_m}\right) \quad [2.10]$$

Para $l_m/l_Q \gg 1$, el efecto dinámico del flujo inicial de descarga se vuelve despreciable, y Q o l_Q pueden ser tratados como parámetros, por lo que las ecuaciones 2.7 y 2.10 pueden expresarse como sigue.

$$\frac{Z_{me}}{l_m} = k \quad [2.11]$$

$$S \frac{l_Q}{l_m} = f\left(\frac{x}{l_m}\right) \quad [2.12]$$

Ahora bien, dado que el difusor es circular, podemos expresar las escalas l_m y l_Q como:

$$l_m = \frac{M^{3/4}}{B^{1/2}} = \frac{\frac{\pi}{4} D^2 u_o^2}{\frac{\pi}{4} D^2 u_o g'_o} = \frac{\pi^{1/4}}{4} DF_{rd} \quad [2.13]$$

$$l_Q = \frac{Q}{M^{1/2}} = \frac{\frac{\pi}{4} D^2 u_o}{\frac{\pi}{4} D^2 u_o^2} = \frac{\pi^{1/2}}{4} D \quad [2.14]$$

Donde F_{rd} es el número densimétrico de Froude, expresado como:

$$F_{rd} = \frac{u_o}{\sqrt{Dg'_o}} \quad [2.15]$$

Por lo tanto, las ecuaciones 2.11 y 2.12 se pueden reescribir como:

$$\frac{Z_{me}}{F_{rd}D} = K \quad [2.16]$$

$$\frac{S}{F_{rd}} = C \quad [2.17]$$

Donde $K=k(\pi/4)^{1/4}$ y $C=f(x/DF_{rd})$.

Este procedimiento se puede repetir para las demás variables de estudio (ver por ejemplo Roberts et al. (1997)). Así, a partir de este desarrollo diversos autores han establecido las relaciones del comportamiento del vertido en función del diámetro del difusor y el número de Froude densimétrico, para ángulos de descarga determinados (θ). Los números adimensionales que se pueden formar son los siguientes:

$$\frac{Z_{me}}{DF_{rd}} = K_1; \frac{Z_m}{DF_{rd}} = K_2; \frac{X_m}{DF_{rd}} = K_3; \frac{S_m}{F_{rd}} = K_4; \frac{X_r}{DF_{rd}} = K_5; \frac{S_r}{F_{rd}} = K_6; \frac{X_i}{DF_{rd}} = K_7; \frac{S_i}{F_{rd}} = K_8 \quad [2.18]$$

Donde las principales variables aparecen definidas en la Figura 2.4 y son:

θ : Ángulo de inclinación del difusor respecto al fondo.

Z_{me} : la cota máxima del vertido.

Z_m : la cota máxima del eje del vertido y su posición horizontal (X_m).

X_r : el punto de retorno, que es la posición a la que el eje del vertido pasa por la cota del inicio del vertido (h_o) o cota del difusor.

h : espesor de la corriente de gravedad formada tras el impacto del vertido sobre el fondo.

X_s : límite de campo cercano y campo lejano.

S_{me} : dilución en la cota máxima alcanzada por el vertido.

S_m : dilución en la cota máxima alcanzada por el eje.

S_r : dilución en el punto de retorno.

S_s : dilución en el límite entre campo cercano y lejano.

H_A : Profundidad de descarga.

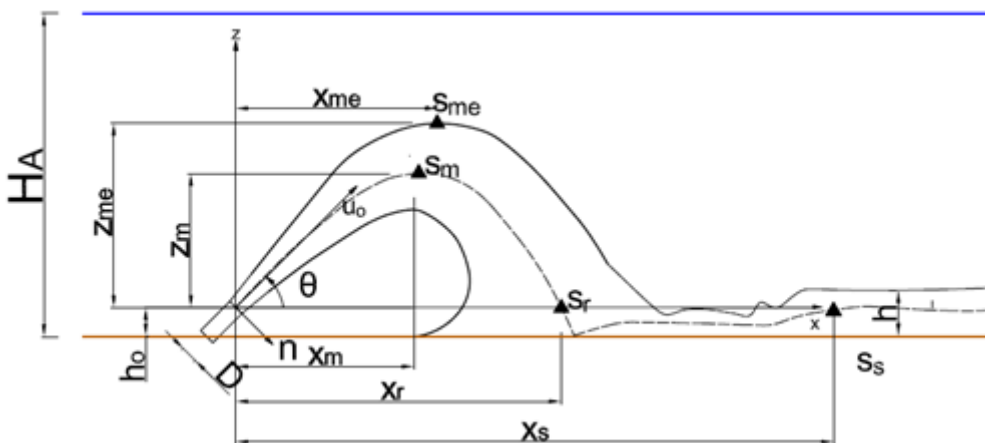


Figura 2.4 Puntos característicos de estudio para un vertido hiperdenso en campo cercano

Gran parte de la literatura sobre vertidos inclinados de fluidos hiperdensos se centra en determinar las constantes presentadas en la Ecuación 2.18. Algunos de los trabajos estudiaron el efecto de la variación del ángulo de descarga inicial (θ), y diferentes diámetros del difusor (D) sobre las diluciones alcanzadas por el vertido. Por ejemplo, Roberts et al. (1997) analizaron la descarga de un difusor inclinado a 60° para distintos valores de F_{rd} . Cipollina et al. (2004) compararon los resultados experimentales obtenidos con los resultados de un modelo predictivo, obteniendo un buen ajuste, como muestra la Figura 2.5. Además, se puede destacar que este análisis fue realizado para ángulos de 30° , 45° y 60° de inclinación inicial del chorro.

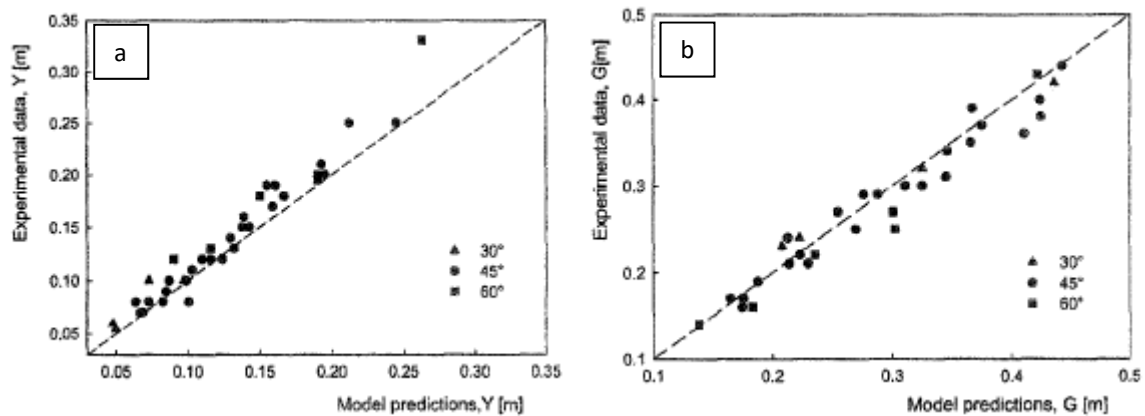


Figura 2.5. Comparaciones entre resultados de modelo y valores experimentales para Z_{me} (a) y X_i (b), Cipollina et al. (2004)

Algunos investigadores estudiaron la dispersión radial del vertido tras el impacto sobre el fondo. El trabajo de Papakonstantis y Christodoulou (2010), realizado con ángulos de 45° , 60° y 75° , para vertidos sumergidos de flotabilidad negativa y vertidos verticales ($\theta=90^\circ$) de flotabilidad positiva, estableció una distancia de dispersión radial (R) correlacionada con el tiempo (t) de vertido, $R \sim t^{1/2}$, para ambas tipologías de descarga. Más recientemente, se ha empezado a estudiar el efecto de los parámetros ambientales sobre el desarrollo del vertido. De este modo, Shao y Law (2010) estudiaron la influencia del efecto Coanda en el vertido, analizando diferentes alturas de difusor respecto al fondo marino (h_o) y los ángulos de inclinación (30° y 45°). Como conclusión se estableció que el efecto de la proximidad del fondo marino es relevante para $\theta \leq 30^\circ$, siempre y cuando $h_o/l_m < 0.2$.

Como resumen de los principales trabajos desarrollados sobre vertidos inclinados en campo lejano, se presenta en la Tabla 2.2. Los valores mostrados son el resultado del promedio de todas las baterías ensayadas por los diferentes autores, con la misma configuración de descarga (θ).

Tabla 2.2. Valores de los coeficientes adimensionales para: cota máxima del vertido (Z_{me}) y dilución y posición de la cota máxima de la trayectoria (S_m, X_m, Z_m)

Investigación	$\Theta = 30^\circ$			
	Zme/Dfr	Zm/Dfr	Xm/Dfr	Sm/Fr
Cipollina et al. (2005)	1.08	0.79	1.95	
Kikkert et al. (2007)	1.17	0.66	1.85	
Shao and Law (2010)	1.05	0.66	1.70	0.62
Chris et al. (2012)	0.95	0.65	1.95	0.40
Oliver et al. (2013)	1.15	0.66	1.75	0.34
Palomar et al. (2014)	1.19	0.77	2.19	0.47

Investigación	$\Theta = 45^\circ$			
	Zme/Dfr	Zm/Dfr	Xm/Dfr	Sm/Fr
Cipollina et al. (2005)	1.61	1.17	1.80	
Kikkert et al. (2007)	1.61	1.07	1.81	
Shao and Law (2010)	1.47	1.14	1.69	0.46
Chris et al. (2012)	1.58	1.19	2.09	0.45
Oliver et al. (2013)	1.65	1.09	1.75	0.39
Palomar et al. (2014)	1.72	1.26	2.12	0.58
Papakostantis et al. (2011b)	1.59	1.17		0.52
Papakostantis y Cristodoulou (2008)	1.59			

Investigación	$\Theta = 60^\circ$			
	Zme/Dfr	Zm/Dfr	Xm/Dfr	Sm/Fr
Cipollina et al. (2005)	2.32	1.77	1.42	
Kikkert et al. (2007)	2.43	1.71	1.75	0.53
Chris et al. (2012)	2.08	1.64	1.78	0.46
Oliver et al. (2013)	2.21	1.61	1.53	0.42
Palomar et al. (2014)	2.46	1.94	2.04	0.57
Papakostantis et al. (2011b)	2.08	1.68		0.56
Papakostantis y Cristodoulou (2010)	2.16			

Como se puede comprobar existen diferencias entre los valores obtenidos de hasta un 45 % en algunos casos. Esto es debido a la variabilidad de los rangos del número de Froude densimétrico (F_{rd}) empleado en cada estudio y al uso de distintas técnicas de caracterización del vertido. La Tabla 2.3 detalla los rangos de F_{rd} y la metodología experimental empleados en las investigaciones mencionadas en la Tabla 2.2. Nótese que para investigaciones con más de una técnica de medición (por ejemplo Kikkert et al. 2010), se ha optado por presentar el promediado de los resultados obtenidos con las mencionadas técnicas. Se puede observar que salvo 3 trabajos, el resto de las investigaciones tienen un Froude densimétrico inferior aproximadamente de $F_{rd}' = 20$ (Roberts et al. 1997), que es el mismo principio tomado en el presente trabajo.

Tabla 2.3. Rangos del número de Froude densimétrico empleado por las investigaciones analizadas, y las metodologías empleadas para el estudio

Investigación	F_{rd}	Metodología empleada
Roberts y Toms (1987)	12-26	Visual y fluorometría
Roberts et al. (1997)	19-36	LIF y conductivímetros
Cipollina et al. (2005)	20-216	Visual y fluorometría
Kikkert et al. (2007)	27-89	Atenuación de luz y LIF
Papakostantis y Cristodoulou (2010)	9-42	Visuales
Shao and Law (2010)	7-32	PIV y LIF
Papakostantis et al. (2011b)	18-50	Conductivímetros
Lai y Lee (2012)	10-40	PIV y LIF
Oliver et al. (2013)	15-106	LIF
Palomar et al. (2014)	10-34	PIV y LIF

El análisis dimensional también es aplicable a los vertidos con un medio receptor dinámico, como se puede ver en detalle en Roberts y Tom (1987). La Figura 2.6 presenta un esquema del vertido para medio dinámico, donde se introducen dos nuevas variables, la velocidad del medio (v) y el ángulo que forma el sentido de la corriente con el difusor (ϕ). En la citada investigación, los autores realizaron ensayos en los que el ángulo de inclinación del difusor (θ) no coincidía con el sentido longitudinal de la corriente. Se trata pues de vertidos *crossflow*, en los que el parámetro ϕ marca la desviación de la descarga respecto a la dirección principal de la corriente del medio receptor. En la presente tesis doctoral se ha supuesto una desviación nula, es decir, $\phi=0^\circ$.

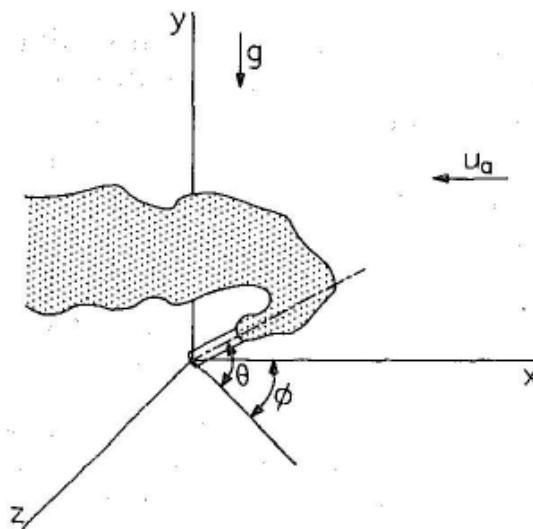


Figura 2.6. Esquema de vertidos en medio dinámico (Roberts y Toms 1987)

Así pues, es posible relacionar la velocidad del ambiente receptor (v) con la velocidad del efluente en el punto de descarga (u_o), mediante el parámetro $u_r=v/u_o$. Y del mismo modo que en el caso estacionario, se puede relacionar cualquier variable, en este caso cota máxima alcanzada por el chorro (Z_{me}), según la Ecuación:

$$Z_{me} = f(Q, M, B, v, \theta, \phi) \quad [2.19]$$

Expresando esta variable en términos de escalas de longitudes y velocidades, se obtiene la Ecuación 2.20.

$$\frac{Z_{me}}{l_m} = f\left(\frac{l_m}{l_Q}, \frac{v}{u_o}, \theta, \phi\right) \quad [2.20]$$

Para obtener la expresión de las diluciones, se aplica el mismo principio que en vertidos en medio estacionario, hipótesis de Boussinesq, obteniendo un factor de la gravedad reducida dependiente de los mismos parámetros que la Ecuación 2.19.

$$g' = \frac{(\rho - \rho_a)g}{\rho_a} = f(Q, M, B, v, \theta, \phi) \quad [2.21]$$

Y tras sustituir los valores de l_m , l_Q y B , se obtiene un factor de dilución de forma similar a la Ecuación 2.20.

$$S \frac{l_Q}{l_m} = f\left(\frac{l_m}{l_Q}, \frac{v}{u_o}, \theta, \phi\right) \quad [2.22]$$

Expresando los términos de l_m y el cociente v/u_o en términos del Froude densimétrico se obtiene la Ecuación 2.13 y 2.23.

$$\frac{v}{u_o} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{-1/4} u_r F_{rd} \quad [2.23]$$

De esta manera las variables de estudio pueden obtenerse según las expresiones 2.24, y 2.25 para el caso particular de $v=0$ m/s.

$$\frac{Z_{me}}{DF_{rd}} = f(u_r, F_{rd}, \theta, \phi) \text{ o } \frac{S_{me}}{F_{rd}} = f(u_r, F_{rd}, \theta, \phi) \quad [2.24]$$

$$\frac{Z_{me}}{DF_{rd}} = f(\theta) \text{ o } \frac{S_{me}}{F_{rd}} = f(\theta) \quad [2.25]$$

Los primeros trabajos relevantes sobre vertidos sumergidos hiperdensos en medio dinámico son los de Pincince A.B. et al. (1973) que realizaron ensayos con 60° de inclinación, en un medio dinámico con una corriente perpendicular al difusor del vertido ($\phi=90^\circ$). Por otro lado, Chu (1975) y Tong y Stolzenbach (1979) analizaron vertidos en medio dinámico con un abanico más amplio de ángulos de descarga respecto a la corriente transversal (ϕ). No obstante, fueron Roberts y Toms (1987) quienes desarrollaron un extenso trabajo para un vertido a $\theta=90^\circ$ y $\theta=60^\circ$, bajo los efectos de una corriente perpendicular al chorro para varias velocidades del medio (u_r), cuyo rango de trabajo fue de $0 < u_r F_{rd} < 1.87$, con un rango de Froude densimétrico de $12 < F_{rd} < 26$. Como resultado se obtuvieron coeficientes experimentales para la cota máxima del chorro, y el punto de impacto (Z_{me}, X_i), además de la dilución alcanzada en estos puntos (S_{me}, S_i).

Más recientemente, Gungor y Roberts (2009) realizaron nuevos experimentos con un rango de $u_r F_{rd}$ entre 0.21 y 0.91 para vertidos verticales ($\theta=90^\circ$). Los coeficientes experimentales obtenidos se agrupan para conformar leyes de comportamiento de las variables estudiadas como muestran las siguientes ecuaciones.

$$\frac{Z_{me}}{DF_{rd}} = K_i \quad \text{para } 0.8 < u_r F_{rd} \quad [2.26]$$

$$\frac{Z_{me}}{DF_{rd}} = K_i (u_r F_{rd})^{-1/3} \quad \text{para } u_r F_{rd} > 0.8 \quad [2.27]$$

$$\frac{S_m}{F_{rd}} = A_i(u_r F_{rd})^{-1/3} \quad [2.28]$$

$$\frac{S_i}{F_{rd}} = B(u_r F_{rd})^{1/2} \quad [2.29]$$

Además, Gungor y Roberts (2009) desarrollaron una ley para la estimación del punto de impacto (X_i).

$$\frac{X_i}{DF_{rd}} = J_i \quad [2.30]$$

Con el objetivo de mejorar la caracterización de los vertidos bajo el efecto de la hidrodinámica del ambiente receptor, Abessi y Roberts (2015) desarrollaron un estudio en el que se determinó el comportamiento del chorro en campo cercano, tras el impacto del efluente con la superficie de la lámina libre para diferentes velocidades del medio. En esta investigación se presenta el parámetro adimensional DF_{rd}/H_A , con el fin de analizar el efecto de la profundidad a la que tiene lugar la descarga de la salmuera. Como resultado se obtuvo que para los ángulos de 30°, 45° y 60° los límites para los que no existe impacto con la superficie del agua son inferiores a 1.15, 0.7 y 0.64 respectivamente.

La tabla 2.4 muestra los coeficientes experimentales para los ensayos dinámicos de Roberts y Toms (1987), y Gungor y Roberts (2009).

Tabla 2.4. Coeficientes experimentales para medio dinámico

Investigación	$\Theta = 60^\circ$						
	\varnothing	θ	A_i	B_i	K_i	J_i	
Roberts and Toms (1987)	90°	90°	0.80	2.00	2.8	2.50	nd

Investigación	$\Theta = 90^\circ$						
	\varnothing	θ	A_i	B_i	K_i	J_i	
Roberts and Toms (1987)	90°	90°	0.80	2.00	2.8	2.50	nd
Gungor and Roberts (2009)	nan	nan	0.87	2.30	2.8	2.50	5.60

En esta tesis doctoral se han llevado a cabo ensayos en los que el parámetro $u_r F_{rd}$ abarca un rango de (0-2.5), con un rango de F_{rd} de (22-61), con lo que se pretende completar los trabajos ya comentados en este apartado. Además, se incluyen ángulos de vertido inicial (θ) de 30° a 150°, con el propósito de estudiar los vertidos en counter-flow.

2.2.2 Descripción del campo cercano a partir de la trayectoria del vertido

La aproximación al comportamiento de un vertido hiperdenso mediante un chorro sumergido inclinado, puede realizarse a través de formulaciones que determinen la posición del eje del vertido a lo largo de su recorrido. Sin embargo, las soluciones sólo son válidas hasta el punto de impacto del vertido, ya sea en el fondo o en superficie (Palomar 2014).

Un ejemplo de esta aproximación es la desarrollada por Davidson y Pun (2000), que analizaron vertidos de flotabilidad positiva. La formulación sirvió de base para el desarrollo de las formulaciones analíticas desarrolladas por Cipollina et al. (2004) o Kikkert et al. (2007), que permiten predecir la trayectoria del vertido y la posición de la cota máxima del eje y su posición (X_m, Z_m), la cota máxima alcanzada por el vertido (Z_{me}) y el punto de retorno (X_{rp}).

Para describir esta metodología de estudio, en este apartado se han desarrollado a modo de ejemplo las ecuaciones propuestas por Kikkert et al. (2007). Así pues, asumiendo que el flujo es dominado por la

cinética del mismo en las proximidades del difusor, se puede deducir que el desplazamiento en la dirección tangente (s) al ángulo inicial respecto a la dirección ortogonal (n) sigue la siguiente trayectoria:

$$\frac{dn}{ds} = \frac{B \cos \theta}{1 - B \sin \theta} \quad [2.31]$$

Por otro lado, la longitud a la que tiene lugar la transición entre chorro y pluma del vertido, se define en función de la expresión 2.32.

$$S_{JP} = \left[\frac{C_1}{C_2} \frac{1}{k} \left(\frac{\pi}{C_3} \right)^{1/2} \right]^{1/2} F_{rd} \quad [2.32]$$

Donde C_1 , C_2 y C_3 (1.7, 2 y 3.8 respectivamente) son constantes de integración y k es un coeficiente constante de valor 0.11. Del mismo modo las coordenadas x y z se definen como sigue:

$$z = s \sin \theta - n \cos \theta \quad [2.33]$$

$$x = s \cos \theta - n \sin \theta \quad [2.34]$$

Integrando las ecuaciones anteriores se pueden determinar las coordenadas y las diluciones alcanzadas en los puntos característicos planteados por Kikkert et al. (2007) como:

$$Z_m = S_{JP} \sin^{3/2} \theta \left\{ 1 + \frac{1}{\tan^2 \theta} \left[1 - \frac{1}{2 \sin \theta} \ln \left(\frac{1 + \sin \theta}{1 - \sin \theta} \right) \right] \right\} \quad [2.35]$$

$$X_m = \frac{S_{JP} \cos \theta}{2 \sin^{1/2} \theta} \ln \left(\frac{1 + \sin \theta}{1 - \sin \theta} \right) \quad [2.36]$$

$$X_{RP} = S_{JP} \cos \theta \left\{ 1 - \frac{1}{2 \sin^{1/2} \theta} \ln \left(\frac{1 + \sin^{1/2} \theta}{1 - \sin^{1/2} \theta} \right) + 12^{1/3} \left[1 - \left(\frac{1}{C_{ORP}} \right)^{1/3} \right] \right\} \quad [2.37a]$$

$$C_{ORP} = 1 + \sin \theta \left\{ 1 - \frac{1}{\tan^2 \theta} \left[-1 + \frac{1}{2 \sin^{1/2} \theta} \ln \left(\frac{1 + \sin \theta}{1 - \sin \theta} \right) \right] \right\} \quad [2.37b]$$

$$Z_{me} = S_{JP} \sin^{1/2} \theta \left\{ \sin \theta \left(1 + \frac{1}{\tan^2 \theta} \left[1 - \frac{1}{2 \sin \theta} \ln \left(\frac{1 + \sin \theta}{1 - \sin \theta} \right) \right] \right) + 2\lambda k \right\} \quad [2.38]$$

Donde λ es el radio del vertido. Para la obtención de las diluciones alcanzadas se establece una relación entre la flotabilidad relativa y la flotabilidad inicial del vertido, similar a la realizada en el análisis dimensional.

$$\frac{g'}{B} = 2C_2 k \left[\frac{1}{\pi C_3} \right]^{1/2} S_m \quad [2.39]$$

Asumiendo que la distancia en horizontal entre la cota máxima del eje (X_m) y la posición de la cota máxima del vertido (X_{me}) es despreciable, la dilución en el punto (Z_{me}) se obtiene como el 7% de S_m . Para la obtención de la dilución en el punto de retorno, se realiza un proceso similar al presentado en la Ecuación 2.40.

$$\frac{g'_r}{B_r} = \frac{12^{1/3}}{\pi \lambda} \frac{C_2}{C_1^{1/2}} C_{RP}^{2/3} \quad [2.40]$$

Las 6 ecuaciones anteriores se pueden emplear para la estimación de los puntos geométricos y las diluciones alcanzadas en la zona de chorro y pluma, es decir, antes de que el vertido impacte sobre el fondo marino. No obstante, para la aplicación estas formulaciones, se debe aceptar la hipótesis de que los perfiles transversales al eje del vertido, antes del impacto sobre el fondo marino, se comportan como un perfil gaussiano. Sin embargo, tal y como muestra la Figura 2.7, la semejanza de las secciones a una campana de Gauss sólo es aplicable a las zonas más próximas al difusor (chorro). Mientras que, en las zonas más alejadas (pluma), la auto semejanza se pierde progresivamente, debido a los desprendimientos de masa que tienen lugar en la parte inferior del vertido ($r > 0$).

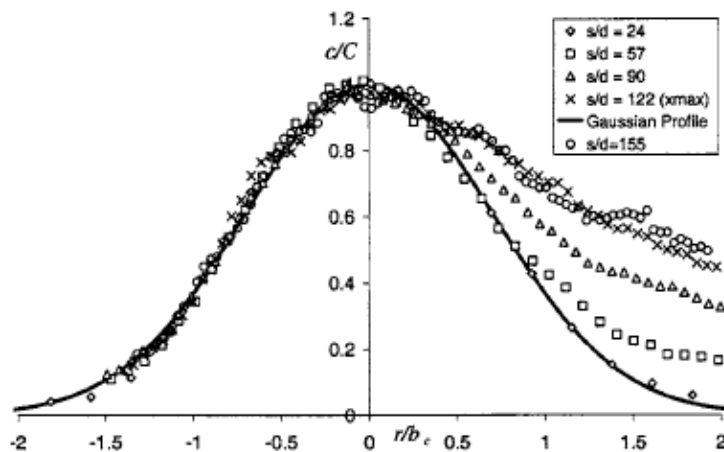


Figura 2.7. Perfiles de un vertido hiperdenso, comparación con un perfil gaussiano, nótese que las coordenadas negativas corresponden a la parte superior del vertido (Kikkert et al. 2007)

2.2.3 Análisis dimensional del campo lejano

El campo lejano es una corriente de gravedad formada tras el impacto del vertido sobre el fondo marino. De forma, previa a la formación de la corriente de gravedad totalmente desarrollada, el flujo de salmuera se desplaza por una zona intermedia entre la pluma del vertido y el campo lejano, denominado zona de transición. Esta zona se caracteriza por experimentar fuertes fluctuaciones donde la energía cinética provocada por el impacto del chorro tiende a disiparse, y los procesos de mezcla con el entorno se vuelven menos importantes. La zona de transición fue estudiada en profundidad por Roberts et al. (1997), que en base al estudio de las fluctuaciones plantearon un límite para el final del campo cercano (final de la zona de transición) en $X/DF_{rd}=9$.

Sin embargo, el límite físico desarrollado por Roberts fue obtenido tras el estudio de descargas en un medio estacionario y un ángulo $\theta=60^\circ$. Palomar (2014) apuntó (Figura 2.8) que el estudio de las fluctuaciones para otros ángulos ($\theta=30^\circ$ y 45°), puede arrojar valores distintos de límites entre campo cercano y lejano (X_s). Este análisis no se desarrolló enteramente, pues el objeto del estudio de Palomar no era caracterizar X_s , sino estudiar la evolución de los parámetros de estudio como la velocidad o la concentración de la zona de transición.

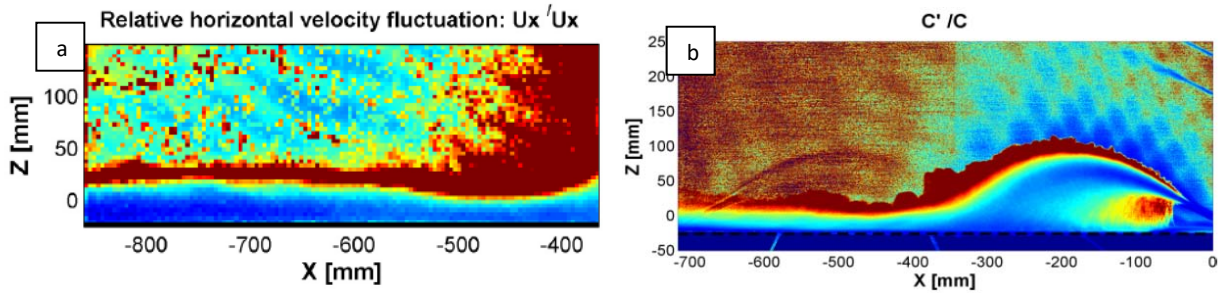


Figura 2.8. Campos de fluctuaciones de velocidad en la zona de transición (a) y campo de fluctuaciones de la concentración (b) para un vertido con 30° de inclinación (Palomar 2014)

Al contrario que ocurre con el campo cercano, el campo lejano no ha sido objeto de tantas investigaciones. Para explicar el comportamiento físico de esta zona se recurre a estudios relacionados con las corrientes de gravedad originadas por diferencias de densidades. En la Figura 2.9 se muestra un esquema de la corriente de gravedad formada por un vertido hipersalino, que ha impactado sobre el fondo del medio receptor.

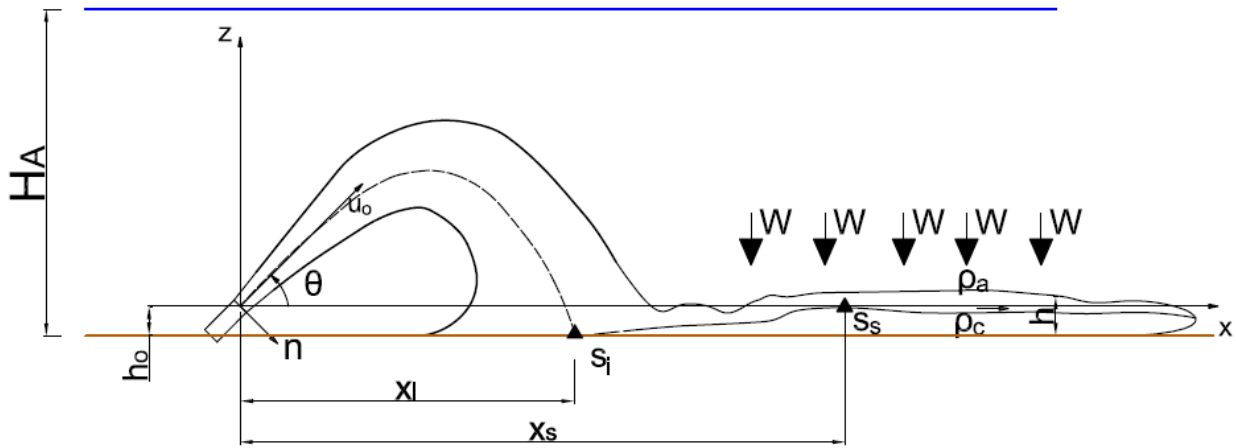


Figura 2.9. Esquema de la corriente de gravedad

Después del punto de impacto (X_i), las fluctuaciones de la velocidad y densidad del flujo comienzan a reducirse, debido al colapso de la turbulencia y a la influencia de la estratificación, que “re-laminariza” el flujo (Roberts et al. 1997). Una vez superada la zona de transición, el flujo se vuelve mucho más lento y los procesos de dilución se concentran en la cabeza y en la interfaz de la corriente de gravedad, con la incorporación de fluido de densidad menor (ρ_a) proveniente del medio receptor (W). Del mismo modo que sucede en campo cercano, la velocidad del medio (v) influye en el comportamiento de la corriente de gravedad.

Al igual que en el apartado anterior, se presentan aquí las formulaciones que describen el comportamiento de los vertidos en campo lejano a través del análisis dimensional. Las siguientes expresiones adimensionales fueron propuestas por Roberts et al. (1997) para caracterizar el comportamiento de la zona de transición, para un determinado ángulo (θ). En esta tesis doctoral se ha empleado el mismo principio para la caracterización de las variables de estudio en campo lejano, como por ejemplo el espesor de la corriente de gravedad (h), la posición de la trayectoria de la corriente (Z_c) o las diluciones en puntos característicos.

$$\frac{Z_c}{DF_{rd}} = K_1; \frac{X_s}{DF_{rd}} = K_2; \frac{h_s}{DF_{rd}} = K_3; \frac{S_s}{F_{rd}} = K_4; \frac{L_s}{DF_{rd}} = K_5; \frac{uF_{rd}}{U_o} = K_6 \quad [2.41]$$

Donde:

Z_c : Cota del eje del vertido en cada punto.

X_s : Posición del final de la zona de transición, inicio del campo lejano.

h_s : Espesor de la corriente de gravedad en el inicio del campo lejano.

S_s : Dilución en el inicio del campo lejano.

L_s : Longitud recorrida por la trayectoria en el inicio del campo lejano.

u : Módulo de la velocidad de la corriente de gravedad

K_i : Coeficientes adimensionales.

Gran parte de los trabajos relacionados con las corrientes de gravedad hallados en la literatura, se han aproximado al fenómeno describiendo el comportamiento de una corriente de gravedad en un medio estacionario ($v=0$ m/s), como por ejemplo los llevados a cabo por Altinakar et al. (1996) o Hallworth et al. (1996), entre otros. La mezcla producida entre los fluidos de distinta densidad se suele parametrizar en función del número de Richardson (R_i), definido en Ellison y Turner (1959) como:

$$R_i = \frac{g'h}{u^2} \cos(\alpha) \quad [2.42]$$

Donde:

u : la velocidad de la corriente de gravedad.

h : altura de la corriente de gravedad.

α : pendiente del fondo.

La entrada de fluido ambiente, o *entrainment*, se define como indica la Ecuación 2.43.

$$E = \frac{W}{u} = f(R_i) \quad [2.43]$$

El *entrainment coefficient* (E) depende de la velocidad de la entrada de agua ambiente en la corriente de gravedad (W). Por otro lado, el número de Richardson (R_i) representa el ratio entre las fuerzas de flotabilidad y las tensiones tangenciales en la interfaz entre flujos, así pues a mayor influencia de la flotabilidad de la corriente, menor capacidad de mezcla. Es decir, si R_i aumenta la entrada de flujo del ambiente disminuye y viceversa.

Las parametrizaciones de la forma $E=f(R_i)$ se han obtenido a partir de ensayos de laboratorio, como hicieron Jacobson y Testik (2014), entre otros. Estas estimaciones se realizaron para corrientes de gravedad de partículas en suspensión (arcillas) y corrientes de gravedad originadas por diferencias térmicas. Alguna de las parametrizaciones más comúnmente empleadas es la desarrollada por Ellison y Turner (1959) para flujos bicapa, Ecuación 2.44:

$$E = \frac{0.08 - 0.1R_i}{1 + 5R_i} \quad R_i < 0.8 \quad [2.44]$$

Más recientemente, se han realizado investigaciones en las que se han tomado datos en campo, a fin de caracterizar las corrientes de gravedad formadas por las descargas de desaladoras (Portillo et al. 2013). En este trabajo en particular, se tomaron datos de los vertidos producidos en la planta desaladora de Maspalomas (Gran Canaria) bajo diferentes condicionantes hidrodinámicos, esto supone una aproximación al estudio de los vertidos hiperdensos similar al realizado en esta tesis doctoral.

Por otra parte, el estudio el campo lejano en laboratorio, supone una dificultad desde el punto de vista del montaje experimental. Esto es debido al espacio abarcado por esta zona de la descarga de salmueras, varios kilómetros en prototipo, por lo que reproducir en un tanque de experimentación todo el vertido induce escalas de trabajo muy pequeñas, y sus errores de escala asociados. Por tanto, el modelado del

vertido de forma conjunta, campo cercano y lejano, suele ser sustituido por una corriente de gravedad formada por un flujo hiperdenso vertido por fondo.

En 2015, Perez-Diaz et al. realizaron un trabajo sobre la caracterización de vertidos de salmuera en campo lejano mediante una descarga por fondo. La Figura 2.10 muestra un esquema del montaje experimental realizado.

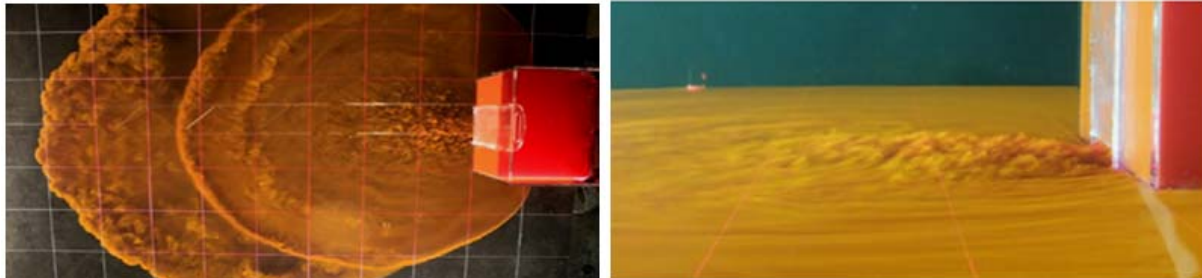


Figura 2.10. Vertido por fondo de una corriente de gravedad (Perez-Diaz et al. 2015)

Es destacable que esta tesis doctoral ha abordado el fenómeno de la corriente de gravedad reproduciendo el vertido desde el difusor, es decir, se ha generado un campo lejano real en modelo, evitando los posibles errores de escala inducidos por una compuerta sumergida.

2.3 Análisis experimental de los vertidos

2.3.1 Técnicas no intrusivas

Se entiende por técnicas no intrusivas aquellas basadas en sistemas que no alteren el fenómeno físico caracterizado. En el ámbito del estudio de los flujos hiperdensos, las técnicas no intrusivas suelen estar basadas en la adquisición de imágenes. Las técnicas ópticas en hidrodinámica experimental se pueden emplear para caracterizar los campos de velocidades o de concentraciones. En este apartado se presentarán los principales resultados tras aplicar este tipo de técnicas a la caracterización de flujos hiperdensos.

Con el objetivo de determinar los campos de velocidades formados por la irrupción del vertido en un medio receptor, se emplean técnicas de velocimetría como el sistema PIV (Particle Image Velocimetry). Esta metodología permite obtener, a partir de trazadores, los campos vectoriales y turbulentos formados por el vertido hiperdenso. El empleo de esta técnica para la caracterización de flujos es algo común, y ha sido estudiada en profundidad en otros trabajos desarrollados desde el GEAMA, y se pueden revisar en profundidad en Anta (2009) y posteriores publicaciones. La Figura 2.11 muestra un esquema de funcionamiento de la misma.

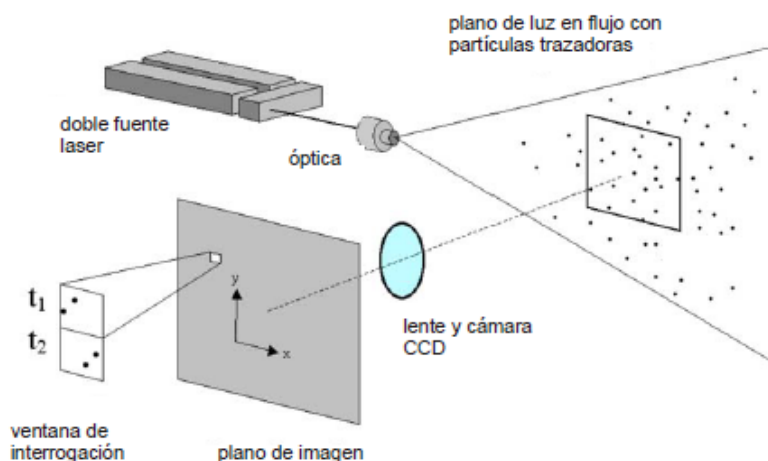


Figura 2.11. Esquema básico de las técnicas PIV (LaVision, 2002)

El fundamento de la toma de datos para la formación del campo vectorial se realiza de la siguiente forma. Si se toman dos imágenes consecutivas y se calcula la correlación cruzada entre ambas, la función tendrá un máximo que se corresponde con el valor del desplazamiento medio de las partículas (si éstas se mueven de un modo aproximadamente uniforme y siguen la dirección del flujo). Esta idea se esquematiza en la Figura 2.12.

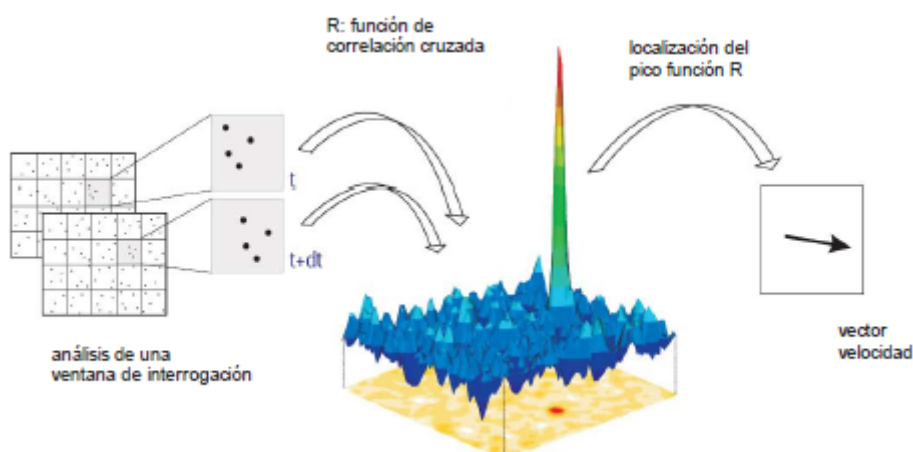


Figura 2.12. Esquema de obtención del campo de velocidades con PIV (LaVision, 2007)

La técnica PIV se ha empleado para la caracterización del campo de velocidades, a fin de estimar una trayectoria de velocidades máximas, (Shao y Law 2010) o (Lai y Lee 2012). Con este nuevo eje de trayectoria se pueden estimar los límites de influencia del campo cercano y campo lejano. Por ejemplo, delimitando la zona de transición, como aquella en la que la fluctuación de la velocidad tiende a cero (Roberts et al. 1997).

Por otro lado, las técnicas de caracterización para los campos de concentración emplean un sistema de tratamiento de imágenes diferente. Los sistemas láser de fluorescencia inducida o LIF (Laser Induced Fluorescence) son de uso común en estudios de este tipo. La técnica LIF se basa en el registro de imágenes en la que un trazador, sensible a la longitud de onda emitida por el láser, se excita tornándose fluorescente. El equipo de registro, al igual que en la técnica PIV, consta de lentes que sólo registran un espectro muy específico de longitud de onda. En el equipo disponible en las instalaciones de la UDC el láser emite en una longitud de onda de 532 nm. El trazador fluorescente empleado en la rodamina 6G, que absorbe la energía en dicho espectro de luz y la emite en una longitud de onda de 560 nm (Figura 2.13).

Basic processes involved (linear regime):

- ▶ Laser illuminates the probe volume (sends photons at λ_L).
- ▶ The LIF scatterer absorbs light at λ_L and emits light at λ_{LIF} .
- ▶ Detector collects the emitted light and converts photons to a signal.

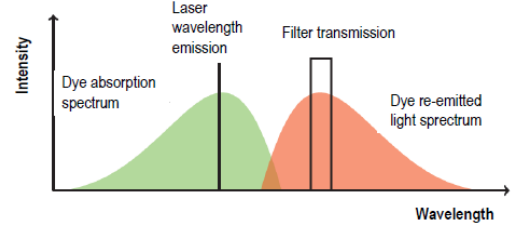
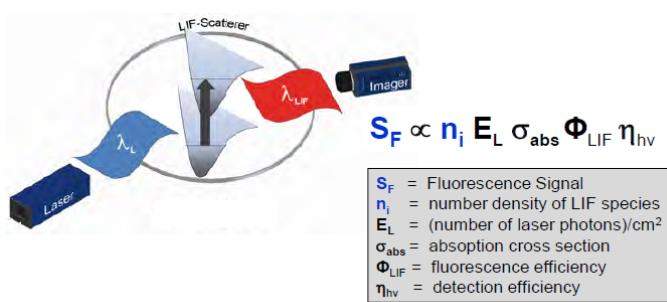


Figura 2.13. Esquema de funcionamiento de la técnica LIF (LaVision, 2013)

La técnica LIF registra la intensidad lumínica (S_l) en un plano atendiendo a la Ecuación 2.45.

$$S = f_{optic} E V_c Q_\lambda A_c C = f_{optic} E V_c Q_\lambda e^{-\epsilon L C} C \quad [2.45]$$

Donde:

c : concentración de trazador.

E : Intensidad lumínica del láser.

Q_λ : eficacia quantum (a la longitud de onda de excitación del láser).

f : factores ópticos.

V_c : volumen de medida.

A_c : término de representación del fenómeno de absorción o atenuación de la intensidad de la luz en su trayectoria (L) por el fluido con índice de absorción (ϵ).

EL fenómeno de absorción es más acusado cuanto mayor es la concentración de trazador en el medio a caracterizar, como indica la Ecuación 2.46.

$$C = \frac{S_l}{\alpha E} \quad [2.46]$$

La relación entre el nivel de fluorescencia o intensidad lumínica (S_l), la concentración del trazador (C) y la intensidad de la luz emitida por el láser (E) es lineal y depende de un parámetro (α), que engloba todos los parámetros experimentales, y que se obtiene en el proceso de calibración explicado en el Capítulo 3 de esta tesis doctoral.

Por lo tanto, la delimitación de la atenuación mediante una configuración óptima del sistema de adquisición (determinación de C y α), es clave para limitar la atenuación del láser. Ferrier et al. (1993) estudiaron los factores que influyen en la atenuación de la intensidad lumínica en función de la fuente de luz y la longitud recorrida por el haz. Por otro lado, las reacciones químicas entre la Rodamina 6G, trazador más usual para estudios de vertidos en chorro sumergido y el medio receptor, fueron estudiados por varios autores, Hartmann et al. (2005) o Palomar (2014). Teniendo en cuenta las fuentes de error citadas, Vanderwel y Tavoularis (2014) trataron de determinar la precisión de la técnica LIF para vertidos de igual densidad que el medio receptor, mediante un trazador tipo Rodamina 6G. Al no existir un aporte de masa, debido a la diferencia de densidad, se crea una lámina estrecha de trazador, que fue analizada mediante secciones transversales (Figura 2.14). Como conclusión principal se obtuvo que, para plumas con un espesor inferior a 1/3 del ancho del plano láser, el error cometido es muy grande. Por ello es necesario asegurar que el plano láser incida en una zona en la que exista una cantidad suficiente de trazador. Esto

no es un factor limitante en los trabajos de análisis de vertidos sumergidos a partir de una distancia reducida del difusor, ya que la forma del chorro ocupa un volumen mucho mayor que el plano de luz

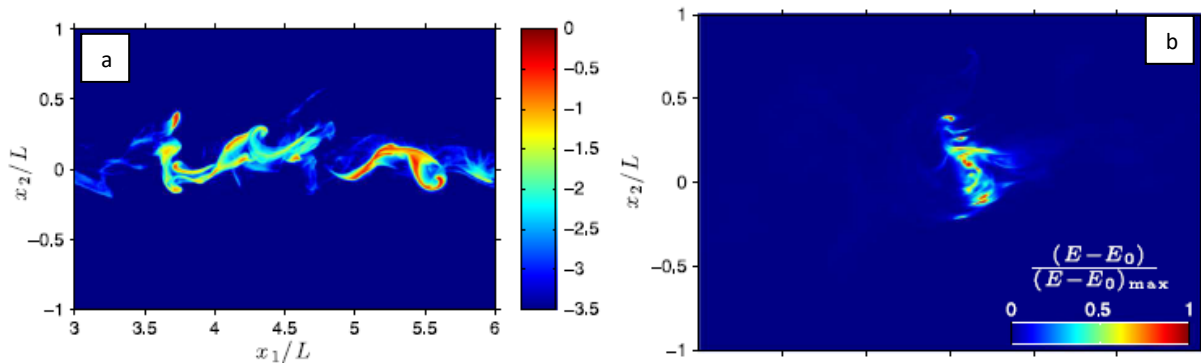


Figura 2.14. Vertido de un trazador en un medio dinámico (a). Sección transversal de la pluma (b), Vanderwel y Tavoularis 2014

El empleo de esta técnica en las últimas décadas ha sido de uso frecuente en la caracterización de los chorros sumergidos. Además, las técnicas PIV y LIF se pueden aplicar de manera conjunta y simultánea como se puede ver en los trabajos de Law y Wang (2000), Shao y Law (2010) o (Palomar et al. 2012 parte 1) entre otros. Estas metodologías han sido estudiadas de forma conjunta por Tarrade et al. (2012) para la aplicación sobre vertidos de salmuera en un medio estacionario.

Otros investigadores, sin embargo, emplearon de forma conjunta técnicas ópticas convencionales para complementar las medidas de LIF, como por ejemplo Kikkert et al. (2007) Figura 2.15. La presente tesis doctoral es novedosa en la aplicación de ambas técnicas láser sobre descargas de salmuera en medio dinámico, y más concretamente en aquellas producidas en sentido opuesto a la corriente del medio receptor.

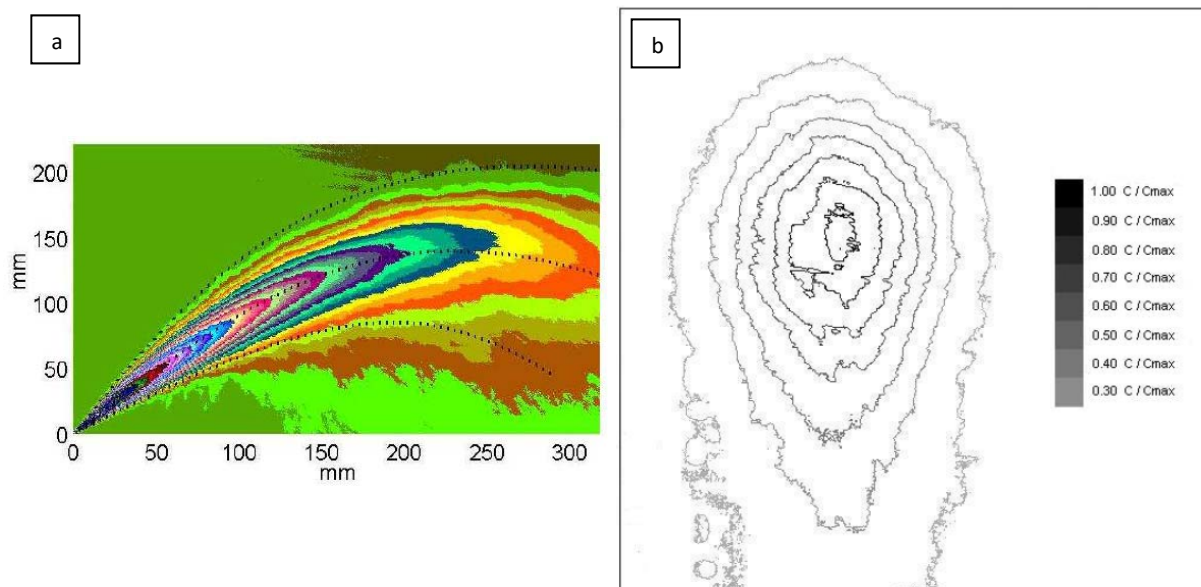


Figura 2.15. Campo de concentraciones promediados, técnica LIF (a). Sección vertical obtenida mediante atenuación lumínica (óptica convencional), b, Kikkert, 2010

Todos los trabajos mencionados hasta el momento, tienen en común el hecho de que el vertido tiene lugar en un medio receptor estacionario y en todos ellos se ha empleado la técnica LIF, con medidas en el plano medio del vertido. No obstante, recientemente se han llevado a cabo trabajos con vertidos en medio dinámico y bajo diferentes configuraciones de vertido e hidrodinámicas (Roberts y Ozeiar, 2012). La técnica empleada fue 3DLIF, que permite obtener datos en todo el cuerpo de la pluma formada por el

vertido. Para poder cubrir todo el dominio tridimensional, un sistema de motores y óptica permite desplazar la posición del láser a lo ancho de la zona de análisis y se pueden obtener campos tridimensionales de concentraciones. La Figura 2.16 muestra algunos de las configuraciones ensayadas en este estudio donde el rango de velocidades del medio empleado fue $0.89 < U_r F_{rd} < 3.42$.

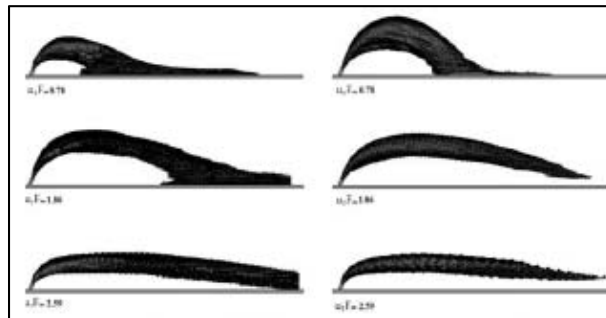


Figura 2.16. Configuraciones ensayadas para medio dinámico, (Roberts y Ozeiar 2012)

Los trabajos llevados a cabo por Roberts y Ozeiar (2012) tomaron como base los datos aportados por la investigación realizada por Gungor y Roberts (2009), en la que fue analizado el comportamiento de las variables geométricas del vertido respecto a la velocidad del medio receptor, como por ejemplo las cotas máximas del vertido (Z_{me}) o de la trayectoria (Z_m), además de su dispersión radial (Figura 2.17).

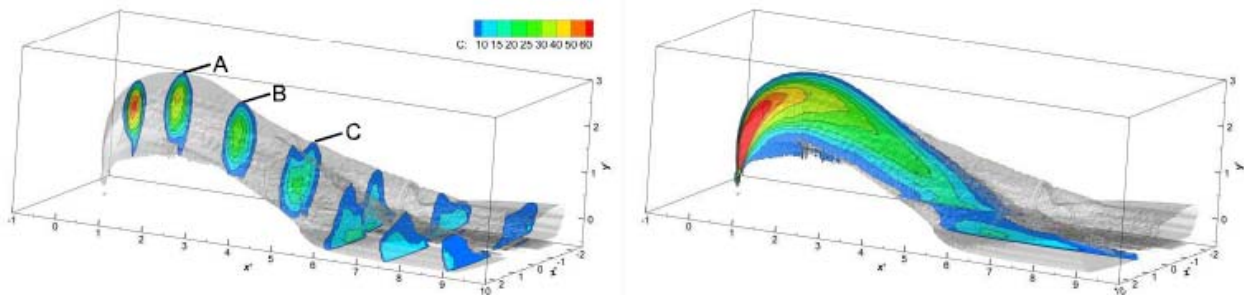


Figura 2.17. Caracterización de la dispersión radial del vertido y su evolución en el plano medio, aplicando la técnica 3DLIF (Gungor y Roberts 2009)

Por último, entre las técnicas ópticas se encuentran aquellas en las que la imagen se toma con un patrón superpuesto a la ventana de visualización, y aquellas en las que se emplea una calibración para cuantificar la cantidad de luz registrada. El primer método es aplicable solo cuando se pretendan medir las variables geométricas del vertido, tal y como muestra la Figura 2.18.

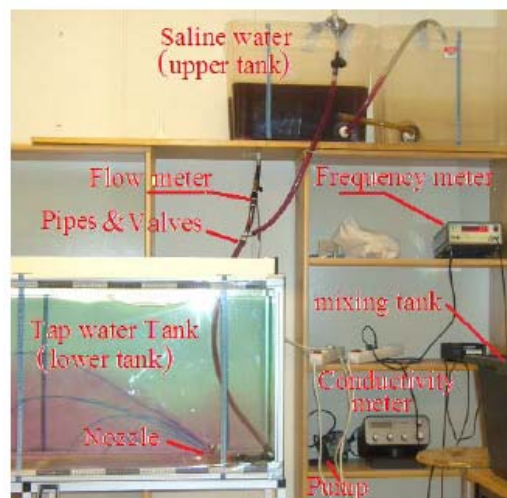


Figura 2.18. Montaje experimental para un sistema de grabación mediante patrón geométrico (Bashitialshaer et al. 2012)

En segundo lugar, están los sistemas que requieren de una calibración minuciosa, a fin de estimar la concentración del vertido en un plano. Para ello es necesario disponer de unas condiciones de ensayo muy rígidas, a fin de reproducir las condiciones de calibración. Kikkert et al. (2010) desarrolló una metodología basada en la toma de imágenes de un vertido iluminado por una fuente de luz. La Figura 2.19 muestra un esquema de dicho montaje experimental.

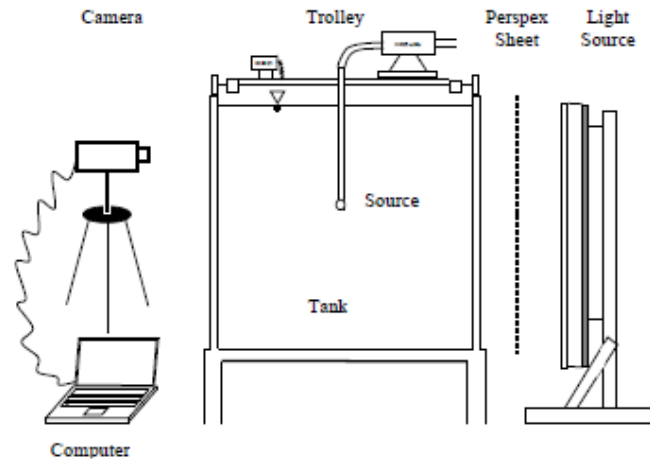


Figura 2.19. Montaje experimental para la metodología experimental desarrollada por Kikkert et al. (2010)

2.3.2 Técnicas intrusivas

Entre los diferentes métodos empleados para la caracterización de vertidos, están aquellos conformados por uno o varios elementos que en algún momento (o en todo el proceso del ensayo), deben tener contacto con el fluido a estudiar. Como los equipos se introducen en el fluido, éstos provocan una distorsión de la hidrodinámica del vertido, que podría llevar a una interpretación errónea de los resultados obtenidos. La manera más común de caracterizar por ejemplo la conductividad de un medio en estos casos, es a través de pequeños tubos conectados a una bomba que toma una muestra del fluido en un punto específico para analizarla a posteriori mediante un sensor provisto de los elementos necesarios para cuantificar un parámetro físico en concreto, por ejemplo la conductividad del medio.

A continuación, se presentan algunos de los trabajos realizados hasta la fecha, que han empleado sensores de conductividad para determinar la concentración de los vertidos hiperdensos. Roberts y Toms (1987) usaron estos elementos localizados en puntos característicos del vertido. Estos sensores, normalmente comerciales, emplean la Ley de Ohm (Ecuación 2.47) donde se establece que la intensidad (I) de una corriente eléctrica es directamente proporcional a la diferencia de potencial o voltaje (V), e inversamente proporcional a la resistividad (R) del medio por el que circula la mencionada corriente eléctrica.

$$I = \frac{V}{R}; R = \frac{V}{I}; C = \frac{1}{R} \quad [2.47]$$

De esta forma, conociendo la distancia entre ánodos (espacio por el que circula la corriente) y dada una intensidad o amperaje, se puede estimar la resistencia del medio, o lo que es lo mismo, su inversa o conductancia (C). Dado que la conductancia depende de la capacidad del medio para la transmisión de electrones, la cantidad de sólidos en suspensión (ej. corrientes de turbidez) o la salinidad del flujo (salmueras), influye directamente en la conductividad del medio. De este modo es posible determinar la concentración de un fluido en un punto en particular.

Comúnmente se emplean conductivímetros comerciales que transforman directamente la conductividad registrada (S/cm) en unidades, bien de turbidez NTU (Nephelometric Turbidity Unit) o bien en unidades de concentración ppt (Partes Por Trillón). Sin embargo, no siempre se emplea un equipo comercial y por ello la conversión mencionada depende de una cuidada calibración, en la que influyen la concentración de soluto y la temperatura del fluido.

Los sistemas de detección de la conductividad se han empleado en diversos estudios, como por ejemplo para la detección de burbujas de aire en la zona de aguas blancas de un resalto hidráulico (Hubert Chanson, 2009). No obstante, el empleo de los mismos en la caracterización de corrientes estratificadas es más común. Así pues, Jay Head (1983) empleó microsondas de conductividad para estudiar la variación de la densidad de una corriente de salmuera frente a cambios en la temperatura.

También existen investigaciones que emplean sondas de conductividad para la determinación de la dilución del vertido. Por ejemplo Roberts et al. (1997) o Miller (2006) emplearon sondas de conductividad para contrastar las medidas aportadas por las técnicas láser. Sin embargo, dada la configuración de estos ensayos, se pierde información de los procesos de mezcla en las zonas de impacto y la consecuente dispersión del vertido en planta.

Más recientemente, Papakonstantis et al. (2011b) ejecutaron un montaje experimental en el que se posicionaron varios sensores comerciales en el fondo de un canal de experimentación, con el objetivo de caracterizar la dispersión radial de un vertido.

Esta tesis doctoral presenta una metodología de trabajo basada en una malla de conductivímetros de fabricación propia. La metodología pretende caracterizar la corriente de gravedad formada por el vertido de salmuera, obtener mapas de concentración en planta y poder caracterizar la evolución longitudinal y radial del flujo bicapa.

2.4 Modelización numérica de los vertidos

En este apartado se realiza una revisión de algunas de las herramientas numéricas comerciales más comunes para la modelización de los vertidos hiperdensos, entre los que se destacan los siguientes: CORMIX, VISUAL PLUMES (UM3) y VISJET, además de la herramienta elaborada por el Instituto de Hidráulica Ambiental IH Cantabria (brIHne). También se hará una introducción al funcionamiento de estos modelos, y una comparación con los resultados obtenidos mediante formulaciones empíricas, en base al trabajo desarrollado por Palomar (2014).

Para la simulación de vertidos de flotabilidad negativa y el diseño de los sistemas de descarga de salmueras, son empleados comúnmente los softwares comerciales CORMIX (Doneker y Jirka 2001), VISUAL PLUMES (Frick 2004) y VISJET (Cheung et al. 2000). No obstante, todos ellos fueron planteados para la modelización de vertidos de flotabilidad positiva. Teniendo en cuenta que para la resolución de ecuaciones hidrodinámicas y de transporte para vertidos en medios marinos, se suelen emplear las aproximaciones lagrangiana y euleriana, se deben aplicar las siguientes hipótesis:

- Fluido incompresible (descomposición de campos medios y turbulentos).
- Aproximación de Boussinesq (se desprecian los efectos de la diferencia de densidades salvo en la flotabilidad).
- Se desprecia la difusión molecular.

Sin embargo, para la correcta aplicación de los modelos es necesario realizar una aproximación bien mediante análisis dimensional, integración de ecuaciones diferenciales o bien mediante aproximaciones numéricas. El primer método requiere de la calibración del modelo mediante ensayos experimentales, tal

y como hicieron Roberts et al. (1997) o Shao y Law (2010). A este tipo de modelos pertenece el CORMIX, que se emplea para vertidos de flotabilidad positiva y negativa.

Por otro lado, los modelos basados en la integración de ecuaciones diferenciales ordinarias, son más fáciles de resolver mediante métodos numéricos. Dado que se debe asumir un cuerpo receptor ilimitado, este método no funciona correctamente cerca del punto de impacto del vertido, al no poder establecer la condición de contorno del fondo.

Los modelos integrales han sido desarrollados para vertidos de desaladoras por diferentes autores, entre los que se encuentran Cipollina et al. (2004), que plantearon un modelo para determinar el comportamiento del chorro en los primeros estados del mismo. Por otro lado, el estudio de la zona de mezcla, directamente relacionado con el cálculo del *entrainment*, fue analizado por Kaminski et al. (2005) y Papanikolaou et al. (2008). Como referencia para estos modelos podemos citar el CORJET, UM3 y JETLAG, que al igual que el CORMIX, se emplean para vertidos de flotabilidad positiva y negativa, pero para uno o varios difusores.

Dado que los fenómenos turbulentos se caracterizan por tener un elevado número de Reynolds, el coste computacional es muy elevado con modelos comunes o DNS (Direct Numerical Simulation). Por ello los modelos numéricos tipo CFD (Computational Fluid Dynamics), son más recomendables para resolver este tipo de problemas. Existe algún trabajo en el que la aplicación de modelos CFD es comparada con resultados obtenidos experimentalmente, como por ejemplo, los realizados por Plum (2008) y Oliver et al. (2008). Siguiendo con esta línea de trabajo, Gildeh et al. (2015) compararon resultados experimentales con aquellos obtenidos numéricamente mediante CFD, con una gran correlación con los parámetros geométricos del vertido. La Figura 2.20 muestra una comparación entre resultados experimentales y estimaciones llevadas a cabo con el modelo numérico, para la trayectoria de un vertido hiperdenso con $\theta=45^\circ$.

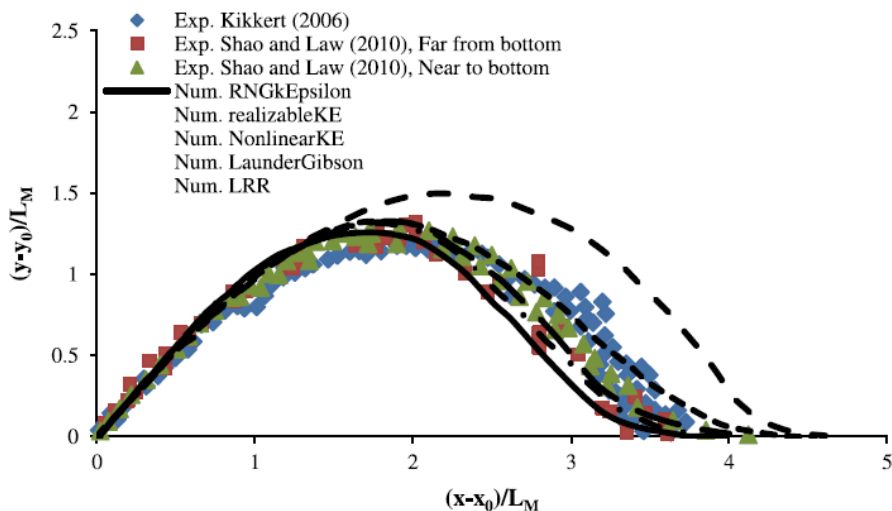


Figura 2.20. Comparación de resultados experimentales, de varios autores, y modelo numérico (Gildeh et al. 2015) Otros investigadores, como Loya-Fernández et al. (2012), compararon las zonas de mezcla para los vertidos hiperdensos, provenientes de una desaladora mediante la aplicación de cuatro modelos

numéricos (CORMIX1, CORJET, MEDVSA y UM3). La Figura 2.21 muestra la relación entre las predicciones de salinidad y las medidas tomadas in situ.

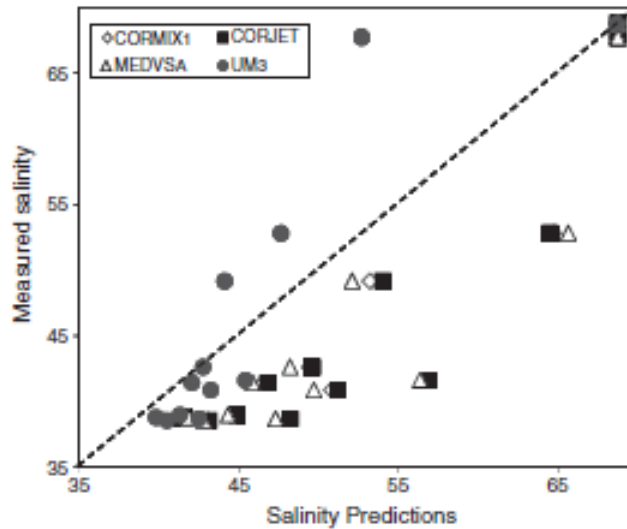


Figura 2.21. Comparativa entre estimaciones y medidas in situ de la salinidad, para cuatro modelos diferentes (Loyaw-Fernández et al. 2012)

No obstante, aunque los modelos numéricos comerciales han evolucionado notablemente empleadas para la estimación de vertidos hipodensos, éstos tienen errores además de ciertas limitaciones, cuantificados por Palomar et al. (2012a), tal y como muestra la Tabla 2.5. Para determinar estas diferencias se obtuvieron los coeficientes experimentales para $F_{rd}=10, 20, 30$ y 40 de varios autores, y se compararon con los valores obtenidos aplicando los modelos numéricos citados.

Tabla 2.5. Error promedio cometido de los modelos comerciales respecto a valores experimentales. < Infravaloran, > Sobrevaloran (Palomar et al. 2012b)

Error estimado para los modelos numéricos para descargas hiperdensas sumergidas										
Estacionario	Variable	$\theta = 30^\circ$			$\theta = 45^\circ$			$\theta = 90^\circ$		
		Corjet	UM3	JetLag	Corjet	UM3	JetLag	Corjet	UM3	JetLag
	Z_{me}	<10%	<25%	0	<10%	<20%	<20%	<15%	<30%	<25%
	S_i	<60%			<60%	<60%	<50%	<60%	<65%	<55%
	X_{rp}	<15%	<25%	<15%	<10%	<25%	<10%	<15%	<25%	<10%

Dinámico	Variable	$\theta = 60^\circ \phi = 180^\circ$			$\theta = 60^\circ \phi = 0^\circ$			$\theta = 60^\circ \phi = 90^\circ$		
		Corjet	UM3	JetLag	Corjet	UM3	JetLag	Corjet	UM3	JetLag
	Z_{me}	<25%	<30%	0	<10%	<20%	<20%	<15%	<30%	<25%
	S_i	<60%			<60%	<60%	<50%	<60%	<65%	<55%

Por último, en cuanto a modelos numéricos aplicados en la zona de campo cercano, se describe brevemente la herramienta numérica desarrollada por el IHCantabria, para la estimación de los vertidos hiperdensos mediante chorro sumergido (brIHne). Esta herramienta está basada en resultados experimentales de un gran abanico de ensayos, contemplando varios ángulos de descarga, así como diferentes condiciones ambientales. Las aproximaciones empleadas para la elaboración de este modelo son de tipo dimensional y de integración de las ecuaciones en el eje del flujo, al igual que los modelos numéricos comerciales más comunes, como el CORJET de Cormix.

Sin embargo, la ventaja que ofrece esta herramienta numérica frente a los modelos numéricos comerciales, es que ésta se ha desarrollado de forma que se pueda aplicar la mejor aproximación posible

para cada zona del vertido. Para un chorro vertical se emplea la integración de las ecuaciones diferenciales, ya que no existe desprendimiento de masa lateral, y el vertido conserva la similitud gaussiana en toda la trayectoria. Para un vertido inclinado, y dado que las secciones no conservan el principio de similitud, se emplea el análisis dimensional.

En cuanto a las simulaciones numéricas de los procesos físicos que tienen lugar en el campo lejano, no se han desarrollado hasta el momento herramientas específicas para abordar esta fase del vertido. Sin embargo, se han llevado a cabo simulaciones con modelos numéricos para representar corrientes de gravedad bajo diferentes condiciones, como por ejemplo en medios confinados y sin confinar (Jiang 2014), lo que podría aplicarse al comportamiento de una corriente de gravedad en el campo lejano. La Figura 2.22 muestra las simulaciones llevadas cabo en un canal abierto y en una conducción en carga.

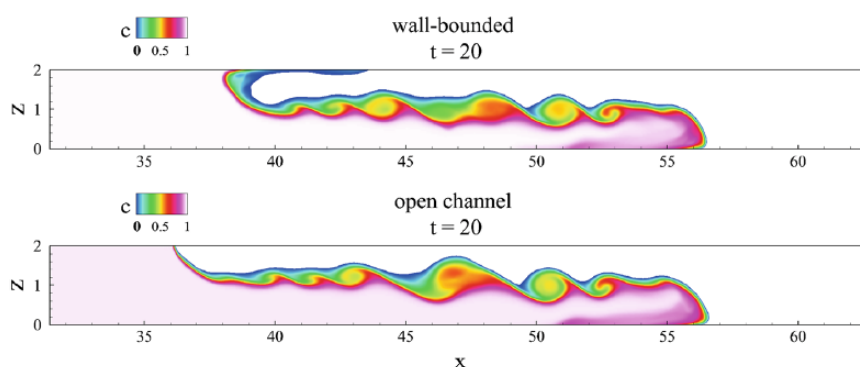


Figura 2.22. Simulación numérica de una corriente de densidad en canal abierto y en carga (Jiang 2014)

BIBLIOGRAFIA

- Altınakar, M.S., Graf, W.H. y Hopfinger, E.J., 1996. Flow structure in turbidity currents. *Journal of Hydraulic Research*, 34(February), pp.713–718.
- International Desalination Association. Disponible en: <http://www.idadesal.org>.
- Anta, J., 2009. *Caracterización hidrodinámica del arrastre del molusco C.edule con la metodología del doble promediado. Estudio en modelo físico con tecnología PIV*. Universidade da Coruña, Tesis doctoral.
- Bashitialshaer, R., Larso, M. y Persson, K.M., 2012. An experimental investigation in inclined negatively buoyants jets. *Water*, 4, pp.720–738.
- Bleninger, T. y Jirka, G.H., 2008. Modelling and environmentally sound management of brine discharges from desalination plants. *Desalination*, 221(1-3), pp.585–597.
- Cheung, S.K.B. et al., 2000. VISJET - A computer ocean outfall modelling system. In *Proceedings of Computer Graphics International Conference, CGI*. pp. 75–80.
- Chu, V.H., 1975. Turbulent dense plumes in a laminar cross-flow. *Journal of Hydraulic Research*, 13, pp.253–279.
- Cipollina, A. et al., 2004. Dense jet modelling applied to the design of dense effluent diffusers. *Desalination*, 167(1-3), pp.459–468.
- Davidson, M.J. y Pun, K.L., 2000. Locating discharge trajectories in still and moving ambient fluids. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(7), pp.513–524.
- Doneker, R.L. y Jirka, G.H., 2001. CORMIX-GI systems for mixing zone analysis of brine wastewater

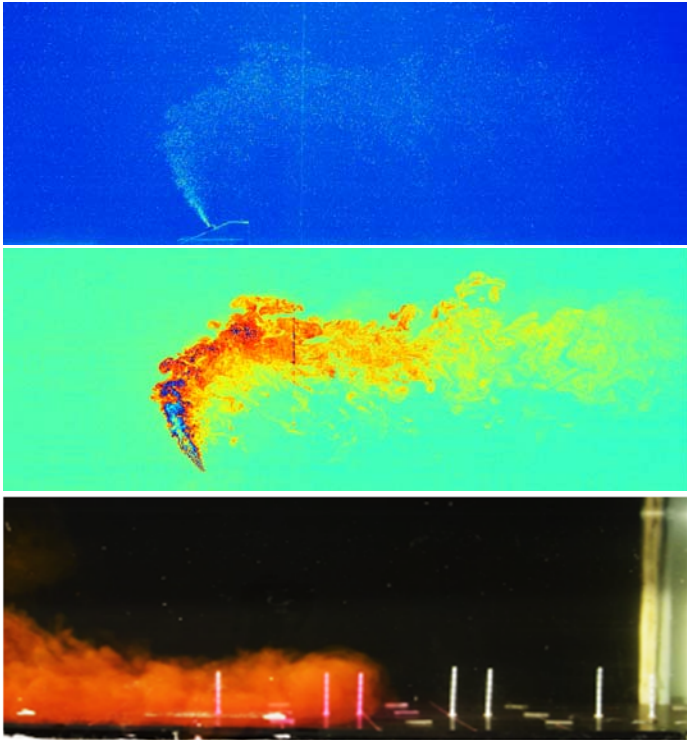
- disposal. *Desalination*, 139(1-3), pp.263–274.
- Einav, R. y Lokiec, F., 2003. Environmental aspects of a desalination plant in Ashkelon. *Desalination*, 156(1-3), pp.79–85.
- Ellison, T.H. y Turner, J.S., 1959. Turbulent entrainment in stratified flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 6(03), p.423.
- Fernandez-Torquemada, Y. y Sanchez-Lizaso, J.L., 2005. Effects of salinity on leaf growth and survival of the Mediterranean seagrass (*L. Delile*). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 320, pp.57–63.
- Ferrier, A.J., Funk, D.R. y Roberts, P.J.W., 1993. Application of optical techniques to the study of plumes in stratified fluids. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 20(1-2), pp.155–183.
- Frick, W.E., 2004. Visual Plumes mixing zone modeling software. *Environmental Modelling and Software*, 19(7-8), pp.645–654.
- Gildeh, H.K. et al., 2015. Numerical modeling of 30° and 45° inclined dense turbulent jets in stationary ambient. *Environmental Fluid Mechanics*, 15, pp.537–562.
- Gungor, E. y Roberts, P., 2009. Experimental studies on vertical dense jets in a flowing current. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(11), pp.935–948.
- Hallworth, M.A. et al., 1996. Entrainment into two-dimensional and axisymmetric turbulent gravity currents. *Journal of Fluid Mechanics*, 308, pp.289–311.
- Hartmanna, T., Paviet-Hartmanna, P., Wettelandb, C., N.L., 2005. Spectroscopic determination of hypochlorous acid, in chloride brine solutions, featuring 5MeV proton beam line experiments. *Radiation Physics and Chemistry*, 66, pp.335–341.
- Hodges, B.R., 2006. Fate of desalination brine in Texas coastal bays and estuaries. Advanced technology program.
- Jacobson, M.R. y Testik, F.Y., 2014. Turbulent entrainment into fluid mud gravity currents. *Environmental Fluid Mechanics*, 14(2), pp.541–563.
- Jiang, X.L.Y., 2014. Direct numerical simulations of boundary condition effects on the propagation of density current in wall-bounded and open channels. , pp.387–407.
- Kikkert, G. a., Davidson, M.J. y Nokes, R.I., 2007. Inclined negatively buoyant discharges. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(5), pp.545–554.
- Kikkert, G. a., Davidson, M.J. y Nokes, R.I., 2010. *Buoyant jets with three-dimensional trajectories*. University of Canterbury, Christchurch, Nueva Zelanda. Tesis doctoral.
- Kaminski, E., Tait, S. y Carazzo, G., 2005. Turbulent entrainment in jets with arbitrary buoyancy. *Journal of Fluid Mechanics*, 526, pp.361–376.
- Lai, C.C.K. y Lee, J.H.W., 2012. Mixing of inclined dense jets in stationary ambient. *Journal of Hydro-Environment Research*, 6(1), pp.9–28.
- Law, A.W.K. y Wang, H., 2000. Measurement of mixing processes with combined digital particle image velocimetry and planar laser induced fluorescence. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 22(3-4), pp.213–229.
- Loya, A., Ferrero, L. M., Marco, C., Martínez, E., Zubcoff, J., Sánchez, J.L., 2012. Comparing four mixing zone models with brine discharge measurements from a reverse osmosis desalination plant in Spain. *Desalination*, 286, pp.217–224.

- Oliver, C.J., Davidson, M.J. y Nokes, R.I., 2008. k- Predictions of the initial mixing of desalination discharges. In *Environmental Fluid Mechanics*. pp. 617–625.
- Palomar, P. et al., 2010. MEDVSA: a methodology for design of brine discharges into seawater. *Desalination and Water Reuse*, 20(1), pp.21–25.
- Palomar, P. et al., 2012a. Near field brine discharge modelling part 1: Analysis of commercial tools. *Desalination*, 290, pp.14–27.
- Palomar, P. et al., 2012b. Near field brine discharge modelling part 2: Validation of commercial tools. *Desalination*, 290, pp.28–42.
- Palomar Herrero, P., 2014. *Optimización experimental y numérica de vertidos hipersalinos en el medio marino*. Universidad de Cantabria, Tesis doctoral.
- Papakonstantis, I.G. y Christodoulou, G.C., 2010. Spreading of round dense jets impinging on a horizontal bottom. *Journal of Hydro-Environment Research*, 4(4), pp.289–300.
- Papakonstantis, I.G., Christodoulou, G.C. y Papanicolaou, P.N., 2011. Inclined negatively buoyant jets 2: concentration measurements. *Journal of Hydraulic Research*, 49(1), pp.13–22.
- Papanikolaou, P.N., Papakonstantis, I.G. y Christodoulou, G.C., 2008. On the entrainment coefficient in negatively buoyant jets. *Journal of Fluids Mechanics*, 614(10 II), pp.447–470.
- Perez-Diaz, B. et al., 2015. Caracterización experimental del campo lejano de los vertidos de salmuera al mar. *Revista Iberoamericana del Agua*, 3, pp.66–75.
- Pincince, A. B., and List, E.J., 1973. Disposal of brine into an estuary. *Water Pollution Control Fedn*, 45(11), pp.2335–2344.
- Plum, B.R., 2008. *Modelling desalination plant outfalls. Final thesis report*. University of New South Wales at the Australia Defence Force Academy.
- Portillo, E. et al., 2013. Dispersion of desalination plant brine discharge under varied hydrodynamic conditions in the south of Gran Canaria. *Desalination and Water Treatment*, 52(1-3), pp.164–177.
- Roberts, P.J.W., Ferrier, A. y Daviero, G., 1997. Mixing in inclined dense jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(8), pp.693–699.
- Roberts, P.J.W. y Ozeiar, A., 2012. *Optimization of Desalination Diffusers Using Three - Dimensional Laser - Induced Fluorescence Quarterly Progress Report Number 4 Period Covered : 1 July to September 30 2012 School of Civil and Environmental Engineering Georgia Institute of Technology*.
- Roberts, P.J.W. y Toms, G., 1987. Inclined dense jets in flowing current. *Journal of Hydraulic Engineering*, 113(3), pp.323–340.
- Sánchez, J. L., Romero, J., Ruiz, J., Gacia, E., Buceta, J.L., Invers, O., Fernández, Y., Mas, J., Ruiz, A., Manzanera, M., 2008. Salinity tolerance of the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*: recommendations to minimize the impact of brine discharges from desalination plants. *Desalination*, 221(1-3), pp.602–607.
- Shao, D. y Law, A.W.K., 2010. Mixing and boundary interactions of 30° and 45° inclined dense jets. *Environmental Fluid Mechanics*, 10(5), pp.521–553.
- Tarrade, J. et al., 2012. Desalination for the environment, clean water and energy. In *Non-intrusive optical techniques for the experimental modelling of brine discharges*. European Desalination Society.
- Tong, S.S. y Stolzenbach, K.D., 1979. *Submerged discharges of dense effluent*. Massachusetts Institute of Technology, Ralph M. Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics, Department of

Civil Engineering.

Vanderwel, C. y Tavoularis, S., 2014. On the accuracy of PLIF measurements in slender plumes. *Journal of Fluid Mechanics*, 55, pp.434–464.

Wade Miller, G., 2006. Integrated concepts in water reuse: Managing global water needs. *Desalination*, 187(1-3), pp.65–75.



CAPITULO III

INSTALACIONES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

RESUMEN

El Capítulo 3 de esta tesis doctoral presenta la descripción de las instalaciones en las que se ha ejecutado la campaña experimental del trabajo de investigación.

También se detallan las técnicas empleadas para la caracterización de los vertidos hiperdensos. En primer lugar se describen las técnicas ópticas láser, y en segundo lugar, el sistema propio desarrollado para el estudio de la corriente de gravedad, basado en la detección de las variaciones de la conductividad del medio.

Por último, se presentan las metodologías de tratamiento de los datos adquiridos por las diferentes técnicas, así como la validación de las mismas.

ÍNDICE

3	CAPÍTULO III. INSTALACIONES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	3.1
3.1	Introducción.....	3.1
3.2	Instalaciones y modelo físico.....	3.2
3.3	Descripción de las técnicas de medida.....	3.9
3.3.1	Equipo PIV.....	3.9
3.3.2	Equipo LIF.....	3.11
3.3.3	Sistema propio de medición de conductividad.....	3.15
3.4	Descripción de la campaña experimental.....	3.21
3.5	Metodología y validación de registros.....	3.23
3.5.1	Equipo PIV.....	3.23
3.5.2	Equipo LIF.....	3.25
3.5.3	Sistema propio de medición de conductividad.....	3.27

3 CAPÍTULO III. INSTALACIONES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 Introducción

Las instalaciones de la Universidade da Coruña (UDC) en el Centro de Investigación Tecnológica en Edificación e Enxeñaría Civil (CITEEC), cuentan con una canal de ola-corriente capaz de generar corrientes, y un equipo láser de medición (PIV-LIF). Este equipo ha sido utilizado en múltiples estudios hidrodinámicos de flujos ambientales como vertidos hipodensos o flujos estratificados (Shao y Law, 2010; Lai y Lee, 2012; Palomar, 2014) o más recientemente (Abessi y Roberts, 2015). En el año 2011, el Ministerio de Ciencia e Innovación concedió al equipo formado por miembros del Instituto Hidráulico Ambiental de la Universidad de Cantabria (IH Cantabria) y el grupo GEAMA de la UDC el proyecto “Análisis (experimental y numérico) de los procesos físicos en campo cercano y lejano para la optimización de vertidos hiperdensos de salmuera.” – BIA2011-29031-C02.

Dentro del marco de este proyecto, el grupo GEAMA de la UDC debía desarrollar una serie de ensayos de vertidos hiperdensos sumergidos, analizando el campo cercano y lejano bajo los efectos de un medio ambiente estacionario y dinámico. La instalación del CITEEC empleada para la ejecución de ensayos fue el canal de ola-corriente, que consta de una bomba de recirculación y una pala de generación de oleaje (Figura 3.1).

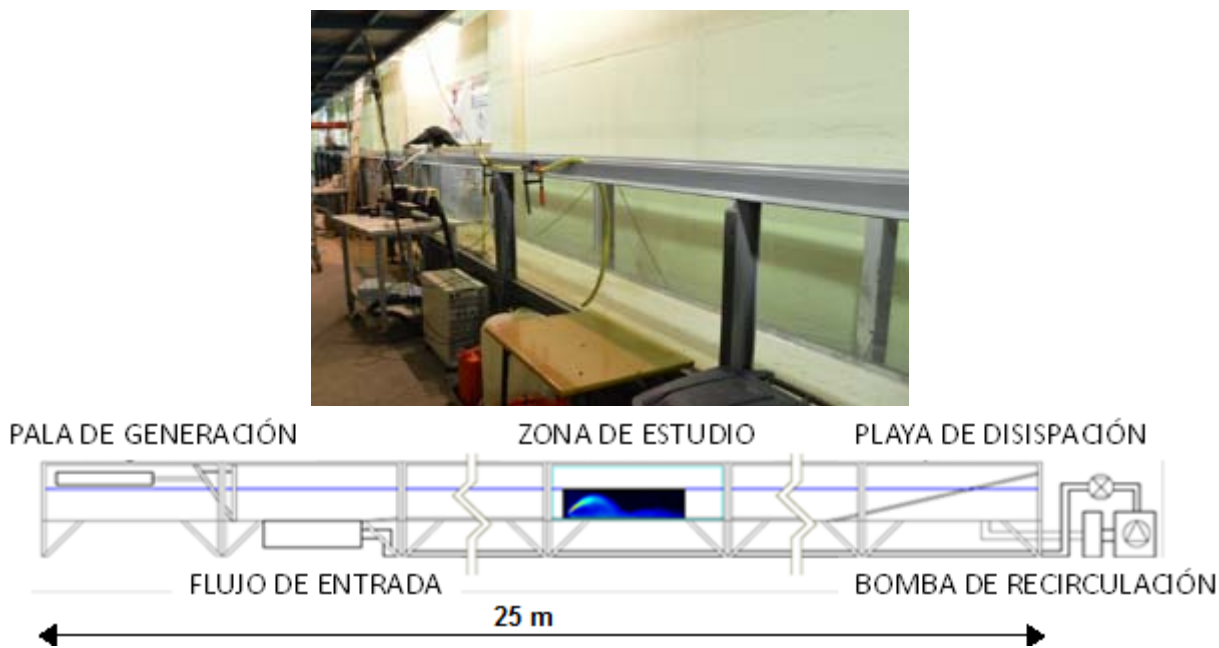


Figura 3.1. Canal de ola-corriente, CITEEC-UDC

Para el planteamiento y desarrollo de la campaña experimental de dicho proyecto, realizado en paralelo a esta tesis doctoral, se han tomado como punto de partida las principales investigaciones revisadas en el Capítulo 2. La mayor parte de ellas analizan el comportamiento del vertido en un medio receptor estacionario para variaciones de los parámetros de diseño, como por ejemplo, el ángulo de descarga o el diámetro del difusor (Roberts y Toms, 1997 o Shao y Law, 2010 entre otros). Para el análisis de los vertidos en medio receptor dinámico se han analizado especialmente los trabajos de Abessi y Roberts (2015), Gungor y Roberts (2009) y Abessi y Roberts (2013).

Tras la presentación y justificación de la campaña se describen en este capítulo las técnicas de medida empleadas para la caracterización del flujo y los procesos de mezcla. Estos métodos de caracterización son de dos tipos, (i) técnicas de visualización e hidrometría láser y (ii) un sistema de conductivímetros desarrollado por el grupo GEAMA. Cabe destacar que el montaje y aplicación de este sistema ha sido objeto de una patente registrada en la OEPM (Oficina Española de Patentes y Marcas) con número de

solicitud P201600064 como Patente de Invención.

Por último, se describen los procedimientos de tratamiento de datos realizado para los campos de datos obtenidos empleando las diferentes técnicas de medida. De este modo, se describen los sucesivos filtros y correcciones realizadas a las imágenes adquiridas mediante las técnicas de velocimetría (Particle Image Velocimetry, en adelante PIV) y fluorescencia láser (Laser Induced Fluorescence en adelante LIF). Finalmente se detallan los procesos de validación y obtención de registros para el sistema de conductivímetros. Esta parte es de especial importancia, ya que el desarrollo de una nueva metodología necesita de una exhaustiva calibración y validación.

3.2 Instalaciones y modelo físico

En este apartado se describen las instalaciones empleadas para la realización de esta investigación en el CITEEC de la UDC. El canal de experimentación de ola-corriente tiene 25 m de longitud, 0.85 m de altura y 0.6 m de ancho. Gracias a la bomba de recirculación empleada (con capacidad máxima de 39 l/s), es posible generar corrientes con una velocidad máxima en sección de 0.16 m/s para un calado de trabajo de 0.4 m.

Una de las características de cualquier campaña experimental, es la necesidad de asegurar la ausencia de efectos de escala o cualquier otro fenómeno que no se reproduzca en la realidad. Así, para poder estudiar la zona de impacto y la zona de desarrollo del campo lejano a lo largo del eje longitudinal del vertido, es necesario que la dispersión de la salmuera tenga un desarrollo completo en planta. Debido a las dimensiones transversales del canal, y con objeto de evitar el rebote de la salmuera en las paredes del mismo, ha sido necesario utilizar un falso fondo de 50 cm de ancho elevado 5 cm sobre la base del canal, y una longitud total de 12.7 m (Figura 3.2). Una solución similar fue desarrollada por Shao y Law (2010). De esta forma se consigue que la salmuera que impacta con las paredes termine precipitando por debajo del falso fondo, evitando contaminar la zona de estudio.

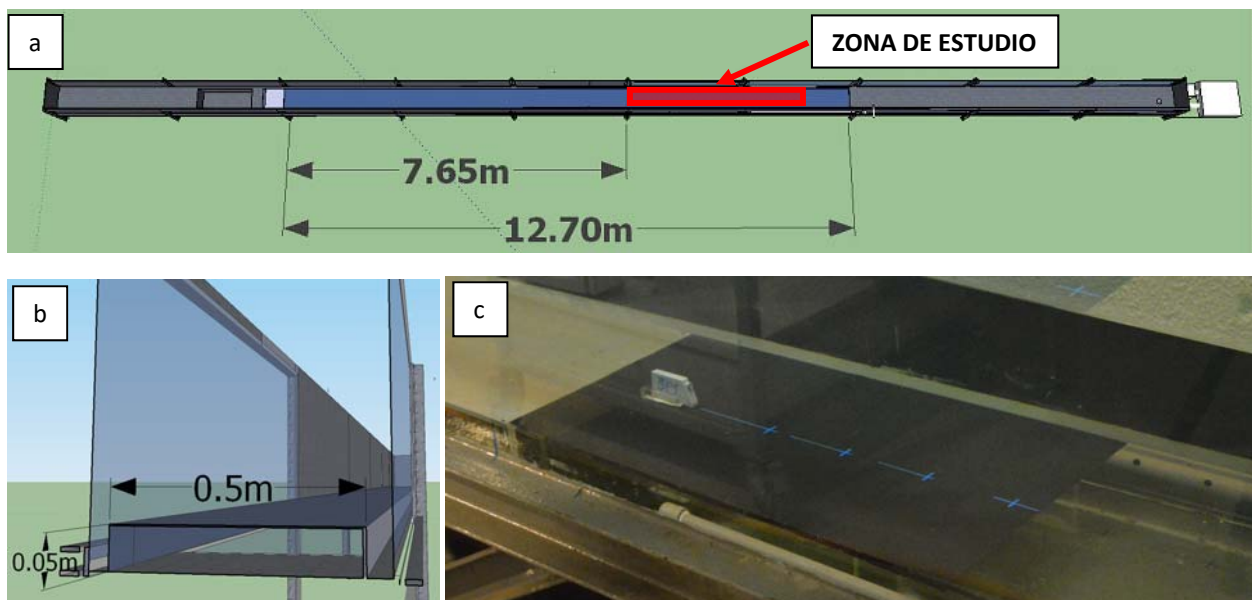


Figura 3.2. Esquema del falso fondo instalado sobre la base del canal de ola-corriente (a y b). Imagen del montaje experimental (c)

Para determinar la distancia necesaria aguas arriba de la zona de estudio, se analizó la formación de la capa límite en el perfil de velocidades en varios puntos del canal de ola-corriente, resultando una distancia mínima de 5 m, empleando un total de 7.65 m. Para corroborar el correcto funcionamiento del falso fondo, se realizaron mediciones de distintas velocidades en el canal mediante un velocímetro acústico puntual Vectrino (Nortek©). Este dispositivo fue posicionado en diferentes puntos formando una malla

de 6 x 5 nodos, para 40 cm de calado, y otra de 5 x 5 nodos para 30 cm de calado. La Figura 3.3 muestra el velocímetro ultrasónico empleado y la malla definida para su aplicación.

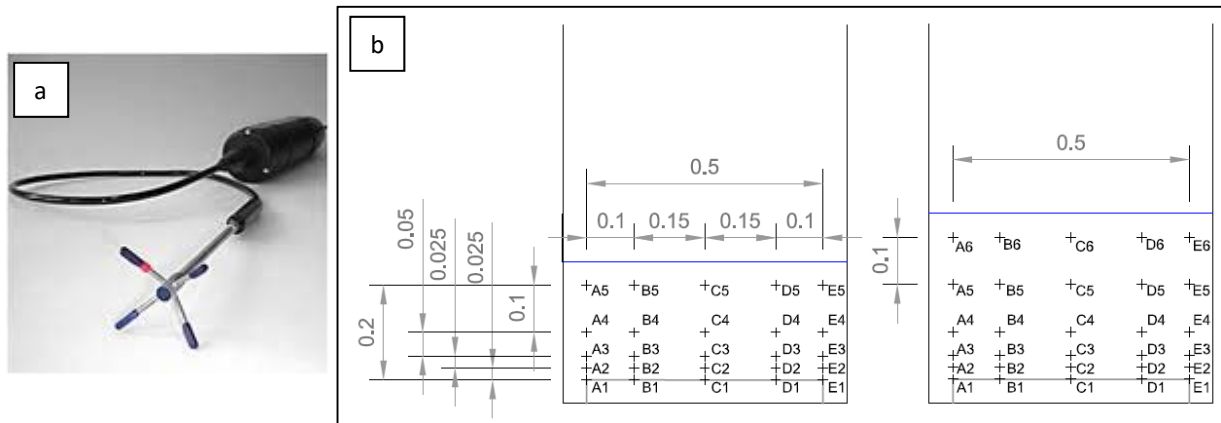


Figura 3.3. Vectrino (Nortek, 2004), (a). Puntos de medición para $H_A=0.3$ m y $H_A=0.4$ m (b)

Para analizar la uniformidad del campo de velocidades se estudiaron dos secciones distintas. Las medidas se desarrollaron durante 30 segundos a una frecuencia de 25 Hz. Los registros de velocidades se procesaron con el filtro de Nikora y Goring (1998).

La Figura 3.4 muestra la localización de estas dos zonas junto con la posición de los perfiles de medida y las Figuras 3.5 y 3.6 muestran los perfiles de velocidades en la sección 1 y sección 2 respectivamente, para los dos calados de la campaña experimental.

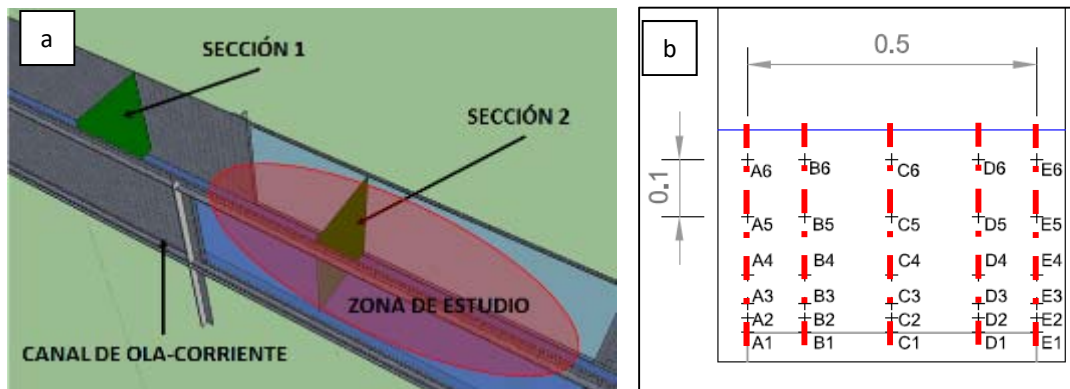


Figura 3.4. Localización de las secciones de control (a) y localización de los perfiles de estudio en ambas secciones (b)

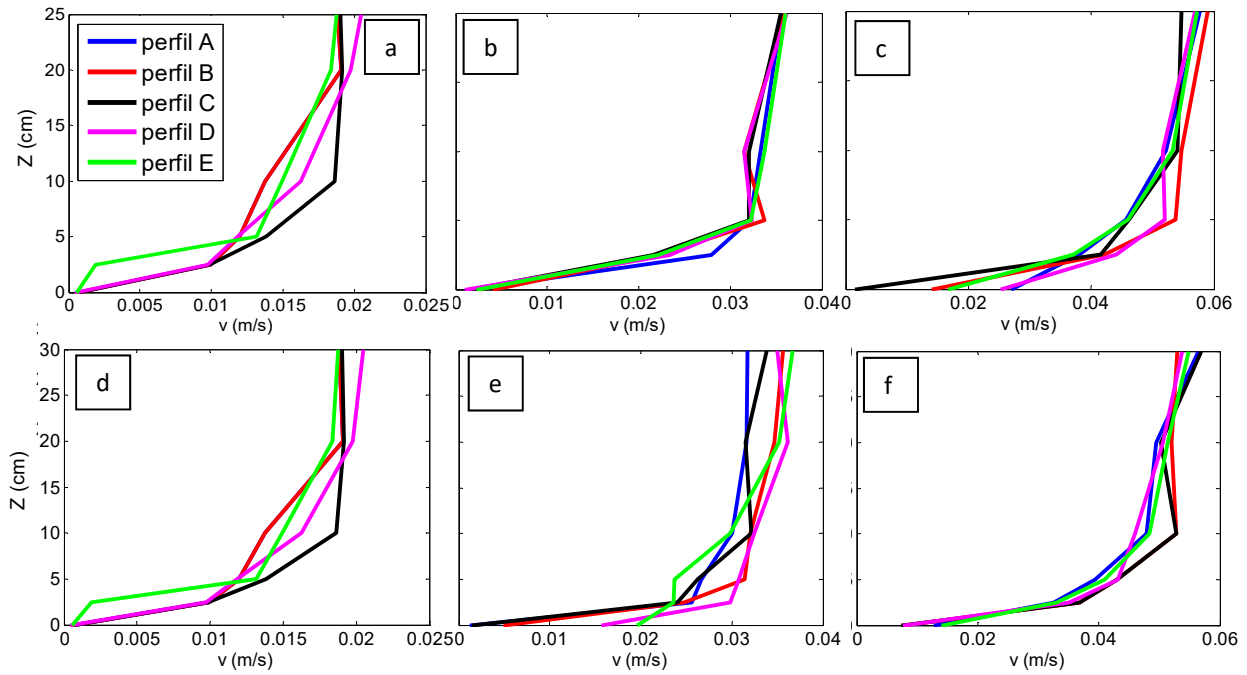


Figura 3.5. Perfiles de velocidad en la sección 1, para los dos calados $H_A=0.3$ m (a-c) y $H_A=0.4$ m (d-e), para las tres velocidades ensayadas $v=0.015$ m/s, $v=0.03$ m/s y $v=0.05$ m/s

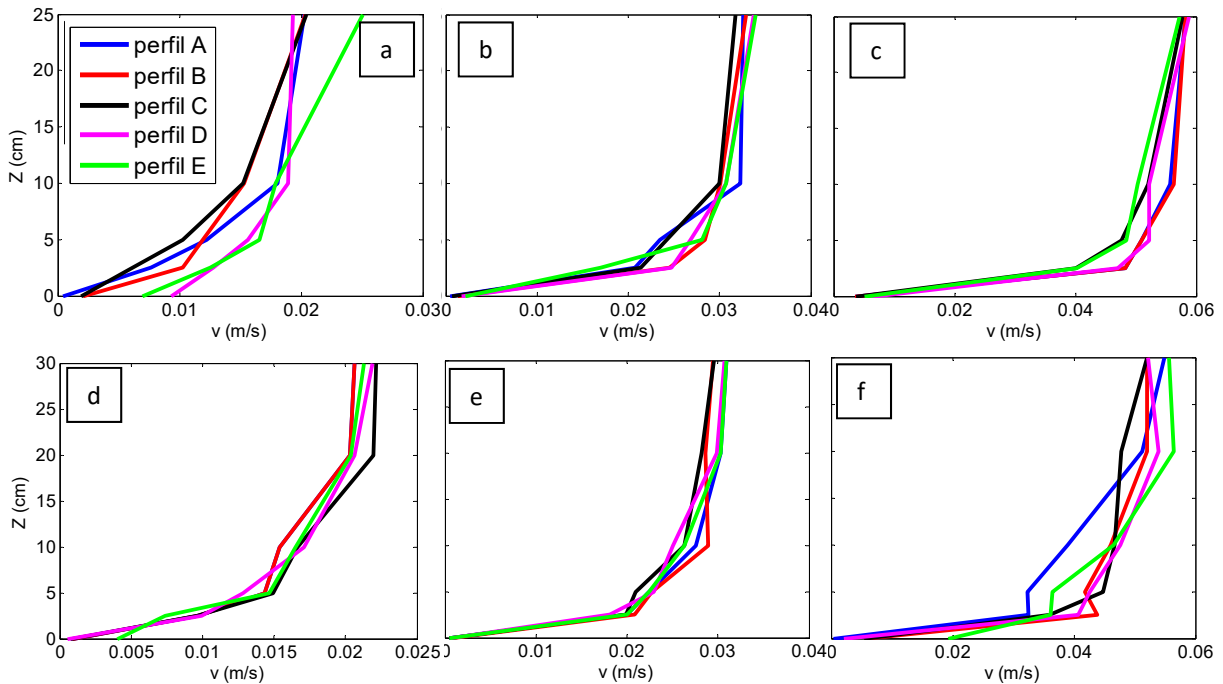


Figura 3.6. Perfiles de velocidad en la sección 2, para los dos calados $H_A=0.3$ m (a-c) y $H_A=0.4$ m (d-e), para las tres velocidades ensayadas $v=0.015$ m/s, $v=0.03$ m/s y $v=0.05$ m/s

Como se puede observar, en ambas secciones la velocidad muestra un comportamiento típico de perfil logarítmico, salvo para algunos de los registros localizados en el punto más cercano al falso fondo ($Z=0$ cm), y siempre en uno de los perfiles más próximos a la pared del canal (perfil E).

Para la modelización física de los vertidos hiperdensos se emplean las leyes de semejanza de Froude. Después de estimar la semejanza geométrica λ_L (la escala de trabajo) se pueden deducir las escalas para otras variables como la velocidad o el caudal (Ecuaciones 3.1 y 3.2).

$$\lambda_v = \lambda_L^{1/2} \quad \text{Ley de similitud cinemática} \quad [3.1]$$

$$\lambda_Q = \lambda_L^{5/2} \quad \text{Ley de similitud del caudal} \quad [3.2]$$

En base a investigaciones previas y a las limitaciones impuestas por las dimensiones del canal de experimentación, la escala de trabajo elegida para este estudio ha sido $\lambda_L=50$. A partir de los diámetros más comunes en prototipo y los valores ensayados por otros autores, se fijaron dos diámetros de difusor para el modelo de 2 mm (0.1 m en prototipo) y 4 mm (0.2 m en prototipo).

Para el correcto desarrollo del modelo físico y evitar los efectos de escala, en la literatura se presentan recomendaciones sobre los valores de algunos parámetros adimensionales. De este modo Roberts et al. (1997) emplearon un Froude densimétrico (F_{rd}) igual o mayor a 20 para asegurar un comportamiento adecuado de los chorros sumergidos de flotabilidad negativa (Ecuación 3.3).

$$F_{rd} = \frac{u_o}{\sqrt{Dg_o'}} \geq 20 \quad [3.3]$$

Donde:

u_o : velocidad inicial de descarga.

D : diámetro del difusor.

g_o' : gravedad reducida: $g_o' = (\rho_a - \rho_o)g / \rho_a$, ρ_a la densidad del medio receptor, ρ_o la densidad del efluente y g la gravedad.

Para el correcto desarrollo del chorro en condiciones de flujo turbulento se debe tener un número de Reynolds suficientemente elevado, definido según la Ecuación 3.4 como:

$$R_e = \frac{u_o D}{\nu} \quad [3.4]$$

Donde ν es la viscosidad cinemática.

En vertidos sumergidos, el comportamiento de chorro está dominado fundamentalmente por las fluctuaciones de gran escala que se producen en la zona de la interfaz con el medio receptor, y los procesos de mezcla y dilución son independientes de las fuerzas viscosas (Jirka 2004). Para el vertido de un chorro en un medio sin corriente, se acepta generalmente como valor crítico mínimo un R_e de 2000 (Fischer et al. 1979). Cuando existen más forzadores como la flotabilidad (ya sea positiva o negativa) o corrientes en el medio receptor, el valor crítico para el número de Reynolds es incluso menor. Ungate et al. (1975) indican que para vertidos sumergidos con flotabilidad, la dilución es turbulenta cuando los chorros tienen un $R_e > 1200$ (para F_{rd} superiores a 10). Si a la flotabilidad se le añade el efecto de la corriente es de esperar que los valores críticos del número de Reynolds sean todavía inferiores.

En esta investigación, el rango de R_e con el que se ha trabajado es $900 < R_e < 2500$ (ver Tabla 3.4). Del total de 57 ensayos realizados para campo cercano y lejano, en tan solo 10 ensayos el valor del número de Reynolds es inferior a 1200. En total, 4 tests (7 %) se corresponden con ensayos en medio sin corriente. Esta configuración es la más crítica en cuanto a la formación de flujo laminar en el vertido, aunque Ungate et al. (1975) indican que, para el rango $700 < R_e < 1200$ el comportamiento del vertido no está claro. En el resto de ensayos (93 %), los valores del número de R_e están en el orden de 2000 o superior.

Por otra parte, en la elección de los ángulos de vertido se ha intentado cubrir todo el abanico de ángulos reflejado en la literatura: 30°, 45° y 60° de inclinación (ver entre otros Roberts et al. 1997; Shao y Law, 2010). Una vez definidos los ángulos iniciales, se definió el calado del medio receptor de modo que el chorro no fuese afectado por la posición de la lámina de agua. Siguiendo las indicaciones de Bleninger y Jirka (2008), la cota mínima la afcción del calado se da para chorros en los que la cota máxima alcanzada (Z_{me}) cumple la siguiente relación.

$$H_{min} \geq 1.33 \cdot Z_{me} \quad [3.5]$$

Tras realizar varias pruebas se fijó el calado del medio ambiente receptor en $H_A=0.3$ m para aguas someras ($\theta=30^\circ$ y 45°) y $H_A=0.4$ m para aguas profundas ($\theta=60^\circ$). Todas estas configuraciones han sido analizadas para corrientes en el sentido del chorro (co-flow, $\phi=0^\circ$) y en sentido contrario al chorro de vertido (counter-flow, $\phi=180^\circ$).

Las velocidades del medio receptor en el canal de experimentación han sido fijadas de acuerdo a las últimas investigaciones ejecutadas por Gungor y Roberts (2009) y Abessi y Roberts (2013), donde se recogen varias configuraciones de medio dinámico. En este trabajo se ha adoptado el compromiso de emplear valores similares de velocidad a fin de conseguir una batería de ensayos comparable con las ejecutadas en trabajos anteriores. Las velocidades del medio para los ensayos realizados son $v=0.015$, 0.03 y 0.05 m/s (0.1 , 0.21 y 0.35 m/s en prototipo respectivamente).

La salmuera es el último elemento a definir para completar el montaje experimental. El flujo hipersalino que se ha empleado para modelar el comportamiento de las descargas de plantas desaladoras, debe poseer unas características acordes a las condiciones reales que se dan en el medio marino. Por ello, la densidad de la salmuera se ha definido conforme a los dos siguientes criterios:

- La densidad del agua marina en las costas españolas es de unos 35 a 38 ppt (partes por trillón, equivalentes a gramos sal/L). Por otro lado, el factor de conversión de la ósmosis inversa es aproximadamente del 45%, por lo que el residuo resultante (el 55% del agua marina empleada) contiene casi el doble de la salinidad inicial, aproximadamente 72 ppt. Esto significa que la diferencia de salinidad entre salmuera y ambiente receptor es del orden de 30-35 ppt.
- Como la salinidad depende de otros factores como la temperatura, el tipo de sales disueltas, o las aportaciones de caudal de agua dulce en la costa, en trabajos similares las diferencias de salinidad empleadas son un poco menores y oscilan entre 27 y 30 ppt (Lai y Lee, 2012 o Palomar et al., 2012b).

En base a estos criterios, en esta investigación se seleccionó una diferencia de 28.5 ppt entre la salmuera y el medio receptor, empleando agua potable de la traída municipal como medio receptor. Para formar la salmuera se diluyó una cantidad conveniente de sal en el mismo tipo de agua.

El montaje experimental para el suministro de salmuera al canal de experimentación consta de 3 elementos principales. El primero es el depósito de 50 L en el que se realiza la mezcla. El segundo es una bomba peristáltica que eleva la salmuera hasta un tanque situado a 3 metros sobre el suelo. Éste consta de un aliviadero para asegurar el nivel constante, y por tanto mantener un caudal de descarga constante. Por último, se ha empleado un caudalímetro ultrasónico para controlar el caudal de salmuera y un sistema de 4 líneas de alimentación en paralelo regulado con válvulas de cierre total y cierre parcial. Las válvulas de cierre parcial se han mantenido siempre en la misma posición con el fin de mantener los caudales de ensayo constantes a lo largo de los experimentos. La Figura 3.7 muestra el montaje experimental descrito.

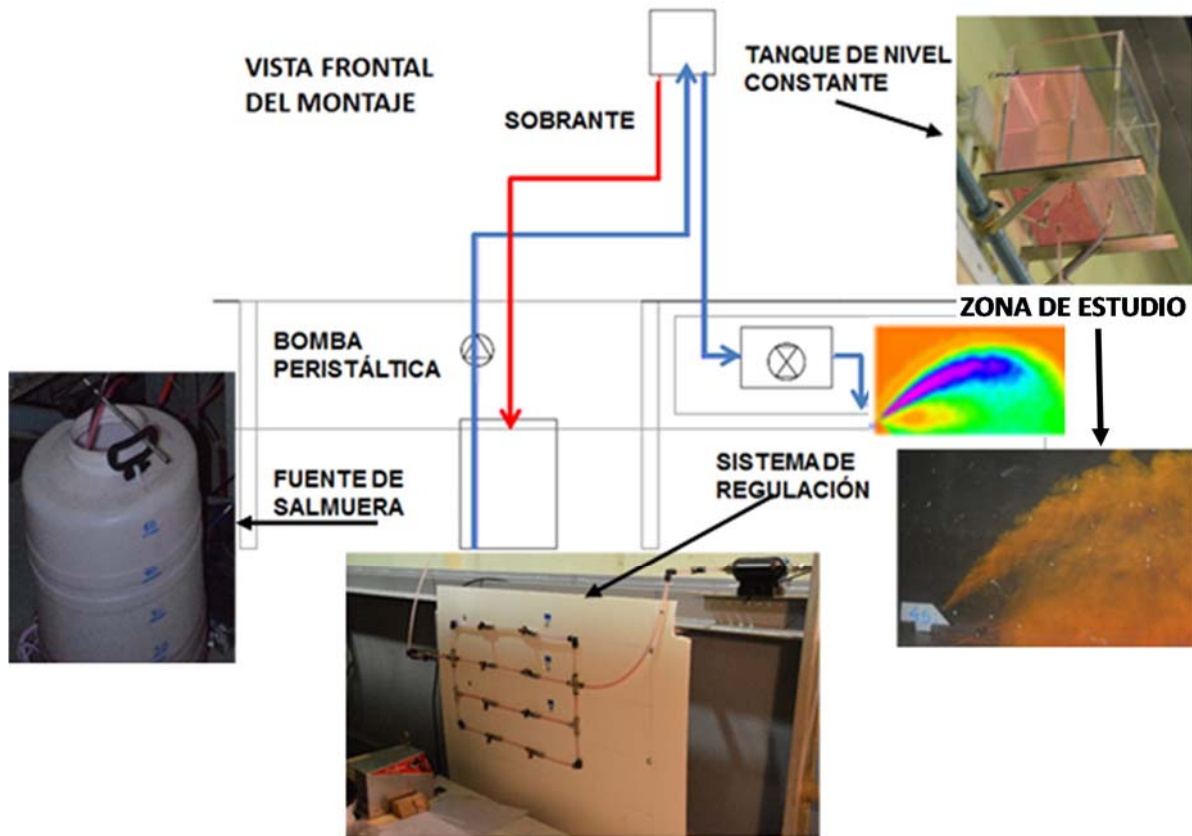


Figura 3.7. Montaje experimental suministro de salmuera

Para la caracterización de los campos de velocidades y concentraciones del chorro en perfil se ha empleado el equipo láser disponible en las instalaciones del CITEEC. La Figura 3.8 muestra esta herramienta emplazada en el canal de experimentación.

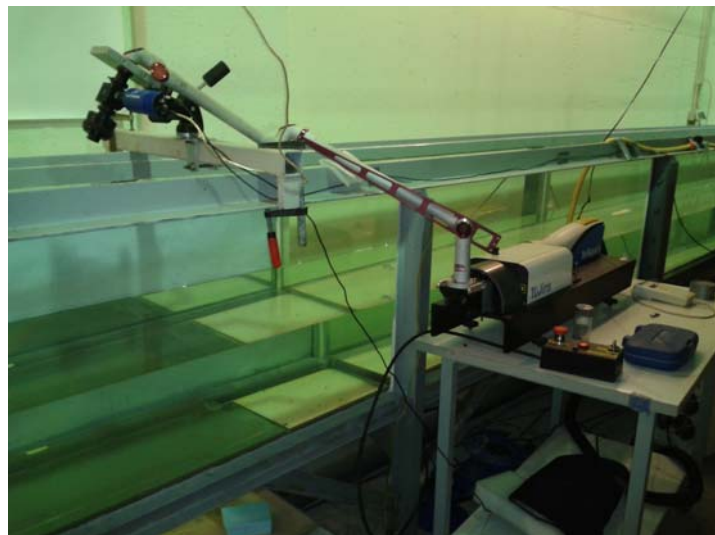


Figura 3.8. Montaje experimental del láser en el canal de experimentación del CITEEC

Este equipo, adquirido a la empresa LaVision® en el año 2001, está formado por dos fuentes láser Nd:YAG, dos cámaras y el equipo de adquisición. Para el registro de imágenes se emplean dos cámaras de Imager Pro de 4 Mpx de resolución con una frecuencia de grabación de 10 Hz. Para el control y evaluación de los campos de velocidades y concentraciones, se utiliza el software DaVis® v7.2 (LaVision, 2007).

Las dos fuentes láser pulsada Nd:YAG Twin Brilliant B están fabricadas por Quantel©. Éstas generan un espectro invisible (1064 nm) que es transformada mediante un sistema armónico en luz verde (532 nm). Cada fuente emite pulsos a una frecuencia constante de 10 Hz que se alinean en un solo haz por medio de un sistema de espejos. El diámetro del haz láser a la salida de la mesa óptica es de aproximadamente 7 mm, y aunque la forma del mismo debería ajustarse a una distribución gaussiana, en realidad no es perfectamente circular.

En el punto de salida del haz láser se ubica un brazo metálico articulado con espejos en los codos que dirige el haz al punto de medida. En el extremo del brazo se dispone de una óptica especial que transforma el haz láser en un plano para la obtención de todo un campo en dos dimensiones (Figura 3.9).

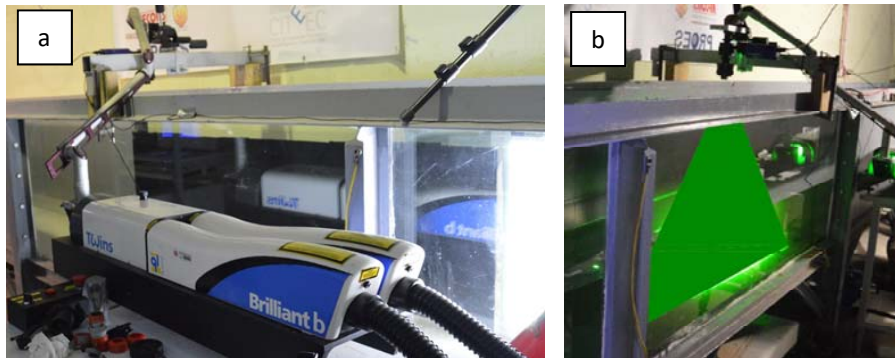


Figura 3.9. Fuentes de láser (a) y brazo articulado con el sistema óptico (b)

Las cámaras empleadas para el registro de imágenes son cámaras digitales fabricadas por PCO©, aunque es distribuida por LaVision© bajo el nombre comercial de Imager ProX 2M. Esta cámara CCD permite adquirir imágenes en *double frame* (dos imágenes, una para cada disparo del láser) con una resolución de $1280 \times 1024 \text{ px}^2$. La cámara trabaja en escalas de grises, con un rango dinámico de 16 bits ($2^{16} = 65536$ niveles de gris). La frecuencia de grabación máxima de la cámara es de 30 Hz, que se reducen a la mitad cuando se trabaja en *double frame*.



Figura 3.10. Cámaras CCD Imager ProX 2M© utilizadas

El montaje de las cámaras de grabación se realizó de manera que cada una de ellas realizase el registro de datos para cada una de las técnicas láser empleadas. De esta forma, una de las cámaras se equipó con un filtro de 532 nm que recoge la luz del láser y evita saturar e incluso dañar el sensor CCD de la cámara. Este rango coincide con la luz reflejada por los trazadores sembrados en el flujo para la técnica PIV.

Para la técnica LIF la segunda cámara es equipada con un filtro denominado *high pass*, y cuya función es permitir el paso de las longitudes de onda de 540 nm, para diferenciar el trazador de las partículas (532 nm). De esta forma, es posible registrar las longitudes de onda emitidas por el trazador (Rodamina 6G), al

ser excitado por el haz láser en función de la concentración del mismo a (mayor concentración, mayor longitud de onda y viceversa, LaVision, 2007).

3.3 Descripción de las técnicas de medida

3.3.1 Equipo PIV

La técnica PIV (Particle Image Velocimetry) es un tipo de caracterización óptica basada en el registro de la luz dispersada por un trazador dentro del flujo a estudiar. Ésta ha sido empleada con gran profusión en hidráulica experimental debido, entre otros factores, a la ausencia de interferencia con el medio caracterizado a diferencia de otras técnicas intrusivas de velocimetría, como pueden ser los sensores ultrasónicos. Otra de las ventajas de esta técnica es el *tracking*, o seguimiento de las partículas (trazadores), por lo que la medida obtenida es de tipo cuantitativa frente a un registro cualitativo de otros sistemas de visualización.

Sin entrar en demasiados detalles, la caracterización de un fluido mediante velocimetría láser se basa en introducir un haz en el flujo a estudiar, con el objetivo de que las partículas trazadoras presentes en el medio reflejen la luz incidente. La luz distorsionada por el trazador tendrá una longitud de onda muy específica, y para ello unas cámaras provistas de objetivos y filtros especiales se emplazan frente al plano generado por el haz láser (Figura 3.11). EL haz láser emite dos pulsaciones en un breve espacio de tiempo (nanosegundos), y cada disparo es grabado por una o varias cámaras. Cada par de imágenes adquiridas es sometido a un test de correlación cruzada para determinar la posición inicial y final de las partículas trazadoras. Una vez conocido el espacio entre ellas y el tiempo transcurrido entre imágenes, es posible obtener el campo de velocidades para la ventana de estudio. Una revisión de esta tecnología, y la descripción detallada de los equipos, y la metodología de aplicación en las instalaciones del CITEEC por parte del GEAMA, se puede encontrar en Anta (2009).

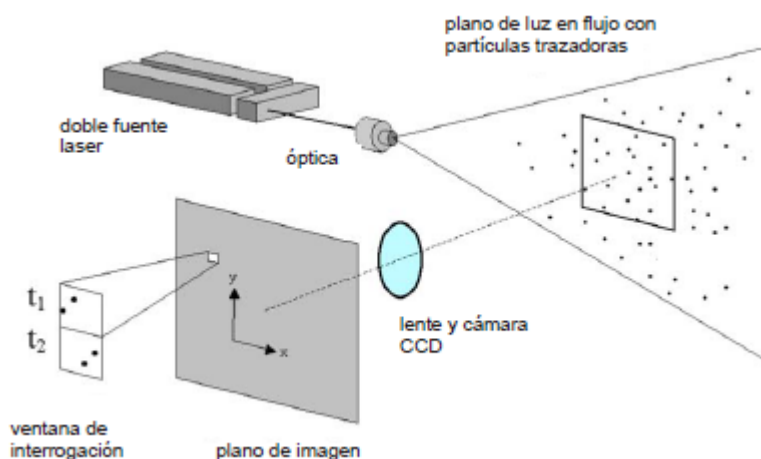


Figura 3.11. Montaje experimental para el funcionamiento de la técnica PIV (LaVision, 2007)

Para el correcto funcionamiento de la técnica es necesario un proceso de calibración que transforma los píxeles en centímetros. Para ello se introduce un patrón con distancias conocidas (malla de cruces o puntos) en el plano de estudio (Figura 3.12). Las partículas empleadas en el experimento, han de ser de una tipología bien definida sin variaciones de forma o tamaño. En este caso se han empleado partículas de poliamida de diámetro 50 μm (Dantec Dynamics©).

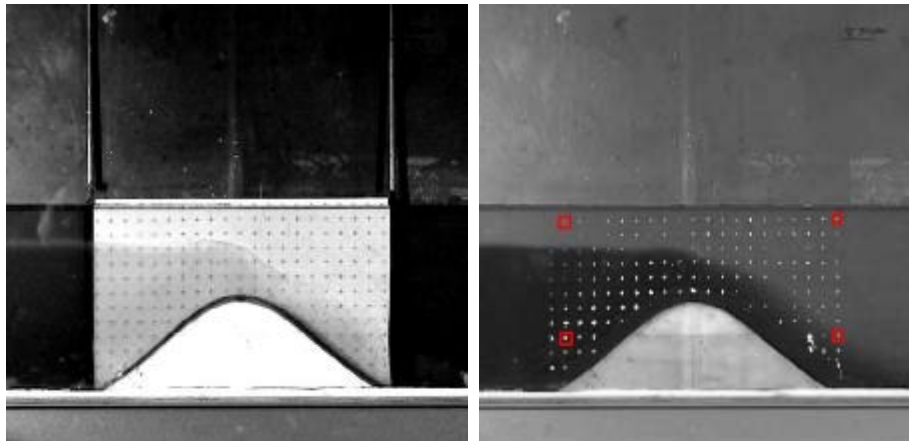


Figura 3.12. Ejemplo de malla de calibración para PIV (Anta, 2009)

El último aspecto fundamental que se debe tener en cuenta en el ajuste del equipo PIV es el tiempo de entre disparos de las fuentes láser (dt). Esto es fundamental, ya que el tiempo debe ser lo suficientemente grande como para que la cámara capte el desplazamiento de la partícula, y lo suficientemente corto como para que la misma partícula no se salga de la ventana de interrogación que definamos. Teniendo en cuenta que en esta investigación el rango de velocidades esperadas abarcan un intervalo muy amplio, con velocidades de hasta 1.2 m/s cerca del difusor y casi imperceptibles en la corriente de gravedad o en el medio ambiente, se debe tomar un término medio.

Tras realizar un análisis con distintos tiempos de disparo entre láser, se adoptó un valor de compromiso de $dt=10000 \mu\text{s}$ en ambas campañas experimentales (campo cercano y lejano), a fin de asegurar una ejecución lo más similar posible y poder realizar un montaje entre los distintos campos obtenidos.

No obstante, se aprecian zonas con valores anómalos debido a velocidades muy altas entorno al difusor, y por otro lado velocidades relativamente bajas en la zona de impacto del vertido. La elección del tiempo entre disparos del láser ($10000 \mu\text{s}$) es un valor que permite captar información de los dos extremos del rango de velocidades sin perder demasiada información (Figura 3.13).

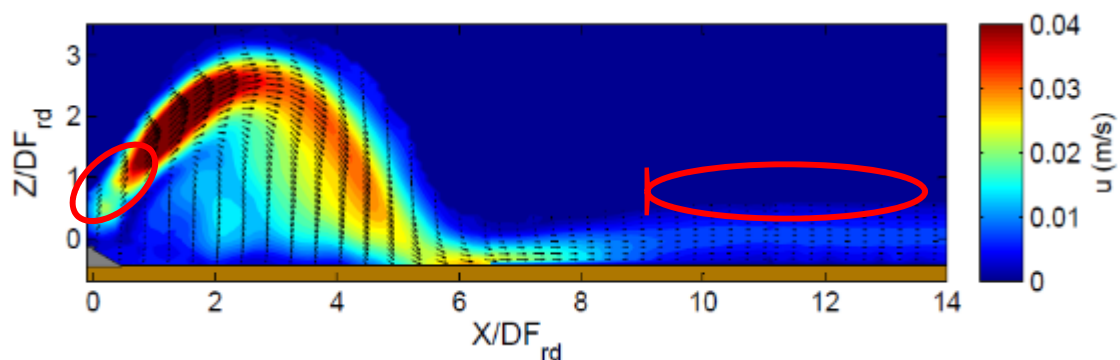


Figura 3.13. Zonas susceptibles de pérdida de información por el rango dinámico de velocidades

Una descripción detallada de la evaluación de las imágenes obtenidas con PIV aparece en Anta (2009), aunque de forma resumida se presentan aquí los principales pasos a dar.

- i). *Correlación espacial*. Se evalúa cada par de imágenes dividiéndolas en subáreas, denominando a la parte del campo de visión de cada una de ellas “ventana de visión”. Se aplica el algoritmo de correlación a cada una de las partículas de la primera ventana, respecto de todas las de la segunda. Se obtiene de este modo el desplazamiento más probable de cada partícula.
- ii). *Análisis de la correlación cruzada digital*. Dado que la adquisición de datos mediante la técnica PIV es discreta, tanto de las imágenes como de la información de luz (escalas de grises con rangos dinámicos de 12 a 26 bits), es necesaria una implementación a la correlación explicada en el

anterior apartado. Si se eligen partículas de tamaño inferior a un pixel se puede perder información de los píxeles adyacentes (*pixel peak-locking*). Para ello se debe configurar la óptica de la cámara (apertura de diafragma y magnificación) de forma adecuada. Se ha aceptado, en varios trabajos, que el tamaño óptimo de la partícula es de $\approx 2-4$ px (Raffel et al. 2007).

- iii). *Algoritmos avanzados de correlación cruzada*. La implementación de técnicas de correlación iterativas con ventanas de interrogación de tamaño decreciente y con deformación de la imagen, permiten obtener una mayor resolución espacial en las zonas de altos gradientes de velocidades. Entre los más conocidos están los esquemas de refinamiento de malla, algoritmos iterativos con desplazamiento de la segunda ventana de interrogación, o esquemas de deformación de la imagen.
- iv). *Postprocesado*. El procedimiento genérico consta de 4 pasos: a) .Validación de los datos, mediante la eliminación de datos espurios o incorrectos del campo de velocidades. b).Sustitución de los datos incorrectos, para obtener datos en una malla regular completa es necesario interpolar los valores de los vectores eliminados anteriormente. c).Evaluación de la información, magnitudes derivadas como estadísticos representativos de la turbulencia o detectar estructuras de flujo. d). Representación gráfica mediante mapas vectoriales.

Para la evaluación de los campos de velocidades en esta tesis doctoral, y atendiendo a las indicaciones dadas en los pasos descritos, se empleó un tamaño de partícula de 4 px con ventanas de interrogación decrecientes deformables (de 128 a 64 px²), y con un solape final del 75%. Como resumen se exponen a continuación los parámetros de ajuste para la aplicación de la técnica PIV, Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Parámetros fijados para técnica PIV

Parámetro	Valor
Tiempo de separación entre imágenes	10.000 μ s
Frecuencia de adquisición	10 Hz
Ventana de interrogación inicial	128 x 128 pixels ²
Ventana de interrogación final	64 x 64 pixels ²
Solape inicial	50 %
Solape final	75 %
Número de iteraciones	3 pasos

3.3.2 Equipo LIF

La técnica LIF (Láser Induced Fluorescence) comparte la misma fuente de energía que la técnica PIV, ya que trabajan con el mismo plano láser generado por una de las fuentes del equipo PIV-LIF. En el método LIF el láser incide sobre el fluido o gas a estudiar, el cual ha sido mezclado previamente con un trazador. Este trazador tiene la capacidad de emitir luz fluorescente cuando se expone a la energía de luz del láser. Se ha empleado como trazador la Rodamina 6G dado que tiene efectos inocuos sobre el fluido a estudiar y la fluorescencia no está afectada por los cambios de temperatura (Crimaldi, 2008). Además, y lo que es más importante, este trazador absorbe la energía a una frecuencia similar a la del espectro visible del láser Nd:Yag (532 nm), y la emite con una longitud de onda de unos 560 nm. De esta manera, equipando la cámara de la técnica LIF con un filtro tipo high-pass de 540 nm, se puede visualizar el movimiento del trazador de manera independiente del movimiento de las partículas (que se ven en una longitud de onda de 532 nm).

El empleo de la Rodamina como trazador requiere una calibración en la que se establece una relación entre la cantidad de trazador y la energía lumínica registrada por la cámara. Esta calibración es mucho

más compleja que la realizada para la técnica PIV. En este caso, se deben tener en cuenta varios fenómenos físicos que se producen por la interacción del trazador con el flujo estudiado y la incidencia del láser.

En este trabajo se han empleado distintas concentraciones iniciales dependiendo de la zona de estudio, 750 $\mu\text{gr/L}$ de Rodamina 6G para los ensayos de campo cercano, y 2000 $\mu\text{gr/L}$ para los de campo lejano. Para la calibración se empleó una urna de metacrilato emplazada en la zona de estudio, que abarca desde $X=-120$ mm a $X=430$ mm en horizontal y de $Z=-50$ mm a $Z=275$ mm en vertical para $H_A=0.3$ m, y de $Z=-50$ mm a $Z=340$ mm para $H_A=0.4$ m. La Figura 3.14 muestra la urna bajo la incidencia del haz para los dos calados previstos de ensayo.

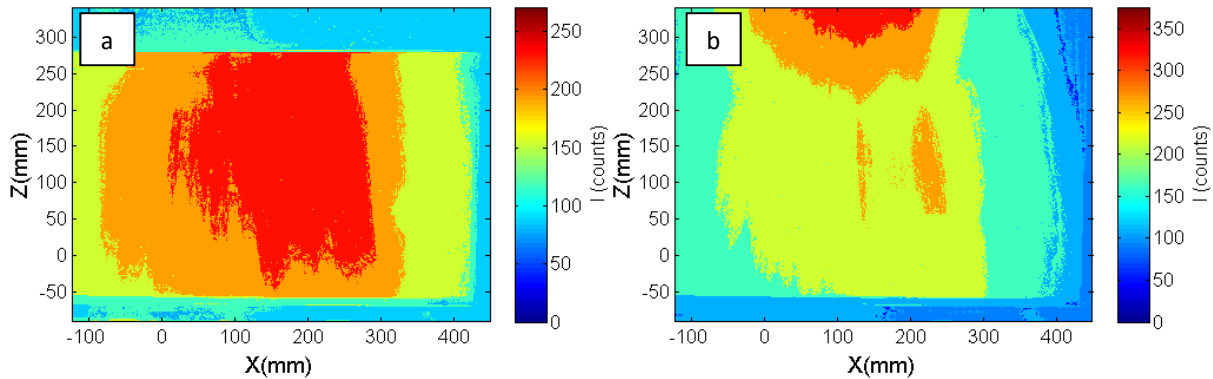


Figura 3.14. Imagen de la urna de calibración para $H_A=30$ cm (a) y $H_A=40$ cm (b)

Como se puede observar, la intensidad lumínica en el interior de la urna no es homogénea y sigue una distribución gaussiana, registrándose mayor energía lumínica en el centro y parte superior de la imagen, que en los extremos y parte inferior. Se puede observar como la zona exterior a la urna, sin trazador, irradia luz por proximidad a la fuente, lo que no es deseable. Para mitigar este fenómeno se aplicaron varias correcciones implementadas en el software Davis 7.2 (LaVision©).

Cada uno de los procesos aplicados a las imágenes registradas se emplea para minimizar una fuente de error. A continuación se describen las correcciones empleadas y su función (LaVision, 2013):

- i). *Background Substraction*. Para mantener las mismas condiciones lumínicas en la zona de ensayo se sustraen los brillos y fuentes de luz residuales que puedan existir. Esta operación necesita de una imagen tomada en oscuridad total y que se emplea para homogeneizar todas las grabaciones realizadas a posteriori.

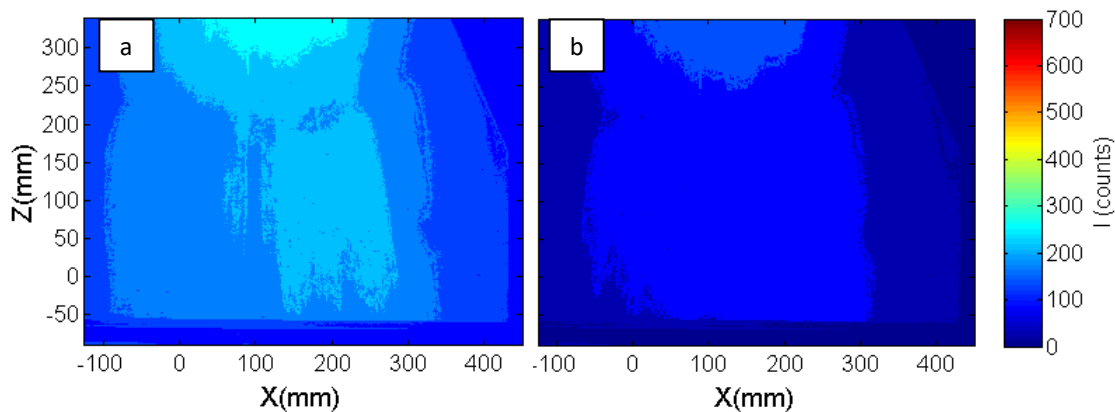


Figura 3.15. *Background*. Corrección de luz residual, inicial (a) y final (b)

- ii). *Energy Correction*. Se trata de una normalización de la imagen (Figura 3.16) mediante el empleo de un valor de energía de referencia, 1000 counts por defecto, o bien mediante el valor máximo

de intensidad lumínica registrado (LaVision, 2013). Este segundo método puede llevar a errores debido a que el máximo registrado puede deberse a un punto fuera de la zona de estudio o bien a un reflejo puntual del haz láser sobre un elemento extraño al experimento.

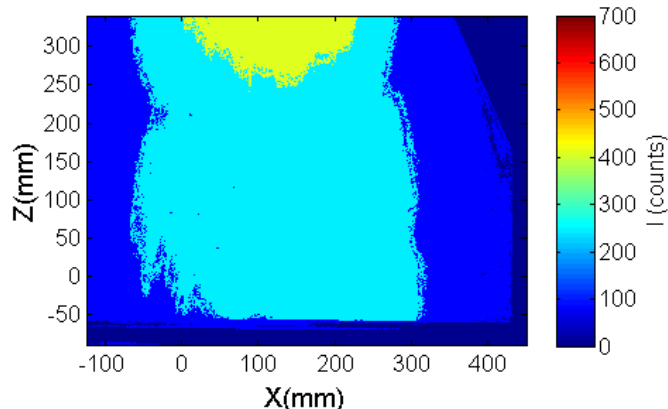


Figura 3.16. *Energy Correction*. Imagen corregida, tomando como referencia un valor por defecto de 1000 counts (LaVision, 2013)

- iii). *Sheet Correction*. Para conseguir que la intensidad lumínica no se vea afectada por la variación de intensidad del plano láser (que sigue una forma gaussiana) se aplica esta corrección, que se basa en homogeneizar los extremos y la zona media con un valor de referencia. Éste se escoge de acuerdo al 50% del valor de intensidad lumínica esperada en la zona de ensayo (LaVision, 2013).

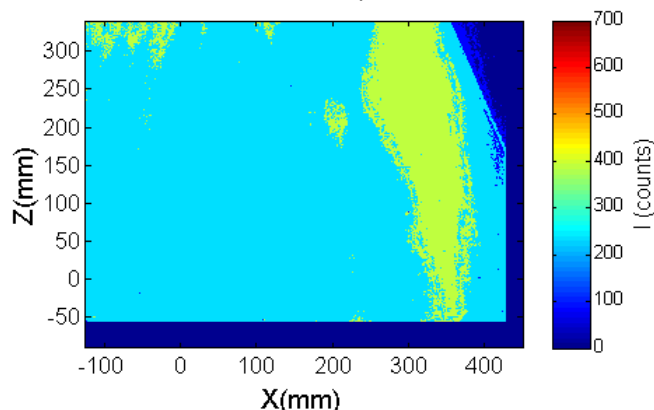


Figura 3.17. *Sheet Correction*. Intensidad lumínica homogénea en una sección horizontal

- iv). *Geometrical Correction*. El software dispone de una corrección que depende directamente de la oblicuidad de la incidencia del láser en el fluido estudiado. Ésta no se ha aplicado a la campaña experimental ejecutada, dado que se ha buscado que la entrada del haz en el medio analizado fuera lo más vertical posible.
- v). *Absorption Correction*. Por último, para evitar la atenuación de la luz a lo largo de la trayectoria del haz se puede aplicar esta corrección. Este método minimiza el decaimiento de la energía del haz a medida que se adentra en el medio de estudio. En Ferrier et al. (1993) se analizó la atenuación de la intensidad lumínica en función de los parámetros de la fuente de luz y la longitud recorrida por el haz.

Dado que en este montaje experimental la óptica del láser está cerca de la zona de estudio (0.75 m por encima de la superficie libre), y el medio tiene una profundidad de 0.4 m en el caso más desfavorable, se comprobó que no se produce una gran absorción de energía por la longitud recorrida. Como muestra la Figura 3.18, la energía lumínica tras aplicar la *Sheet Correction*, se mantiene constante en la vertical hasta concentraciones de rodamina del orden de 100-150 $\mu\text{gr/L}$. Por este motivo se prescindió de la aplicación de la *Absorption Correction*. La única consideración

respecto a este fenómeno fue no sobrepasar una concentración de Rodamina de 150 $\mu\text{gr/L}$ en la zona de estudio, que podría ocasionar una gran absorción de energía. Hay que tener en cuenta que, aunque las concentraciones iniciales de Rodamina son mucho mayores, la dilución inicial del vertido hace que este valor baje drásticamente a escasos centímetros del difusor.

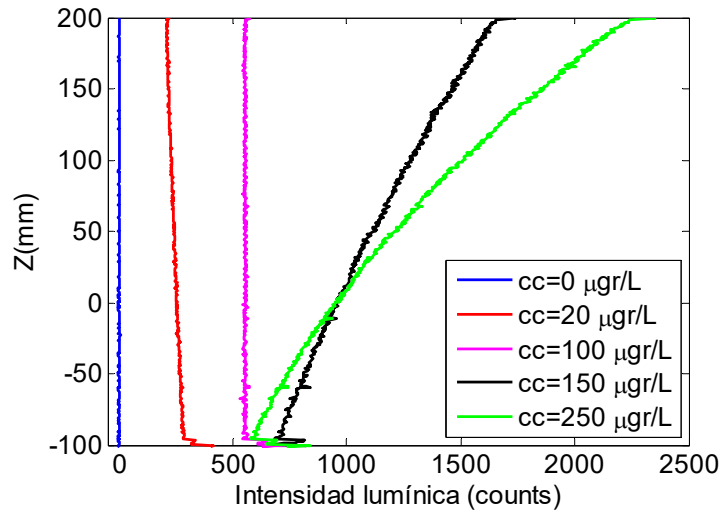


Figura 3.18. Perfiles verticales de intensidad lumínica, en la misma posición, para diferentes concentraciones de Rodamina 6G en la urna de calibración

El último paso de la calibración consiste en determinar el valor de la intensidad lumínica para distintas concentraciones de Rodamina. Se han desarrollado dos calibraciones, una para cada uno de los calados de ensayo, $H_A=0.3\text{ m}$ y $H_A=0.4\text{ m}$. A mayor concentración de trazador mayor absorción de energía lumínica. Por tanto, la atenuación provoca que la calibración no sea lineal para los puntos con mayores concentraciones, tal y como muestra la Figura 3.18.

Para la definición cuantitativa de las concentraciones de Rodamina 6G se ha empleado el primer tramo de la calibración con valores máximos de rodamina de 80 $\mu\text{gr/L}$ (rectas en color rojo en la Figura 3.19). El segundo tramo de concentraciones mayores (curva en color azul en la Figura 3.19) se ha empleado para la visualización de los mapas de diluciones en las zonas más próximas al difusor.

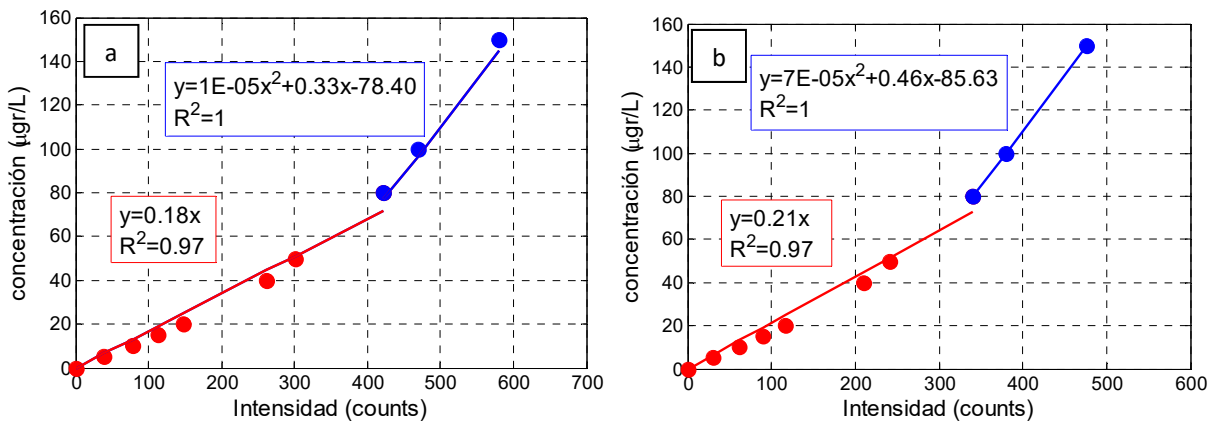


Figura 3.19. Curvas de calibración para $H_A=0.3\text{ m}$ (a) y $H_A=0.4\text{ m}$ (b)

En el apartado 3.5.2 del presente capítulo se analizarán las zonas del vertido para la aplicación de las curvas de calibración obtenidas. Además se identificarán los posibles errores de medición inducidos por zonas con exceso o defecto de concentración del trazador.

3.3.3 Sistema propio de medición de conductividad

Una parte fundamental de esta tesis doctoral ha consistido en la construcción de un sistema de caracterización de la salinidad. Esta herramienta se diseñó partiendo del principio de funcionamiento de un conductímetro, capaz de determinar la salinidad de un medio en un punto e instante determinado, a través de su conductancia y de la temperatura del flujo. Se pensó en un método que permitiera obtener un registro en continuo y en varios puntos del vertido de forma simultánea.

El primer paso fue realizar una búsqueda bibliográfica sobre la aplicación de este tipo de sistemas a la caracterización de salmueras. El resultado de esta búsqueda llevó a los miembros del GEAMA a pensar en un sistema innovador que facilitase esta tarea, que como resultado produjo el registro de una patente. Ésta ha sido registrada en la OEPM (Oficina Española de Patentes y Marcas) como Patente de Invención con número de solicitud P201600064 a fecha de 22/01/2016.

El elemento sobre el que se basa toda la metodología son unas sondas de conductividad fabricadas por el propio grupo investigador. Estas sondas están formadas por dos pletinas de acero inoxidable dispuestas en paralelo sobre una base de metacrilato. La Figura 3.20 muestra una de estas sondas frente a un sensor de conductividad comercial convencional.



Figura 3.20. Sonda de fabricación propia (a) y sensor comercial Hach Lange, modelo HQ40D multi (b)

El diseño final de las sondas se definió tras realizar numerosas pruebas. Como premisa fundamental se estableció que la sonda no debía afectar al flujo en ningún caso, ya que cualquier elemento provocaría una distorsión del mismo como la aparición de vórtices en las conocidas calles de Karman (Figura 3.21a). Algunos de los diseños preliminares aparecen en la Figura 3.21b.

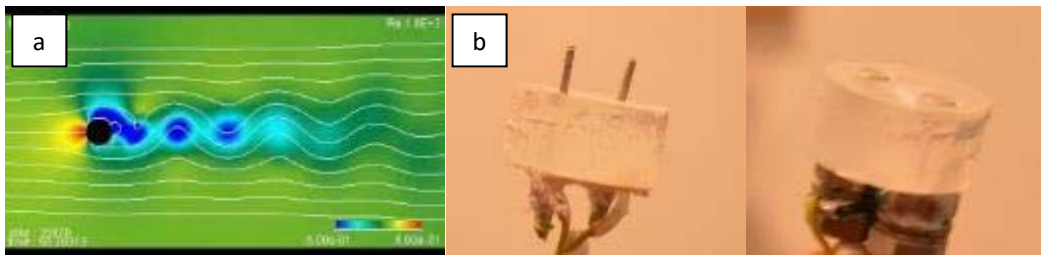


Figura 3.21. Calle de Karman asociada a un obstáculo circular en un flujo (Chen y H. 1995, a). Prototipos de sondas (b)

La finalidad de las sondas de conductividad es la de caracterizar la densidad o salinidad de la corriente de gravedad que se forma aguas abajo del vertido hiperdenso (salmuera). Este flujo modeliza la descarga de una planta de desalación y su dispersión en el fondo marino. Las sondas de conductividad se han dispuesto de forma que caractericen la zona más amplia posible, y para ello se han embebido en un falso fondo formando una retícula. Esta disposición no es fija, simplemente se adapta a las condiciones del canal de ensayo y del diseño experimental.

La Figura 3.22 muestra el montaje, dimensiones y la disposición de las sondas en las instalaciones experimentales. A través un acondicionador de señal, y teniendo en cuenta la Ley de Ohm ($V=R \cdot I$) fue

posible determinar la variación de la conductancia ($1/R$) entre las dos pletinas de la sonda, según varía la salinidad del medio en el que están inmersas los sensores.

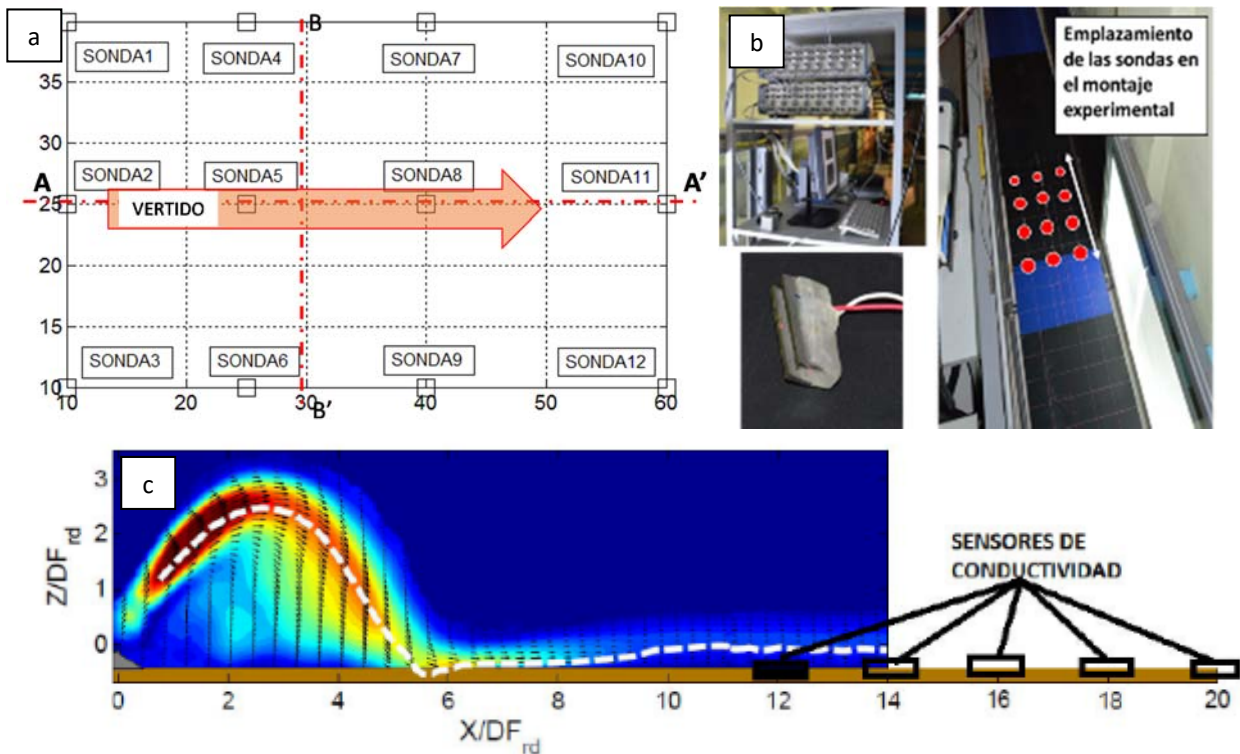


Figura 3.22. Posición de las sondas en la malla de conductivímetros (a) y emplazamiento de la malla en el canal de experimentación (b y c)

El error de precisión de la metodología planteada está asociado a cambios en la temperatura, calado y medio en el que se realiza la medición. El uso de este sistema hace necesario una extensa batería de pruebas y comprobaciones con el propósito de acotar y delimitar los límites de aplicación del sistema. Como resultado de estos ensayos se ha constatado que:

- i). El error cometido entre las sondas, y la medida obtenida por una sonda comercial es inferior al 0.1 %.
- ii). La distancia mínima a la que se deben colocar dos sondas, para evitar efectos de proximidad, es 1.5 cm.
- iii). La disposición de las sondas, paralelas al sentido del flujo, no provoca perturbaciones hidrodinámicas.
- iv). La disposición de las sondas deberá ajustarse al dominio que queramos estudiar, pudiendo variar la geometría de la malla y su densidad sin afectar a la precisión ni a la estabilidad de la medida.

El funcionamiento de los sensores fabricados fue testado con diferentes variaciones de su entorno, y para ello se registraron los valores obtenidos en 6 sensores escogidos al azar de los 12 elaborados. La primera prueba se hizo para 3 espesores diferentes de salmuera ($e=1$ cm, $e=3$ cm y 5 cm) y se registró la evolución y el promediado de cada sonda (Figura 3.23a). Además se muestran las diferencias entre el inicio y el final del registro, que muestra la variación temporal de la adquisición (Figura 3.23b).

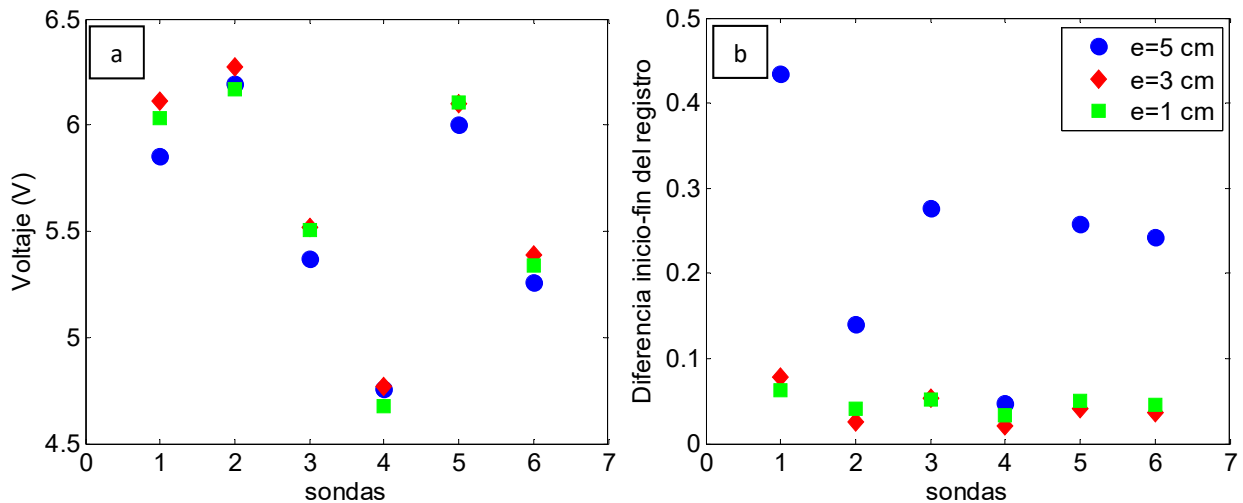


Figura 3.23. Registros brutos de voltaje para 3 espesores (a) y variación entre el inicio y el final del registro (b)

Como se puede apreciar los registros con 1 y 3 cm de espesor de salmuera son muy parecidos, mientras que para espesores mayores se registraron valores de conductividad menores (Figura 3.23a). Dado que no se esperan espesores mayores de 2.5 cm en toda la batería de ensayos, no fue necesario realizar ningún ajuste respecto al calado en el procedimiento de calibración. En cuanto a la estabilidad de la medida (Figura 3.23b), no se aprecian variaciones en el registro para los espesores de 1 y 3 cm, y sí para $e=5$ cm.

Por último, se analizó el comportamiento de los sensores respecto a las variaciones de temperatura, y como se esperaba, a mayor temperatura del medio mayor es el voltaje registrado (mayor conductividad), Figura 3.24. Se ejecutó una calibración teniendo en cuenta las temperaturas esperadas del fluido ambiente. Estas variaciones de la temperatura fueron debidas en su mayor parte a dos factores, el calentamiento del flujo por el paso a través de la bomba de recirculación del canal de ola-corriente, y el aumento de la temperatura del entorno al realizarse los ensayos en época estival.

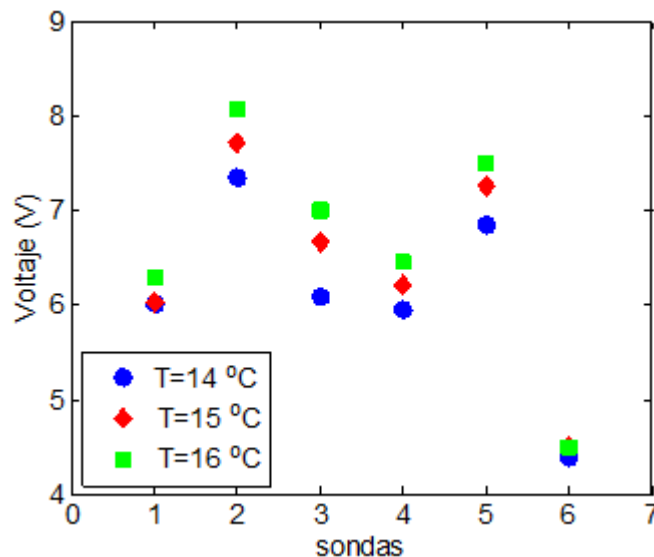


Figura 3.24. Registros de voltaje para 3 temperaturas diferentes

Como parte fundamental de la metodología se desarrolló un proceso de calibración en función de la temperatura del medio, rango de salinidad esperado y espesor de la corriente de gravedad. Para ello se utilizó una urna con concentraciones conocidas (1-8 ppt) tomando como base 5 temperaturas de referencia 13.5, 15, 17, 19 y 21 °C. A fin de corroborar el funcionamiento del sistema se realizó una calibración usando dos métodos diferentes.

El primer método consiste en el registro de la diferencia de potencial (V) con las 12 sondas fabricadas para distintos pares de salinidad-temperatura. Así se obtiene una relación directa entre voltaje-salinidad, que a su vez se convierte a densidad del agua empleando la ecuación desarrollada por la UNESCO (www.unesco.org).

En el segundo método, la calibración se realiza comparando el registro de cada sonda (V) con la conductividad registrada con un conductímetro comercial. En este caso se empleó el equipo HQ40D multi. Posteriormente se convierte la conductividad (mS/cm) en unidades de salinidad (ppt), mediante una transformada directa definida por el fabricante (HQ40D multi User manual, 2002). Finalmente mediante la ecuación de la UNESCO se obtiene de nuevo la densidad. La Figura 3.25 muestra las dos opciones de calibración.

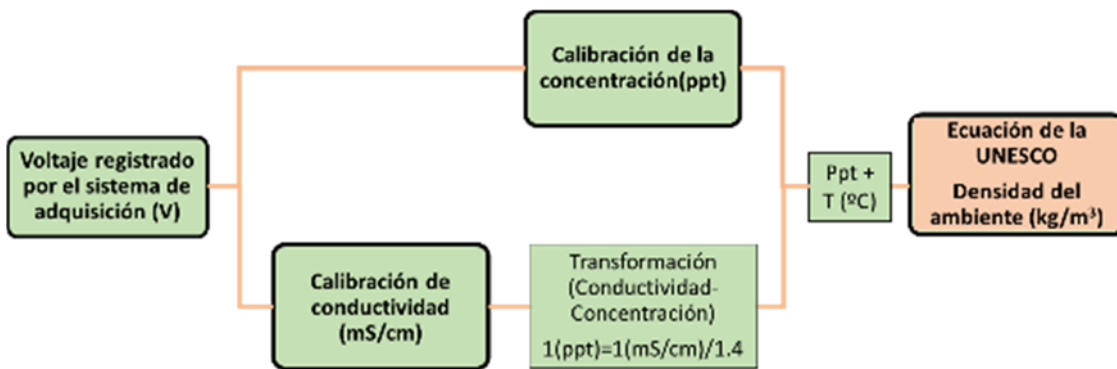


Figura 3.25. Procedimiento de calibración desarrollado para el sistema de conductímetros

Con este procedimiento se elaboraron las curvas de calibración voltaje-conductividad para cada sonda y temperatura. Para la determinación del método de calibración más apropiado, se realizaron varias comparaciones entre los resultados obtenidos con ambas metodologías. La Figura 3.26 muestra una comparación de los valores obtenidos, con cada uno de los métodos, para tres densidades diferentes del rango de calibración. Se emplearon salinidades de 2.5, 4 y 8 ppt a 17 °C, que corresponden con unas densidades de 1000.7, 1001.8 y 1004.9 Kg/m^3 respectivamente, según la ecuación de la UNESCO (www.unesco.org).

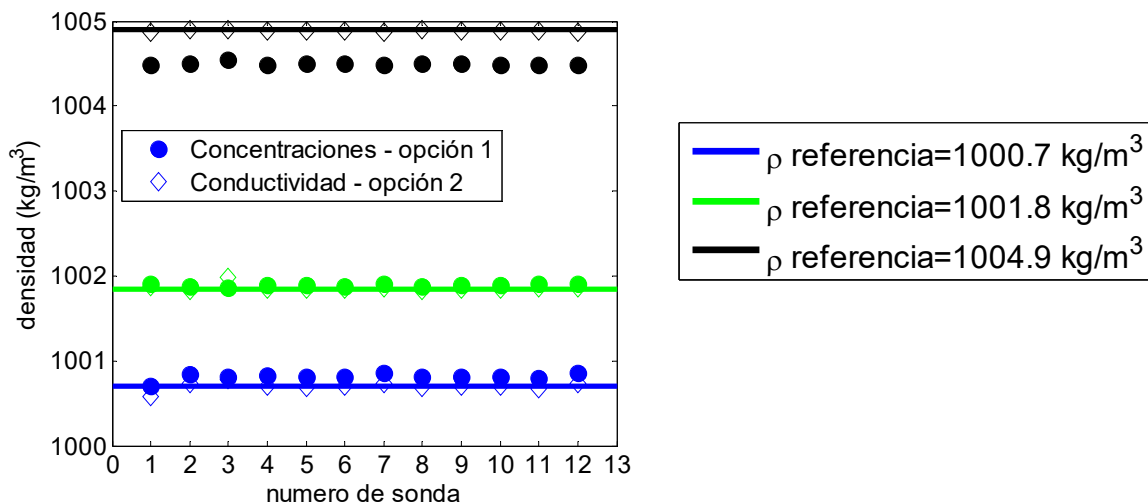


Figura 3.26. Comparación de los valores de densidad obtenidos con las dos opciones de calibración, para tres densidades de referencia

Como se puede observar, los valores obtenidos mediante la opción 2 (conductividades) muestran un mejor ajuste a los valores de referencia. Sin embargo, para una comprobación más exhaustiva se realizó un estudio de errores de todos los sensores y para todas las temperaturas del rango de calibración. A

continuación (Figura 3.27), se muestran los errores cometidos por los 12 sensores fabricados respecto al valor de referencia, aplicando los dos métodos de calibración. En el presente documento y para evitar un número excesivo de gráficas se han representado sólo los errores cometidos para 3 valores de la calibración y para la temperatura de 17 °C.

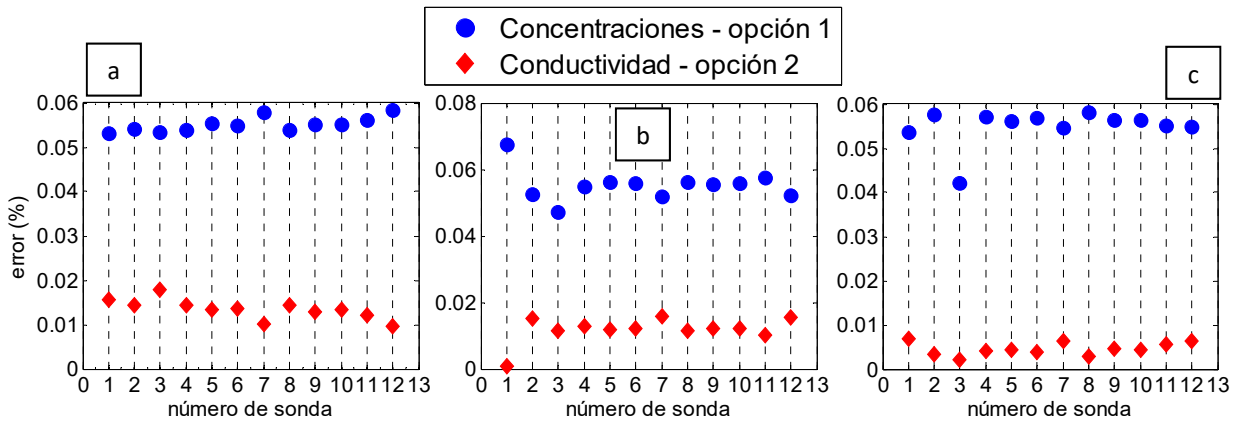


Figura 3.27. Errores cometidos por las dos opciones de calibración para las $\rho=1000.7$ (a), 1001.8 (b) y 1004.9 kg/m³(c)

Nuevamente se observan mayores errores en los valores obtenidos con la opción 1 de calibración. También se aprecian mayores dispersiones para esta metodología (sensor 1 panel b y sensor 3 panel c), aunque existen también sondas en la opción 1 que muestran diferencias notables para el caso de $\rho=1001.8$ Kg/m³ (sensor 1, panel b). Sin embargo, este fenómeno fue puntual, por lo que se consideró que el sensor funciona correctamente. Por último, se realizó un estudio de la desviación media cuadrática, RMS (*Root Mean Square*), de todas las sondas para las densidades empleadas en la calibración para ambas metodologías (Figura 3.28).

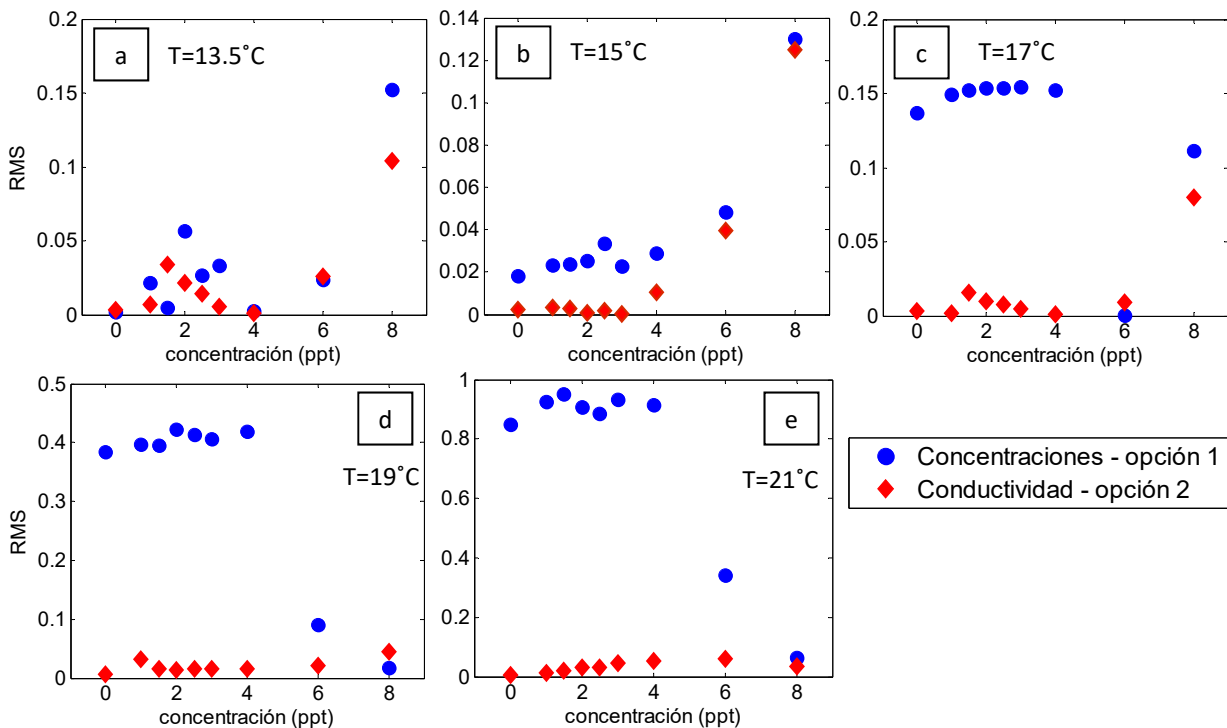


Figura 3.28. RMS para todas las sondas y las concentraciones empleadas para las calibraciones en ambas metodologías, con las 5 temperaturas de referencia: T=13.5°C (a), 15°C (b), 17°C (c), 19°C (d) y 21°C (e)

Se comprueba una vez más que la variaciones de la opción 2 son mucho menores que las obtenidas para la opción 1, por lo que se optó por emplear la calibración obtenida a través de la segunda vía mostrada

en la Figura 3.25. A modo de ejemplo se presenta la curva de calibración de una sonda cualquiera empleando el segundo método en la Figura 3.29.

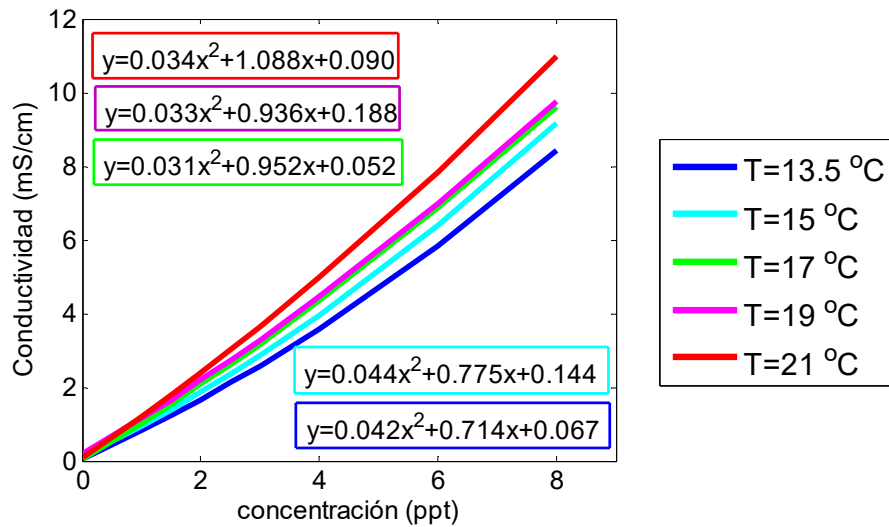


Figura 3.29. Calibración para la sonda 1 mediante el método de la conductividad, opción 2

Esta invención desarrollada en el marco de esta tesis doctoral permite estimar la variación de la salinidad en planta, y con ella la dispersión de una corriente de gravedad de forma continua y en varias posiciones al mismo tiempo. El registro de conductividad en continuo supone una gran diferencia respecto a los conductímetros comerciales, proporcionan resultados puntuales. Los mapas de salinidad presentados (Figura 3.30b) son el resultado del promediado de las sondas una vez alcanzan el régimen estacionario (zona sombreada en la Figura 3.30a).

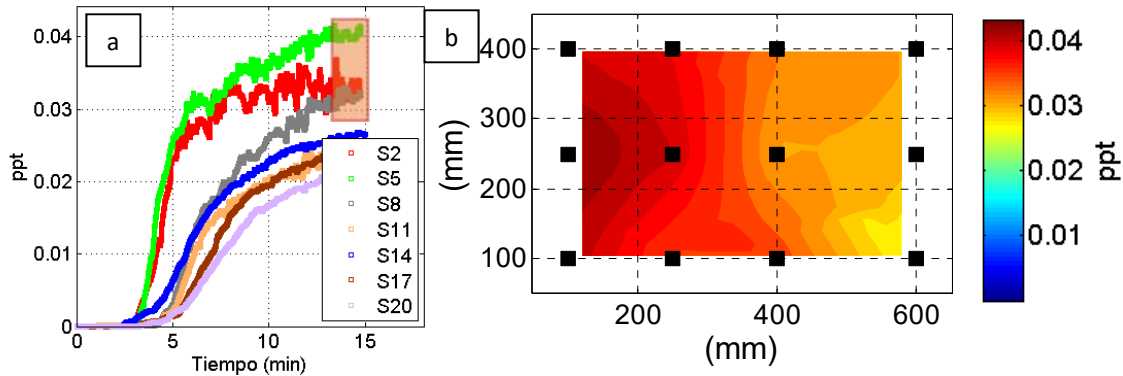


Figura 3.30. Evolución temporal (a) y campo de salinidad para un vertido de salmuera promediado con una malla de sensores de 3 x 4 (b)

A modo de resumen se puede indicar que esta metodología desarrollada por el grupo GEAMA sirve como herramienta para caracterizar los vertidos hipersalinos procedentes de plantas de desalinización en modelo físico, y puede ser utilizada como un complemento a las técnicas convencionales empleadas en la actualidad (ya sean técnicas de imagen o de medida puntual de conductividad). Las **novedades** que se plantean con la metodología desarrollada son:

1. Aplicación de una instrumentación de **medición de variables ambientales** en corrientes de gravedad en continuo, de **gran dificultad de registro con técnicas convencionales**, que suelen tener afección al vertido.
2. **Caracterización** de la evolución de un vertido hipersalino en **planta**, en **contraste con las metodologías de imagen tradicionales** que se centran en el estudio longitudinal del vertido.

3. La metodología desarrollada **permite una comparación de resultados con dos calibraciones** diferentes.

3.4 Descripción de la campaña experimental

La campaña experimental desarrollada en esta tesis doctoral se compone de ensayos realizados en los dos ámbitos de estudio de los vertidos hiperdensos mediante chorro sumergido. Para campo cercano se han tomado como referencia las investigaciones halladas en la literatura para definir diámetros, ángulos de inclinación y el resto de parámetros de diseño. Una de las características de esta investigación es la ejecución de ensayos en medios receptores con diferentes condiciones hidrodinámicas. Otra novedad es que se han ejecutado ensayos en los que el sentido de descarga es contrario al de la corriente del ambiente de ensayo, descargas counter-flow.

En su totalidad la campaña experimental de campo cercano consta de 42 ensayos (Tabla 3.2), divididos en cuatro bloques. Medio estacionario ($v=0$ m/s, 12 ensayos), velocidad del medio baja ($v=0.015$ m/s, 10 ensayos, $0.5 < u_r F_{rd} < 0.8$), velocidad media ($v=0.03$ m/s, 10 ensayos, $1 < u_r F_{rd} < 1.6$) y velocidad alta ($v=0.05$ m/s, 10 ensayos, $1.75 < u_r F_{rd} < 2.6$).

La campaña experimental de campo lejano sigue el mismo patrón, con 15 ensayos en 4 bloques de velocidades (Tabla 3.3). En este caso, se escogieron ensayos característicos de la campaña de campo cercano, y se realizaron de nuevo, centrando la zona de estudio en la zona de transición y la corriente de gravedad formada a continuación. La Figura 3.31 muestra el montaje experimental de las dos zonas de estudio, campo cercano y campo lejano.

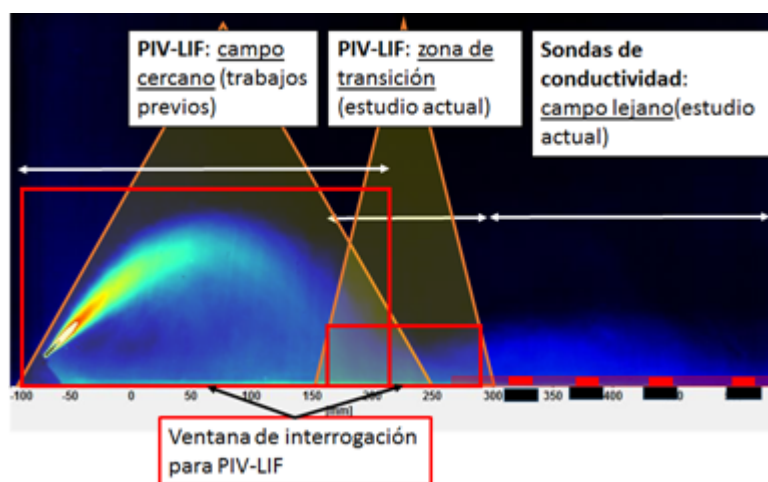


Figura 3.31. Montaje experimental de técnicas de caracterización para campo cercano y campo lejano

Como ya se ha señalado el uso de las técnicas PIV y LIF es algo novedoso respecto a su uso en medio dinámico. Aunque existen investigaciones en las que se han empleado ambas metodologías (Shao y Law, 2010, entre otros), el medio receptor es estacionario. Por otro lado, la fluorescencia láser ha sido utilizada en ensayos en medio dinámico (Abessi y Roberts, 2013), aunque en este caso sólo se han estudiado descargas en el mismo sentido que la corriente (co-flow). Por ello, el análisis de los campos de velocidades y concentraciones en descargas counter-flow, suponen un avance en el estado del arte de vertidos hiperdensos con flotabilidad negativa.

Tabla 3.2. Campaña experimental para campo cercano

	Ensayo	Ángulo Θ	Diámetro del difusor D (mm)	Velocidad de descarga U_o (m/s)	Caudal de salida Q_o (ml/s)	Profundidad de descarga H_A (m)	Gravedad reducida g_o' (m/s^2)	Número de Reynolds Re	Número Froude dendimétrico F_{rd}	Velocidad del medio V (m/s)	$u_r=U_o/V$ $u_r F_{rd}$
V=0 (m/s)	C01	30	2	0.6	1.7	0.3	0.193	903	28	0	0
	C02	30	2	1.2	3.8	0.3	0.193	1970	61	0	0
	C03	30	4	0.6	7.5	0.3	0.193	1970	22	0	0
	C04	30	4	0.7	9.3	0.3	0.193	2429	27	0	0
	C05	45	2	0.6	1.7	0.3	0.193	903	28	0	0
	C06	45	2	1.2	3.8	0.3	0.193	1970	61	0	0
	C07	45	4	0.6	7.5	0.3	0.193	1970	22	0	0
	C08	45	4	0.7	9.3	0.3	0.193	2429	27	0	0
	C09	60	2	0.6	1.7	0.4	0.192	903	28	0	0
	C10	60	2	1.2	3.8	0.4	0.192	1969	61	0	0
	C11	60	4	0.6	7.5	0.4	0.192	1969	22	0	0
	C12	60	4	0.7	9.3	0.4	0.191	2429	27	0	0
V=0.015 (m/s)	C13	30	2	0.6	1.7	0.3	0.192	903	28	0.015	0.77
	C14	150	2	0.6	1.7	0.3	0.196	903	28	0.015	0.76
	C15	30	4	0.6	7.5	0.3	0.194	1969	22	0.015	0.54
	C16	150	4	0.6	7.5	0.3	0.196	1970	21	0.015	0.54
	C17	45	2	1.2	3.8	0.3	0.194	1969	61	0.015	0.76
	C18	135	2	1.2	3.8	0.3	0.196	1970	61	0.015	0.76
	C19	45	4	0.7	9.3	0.3	0.194	2429	27	0.015	0.54
	C20	135	4	0.7	9.3	0.3	0.196	2430	26	0.015	0.54
	C21	60	2	1.2	3.8	0.4	0.192	1969	61	0.015	0.77
	C22	120	2	1.2	3.8	0.4	0.196	1970	61	0.015	0.76
V=0.03 (m/s)	C23	30	2	0.6	1.7	0.3	0.192	903	28	0.03	1.53
	C24	150	2	0.6	1.7	0.3	0.198	903	28	0.03	1.51
	C25	30	4	0.6	7.5	0.3	0.194	1969	22	0.03	1.08
	C26	150	4	0.6	7.5	0.3	0.193	1969	22	0.03	1.08
	C27	45	2	1.2	3.8	0.3	0.194	1969	61	0.03	1.52
	C28	135	2	1.2	3.8	0.3	0.193	1969	61	0.03	1.53
	C29	45	4	0.7	9.3	0.3	0.194	2429	27	0.03	1.08
	C30	135	4	0.7	9.3	0.3	0.194	2429	27	0.03	1.08
	C31	60	2	1.2	3.8	0.4	0.193	1969	61	0.03	1.53
	C32	120	2	1.2	3.8	0.4	0.197	1970	61	0.03	1.51
V=0.05 (m/s)	C33	30	2	0.6	1.7	0.3	0.192	903	28	0.05	2.55
	C34	150	2	0.6	1.7	0.3	0.199	903	28	0.05	2.51
	C35	30	4	0.6	7.5	0.3	0.193	1969	22	0.05	1.80
	C36	150	4	0.6	7.5	0.3	0.199	1970	21	0.05	1.77
	C37	45	2	1.2	3.8	0.3	0.193	1969	61	0.05	2.54
	C38	135	2	1.2	3.8	0.3	0.199	1970	60	0.05	2.50
	C39	45	4	0.7	9.3	0.3	0.193	2429	27	0.05	1.80
	C40	135	4	0.7	9.3	0.3	0.199	2430	26	0.05	1.77
	C41	60	2	1.2	3.8	0.4	0.193	1969	61	0.05	2.55
	C42	120	2	1.2	3.8	0.4	0.197	1970	60	0.05	2.52

Tabla 3.3. Campaña experimental para campo lejano

	Ensayo	Ángulo Θ	Diámetro del difusor D (mm)	Velocidad de descarga U_o (m/s)	Caudal de salida Q_o (ml/s)	Profundidad de descarga H_A (m)	Gravedad reducida g_o' (m/s^2)	Número de Reynolds R_e	Número Froude dendimétrico F_{rd}	Velocidad del medio V (m/s)	$u_r = u_o/v$ $u_r F_{rd}$
V=0 (m/s)	L01	30	2	0.7	3.1	0.3	0.193	1069	31	0	0
	L02	45	2	1.2	3.1	0.3	0.193	1974	58	0	0
	L03	60	4	0.6	12.6	0.4	0.193	1974	20	0	0
V=0.015 (m/s)	L04	45	2	1.2	3.1	0.3	0.192	1974	58	0.015	0.72
	L05	135	2	1.2	3.1	0.3	0.196	1974	58	0.015	0.72
	L06	60	4	0.6	12.6	0.4	0.194	1974	20	0.015	0.51
	L07	120	4	0.6	12.6	0.4	0.196	1974	20	0.015	0.51
V=0.03 (m/s)	L08	45	2	1.2	3.1	0.3	0.192	1974	58	0.03	1.44
	L09	135	2	1.2	3.1	0.3	0.198	1974	58	0.03	1.44
	L10	60	4	0.6	12.6	0.4	0.194	1974	20	0.03	1.02
	L11	120	4	0.6	12.6	0.4	0.193	1974	20	0.03	1.02
V=0.05 (m/s)	L12	45	2	1.2	3.1	0.3	0.192	1974	58	0.05	2.40
	L13	135	2	1.2	3.1	0.3	0.199	1974	58	0.05	2.40
	L14	60	4	0.6	12.6	0.4	0.193	1974	20	0.05	1.67
	L15	120	4	0.6	12.6	0.4	0.199	1974	20	0.05	1.67

3.5 Metodología y validación de registros

3.5.1 Equipo PIV

Los campos vectoriales obtenidos mediante la técnica PIV pueden mostrar vectores fuera de rango debido, entre otros factores, a la ausencia de partículas trazadoras en el flujo y/o por estar situado en una zona que recibe insuficiente energía del haz láser (extremos de la ventana de visión). Para minimizar errores se debe escoger bien el método de obtención del campo vectorial, que incluye correcciones de la imagen bruta (preproceso), elección adecuada del procedimiento de evaluación de las imágenes (proceso), y filtrado y suavizado de los campos vectoriales (postproceso). En esta tesis doctoral se han realizado pruebas a fin de determinar el mejor postprocesado posible. Este procedimiento se puede realizar en el software Davis 7.2:

- i). Para el pre-procesado se realizó una corrección de la imagen basada en un filtro tipo min/max, que normaliza la imagen con los valores extremos registrados de intensidad lumínica, en una radio de 4 píxeles.
- ii). El procesado se realizó con 2 iteraciones con ventanas de interrogación deformables decrecientes (128×128 a 64×64 píxeles²), donde se aplica la correlación cruzada en ventanas con solapes del 50 % en primer paso, y el 75 % en el segundo.
- iii). Por último, a modo de ejemplo se expone aquí un ejemplo de postprocesado realizable desde el software Davis7.2. Este software permite la aplicación de dos filtros, el primero de ellos de mediana, que elimina vectores espurios y los sustituye por la mediana de los valores más próximos. El segundo es un suavizado en una malla de 3×3 píxeles² de tipo media móvil. La Figura 3.32 muestra el procesado completo de una imagen.

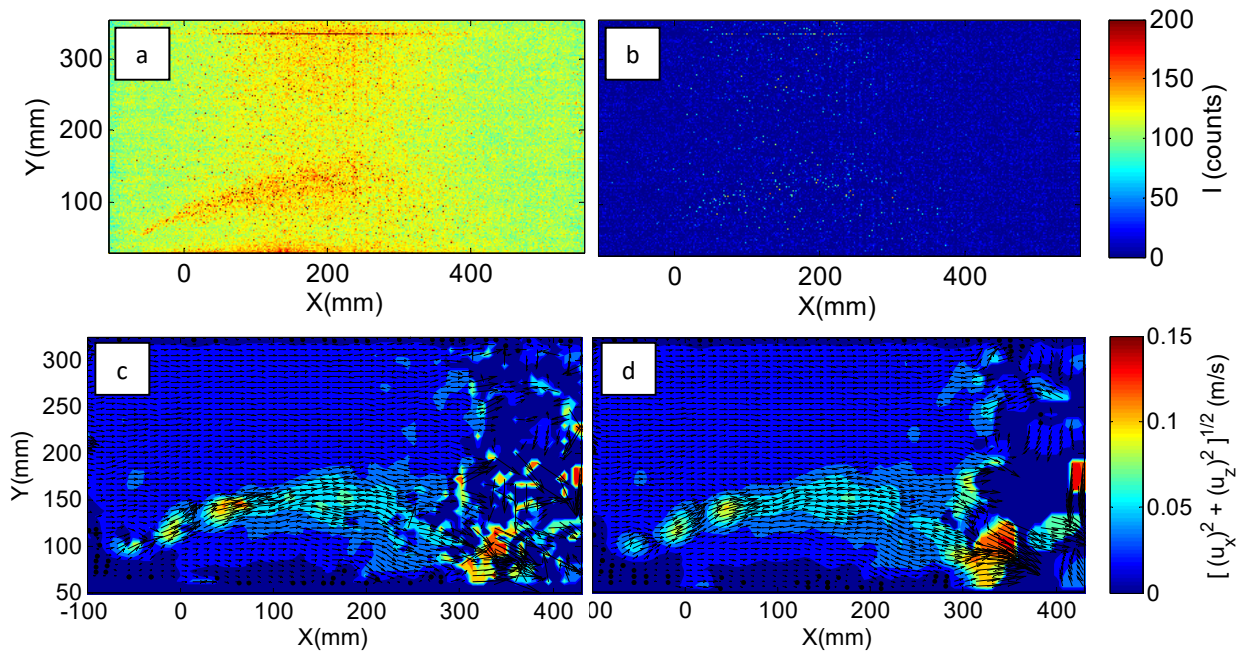


Figura 3.32. Corrección de la imagen original (a) mediante filtro min/max (b), procesado (c) y postproceso (d).

Nótese que se han eliminado datos de la zona derecha de la ventana de visión por deficiencias de la iluminación

Para comprobar la eficacia del filtro de mediana realizado por el software Davis©, se han aplicado varios filtrados al campo vectorial bruto. Los métodos empleados para este proceso son el filtro PPIV (Garcia, 2011) y el filtro universal desarrollado por Westerweel y Scarano (Westerweel y Scarano, 2005). Además se ha eliminado parte de la zona final de la imagen (derecha de la ventana de visión), por deficiencias en la iluminación.

A modo de ejemplo se presenta en la Figura 3.33 el resultado de aplicar 4 tipos de post-procesado (imagen bruta sin post-procesar, filtro de mediana –Davis-, filtro PPIV y filtro de Westerweel y Scarano) en perfiles verticales del vertido en 3 posiciones distintas desde el origen $X/DF_{rd}=1, 3$ y 6. Tras el análisis realizado se concluyó que el filtro más adecuado fue el desarrollado por Westerweel y Scarano, ya que suaviza los picos existentes mejor que el filtro de mediana (Davis), y sin eliminar demasiada información como hace el filtro PPIV.

Como se ha descrito en el apartado 3.3.1 del presente capítulo, la configuración del sistema de medida PIV induce una zona de incertidumbre próxima al difusor, que dependiendo del ensayo será mayor o menor. Como valor promedio se puede establecer que las velocidades obtenidas a una distancia inferior a $X/DF_{rd} \leq 1.5$ no se consideran resultados válidos.

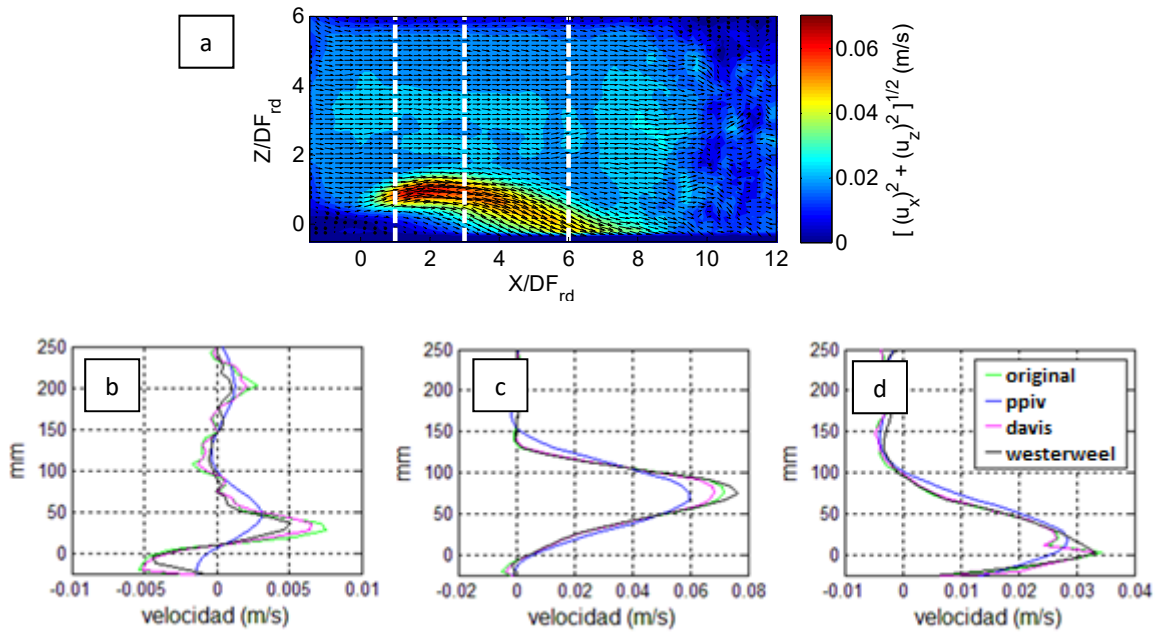


Figura 3.33. Localización (a) y comparación del registro original con los tres filtros empleados, $X/DF_{rd}=1, 3$ y 6 (b, c y d)

3.5.2 Equipo LIF

En este apartado se describe el tratamiento de los datos obtenidos aplicando técnicas de fluorescencia láser LIF. Como se ha visto en el apartado 3.3.2, las imágenes registradas fueron sometidas a una serie de correcciones para la obtención del campo de concentraciones. En el esquema siguiente (Figura 3.34) se muestra el procedimiento aplicado a todos los registros realizados mediante la técnica LIF.

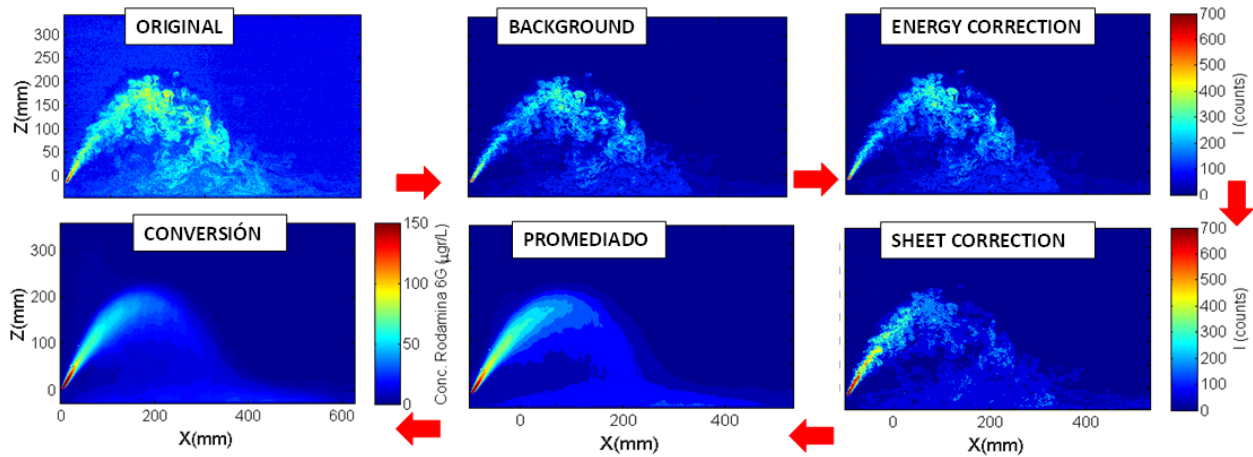


Figura 3.34. Tratamiento de las imágenes tomadas con la técnica LIF

Como se puede observar, el procedimiento de tratamiento de imágenes se realizó individualmente para todas las imágenes tomadas una vez que se alcanzó el régimen estacionario. En el penúltimo paso se ejecutó un promediado para obtener un campo de concentraciones en el que se eliminaron las inestabilidades del flujo y los vórtices de mezcla. Es de destacar, que dada la naturaleza del vertido, la corrección de la *energy correction* sólo es apreciable en la zona más próxima al chorro y siempre que existan reflejos y/o zonas con una energía lumínica muy elevada.

No obstante, el campo escalar obtenido puede presentar un bajo nivel de ruido producido por pequeñas anomalías ópticas o por el proceso de digitalización de la imagen (fidelización). Por este motivo, se ha realizado un postprocesado de las imágenes basado en un filtro de mediana programado en Matlab®. Se realizaron varias pruebas con distintos entornos de aplicación del filtro: 2x2, 3x3 y 5x5 px². La Figura 3.35 muestra un ejemplo en el que se analiza el efecto del filtro en distintas zonas del vertido.

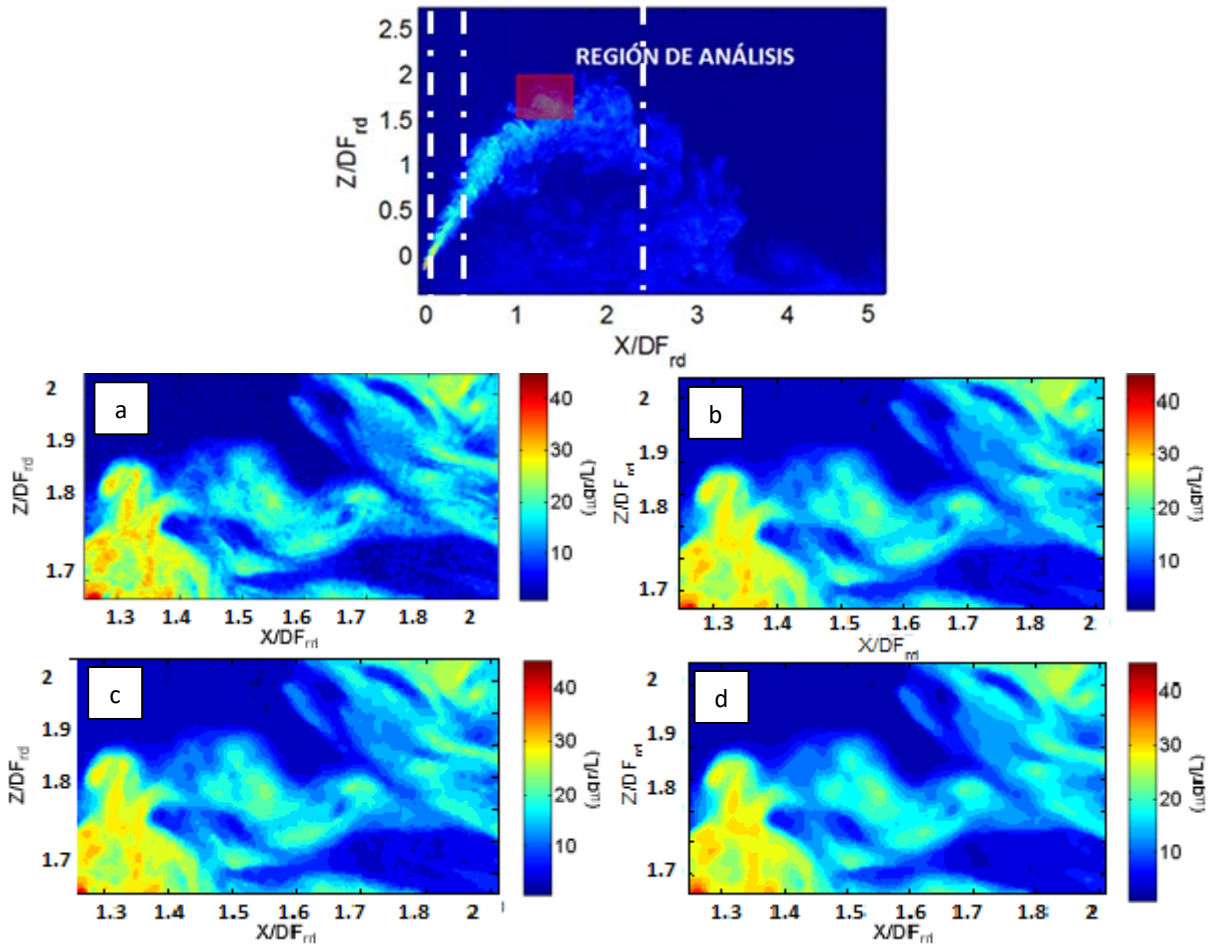


Figura 3.35. Aplicación del filtro mediana a los campos de concentraciones con radios de aplicación $R=1 \times 1$ (a), $R=2 \times 2$ (b), $R=3 \times 3$ (c) y $R=5 \times 5$ píxeles (d), en la zona marcada en el vertido.

Como se puede comprobar, el filtro con radio 3x3 px² elimina el efecto de la pixelización de la imagen, conservando la forma de las estructuras de mezcla del vertido en el ambiente receptor. Este ha sido el valor empleado para el postprocesado de las imágenes LIF.

Respecto a los perfiles verticales de concentraciones, en la Figura 3.36b se puede observar una zona con concentración nula en el perfil $X/DF_{rd}=0.1$. Esta zona representa el área más próxima al difusor, es decir, aquella en la que la concentración de Rodamina es muy elevada. Como se ha visto en el punto 3.3.2, la calibración Intensidad de luz (*counts*) a concentración de Rodamina ($\mu\text{gr/L}$) tiene el límite superior en 150 gr/L, por lo que para concentraciones mayores la calibración no es aplicable y se representa como espacios vacíos.

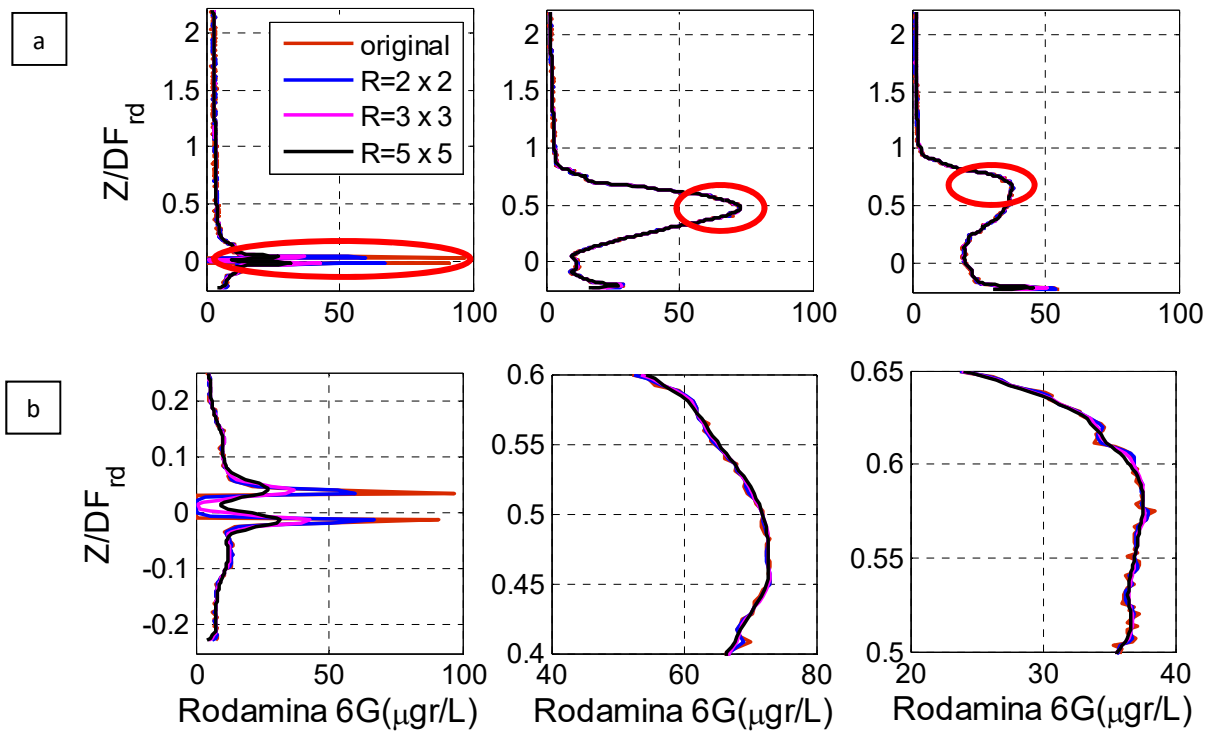


Figura 3.36. Comparaciones con distintos filtros de mediana para los perfiles $X/DF_{rd}=0.1, 0.5$ y 2.5 (a), señalados en la Figura 3.35. Ampliación de las zonas señaladas en rojo (b)

El fenómeno de absorción es muy fuerte para concentraciones superiores a $150 \mu\text{gr/L}$ y, por tanto, para trabajar con un margen de seguridad se aplica sólo la calibración lineal hasta concentraciones de $80 \mu\text{gr/L}$, como se ha explicado en el apartado 3.3.2. Por este motivo las zonas con concentraciones similares al valor $150 \mu\text{gr/L}$ arrojan resultados que pueden estar distorsionados. No obstante, no es el objetivo de esta tesis estudiar los fenómenos de mezcla en la zona del chorro, sino en las zonas de pluma, zona de transición y campo lejano, que no están afectadas por este fenómeno, como indica la Figura 3.37

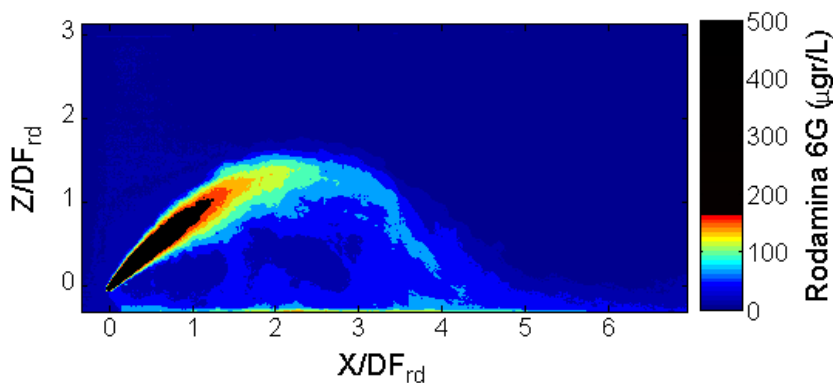


Figura 3.37. Zona de medidas distorsionadas por la absorción de luz de la Rodamina 6G

3.5.3 Sistema propio de medición de conductividad

Aunque el sistema desarrollado para determinar la salinidad y densidad de la corriente de gravedad en campo lejano se puede emplear para analizar flujos en régimen variable, en este trabajo se ha analizado el comportamiento en régimen estacionario. Por este motivo, el primer paso del tratamiento de la información ha consistido en determinar, a partir del registro temporal, un valor promedio para la salinidad. Para ello se analizaron diferentes técnicas que se presentan a continuación:

- i). Estimación del coeficiente de variación. Primero se halla la media para cada intervalo y a continuación la desviación típica, obteniendo el coeficiente de variación (CV). Una vez realizado

esto, se ajusta el parámetro cv a una exponencial, y se realiza un estudio de máximos y mínimos. Buscando la variación de pendiente mínima (máximo), para establecer el punto a partir del cual la variación está por debajo del 0.01 % del máximo encontrado.

- ii). Error último tramo. Se estima la media de los últimos 30 segundos de cada registro, y a continuación se efectúa un estudio de errores. Una vez hecho esto, el límite impuesto es del 95 %, del valor medio de referencia. Para este punto en adelante se considera que se ha alcanzado el estado estacionario.
- iii). Media regresiva. Se obtiene la media simple de un intervalo localizado en el tramo final del registro. A continuación es añadido un incremento de tiempo en sentido contrario al crecimiento. De esta forma el un intervalo obtenido es mayor, y se vuelve a obtener la media. El proceso continúa hasta llegar al inicio del registro, y por tanto la media final será el del registro completo. A continuación se adimensionalizan todos los valores respecto a la media del primer intervalo, y nos quedamos solo con aquellos valores iguales o superiores al 95 %.
- iv). Señal acumulada. Está basado en la suma acumulada en cada instante del registro y sus anteriores valores, de este modo lo que se obtiene es una curva con fuerte crecimiento en su primer etapa y a continuación un tramo de crecimiento constante. Para la determinación del tramo de pendiente constante se efectuó un estudio de la variación de la pendiente y obteniendo el punto a partir del cual el crecimiento se mantiene invariante.

Tras varias pruebas se comprobó que el método que mejor funcionó fue el del error respecto al último tramo de registro (ii). La Figura 3.38 muestra la aplicación de cada uno de estos métodos a una misma sonda.

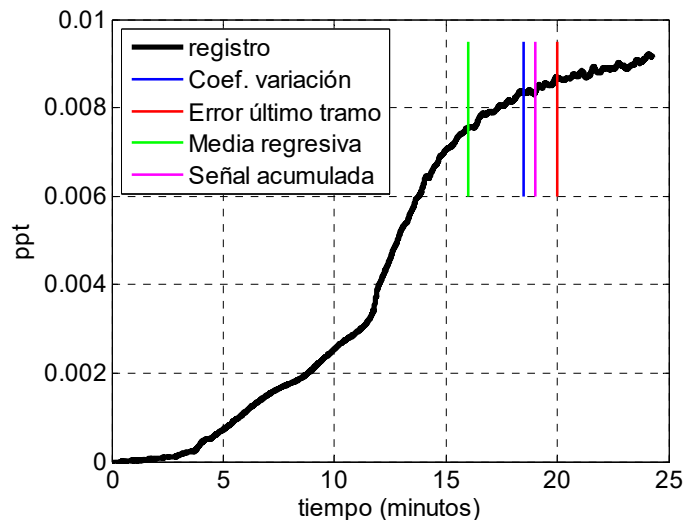


Figura 3.38. Determinación de la zona de registro en régimen estacionario mediante diferentes métodos

Una vez determinado el valor último (estacionario) de la salinidad en cada sonda se elaboraron los mapas de salinidad de todo el dominio analizado. Para suavizar y eliminar posibles valores espurios de los registros, se aplicó un filtro de mediana a estos campos. La Figura 6.39 muestra un campo de concentraciones bruto y el mismo tras el filtrado correspondiente.

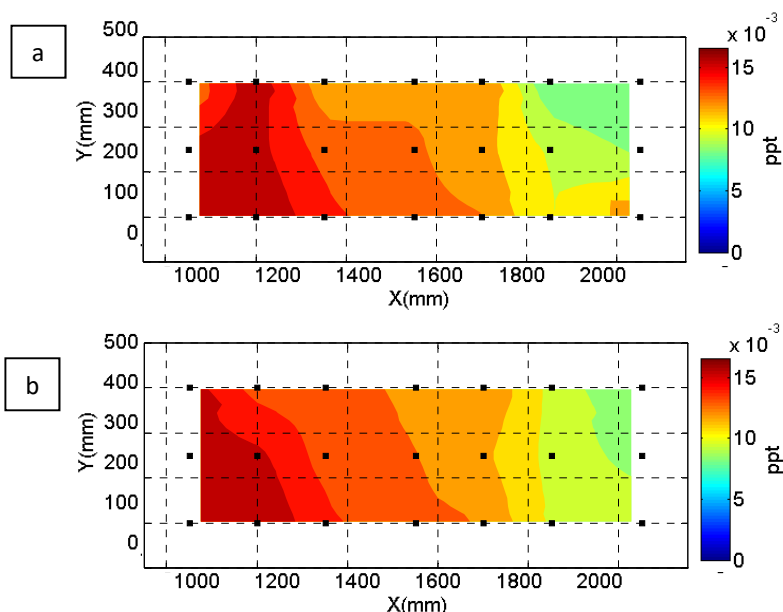


Figura 3.39. Mapa de concentraciones obtenido con malla de conductivímetros bruto (a) y tras la aplicación de un filtro de mediana (b)

BIBLIOGRAFÍA

- Abessi, O. & Roberts, P.J.W., 2013. Multiport diffusers for dense discharges. *Journal of Hydraulic Engineering*, (September), pp.1–24.
- Abessi, O. & Roberts, P.J.W., 2015. Effect of nozzle orientation on dense jets in stagnant environments. *Journal of Hydraulic Engineering*, (2013), pp.1–8.
- Anta, J., 2009. *Caracterización hidrodinámica del arrastre del molusco C.edule con la metodología del doble promediado. Estudio en modelo físico con tecnología PIV*. Universidade da Coruña. Tesis doctoral
- Bleninger, T. y Jirka, G.H., 2008. Modelling and environmentally sound management of brine discharges from desalination plants. *Desalination*, 221(1-3), pp.585–597.
- Chen, D. y H., J.G., 1995. Experimental study of plane turbulent wakes in a shallow water layer. *Fluid Dynamics Research*, 16, pp.11–41.
- Crimaldi, J.P., 2008. Planar laser induced fluorescence in aqueous flows. *Experiments in Fluids*, 44(6), pp.851–863.
- Ferrier, A.J., Funk, D.R. y Roberts, P.J.W., 1993. Application of optical techniques to the study of plumes in stratified fluids. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 20(1-2), pp.155–183.
- Fischer, H.B. et al., 1979. Mixing in inland and coastal waters. *Academic San Diego Calif*, 114, pp.315 – 316.
- Garcia, D., 2011. A fast all-in-one method for automated post-processing of PIV data. *Experiments in Fluids*, 50(5), pp.1247–1259.
- Gungor, E. y Roberts, P., 2009. Experimental studies on vertical dense jets in a flowing current. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(11), pp.935–948.

HQ40D multi User manual, 2002. Disponible en <http://www.hach.com>

Jirka, G.H., 2004. Integral model for turbulent buoyant jets in unbounded stratified flows. Part I: Single Round Jet. *Environmental Fluid Mechanics*, 4(1), pp.1–56.

Lai, C.C.K. y Lee, J.H.W., 2012. Mixing of inclined dense jets in stationary ambient. *Journal of Hydro-Environment Research*, 6(1), pp.9–28.

LaVision (2007a). FlowMaster. DaVis 7.2 Product Manual. Göttingen, Germany.

LaVision, 2013. *LIF Seminar October 22-24, 2013*, Göttingen, Germany.

Palomar, P., Lara, J.L. y Losada, I.J., 2012b. Near field brine discharge modeling part 2: Validation of commercial tools. *Desalination*, 290, pp.28–42.

Palomar, P., 2014. *Optimización experimental y numérica de vertidos hipoersalinos en medio marino*. Universidad de Cantabria, Tesis doctoral.

Raffel, M., Willert, C. y Kompenhans, J., 2007. *Particle Image Velocimetry A practical guide*. Berlin, Springer.

Roberts, P.J.W. y Toms, G., 1987. Inclined dense jets in flowing current. *Journal of Hydraulic Engineering*, 113(3), pp.323–340.

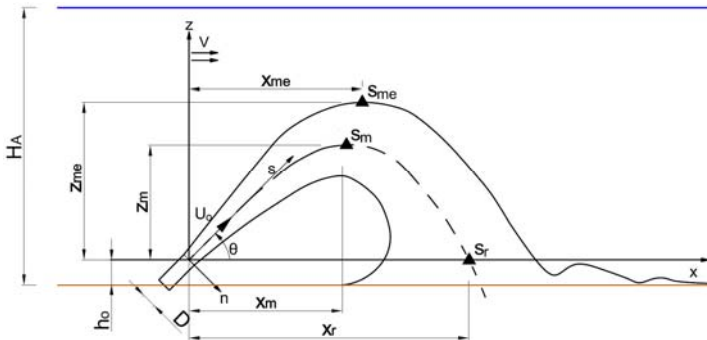
Roberts, P.J.W., Ferrier, A. y Daviero, G., 1997. Mixing in inclined dense jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(8), pp.693–699.

Shao, D. y Law, A.W.K., 2010. Mixing and boundary interactions of 30° and 45° inclined dense jets. *Environmental Fluid Mechanics*, 10(5), pp.521–553.

Unesco, 2016. Disponible en <http://www.unesco.org>.

Ungate, C., Harleman, D. y Jirka, G.H., 1975. *Stability and mixing of submerged turbulent jets at low Reynolds numbers*. Informe de Laboratorio. Massachusetts Institute of Technology.

Westerweel, J. y Scarano, F., 2005. Universal outlier detection for PIV data. *Experiments in Fluids*, 39(6), pp.1096–1100.



CAPITULO IV.

ANÁLISIS DIMENSIONAL DEL CAMPO CERCANO

RESUMEN

Este capítulo describe el análisis de las variables de estudio (para el campo cercano) de un chorro sumergido de flotabilidad negativa.

Se describen las metodologías empleadas para la interpretación de los datos adquiridos. Se mostrarán por separado los campos resultantes de la aplicación de las técnicas PIV y LIF, y los parámetros obtenidas tras el procesado adecuado.

Por último, se lleva a cabo una comparación con los resultados de investigaciones anteriores, a fin de comprobar la correcta ejecución de la batería de ensayos. Este hecho se demuestra mediante la congruencia entre resultados propios y previos.

ÍNDICE

4	CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DIMENSIONAL DEL CAMPO CERCANO	4.1
4.1	Introducción	4.1
4.2	Definición del eje del vertido y análisis dimensional para campo cercano	4.2
4.2.1	Eje de velocidades y concentraciones	4.2
4.2.2	Variables de estudio.....	4.5
4.2.3	Influencia del número de Froude.....	4.6
4.2.4	Análisis dimensional de chorro con flotabilidad negativa	4.8
4.3	Perfiles longitudinales del chorro	4.10
4.3.1	Perfiles longitudinales campos de concentraciones.....	4.10
4.3.2	Perfiles longitudinales de los campos vectoriales	4.11
4.3.3	Análisis de parámetros de estudio.....	4.12
4.4	Comparación con resultados previos.....	4.15
4.5	Conclusiones	4.18

4 CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DIMENSIONAL DEL CAMPO CERCANO

4.1 Introducción

En este capítulo se realiza el análisis de las variables de estudio de un vertido hiperdenso que definen el comportamiento del vertido en el área más próxima al difusor del efluente (chorro) y en la pluma hipersalina. Ambas zonas definen el campo cercano. El objetivo de este análisis es confirmar que el montaje experimental y los resultados obtenidos en esta investigación son congruentes con las leyes de similitud empleadas y con los resultados de trabajos previos. Este proceso se repetirá para el análisis dimensional de las variables de estudio del campo lejano, en el Capítulo 6 de esta tesis.

Para comenzar con el desarrollo del análisis dimensional, se describe la metodología de caracterización del vertido. De este modo, se presenta el trabajo realizado para la obtención de los campos de velocidades (PIV) y concentraciones (LIF), de campo cercano. Al igual que las investigaciones llevadas a cabo por autores como Shao y Law (2010) y Lai y Lee (2012), que basaron los resultados obtenidos en el análisis dimensional de parámetros específicos del vertido (valores geométricos y diluciones), este trabajo estudia la dilución y la geometría del efluente en puntos característicos del mismo, como por ejemplo la cota máxima alcanzada o el punto de impacto. Las variables más comunes analizadas en los trabajos previos provienen de los campos de concentraciones obtenidos mediante las diferentes técnicas de caracterización empleadas (LIF, conductivímetros, etc.). No obstante, Palomar et al. (2012a) analizó los parámetros hidrodinámicos de los flujos hiperdensos, prestando especial atención a los procesos de mezcla del vertido con el medio receptor (campo de velocidades y vorticidades). En esta investigación también se ha llevado un análisis de los campos de velocidades, empleando como base el trabajo desarrollado por Palomar (2014).

Para la determinación de las variables de un fluido hiperdenso se emplea como referencia común el eje del vertido. Los ejes obtenidos pueden estar determinados por los campos de velocidades o de concentración. Las primeras trayectorias analizadas en anteriores trabajos fueron los ejes que corresponden a la concentración máxima del vertido (ver por ejemplo o Kikkert et al. 2007, entre otros). Por otro lado, gracias a la metodología de velocimetría láser (PIV), se puede obtener, la envolvente de los puntos de velocidad máxima del vertido, lo que aporta un valor añadido al conocimiento de los procesos físicos o (Shao y Law, 2010 o Palomar et al., 2012b).

En los siguientes apartados se lleva a cabo un análisis de las variables características de estudio a lo largo de la trayectoria en el chorro y en la pluma hipersalina. Se presentan los resultados experimentales obtenidos y su comparación con datos de investigaciones previas incluyendo las más recientes (Abessi y Roberts 2015), en las que se tiene en cuenta la proximidad de la lámina libre. Por este motivo, también se ha analizado el parámetro H_A (profundidad de descarga) en el comportamiento del vertido.

La campaña experimental de esta tesis doctoral contempla la ejecución de ensayos con medios receptores no estacionarios. Es por ello, que esta investigación supone un avance en el análisis existente sobre vertidos hiperdensos en medio dinámico, dado el reducido número de investigaciones sobre este tema en la literatura, Roberts y Toms (1987), Gungor y Roberts (2009), o más recientemente Lai y Lee (2012) o Abessi y Roberts (2015).

4.2 Definición del eje del vertido y análisis dimensional para campo cercano

4.2.1 Eje de velocidades y concentraciones

La determinación de los ejes del vertido tanto para concentraciones como para velocidades se ha llevado a cabo partiendo de los campos mostrados en la Figura 4.1. Los campos medios de concentraciones (Fig4.1a) y velocidades (Fig4.1b) proporcionan los ejes correspondientes. El campo mostrado en la Figura 4.1c, se emplea para la interpretación de las vorticidades, mientras que la Figura 4.1d presenta las fluctuaciones turbulentas $u'_x \bullet u'_z$, que determinan las zonas de mayor tensión cortante a lo largo del eje del vertido. Como se puede apreciar, los registros que no pertenecen al vertido (panel d) muestran ruido experimental, que no se refleja en el cuerpo del efluente, por lo que éste ha sido bien caracterizado.

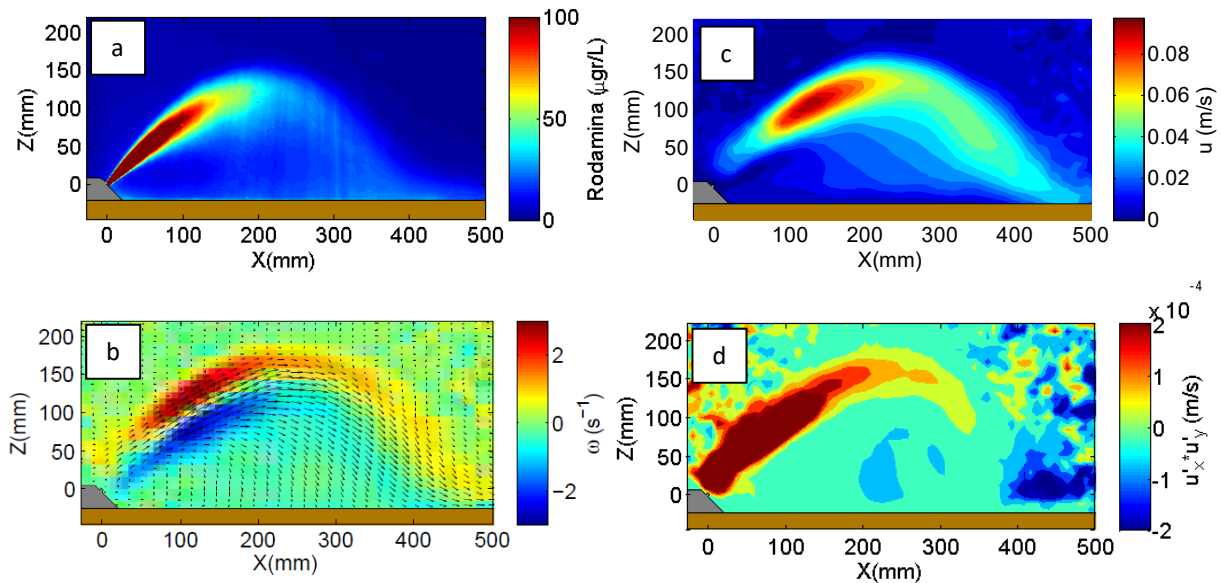


Figura 4.1. Campo de concentraciones LIF (a), campo de velocidades totales PIV (b), campo vectorial de velocidades con fondo de vorticidad (c) y fluctuaciones de la velocidad PIV (d)

Este último campo permite calcular las tensiones tangenciales de Reynolds.

$$\tau = -\rho u'_x u'_z \quad [4.1]$$

Gracias a este mapa de tensiones turbulentas es posible determinar el eje del vertido, para ensayos en los que trabajar con el campo de velocidades es más complicado (medio dinámico). Los ensayos con medio receptor estacionario y dinámico co-flow (tipos I, II y IV, representado en la Figura 4.2), permiten estimar de los valores máximos de velocidades el eje velocidades máximas. Las descargas counter-flow se dividen en aquellos en las que existe inversión del mismo, y entre las que no. En los chorros en los que no existe inversión (Tipo III) se buscan los máximos de las velocidades, de una forma similar a los vertidos típicos en la dirección de la corriente. No obstante, para descargas con inversión (Tipo V), éstas son tratadas de forma diferente, y para ello se emplea el campo de tensiones turbulentas (Figura 4.2).

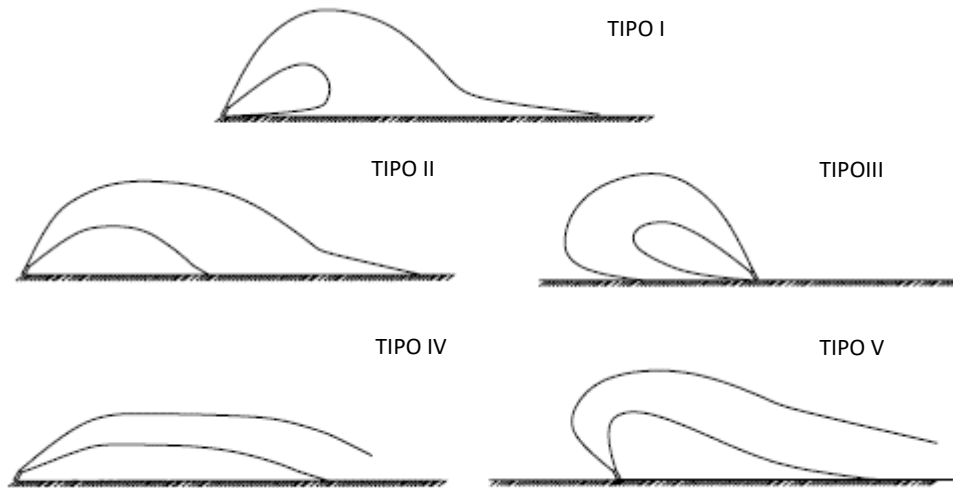


Figura 4.2. Tipologías de vertidos ensayados en este trabajo de investigación

EL eje de concentraciones para los vertidos Tipos I, II y IV, se obtiene tras un promediado de todas las imágenes adquiridas mediante la técnica LIF durante el régimen estacionario. A partir del campo promedio de concentraciones de rodamina, se ha realizado la búsqueda por columnas de la posición de máxima concentración, que se corresponde con una resolución de 1 píxel (0.12 mm). De este modo, es sencillo determinar la envolvente de los puntos con mayor concentración a lo largo del vertido. Una vez obtenido este eje, se suaviza aplicando un doble filtrado compuesto por una media simple cada 5 elementos del vector, y seguidamente se realiza una mediana móvil con un intervalo de 10 elementos. La Figura 4.3 muestra la trayectoria bruta y la trayectoria filtrada de un ensayo en medio estacionario.

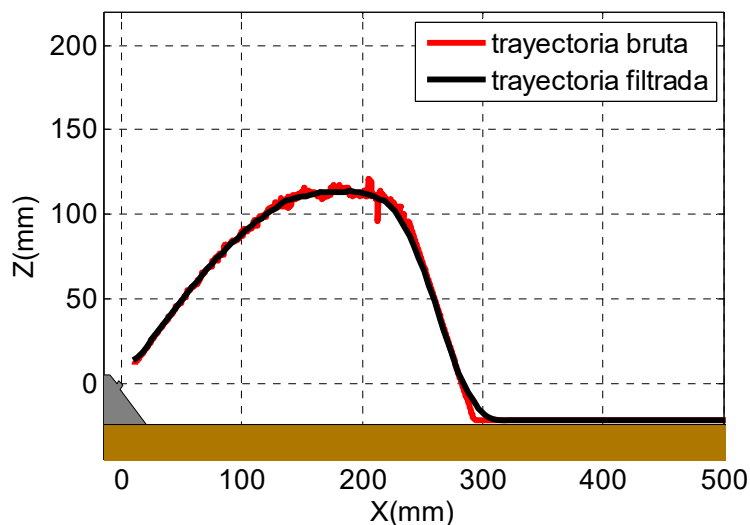


Figura 4.3. Eje de concentraciones del vertido sin filtrar y tras la aplicación del filtro

La determinación del eje del vertido, para el campo medio de velocidades, sigue una estructura similar a la del caso anterior. Se realiza una búsqueda de los máximos de velocidades por columnas, obteniendo un vector de posiciones inicial. Sin embargo, y dado que la resolución de estos ensayos es de 7.8x 7.8 mm (el procesado de imágenes se realizó con ventanas de 64x64 píxeles con un solape del 87 %), la trayectoria bruta presenta escalones (Figura 4.4a). Para obtener un eje más realista, se realizó un ajuste polinómico de grado 3 en torno a cada punto de la estimación inicial como se indica en la Figura 4.4b. Una vez realizado este ajuste para todos los puntos de la trayectoria inicial, se obtiene la posición de los puntos con velocidades máximas, como muestra la Figura 4.5.

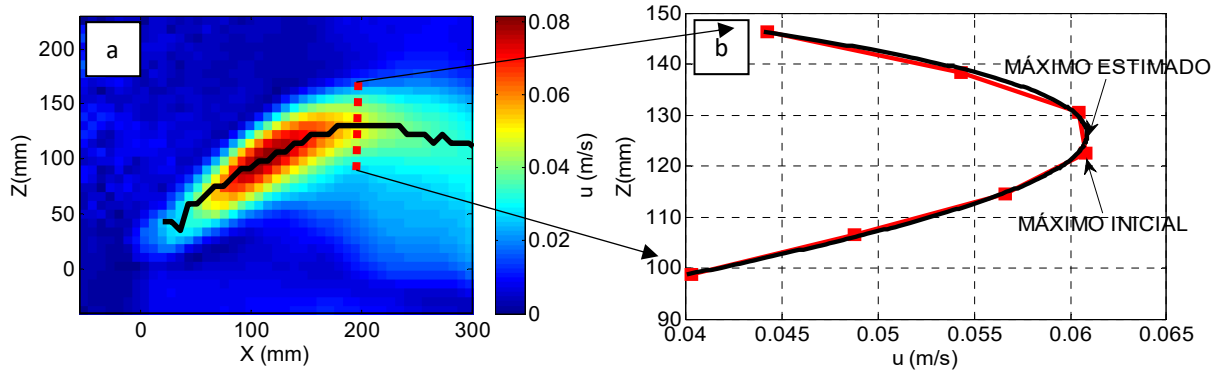


Figura 4.4. Sección vertical de velocidades (a) y ajuste polinómico de grado 3 (b)

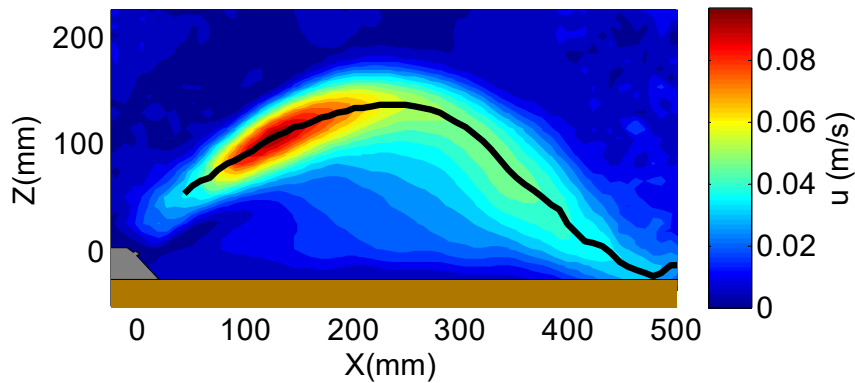


Figura 4.5. Estimación de los puntos con velocidades máximas para un vertido en medio estacionario

Por último, se analiza el campo compuesto por el producto de las fluctuaciones de velocidades $u_x' \bullet u_z'$, o de tensiones de Reynolds. En un vertido convencional (medio estacionario o co-flow), la estimación del eje para los campo de velocidades (PIV) se realiza buscando el máximo en el chorro. Sin embargo, para un vertido counter-flow la determinación del eje mediante los campo de tensiones de Reynolds, dependen del sentido de la descarga y de la velocidad del ambiente receptor. La Figura 4.6 muestra las trayectorias obtenidas para los tres campos estudiados (concentraciones, velocidades, y tensiones de Reynolds). Se observa como las tres trayectorias obtenidas coinciden hasta la cota máxima alcanzada por el vertido (Z_{me}), y a continuación se separan por diferencias en la mecánica de mezcla. En trabajos de flujo estratificado se ha detectado diferencias en la posición de la interfaz de velocidades y densidades, que favorecen la mezcla el límite entre fluidos (Anta et al. 2016).

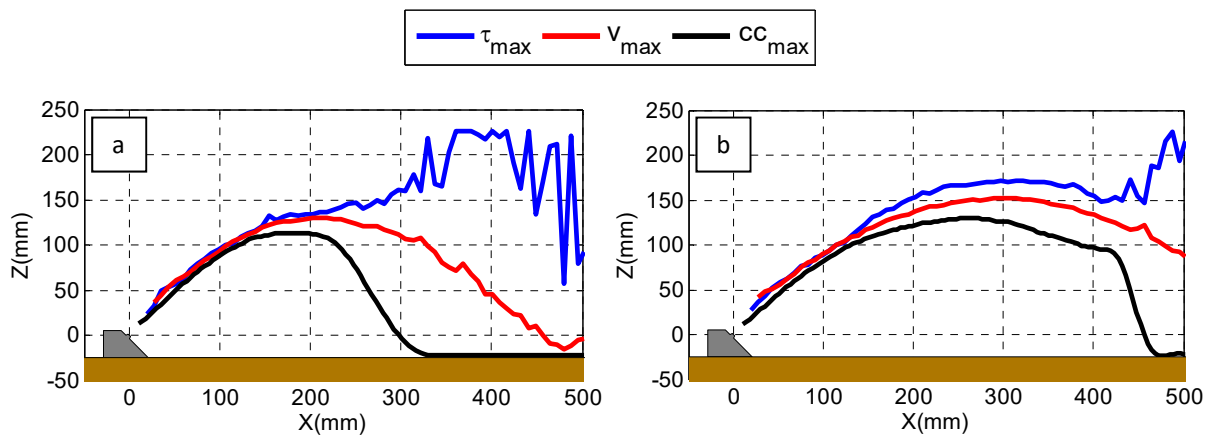


Figura 4.6. Ejes de fluctuaciones, velocidades y concentraciones máximas para un vertido en medio estacionario, Tipo I (a) y dinámico co-flow, Tipos II y IV (b)

A continuación, se describe la metodología de determinación de la trayectoria para vertidos en medio dinámico counter-flow (Tipo III y V), como muestra la Figura 4.7. En el primer caso, el punto de impacto

del efluente está localizado aguas arriba del origen del mismo. Por el contrario, los vertidos con inversión tienden a precipitarse sobre el fondo aguas abajo del difusor, siempre y cuando la salmuera no se diluya lo suficiente como para ser arrastrada por el medio receptor sin llegar a precipitar.

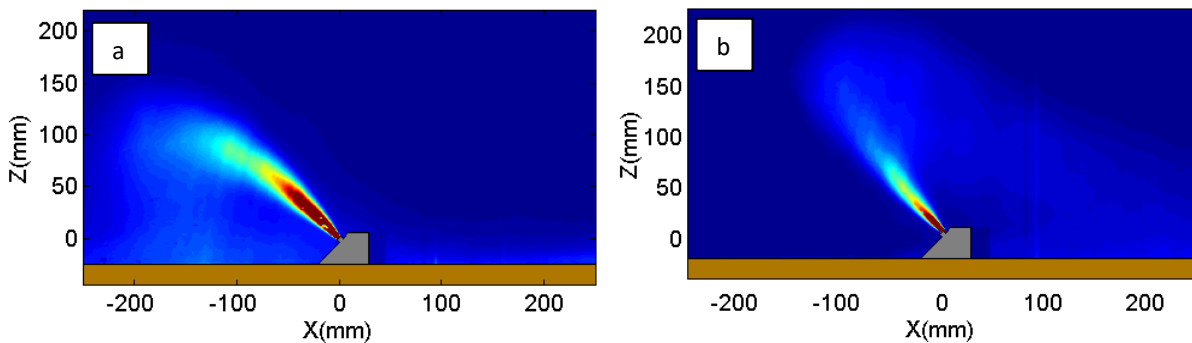


Figura 4.7. Vertido sin inversión, Tipo III, (a) y con inversión, Tipo V (b)

Para los vertidos en los que no se produce inversión, se lleva a cabo una búsqueda del valor máximo del campo de velocidades. Debido a la turbulencia inducida por el medio receptor, la velocidad del efluente disminuye drásticamente una vez que se alcanza la cota máxima del vertido, aunque sigue siendo sustancialmente superior a la velocidad del medio, Figura 4.8(a) lo que permite distinguir el eje de velocidades, del entorno.

Por otro lado, las descargas en las que existe una inversión del efluente observan un comportamiento distinto. En este caso el eje de velocidades máximas definido por el campo vectorial es más complejo de determinar. Debido a que la velocidad del medio es elevada y a que el flujo hiperdenso pierde velocidad ascensional progresivamente hasta la cota máxima, es complicado realizar la búsqueda de los máximos. En última instancia, el vertido es trasladado aguas abajo del difusor por el medio receptor, provocando que el flujo hiperdenso adquiera la velocidad del entorno. Dado que las velocidades de la descarga son semejantes a la del entorno, se ha optado por caracterizar el eje del vertido mediante el mínimo de las tensiones turbulentas, hasta la cota máxima alcanzada por el eje Figura 4.8b. Como se ha comentado anteriormente, hasta esta cota las trayectorias obtenidas con las tres metodologías se solapan.

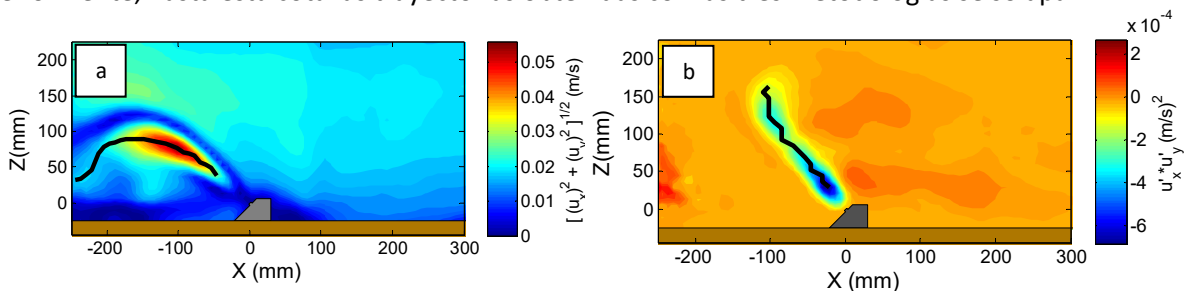


Figura 4.8. Trayectorias para vertidos con y sin inversión Tipo III (a) y V (b) respectivamente

4.2.2 Variables de estudio

En este apartado se definen los parámetros físicos del vertido empleados para el estudio del campo cercano. La Figura 4.9 muestra las variables de estudio en un esquema de un chorro sumergido de flotabilidad negativa.

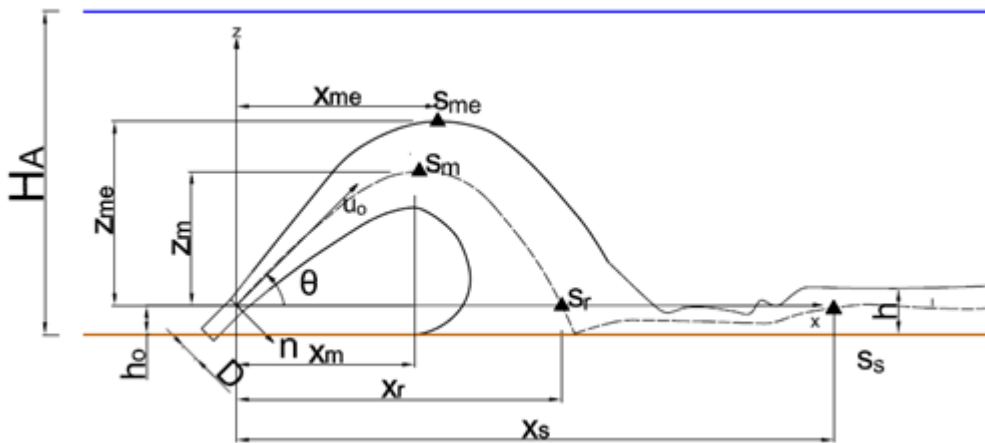


Figura 4.9. Esquema vertido en Campo Cercano

Los principales parámetros geométricos y ambientales a tener en cuenta son los siguientes:

D : Diámetro del difusor.

H_A : Calado del medio receptor.

u_o : Velocidad inicial del efluente.

θ : Ángulo de inclinación del difusor.

n : Dirección normal a la inclinación inicial del vertido.

Z_{me} : Cota máxima alcanzada por el vertido.

X_{me} : Posición horizontal desde el difusor al punto de cota máxima del vertido.

Z_m : Cota máxima alcanzada por el eje del vertido.

X_m : Posición horizontal desde el difusor del punto de cota máxima del eje.

L_m : Distancia en el eje del vertido.

X_r : Posición del punto de retorno, localización al punto en el que el eje pasa por la cota cero (altura del difusor).

V : Velocidad del medio.

h_o : Elevación del difusor sobre el fondo.

Q_o : Caudal de entrada de la salmuera en el ambiente receptor

A continuación se definen las variables de estudio para vertidos de salmuera relacionadas con la diferencia de densidad.

S_m : Dilución alcanzada en el punto de cota máxima del eje (X_m, Z_m). $S_m = C_o/C_m$, C_o =concentración inicial del vertido; C_m = concentración en la cota máxima del eje.

S_{me} : Dilución alcanzada en el punto de cota máxima alcanzada por el vertido (X_{me}, Z_{me}). $S_{me} = C_o/C_{me}$, C_{me} = concentración en la cota máxima alcanzada por el vertido.

S_r : Dilución alcanzada en el punto de retorno ($X_r, 0$). $S_r = C_o/C_r$, C_r = concentración en el punto de retorno.

Por último, se presenta un parámetro adimensional que sirve para caracterizar el comportamiento de un vertido hiperdenso, en relación a la hidrodinámica del ambiente. Este parámetro relaciona la velocidad del medio receptor y la velocidad inicial del efluente ($u_r = u_o/v$, donde u_o es la velocidad inicial del chorro) (Roberts y Toms, 1987). El parámetro u_r , junto con el número de Froude densimétrico (F_{rd}), se ha empleado para definir la influencia de la velocidad del medio sobre un vertido hiperdenso, como se verá más adelante.

4.2.3 Influencia del número de Froude

El número de Froude densimétrico es un parámetro adimensional que relaciona las fuerzas gravimétricas con la flotabilidad de un fluido. Ha sido empleado de forma generalizada para describir el comportamiento

de vertidos en medios receptores con diferentes densidades, ya sean flujos hipodensos o hiperdensos (Ecuación 4.1).

$$F_{rd} = \frac{u_0}{\sqrt{D \cdot g'_0}} \quad [4.1]$$

EL parámetro adimensional F_{rd} se emplea para adimensionalizar las variables de estudio de los vertidos hipersalinos. Además es relevante, como se ha comprobado en investigaciones previas (Roberts et al., 1997 o Palomar, 2014), la existencia de un valor mínimo para el cual el F_{rd} deja de tener efecto sobre el comportamiento del vertido. La Figura 4.10 muestra como varían los parámetros de estudio respecto del número densimétrico de Froude.

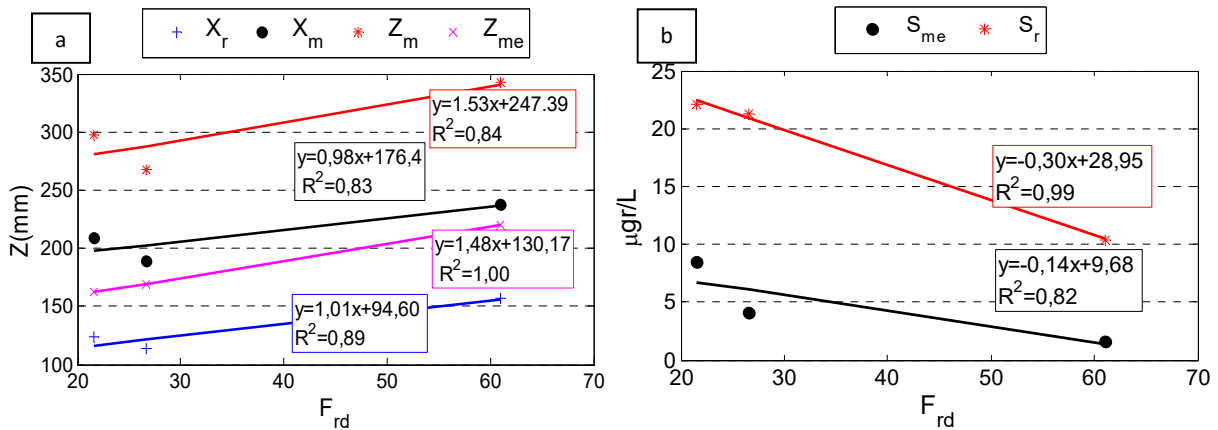


Figura 4.10. Variación de los parámetros de estudio respecto a F_{rd} , (a) geométricas y (b) diluciones.

La variación presentada en la Figura 4.10 hace referencia a ensayos con parámetros de diseño similares, pero con diferentes F_{rd} . La Figura 4.10a muestra como las magnitudes aumentan de manera acorde al número de F_{rd} , como ya demostraron Papakonstantis et al. (2011). Por otro lado, en la Figura 4.10b se puede apreciar que las diluciones alcanzadas en el punto de retorno (S_r) y en el punto más alto del vertido (S_{me}) disminuyen con el F_{rd} . Por último, la Figura 4.11 presenta el comportamiento del vertido bajo la influencia de F_{rd} , mostrando la concentración del vertido en el punto de cota máxima del eje (X_m, Z_m).

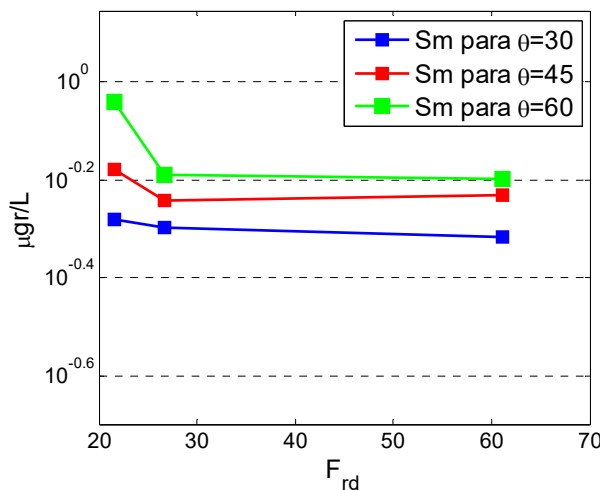


Figura 4.11. Influencia del parámetro F_{rd} en la evolución de la concentración de rodamina en el punto de cota máxima del eje

En la Figura 4.11 se comprueba que existe un cambio de tendencia para valores de F_{rd} inferiores a 25, que se debe al caudal de entrada del flujo hiperdenso en el medio receptor. Por ello se establece un límite inferior de $F_{rd}=20$, para el cual el efecto del Q_0 es despreciable sobre el chorro (Roberts et al. 1997). Como

se comentó anteriormente, el número de F_{rd} no sólo tiene influencia sobre el vertido en medios estacionarios. Para el análisis de vertidos en medios dinámicos se emplea el parámetro formulado por Roberts y Toms (1987), $u_r F_{rd}$. Este parámetro relaciona la velocidad del difusor con la velocidad del medio receptor, y con las fuerzas de flotabilidad (F_{rd}). Con el propósito de mostrar el efecto de este parámetro sobre el comportamiento del efluente, la Figura 4.12 muestra la evolución, para diferentes velocidades del medio, de la variable X_s (límite entre campo cercano y campo lejano).

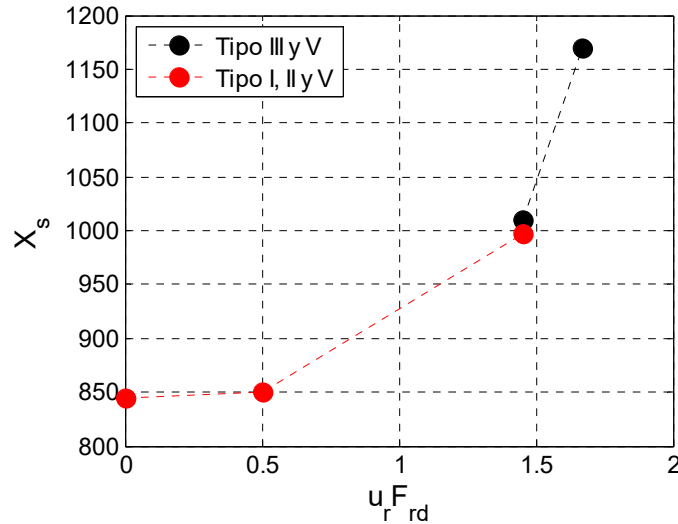


Figura 4.12. Evolución del límite entre campo cercano y campo lejano para diferentes velocidades del medio. La evolución del límite entre campo cercano y campo lejano, aumenta a medida que crece la velocidad. Aunque la hidrodinámica provoca que el límite entre campos se desplace aguas abajo se aprecia que el valor X_s es siempre mayor para vertidos counter-flow (Tipos III y IV).

4.2.4 Análisis dimensional de chorro con flotabilidad negativa

En este apartado se realiza una descripción de las formulaciones adimensionales empleadas para la descripción de un vertido hiperdenso. Para ello, se realiza un análisis dimensional, el cual es una aproximación matemática en la que se tienen en cuenta sólo las variables con mayor peso en un proceso físico. Se ejecutó un procedimiento similar a investigaciones previas como Abessi et al. (2008). Por otra parte, las variables cuya variación es despreciable no se tienen en cuenta, a fin de reducir el número de parámetros a considerar. Así pues, asumiendo un flujo totalmente turbulento y la hipótesis de Boussinesq para fuerzas gravitacionales, se obtienen los parámetros mostrados a continuación (Ecuación 4.2 a 4.4).

Variables para la cota máxima alcanzada por el eje del vertido.

$$\frac{Z_m}{DF_{rd}} = K_1; \frac{X_m}{DF_{rd}} = K_2; \frac{S_m}{F_{rd}} = K_3; \frac{b_m}{DF_{rd}} = K_4; \frac{L_m}{DF_{rd}} = K_5; \frac{U_m F_{rd}}{U_o} = K_6 \quad [4.2]$$

Variables en el punto de retorno.

$$\frac{X_r}{DF_{rd}} = K_7; \frac{S_r}{F_{rd}} = K_8; \frac{b_r}{DF_{rd}} = K_9; \frac{L_r}{DF_{rd}} = K_{10}; \frac{U_r F_{rd}}{U_o} = K_{11} \quad [4.3]$$

Variables en el punto de impacto.

$$\frac{X_i}{DF_{rd}} = K_{12}; \frac{S_i}{F_{rd}} = K_{13}; \frac{b_i}{DF_{rd}} = K_{14}; \frac{L_i}{DF_{rd}} = K_{15}; \frac{U_i F_{rd}}{U_o} = K_{16} \quad [4.4]$$

Dado que los coeficientes obtenidos en las ecuaciones 4.2, 4.3 y 4.4, son adimensionales, se han escogido ensayos representativos de cada tipología para un análisis posterior de estos parámetros. Se proponen los ensayos C07, C20, C39 y C40, como ejemplo de estudio de la batería llevada a cabo en campo cercano, ya que todos ellos comparten la misma configuración geométrica, y valores del F_{rd} y R_e similares. Las Figuras 4.13 a 4.16, muestran los campos de concentración y de velocidades analizados.

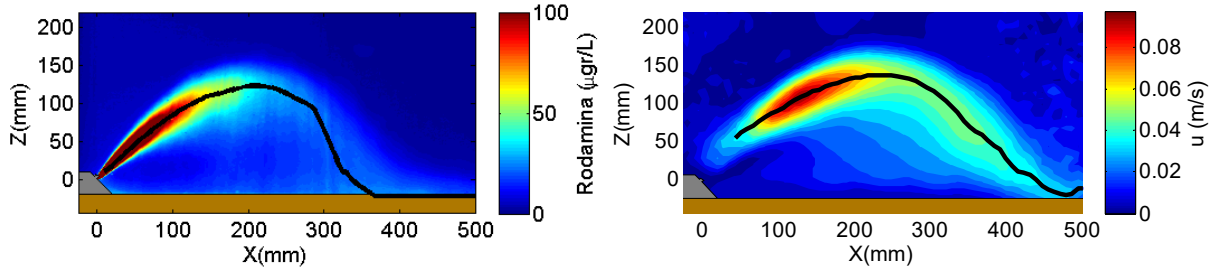


Figura 4.13. Campos LIF y PIV C07 (Tipo I, estacionario)

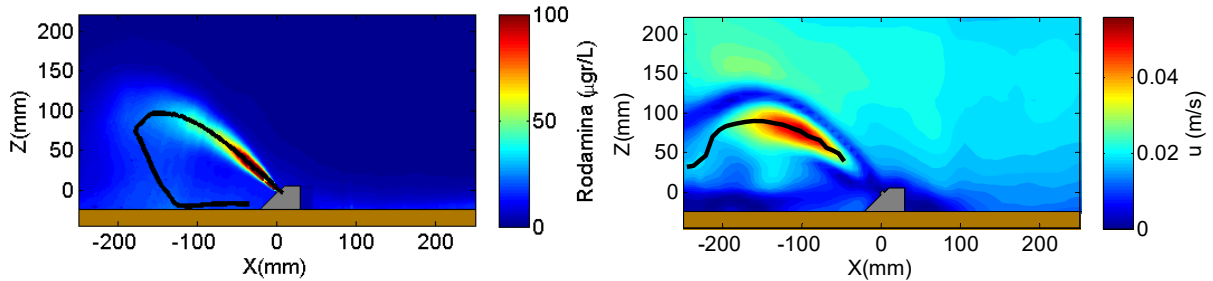


Figura 4.14. Campos LIF y PIV C20 (Tipo III, $v=0.015$ m/s counter-flow)

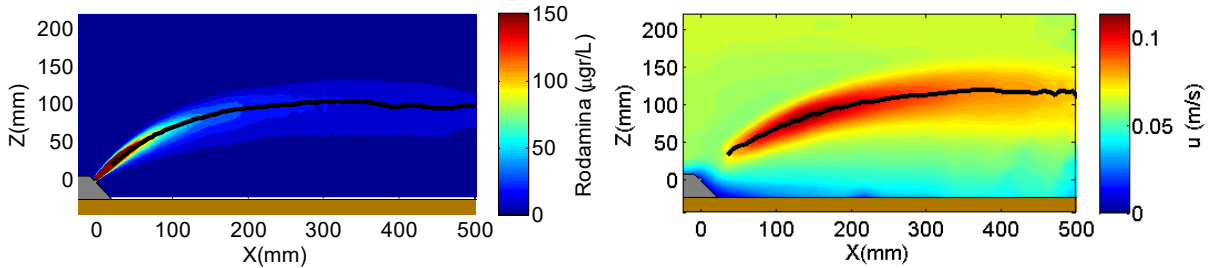


Figura 4.15. Campos LIF y PIV C39 (Tipo IV, $v=0.05$ m/s co-flow)

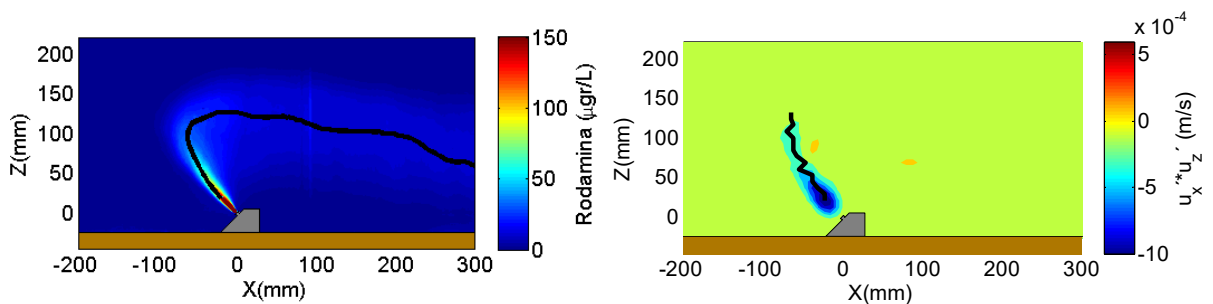


Figura 4.16. Campos LIF y PIV C40 (Tipo V, $v=0.05$ m/s counter-flow)

Así pues, una vez obtenidas las trayectorias de los ensayos aquí presentados, se pueden obtener los parámetros de estudio (cotas y diluciones) para ser adimensionalizados. Dado que estos ensayos son representativos de toda la batería de ensayos, se pueden establecer ciertos patrones comunes en los resultados obtenidos.

4.3 Perfiles longitudinales del chorro

4.3.1 Perfiles longitudinales campos de concentraciones

En este apartado, se presenta el análisis de diferentes parámetros, para los ensayos C07, C20, C39 y C40. Como se ha explicado en el apartado anterior, las cotas y diluciones del vertido se adimensionalizan, de forma que los resultados obtenidos para diferentes ensayos pueden ser comparados entre ellos. Las trayectorias y diluciones presentadas en las siguientes figuras son obtenidas a través de los promediados de los campos de estudio.

En primer lugar, se presenta la evolución de los perfiles longitudinales de la trayectoria del efluente obtenidos mediante la técnica LIF. Para su representación se emplean coordenadas geométricas $\left(\frac{X}{DF_{rd}}, \frac{Z}{DF_{rd}}\right)$ del eje del vertido, además de la dilución adimensionalizada $\left(\frac{S}{F_{rd}}\right)$.

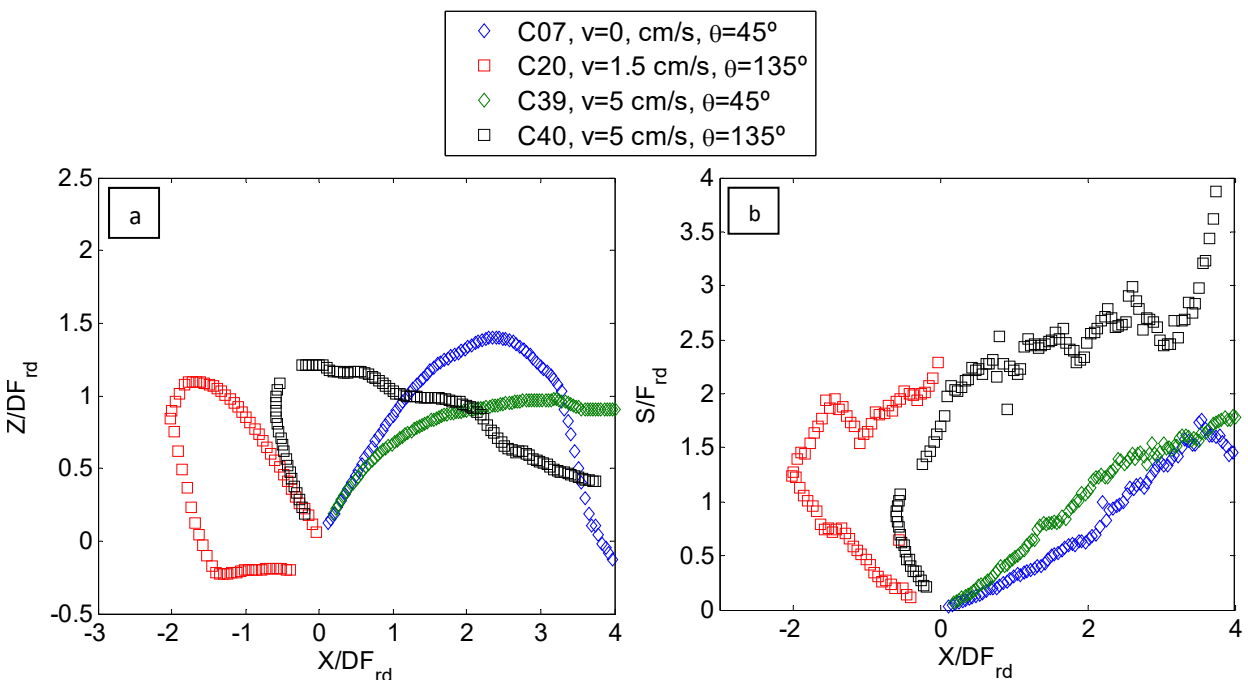


Figura 4.17. Evolución longitudinal de las variables obtenidas adimensionalizadas. Posición (X, Y) del eje de concentraciones (a) y dilución (S) en el eje del vertido (b)

En todos los casos, la trayectoria del vertido crece hasta un máximo absoluto para luego descender, observando que cuanto mayor es la velocidad del medio más tarda el efluente en caer. Para el caso C39 no se aprecia el descenso de la trayectoria, ya que la corriente arrastra el vertido aguas abajo. El ensayo C20, la salmuera se precipita aguas arriba del difusor y a continuación se traslada por el fondo del medio, por lo que la formación de la corriente de gravedad tiene lugar mucho antes que en los casos anteriores.

La gráfica 4.17b muestra la dilución a lo largo del eje, que en este tipo de investigaciones es contraria a la “habitual” $(S=C_o/C)$. Como se aprecia, para los casos en co-flow (C07 y C39), la dilución aumenta progresivamente y casi de forma lineal. No obstante, para los vertidos en counter-flow (C20 y C40), la dilución aumenta rápidamente por efecto de la corriente del medio, y a continuación crece de forma casi constante. Como se puede observar, el ensayo C20 tiene un máximo relativo de la dilución en $X/DF_{rd} \approx -1.5$. De igual manera, el ensayo C07 experimenta un máximo absoluto en la posición $X/DF_{rd} \approx 3.5$, que en ambos casos coinciden con el punto de impacto del efluente sobre el fondo del medio receptor. Por lo tanto, como es de esperar, las zonas de dilución elevada se corresponden con zonas de fuerte turbulencia del vertido.

4.3.2 Perfiles longitudinales de los campos vectoriales

De forma similar al apartado anterior, se presentan a continuación la evolución de las variables hidrodinámicas a lo largo del eje de velocidades, obtenido mediante la técnica PIV. Se evalúa la trayectoria con sus coordenadas $\left(\frac{X}{DF_{rd}}, \frac{Z}{DF_{rd}}\right)$, y además se presenta la evolución del módulo de la velocidad a lo largo del eje, junto con sus componentes vertical y horizontal.

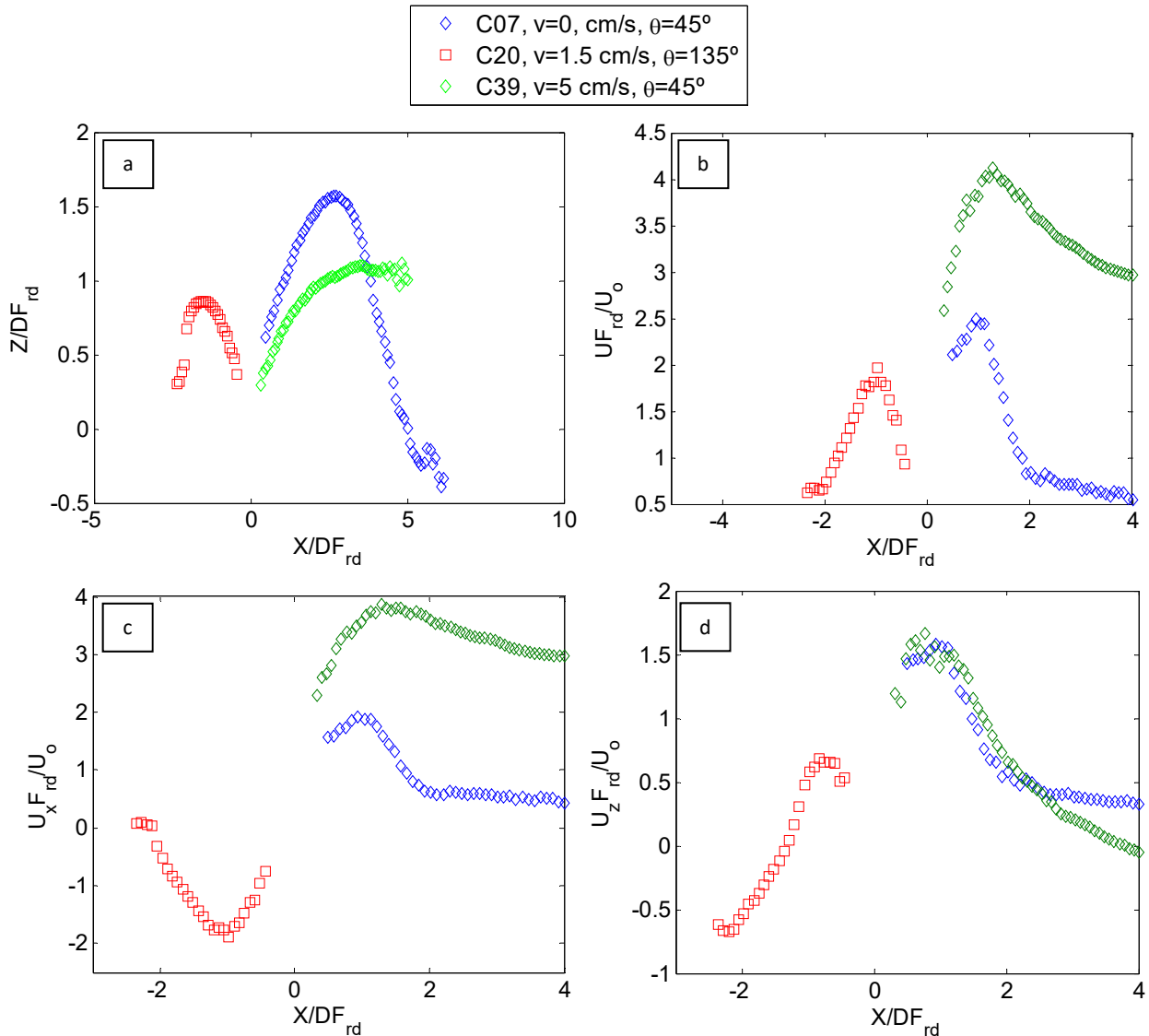


Figura 4.18. Evolución longitudinal de las variables PIV adimensionalizadas. (a) Trayectoria, (b) velocidad en el eje del vertido, (c) velocidad horizontal y (d) velocidad vertical

En primer lugar, se ha de señalar que el eje y las variables hidrodinámicas del ensayo C40 no se presentan, dado que su determinación mediante técnicas PIV (máximo del módulo de velocidad) es muy complicada, al confundirse la velocidad del medio con la velocidad del flujo hiperdenso. Este fenómeno es debido a que la descarga en counter-flow (tipo V), pierde rápidamente la velocidad inicial provocando que el flujo de salmuera se adapte al medio receptor tras la inversión del vertido.

La Figura 4.18a muestra un comportamiento de los ejes obtenidos mediante la técnica PIV, similar a los ejes obtenidos mediante la técnica LIF. No obstante, es de resaltar que este ajuste no es perfecto, ya que el punto en el que el eje de velocidades impacta sobre el fondo del medio (X_i), es de al menos un 20 % superior al obtenido mediante el eje de concentraciones. Esta diferencia va disminuyendo con el aumento

de la velocidad del medio, debido a la pérdida de influencia de la flotabilidad sobre el chorro en favor de la cinética. Por lo tanto, al disminuir la caída de masa sobre el fondo los ejes de velocidades y concentraciones tienden a coincidir.

El análisis de los módulos de las velocidades (Figura 4.18b), refleja que los valores en las zonas más próximas al difusor son menores que las velocidades medidas aguas abajo de esta zona. Este efecto no representa la realidad del proceso físico, ya que el caudal del efluente, al estar afectado por los fenómenos turbulentos, pierde velocidad desde el instante mismo de la descarga. No obstante, y como ya se ha comentado en el Capítulo 3 de esta tesis doctoral, el compromiso aceptado por la escala de trabajo, origina zonas del campo vectorial (PIV) con menores velocidades existentes que en la realidad. Sin embargo, la pérdida de velocidad se produce antes para vertidos en medio estacionario, que aquellos efluentes en medios dinámicos (co-flow) como muestra el caso C39. Por otro lado, el vertido C20 (counter-flow) sufre una pérdida de velocidad muy brusca al ser frenado por la corriente del medio.

Las Figuras 4.18c y d presentan el análisis por separado de las componentes vertical y horizontal de las velocidades, de donde se puede concluir que los vertidos en medios dinámicos tienen una componente dominante en la horizontal, siempre y cuando la descarga realizada sea en sentido co-flow. Como se puede observar en la Figura 4.18d, para un vertido counter-flow la componente vertical de la velocidad es más importante, ya que se produce un descenso en el chorro inicial muy importante.

4.3.3 Análisis de parámetros de estudio

A continuación se presentan los resultados obtenidos para la batería de ensayos llevados a cabo en esta investigación, además de algunos de los resultados de trabajos previos. En primer lugar, para medio estacionario, la Figura 4.19a muestra los resultados experimentales para la cota máxima del eje (Z_m) y punto de retorno (X_r). La Figura 4.19b muestra las diluciones alcanzadas en esos puntos, todas ellas adimensionalizadas (Ecuaciones 4.2, 4.3 y 4.4). Los valores aquí representados se han agrupado según el ángulo de descarga inicial (θ), con el propósito de evaluar el efecto de esta variable geométrica sobre el comportamiento del fluido.

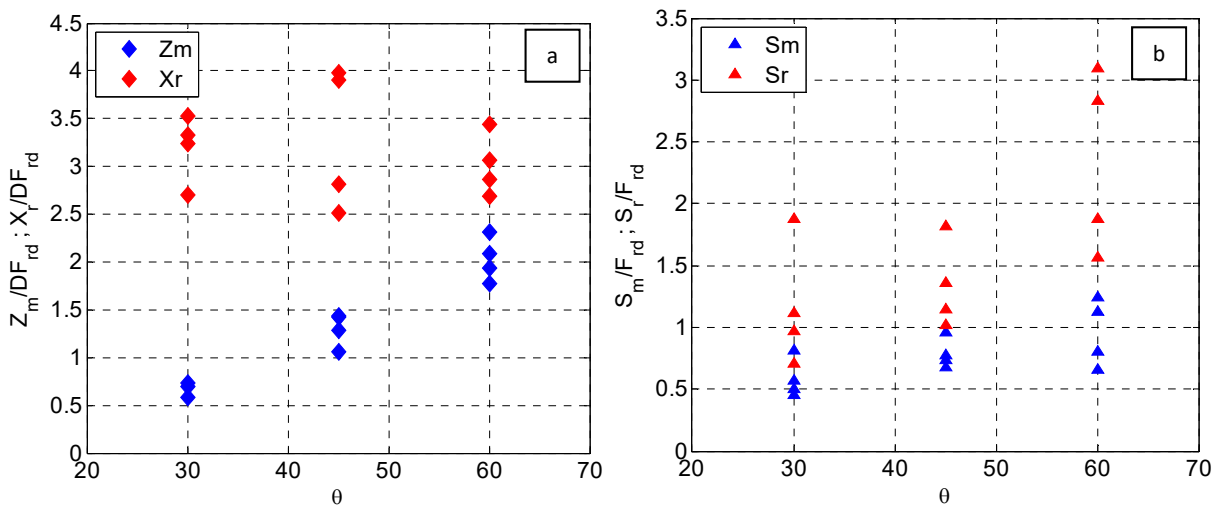


Figura 4.19. Análisis dimensionales de variables geométricas (a) y diluciones (b) para medio estacionario, correspondientes a la cota máxima del eje (Z_m) y el punto de retorno (X_r)

Como se puede apreciar, cuanto mayor es el ángulo de descarga mayor es la cota máxima que alcanza el eje del vertido, lo que no ocurre para el punto de retorno. La dispersión que se aprecia en los resultados para esta variable, dependen directamente del número de F_{rd} .

La Figura 4.19b muestra las diluciones alcanzadas para los 3 ángulos ensayados (30°, 45° y 60°) en las dos coordenadas estimadas (Z_m y X_r). De nuevo se observa una mayor dilución alcanzada cuanto mayor es el ángulo, tanto en la cota máxima del eje (S_m), como en el punto de retorno (S_r). No obstante, este efecto es más fuerte para S_r aunque la dispersión en los resultados depende nuevamente del número de F_{rd} empleado.

La Figura 4.20 muestra los resultados adimensionalizados de la cota máxima alcanzada por el eje (Z_m), para los ensayos con medio receptor dinámico. Los resultados de estos ensayos se clasifican según la velocidad del medio (eje X), representada por el parámetro adimensional $u_r F_{rd}$ (Roberts y Toms, 1987). Además, los valores representados hacen referencia al ángulo de descarga y a la orientación del vertido respecto a la corriente del medio. Esta clasificación es importante, ya que el estudio de los efluentes hipersalinos con distintas configuraciones respecto al sentido del medio receptor, suponen comportamientos poco analizados en la literatura existente.

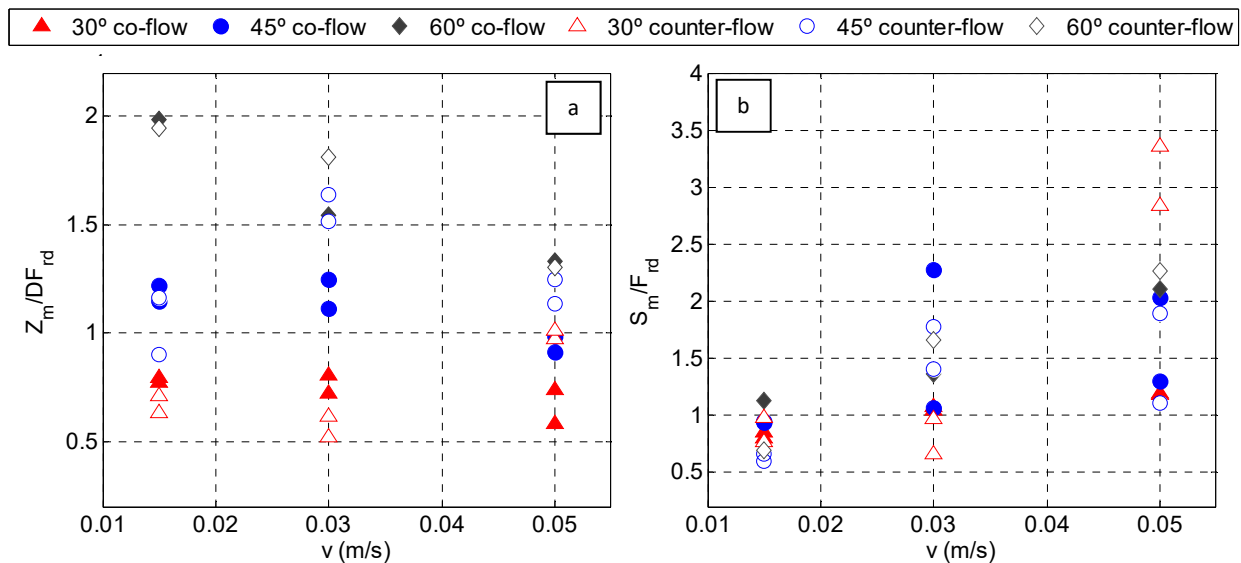


Figura 4.20. Análisis dimensional de la cota máxima alcanzada por el eje del vertido, Z_m (a), y la dilución en el mismo punto, S_m (b), para vertidos en un medio receptor dinámico

Como se observa en la Figura 4.20a, la cota máxima alcanzada por el eje (Z_m) disminuye según aumenta la velocidad del medio receptor. Se puede concluir que para los ensayos en counter-flow y con ángulos pequeños de vertido (30° y 45°), la cota es menor que para el mismo ensayo en co-flow. Este fenómeno se debe a que la irrupción del efluente en el medio se ve frenada bruscamente, generándose estructuras turbulentas que disipan la energía del chorro. No obstante, para los vertidos en los que sí existe inversión del vertido, la cota máxima del eje (Z_m) es mayor que las obtenidas para los ensayos en co-flow. Por otro lado, los vertidos con ángulos grandes (60°), éstos tienden a experimentar inversión del flujo en counter-flow, incluso para velocidades pequeñas, por lo que la cota alcanzada por el vertido es similar a la obtenida en co-flow.

En cuanto a la dilución alcanzada (Figura 4.20b), ésta aumenta con la velocidad del medio, como era de esperar debido a la turbulencia inducida por la corriente del ambiente receptor. Para velocidades bajas hay poca dispersión entre resultados, pero, a medida que aumenta la velocidad del medio aparecen mayores diferencias. De hecho, se puede observar que para velocidades altas, las diluciones alcanzadas por vertidos de 30° en counter-flow, son mayores que el resto de ensayos, lo cual tiene relación directa con el F_{rd} del vertido y su configuración de descarga.

La Tabla 4.1 muestra la variación de la dilución alcanzada en la cota superior del eje (Z_m), para las 3 velocidades ensayadas en esta campaña experimental ($v = 0.015, 0.03$ y 0.05 m/s). Se aprecia que las

diluciones promediadas obtenidas en medio dinámico, son generalmente el doble que en medio estacionario.

Tabla 4.1. Incrementos de la dilución en la cota máxima del eje (S_m) para las velocidades ensayadas, respecto a vertidos en medio estacionario

	v=0.015 (m/s)	v=0.03 (m/s)	v=0.05 (m/s)
Incremento de la dilución	14%	65%	176%

Los resultados adimensionalizados para las variables estudiadas en la campaña experimental de campo cercano son mostrados en la Tabla 4.2. Como ya se ha descrito en este apartado, los resultados obtenidos se han promediado atendiendo al ángulo de inclinación del vertido, velocidad y sentido de la descarga. La Tabla 4.3 presenta los resultados para la campaña experimental con medio receptor dinámico.

Tabla 4.2. Resultados experimentales en medio estacionario

Θ	Z_m/DF_{rd}	X_m/DF_{rd}	X_r/DF_{rd}	Z_{me}/DF_{rd}	X_{me}/DF_{rd}	S_m/F_{rd}	S_{me}/F_{rd}	S_r/F_{rd}
30°	0.67	1.89	3.19	1.02	2.38	0.50	3.43	1.20
45°	1.26	2.05	3.08	1.76	2.31	0.61	4.21	0.92
60°	2.06	2.03	3.12	2.58	2.18	0.70	5.99	1.68

Tabla 4.3. Resultados experimentales en medio dinámico

	Θ	Z_m/DF_{rd}	X_m/DF_{rd}	X_r/DF_{rd}	Z_{me}/DF_{rd}	X_{me}/DF_{rd}	S_m/F_{rd}	S_{me}/F_{rd}	S_r/F_{rd}
30° co-flow	0.5<urF<1	0.78	2.58	4.69	1.20	2.97	0.65	3.25	1.18
	1<urF<1.6	0.76	2.71	5.93	1.16	3.45	0.83	4.50	1.79
	urF>1.8	0.66	2.96	0.00	1.11	4.55	0.93	6.27	3.82
30° counter-flow	0.5<urF<1	0.67	-1.73	-1.95	0.98	-1.80	0.79	3.51	1.25
	1<urF<1.6	0.57	-1.56	-1.88	1.09	-1.99	0.64	3.45	0.85
	urF>1.8	0.99	0.04	4.87	1.54	2.61	2.43	8.95	3.71
45° co-flow	0.5<urF<1	1.18	2.47	2.18	1.63	3.19	0.74	4.02	1.47
	1<urF<1.6	1.18	3.40	0.00	1.55	3.74	1.31	7.82	4.17
	urF>1.8	0.95	3.55	0.00	1.31	3.92	1.30	6.32	3.09
45° counter-flow	0.5<urF<1	1.03	-1.35	-1.15	1.66	-1.48	0.57	3.92	1.83
	1<urF<1.6	1.58	-0.53	0.54	2.04	-0.29	1.25	5.16	3.38
	urF>1.8	1.19	0.50	-0.19	1.66	1.44	1.17	6.42	4.36
60° co-flow	0.5<urF<1	1.99	2.69	0.00	2.43	2.97	0.91	3.93	3.87
	1<urF<1.6	1.54	3.59	0.00	2.19	4.68	0.71	7.33	3.90
	urF>1.8	1.33	4.47	0.00	1.67	4.88	1.70	10.04	4.40
60° counter-flow	0.5<urF<1	1.95	-0.50	1.10	2.94	-0.16	0.63	15.80	1.43
	1<urF<1.6	1.81	1.64	0.00	2.37	1.79	1.34	5.72	0.72
	urF>1.8	1.30	2.28	0.00	1.68	2.89	1.82	11.33	4.61

La Figura 4.21 muestra los valores de la Tabla 4.2 para los ángulos de descarga empleados (30°, 45° y 60°). El análisis de las variables geométricas muestra que a mayor ángulo de descarga, la cota máxima alcanzada por el eje (Z_m) y su posición horizontal (X_m) convergen en un mismo punto para 60°. Este efecto, que ya ha sido corroborado por otros autores como Shao y Law (2010) o Palomar et al. (2012b) entre otros, y se debe a que los recorridos más largos para vertidos hiperdensos tienen lugar para ángulos con inclinaciones de 60°. Por lo tanto, la distancia en horizontal (X_m) es similar a la cota vertical alcanzada (Z_m), disminuyendo la diferencia entre ambas magnitudes. Por otro lado, y como es de esperar, las diluciones alcanzadas para el ángulo de 60° son mayores que las obtenidas para ángulos inferiores.

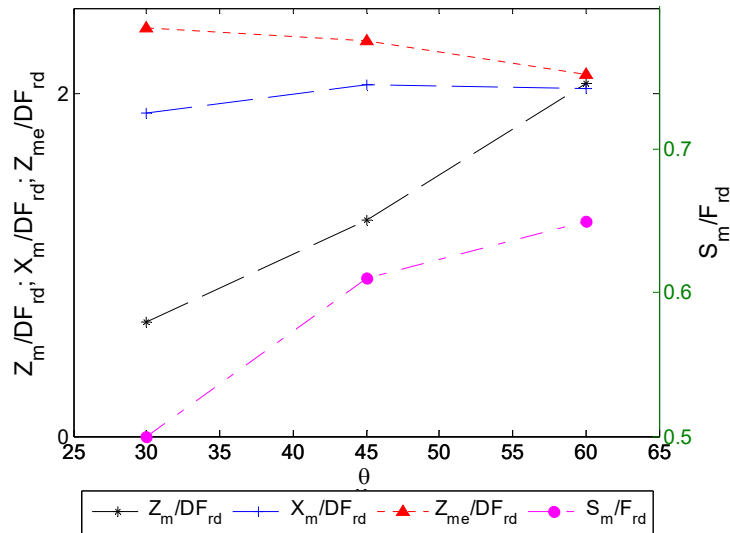


Figura 4.21. Evolución variables en medio estacionario

De forma individual, cada variable muestra un comportamiento que está más o menos relacionado con la velocidad del medio receptor. La Figura 4.22a presenta la evolución de la cota máxima alcanzada por el eje del vertido para diferentes velocidades del ambiente. La Figura 4.22b muestra la evolución de la dilución en el punto más elevado del eje (S_m), siempre en el mismo sentido de descarga (co-flow).

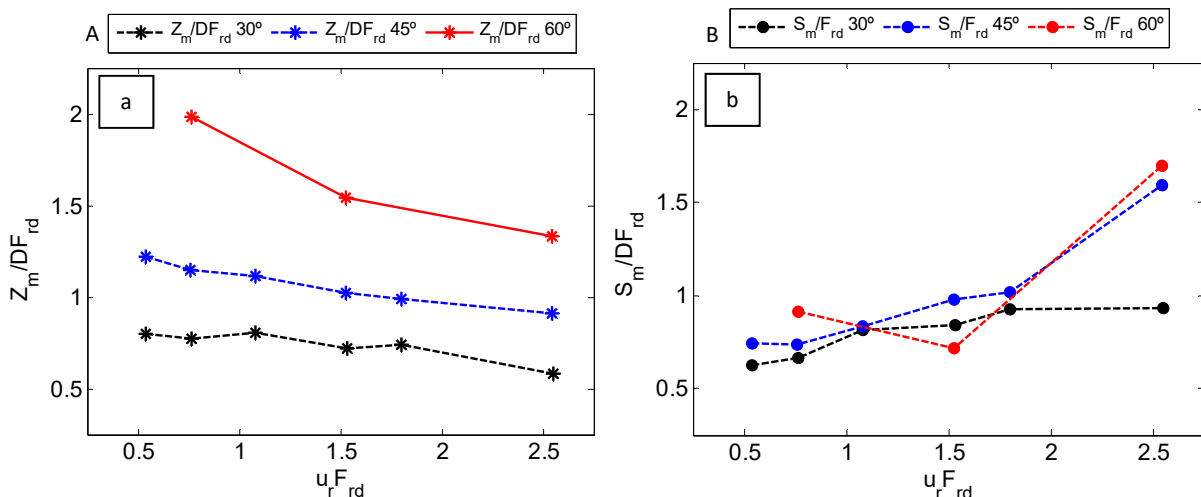


Figura 4.22. Evolución variables geométricas (a) y diluciones (b) en medio dinámico

El panel A muestra como la evolución de la cota máxima del eje disminuye a medida que crece la velocidad del medio, y el valor alcanzado es mayor cuanto mayor es el ángulo de descarga. Del mismo modo la dilución aumenta con la velocidad, aunque en este caso la dispersión de los resultados es menor que para la cota máxima del eje (Z_m). Sin embargo, se aprecia un punto discordante para $\theta=60^\circ$, que no parece seguir el patrón de las diluciones, para los ángulo de 30° y 45° , cuya variación no se considera relevante.

4.4 Comparación con resultados previos

Con el objeto de validar el montaje experimental y los resultados obtenidos en la campaña de ensayos de campo cercano, se presenta a continuación la comparación entre los resultados de esta investigación y los hallados en la literatura. Las variables de comparación son la cota máxima para el eje (Z_m) y la dilución alcanzada en dicho punto (S_m), la cota máxima alcanzada por el vertido y la dilución correspondiente (Z_{me} y S_{me} , respectivamente).

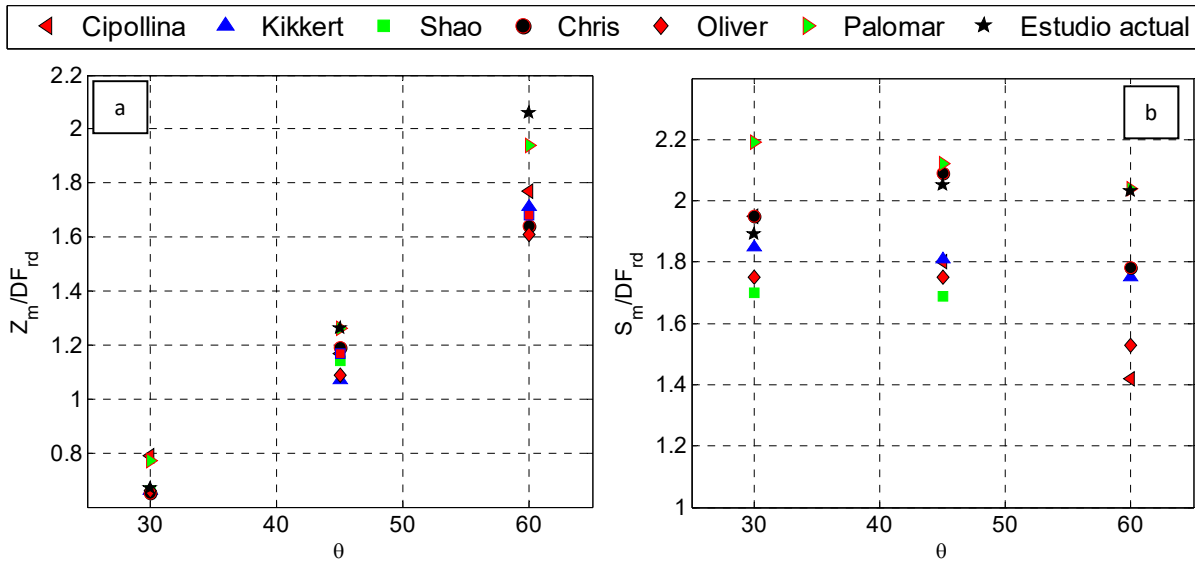


Figura 4.23. Comparación con resultados de trabajos previos. Panel a, cota máxima alcanzada por el eje del vertido (Z_m). Panel b, dilución alcanzada en la cota máxima del eje (S_m).

Los resultados obtenidos muestran valores similares respecto a trabajos anteriores, especialmente para $\theta=30^\circ$ y 45° . No obstante, para vertidos con $\theta=60^\circ$ se aprecia que el valor obtenido en este trabajo es mayor que los obtenidos en trabajo previos. Por otro lado, los valores resultantes de dilución (S_m) se ajustan mejor a los resultados de la literatura. En este caso, se aprecia que aunque el resultado de esta investigación es un 20 % mayor que el promedio de todos los anteriores, el valor presentado es similar al resultado obtenido por Palomar (2014).

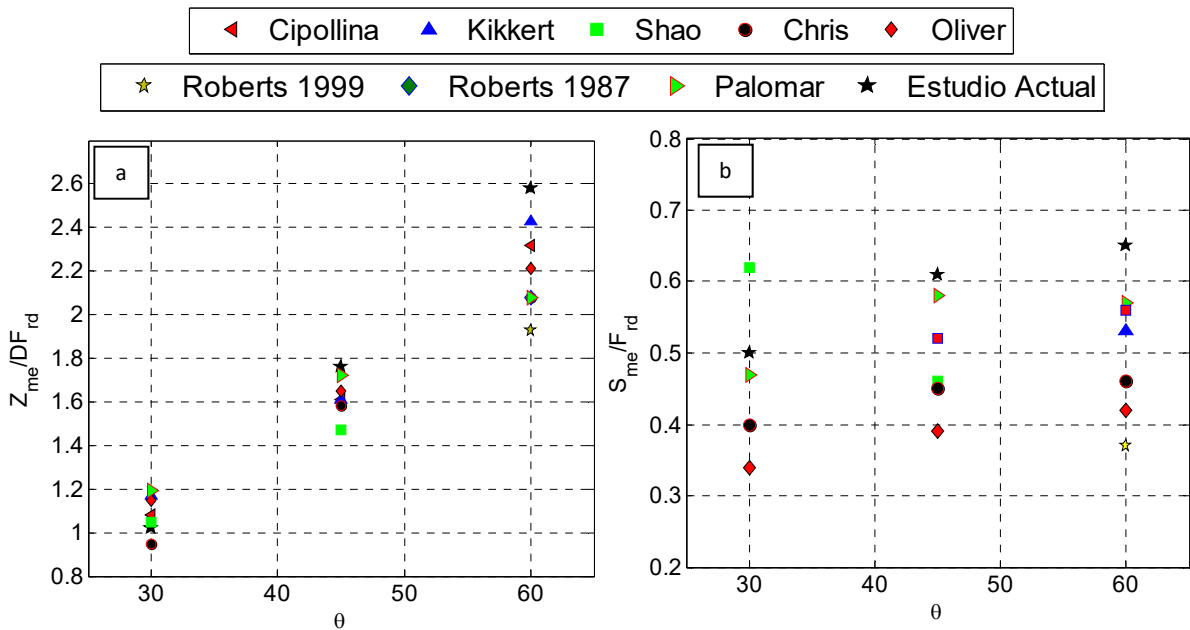


Figura 4.24. Comparación con resultados de investigaciones previas. Panel a, cota máxima alcanzada por el vertido (Z_{me}). Panel b, dilución alcanzada en la cota máxima del eje (S_{me}).

En los resultados de la cota máxima alcanzada por el vertido (Z_{me}) y su dilución (S_{me}), la tendencia observada en las variables es similar a las tendencias de la Figura 4.23. La dispersión de resultados respecto a los estudios previos aumenta con el ángulo de vertido. Por otro lado, se vuelve a contrastar el buen ajuste de los valores obtenidos con los coeficientes presentados por Palomar (2014), salvo para inclinaciones de $\theta=60^\circ$, donde se aprecia una mayor diferencia.

Es de destacar que el promediado de resultados mostrados en las Figuras 4.23 y 4.24, corresponde a ensayos en los que el vertido no impacta con la superficie libre. Sin embargo, en un estudio reciente (Abessi y Roberts 2015) se ejecutaron vertidos en los que se contempló el impacto contra la superficie del agua. Este fenómeno tiene lugar, sobre todo, cuando se vierte con un ángulo grande ($\theta \geq 60^\circ$) para profundidades someras. La figura 4.25 muestra una comparación de los valores obtenidos en esta tesis, y los resultados obtenidos por Abessi y Roberts (2015). De forma adicional, y para contrastar con los estudios previos, se ha realizado una gráfica de cajones para mostrar la posición de los valores de este estudio y del reciente trabajo de Abessi y Roberts, respecto a la literatura. Como se puede apreciar, los resultados de esta tesis doctoral son superiores a los obtenidos por Roberts y a la media de los resultados de trabajos anteriores.

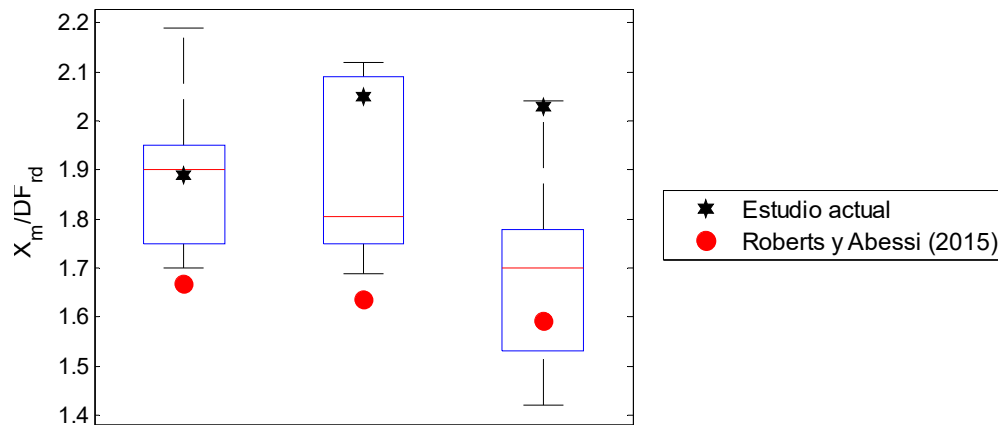


Figura 4.25. Comparación de resultados para vertidos con impacto en la lámina libre, Roberts y Abessi (2015), respecto a valores sin impacto de la literatura, cajas. Posición de la cota máxima del eje (X_m). Cada columna representa un ángulo de inclinación de vertido, 30°, 45° y 60° respectivamente (de izquierda a derecha)

La posición de los valores para X_m (posición de la cota máxima del eje) de Abessi y Roberts (2015) respecto al resto de trabajos es significativamente inferior. Este hecho es razonable, dado que la interferencia de la superficie frena bruscamente el vertido. Por otro lado, la dispersión de los resultados de esta tesis respecto a los trabajos previos vuelve a acentuarse para $\theta=60^\circ$, mientras que para $\theta=30^\circ$ el ajuste es bastante bueno para los ensayos en los que no existe impacto contra la lámina libre.

Por último, en este apartado se presentan las comparaciones para los resultados obtenidos en medio dinámico con los valores hallados en la literatura. En este caso, el número de investigaciones relacionadas con vertidos en ambientes receptores con presencia de corrientes, es mucho menor que los trabajos realizados para medio estacionario. Por lo tanto, dado que no se han encontrado resultados con ángulos de 30° y 45°, la comparación presentada se ha realizado para ángulos de 60° grados de inclinación. Como se puede observar en la Figura 4.26, los resultados obtenidos en este estudio se ajustan muy bien con los valores previos, y a las tendencias propuestas por Gungor y Roberts (2009).

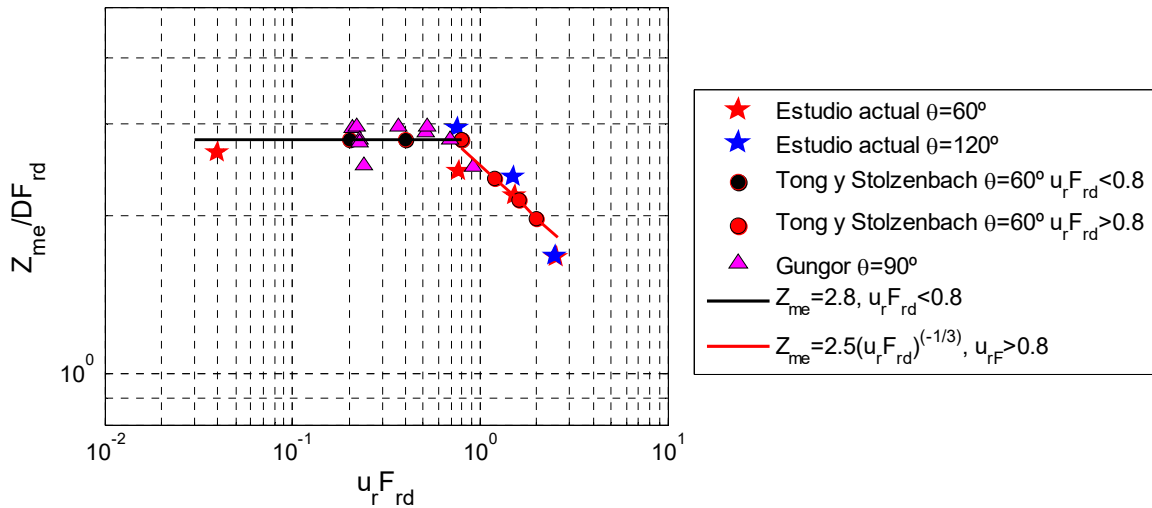


Figura 4.26. Comparación medio dinámico Z_{me}/DF_{rd}

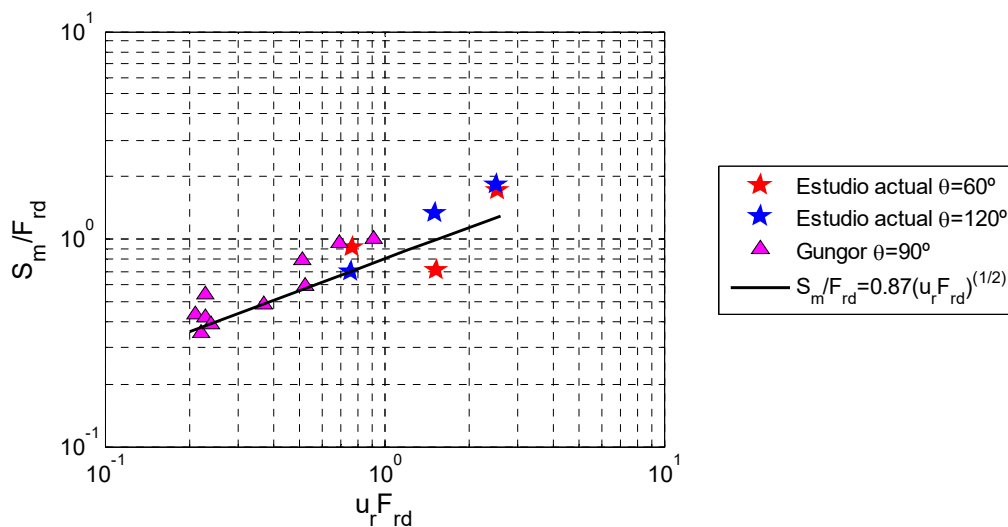


Figura 4.27. Comparación medio dinámica (S_m/F_{rd})

De igual manera que en la Figura 4.26, los valores de dilución obtenidos (Figura 4.27) guardan bastante relación con los resultados obtenidos por Gungor y Roberts (2009), y su propuesta de ajuste (línea negra). En este caso, sin embargo, los resultados de esta tesis tienen más dispersión debido a las diferentes configuraciones de descarga. Las mayores diluciones se obtienen para vertidos en counter-flow (azul) respecto a los vertidos en co-flow (rojo), lo cual es lógico, debido a las turbulencias generadas por la corriente del medio. Por otro lado, se aprecia que para valores de $u_r F_{rd}$ más elevados se obtienen diluciones más altas, lo que es congruente con la propuesta de Gungor para la estimación S_m .

4.5 Conclusiones

Los resultados presentados en este capítulo de esta tesis doctoral corresponden a una campaña experimental con un rango del número de Froude densimétrico de $22 < F_{rd} < 61$, y un rango de Reynolds de $903 < R_e < 2500$. En las comparaciones realizadas en este capítulo sólo han tenido en cuenta los ensayos con $R_e > 1200$, a fin de asegurar un flujo lo más turbulento posible. Por otro lado, los ángulos de vertido escogidos han sido 30° , 45° y 60° , ya que son los ángulos más comunes encontrados en la bibliografía. Respecto a las comparaciones en medio dinámico, sólo se han tenido en cuenta los vertidos cuya configuración de descarga es co-flow, dado que no se han encontrado bases de datos para montajes experimentales en counter-flow con difusor simple.

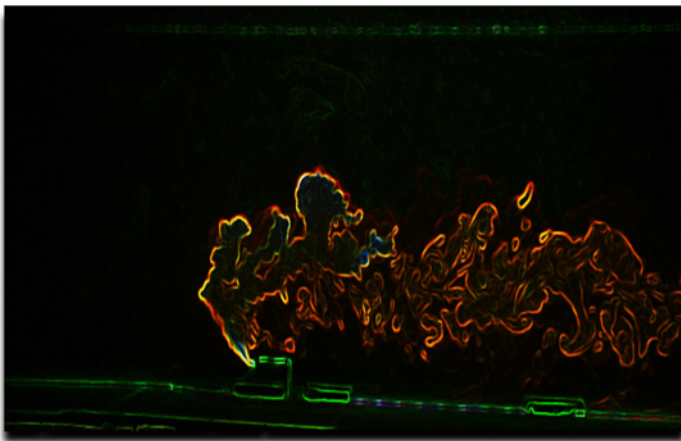
Las principales conclusiones del presente capítulo se exponen a continuación:

- Las trayectorias presentadas en este capítulo han sido obtenidas a partir de los datos registrados mediante técnicas PIV y LIF. Para los campos de velocidades (PIV), se ha optado por el máximo del campo en ensayos en estacionario y co-flow. Sin embargo, para vertidos en counter-flow, debido a la turbulencia inducida por el medio, es más complicado determinar el eje empleando la misma metodología. En este caso se ha determinado el máximo de las velocidades para vertidos sin inversión, y para vertidos con inversión del vertido se ha buscado el mínimo del campo de tensiones de Reynolds.
- Los ejes de concentración obtenidos tienden a converger según aumente la velocidad del medio ($u_r F_{rd}$), y según sea la configuración de vertido. De esta forma, para los vertidos en co-flow, y counter-flow (con inversión del vertido) los ejes convergen, dado que la corriente del medio arrastra el efluente aguas abajo del difusor. En los vertidos en counter-flow en los que no existe inversión precipitan sobre el fondo, para luego ser arrastrados aguas abajo del difusor.
- Las diluciones alcanzadas a lo largo del eje del vertido aumentan con la velocidad del medio. Los vertidos en co-flow y counter-flow convergen en una misma tendencia, y se presenta un máximo relativo en el punto correspondiente al impacto del vertido (X_i).
- Los ejes de velocidades obtenidos muestran una clara afectación por el medio receptor y por la turbulencia. Esto conlleva a que en los vertidos con configuraciones co-flow (Tipo I, II y IV), tenga más peso la componente horizontal de la velocidad. Sin embargo, para vertidos en counter-flow (Tipos III y V) la componente vertical de la velocidad es dominante, sobre todo en los primeros instantes de la descarga.
- El análisis de Z_m permite concluir que a mayor velocidad del medio menor es la cota máxima del eje, sin importar cuál sea la configuración de vertido. Además, la dilución alcanzada es mayor para aquellos vertidos en counter-flow, debido a la turbulencia inducida por el medio. Esta diferencia es mayor cuanto mayor es el ángulo de descarga. Para vertidos en medio dinámico algunas de las variables de estudio no pueden ser determinadas, ya que no existe impacto del flujo hipersalino sobre el fondo del medio receptor.
- Los parámetros adimensionales obtenidos tras un promediado (Z_m/DF_{rd} , X_m/DF_{rd} y Z_{me}/DF_{rd}) para los diferentes ángulos y sentidos de descarga, muestran una clara tendencia de convergencia para ángulos de $\theta=60^\circ$. Del mismo modo, el coeficiente S_m/DF_{rd} aumenta para $\theta=60^\circ$ en medio estacionario. Por otro lado, para un vertido en medio dinámico el comportamiento del parámetro adimensional Z_m/DF_{rd} sigue la misma tendencia decreciente para los 3 ángulos ensayados.
- Para un medio dinámico, la dilución alcanzada en la cota máxima del eje (S_m), sigue un mismo patrón hasta un $u_r F_{rd} \approx 1.5$ para los 3 ángulos ensayados. Para velocidades del medio mayores, se observa que la dilución para ángulos de 45° y 60° aumenta de forma similar.
- Por último, las comparaciones llevadas a cabo en este capítulo demuestran que los resultados obtenidos en esta tesis doctoral tienen un buen ajuste con las investigaciones previas. No obstante, los valores de diluciones presentados son en general mayores que aquellos hallados en la literatura. Se ha podido comprobar que algunas de los trabajos analizados presentaban rangos de R_e inferiores a 1000 (régimen poco turbulento). Por lo tanto, teniendo en cuenta que la dilución está ligada a la turbulencia de la descarga, las diluciones alcanzadas en dichos trabajos son menores que las obtenidas en la presente tesis doctoral, en la que se han empleado valores de $R_e > 1200$ para el promediado de resultados.

- Aunque el número de investigaciones previas para medio dinámico es mucho menor que para medio estacionario, se ha obtenido un buen ajuste para las comparaciones realizadas. Además, con el rango de velocidades ensayadas $0.5 < u_r F_{rd} < 2.5$, se ha constatado que los resultados obtenidos siguen la tendencia propuesta en trabajos anteriores. Por ello, este trabajo permite avanzar en el estado del arte de los vertidos de salmuera en medio dinámico.

BIBLIOGRAFÍA

- Abessi, O. et al., 2008. Dense jet discharges in shallow water. , 142(1), pp.1–13.
- Abessi, O. y Roberts, P.J.W., 2015. Effect of nozzle orientation on dense jets in stagnant environments. *Journal of Hydraulic Engineering*, (2013), pp.1–8.
- International Desalination Association. Disponible en: <http://idadesal.org>.
- Anta, J. et al., 2016. Eight International Conference on Fluvial Hydraulics (River Flow). In *Combined PIV-LIF measurements and numerical modeling of stratified flows over a dune and an array of dunes*. St. Louis, Estados Unidos.
- Gungor, E. y Roberts, P., 2009. Experimental studies on vertical dense jets in a flowing current. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(11), pp.935–948.
- Kikkert, G. a., Davidson, M.J. y Nokes, R.I., 2007. Inclined negatively buoyant discharges. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(5), pp.545–554.
- Lai, C.C.K. y Lee, J.H.W., 2012. Mixing of inclined dense jets in stationary ambient. *Journal of Hydro-Environment Research*, 6(1), pp.9–28.
- Palomar, P., Lara, J.L., Losada, I.J., et al., 2012a. Near field brine discharge modelling part 1: Analysis of commercial tools. *Desalination*, 290, pp.14–27.
- Palomar, P., Lara, J.L. y Losada, I.J., 2012b. Near field brine discharge modeling part 2: Validation of commercial tools. *Desalination*, 290, pp.28–42.
- Palomar Herrero, P., 2014. *Optimización experimental y numérica de vertidos hipersalinos en el medio marino*. Universidad de Cantabria, Tesis doctoral.
- Papakonstantis, I.G., Christodoulou, G.C. y Papanicolaou, P.N., 2011. Inclined negatively buoyant jets 2: concentration measurements. *Journal of Hydraulic Research*, 49(1), pp.13–22.
- Roberts, P.J.W. y Toms, G., 1987. Inclined dense jets in flowing current. *Journal of Hydraulic Engineering*, 113(3), pp.323–340.
- Roberts, P.J.W., Ferrier, A. y Daviero, G., 1997. Mixing in inclined dense jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(8), pp.693–699.
- Shao, D. y Law, A.W.K., 2010. Mixing and boundary interactions of 30° and 45° inclined dense jets. *Environmental Fluid Mechanics*, 10(5), pp.521–553.



CAPITULO V.

VERTIDO HIPERDENSO EN CAMPO CERCANO. CAMPOS DE FLUJO Y SECCIONES TRANSVERSALES

RESUMEN

En este capítulo se presenta el análisis de los procesos físicos presentes en un vertido de salmuera en campo cercano bajo diferentes condiciones ambientales. Para ello, se han empleado los campos de vectoriales (PIV) y escalares (LIF) obtenidos en la campaña experimental de campo cercano.

Para comprender mejor el funcionamiento del vertido, se han estudiado las secciones transversales al eje de la trayectoria. Además, se han analizado las fluctuaciones presentes para ambos registros, a fin de determinar las zonas de mayor potencial de dilución.

Este análisis se ha realizado para las diferentes tipologías de descarga, con el objetivo de obtener una comparativa del comportamiento de los flujos hiperdensos, en medios receptores estacionario y dinámico.

ÍNDICE

5	CAPÍTULO V. VERTIDO HIPERDENSO EN CAMPO CERCANO. CAMPOS DE FLUJO Y SECCIONES TRANSVERSALES.....	5.1
5.1	Introducción.....	5.1
5.2	Campos estudiados. Velocidades y diluciones.....	5.2
5.2.1	Campos vectoriales.....	5.2
5.2.2	Campos de diluciones.....	5.9
5.3	Secciones transversales.....	5.14
5.3.1	Velocidades y diluciones en el eje del vertido.....	5.16
5.3.2	Fluctuaciones de velocidades y diluciones.....	5.21
5.4	Conclusiones.....	5.26

5 CAPÍTULO V. VERTIDO HIPERDENSO EN CAMPO CERCANO. CAMPOS DE FLUJO Y SECCIONES TRANSVERSALES

5.1 Introducción

Tras el primer estudio de los resultados obtenidos en la campaña experimental de campo cercano, presentado en el Capítulo IV, en este apartado se realiza un análisis que profundiza en el comportamiento de los vertidos hiperdensos. Esta parte de la presente tesis doctoral se centra en la caracterización de los fenómenos hidrodinámicos y diluciones a lo largo del eje del vertido, además de caracterizar las secciones transversales al mismo.

La mayoría de los trabajos hallados en la literatura han enfocado sus esfuerzos en la determinación de los procesos físicos a partir de los campos de concentración obtenidos (Roberts et al., 1997 o Kikkert et al., 2010). Más recientemente, el empleo de sistemas de adquisición láser ha propiciado la caracterización de la hidrodinámica del vertido, (ver Shao y Law, 2010 entre otros). Esto proporciona un conocimiento añadido al comportamiento de la descarga, y permite estudiar los procesos hidrodinámicos presentes en la interfaz de mezcla y en las zonas de turbulencia elevada (a través de los campos de PIV). Las investigaciones más completas han empleado conjuntamente los campos de concentración y de velocidades para la caracterización del vertido (Lai y Lee, 2012 o Palomar et al., 2012).

Desde un punto de vista práctico, los estudios hallados en la literatura se han centrado en determinar el comportamiento de las descargas hipersalinas respecto a la variación de algunos parámetros, como por ejemplo el ángulo del difusor, el número de Froude densimétrico, calado o proximidad del difusor al fondo. Es de destacar que todos los parámetros mencionados afectan directamente a la configuración geométrica del chorro hipersalino, por lo que los estudios de las variables ambientales como la velocidad de la corriente casi no se han tenido en cuenta.

En esta tesis doctoral realiza un análisis de las variables físicas del chorro sumergido, incluyendo parámetros ambientales de la descarga, corriente y dirección del vertido hipersalino. Si bien el estudio de los vertidos de salmuera en medios dinámicos ha empezado a estudiarse recientemente, lo más reseñable es que su caracterización se ha llevado a cabo con técnicas láser 3D (3DLIF). Sin embargo, no se han hallado trabajos en la literatura que caractericen los campos de velocidades, ya sean en configuraciones bi- o tri-dimensionales.

Los rangos de estudio empleados en la campaña experimental han sido $22 < F_{rd} < 61$, $903 < Re < 2000$, y desde el punto de vista de la velocidad del medio, el rango de estudio fue de $0 < u_r F_{rd} < 2.55$, donde u_r relaciona la velocidad del medio v con la velocidad de descarga u_o ($u_r = v/u_o$). De este modo, lo que se pretende es determinar el efecto de hidrodinámica ambiental sobre el vertido. Se han caracterizado los campos de concentración y velocidad, así como las componentes horizontal y vertical de la misma, además de los campos de tensiones de Reynolds ($u_x' \cdot u_z'$).

A continuación, se hace un análisis de las secciones transversales a la trayectoria del vertido, la cual corresponde a la envolvente de puntos con concentración máxima (eje de concentraciones). Se han estudiado las secciones del efluente, primero adimensionalizando las variables de estudio (concentraciones y velocidades), y a continuación mediante una comparación con una campana de Gauss. Esta comparación es la base de la hipótesis de partida de muchas investigaciones y modelos conceptuales, que plantean la similitud de los perfiles de concentración y velocidades a una curva gaussiana. De este modo, se podrá establecer a qué distancia deja de tener sentido esta hipótesis, según sea la configuración de descarga o la velocidad del medio.

5.2 Campos estudiados. Velocidades y diluciones

5.2.1 Campos vectoriales

En este apartado se presentan los campos de concentraciones y velocidades obtenidos mediante las técnicas LIF y PIV respectivamente. En primer lugar, se analizan los campos vectoriales caracterizados y se detallan por separado las componentes vertical y horizontal, además de los campos de tensiones de Reynolds. A continuación, se presentan el desarrollo matemático de los campos analizados, partiendo del cálculo del módulo de la velocidad en el chorro (Ecuación 5.1).

$$u = \sqrt{u_x^2 + u_z^2} \quad [5.1]$$

Una vez se ha calculado el módulo de la velocidad en cada punto, se realiza una media de todas las imágenes obtenidas. Para estudiar la evolución del chorro y la pluma en campo cercano, se presentan a continuación los campos de dilución para los ensayos de referencia empleados en el Capítulo IV (C07, C20, C39 y C40), correspondientes a los tipos de vertido I, III, IV y V, respectivamente. Además, se analizan los campos de velocidades vertical (u_z) y horizontal (u_x), con lo que se puede obtener los productos de las fluctuaciones de la velocidad. El procedimiento matemático de obtención de las tensiones de Reynolds se explica a continuación. En primer lugar, se calcula la fluctuación de la velocidad en cada punto de la imagen y en cada dirección, como la diferencia entre la velocidad promediada de todo el campo y la velocidad instantánea de ese punto.

$$u'(i) = \bar{u} - u_{inst}(i) \quad [5.2]$$

A continuación, se calcula la desviación típica de todo el registro obtenido. Esta desviación típica es obtenida aplicando las ecuaciones 5.3 y 5.4.

$$\sqrt{\frac{\sum_i^n u'_x(i)^2}{n}} \quad [5.3]$$

$$\sqrt{\frac{\sum_i^n u'_z(i)^2}{n}} \quad [5.4]$$

Por último, se lleva a cabo el producto de ambos resultados. De esta forma, se obtiene un campo que representa una parte de las tensiones de Reynolds, expresión del tensor de fuerzas, obtenidos tras un promediado de todas las fluctuaciones de una porción de fluido, Ecuación 5.5.

$$\tau_{xy} = -\rho u'_x u'_z \quad [5.5]$$

Las siguientes imágenes muestran los campos obtenidos aplicando la técnica PIV. Velocidad total, tensiones de Reynolds y campos de velocidades horizontal y vertical. A fin de realizar una comparación adecuada, y como ya se ha explicado en Capítulo 4 de esta tesis doctoral, se han escogido los ensayos, C07, C20, C39 y C40. Estos ensayos tienen un mismo patrón para los diferentes números de F_{rd} y Re . La Figura 5.1 muestra los campos obtenidos para el ensayo C07.

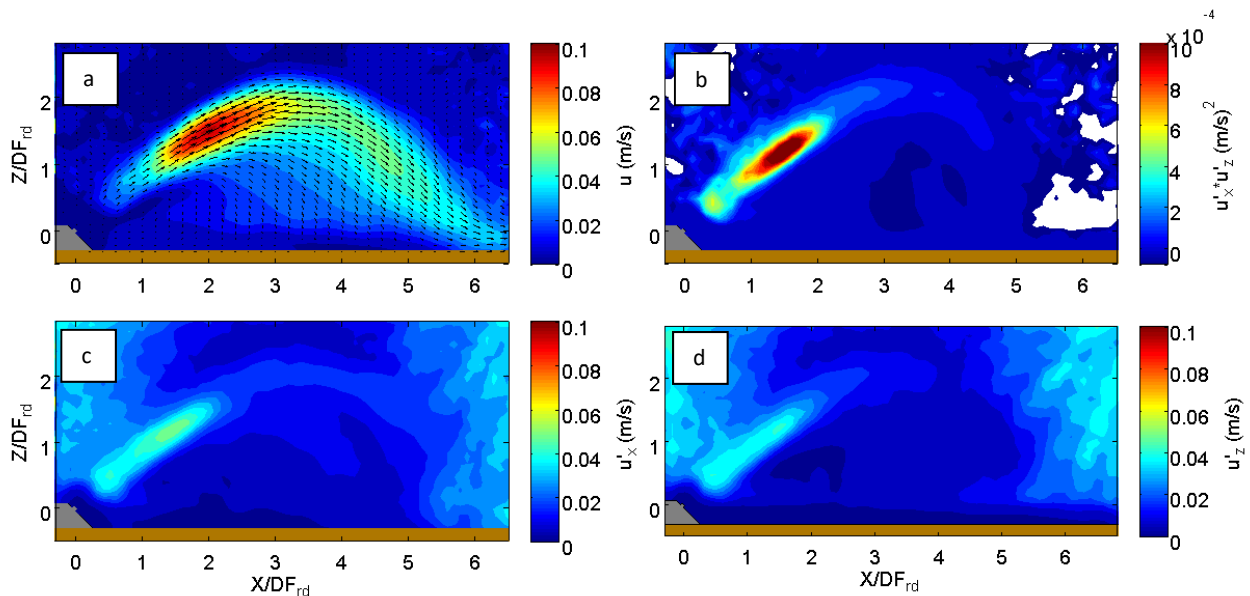


Figura 5.1 Campos vectoriales para ensayo C07 (45° , medio estacionario, Tipo I). Velocidad media (a), tensiones Reynolds (b), fluctuaciones de la velocidad horizontal (c) y fluctuaciones de la velocidad vertical (d)

Como se puede ver en la Figura 5.1a, el campo de velocidades medias muestra una zona de menor intensidad en las proximidades del difusor. Este efecto, que ya se ha descrito en los capítulos anteriores, se debe a las limitaciones de escala impuesta por la técnica de medida del vertido (PIV). Se observa como una vez alcanzada la cota máxima del chorro (Z_{me}), el vertido precipita sobre el fondo a una velocidad más constante, para luego frenar bruscamente en el punto de impacto (X_i).

No obstante, tanto las fluctuaciones en x e z , como el producto de ambas, muestran una zona de ruido en los extremos de la imagen, consecuencia del compromiso que se debe aceptar entre escala de trabajo y la limitación de la ventana de interrogación. Es decir, dado que la distancia de estudio es de aproximadamente 60 cm de longitud, y a que los vertidos Tipo I se dan en medios receptores estacionarios, es muy difícil captar los pequeños movimientos que tienen lugar en esta zona. Gran parte de este problema se debe a que la potencia del haz láser decae en estos extremos de la ventana, provocando que no se obtengan medidas de buena calidad en los límites del campo de visión.

Como se puede apreciar en las imágenes c y d, las fluctuaciones en la zona próxima al fondo son en su mayor parte horizontales, ya que no hay mezcla vertical del flujo en la zona inferior del vertido. Por otro lado, en la zona superior del vertido las fluctuaciones de las componentes de la velocidad son similares.

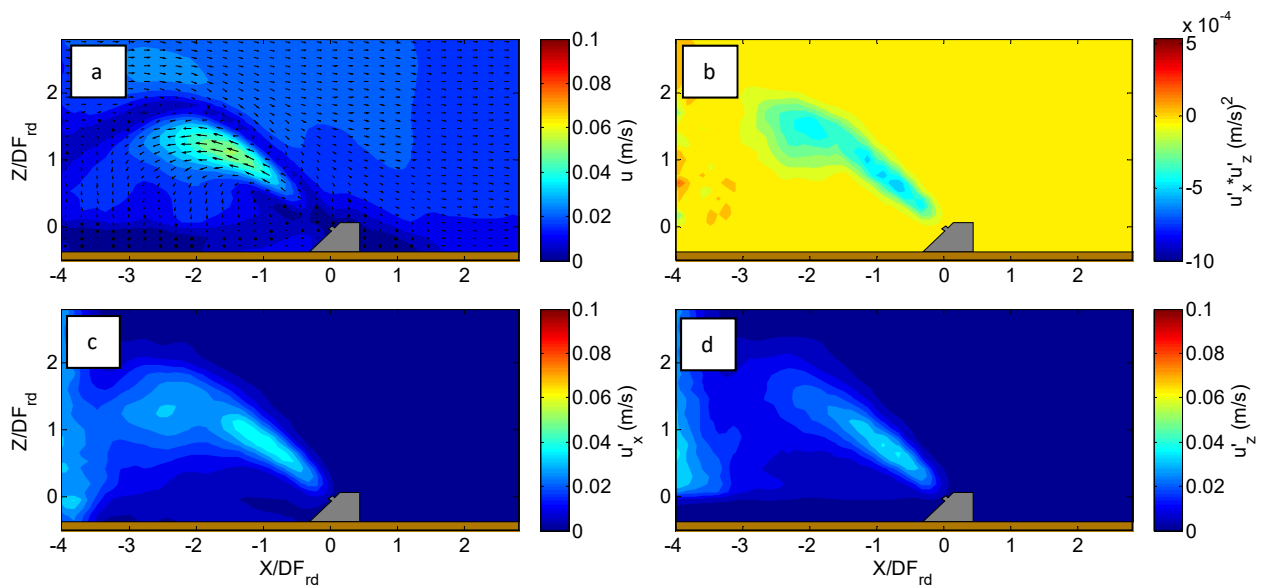


Figura 5.2. Campos vectoriales para ensayo C20 (135° , medio dinámico counter-flow, $v=0.015$ m/s, Tipo III). Velocidad media (a), tensiones Reynolds (b), fluctuaciones de la velocidad horizontal (c) y fluctuaciones de la velocidad vertical (d)

Los campos correspondientes a un vertido Tipo III (C20) aparecen mostrados en la Figura 5.2, donde se observa el campo vectorial para un vertido en counter-flow y sin inversión del vertido. Se puede apreciar que existe un flujo bicapa en las zonas superior e inferior del vertido, marcado por un área de velocidades mínimas. Del mismo modo, las tensiones de Reynolds son negativas en el cuerpo del chorro, dado que en este caso el sentido de la componente horizontal de la velocidad es negativo. A diferencia del ensayo C07, en este vertido no se aprecia el ruido en la zona final de la imagen, que sí es apreciable aguas arriba del vertido.

En la Figura 5.3 se muestra el vertido del ensayo C39, co-flow en dinámico, en el que se vuelven a apreciar los errores de medida en los extremos del campo de visión, sobre todo aguas abajo del difusor. La Figura 5.3b muestra las tensiones de Reynolds y un máximo en el eje del vertido. Las componentes verticales y horizontales son positivos en ambos casos, y predomina la componente horizontal.

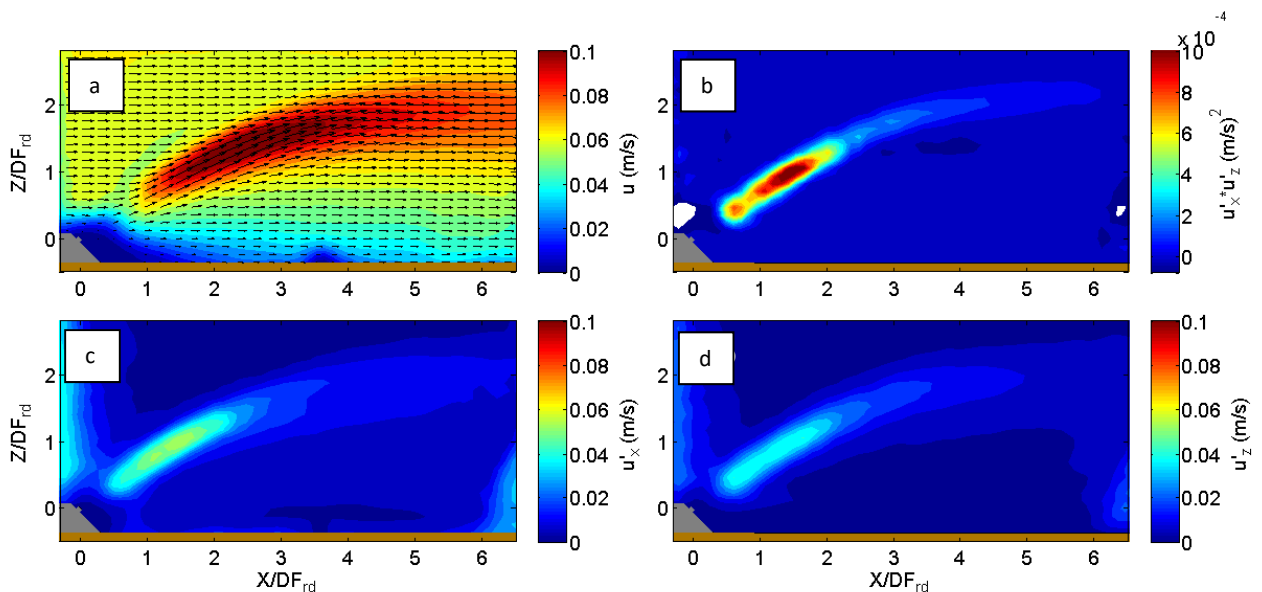


Figura 5.3. Campos vectoriales para ensayo C39 (45° , medio dinámico co-flow, $v=0.05$ m/s, Tipo IV). Velocidad media (A), tensiones Reynolds (B), fluctuaciones de la velocidad horizontal (C) y fluctuaciones de la velocidad vertical (D)

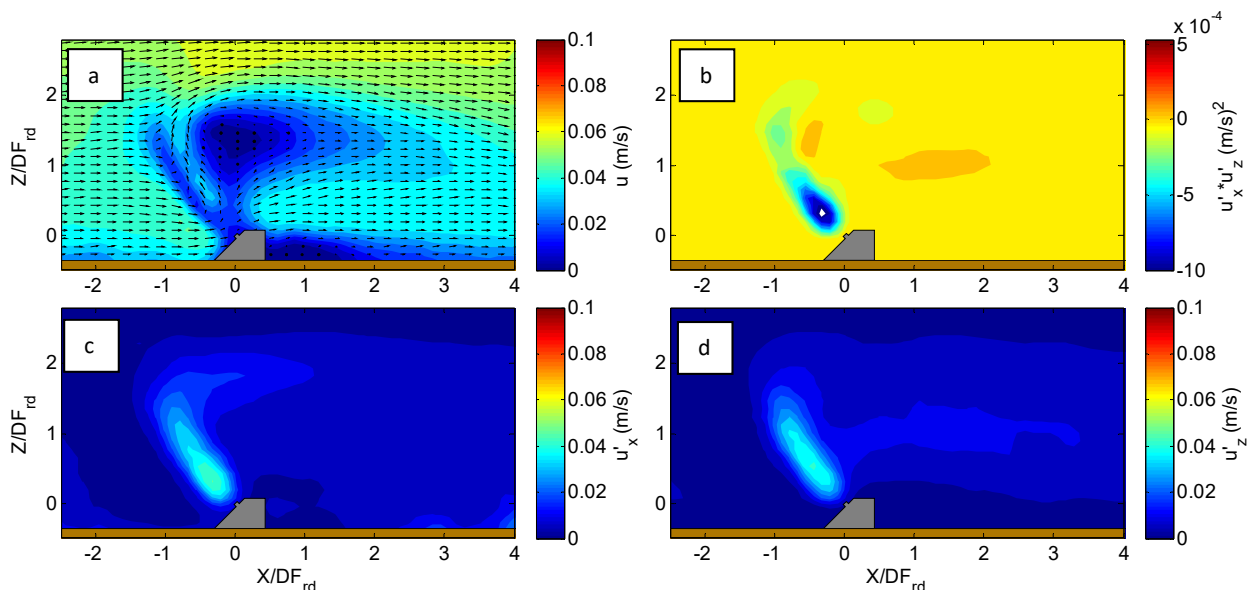


Figura 5.4. Campos vectoriales para ensayo C40 (135° , medio dinámico counter-flow, $v=0.05$ m/s, Tipo V). Velocidad media (A), tensiones Reynolds (B), fluctuaciones de la velocidad horizontal (C) y fluctuaciones de la velocidad vertical (D)

Por último, se presenta un ensayo tipo V en el que se aprecia un vertido en counter-flow con inversión del vertido en medio dinámico (Figura 5.4). Al igual que los chorros del tipo III, las tensiones de Reynolds en el eje del vertido son negativas hasta la cota máxima del eje (Z_m). En este caso, la componente principal del flujo es vertical al inicio del mismo y después de la inversión del vertido, la hidrodinámica del medio hace que la componente principal sea la horizontal, adquiriendo un comportamiento similar al de los vertidos en medio dinámico co-flow, tipo V.

Una vez presentados los patrones de las estructuras hidrodinámicas para los tipos de ensayo más característicos de la batería de ensayos, se proceden a describir brevemente los procesos de mezcla a través de las vorticidades. Por ello, se presentan los mismos ensayos descritos hasta el momento, para los cuales se muestran los campos de vorticidades junto con los campos de velocidad horizontal y vertical, adimensionalizados respecto a la velocidad inicial del vertido (u_o). Además, se presenta un instante de cada vertido, para ilustrar las inestabilidades y correlacionar patrones que aparezcan en los campos de vorticidad.

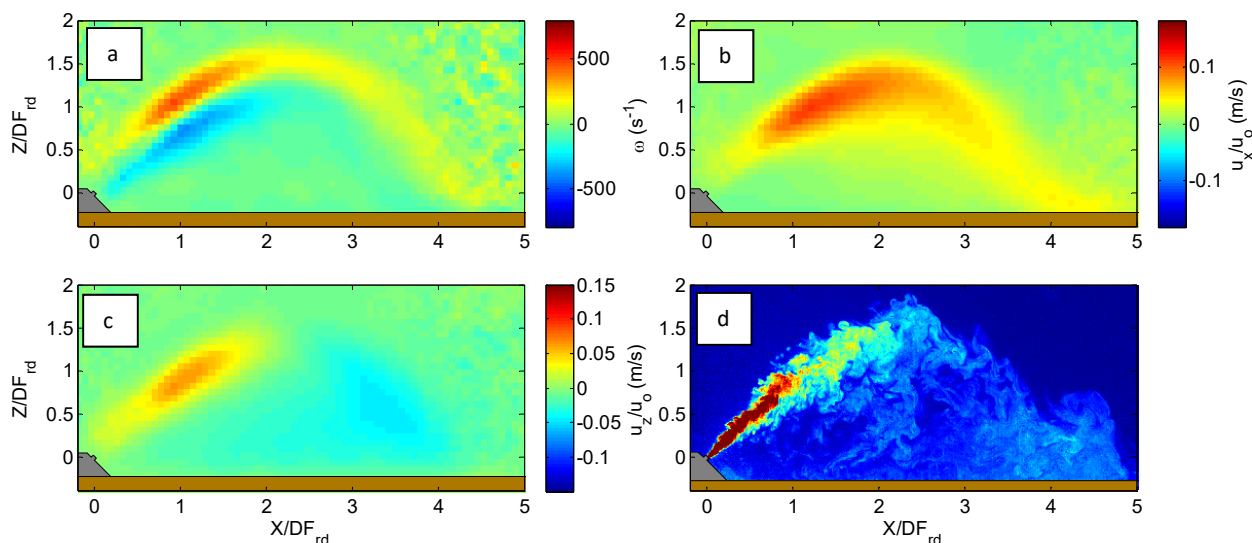


Figura 5.5. Campos escalares para ensayo C07 (45° , medio estacionario, Tipo I). Vorticidades (a), velocidad horizontal adimensionalizada (b), velocidad vertical adimensionalizada (c) y vertido instantáneo (d)

Como muestra la Figura 5.5 las vorticidades (panel a) en los extremos del campo de visión, muestran ruido similar a los campos de fluctuaciones mostrados en las Figuras 5.1 a 5.4. En la zona inferior del vertido se observan vorticidades negativas (sentido horario), y positivas en la zona superior del vertido (sentido anti horario). Este patrón se repite para todos los vertidos ensayados cuyo medio receptor es estacionario ($u_r F_{rd}=0$). Se puede observar que la caída de vorticidades es más acusada en la parte inferior de la pluma, mientras que la parte superior experimenta una caída más progresiva hasta el punto de impacto (X_i), en coherencia con las velocidades verticales.

Por otro lado, el campo horizontal de velocidades aumenta desde el punto máximo del chorro (Z_{me}) hasta X_i . Este incremento de la velocidad es el resultado de la caída de la salmuera sobre el fondo (pluma del vertido), por efecto de la flotabilidad negativa de la salmuera. Además, se puede apreciar que la velocidad vertical (panel c) experimenta el cambio de sentido en el mismo punto de cota máxima del vertido (Z_{me}). Se destaca también la formación de campos de velocidad negativa a poca distancia del difusor, efecto inducido por la caída de vorticidades sobre el fondo del medio receptor, como evidencia el instante mostrado en el panel d.

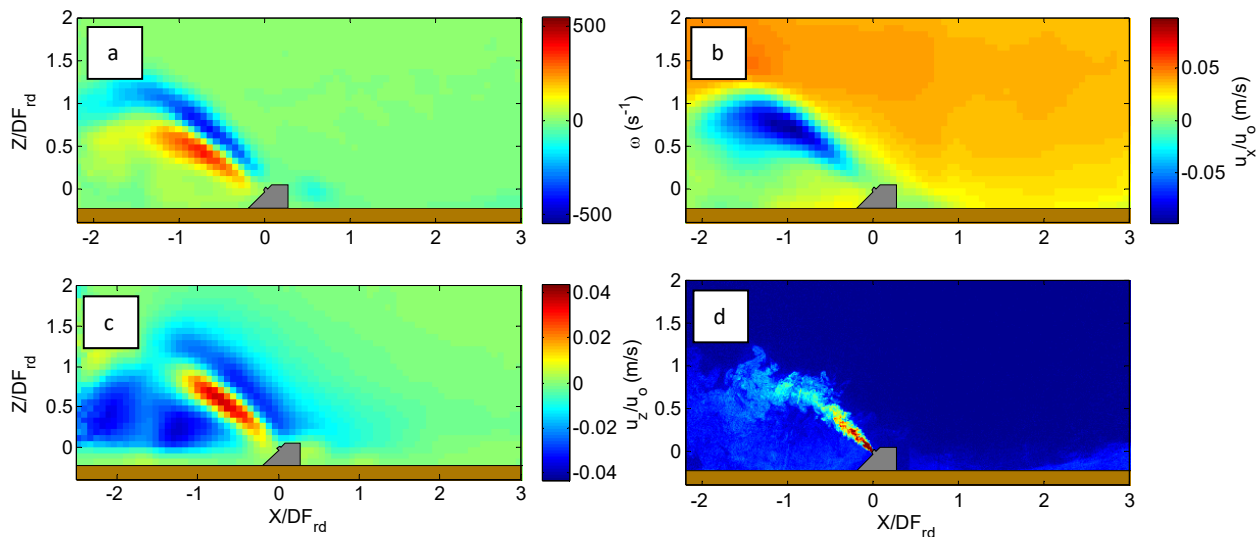


Figura 5.6. Campos escalares para ensayo C20 (135° , counter-flow, $v=0.015$ m/s, Tipo III). Vorticidades (a), velocidad horizontal adimensionalizada (b), velocidad vertical adimensionalizada (c) y vertido instantáneo (d)

Para el ensayo mostrado en la Figura 5.6, dado que la configuración del vertido es del tipo II (counter-flow, sin inversión del vertido), el panel a muestra un sentido de la vorticidad horaria en la parte superior del chorro, y anti horario en la inferior, contrario al patrón encontrado en los ensayos tipo I. Por otro lado, vuelven a encontrarse desprendimientos de vorticidades en la parte inferior de la pluma, del mismo modo que en el caso de descargas tipo I.

En el panel b se muestran los campos de velocidades horizontales que, como eran de esperar, son negativos en el chorro y positivos en el medio receptor. El panel c muestra el campo vertical de la velocidad, y se puede apreciar el cambio de sentido alrededor del eje del vertido. En este caso, debido a la presencia del difusor, la componente principal del flujo en las proximidades del fondo es horizontal, y no se aprecian velocidades verticales en esta zona.

Para analizar los fenómenos de vorticidad en un medio receptor con una fuerte influencia hidrodinámica, se presentan a continuación los campos obtenidos para los ensayos, C39 y C40 (tipos IV y V respectivamente)

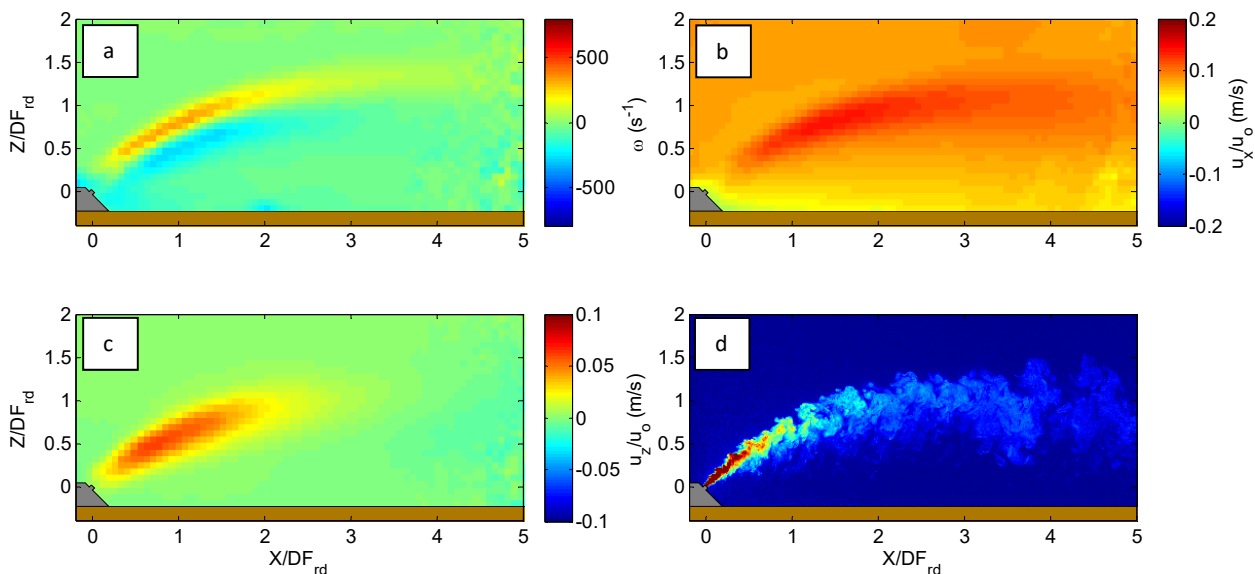


Figura 5.7. Campos escalares para ensayo C39 (45°, co-flow, $v=0.05$ m/s, Tipo IV). Vorticidades (a), velocidad horizontal adimensionalizada (b), velocidad vertical adimensionalizada (c) y vertido instantáneo (d)

La Figura 5.7 muestra un vertido en co-flow en un ambiente receptor dinámico con una velocidad elevada. Se puede observar como el patrón de vorticidades es el mismo que en descargas tipo I. No obstante, en este caso no se aprecian desprendimientos de vorticidades en la zona inferior del flujo hipersalino, debido al arrastre de la salmuera por la corriente. Por otro lado, las velocidades verticales casi no tienen peso en el flujo, salvo en las fases iniciales del chorro.

En este caso el patrón del comportamiento del vertido es similar al observado en los ensayos tipo I, dado que la mayor diferencia es la velocidad del medio receptor. Como se observa en el panel d, las caídas de masa corresponden a los escasos desprendimientos de vorticidades que se observan en el panel a.

En la Figura 5.8, correspondiente a un vertido en counter-flow, se pueden apreciar caídas de vórtices, tal y como muestra el panel a. En este caso estos desprendimientos son menores que los observados en el ensayo tipo III, también counter-flow. El comportamiento de estos vertidos es el más complejo que se han encontrado en los ensayos realizados, con diferencias significativas respecto al mismo caso en medio estacionario.

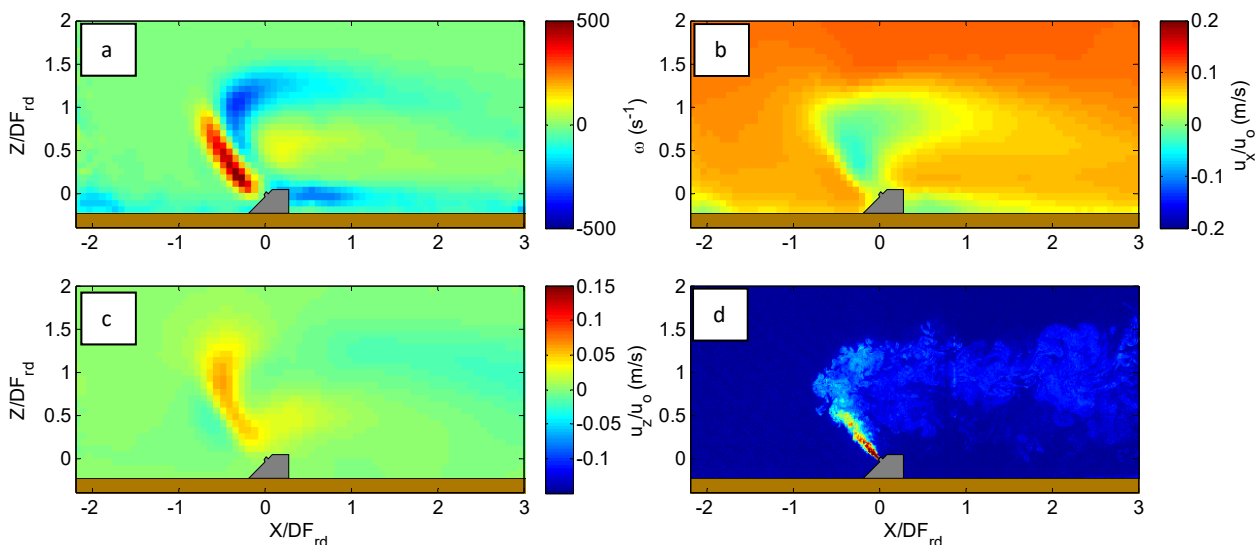


Figura 5.8. Campos escalares para ensayo C40 (135°, counter-flow, $v=0.05$ m/s, Tipo V). Vorticidades (a), velocidad horizontal adimensionalizada (b), velocidad vertical adimensionalizada (c) y vertido instantáneo (d)

Las vorticidades registradas presentan 3 zonas bien diferenciadas en el entorno del vertido. Primero se produce una zona de vorticidad en sentido horario, y que corresponde con el descenso del flujo presentado en el panel c. En la zona en la que se produce la inversión del chorro, la vorticidad es negativa, ya que se produce el giro del flujo. Por último, se aprecia una zona de vorticidades positivas que corresponden a los desprendimientos de vórtices en la parte inferior del vertido.

Los campos de velocidad horizontal muestran una zona en torno a $X/DF_{rd} \approx 0.75$, en el que el sentido es negativo. Una vez alcanzado la cota máxima del vertido (Z_{me}) la velocidad es positiva aunque el aumento de la velocidad sea progresivo. Un fenómeno destacable es la aceleración que sufre la corriente en la zona superior del flujo (panel b), al estrecharse la sección de paso debido a la presencia de la salmuera. Por otro lado, la velocidad vertical experimenta dos cambios en la zona inicial del chorro. En primer lugar, se produce un frenado y una recirculación de la salmuera en sentido descendente. A continuación, el vertido se eleva de forma continuada hasta la cota máxima alcanzada por el efluente (Z_{me}) para después frenarse por completo. Por otro lado, debido a la barrera que representa el chorro inicial, se observa un descenso en la parte posterior del vertido.

Por último, se resalta que para vertidos tipo V se puede observar cómo se produce un desprendimiento de masa aguas abajo de la inversión del chorro. No obstante, no se aprecia salmuera que precipite sobre el fondo del medio receptor, y dado que el difusor genera una zona de sombra, las vorticidades que se observan en el panel a son de signo negativo.

A modo de resumen se presenta una descripción de los principales patrones hidrodinámicos observados en la campaña experimental de campo cercano.

- Los campos vectoriales presentan un alto grado de sensibilidad a las fluctuaciones inducidas por el medio receptor. De este modo los vertidos tipo I, y IV tienden a disminuir la velocidad hasta el punto de cota máxima (Z_{me}), para a continuación volver a incrementar la velocidad en la caída del flujo hiperdenso. Las diferencias apreciadas dentro de estas 2 tipologías se basan en la velocidad de la corriente del medio. Por otro lado, las tipologías III y V presentan una capa de velocidades nulas que rodea al vertido, que marcan la zona de mezcla entre vertido y medio receptor. Es reseñable que los vertidos tipo III presentan velocidades en el inicio del chorro mucho más pequeñas que las registradas en ensayos similares, con descargas en co-flow.
- Las tensiones de Reynolds (panel b, Figuras 5.1-5.5) tienden a ser máximas (en valor absoluto) en el eje del vertido, tanto en vertidos co-flow como counter-flow. Sin embargo, el signo de las tensiones de Reynolds en vertidos tipo III y V son negativas, ya que el sentido de la corriente del medio receptor es contraria a la del vertido.
- Las vorticidades presentadas (panel a, Figuras 5.6-5.8) muestran patrones claros de rotación dependiendo del sentido de descarga. Para vertidos tipo I y IV, se aprecian rotacionales positivos en la parte superior del vertido, y negativos en la parte inferior. Para vertidos tipo III, el patrón es el contrario, con vorticidades negativas en la parte superior, y positivas en la parte inferior. Para vertidos tipo V las vorticidades experimentan un cambio brusco de sentidos, justo donde el chorro se invierte (Z_{me}).
- Los campos de velocidades horizontal y vertical (paneles b y c) muestran las componentes principales del vertido según sea la tipología descarga. Para vertidos co-flow (tipos II y IV), la velocidad horizontal es la que más peso tiene en el flujo. Sin embargo, para vertidos counter-flow (tipos III y V) la componente principal del flujo es la vertical.
- Por último, tras el análisis en detalle de los campos de vorticidades, se puede establecer que los vórtices en la parte inferior del vertido corresponden con los desprendimientos de masa, los cuales se pueden observar en las imágenes instantáneas que se presentan en el panel d. Este

proceso de desprendimiento se mitiga para vertidos en medio dinámico. Además mayor velocidad ($u_r F_{rd} \gg$) menor caída de vórtices, lo que implica menor dilución.

5.2.2 Campos de diluciones

Los campos presentados en este apartado representan las diluciones obtenidas tras aplicar el cociente C_0/C , siguiendo la metodología de otros estudio, como por ejemplo Shao y Law (2010) o Palomar (2014). Dada la naturaleza del campo presentado, las zonas en las que no hay salmuera provocan que el cociente tienda a infinito, y por este motivo el campo se ha limitado a un rango de trabajo de 0 a 100 unidades. Los campos mostrados se han obtenido mediante un promediado simple de las imágenes instantáneas obtenidas mediante la técnica LIF. Tal y como muestra la Figura 5.9, la imagen promediada elimina las inestabilidades y fluctuaciones de la concentración del vertido instantáneo. La expresión aplicada para la obtención de la imagen promediada es mostrada en la Ecuación 5.6.

$$C = \frac{1}{N} \sum_i^n C_i \quad [5.6]$$

Donde c_i es la concentración instantánea y N es el número total de imágenes. Una vez promediadas las imágenes se efectúa el cociente $S=C_0/C$, donde C_0 es la dilución inicial del vertido.

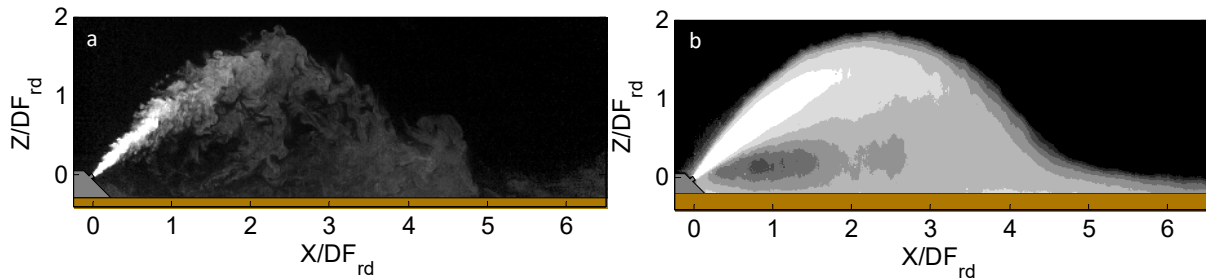


Figura 5.9. Vertido instantáneo (a) y promediado (b) de un campo de concentraciones

Para estudiar la evolución del chorro y la pluma en campo cercano, se presentan a continuación los campos de dilución para los ensayos de referencia (C07, C20, C39 y C40), correspondientes a los tipos I, III, IV y V, respectivamente. Además, se muestra superpuesto el eje obtenido para cada ensayo a partir de las concentraciones máximas, o lo que es lo mismo, mínimas diluciones alcanzadas, Figuras 5.10, 5.11, 5.12 y 5.13.

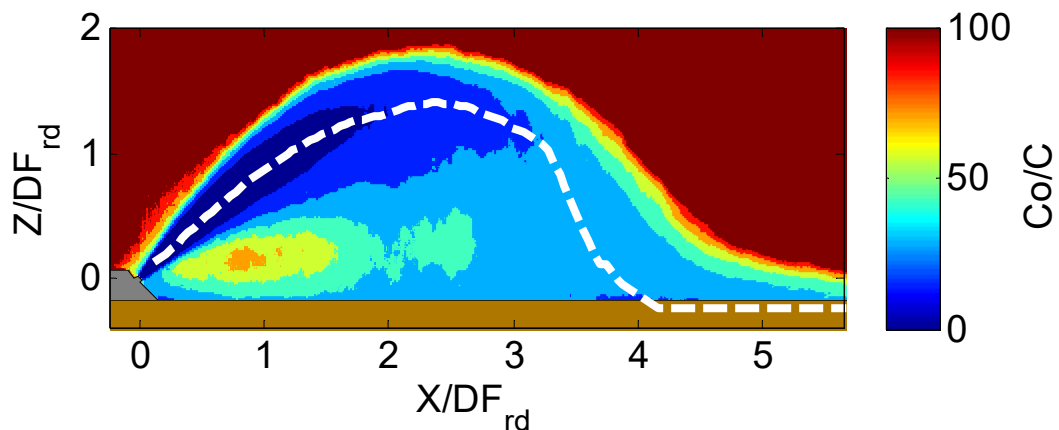


Figura 5.10. Campo de diluciones (S) para ensayo C07 (45° , medio estacionario, Tipo I)

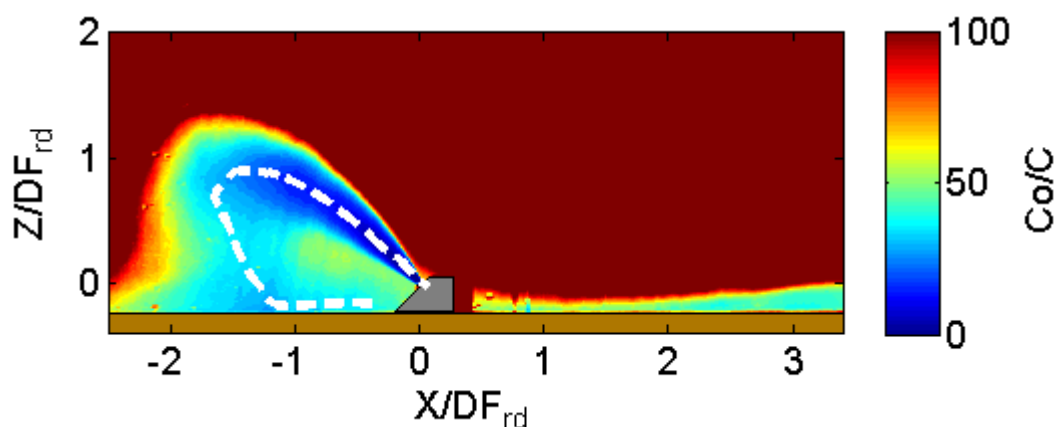


Figura 5.11. Campo de diluciones (S) para ensayo C20 (135° , counter-flow, $v=0.015$ m/s, Tipo III)

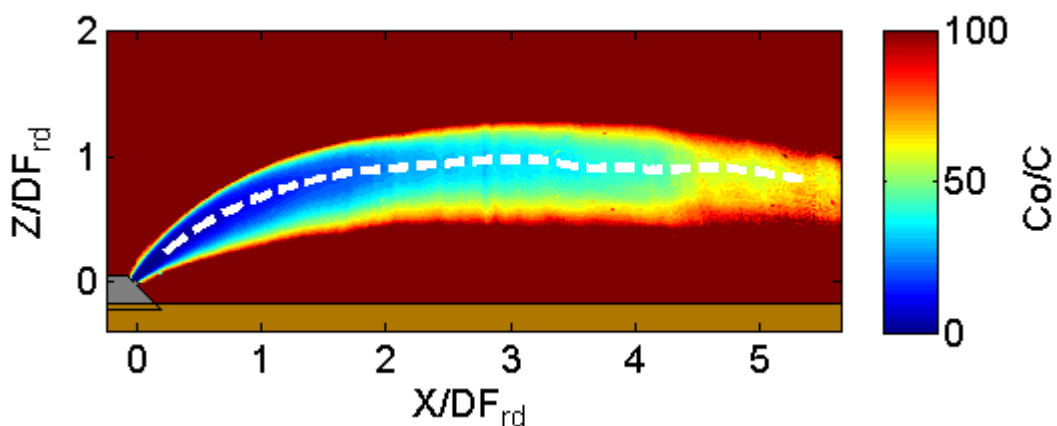


Figura 5.12. Campo de diluciones (S) para ensayo C39 (135° , co-flow, $v=0.05$ m/s, Tipo IV)

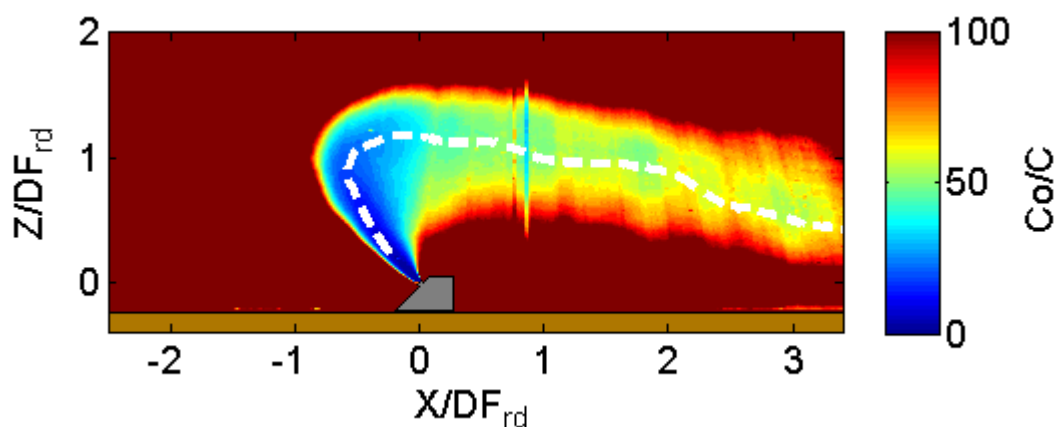


Figura 5.13. Campo de diluciones (S) para ensayo C40 (135° , counter-flow, $v=0.05$ m/s, Tipo V)

Como se puede apreciar, los campos obtenidos muestran cómo el vertido se diluye a medida que avanza a lo largo de la trayectoria. No obstante, se observan diferencias según sea la configuración de descarga o la velocidad del medio receptor. De forma general, los vertidos en medio estacionario presentan las diluciones menores que aquellas en medio dinámico. Como ya se ha comprobado en investigaciones previas (Papakonstantis et al., 2011 o Oliver et al., 2013) las diluciones aumentan conforme aumenta el ángulo de inclinación. Este efecto fue corroborado en este trabajo, y prueba de ello es que con el ángulo $\theta=30^\circ$. La salmuera tiende a pegarse al fondo, (efecto Coanda) minimizando el potencial de dilución.

Por otro lado, los vertidos en medio dinámico se comportan de manera diferente según sea la configuración de salida. Para vertidos tipo II, el comportamiento es similar al tipo I (Figura 5.10), con la

salvedad de que el efluente presenta un punto de impacto (X_i) más alejado. De igual forma, la dilución se incrementa, pero no de forma significativa, dado que la turbulencia inducida por el medio no es elevada. Con el cambio de configuración de descarga (counter-flow) se aumenta la turbulencia del medio, y de esta forma se potencia la dilución del vertido. En este caso la dilución que se alcanza en la zona de impacto es mayor que la que se alcanza en vertidos de tipo I y II.

Un comportamiento observado es que a mayor velocidad, mayor es la distancia a la que se produce el impacto sobre el fondo, e incluso en estos casos no se aprecia impacto ya que la salmuera es arrastrada aguas abajo del difusor (Figura 5.12 y 5.13). Se puede establecer que la dilución alcanzada en la misma posición ($X/DF_{rd}=3$) es del orden de 2 y 3 veces mayor para los vertidos IV y V respectivamente, respecto a la dilución alcanzada por un vertido tipo I.

Las descargas tipo IV y V se comportan de forma diferente entre ellas debido a la configuración de salida. Por un lado, el vertido tipo IV (Figura 5.12) forma una corriente de gravedad o flujo bicapa, que se ve arrastrada por la corriente del medio receptor. Como se puede apreciar no se observa caída del eje del vertido, dado que la ventana de visión es demasiado pequeña para abarcar toda la zona de campo cercano para este ensayo en concreto. Sin embargo para vertidos tipo V, se puede ver como el eje cae progresivamente debido a la ausencia de velocidad horizontal en esta zona Figura 5.4. No obstante se sigue sin apreciar el impacto del vertido sobre el fondo.

Para completar el análisis longitudinal del vertido, se presentan a continuación la evolución de las principales variables del flujo hiperdenso respecto a los cambios en el medio receptor. Como se muestra a continuación, se ha seguido el esquema de presentación desarrollado por Gungor y Roberts (2009), evaluando el comportamiento de la cota máxima del vertido (Z_{me}) y la dilución en el punto de cota máxima del eje (S_m). La Figura 5.14 muestra la evolución de Z_{me} para el ángulo de descarga 30° , tanto para el vertidos co-flow como para counter-flow ($180^\circ-30^\circ=150^\circ$), para las 3 velocidades ensayadas.

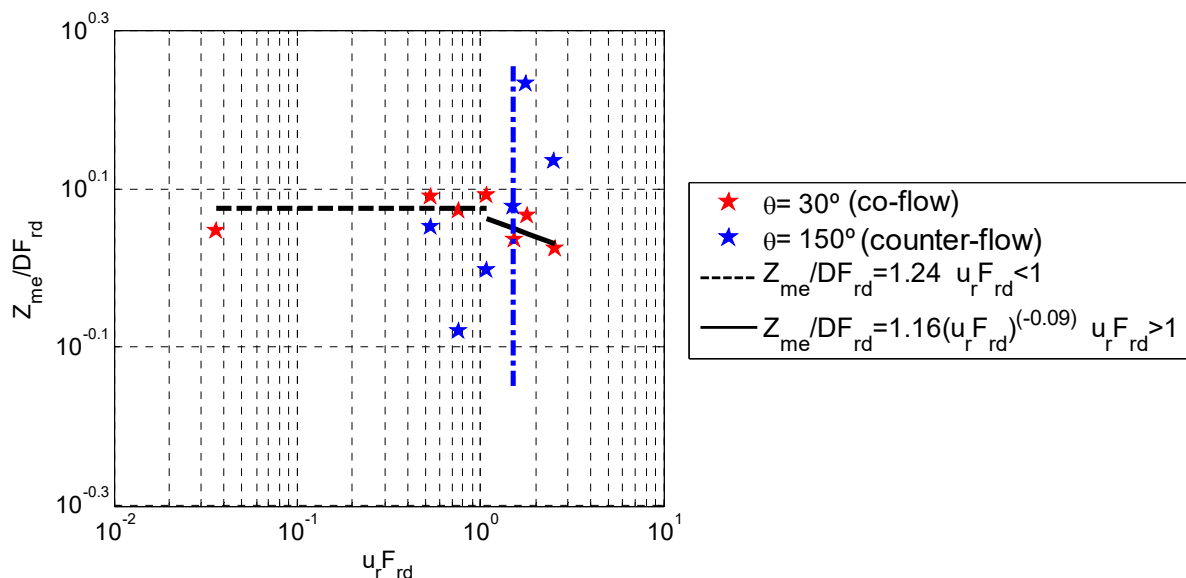


Figura 5.14. Evolución de la cota máxima alcanzada por el vertido (Z_{me}) para $\theta=30^\circ$, en co-flow (rojo) y counter-flow (azul)

En primer lugar se comprueba que los resultados de co-flow (en color rojo) y los obtenidos en ensayos counter-flow (en color azul) no siguen el mismo comportamiento. Claramente, los vertidos en co-flow presentan dos tendencias bien diferenciadas, que se han representado mediante dos curvas de ajuste. Estas dos zonas diferencian entre ensayos cuyo comportamiento sigue el mismo patrón que los vertidos en medio estacionario, y aquellos en los que la velocidad del medio ($u_r F_{rd}$) afecta al comportamiento del vertido.

Por otro lado, la línea vertical azul representa la velocidad del medio en la que se produce el cambio de comportamiento de los vertidos counter-flow entre vertidos con y sin inversión. Como se puede apreciar la evolución de Z_{me} muestra un decrecimiento, acorde a vertidos en los que no existe inversión, pero se ven frenados a medida que aumenta la velocidad del medio. Sin embargo, llega un momento ($u_r F_{rd}=1.05$) en el que el vertido se invierte completamente, y por efecto de la velocidad el comportamiento del flujo hiperdenso es similar al de un vertido en co-flow, de modo que a medida que aumenta la velocidad disminuye la cota máxima del vertido.

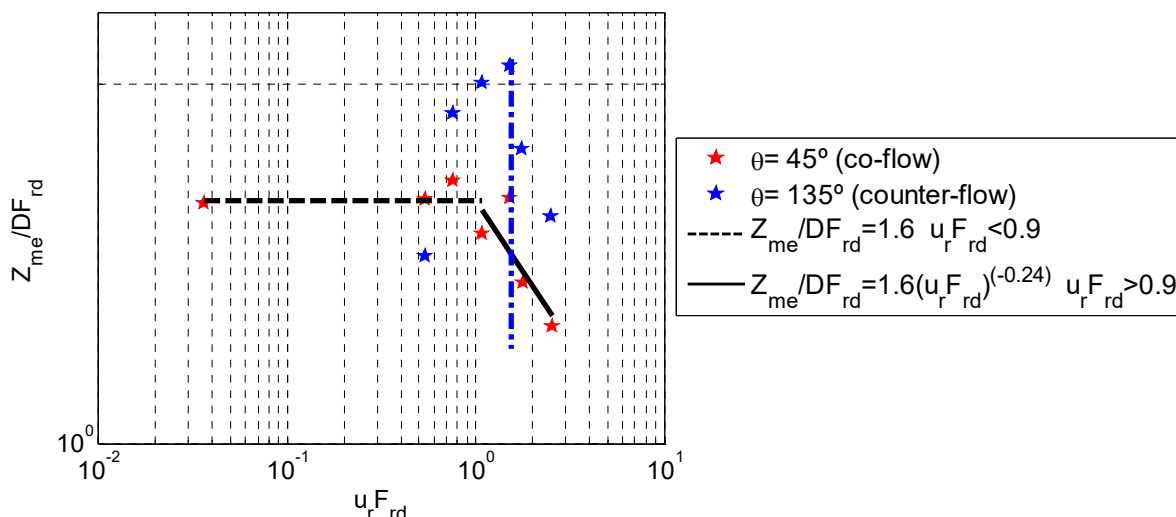


Figura 5.15. Evolución de la cota máxima alcanzada por el vertido (Z_{me}) para $\theta=45^\circ$, en co-flow (rojo) y counter-flow (azul)

La Figura 5.15 muestra la evolución de la cota máxima del vertido para un ángulo de descarga inicial de 45° en un medio dinámico. Al igual que el caso anterior (30°) se presentan los resultados para vertidos en co-flow y counter-flow, diferenciando además el punto en el que los vertidos en counter-flow cambian de comportamiento. De forma breve se hace destacar que el punto en el que los vertidos en co-flow son alterados por el medio receptor, se produce para $u_r F_{rd}=0.9$ (aproximadamente). De igual forma, el punto en el que se produce la inversión de los vertidos en counter-flow se da para $u_r F_{rd}=1.1$, o momento en el que se aprecia un aumento de la cota máxima hasta que el vertido es arrastrado aguas abajo (máximo valor de Z_{me}), pegándose al fondo a medida que aumenta la velocidad del medio.

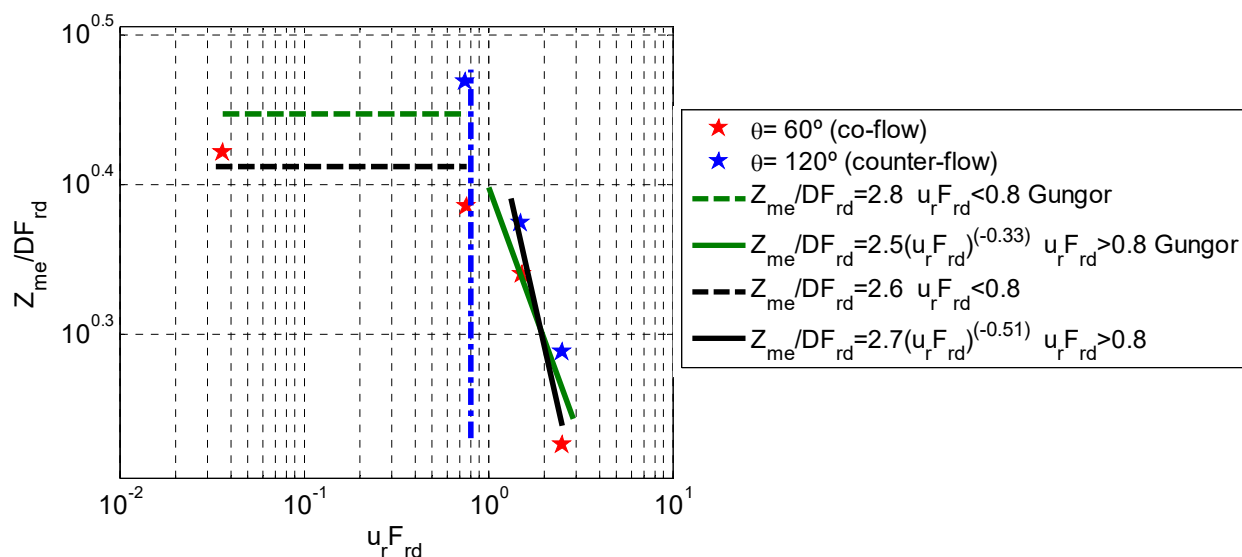


Figura 5.16. Evolución de la cota máxima alcanzada por el vertido (Z_{me}) para $\theta=60^\circ$, en co-flow (rojo) y counter-flow (azul)

Por último, se presenta la evolución de un vertido con 60° de inclinación. En este caso los resultados obtenidos han sido contrastados con los presentados por Gungor y Roberts (2009), obteniéndose un buen ajuste con las tendencias propuestas por el mismo autor. Según en el desarrollo propuesto, el límite entre vertidos sensibles a la hidrodinámica del medio es de 0.8, valor que corresponde con el obtenido y que representa el punto a partir del cual el medio influye de forma notable sobre el vertido. Como se puede comprobar, en este tipo de descargas la afección de la hidrodinámica del medio, por pequeña que sea, ejerce una gran influencia sobre el chorro hiperdensos decreciendo la cota máxima del vertido. Del mismo modo, y debido a la gran afección del medio, se observa como la inversión del efluente se produce para la velocidad más baja $u_r F_{rd}=0.7$.

Para representar los distintos comportamientos de los flujos hiperdensos, se presenta un gráfica en la que se observan las diluciones en la cota máxima del eje del vertido (S_m), para las distintas velocidades y configuraciones de descarga de cada ángulo ensayado (Figura 5.17). El objetivo es comprobar la evolución de S_m con dichos parámetros geométricos y ambientales. Se analizan en primer lugar la evolución de la dilución en el punto de cota máxima del eje (S_m) para los tres ángulos ensayados, tanto para la configuración de descarga co-flow (30° , 45° y 60°), como para la descarga en counter-flow correspondiente (150° , 135° y 120°). Como conclusión preliminar se puede establecer que, las tendencias de ajuste propuestas en esta tesis doctoral tienen una mayor variación cuanto mayor es el ángulo de vertido.

Por otro lado, a fin de contrastar los valores obtenidos en ambos sentidos de descarga, se presentan por separado los resultados de cada uno de los ángulos ensayados. De este modo, los ensayos con $\theta=30^\circ$ presentan una tendencia de ajuste claramente creciente para los vertido en co-flow. No obstante, para vertidos en counter-flow la evolución muestra una depresión para medios receptores con velocidades intermedias ($0.7 < u_r F_{rd} < 1.1$). En este intervalo el chorro inicial pierde fuerza por la presencia del medio receptor, hasta que el vertido invierte su sentido de avance. Por lo tanto, la dilución alcanzada en la cota máxima del eje decrece hasta la dicha inversión donde el chorro pierde desarrollo y por tanto la dilución alcanzada es mínima. Una vez que se produce la inversión la dilución vuelve a incrementarse.

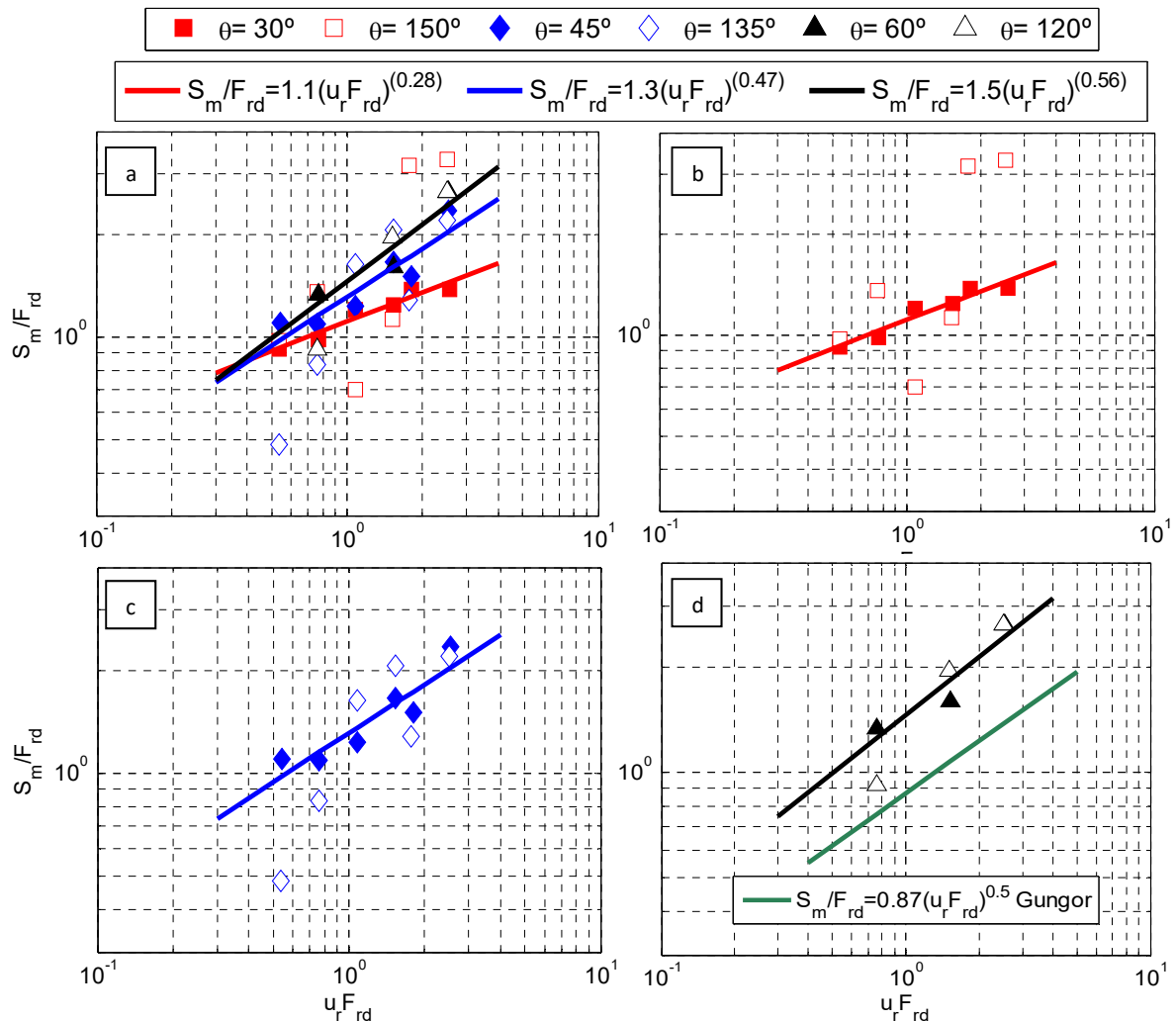


Figura 5.17. Evolución de la dilución en la cota máxima del eje para diferentes ángulos de descarga y velocidades del medio receptor. Global (a), $\theta=30^\circ$ y 150° (b), $\theta=45^\circ$ y 135° (c), $\theta=60^\circ$ y 120° (d)

Para ángulos de descarga con $\theta=45^\circ$ el comportamiento de la evolución co-flow es similar a la estudiada en el caso anterior (Figura 5.17C). Sin embargo, en este caso no se aprecia tan claramente la depresión presente justo antes de la inversión del chorro. Aparece una dilución menor en $u_r F_{rd}=1.08$ correspondiente a la velocidad del medio que minimiza el recorrido del chorro, disminuyendo de esta forma la dilución alcanzada. Es de destacar, que, de forma contraria a lo que sucede para vertidos con $\theta=150^\circ$, en este caso ($\theta=135^\circ$) la dilución tiende a converger al valor obtenido para $\theta=45^\circ$.

Por último, la Figura 5.17d muestra las diluciones alcanzadas para vertidos de $\theta=60^\circ$ y $\theta=120^\circ$. En este tipo de ensayos, y como ya se ha demostrado en este capítulo, la salmuera experimenta la inversión para cualquier velocidad del medio debido a la inclinación inicial del chorro. De este modo, los valores obtenidos son similares y tiende a converger hacia la misma expresión propuesta en esta tesis doctoral para la estimación de S_m con inclinaciones de 60° . Se presenta también, la propuesta de Gungor para la estimación de esta variable.

5.3 Secciones transversales

En este apartado se analizan las secciones ortogonales al eje de la trayectoria del vertido en el campo cercano. En concreto, el eje empleado para el análisis ha sido obtenido tras el estudio de los campos de concentraciones (LIF). La localización de las secciones se referencia a través de la longitud a lo largo del eje (L) adimensionalizado respecto al diámetro (D) del difusor. El criterio de selección de las localizaciones ha sido el siguiente; se elige una sección en el punto de cota máxima del vertido (Z_{me}) y se identifican dos

secciones a cada lado de esa sección central. La distancia entre ellas será equidistante, o en su caso, se estudiarán secciones representativas del vertido.

El esquema de presentación de resultados en este apartado seguirá el siguiente esquema en todos los casos. La gráfica superior presenta el vertido estudiado, junto con la posición de las secciones analizadas. A continuación, se presentan las secciones de velocidades y concentraciones para las localizaciones en el eje del vertido (paneles b y c) y, en último lugar, se realiza una comparación gaussiana para velocidades y concentraciones (paneles d y e).

El sistema de coordenadas empleado en este apartado, sigue el siguiente patrón. El sentido de avance del eje determina, según la regla de la mano derecha, la normal a la trayectoria. Por lo tanto, el sentido positivo ($r/b_u > 0$), corresponde con la zona inferior del vertido, para vertidos tipo I, II y IV. Por el contrario el sentido negativo ($r/b_u < 0$) corresponde con la zona superior del chorro. Para vertidos tipo III y V, en el que el sentido de avance de la trayectoria es contrario a las descargas co-flow, el sentido positivo depende de si se ha producido la inversión (tipo V) o no (tipo III), Figura 5.18.

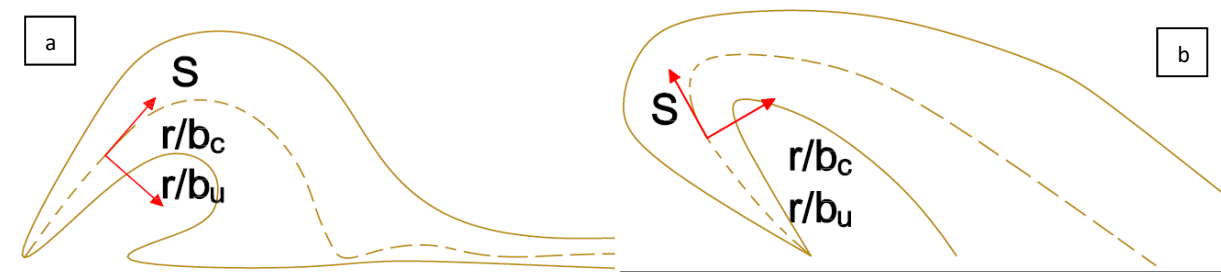


Figura 5.18. Sistema de referencia para vertidos en co-flow, tipos I, II y IV (a) y counter-flow, tipos III y V (b).

El esquema de presentación de resultados es el siguiente; el eje vertical muestra en el panel b la velocidad adimensionalizada respecto a la velocidad inicial de vertido (u_o). Del mismo modo, el panel d muestra una comparación con una campana de Gauss, y adimensionalizando la velocidad con el módulo de la velocidad en el del eje vertido (u_c).

Para las secciones de concentraciones (paneles c y e) se sigue un esquema similar al tomado para las secciones de velocidades. El panel c muestra la sección de concentraciones adimensionalizadas respecto a la concentración inicial (c_o), y, el panel e muestra la sección de la concentración adimensionalizada con la concentración del vertido en el eje de la trayectoria (c_c). Las curvas gaussianas empleadas en este apartado para la comparación con los perfiles obtenidos, son las presentadas en las ecuaciones 5.8 y 5.9 (Jirka, 2004).

$$U = U_c e^{-r^2/b_u^2} \quad [5.7]$$

$$C = C_c e^{-r^2/\lambda b_c^2} \quad [5.8]$$

Donde $\lambda=1.2$ para el ratio de dispersión para un chorro puro.

Para la determinación de los límites superior e inferior del chorro se han aplicado los criterios empleados en trabajos anteriores (Palomar, 2014), los cuales enmarcan la zona representada a partir de un porcentaje de la velocidad o de la concentración en el eje del flujo hipersalino. En concreto, para la determinación de los límites del vertido de las secciones transversales de velocidad y concentración se emplea un valor del 7 % de la velocidad o concentración máxima determinada (Shao y Law, 2010). Para comprobar la autosemejanza de las secciones analizadas, se han ajustado los perfiles de velocidad y concentración a las ecuaciones 5.7 y 5.8. Para determinar el valor del radio b_u y b_c se emplean los valores

del 37% y 37% de las velocidades y concentraciones máximas de cada perfil de velocidades y concentraciones, respectivamente.

5.3.1 Velocidades y diluciones en el eje del vertido

A continuación, se presenta el análisis de las secciones transversales de los ensayos C07, C20, C39 y C40. En primer lugar, se presentan los resultados para el caso C07 (45°, medio estacionario, Tipo I), donde puede comprobarse que los valores máximos de los perfiles se alejan del origen de coordenadas ($r/D=0$). Como se ha explicado en el apartado anterior, este fenómeno se debe a que el eje de velocidades máximas se encuentra desplazado respecto a la trayectoria del vertido (eje de concentraciones máximas). En todos los casos el primer perfil ($L/D=10$) se muestran valores de velocidad más bajos de los esperados. Este fenómeno, es debido a los efectos de escala inducidos por la técnica de medida de velocidades (PIV).

El panel c, de la Figura 5.19, muestra la evolución de los perfiles de concentraciones, y en este caso se puede ver que hay un perfil mucho más acusado que el resto para la posición $L/D=10$, dada la elevada concentración del chorro en este primer perfil, se puede apreciar que el vertido para la posición siguiente ($L/D=40$), empieza a abrirse en la zona inferior del vertido, $r/D>0$.

En el panel d la similitud con la campana de Gauss se mantiene para la zona negativa (parte superior del vertido), con la diferencia de que los perfiles analizados hasta la cota máxima de la trayectoria (Z_m), son mucho más cerrados que los siguientes. Se comprueba, acorde a los resultados obtenidos en investigaciones previas (Palomar et al. 2012), que los perfiles se abren en la zona inferior del vertido, $r/b_c>0$.

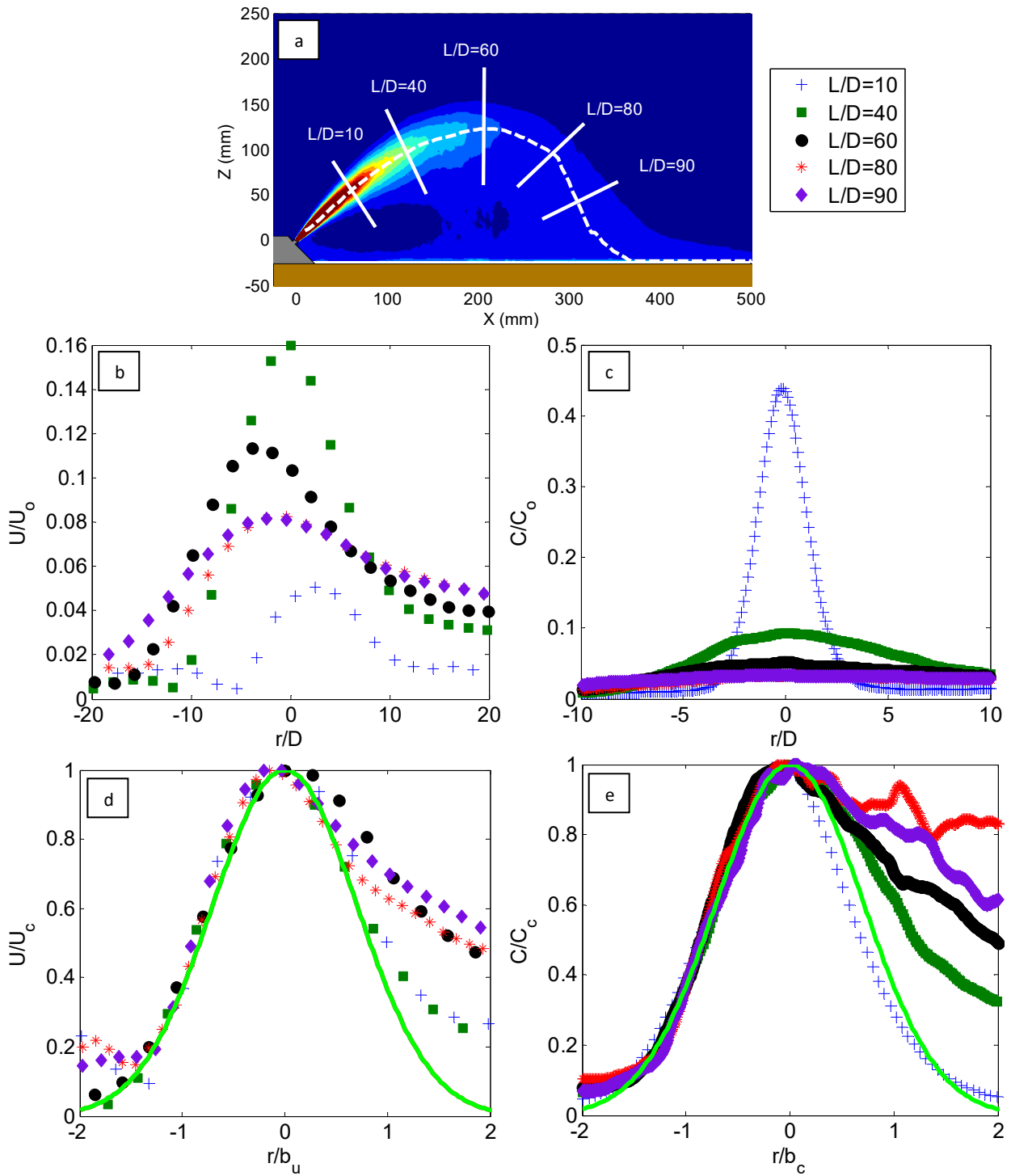


Figura 5.19. Evolución del vertido para ensayo C07 (45°, medio estacionario, Tipo I). Localización de los perfiles (a), velocidad media (b), dilución (c) y comparación con perfil gaussiano (d) y (e)

Por último, las secciones mostradas en el panel e, muestran la misma tendencia observada en el panel d. La hipótesis de Gauss se mantiene para las primeras secciones, mientras que los perfiles siguientes pierden la similitud desde la posición $L/D=60$. Para $r/b_c > 0$ las secciones experimentan una apertura debido a la acumulación de la salmuera en la zona inferior del vertido.

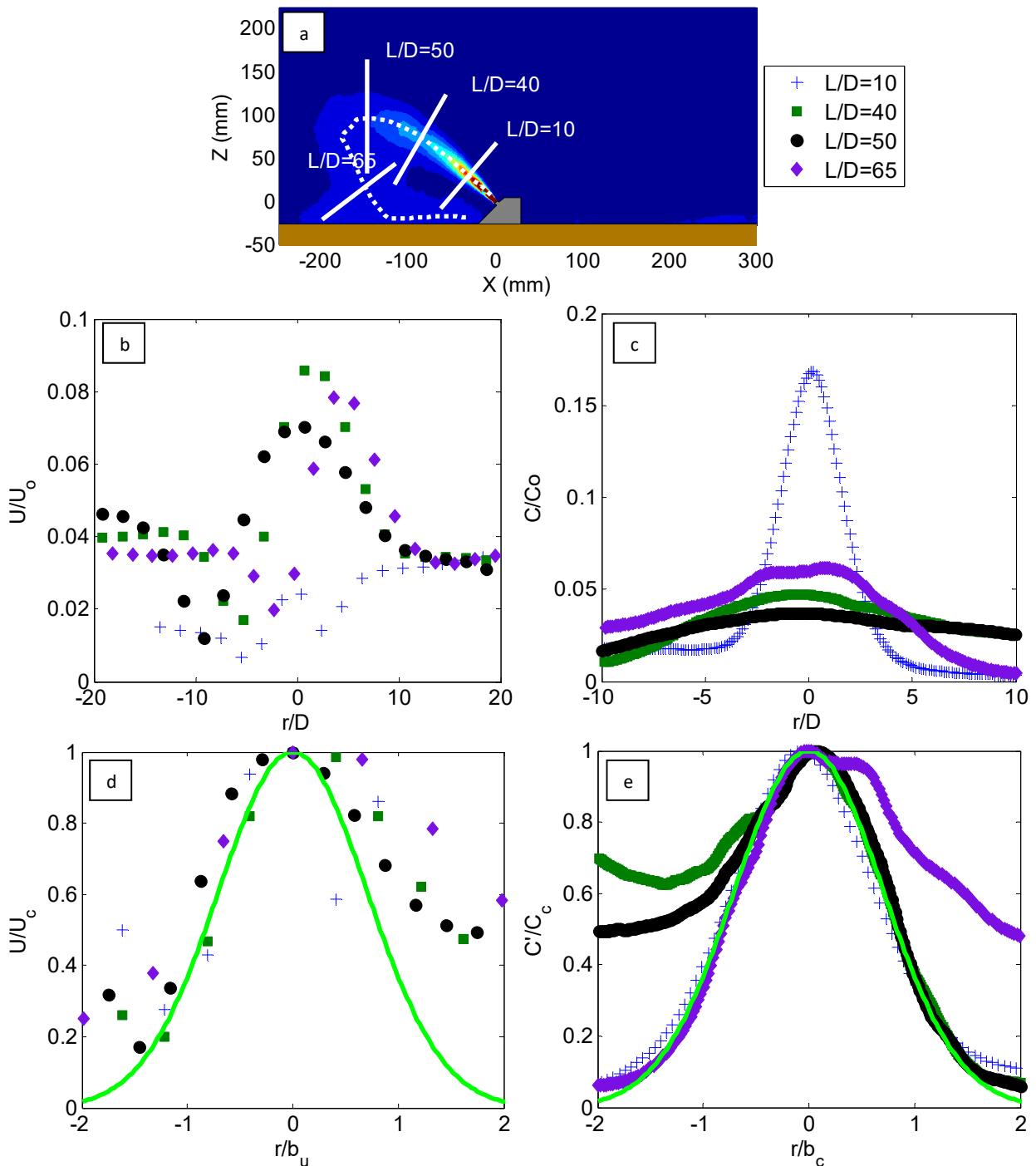


Figura 5.20. Evolución del vertido para ensayo C20 (45° , medio dinámico $v=0.015$ m/s, counter-flow, Tipo III). Localización de los perfiles (a), velocidad media (b), dilución (c) y comparación con perfil gaussiano (d) y (e)

En la Figura 5.20 se presenta la evolución del vertido para el ensayo C20. En primer lugar, se debe señalar que para el vertido en counter-flow (tipo III), la zona positiva del vertido corresponde a la zona superior, de manera contraria a los vertidos de tipo I y IV. En este caso, se puede observar como las secciones de velocidades (panel b) experimentan una zona de velocidades bajas, justo debajo del chorro hasta la sección $L/D=50$. Es de destacar, que las velocidades en los extremos de la sección no tienden a cero, si no que se estabilizan por ambos extremos, debido a la presencia de la corriente del entorno.

El comportamiento de las secciones de concentraciones (panel c), es similar al de los perfiles transversales observados en un vertido en medio estacionario, abriéndose en la zona de acumulación de salmuera. Por

otro lado, las gráficas de velocidades adimensionalizadas (panel d) tienden a converger en los extremos, conservando el principio de autosemejanza de forma similar al de los vertidos tipo I (medio estacionario). Por último, los perfiles adimensionalizados de concentración (panel e) presentan un buen ajuste y de nuevo se muestra una tendencia de apertura en la zona de acumulación. En este caso, el colapso de las secciones sólo se da para las ubicadas en $L/D=40$ y 50 , ya que la última sección ($L/D=65$) tiende a acumular salmuera en la zona positiva.

Los vertidos tipo IV (Figura 5.21) corresponden a un vertido co-flow con velocidad del medio elevada ($u_r F_{rd} > 1.5$). A diferencia del caso anterior, no existe depresión en el perfil de velocidades ya que el vertido se hace en el mismo sentido que la corriente. En primer lugar, las velocidades registradas (panel b) muestran que la diferencia entre la velocidad del medio receptor y el máximo de la velocidad en el vertido es menor cuanto mayor es la velocidad del medio. Por otro lado, las concentraciones (panel c) siguen la misma tendencia que los ensayos anteriores, con un primer perfil mucho más acusado mostrando una tendencia clara de convergencia.

El panel d muestra, al igual que en el anterior caso para $r/b_u > 0$, la convergencia de las secciones tienden a velocidades menores según se aproximan al fondo del medio. El ajuste de las secciones a la curva de Gauss sólo es válido para las velocidades superiores a la del medio receptor, $u/u_c > 78$. Por otro lado, los perfiles tienden a converger en dos grupos, el primero de ellos engloba la primera sección ($L/D=10$), mientras que el segundo grupo engloba las siguientes secciones ($L/D=40, 86$ y 110). Se observan velocidades menores en la parte inferior del vertido, debido al freno que provoca la presencia del chorro aguas arriba de las secciones en cuestión.

En el panel e se muestran las secciones adimensionalizadas de concentraciones, junto con la curva de Gauss. En este caso el ajuste de las curvas es bastante bueno para todas las secciones analizadas, debido a la hidrodinámica del medio que induce un comportamiento simétrico. Las secciones colapsan todas en la misma zona pero en valores diferentes. Se puede apreciar como el efecto de la gravedad provoca que las secciones en la parte inferior se abran progresivamente, debido a la caída de la salmuera.

En la Figura 5.22 se presenta las secciones analizadas para el ensayo C40, tipo V. Dada la naturaleza del vertido, los resultados no siguen la misma tendencia de los ensayos ya descritos. En este caso se puede observar (panel b), que las secciones de velocidad muestran una depresión justo en el eje del vertido para las posiciones iniciales del mismo ($L/D=10$ y 40 respectivamente). Esta depresión es inducida por un frenado brusco en la zona exterior del chorro, que desplaza el flujo de salmuera aguas abajo. Por otra parte, el panel c muestra un comportamiento típico de descarga con concentraciones mayores en el eje del chorro y una acumulación en la parte inferior ($r/D > 0$). Además, debido a la turbulencia del medio, se aprecia como la dilución aumenta mucho entre la primera y la segunda sección.

La comparación de los perfiles de velocidad con una curva gaussiana (panel d), muestran como para la parte exterior de la descarga se produce una desaceleración en la primera sección analizada ($L/D=10$). Para las siguientes curvas se aprecia como la velocidad en la parte superior de la ventana es mucho más elevada, con zonas de velocidad del medio (v) aproximadamente 1.5 y 2 veces mayores que en el chorro (u_c). Es interesante resaltar que las secciones analizadas colapsan en la parte superior del vertido ($r/b_u < 0$), a un valor constante (velocidad del medio receptor).

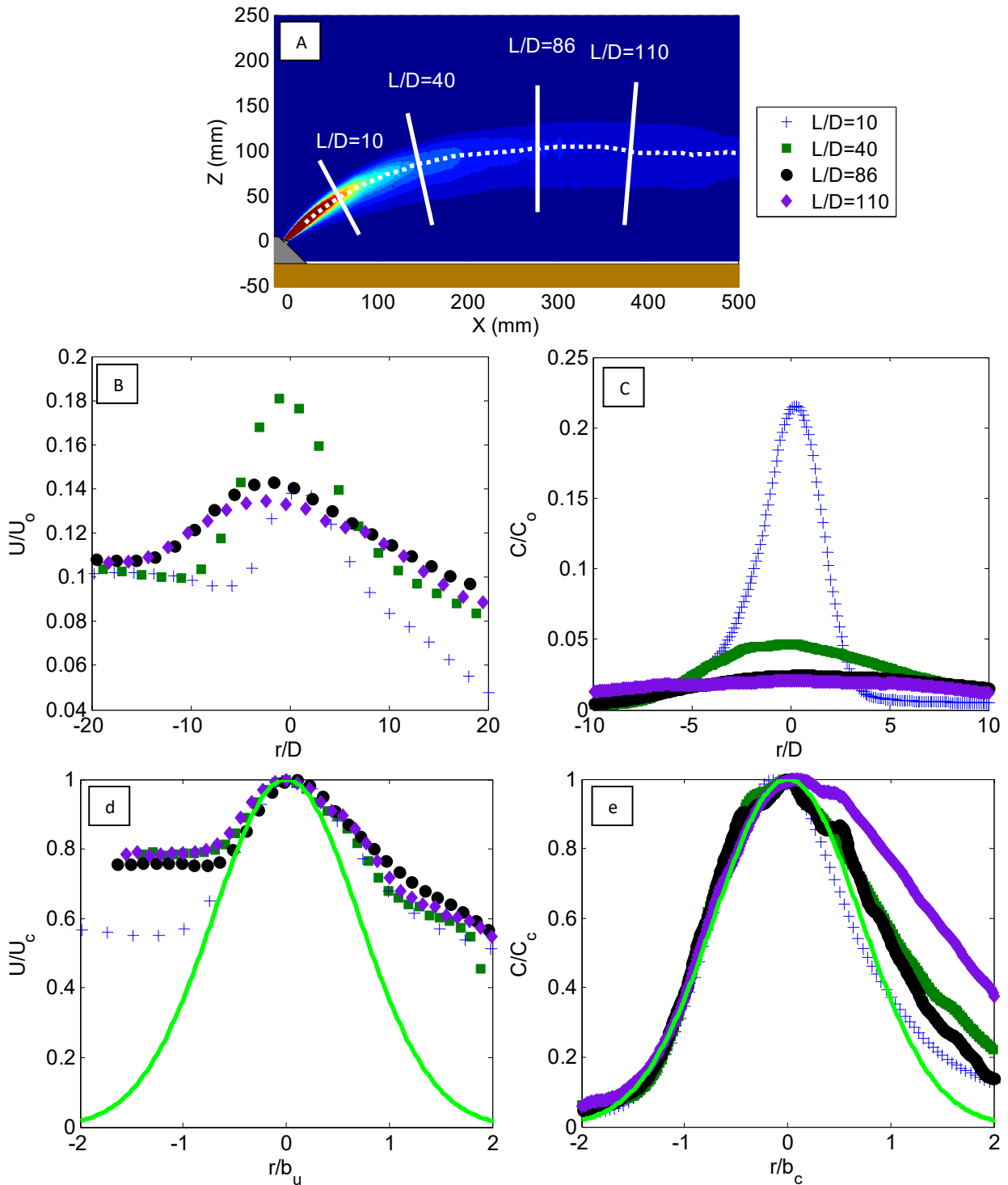


Figura 5.21. Evolución del vertido para ensayo C39 (45° , medio dinámico $v=0.05$ m/s, co-flow, Tipo IV). Localización de los perfiles (a), velocidad media (b), dilución (c) y comparación con perfil gaussiano (d) y (e)

Por último se presentan las comparaciones con las curvas de concentración, en las que se puede apreciar como todas las secciones siguen el mismo patrón, salvo la sección localizada en la posición $L/D=10$. En este caso, la sección sólo ajusta a una curva gaussiana en la parte positiva del vertido dado que se localiza aguas arriba de la inversión del chorro. El resto de las secciones muestran auto semejanza en la parte negativa del vertido.

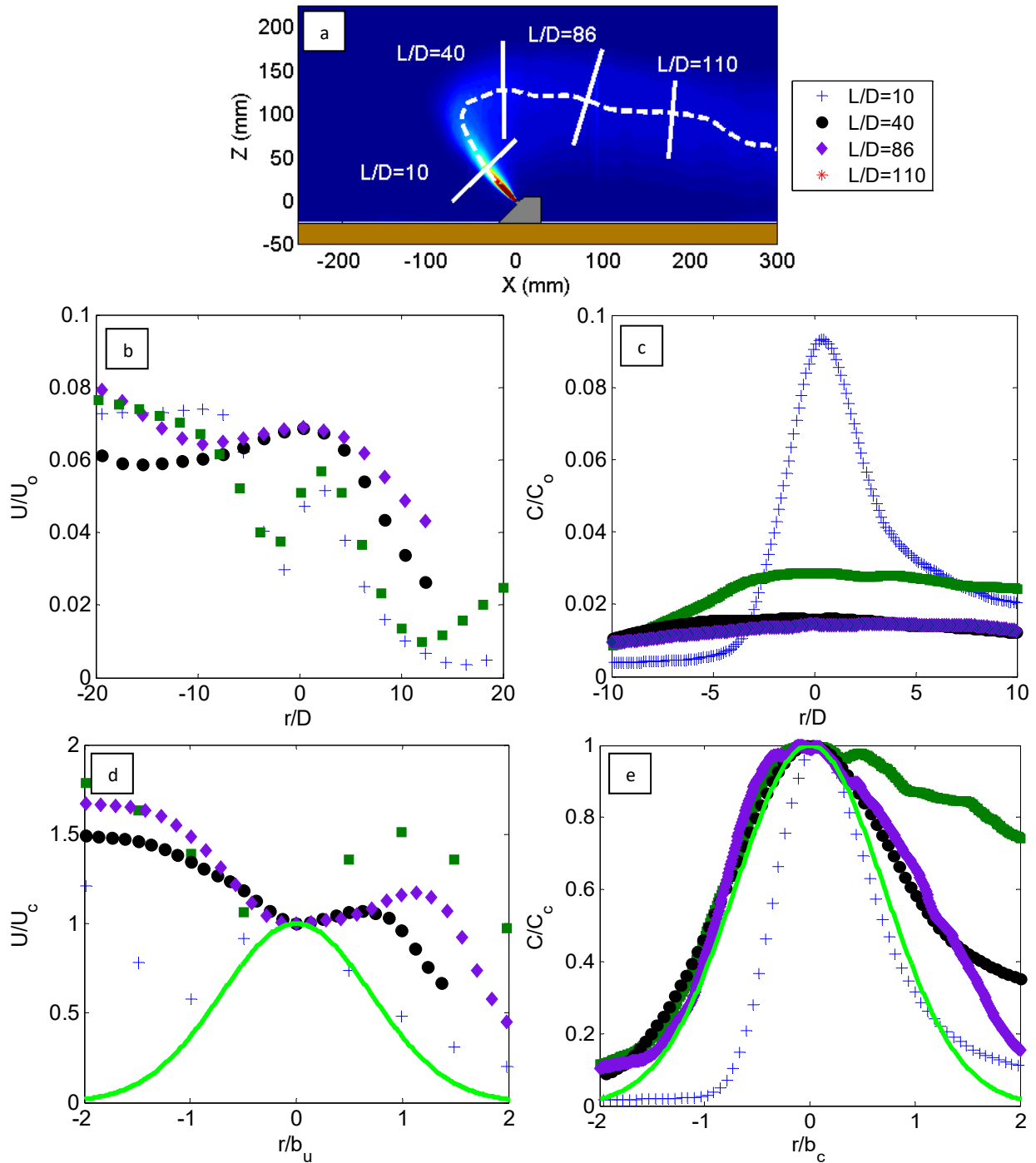


Figura 5.22. Evolución del vertido para ensayo C40 (45°, medio dinámico $v=0.05$ m/s, counter-flow, Tipo V). Localización de los perfiles (A), velocidad media (B), dilución (C) y comparación con perfil gaussiano (D) y (E)

5.3.2 Fluctuaciones de velocidades y diluciones

La caracterización de las variables turbulentas en el comportamiento de los vertidos, se ha llevado a cabo mediante la aplicación de las Ecuaciones 5.9 (fluctuación del módulo de la velocidad) y 5.10 (fluctuación de la concentración).

$$U' = \sqrt{U_x'^2 + U_z'^2} \quad [5.9]$$

$$U_x' = \frac{1}{N} \sqrt{(u_x - U_x)^2} \quad U_z' = \frac{1}{N} \sqrt{(u_z - U_z)^2}$$

$$C' = \frac{1}{N} \sqrt{(C_i - C)^2} \quad [5.10]$$

Donde:

u_x, u_z : Valores instantáneos de velocidad en horizontal y vertical.

U_x, U_z : Media de la velocidad horizontal y vertical en la ventana de análisis.

c_i : Valores instantáneos de concentración

C : Media de la concentración en el campo de análisis.

N : Número de imágenes.

Los valores de la fluctuación de velocidades (u') y concentraciones (c') se han adimensionalizado con los valores de velocidad (u_c) y concentración (c_c) en el eje del vertido. Así mismo, las secciones transversales se representan en función de las distancias radiales b_u y b_c . Estas distancias corresponden a las posiciones donde las velocidades y las concentraciones son el 37 % de las evaluadas en el eje del vertido, en ambos casos, de forma similar a las secciones presentadas en el apartado 5.3.1.

El esquema seguido en las figuras mostradas en este apartado es el siguiente; localizaciones de las secciones en los respectivos campos de fluctuaciones de velocidad y concentraciones (paneles a y b respectivamente), secciones de fluctuaciones de velocidades (panel c) y secciones de fluctuaciones de concentración (panel d), el primer resultado presentado corresponde al ensayo C07 (tipo I), Figura 5.23.

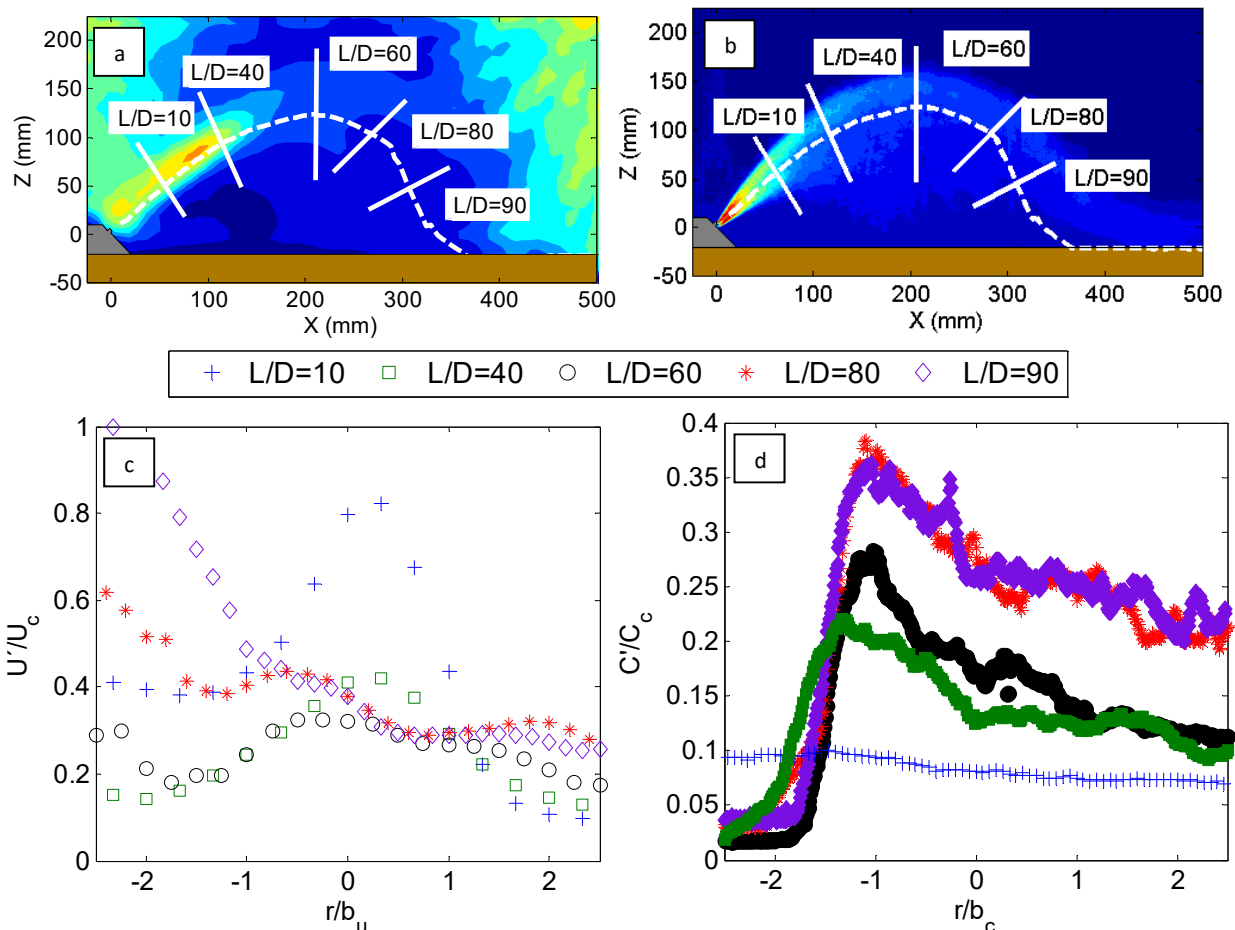


Figura 5.23. Campo de fluctuaciones del módulo de la velocidad (a) y concentraciones (b) ensayo C07 (45°, medio estacionario, Tipo I). Secciones transversales de la velocidad total (c) y concentraciones (d)

Como se puede observar en el panel c, las secciones no muestran una simetría clara salvo para la primera de ellas ($L/D=10$). Las demás curvas evidencian dos máximos en las inmediaciones del eje, que marcan la

interfaz superior e inferior, más notable para secciones alejadas del difusor ($L/D > 40$). Además, se puede observar que el margen superior del vertido ($r/b_u < 0$) muestra una zona de mayor turbulencia que la inferior, coincidiendo con la zona de mayor dilución, mientras que en la parte inferior ($r/b_u > 0$), se experimentan desprendimientos de masa. Este patrón se repite en estudios previos como Papakonstantis et al. (2011) o Palomar et al. (2012).

Por otro lado, el panel d muestra las secciones de fluctuaciones de concentración adimensionalizadas respecto a la concentración del eje. En este caso, a mayor distancia desde el origen del vertido, mayores son las fluctuaciones registradas y mayor es la dispersión entre las secciones transversales. Del mismo modo, al igual que en el panel c, existen dos máximos que delimitan la interfaz del vertido. La presencia de los máximos desaparecen una vez que se alcanza el punto máximo del vertido (Z_m), en la posición $L/D=60$, aunque en este caso no es tan evidente como en el análisis de fluctuaciones de la velocidad. Este fenómeno se debe a que la parte inferior del vertido ($r/b_c > 0$) corresponde a una zona de caída de salmuera, y por tanto las fluctuaciones en la concentración se mantienen casi constantes en la pluma.

La Figura 5.24 muestra las fluctuaciones de un vertido tipo III, en el que el sentido de avance del vertido provoca que la parte positiva del vertido (paneles c y d) corresponda con la zona exterior del mismo. La sección $L/D=50$ corta a la zona de caída de la pluma y por tanto, las turbulencias aumentan en el extremo de la sección analizada ($r/b_u < 0$). Otra característica de este tipo de vertidos es que la fluctuación alcanzada en el eje, para las primeras zonas del vertido ($L/D < 10$), es mayor que las analizadas en vertidos en medios estacionarios (tipo I). Este efecto, sin duda, evidencia turbulencias mayores debido a la interacción con el medio receptor.

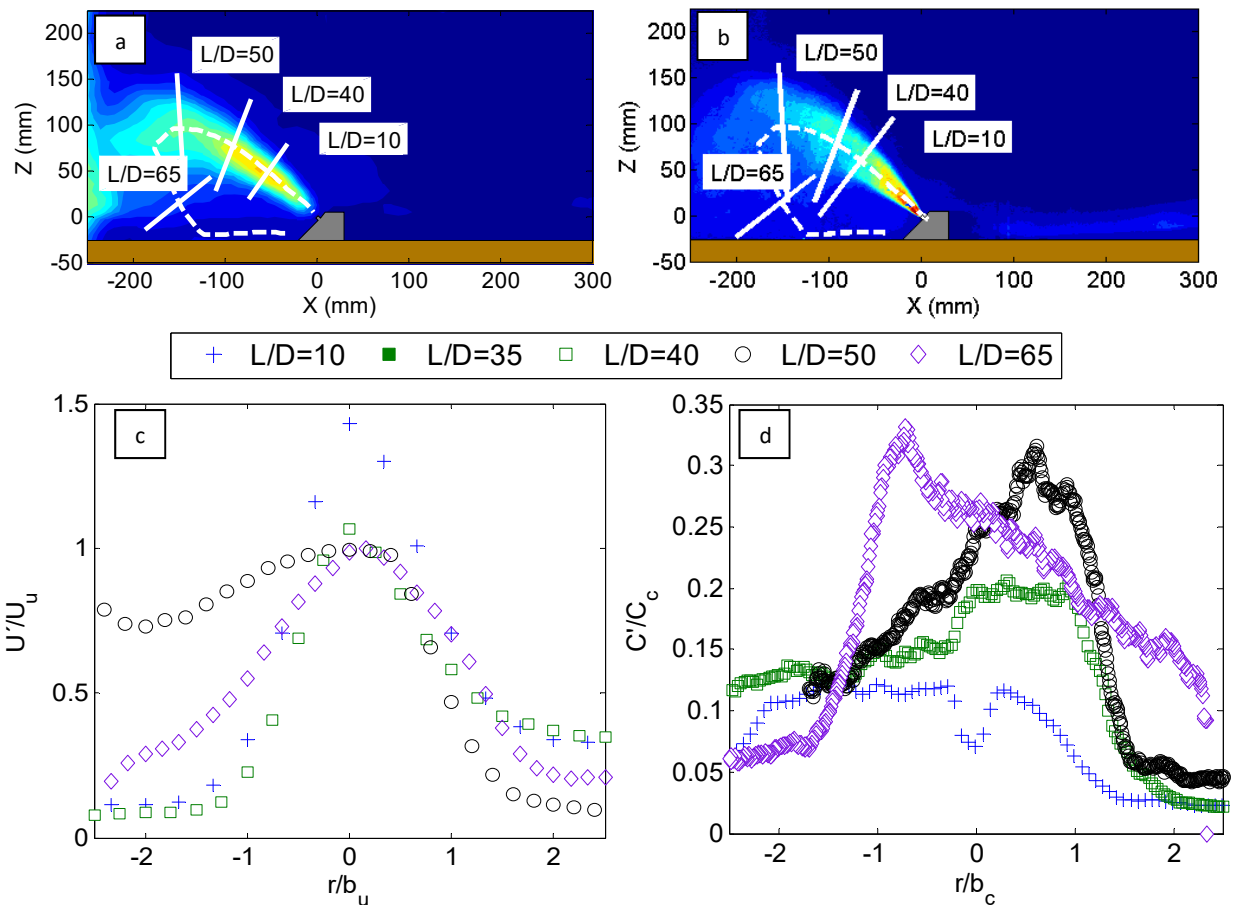


Figura 5.24. Campo de fluctuaciones del módulo de la velocidad (a) y concentraciones (b) ensayo C20 (45° , counter-flow, $v=0.015$ m/s, Tipo III). Secciones transversales de la velocidad total (c) y concentraciones (d)

La Figura 5.24d muestra cómo las fluctuaciones de la concentración representan los máximos que marcan las interfaces del chorro, más marcados en las dos primeras secciones ($L/D=10$ y 40). No obstante, debido al sentido de descarga y al comportamiento del vertido (counter-flow, sin inversión), los máximos para la última sección se localizan en la zona negativa del mismo.

La Figura 4.25 muestra un vertido en medio dinámico con una configuración de descarga en co-flow (tipo IV). Para este tipo de chorros, al igual que en las de tipo I, el sentido de la descarga conlleva que la zona positiva del flujo se localice la parte inferior del vertido.

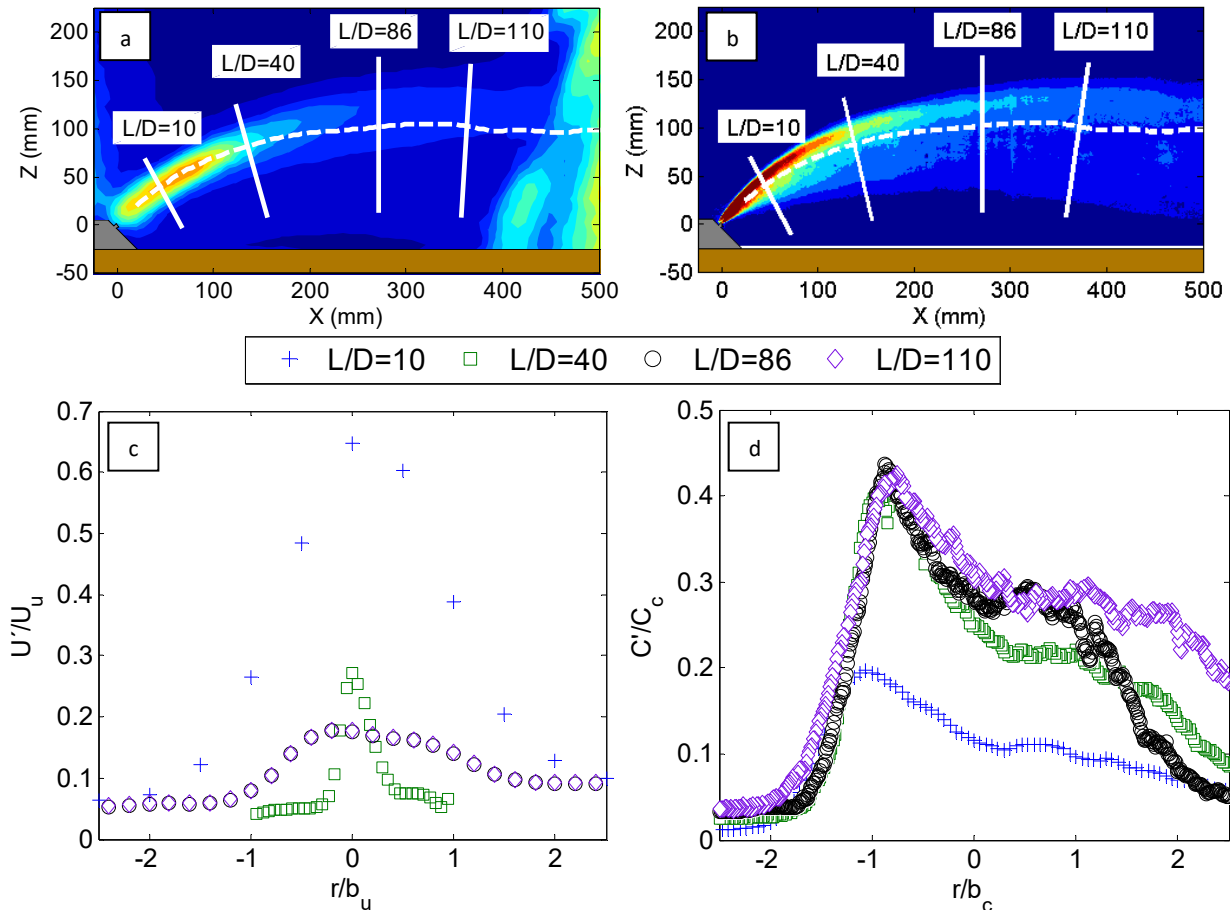


Figura 5.25. Campo de fluctuaciones del módulo de la velocidad (a) y concentraciones (b) ensayo C39 (45° , co-flow, $v=0.05$ m/s, Tipo IV). Secciones transversales de la velocidad total (c) y concentraciones (d)

Como muestra el panel c, la turbulencia de las velocidades es más acusada en las primeras zonas del vertido, sección $L/D=10$. Dado que el vertido es arrastrado por la corriente, éste no precipita, y por lo tanto la simetría del chorro se mantiene durante más recorrido. En este caso no se aprecian máximos que delimiten el chorro, y se puede deducir que las fluctuaciones son mínimas en los extremos superior e inferior del mismo, dentro del rango analizado. Respecto a la dispersión de las fluctuaciones, una vez superado los primeros instantes del vertido ($L/D=40$) ésta es mínima, y las secciones tienden a converger a un valor constante, conservando la autosemejanza. Por último, la caída de salmuera en las zonas más alejadas del difusor es más lenta y con menor potencial de dilución que en los casos anteriores. Sin embargo, se aprecia en la zona inferior del vertido ($r/b_u > 0$) una mayor fluctuación debida a la dilución que se produce.

Los valores de la fluctuación de la concentración (Figura 5.25d), se asemejan a los patrones mostrados en los ensayos tipo I. Se observan claramente dos máximos que evidencian la presencia de una interfaz con el medio receptor, al generarse mayores fluctuaciones inducidas por la dilución. Se muestra un pico más

acusado en la zona superior del vertido ($r/b_c < 0$) y otro más suave en la zona inferior del mismo. La convergencia de las secciones sigue el patrón mostrado en la Figura 5.25c, ya que para $L/D > 40$, las secciones analizadas son casi idénticas. Por último, la tendencia más suave en la zona inferior del vertido denota una caída progresiva de las fluctuaciones, por lo que se puede deducir que existe precipitación de salmuera, con la dilución correspondiente asociada.

Por último, la Figura 5.26 presenta un ensayo con vertido en un medio dinámico y con la configuración de descarga counter-flow (Tipo V). En este caso, debido a la inversión del vertido, el sentido positivo en el eje de abscisas corresponde a la zona interior del vertido.

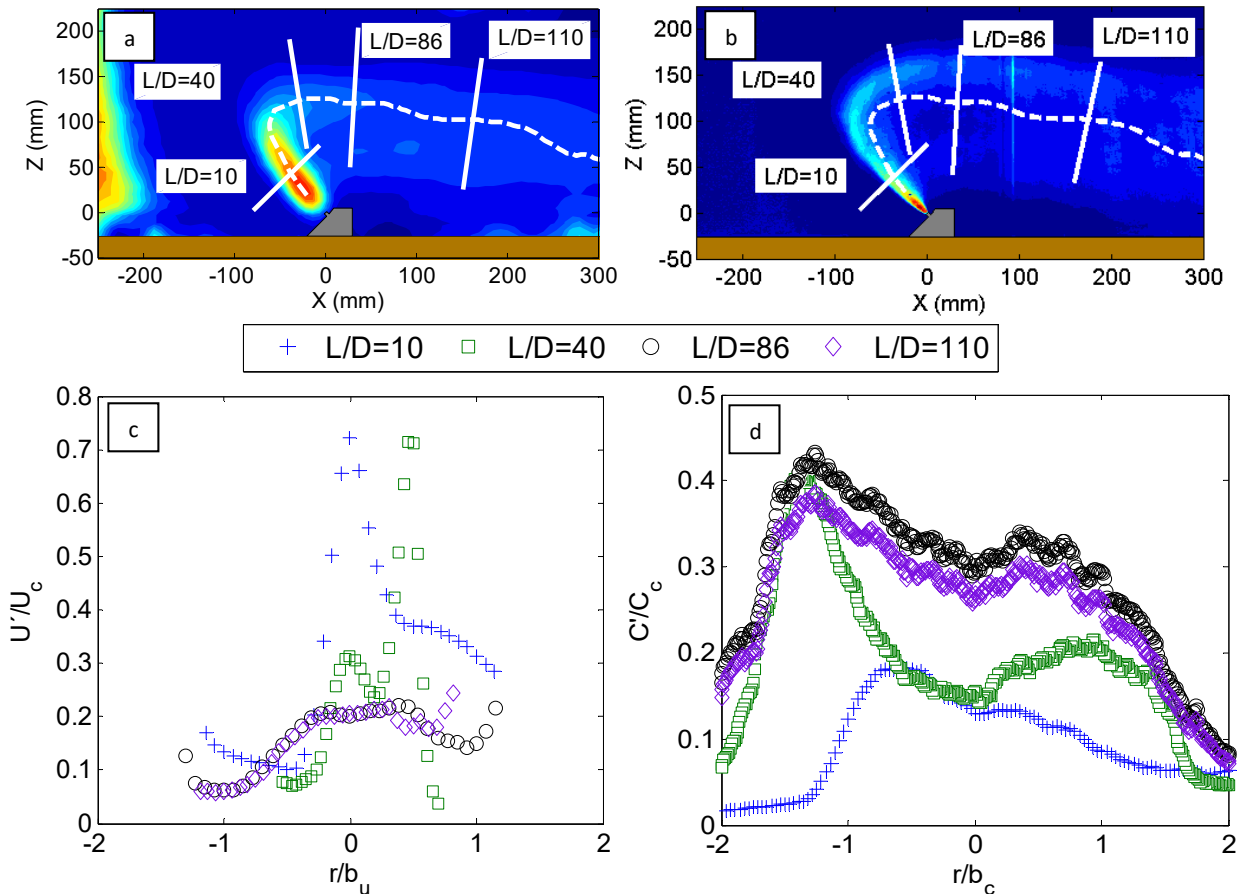


Figura 5.26. Campo de fluctuaciones de velocidades (a) y concentraciones (b) ensayo C40 (45° , counter-flow, $v=0.05$ m/s, Tipo V). Secciones transversales de fluctuaciones de la velocidad (c) y concentraciones (d)

Dada la singular configuración de descarga en este tipo de ensayos, el comportamiento del vertido también es distinto al de los demás tipos de ensayo. En primer lugar, se observa que la fluctuación de la velocidad (Figura 5.26c) en los primeros estados del chorro es del orden del doble de las fluctuaciones de las secciones posteriores. Este fenómeno viene propiciado por las descarga en el sentido contrario al flujo dominante en el medio receptor. Por otro lado, la sección correspondiente a la cota máxima del eje (Z_m), $L/D=40$, muestra un máximo y una tendencia creciente en la zona positiva ($r/b_u > 0$). Este nuevo máximo coincide con la zona inicial del flujo, ya que la sección intercepta el vertido en dos puntos. Las secciones posteriores, al igual que ocurre con los demás tipos de vertido, tienden a converger y además muestran una turbulencia mayor en la zona positiva por efecto de la corriente, lo que denota caída de salmuera sobre el fondo.

La Figura 5.26d presenta las fluctuaciones de la concentración en las secciones de estudio, y se puede observar como el patrón mostrado coincide con las demás tipologías de vertido. Se aprecian dos máximos

que coinciden con la interfaz del chorro en ambos lados. No obstante, dado que existe inversión del vertido, las secciones muestran el máximo absoluto en la zona negativa ($r/b_u < 0$). Para secciones con $L/D > 40$, se puede asegurar su autosemejanza y convergencia, dado que el flujo llega a las zonas más alejadas del difusor muy diluido y los procesos turbulentos son mínimos.

5.4 Conclusiones

En este capítulo se han analizado en detalle los campos de velocidades y de concentraciones obtenidos mediante las técnicas no intrusivas PIV y LIF. Como parte fundamental de este estudio, se ha realizado un análisis de los campos de velocidades y concentraciones, así como de las componentes vertical y horizontal del flujo, además también se ha estudiado el comportamiento de las vorticidades. Este análisis junto con el estudio de los campos de diluciones, permite establecer patrones de comportamiento de los vertidos para diferentes tipologías de descarga.

Por otro lado, se han analizado las secciones transversales a la trayectoria del vertido de los campos de velocidades y de concentración, además de una comparación con una curva gaussiana en esos mismos puntos. Esta comparación es de gran importancia, dado que autores previos como Shao y Law (2010) o Papakonstantis et al. (2011), entre otros, se han basado en la hipótesis de autosimilitud entre secciones, como base de herramientas numéricas que predicen el comportamiento del flujo hiperdenso en medio estacionario. Además, se ha realizado un estudio de las fluctuaciones de velocidad y concentración, que junto con el análisis anterior ayuda a entender mejor los procesos físicos existentes en un vertido de salmuera. Se presentan las conclusiones de este capítulo ordenadas, según la tipología de descarga.

Vertidos en tipo I, II y IV (medio estacionario y medio dinámico *co-flow*)

- Los campos de velocidades de los vertidos muestran una influencia dominante de la velocidad horizontal sobre el flujo. Es de destacar, que los ensayos con menor velocidad del medio (parámetro $u_r F_{rd}$ bajo), tienden a presentar mayor influencia de la componente vertical.
- La componente vertical del vertido decrece en todos los casos hasta alcanzar la cota máxima del chorro. Para vertidos en *co-flow* este proceso es más acusado cuanto mayor es la velocidad del medio. Lo que se traduce en que para velocidades mayores la cota máxima del vertido (Z_{me}) se alcanza antes.
- Por otro lado las vorticidades analizadas muestran un sentido positivo en la parte superior del vertido y negativo en la inferior del mismo.
- La dilución alcanzada para vertidos tipo IV se mantiene casi constante una vez que el flujo hiperdenso se ve arrastrado por el medio receptor, ya que no existe caída de la salmuera, o bien esta es mínima. Por lo tanto, la turbulencia asociada al proceso de descenso desaparece.
- La evolución de los parámetros de estudio analizados, está influenciada por el sentido de descarga. Los vertidos en *co-flow* (Tipos II y IV) muestran evoluciones progresivas de las variables.
- El análisis de las secciones de velocidades para los tipos II y IV muestra que los máximos de velocidad están desplazados respecto al origen, este desplazamiento tiene lugar en la zona negativa del vertido ($r/b_u < 0$). El comportamiento de las secciones de concentraciones para tipos II y IV es similar a las secciones de velocidad, dado que la salmuera es arrastrada aguas abajo por el medio y los campos de concentración y velocidad tienden a superponerse.

Vertidos en tipo III y V (medio dinámico *counter-flow*)

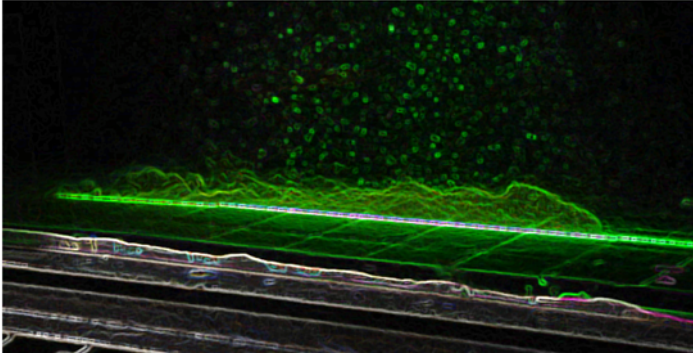
- Para vertidos tipo III y V el comportamiento de los campos de velocidades se divide en dos fases. Tipo III, Z_{me} es menor respecto a ensayos tipo I y para aquellos de tipo V en los que existe inversión del flujo, este valor tiende a seguir el comportamiento usual. Es decir, que para velocidades mayores el vertido se invierte antes y la cota máxima tiene lugar antes.
- EL comportamiento de los campos de vorticidades es el opuesto al observado en vertidos co-flow. Es decir, la parte positiva del campo corresponde a la zona inferior del vertido, y viceversa. Es de destacar que para descargas tipo V, una vez se ha invertido el chorro, el sentido de las vorticidades es semejante al observado en configuraciones de descarga co-flow.
- La dilución aumenta continuamente a lo largo de la trayectoria del vertido para todos los casos, no obstante, es de destacar que para vertidos tipo III la dilución alcanzada es mayor para un menor recorrido respecto a los demás vertidos.
- El comportamiento de las variables estudiadas, para ensayos en counter-flow (tipos III y V), muestra un cambio de pendientes en la evolución. Esta variabilidad de la evolución es fruto del cambio que se produce al invertirse el flujo de salmuera.

Para ambas configuraciones de vertido (*co-flow* y *counter-flow*)

- Se han obtenido formulaciones que permiten estimar la evolución de los parámetros de estudio. Estos ajustes sólo serían aplicables a vertidos con la misma configuración de descarga que la empleada en esta tesis. En particular, se han analizado la posición de la cota máxima del chorro (Z_{me}), así como la dilución alcanzada en la cota máxima del eje (S_m).
- El efecto coanda es muy importante y la corriente de gravedad se forma muy pronto para vertidos con ángulos pequeños ($\theta < 60^\circ$), o aquellos en los que el impacto sucede pronto ($F_{rd} < 25$), por lo que la dilución es menor que para los demás ensayos analizados.
- La hipótesis de similitud con una curva gaussiana sólo es válida para secciones próximas al difusor, y cuanto más se alejan del mismo esta ley de semejanza deja de tener validez. El límite de aplicación para vertidos en medio dinámico co-flow (tipo IV) el límite está en $L/D < 110$ mientras que para vertidos en estacionario (tipo I) este límite es de $L/D < 80$.
- En vertidos counter-flow, esta similitud es descartable para las secciones de velocidad, debido a que los fenómenos de mezcla generan una redistribución del flujo más complejo que en los casos co-flow. Además, dado que la velocidad del medio suele ser superior que la de la trayectoria del vertido, la distribución de valores muestra una campana invertida. No obstante, para los perfiles de concentraciones, sí es aplicable esta similitud dado que, el comportamiento de la pluma es parecida a la de vertidos con descargas co-flow, salvo para algunos casos. Esto vertidos (tipo III) muestran comportamientos en los que la autosemejanza no es aplicable al mostrar perfiles con comportamientos distintos en la zona positiva y negativa del radio del efluente.
- Por último el análisis de las secciones de fluctuaciones revela un comportamiento bimodal, dos máximos que corresponden con las zonas de mayor turbulencia (es decir los extremos superior e inferior del vertido). Por otro lado, a medida que las secciones están más alejadas del difusor, los picos se van atenuando, debido a que la turbulencia generada por la fricción con el medio receptor es menor. Se puede decir que para las secciones con $L/D > 80$ (en todas las tipologías analizadas), existe cierta autosemejanza, salvo para vertidos tipo III (counter-flow sin inversión).

BIBLIOGRAFÍA

- Gungor, E. y Roberts, P., 2009. Experimental studies on vertical dense jets in a flowing current. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(11), pp.935–948.
- Jirka, G.H., 2004. Integral model for turbulent buoyant jets in unbounded stratified flows. Part I: Single Round Jet. *Environmental Fluid Mechanics*, 4(1), pp.1–56.
- Kikkert, G. a., Davidson, M.J. y Nokes, R.I., 2010. *Buoyant jets with three-dimensional trajectories*. University of Canterbury, Christchurch, Nueva Zelanda. Tesis doctoral.
- Lai, C.C.K. y Lee, J.H.W., 2012. Mixing of inclined dense jets in stationary ambient. *Journal of Hydro-Environment Research*, 6(1), pp.9–28.
- Oliver, C.J., Davidson, M.J. y Nokes, R.I., 2013. Removing the boundary influence on negatively buoyant jets. *Environmental Fluid Mechanics*, 13(6), pp.625–648.
- Palomar, P., Lara, J.L. y Losada, I.J., 2012. Near field brine discharge modeling part 2: Validation of commercial tools. *Desalination*, 290, pp.28–42.
- Palomar Herrero, P., 2014. *Optimización experimental y numérica de vertidos hipersalinos en el medio marino*. Universidad de Cantabria, Tesis doctoral.
- Papakonstantis, I.G., Christodoulou, G.C. y Papanicolaou, P.N., 2011. Inclined negatively buoyant jets 2: concentration measurements. *Journal of Hydraulic Research*, 49(1), pp.13–22.
- Roberts, P.J.W., Ferrier, A. y Daviero, G., 1997. Mixing in inclined dense jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(8), pp.693–699.
- Shao, D. y Law, A.W.K., 2010. Mixing and boundary interactions of 30° and 45° inclined dense jets. *Environmental Fluid Mechanics*, 10(5), pp.521–553.



CAPITULO VI.

CORRIENTE DE GRAVEDAD EN CAMPO LEJANO. ANÁLISIS DEL FLUJO HIPERSALINO EN ALZADO Y PLANTA

RESUMEN

En este capítulo se analizan los fenómenos físicos que tienen lugar en una corriente de gravedad formada tras el impacto de un vertido de salmuera sobre el fondo del medio receptor.

Para una caracterización en detalle del campo lejano de dicho vertido, se emplean los datos registrados en la campaña experimental realizada con las tecnologías LIF y PIV. Además, y como novedad, se ha empleado un sistema de caracterización basado en conductivímetros, que ha sido objeto de registro en la OEPM como patente de invención.

Del mismo modo que en campo cercano, se presenta en este capítulo un análisis dimensional de las variables de estudio para campo lejano. Como paso previo, se ha definido en primer lugar la zona de transición entre campo cercano y lejano.

ÍNDICE

6	CAPÍTULO VI. CORRIENTE DE GRAVEDAD EN CAMPO LEJANO. ANÁLISIS DEL FLUJO HIPERSALINO EN ALZADO Y PLANTA.....	6.1
6.1	Introducción.....	6.1
6.2	Campos estudiados. Análisis integrado del vertido.....	6.3
6.2.1	Campos de velocidades (PIV).....	6.3
6.2.2	Campos de diluciones (LIF).....	6.10
6.3	Influencia de variables geométricas y ambientales en la corriente de gravedad.....	6.11
6.3.1	Análisis de la zona de transición entre campo cercano y campo lejano.....	6.11
6.3.2	Análisis dimensional en la corriente de gravedad. Influencia del parámetro $u_r F_{rd}$ sobre la corriente de gravedad.....	6.16
6.4	Análisis en perfil de la corriente de gravedad generada en campo lejano.....	6.18
6.5	Caracterización de la corriente de gravedad en planta.....	6.25
6.5.1.	Evolución de los campos de concentración.....	6.25
6.5.2.	Análisis de resultados según tipologías de vertido.....	6.33
6.6	Conclusiones.....	6.35

6 CAPÍTULO VI. CORRIENTE DE GRAVEDAD EN CAMPO LEJANO. ANÁLISIS DEL FLUJO HIPERSALINO EN ALZADO Y PLANTA

6.1 Introducción

Tal y como se ha descrito con anterioridad en esta tesis doctoral, en el vertido hiperdenso de salmueras mediante chorro sumergidos se diferencian dos zonas, campo cercano y campo lejano. Este capítulo se centra en la descripción de la corriente de gravedad formada en campo lejano. De manera acorde al desarrollo del Capítulo 5, a continuación se describen de forma detallada los procesos físicos a partir de los datos obtenidos mediante las diferentes técnicas de caracterización empleadas.

El estudio de los vertidos de flotabilidad negativa mediante chorro sumergido, comúnmente se ha centrado sólo en el campo cercano. Por otra parte, la caracterización del campo lejano se ha realizado, mediante el modelado físico de corrientes de gravedad totalmente desarrolladas, originadas por fluidos con diferentes densidades, corrientes de turbidez, etc. Este capítulo presenta el análisis integrado del campo cercano y campo lejano, a través de los datos obtenidos mediante las técnicas PIV y LIF. Para lograr este campo global de estudio, se han solapado los campos vectoriales y escalares obtenidos de forma individual. De esta forma, se ha conseguido registrar la evolución de la hidrodinámica y los fenómenos de mezcla en todo el vertido, que, como se ha dicho, es una contribución novedosa al estado del arte de en este tipo de trabajos en hidráulica experimental.

La corriente de gravedad originada por la descarga de un vertido hiperdenso en un medio receptor se caracteriza por ser una zona de baja influencia de los fenómenos de mezcla. Las diluciones presentes en la corriente de gravedad tienen su fuente en los procesos de mezcla en la interfaz entre ambos flujos (efluente y receptor) y en la rugosidad del fondo. Otro de los aspectos a tener en cuenta es la concentración en el punto límite entre campo cercano y lejano (X_s). Si la dilución antes de esta frontera es baja, la corriente de gravedad tendrá una concentración alta, por lo que necesitará un forzador mayor para inducir el fenómeno de dilución.

La zona previa a la formación de la corriente de gravedad, zona de transición, tiene lugar entre el campo cercano y lejano. Uno de los objetivos de este capítulo es determinar el límite entre campo cercano y campo lejano, además de caracterizar la evolución de este parámetro (X_s), en función de las condiciones hidrodinámicas del medio receptor. Con este análisis se avanza el desarrollado en la literatura, en el que se ha analizado el límite de la zona de transición para medios sin corriente, como por ejemplo en el estudio realizado por Palomar (2014).

Para llevar a cabo una descripción de las corrientes de gravedad en campo lejano, se suele recurrir a los trabajos realizados sobre corrientes de turbidez o flujos bicapa. Algunos de los trabajos empleados para describir estos fenómenos se basan en fenómenos naturales, como las intrusiones salinas en aguas costeras, o los flujos cargados de materiales en suspensión. Estas investigaciones han permitido desarrollar parámetros de trabajo que caracterizan las corrientes de gravedad según sea la diferencia de densidades. Entre estos parámetros cabe destacar el número de Richardson (R_i), que ha sido empleado por Altinakar et al. (1996) o Hallworth et al. (1996) –entre otros- para definir los procesos de mezcla e intercambio de fluidos con distintas densidades. En este capítulo también se estudiará el efecto de las variables ambientales (velocidad y sentido de la corriente del medio receptor), sobre el número de Richardson (R_i).

Se presentarán los perfiles de velocidad y concentración de las corrientes de gravedad, obtenidos a partir de los campos vectoriales y escalares determinados con las técnicas PIV y LIF, respectivamente. Por otro

lado, se presentarán los campos de salinidades obtenidos mediante un sistema de caracterización basado en conductivímetros, que ha sido objeto de registro en la OEPM como patente de invención. Dicha metodología ha sido desarrollada por el grupo de investigación al que pertenece el autor de esta tesis. De este modo, se pretende complementar la caracterización del comportamiento del campo lejano para diferentes velocidades y configuraciones de descarga.

De acuerdo con el esquema seguido en la tesis doctoral, se presenta la Figura 6.1 las configuraciones tipo de descarga de salmueras analizadas en este trabajo.

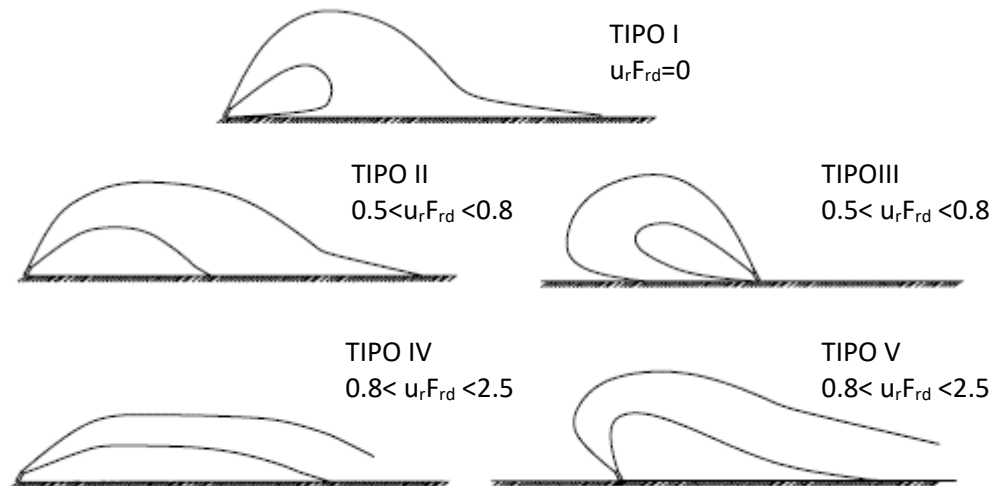


Figura 6.1. Tipologías de vertido analizadas: $u_r F_{rd} = 0$, (Tipo I). Vertido co-flow $0.5 < u_r F_{rd} < 0.8$ (Tipo II). Vertido counter-flow, $0.5 < u_r F_{rd} < 0.8$ (Tipo III). Vertido co-flow, $0.8 < u_r F_{rd} < 2.5$ (Tipo IV). Vertido counter-flow, $0.8 < u_r F_{rd} < 2.5$ (Tipo V)

A continuación se describe la metodología empleada para la caracterización conjunta del vertido en alzado. De forma resumida, se emplean las imágenes obtenidas mediante técnicas láser (PIV y LIF) en 3 posiciones distintas para representar el vertido hiperdenso en su totalidad. Las imágenes obtenidas para la caracterización del campo cercano (primera posición de la cámara) se solapan con las imágenes obtenidas en campo lejano (tomadas en dos ubicaciones). Para ello, se reprodujeron los ensayos clave de campo cercano, pero trasladando el sistema de medida hacia aguas abajo (esquema Figura 6.2). Estas zonas corresponden a ventanas de visión de 500 a 600 mm de longitud, que abarcan el campo cercano y 2 tramos del campo lejano, lo que constituye un campo total de aproximadamente 1500 mm de longitud. De esta forma se logró caracterizar el chorro de salmuera y la corriente de gravedad de forma conjunta (aunque no simultánea).

Dada la naturaleza de los ensayos realizados, el campo lejano tiene lugar en un punto distinto cada vez. Por lo tanto, a fin de caracterizar la corriente de gravedad de forma correcta se definieron una serie de ensayos representativos de la campaña experimental. De este modo, se seleccionaron 15 ensayos con valores de F_{rd} y Re similares, y las mismas características geométricas de descarga. Una vez determinados los ensayos representativos, se llevan a cabo en dos fases diferentes. En la primera de ellas se caracteriza la zona más próxima al punto de impacto X_i en perfil, empleando las técnicas láser centradas sobre la zona de interés, y en la segunda se utiliza una malla de conductivímetros. A continuación, todo el montaje se desplaza aguas abajo, caracterizando de este modo la corriente de gravedad en una longitud de desarrollo mayor.

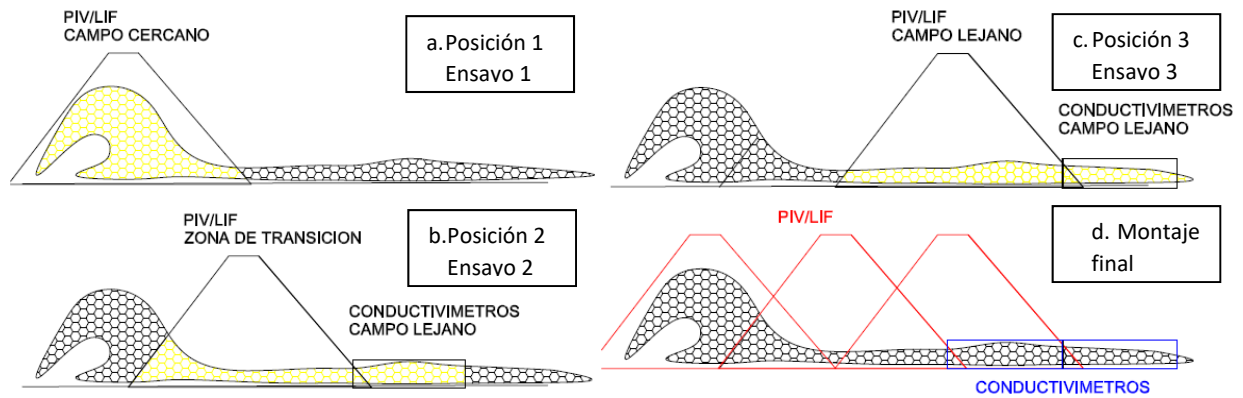


Figura 6.2. Montaje experimental de las técnicas PIV/LIF y conductivímetros para campo cercano (a), y dos fases de medida en campo lejano (b y c). Caracterización de conjunta de ambos campos (d)

6.2 Campos estudiados. Análisis integrado del vertido

6.2.1 Campos de velocidades (PIV)

Para cada ensayo analizado se presentan tres campos de resultados; en primer lugar el campo de velocidades y las componentes horizontal y vertical de la velocidad. Cabe destacar que, para los ensayos con descargas counter-flow se presenta de forma ampliada la zona de descarga, ya que la hidrodinámica de esta zona es más compleja.

La Figura 6.3a muestra el campo de velocidades donde aparecen en primer lugar el campo cercano analizado en el Capítulo 5 de esta tesis doctoral. Centrando el análisis de vertido en la zona de impacto (X_i) de la pluma sobre el fondo del medio receptor y el campo lejano, se aprecia una aceleración del flujo aguas abajo de X_i . Se observa claramente como el flujo pierde velocidad, a medida que se aleja del origen del vertido. Para una mejor visualización del campo obtenido, se han eliminado todos los valores existentes fuera del flujo hipersalino.

En las dos siguientes figuras se muestran los campos horizontal y vertical de velocidades (panel b y c). Puede observarse claramente que la componente vertical del flujo sólo afecta a la zona de chorro y pluma del campo cercano, mientras que, la componente horizontal del flujo es predominante en la zona correspondiente a la corriente de gravedad. Sin embargo, si se analiza en detalle la zona comprendida entre $5 < X/DF_{rd} < 9$ se detecta todavía una zona de fuerte influencia de la componente de la velocidad horizontal. Esta área corresponde con la zona de transición, que limita el final de campo cercano y el inicio del campo lejano, donde se denota una zona de mayor intensidad turbulenta que la existente en las zonas más alejadas del origen.

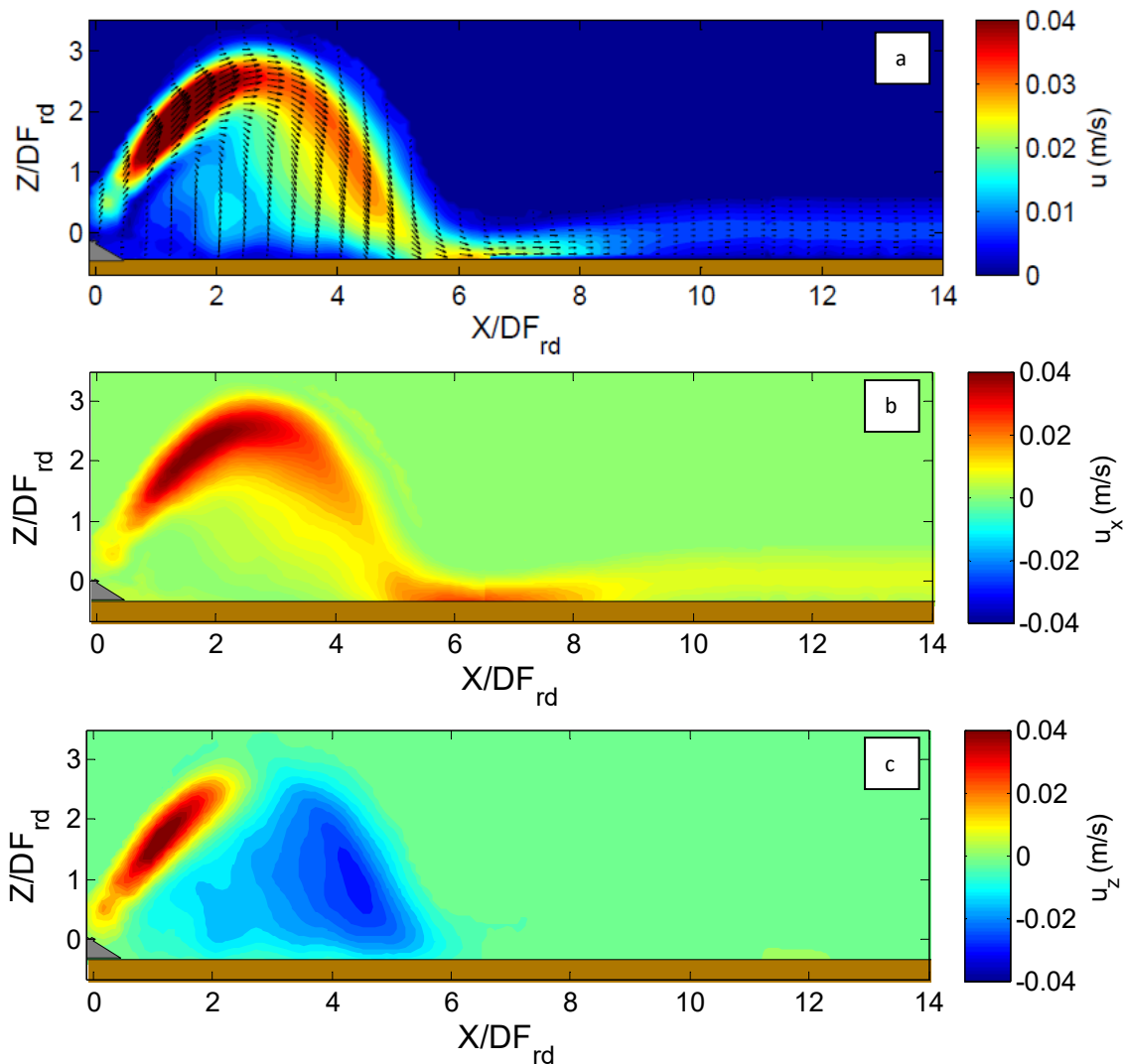


Figura 6.3. L03 (60° , medio estacionario, Tipo I). Módulo de la velocidad (a). Velocidad horizontal (u_x , b). Velocidad vertical (u_z , c)

El ensayo L06 ($\theta=60^\circ$, medio dinámico co-flow), correspondiente a los vertidos tipo II, muestra un campo de velocidades donde claramente se observa un salto en la posición $X/DF_{rd}=9$. Este tipo de discontinuidades son el resultado de una diferencia entre las campañas experimentales realizadas. Además, se aprecian errores de medida en la parte final de la ventana correspondiente a la primera campaña experimental (campo cercano), que no se han podido solventar tras aplicar diferentes filtrados.

Sin embargo, se ha optado por mostrar el campo en su conjunto, dado que las diferencias entre las distintas ventanas de visión no exceden el 10%. Analizando las componentes de las velocidades se puede observar que la velocidad vertical (Figura 6.4c) tiene relevancia sólo en el ascenso y caída del flujo, pero sus magnitudes son sustancialmente inferiores a los valores presentados en el campo horizontal de velocidades (Figura 6.4b).

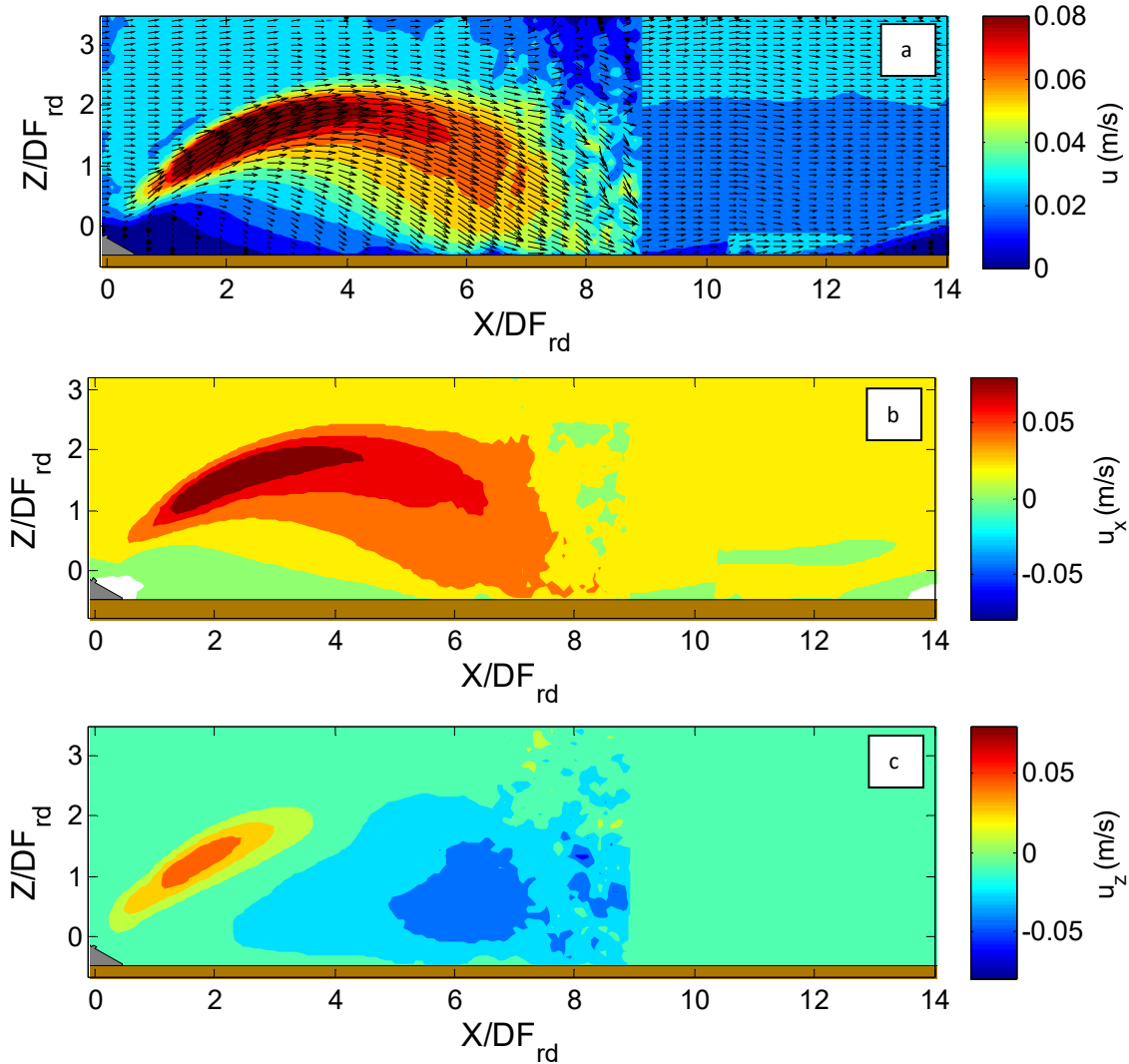


Figura 6.4. L06 (60°, co-flow, $v=0.015$ m/s, Tipo II). Módulo de la velocidad (a). Velocidad horizontal (u_x , b). Velocidad vertical (u_z , c)

Cabe destacar que en la zona de campo lejano se aprecia un aumento del espesor de la corriente de la gravedad en la posición $X/DF_{rd}=12$. Este comportamiento no se ha repetido para ninguno de los ensayos realizados en la batería experimental de campo lejano, y por tato se plantea como un error de medición. Para la descripción de los vertidos con descarga en counter-flow se presenta la Figura 6.5.

Este tipo de vertidos se caracterizan por el frenado brusco que se produce debido a la presencia de la corriente del medio receptor. Por otro lado, el impacto del vertido se produce aguas arriba del difusor (lado izquierdo del difusor), ya que no se produce inversión del flujo. Además, el comportamiento de la corriente de gravedad, al ser recirculada por el medio (lado derecho del difusor), es similar al de un vertido en medio estacionario. Se puede observar como el flujo justo aguas arriba y aguas abajo del difusor se frena debido a la presencia de la pieza empleada para modelizar el sistema de descarga. Para una mejor visualización de la zona de descarga y de los procesos que tienen lugar en el difusor, se muestra una zona ampliada del mismo. En el chorro hipersalino se aprecian dos zonas de descenso en el vertido, correspondientes al desprendimiento de masa, en primer lugar, y a la caída del vertido en el segundo.

Los campos horizontales (Figura 6.5b) de la velocidad muestran zonas de una velocidad de sentido negativo al del medio receptor. Y, como ya se ha mencionado en este trabajo, alrededor de la zona del vertido existe una capa de velocidad nula, que se identifica con la interfaz chorro-medio receptor. Por lo

demás, el comportamiento del campo corresponde al de un flujo normal, de la posición $X/DF_{rd}=2.5$ en adelante.

Por el contrario, la Figura 6.5c muestra el comportamiento de la componente vertical de la velocidad, donde se puede observar claramente, la zona de ascenso del chorro hasta alcanzar la cota máxima del eje (Z_m). Por otro lado, las zonas de sentido negativo marcan las regiones del campo que coinciden con la caída de la salmuera sobre el lecho del medio receptor, parte inferior del vertido, y la recirculación del medio receptor sobre el chorro en la parte superior del mismo.

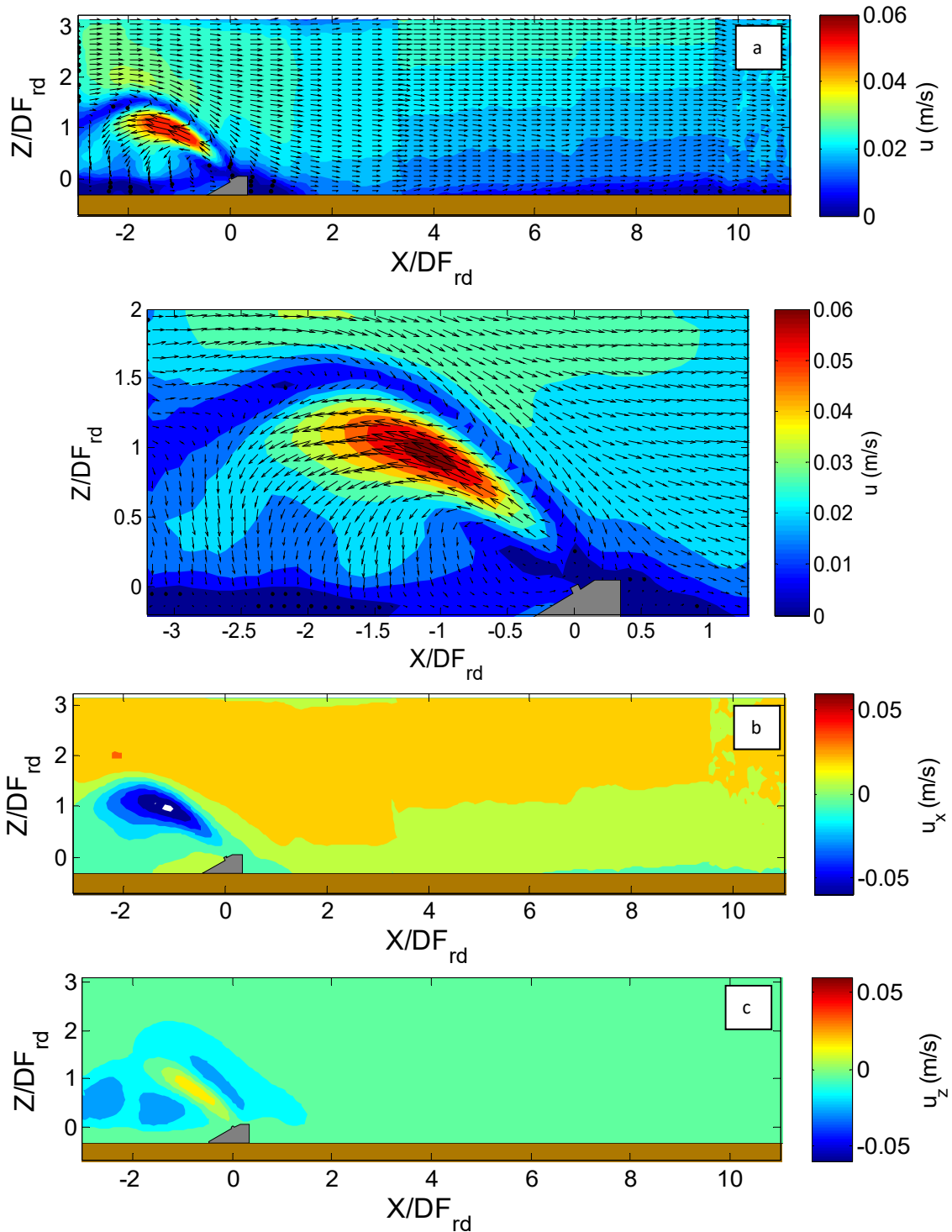


Figura 6.5. L07 (120° , counter-flow, $v=0.03$ m/s, Tipo III). Módulo de la velocidad (a). Velocidad horizontal (u_x , b). Velocidad vertical (u_z , c)

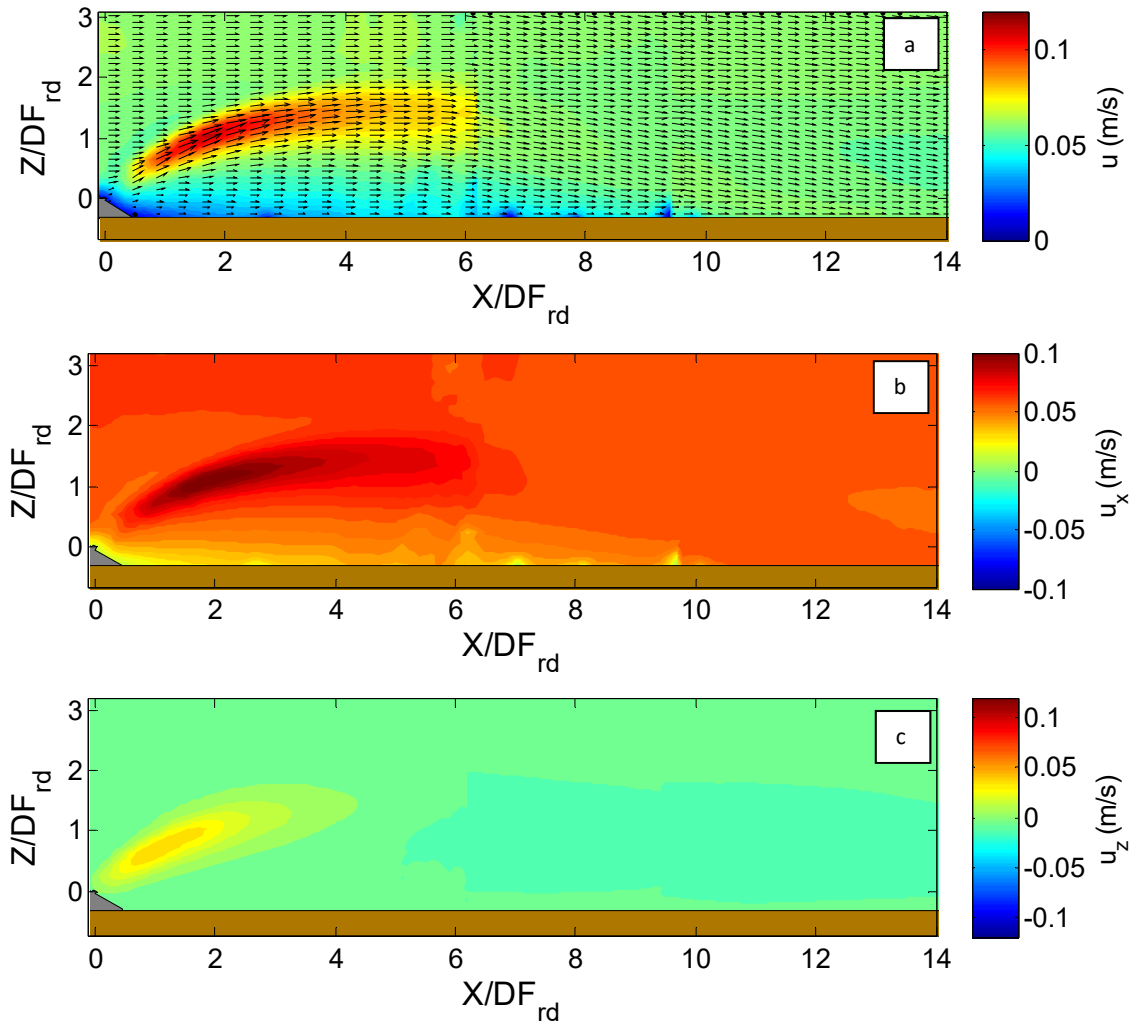


Figura 6.6. L14 (60° , co-flow, $v=0.05$ m/s, Tipo IV). Módulo de la velocidad (a). Velocidad horizontal (u_x , b). Velocidad vertical (u_z , c)

Como en el caso anterior, los vertidos tipo IV (Figura 6.6) se desarrollan en un ambiente receptor dinámico, con una configuración de salida co-flow. Gracias a las técnicas de medición se puede analizar en conjunto el campo cercano y lejano. De esta forma, es posible estimar la trayectoria total del flujo, mientras que en el caso de estudios convencionales solo es posible caracterizar la zona del vertido arrastrado por la corriente del medio receptor. Por consiguiente, se puede determinar la posición del punto de retorno en $X/DF_{rd} \approx 11$, lo cual representa un 110% respecto al mismo ensayo (L03) en medio estacionario. No obstante, la velocidad del flujo en la zona de caída es aproximadamente igual a la del medio, por lo que la turbulencia y dilución inducida es debida en su totalidad a la flotabilidad.

En cuanto a la componente horizontal y velocidad del campo, se pueden observar patrones acordes al tipo de vertido. En primer lugar, la Figura 6.6a muestra cómo la velocidad del chorro es sustancialmente mayor que la del medio hasta $X/DF_{rd}=6$. Una vez rebasado este límite no se aprecian grandes diferencias entre el vertido y el ambiente circundante.

Por último, las velocidades verticales evidencian el ascenso y descenso del flujo hipersalino, en el primer caso las velocidades ascensionales son fácilmente identificables con valores positivos. En segundo lugar, tras un espacio con velocidades verticales nulas, se aprecian velocidades negativas correspondientes al descenso del flujo de valor muy bajo.

El último de los campos vectoriales presentado corresponde al vertido tipo V, descarga counter-flow en medio receptor con velocidad elevada (Figura 6.7). En este caso, debido a la presencia de la corriente del medio, el vertido experimenta la inversión momentos después de la descarga. A continuación, el flujo hiperdenso es arrastrado aguas abajo del difusor. En este caso, como en el anterior, la posibilidad de disponer una dimensión de análisis tan extensa, permite determinar el punto de retorno (X_r) que en el análisis del campo cercano (Capítulo 5) no pudo ser estimado. Se aprecia nuevamente una deceleración en la zona inmediatamente aguas abajo del chorro de salmuera, ocasionada por la zona de sombra.

De nuevo, y debido a la compleja hidrodinámica desarrollada en los vertidos en counter-flow, se presenta una ampliación de la imagen en la zona del difusor. Se observa la recirculación del medio receptor por la presencia del chorro ascendente, con una zona de estancamiento justo aguas abajo del chorro. Como sucede en el vertido tipo III, se produce una zona sin dinámica aguas abajo del difusor, lo cual se traduce una zona de sombra que abarca desde el origen hasta $X/DF_{rd}=4$.

La componente horizontal de la velocidad muestra una zona, en torno al chorro inicial, de velocidades nulas que denotan la recirculación del medio ambiente receptor, además de la zona de sombra producida por el propio chorro. Por otro lado se pueden apreciar la progresiva aceleración del efluente al ser arrastrado por la corriente del medio receptor, que se uniformiza aguas abajo del punto de impacto ($X/DF_{rd}=6$).

La componente vertical de la velocidad (Figura 6.7c), muestra la evolución del chorro en las primeras fases del vertido, y cómo se produce la caída sobre el fondo del medio receptor. Así pues, la velocidad inicial del vertido es positiva hasta la cota máxima del eje (Z_{me}), para después comenzar un proceso de aceleración en sentido negativo. Nótese que entre los dos sentidos descritos existe una zona de velocidad vertical nula, que es donde se produce el cambio de signo. Por lo tanto, dado que existe una caída de salmuera, los procesos turbulentos existentes potencian la dilución del vertido en esta zona, antes del impacto de la pluma sobre el fondo.

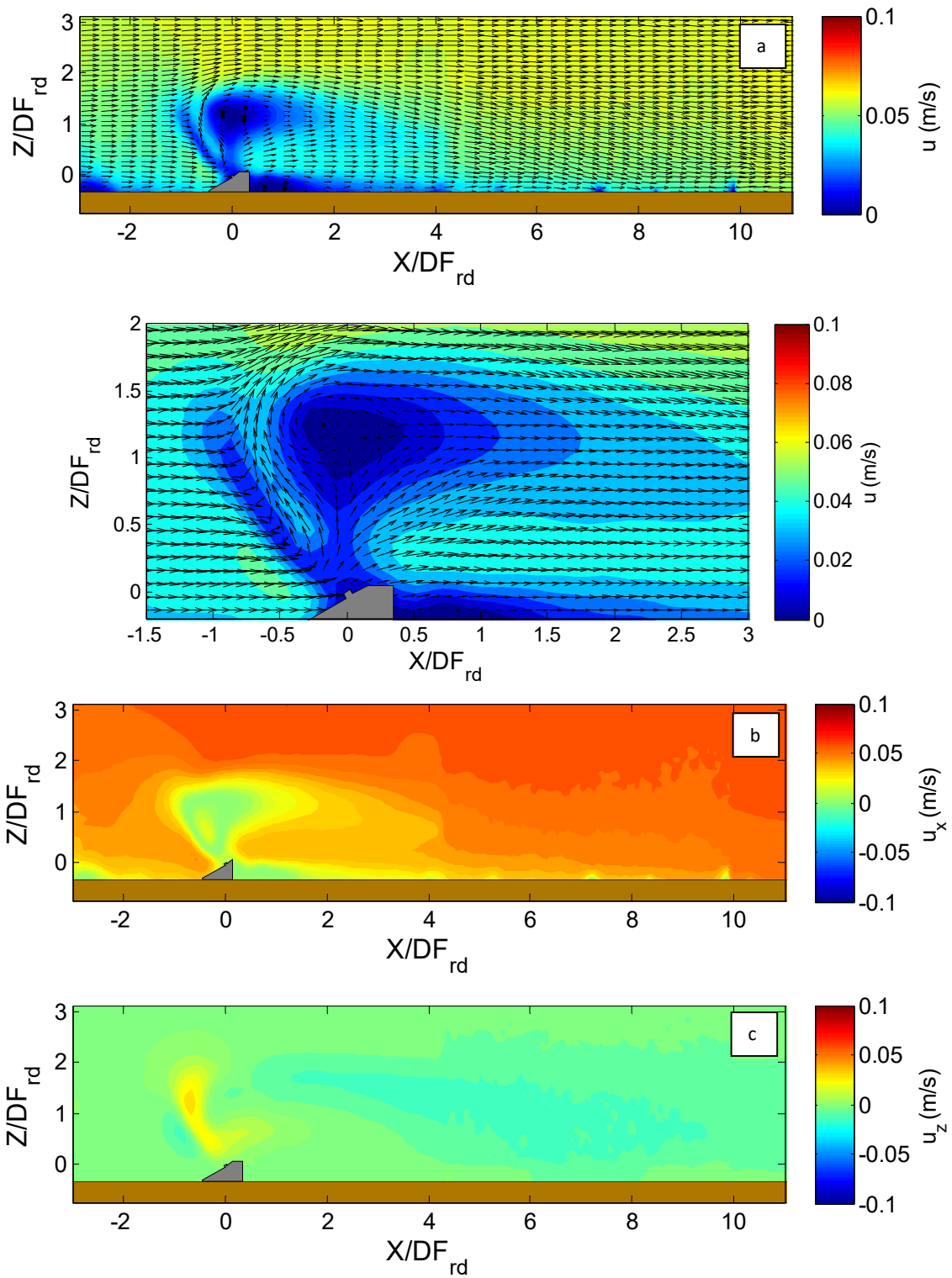


Figura 6.7. L15 (120° , co-flow, $v=0.05$ m/s, Tipo IV). Módulo de la velocidad (a). Velocidad horizontal (u_x , b). Velocidad vertical (u_z , c)

6.2.2 Campos de diluciones (LIF)

Del mismo modo que en el análisis de los campos de diluciones en campo cercano (Capítulo 5), en este apartado se estudian los campos de diluciones obtenidos tras el solape de las distintas campañas experimentales. De este modo, se consiguen caracterizar las diluciones alcanzadas por el vertido a lo largo de toda la trayectoria del mismo. En la Figura 6.8 se presentan los resultados de ensayo representativos de las 5 tipologías de descarga

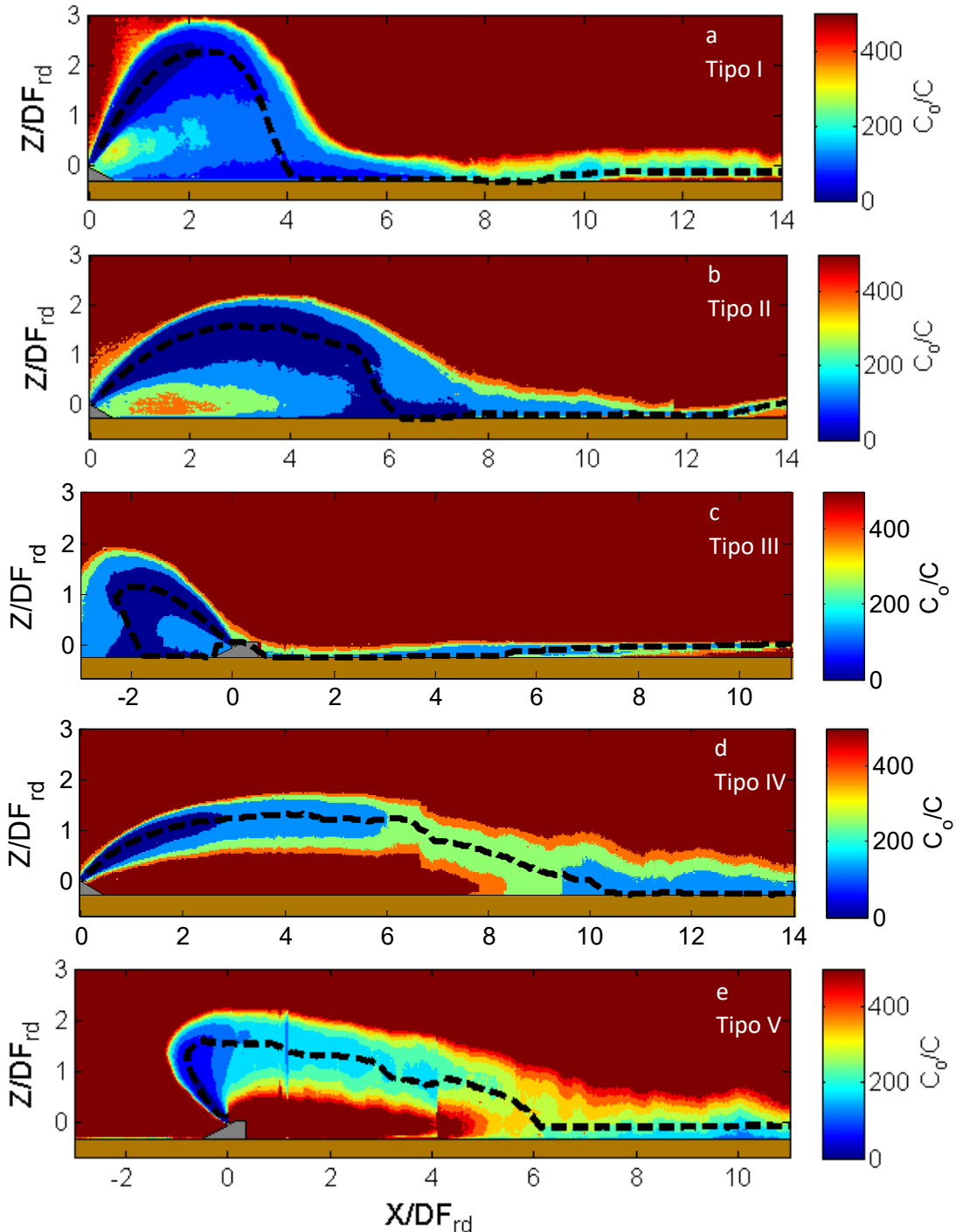


Figura 6.8. Campos de dilución obtenidos para los ensayos L03 Tipo I (a), L06, Tipo II (b), L07 Tipo III (c), L14 Tipo IV (d) y L15 Tipo V (e)

Como se muestra en los paneles a y b, las diluciones alcanzadas para una posición determinada, por ejemplo en el punto de impacto (S_i), aumentan conforme crece la corriente del medio. A modo de

ejemplo, la dilución alcanzada para un vertido tipo V es 3 veces mayor que la dilución alcanzada para un vertido tipo I. Por otro lado, atendiendo a la formación de la corriente de gravedad se puede observar como el efluente hipersalino tiende a pegarse al fondo del medio receptor, aunque para velocidades del medio elevadas esta corriente de gravedad tienda a aumentar su espesor (h). Este espesor está directamente ligado a la concentración del flujo hipersalino, por lo que a mayor dilución en las fases previas, menores diferencias de salinidad y mayor espesor de la corriente.

Respecto a la formación de la corriente de gravedad, se debe tener en cuenta que cuanto mayores sean los procesos turbulentos producidos en la zona de impacto, más tiempo tardará en estabilizarse el flujo hipersalino, y más larga será la zona de transición entre campo cercano y lejano. En la Figura 6.8c se comprueba que los procesos turbulentos colapsan nada más impactar el flujo sobre el fondo, debido a que en esta zona el medio receptor arrastra la salmuera aguas abajo, sin provocar fluctuaciones de la concentración.

Por último, se hace notar que la dilución tiende a disminuir desde el mismo momento en que la salmuera es descargada, pero sólo aumenta en el momento en que el vertido impacta sobre el fondo. Como se puede apreciar en todas las figuras mostradas, en el momento del impacto la dilución es prácticamente la misma que en la cota máxima del eje (Z_m). Esto quiere decir que la dilución que llega a la corriente de gravedad, dependerá de forma directa de los procesos turbulentos que tienen lugar previamente. Del mismo modo, y como ya se ha mencionado, la evolución de la dilución a lo largo de la corriente de gravedad es mínima, y sólo se aprecia mezcla en las zonas próximas a la interfaz con el medio receptor.

6.3 Influencia de variables geométricas y ambientales en la corriente de gravedad

6.3.1 Análisis de la zona de transición entre campo cercano y campo lejano

El comportamiento de la zona de transición entre campo cercano y lejano ha sido estudiada por diferentes autores como Roberts et al. (1997), que definieron el límite de actuación de esta zona en base a experimentos con ángulos de inclinación de 60° . Más recientemente Shao y Law (2010) o Palomar (2014) analizaron el comportamiento de la zona de transición mediante perfiles verticales, detallando los procesos turbulentos más relevantes de esta zona.

En esta tesis doctoral se lleva a cabo un análisis de los fenómenos físicos y su evolución a lo largo de la zona de transición a fin de determinar el comportamiento y la duración de los procesos previos a la formación de la corriente de gravedad en campo lejano. La primera de las acciones ha sido determinar la evolución de la dilución alcanzada a partir del punto de impacto del flujo hipersalino (X_i). Se han escogido dos ensayos con misma configuración geométrica y diferente medio receptor (Figura 6.9), a fin de representar claramente la variación de este parámetro geométrico para un vertido en estacionario y dinámico co-flow con $\theta=60^\circ$.

El análisis de la zona de transición se lleva a cabo a través del estudio de los perfiles verticales de la dilución en posiciones fijas y, como se puede observar, el flujo hiperdenso se comporta de manera muy diferente dependiendo de las condiciones ambientales. En el panel a, se muestran la localización de las secciones verticales empleadas para la representación de la evolución longitudinal de la salmuera. En el panel c (perfiles de dilución en abscisas y espesor en ordenadas) se observa un primer perfil con un valor de dilución mucho mayor y a continuación, a partir de la posición $X/DF_{rd}=8$ donde se experimenta una caída en la dilución, los perfiles verticales tienden a converger. De igual manera, el espesor de la corriente de gravedad disminuye de forma progresiva. Para este tipo de ensayos (tipo I) se identifica que la corriente de gravedad comienza a formarse a partir de la posición mencionada ($X/DF_{rd}=8$), dado que no existen grandes diferencias entre perfiles y la fluctuación es mínima. Este límite entre campo cercano y lejano, es aproximado al valor establecido por Roberts et al. (1997) en $X/DF_{rd}=9$.

Por otro lado, si se repite el mismo proceso para un ensayo con un medio receptor no estacionario (descarga tipo V), se concluye que el estudio de las mismas posiciones no son suficientes para determinar el alcance de la zona de transición. Como se puede observar en el panel b, el primer perfil de estudio ($X/DF_{rd}=5$) no se presenta en el análisis del panel d. El motivo de esta exclusión es que en la posición mencionada el flujo no ha impactado con el fondo, por lo que se descarta al no haber comenzado la zona de transición.

No obstante, se presentan 4 perfiles comenzando por la posición $X/DF_{rd}=8$, localizada inmediatamente aguas arriba de X_i donde se aprecia un perfil típico de un vertido, con una zona de mayor dilución correspondiente al eje del mismo. Del mismo modo que en el caso de descarga tipo I, en este caso los perfiles tienden a converger, observándose menores diferencias entre perfiles a medida que se avanza en la corriente de gravedad. El espesor de esta corriente es mayor y no se mantiene constante, a diferencia de la analizada previamente. Podríamos establecer el límite entre campos en $X/DF_{rd}=12$, que es un 50% mayor que el estimado para el mismo ensayo con medio receptor estacionario.

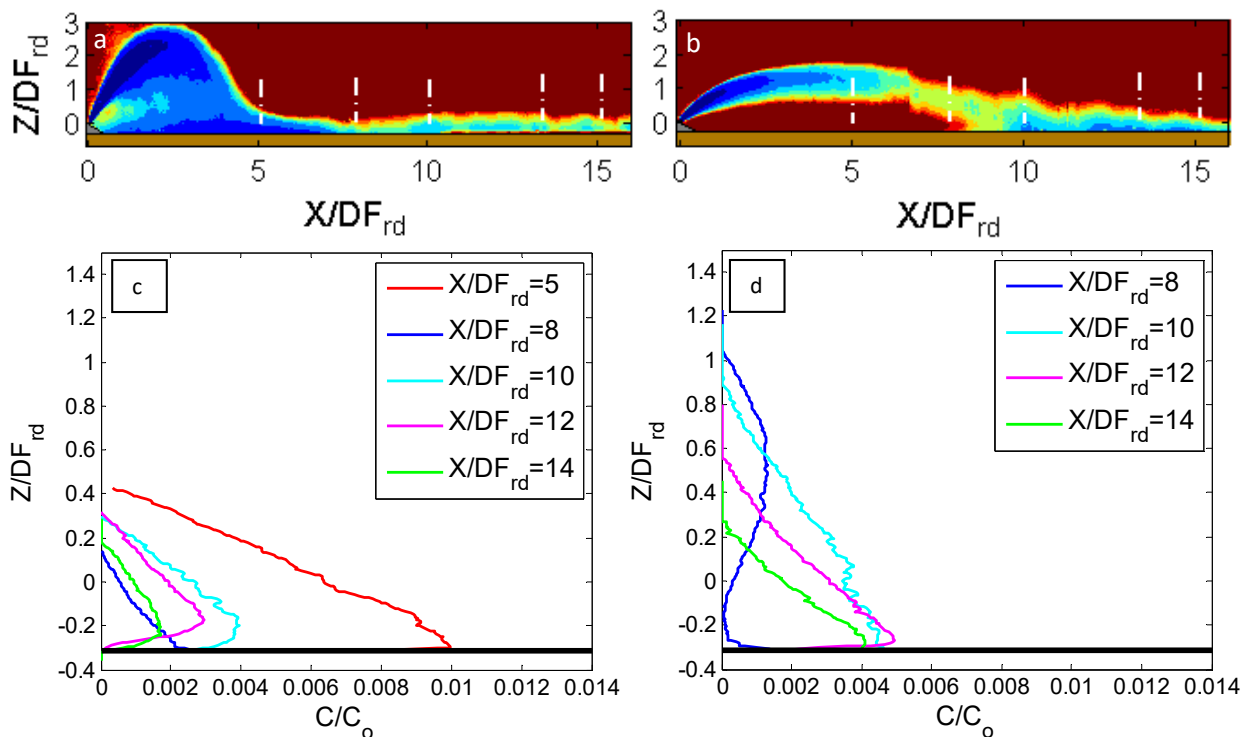


Figura 6.9. Ubicación de perfiles para ensayos L03 (60° , estacionario, Tipo I) y L14 (60° , co-flow, $v=0.05$ m/s, Tipo V) (a, b) y evolución de perfiles de dilución para ensayo (c, d)

Así pues, como conclusión se puede establecer que aunque el comportamiento de los campos de diluciones permita obtener una idea aproximada del espacio que ocupa la zona de transición, este límite es variable respecto a cada tipología de ensayo. Por lo tanto, en este estudio se ha desarrollado una metodología de determinación basada en la variación de las fluctuaciones, tal y como Palomar (2014) sugiere en su tesis doctoral para ángulos distintos de 60° . Para la caracterización de las fluctuaciones, tanto de velocidades como de concentraciones, como paso previo se estiman las trayectorias para cada campo en cuestión (PIV y LIF). A modo de ejemplo se presenta la Figura 6.10, en la que se muestra el eje de velocidades para el caso L03 (60° , medio estacionario, Tipo I).

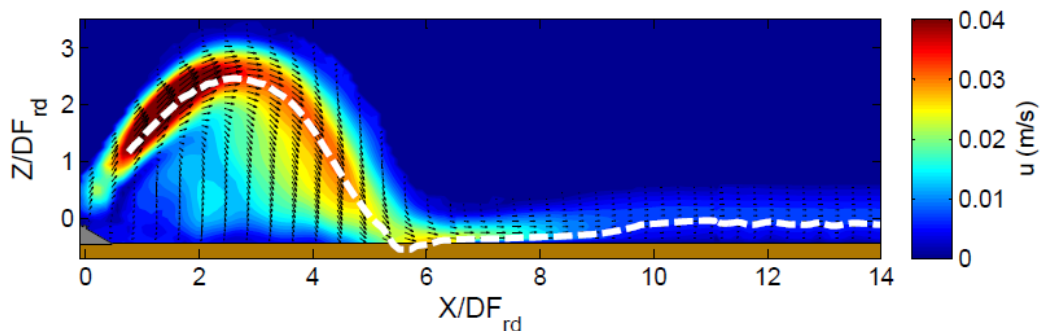


Figura 6.10. Eje velocidades máximas Ensayos L03 (60°, estacionario, Tipo I)

Como segundo paso en la determinación de X_s (final del campo cercano), se analiza la evolución de la turbulencia en la zona de transición con la fluctuación de la velocidad y la concentración del flujo, desde el punto de impacto hasta el final de la ventana de estudio (Figura 6.11).

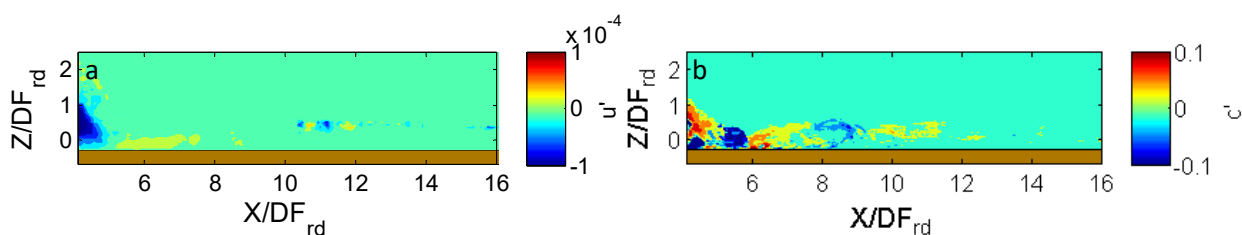


Figura 6.11. Campos de fluctuaciones de velocidad (a) y concentraciones (b)

Partiendo de la hipótesis de que la corriente de gravedad totalmente desarrollada se caracteriza por una presencia mínima de fluctuaciones de las velocidades y la concentración, se debe establecer un punto de variación mínima. Una vez que se han obtenido los campos de fluctuaciones se obtienen los valores de referencia para estimar el límite entre campo cercano y lejano. De este modo, y teniendo en cuenta el análisis de las fluctuaciones realizados por (Roberts et al., 1997) para descargas con $\theta=60^\circ$ y las recomendaciones hechas por Palomar (2014) respecto al estudio de estos campos en vertidos con $\theta \neq 60^\circ$, se busca determinar el punto a partir del cual la variación de la fluctuación sea mínima en ambos casos. Con este fin, se evalúan las fluctuaciones en el punto de impacto y se establece el punto final de la zona de transición (X_s), como aquel a partir del cual las variaciones son menores al 5% del valor estimado en X_i .

La Figura 6.12 muestra la evolución de las fluctuaciones tanto de velocidades como de concentraciones del caso L03 (60°, medio estacionario, Tipo I) a lo largo de la trayectoria del vertido. Se presentan los puntos correspondientes al punto de impacto (X_i) y al límite entre campo cercano y lejano, final de la zona de transición (X_s). Para una mejor representación de los datos obtenidos, se presenta, además el límite establecido por Roberts et al. (1997) como $X/DF_{rd}=9$.

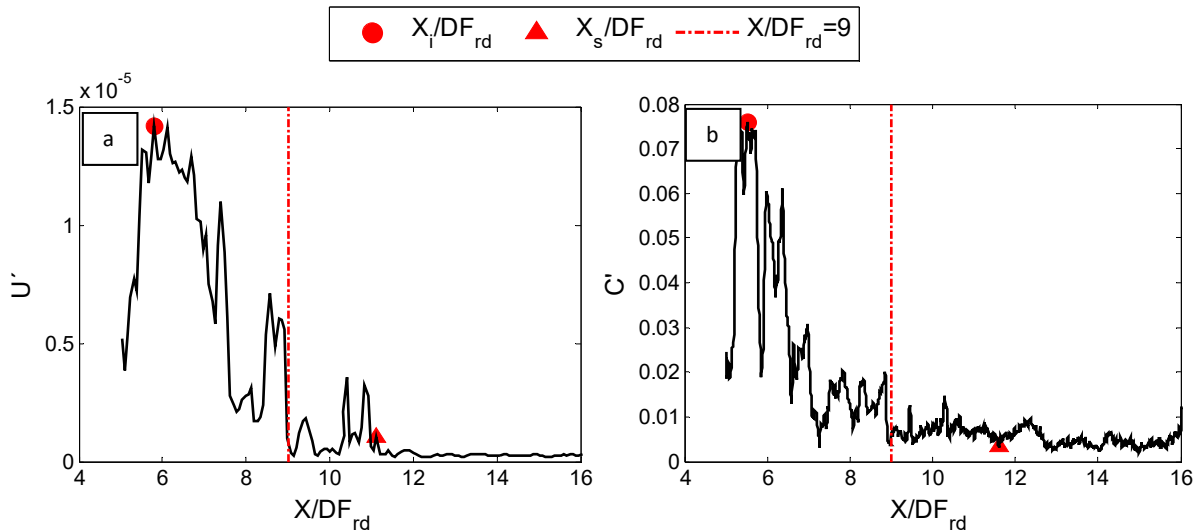


Figura 6.12. Metodología de cálculo para X_s , para el campo de fluctuaciones de velocidades (a) y de concentraciones (b). Las figuras representan la evolución de las fluctuaciones a lo largo del eje del vertido. Se puede apreciar como para un vertido en medio estacionario (tipo I) el colapso de las fluctuaciones de velocidad y concentración se produce para $X/DF_{rd}=11.3$ y 11.8 , respectivamente. Se hace notar que, el máximo absoluto para la zona de análisis (pluma y zona de transición), corresponden con el punto de impacto del vertido empleado para la estimación del límite X_s . Como se puede comprobar, se obtienen diferentes valores a partir de los campos PIV y LIF. Se ha optado por emplear el valor estimado con las fluctuaciones de velocidad, dado que se aprecian menores variaciones aguas abajo de X_s , que los presentes en la evolución de las fluctuaciones de concentración. A continuación, se presenta una tabla con los valores de X_i y X_s , identificados como los puntos que enmarcan la zona de transición (Tabla 6.1).

Tabla 6.1. Valores para inicio (X_i) y final (X_s) para la zona de transición adimensionalizadas

	X_i	X_i/DF_{rd}	X_s	X_s/DF_{rd}
L01	274.00	4.42	555.59	8.96
L02	416.51	3.59	870.76	7.51
L03	417.00	5.21	890.01	11.13
L04	520.45	4.49	1049.40	9.05
L05	nd	nd	nd	nd
L06	496.28	6.20	932.60	11.66
L07	nd	nd	nd	nd
L08	835.36	7.20	1107.20	9.54
L09	870.21	7.50	1186.00	10.22
L10	520.80	6.51	929.54	11.62
L11	236.36	2.95	969.22	12.12
L12	nd	nd	nd	nd
L13	nd	nd	nd	nd
L14	918.91	11.49	1028.70	12.86
L15	522.93	6.54	1051.80	13.15

Cabe destacar que, los ensayos L12 (45°, co-flow, $v=0.05$ m/s, Tipo IV) y L13 (135°, counter-flow, $v=0.05$ m/s, Tipo V) no se presentan aquí debido a que los campos de diluciones y velocidades obtenidos, no tienen la suficiente calidad para realizar el montaje de las tres ventanas de estudio empleadas. Del mismo, los ensayos L05 y L07, son vertidos en counter-flow de $\theta=30^\circ$ (tipo III), presentan una evolución distinta al resto de ensayos, considerando que el campo lejano se forma al producirse la caída de la salmuera sobre el fondo del medio receptor.

Se han separado los ensayos realizados según el ángulo de descarga y la configuración de la misma. Así pues, se obtienen dos valores de X_s para un mismo ángulo y velocidad del medio (co-flow y counter-flow). Con el objetivo de encontrar un patrón del comportamiento del inicio del campo lejano, se presenta la Figura 6.13.

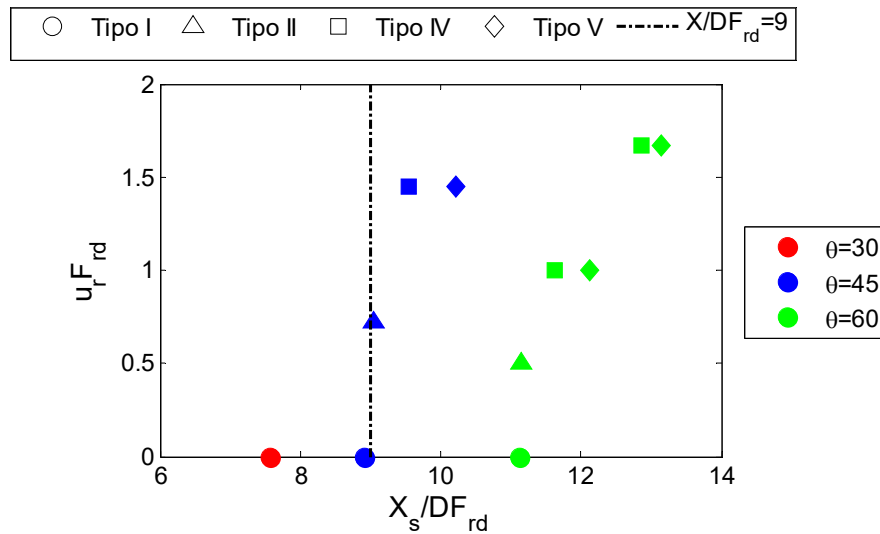


Figura 6.13. Evolución del límite X_s respecto a la velocidad del medio receptor ($u_r F_{rd}$)

La evolución presentada en la Figura 6.13 muestra una tendencia creciente del parámetro X_s , que está directamente relacionado con la velocidad del medio y el ángulo del vertido. De forma general el inicio del campo lejano (X_s) se produce antes para vertidos co-flow (tipo IV), que para counter-flow (tipo V) salvo para el ángulo de 60°.

Por otro lado, y a fin de comparar los resultados obtenidos en esta tesis se representa el valor establecido por Roberts et al. (1997) para el límite del campo cercano ($X/DF_{rd}=9$). Se ha comprobado que este valor, aunque se aproxima a los límites obtenidos para medios estacionarios (tipo I), aplicando la metodología propuesta en este trabajo de investigación, no es aplicable a vertidos en medio dinámico. Una de las líneas de avance en este campo sería el de completar el análisis con más vertidos, con el objetivo de obtener una formulación que permita determinar este límite respecto al parámetro dinámico, $u_r F_{rd}$.

La evolución del espesor de la corriente de gravedad (h) a lo largo de la zona de transición entre los diferentes tipos de vertidos se presenta la Figura 6.14. Se muestra la variación de los espesores del vertido debido a la influencia del medio, así como el recorrido que es necesario para que colapse la fluctuación de la velocidad y se desarrolle por completo el campo lejano. El tramo mostrado en la siguiente figura corresponde a los espesores de la zona de transición, desde el punto de impacto (X_i), hasta el final del campo de visión. Del mismo modo que en la figura anterior, se presenta el valor límite establecido por Roberts et al. (1997).

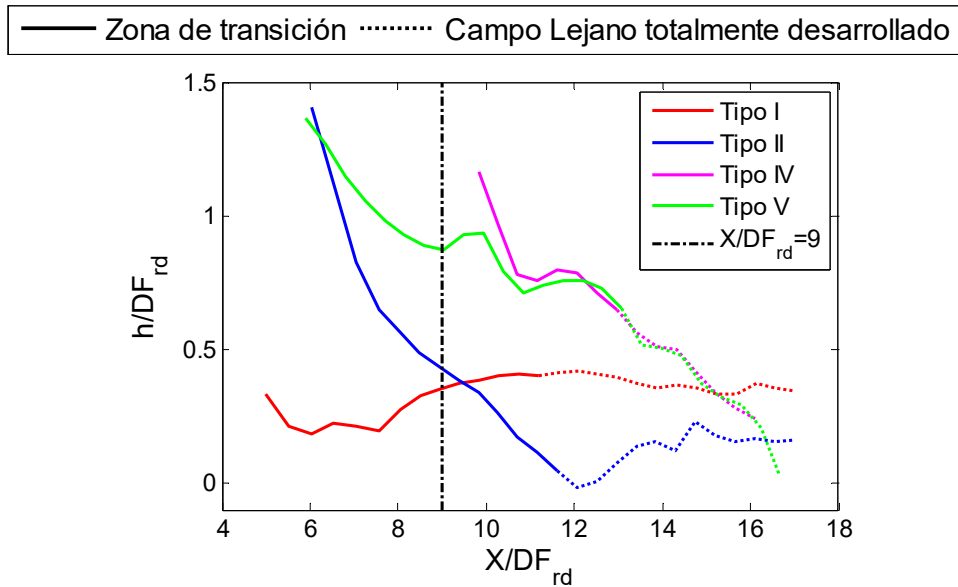


Figura 6.14. Evolución del espesor de la corriente de gravedad para la Spreading Layer y el campo lejano.

Se ha representado en línea continua la zona de transición y en línea discontinua el campo lejano. De este modo, se puede analizar el comportamiento del espesor de la corriente de gravedad. Se observa como los espesores para un vertido tipo II varían de forma brusca, con un mismo patrón para los vertidos en medios dinámicos (Tipos II, IV y V). Por el contrario, las descargas en medios estacionarios tienden a estabilizarse de forma más progresiva, manteniendo un espesor aproximadamente constante una vez que han alcanzado el campo lejano.

6.3.2 Análisis dimensional en la corriente de gravedad. Influencia del parámetro $u_r F_{rd}$ sobre la corriente de gravedad

En este apartado se realiza un análisis adimensional sobre campo lejano similar al presentado en el Capítulo 4 de esta tesis doctoral (campo cercano). Se estudian las variables empleadas para la caracterización de una corriente de gravedad para comprobar el comportamiento de las corrientes de gravedad bajo diferentes condiciones ambientales (velocidad, calado y sentido de la descarga).

Para completar la definición de las variables de estudio en campo lejano se presenta en la Figura 6.15 un esquema de la zona de transición, lo que corresponde al tramo correspondiente desde X_r en adelante. Con ello se caracterizan las variables de estudio (geométricas y diluciones) en la zona de transición entre campo cercano y campo lejano, y en la corriente de gravedad desarrollada.

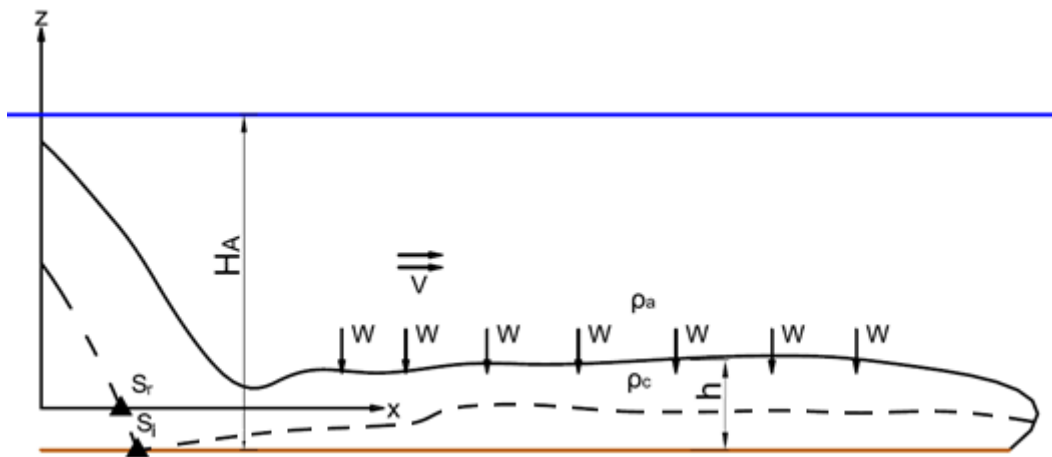


Figura 6.15. Esquema vertido en campo cercano

Donde:

H_A : Calado del medio receptor.

v : Velocidad del ambiente receptor.

W : Flujo de caudal proveniente del medio receptor que se incorpora a la corriente de gravedad.

h : Espesor de la corriente de gravedad, posición en la que $C=10\%C_c$.

C_c : Concentración en el eje de la corriente de gravedad.

S_r : Dilución (C_o/C) alcanzada en el punto de retorno.

S_i : Dilución alcanzada en el punto de impacto.

ρ_a : Densidad del ambiente receptor.

ρ_c : Densidad de la corriente de gravedad.

Con el propósito de estudiar la afección de la velocidad del medio receptor sobre el final de la zona de transición, se presenta la Figura 6.16. Ésta presenta la relación del límite entre campo cercano y campo lejano (X_s) con el parámetro adimensional $u_r F_{rd}$. Como ya se ha descrito, este parámetro muestra la relación de la velocidad del medio receptor respecto a la velocidad del efluente ($u_r=v/u_o$) y el número de Froude densimétrico.

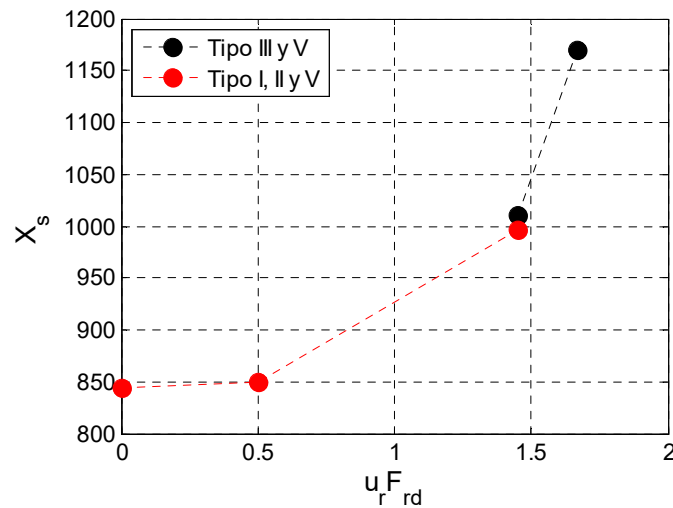


Figura 6.16 Evolución X_s para $u_r F_{rd}$ crecientes

Como se puede observar, a medida que crece la velocidad del medio receptor, el límite entre campo cercano y campo lejano aumenta. Este fenómeno es el esperado para esta variable, ya que a medida que aumentamos la velocidad, el impacto de la pluma sobre el fondo se incrementa.

Así como el número de Froude densimétrico (F_{rd}) es empleado para caracterizar el flujo de salmuera en campo cercano, en corrientes de gravedad y flujos bicapa es frecuente caracterizar los flujos mediante el número de Richardson (R_i). Algunas investigaciones de referencia que emplearon este parámetro fueron Altinakar et al. (1996) y Hallworth et al. (1996). En estos trabajos se empleó R_i para explicar el comportamiento de flujos hiperdensos. El número de Richardson se relaciona las fuerzas de flotabilidad y el espesor de la corriente, con la velocidad de avance de la misma.

$$R_i = \frac{g'_o h}{u^2} \quad [6.1]$$

Donde:

g'_o : Gravedad reducida. $g'_o=(\rho_o-\rho_a)g/\rho_a$.

h : Espesor de la corriente de gravedad.

u : Módulo de la velocidad en el perfil estudiado.

Un valor de $R_i \ll 1$ significa que la flotabilidad tiene poca importancia en el comportamiento de la corriente de gravedad. Por el contrario si $R_i \gg 1$, en este caso la flotabilidad es relevante, y por tanto la energía cinética tiene poco potencial para homogeneizar el fluido o, en otras palabras, para lograr la mezcla de las fases presentes en la corriente de gravedad.

No obstante el valor de R_i evoluciona a lo largo de la corriente de gravedad debido a que depende del valor en cada posición de la dilución a través de características geométricas e hidrodinámicas. Solamente para vertidos con una corriente de gravedad lo más uniforme y homogénea posible, como el caso de descargas tipo I, se podría obtener un valor medio de R_i . Por ello, para evaluar el comportamiento de este parámetro respecto a las condiciones hidrodinámicas del medio se presenta la Figura 6.17, en la que se representa el valor de R_i en el inicio del campo lejano (X_s) de los ensayos tipo analizados, L03, L06, L07, L14 y L15.

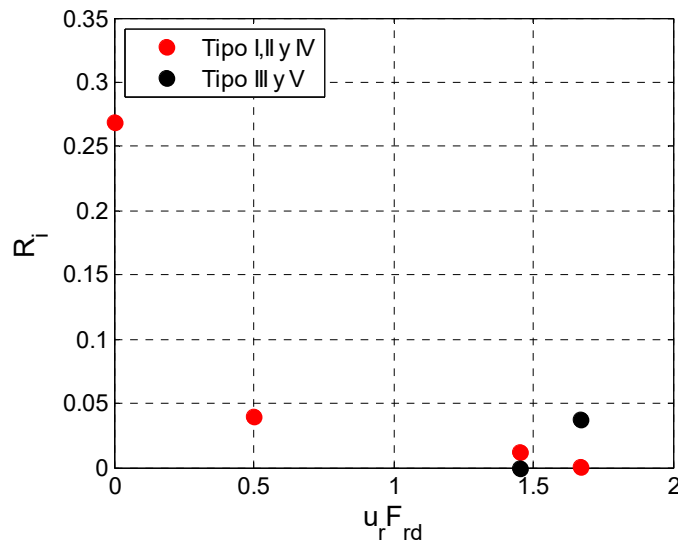


Figura 6.17. Evolución R_i en X_s para diferentes velocidades del medio receptor

Se han separado los vertidos presentados en co-flow (tipos I, II, y IV) y counter-flow (tipos III y V). De este modo, se pretende mostrar la influencia del sentido de descarga sobre el valor de R_i . Como se puede apreciar, el número de Richardson decrece conforme aumenta la velocidad. Como se ha visto el R_i es inversamente proporcional a la velocidad de avance del fluido hiperdenso, y por otro lado es directamente a la flotabilidad (g') y al espesor de la corriente de gravedad (h). Por ello se puede concluir de la Figura 6.16 que la velocidad es dominante en el comportamiento del parámetro R_i en el marco de este estudio, ya que a mayores velocidades éste disminuye notablemente, casi hasta ser despreciable. Este fenómeno, implica que la corriente de gravedad tiene un punto de fuerte potencial de dilución en esta localización.

Por otro lado, los vertidos en counter-flow (tipos III y V) muestran un patrón diferente. En primer lugar los vertidos tipo III, sin inversión, alcanzan un grado alto de dilución en el proceso de descarga, y posteriormente en el impacto del flujo sobre el fondo. De esta forma, se alcanza un equilibrio entre fuerzas de flotación e hidrodinámica del medio, que provoca el arrastre sobre el fondo de la corriente de gravedad. Al acelerarse, la cinética gana en importancia y la flotación pierde peso. Por el contrario, los vertidos en los que existe inversión (tipo V) tienden a precipitar sin haber experimentado tanto grado de dilución como en el caso anterior. Por lo tanto, la corriente de gravedad formada todavía alberga una diferencia de densidad con el medio importante.

6.4 Análisis en perfil de la corriente de gravedad generada en campo lejano

Una vez determinado el valor de X_s , limitando de esta forma la zona del campo lejano, se lleva a cabo un análisis de la corriente de gravedad mediante los perfiles verticales obtenidos a partir de las técnicas de

caracterización del flujo en su plano medio, PIV y LIF. De esta forma, se presenta un análisis de la corriente de gravedad totalmente desarrollada.

El esquema presentado en este análisis es el siguiente. En primer lugar presenta un campo de diluciones en el que aparecen señaladas las localizaciones de los perfiles estudiados. A continuación, son representados los perfiles de velocidades y de concentraciones para cada perfil. En las gráficas se emplea el valor de la velocidad y de la concentración inicial para la adimensionalización de los perfiles. Se presentan a continuación los perfiles mencionados para los ensayos L03 (60°, medio estacionario, Tipo I), L06 (60°, co-flow, $v=0.015$, Tipo II), L07 (120°, counter-flow, $v=0.015$, Tipo III), L14 (60°, co-flow, $v=0.05$, Tipo IV) y L15 (120°, counter-flow, $v=0.05$, Tipo V).

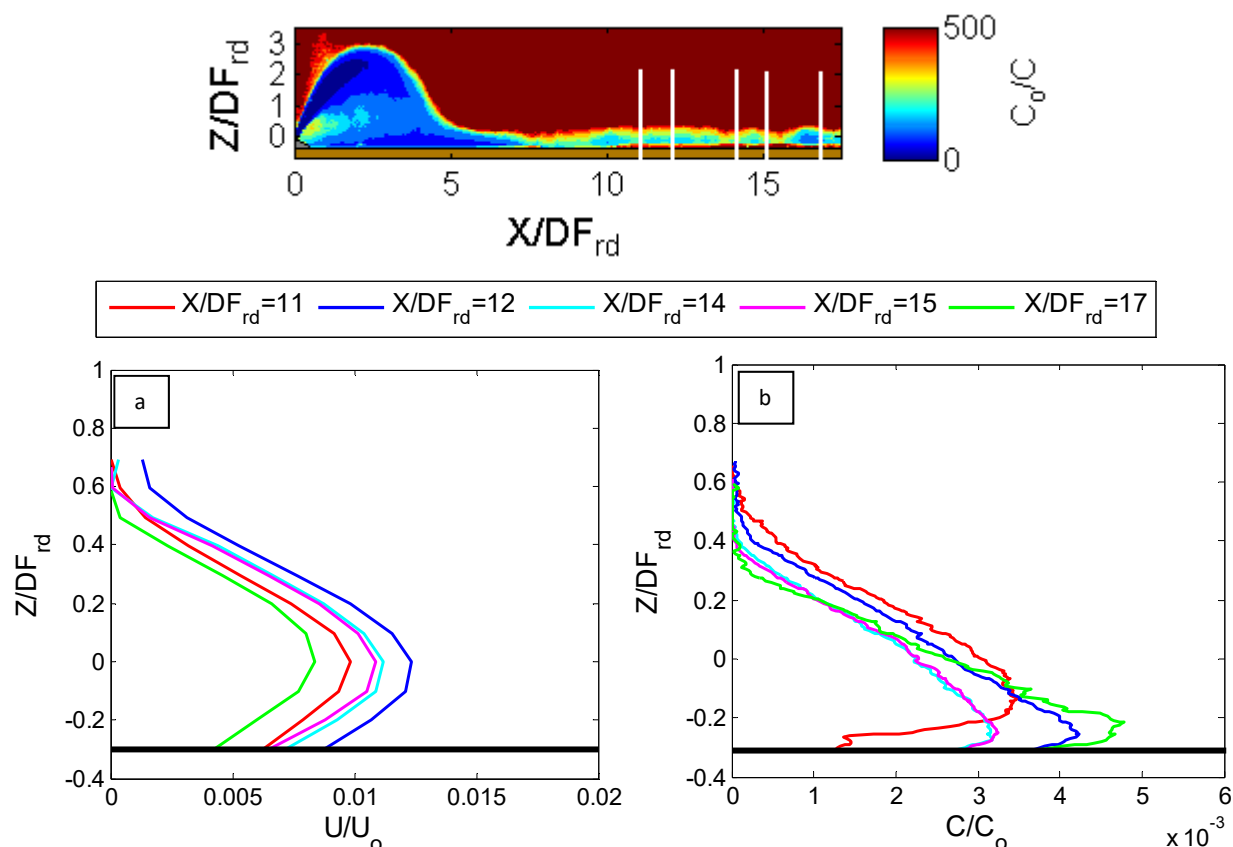


Figura 6.18. Perfiles verticales de la corriente de gravedad L03 (60°, medio estacionario, Tipo I) velocidad adimensionalizada (a) y diluciones (b)

En la Figura 6.8 se detalla la localización de los perfiles localizados en la corriente de gravedad totalmente desarrollada. La norma empleada para elegir los perfiles de análisis ha sido equiespaciarse las posiciones, o, en su defecto, centrarse en secciones representativas; inicio, final y centro del dominio de visualización. Esta zona representada corresponde con la zona homogeneizada del vertido, como muestra la Figura 6.18a, marcando un claro descenso de la velocidad en el último perfil analizado.

Por otra parte, los perfiles de concentración muestran una clara tendencia a pegarse al fondo del medio receptor, conforme avanza la corriente de gravedad y ésta pierde velocidad. Este comportamiento es acorde con la relación establecida por el número de Richardson, ya que para velocidades bajas las fuerzas de flotabilidad tienen más peso. Este efecto es más notable forma del perfil $X/DF_{rd}=17$.

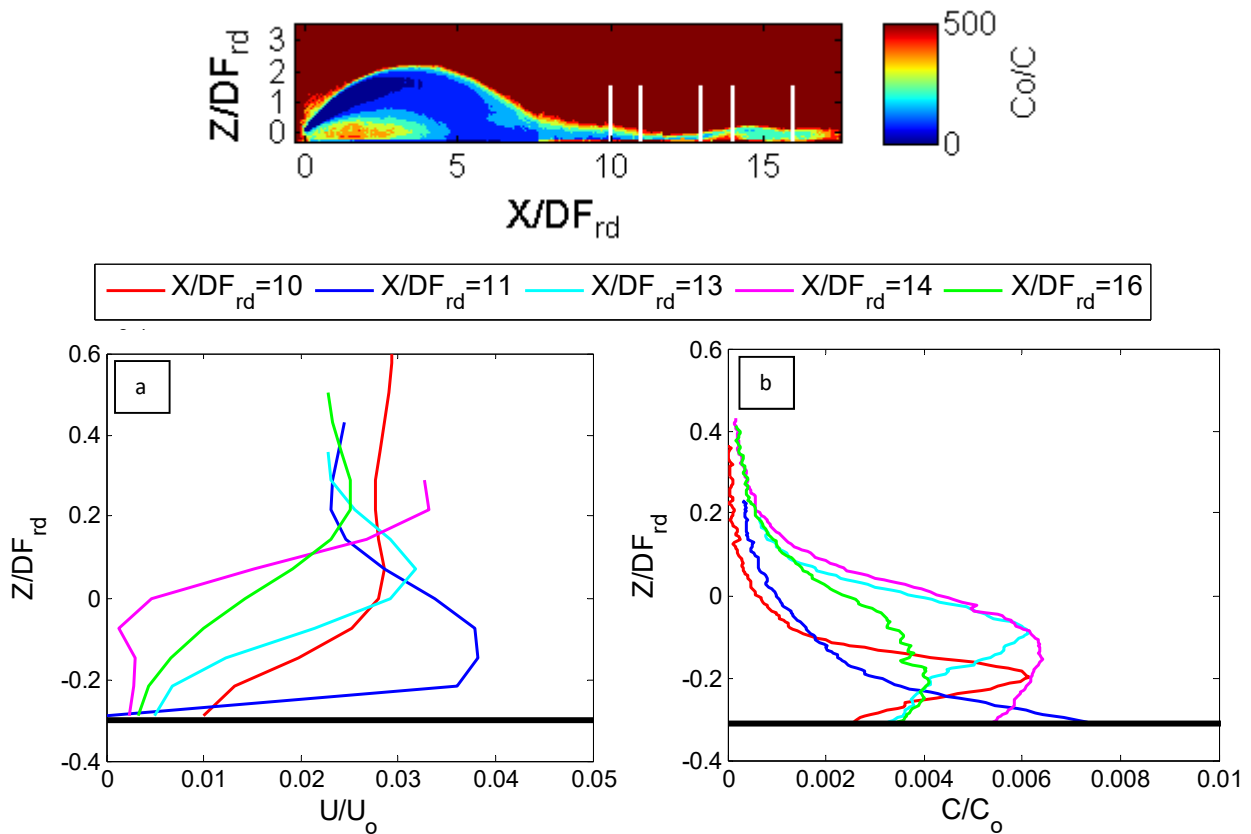


Figura 6.19. Perfiles verticales de la corriente de gravedad L06 (60° , co-flow, $v=0.015$ m/s, Tipo II) velocidad adimensionalizada (a) y diluciones (b)

El análisis del tipo de vertido II, Figura 6.19, muestra el comportamiento de un vertido con descarga co-flow, con una hidrodinámica del medio receptor baja. Este tipo de descargas comparten gran similitud con los vertidos tipo I, salvo en que el impacto de la pluma sobre el fondo (X_i) se incrementa por efecto de la velocidad del medio. De esta forma, se presentan los perfiles de velocidad (Figura 6.19a) desde X_i a fin de comprobar la evolución del mismo. A diferencia de lo que ocurre en descargas tipo I, en este caso las secciones no muestran una similitud aplicable entre las diferentes posiciones. El colapso de las turbulencias es más lento y por tanto los campos de velocidad muestran alteraciones a lo largo de la corriente de gravedad.

Por otro lado, la Figura 6.19b muestra los perfiles de concentración adimensionalizados, donde se observa una elevación de la corriente de gravedad, como evidencia el perfil $X/DF_{rd}=11$, en el que se aprecia un incremento de la posición de la concentración máxima. De igual manera, dado que la corriente de gravedad está influenciada por la hidrodinámica del medio, la componente cinética del flujo hiperdenso gana peso respecto a la corriente de gravedad analizada en el tipo I. En consecuencia, el número de R_i esperado es más bajo. No obstante, hay que resaltar que el montaje de los campos de velocidades y concentraciones para este ensayo específico resultó el de peor calidad, debido a que la zona de solape coincidió en zonas de baja intensidad lumínica proveniente del haz (ver Figura 6.8b).

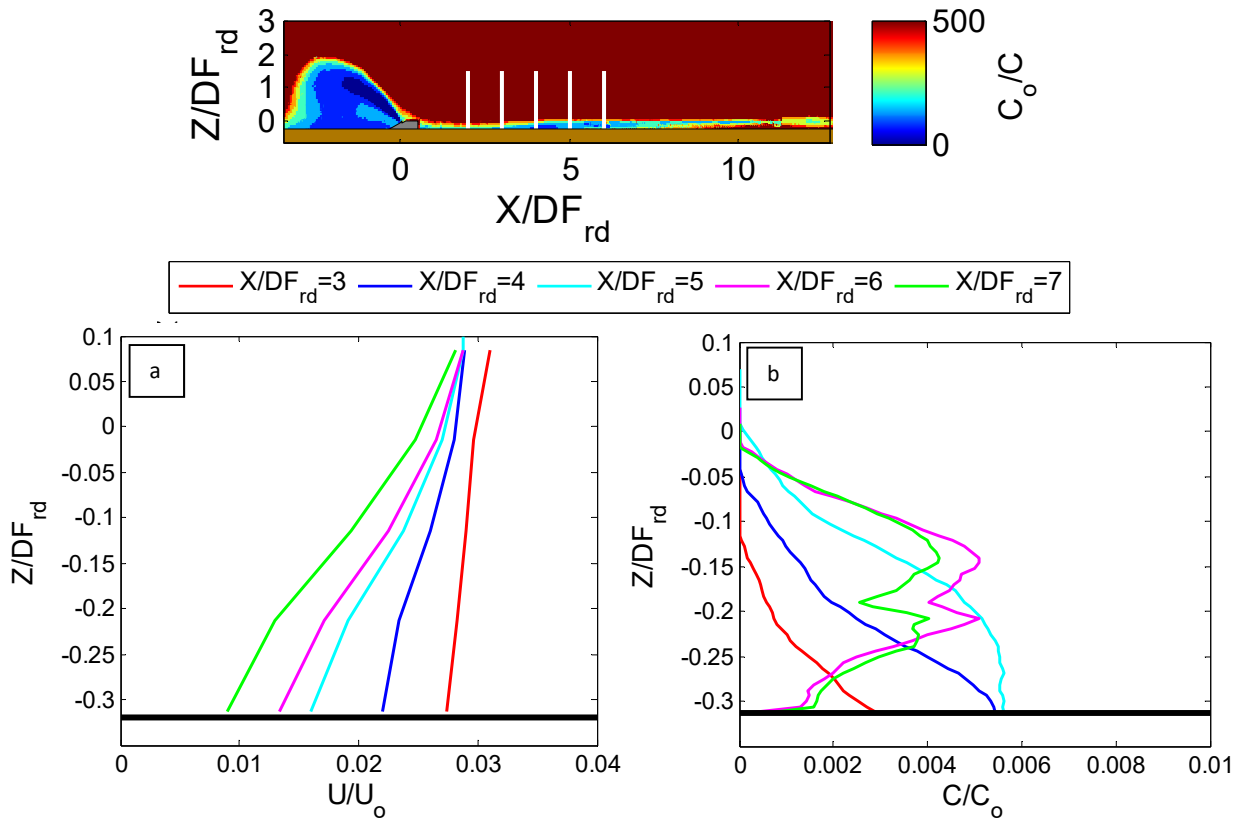


Figura 6.20. Perfiles verticales de la corriente de gravedad L07 (120° , counter-flow, $v=0.015$ m/s, Tipo III) velocidad adimensionalizada (a) y diluciones (b)

La Figura 6.20 muestra el análisis de perfiles del campo lejano para descargas tipo III. Dado que en este caso el vertido en counter-flow no experimenta la inversión del flujo, los procesos turbulentos originados en el punto de impacto y la presencia del difusor, conllevan una gran pérdida de energía cinética de la corriente de gravedad. Es por ello que la zona de transición termina muy cerca del difusor ($X/DF_{rd}=3$).

Como se puede observar en la Figura 6.20a, la corriente de gravedad se desarrolla totalmente al ser arrastrada por la corriente del medio receptor. De este modo, el comportamiento es similar al de la corriente de gravedad formada por una descarga tipo I. Las secciones analizadas mantienen una similitud geométrica, y muestran una clara atenuación de la velocidad. Por otro lado los perfiles mostrados en la Figura 6.20b muestran un aumento de la salmuera por acumulación en las zonas finales ($X/DF_{rd}=7$). Por lo tanto, teniendo en cuenta el descenso de la cinética en la última fase del campo lejano, y el aumento de las fuerzas de flotación, se obtienen valores de R_i elevados. Esto evidencia una capacidad de dilución menor que el mismo ensayo con descarga co-flow (tipo II). Hay que hacer notar, que en este caso, el solape de campos de concentraciones muestra algunas discontinuidades que se ven reflejadas en los perfiles $X/DF_{rd}=6$ y 7.

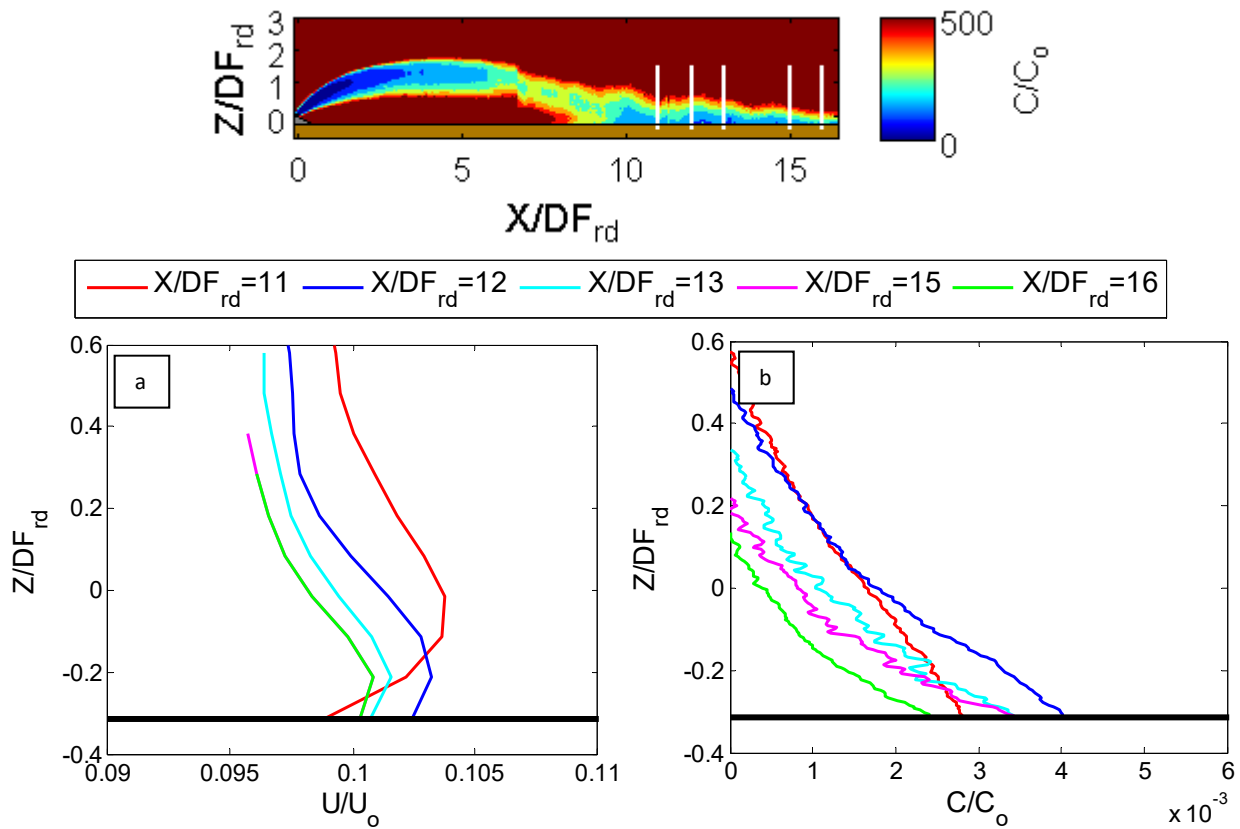


Figura 6.21. Perfiles verticales de la corriente de gravedad L14 (60° , co-flow, $v=0.05$ m/s, Tipo IV) velocidad adimensionalizada (a) y diluciones (b)

El comportamiento de las corrientes de gravedad bajo la influencia de medios receptores con una hidrodinámica fuerte es presentado en la Figura 6.21. Para este tipo de vertidos (tipo IV) las secciones se han escogido acorde a las empleadas en un vertido tipo I, a fin de estudiar su evolución aproximadamente desde X_i . Como se puede observar, los perfiles de velocidad, muestran un descenso de las velocidades a lo largo de la corriente de gravedad. Sin embargo, este descenso se detiene en la sección $X/DF_{rd}=15$, donde la velocidad promedio de la corriente en ese punto es el doble que la velocidad del medio receptor ($u=0.1$ m/s).

Respecto a los perfiles de concentración, éstos muestran un decaimiento gradual de la concentración en su avance. No obstante, en este caso se puede observar cómo las secciones analizadas mantienen una similitud geométrica, que se caracteriza por localizar el máximo de la corriente pegado al fondo del medio receptor. Este máximo de concentración corresponde con una acumulación de salmuera sobre el fondo marino ya que, como se ha visto, a mayores velocidades menores espesores de la corriente de gravedad.

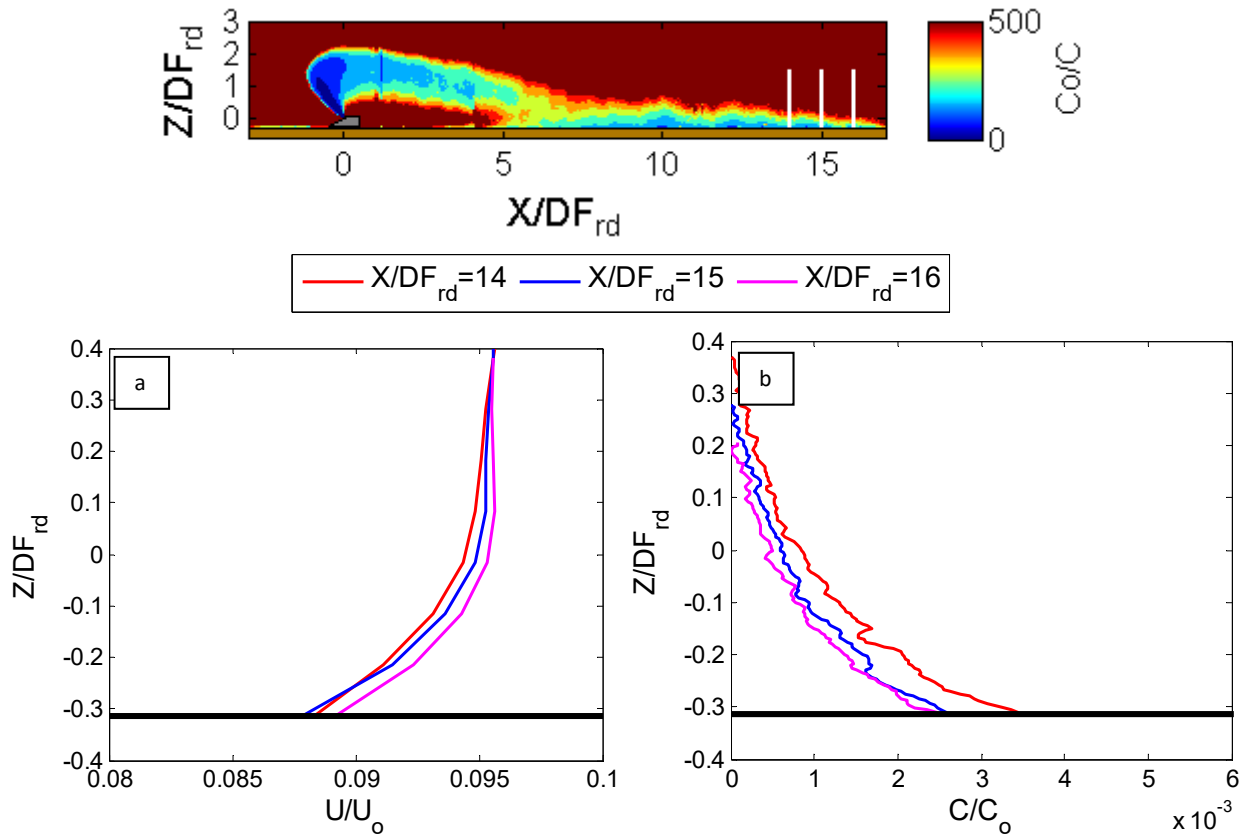


Figura 6.22. Perfiles verticales de la corriente de gravedad L15 (120° , counter-flow, $v=0.05$ m/s, Tipo V) velocidad adimensionalizada (a) y diluciones (b)

Por último, se presenta el análisis realizado para vertidos tipo V, descargas counter-flow con inversión del flujo y en medios receptores con hidrodinámica fuerte. En este caso, como se puede observar se han representado sólo 3 perfiles, ya que el punto de formación de la corriente de gravedad se encuentra en $X/DF_{rd}=13.5$. Por lo tanto, como se puede ver en la Figura 6.22a los perfiles de velocidad convergen de forma clara a un único perfil y, el comportamiento de los perfiles de concentración (Figura 6.22b) sigue el mismo principio.

Así pues, se puede concluir que tanto para vertidos con descarga co-flow (tipo IV) como para counter-flow (tipo V), el comportamiento de los perfiles de velocidades y concentraciones es similar. No obstante, la evolución de la capacidad de dilución de la corriente de gravedad formada, en cada caso varía según sea la hidrodinámica del vertido, o su dilución inicial.

Para un análisis en detalle se han calculado los valores para el número de Richardson en varias secciones del vertido. Para ello, se estima la velocidad media en el perfil de estudio así como el espesor de cada uno. Del mismo modo se obtiene la gravedad reducida (g') de cada perfil, y se promedia el valor obtenido en cada uno de ellos. La Tabla 6.2 muestra el valor de R_i para cada uno de los ensayos de la campaña experimental de campo lejano. Nótese que no se presentan los resultados de los ensayos L12 y L13, dado que los datos obtenidos no son aceptables para su análisis.

Tabla 6.2. Valores de R_i para la corriente de gravedad totalmente desarrollada.

	F_{rd}	D (mm)	u	$u_r F_{rd}$	R_i
L01	31	2	0.7	0.00	2.54
L02	58	2	1.2	0.00	0.59
L03	20	4	0.6	0.00	1.35
L04	58	2	1.2	0.73	0.66
L05	58	2	1.2	0.73	0.20
L06	20	4	0.6	0.50	0.18
L07	20	4	0.6	0.50	0.15
L08	58	2	1.2	1.45	0.01
L09	58	2	1.2	1.45	0.04
L10	20	4	0.6	1.00	0.01
L11	20	4	0.6	1.00	0.01
L14	20	4	0.6	1.67	0.01
L15	20	4	0.6	1.67	0.01

Para una visualización de los datos obtenidos, se presenta la Figura 6.23 en la que se presentan los valores de R_i promedio de cada una de las corrientes de gravedad formadas. Frente a los valores de la velocidad en el medio receptor. Se observa una caída de los valores a medida que aumenta la velocidad del medio. Si se hace un análisis por ángulos se observa como la divergencia disminuye con la velocidad. Por otro lado, la diferencia entre resultados en counter-flow (Tipos III y V) y entre los resultados de vertidos co-flow (Tipos II y IV).

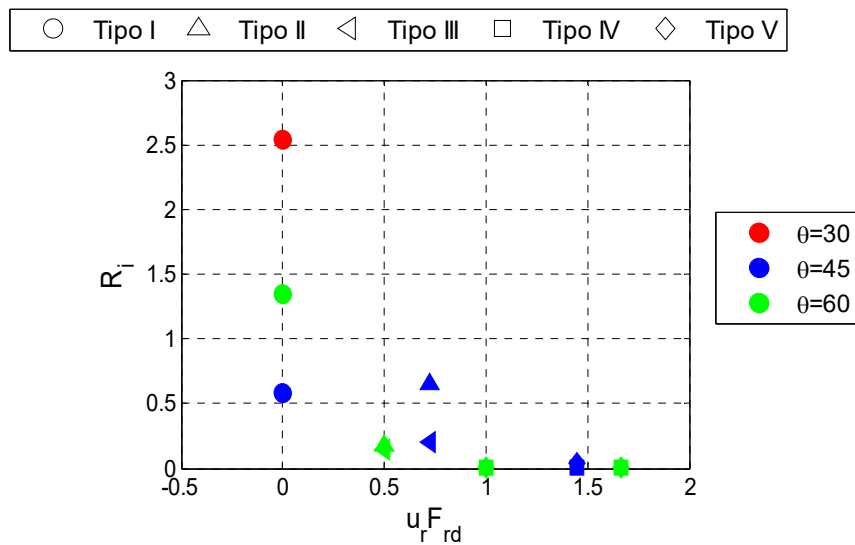


Figura 6.23. Evolución del número de Richardson respecto a la velocidad del medio receptor

Como conclusión se puede decir que el factor cinético en la corriente de gravedad aumenta conforme aumenta la velocidad del ambiente receptor, incrementando potencial del flujo hiperdenso de homogeneizarse con el ambiente receptor. Por otro lado, las diferencias apreciadas entre vertidos en co-flow y counter-flow (tipos III y V respectivamente), sólo son apreciables para $\theta \leq 45^\circ$, mientras que para ángulos de vertidos mayores, esta diferencia es despreciable. Esto es debido a que los vertidos en counter-flow siempre presentan inversión para $\theta=60^\circ$.

6.5 Caracterización de la corriente de gravedad en planta

6.5.1. Evolución de los campos de concentración

Por último, se presenta en este apartado el análisis de la corriente de gravedad en planta a fin de completar la caracterización del campo lejano de un vertido hiperdenso. Para este cometido, se ha empleado el sistema de conductivímetros desarrollado específicamente para este trabajo, por el grupo de investigación GEAMA. Se recuerda aquí que el sistema ha sido registrado en la OEPM con fecha 22/01/2016 y referencia P20160006. Como se ha explicado con detalle en el Capítulo 3, este sistema se basa en el registro de concentraciones a partir de una malla de conductivímetros emplazada sobre el falso fondo del canal de experimentación, empleado en la campaña experimental.

De esta forma, se logra caracterizar la evolución de la corriente de gravedad en planta, obteniendo una medida complementaria a los datos obtenidos empleando las técnicas de visualización láser. La Figura 6.24 muestra la configuración de los sistemas de medida en el canal de experimentación. Como se puede apreciar, la toma de datos del flujo hiperdenso se solapa con los registros de las técnicas láser, en el extremo final de la ventana de análisis. Este hecho permite comprobar la concordancia de ambas técnicas, y asegurar el correcto funcionamiento de la técnica desarrollada.

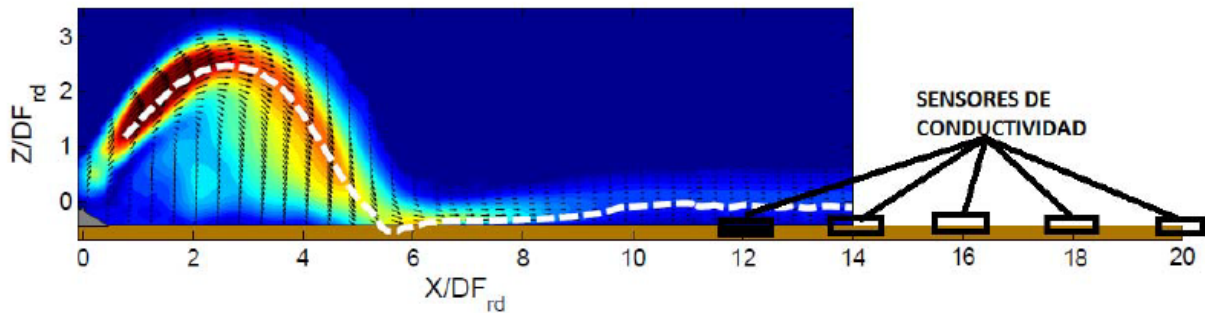


Figura 6.24. Disposición de los sensores de conductividad en el canal de experimentación

Para la disposición de las sondas de conductividad se emplea una base rectangular que se emplaza en la parte final de la ventana de estudio (Figura 6.25), en la que se colocan un total de 21 sondas (7 x 3). Se caracterizó un área total de (1000 x 300 mm²), malla (500 mm x 300 mm) en dos posiciones diferentes, superponiendo la última columna de la primera posición, con la primera columna de la segunda posición (S10, S11 y S12). Para la presentación de los resultados obtenidos, se aplica un promediado que corresponde con el estado estacionario del flujo hiperdenso. Este proceso de obtención de campos es explicado en el Capítulo 3 de esta tesis. Por tanto, a continuación se procede a mostrar los registros de los campos de concentración obtenidos para los ensayos L03, L06, L07, L14 y L15, correspondientes a los tipos de vertido I, II, III, IV y V.

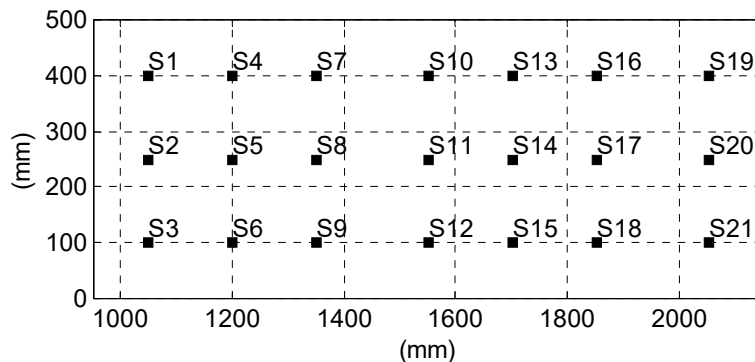


Figura 6.25. Posición de las sondas de conductividad.

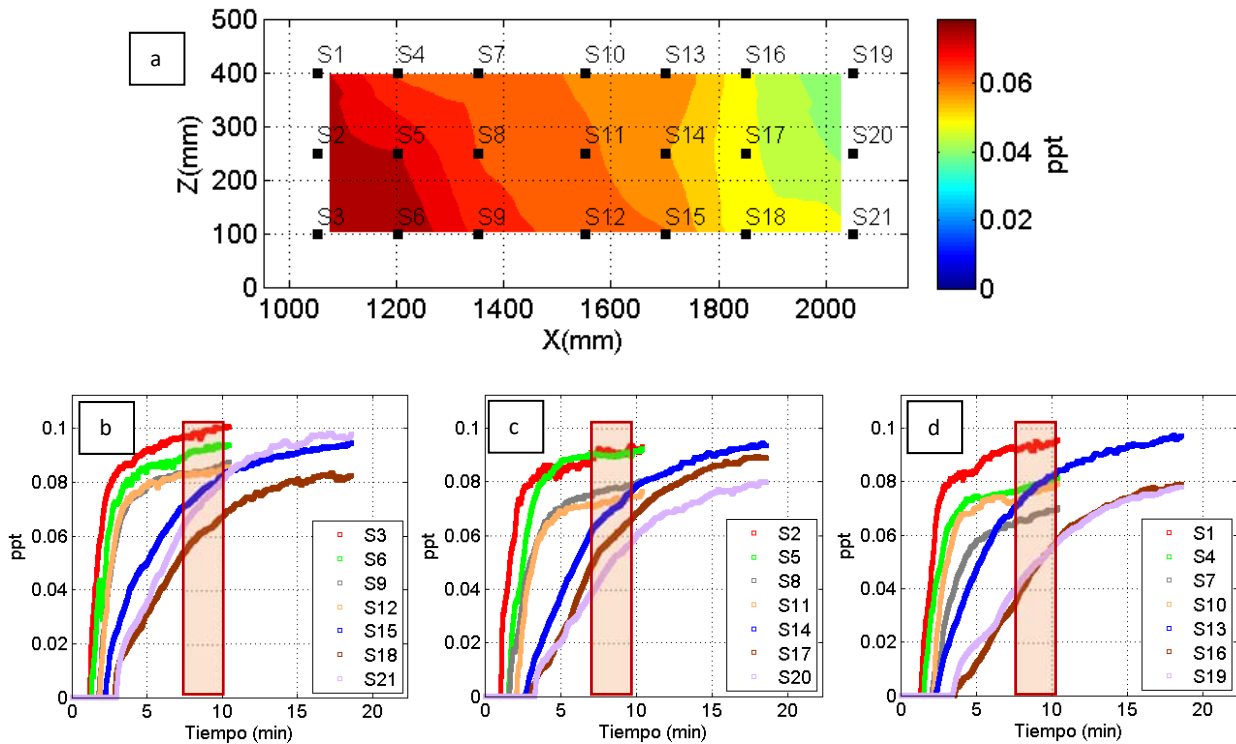


Figura 6.26 Ensayo L03 (60°, medio estacionario, Tipo I). Campo de salinidad una vez se ha alcanzado el medio estacionario (a). Evolución temporal del eje inferior (b). Evolución temporal del eje medio (c). Evolución temporal del eje superior (d)

La Figura 6.26 muestra un vertido tipo I (medio estacionario), con la evolución de la corriente de gravedad se representa como un campo de concentraciones (ppt) en la malla de conductivímetros. Este registro muestra la disminución de la concentración con el avance, con una ligera acumulación de masa en la zona inferior de la malla. Este efecto se repite en casi todos los campos presentados en este apartado, por lo que se deduce que se trata de una pequeña asimetría debido a un fallo de montaje del falso fondo en el canal de experimentación. Se puede establecer que el potencial de dilución en este caso es inducido por el efecto del rozamiento de la corriente de gravedad sobre el fondo, y por las turbulencias generadas en la interfaz entre fluidos.

Respecto a la evolución de la concentración a lo largo de los tres ejes longitudinales de la malla de conductivímetros, se presentan los paneles b, c y d que corresponden a los ejes inferior, medio y superior respectivamente, de la malla de sondas. Tras el análisis del caso L03 (60°, medio estacionario, Tipo I) se ha constatado que la salinidad se reduce en un 45 % aproximadamente.

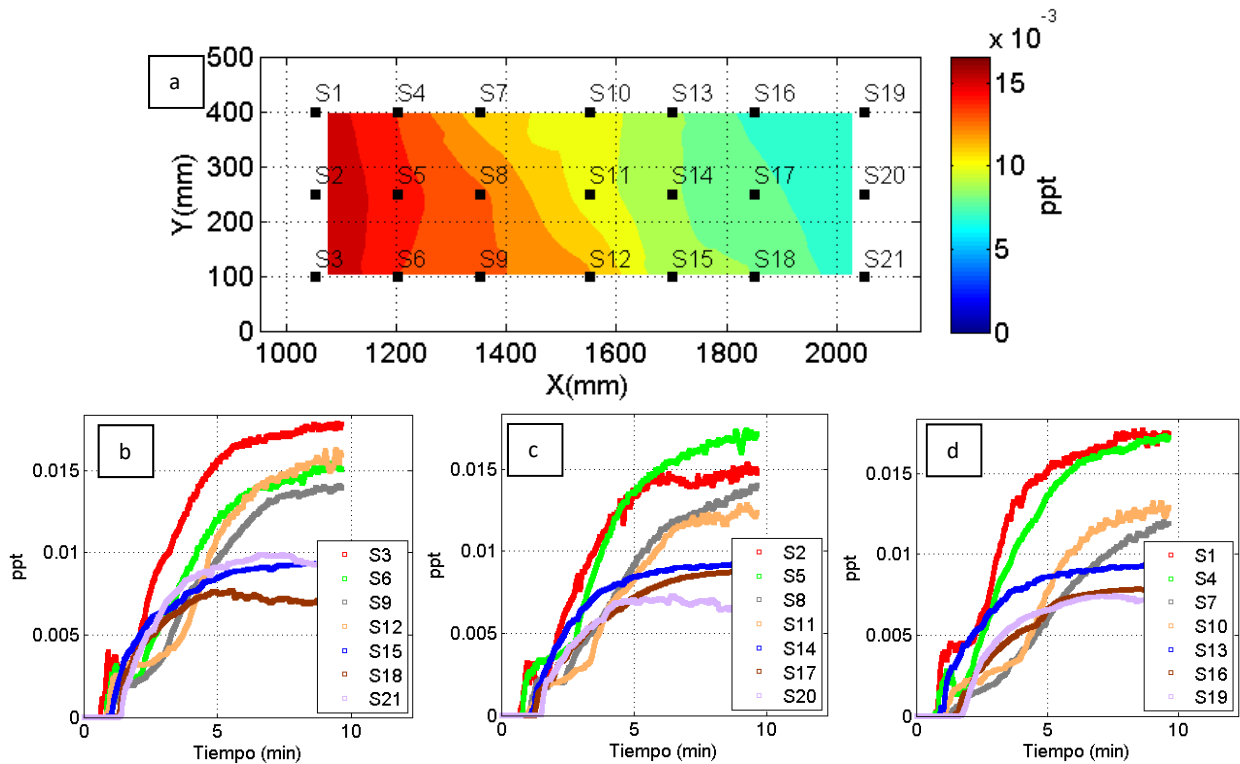


Figura 6.27. Ensayo L06 (60° , co-flow, $v=0.015$ m/s, Tipo II). Campo de salinidad una vez se ha alcanzado el medio estacionario (a). Evolución temporal del eje inferior (b). Evolución temporal del eje medio (c). Evolución temporal del eje superior (d)

De igual manera que en el caso anterior, la Figura 6.27 muestra los valores de concentración de una salmuera vertida mediante una descarga tipo II (co-flow, $v=0.015$ m/s). En este caso, y como se puede apreciar en los paneles inferiores, el tiempo de adquisición es inferior al vertido en medio estacionario. Este efecto es debido a que el régimen estacionario se alcanza mucho antes, y por ello las sondas de las dos mallas empleadas necesitan un tiempo similar para realizar el promediado.

La característica más notable de este campo es que, debido a las turbulencias inducidas por el medio receptor, la capacidad de esta salmuera para diluirse es mayor. Por tanto, la evolución de la concentración en el campo lejano es mucho más acusada que en el caso anterior, un 60 % menor.

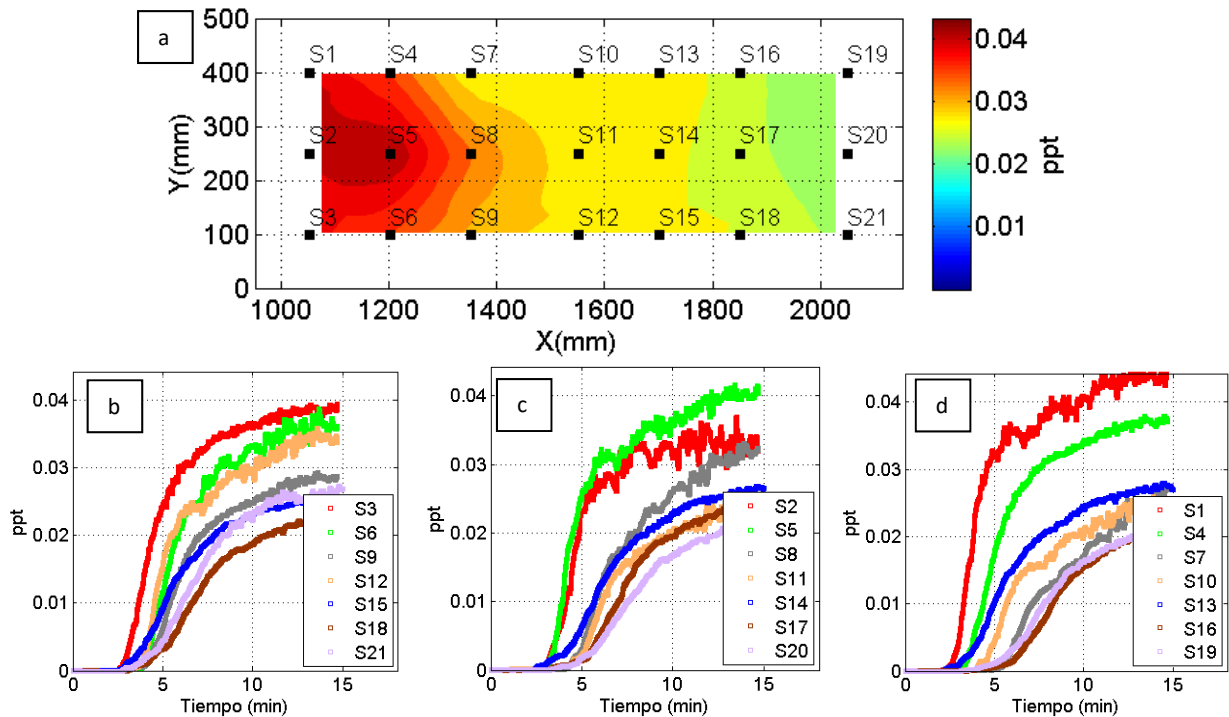


Figura 6.28. Ensayo L07 (120° , counter-flow, $v=0.015$ m/s, Tipo III). Campo de salinidad una vez se ha alcanzado el medio estacionario (a). Evolución temporal del eje inferior (b). Evolución temporal del eje medio (c). Evolución temporal del eje superior (d)

Para un vertido en counter-flow tipo III (counter-flow, $v=0.015$ m/s), en el que no existe inversión del vertido, el comportamiento de la corriente de gravedad se parece mucho a un vertido en medio estacionario. La razón es que al producirse el impacto aguas arriba del difusor, la salmuera es arrastrada aguas abajo por un medio con una hidrodinámica baja ($u_r Fr_d < 0.8$). La suma de estos dos factores provoca que la corriente avance más lentamente que el vertido homólogo en co-flow (Tipo II), y como se puede apreciar en la evolución de los ejes longitudinales la variación es más acorde a un vertido estacionario.

El análisis de la evolución en un vertido tipo IV, se presenta en la Figura 6.29. En este caso, la velocidad del ambiente receptor es muy elevada, con lo que al tratarse de un vertido co-flow, la salmuera es arrastrada por la corriente aguas abajo y el impacto se produce lejos del difusor. En nuestro caso, el punto de impacto (X_i) se sitúa en torno a los 880 mm, por lo que parte de la zona analizada queda englobada en la zona de transición. Es por esto, que las gráficas de registros para los ejes longitudinales presentan fluctuaciones importantes.

Por otro lado, y debido a las dichas fluctuaciones presentes, la salmuera no diluida tiende a ser desplazada aguas abajo hasta que alcanza un régimen de turbulencia mínima. Es por ello que se aprecian valores más altos de concentración en el tramo final de la malla, con una reducción de la concentración de un 50%, menor que para un vertido Tipo II.

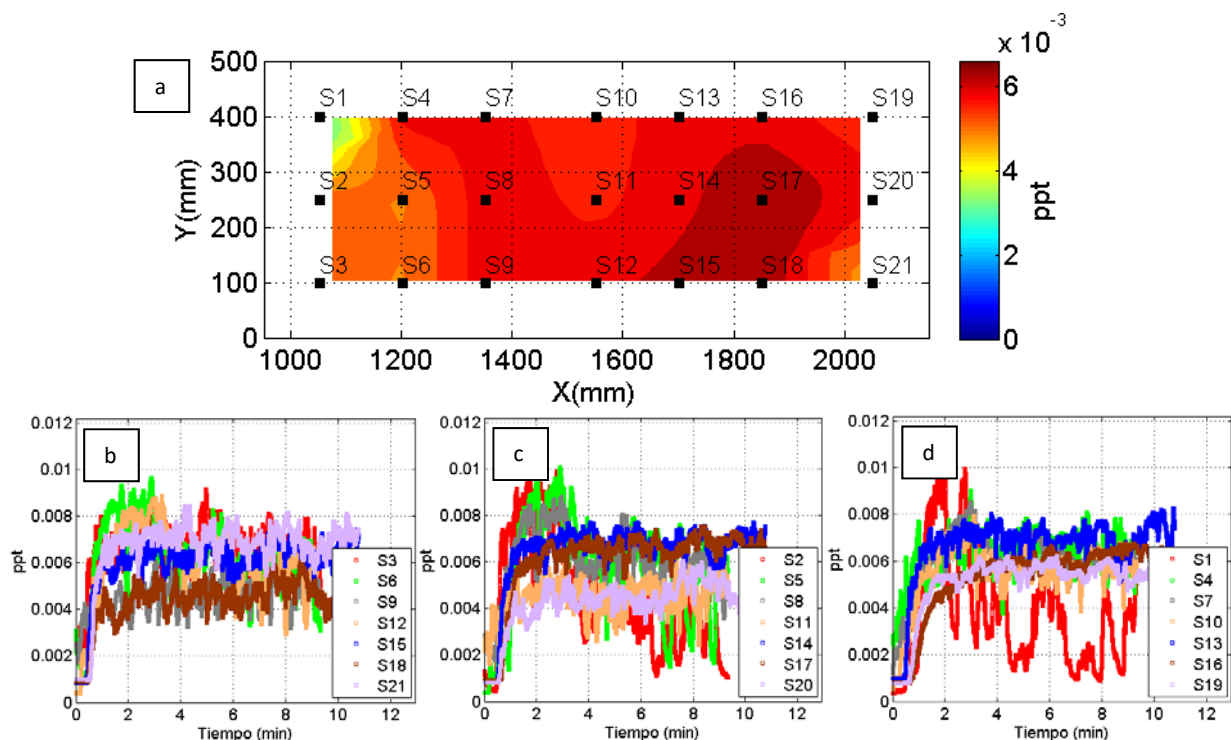


Figura 6.29. Ensayo L14 (60° , co-flow, $v=0.05$ m/s, Tipo IV). Campo de salinidad una vez se ha alcanzado el medio estacionario (a). Evolución temporal del eje inferior (b). Evolución temporal del eje medio (c). Evolución temporal del eje superior (d)

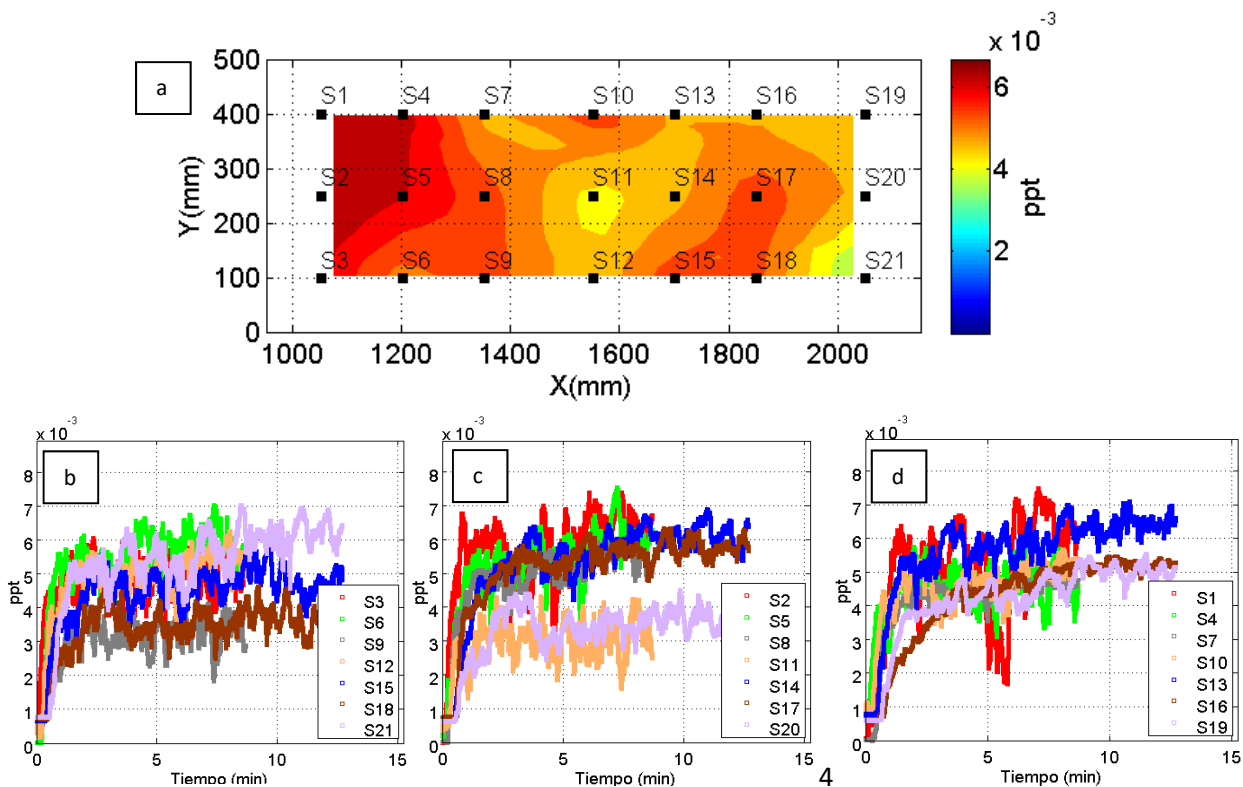


Figura 6.30. Ensayo L15 (120° , counter-flow, $v=0.05$ m/s, Tipo V). Campo de salinidad una vez se ha alcanzado el medio estacionario (a). Evolución temporal del eje inferior (b). Evolución temporal del eje medio (c). Evolución temporal del eje superior (d)

En el último caso analizado Tipo V (counter-flow, $v=0.05$ m/s) de la Figura 6.30 el vertido counter-flow, en el que se produce inversión del vertido, y el punto de impacto se localiza más cerca que en el caso anterior, pero sigue estando cerca de la zona de registro de la malla. Por ello se vuelven a apreciar fluctuaciones en los ejes longitudinales, que sin embargo presentan valores de registro muy parecidos, lo que evidencia poca evolución de la concentración. Este fenómeno, al igual que en el caso anterior, no sigue un comportamiento lógico y se debe a que el registro se toma muy cerca del punto de impacto, por lo que para posteriores trabajo se debería analizar distancias mayores de campo lejano, o centrar el estudio aguas abajo de la zona analizada en este apartado (1000 a 2000 mm desde el origen del vertido a escala).

Por último, a fin de explicar de forma más detallada las fluctuaciones presentes en las figuras anteriores, se presenta a continuación la evolución de las fluctuaciones para los campos estudiados. Así pues, se muestra un campo de fluctuaciones de la concentración (ppt'), acompañado de tres figuras cada una correspondiente a los ejes longitudinales de la malla de conductivímetros (inferior, medio y superior). Cada una de estas figuras representa la fluctuación de la concentración media en las sondas. Como ejemplo se presenta la Figura 6.31, que corresponde al caso de estudio L03 (tipo I).

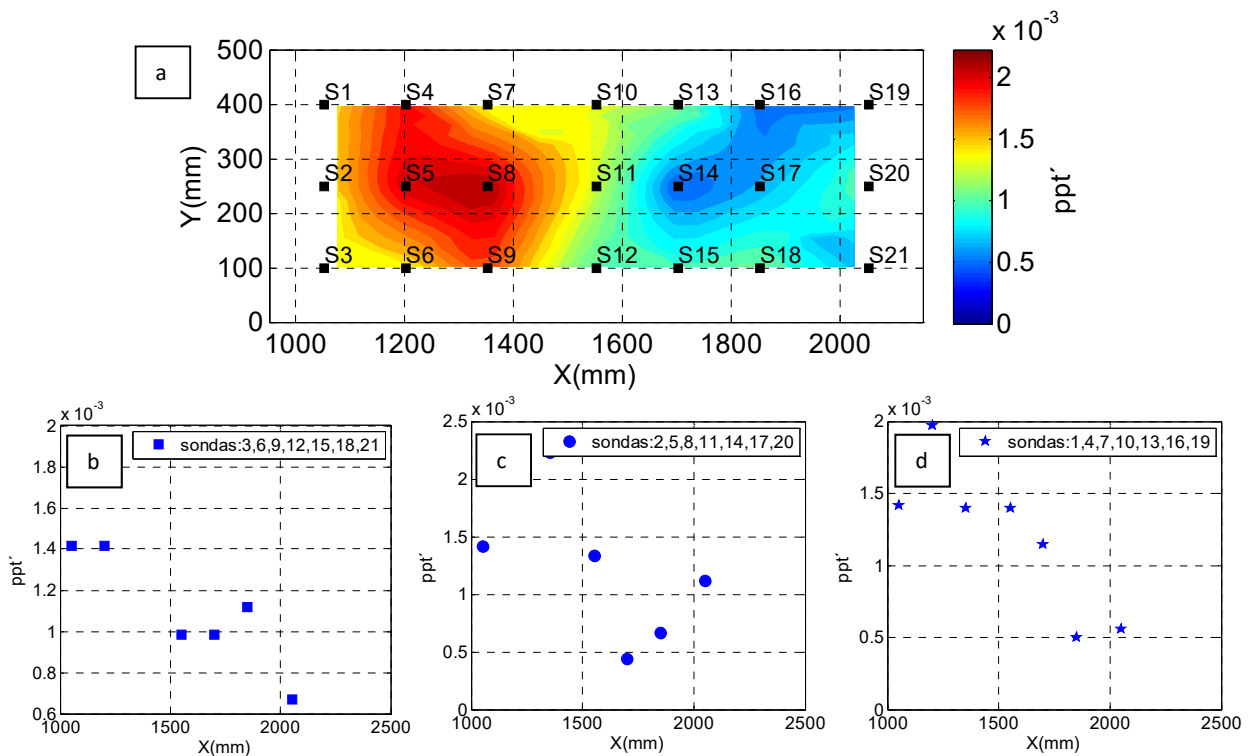


Figura 6.31. Ensayo L03 (60°, medio estacionario, Tipo I). Campo de la fluctuación una vez alcanzado el medio estacionario (a). Evolución de la fluctuación del eje inferior (b). Evolución de la fluctuación del eje medio (c). Evolución de la fluctuación del eje superior (d)

Los resultados en los tres ejes siguen patrones similares, con algunos resultados anómalos. El campo de fluctuaciones (panel a) muestra una zona de mayor turbulencias en las sondas S5 y S8, y otra zona de menor turbulencia en las S14 y S17, todas ellas localizadas en el eje medio de la malla. Este fenómeno, que parece no seguir ningún patrón lógico desaparece cuando la corriente de gravedad se ve afectada por una corriente presente en el medio receptor. De esta forma, la Figura 6.32, muestra un campo de fluctuaciones que disminuye progresivamente.

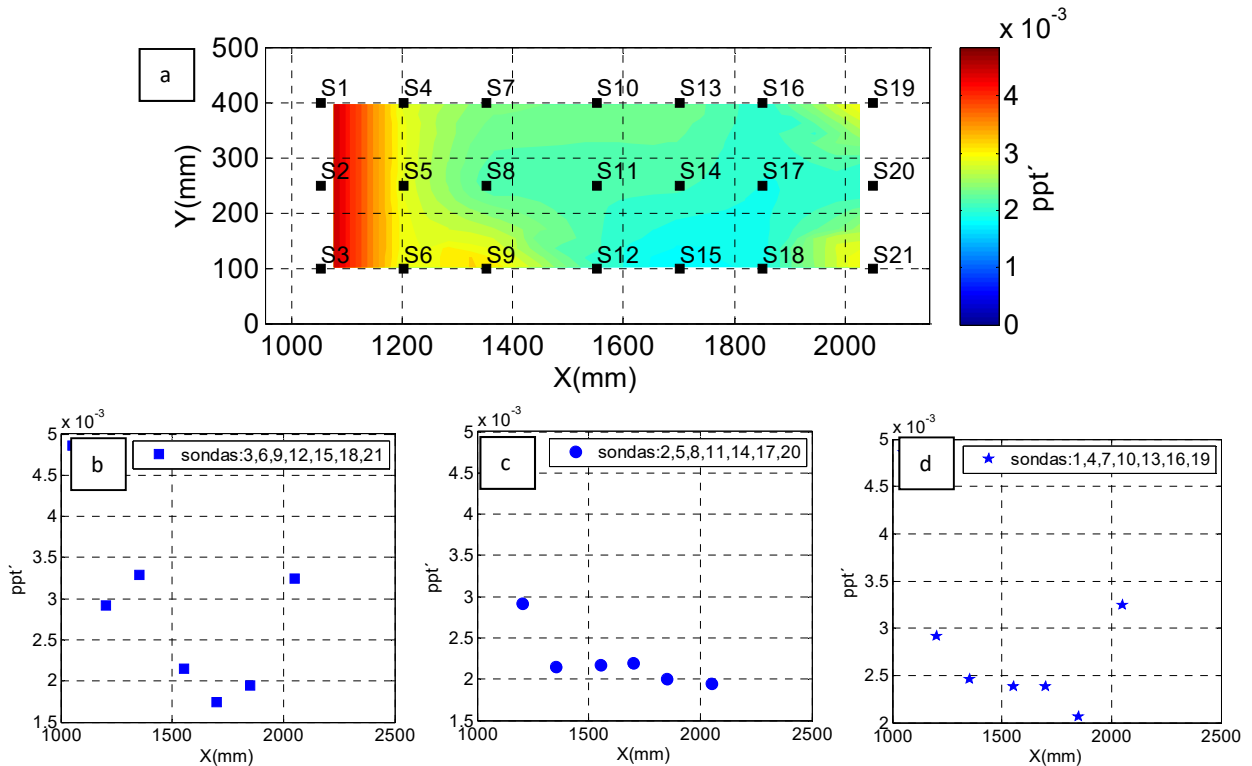


Figura 6.32 Ensayo L06 (60°, co-flow, $v=0.015$ m/s, Tipo II). Campo de la fluctuación una vez alcanzado el medio estacionario (a). Evolución de la fluctuación del eje inferior (b). Evolución de la fluctuación del eje medio (c). Evolución de la fluctuación del eje superior (d)

Sin embargo, como muestra la Figura 6.33, en el caso de una corriente de gravedad formada por un vertido en counter-flow el comportamiento es incongruente con la explicación anterior. En este caso las fluctuaciones parecen estar localizadas en uno de los ejes longitudinales. No obstante, si se analiza en detalle, es de destacar que las fluctuaciones existentes son de poca magnitud, y más de la mitad de la corriente no experimenta fluctuaciones. Esta ausencia de variaciones en el flujo hiperdenso, es característico de una corriente de gravedad totalmente desarrollada.

Los comportamientos explicados en las figuras presentadas, se repiten para los casos de las corrientes de gravedad formadas por los vertidos tipos IV y V. Para una descarga de salmuera en co-flow, o tipo IV, (Figura 6.34) las fluctuaciones tienden a decrecer de manera clara, mientras que para vertidos counter-flow, o tipo V (Figura 6.35), este patrón presenta variaciones. No obstante, dado que la malla de registro se sitúa cerca de la zona de transición para ambos casos, los valores registrados son similares en los dos campos presentados, salvo en las primeras sondas de la malla (S1, S2 y S3).

En cualquier caso, casi todos los resultados reflejan evoluciones similares, en los tres ejes y en la evaluación longitudinal, permitiendo completar el análisis detallado de valores promediados y fluctuaciones en las cinco tipologías de vertido.

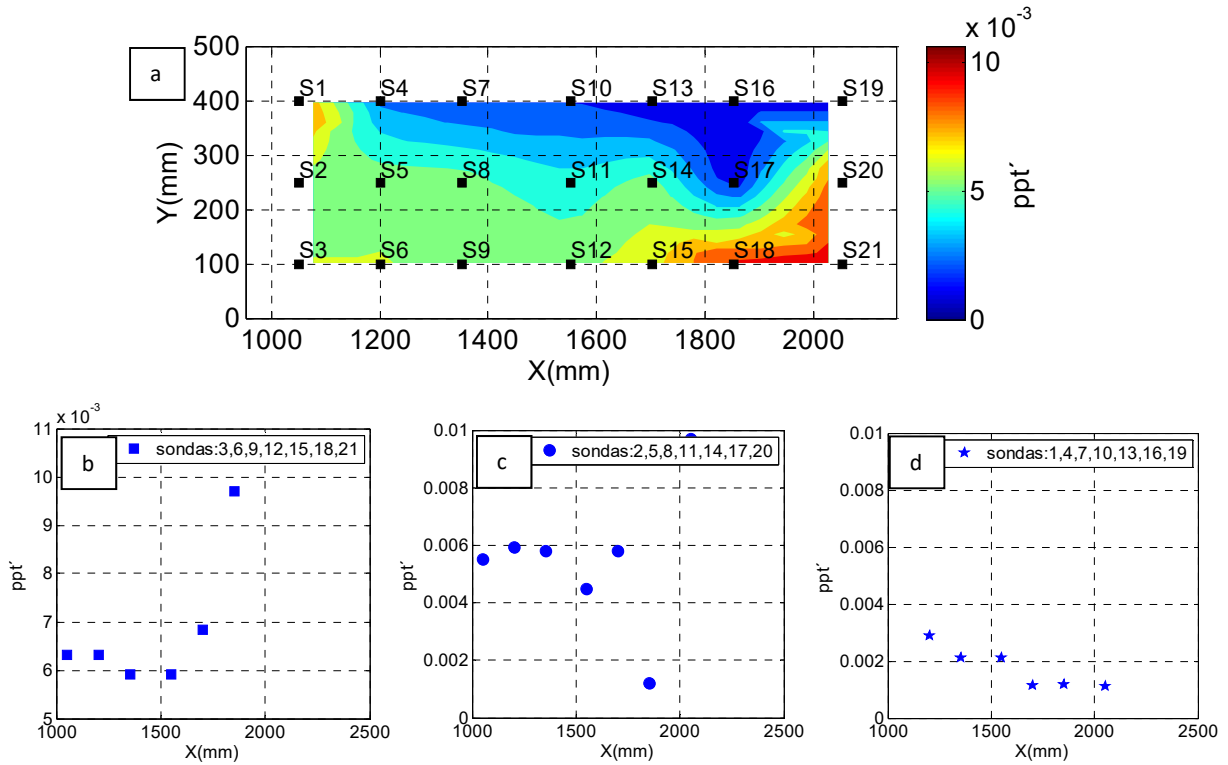


Figura 6.33. Ensayo L07 (120°, counter-flow, $v=0.015$ m/s, Tipo III). Campo de la fluctuación una vez alcanzado el medio estacionario (a). Evolución de la fluctuación del eje inferior (b). Evolución de la fluctuación del eje medio (c). Evolución de la fluctuación del eje superior (d)

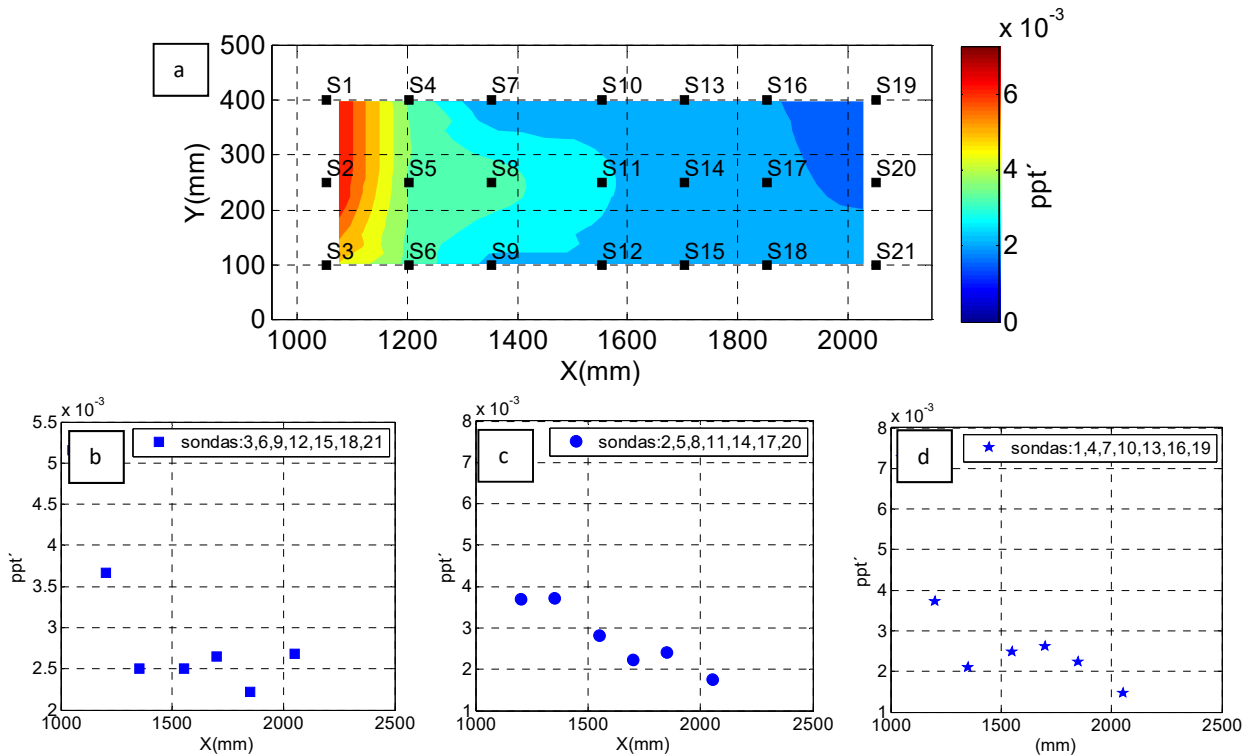


Figura 6.34. Ensayo L15 (60°, co-flow, $v=0.05$ m/s, Tipo IV). Campo de la fluctuación una vez alcanzado el medio estacionario (a). Evolución de la fluctuación del eje inferior (b). Evolución de la fluctuación del eje medio (c). Evolución de la fluctuación del eje superior (d)

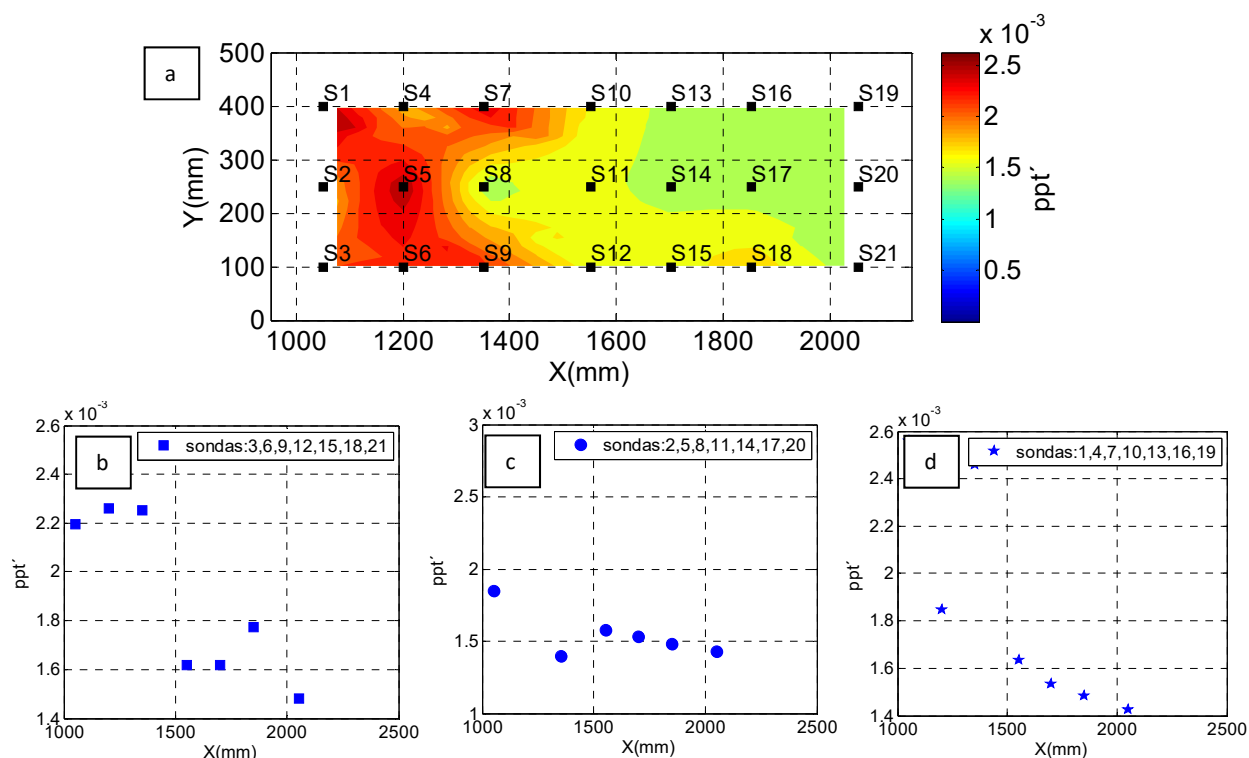


Figura 6.35. Ensayo L16 (120° , counter-flow, $v=0.05$ m/s, Tipo V). Campo de la fluctuación una vez alcanzado el medio estacionario (a). Evolución de la fluctuación del eje inferior (b). Evolución de la fluctuación del eje medio (c). Evolución de la fluctuación del eje superior (d)

6.5.2. Análisis de resultados según tipologías de vertido

En esta última parte del trabajo, se propone estimar el potencial de dilución para cada ensayo. A este fin, se presenta la Tabla 6.3 en la que se muestran las diluciones últimas registradas en esta investigación por las sondas de conductividad. Por tanto los valores aquí mostrados corresponden al promedio de las sondas S19, S20 y S21.

Tabla 6.3. Valores de dilución y R_i alcanzado en la última posición analizada por la malla de conductímetro, sondas S19, S20 y S21

	Θ	F_{rd}	D (mm)	u	$u_r F_{rd}$	C/C _o	R_i
L01	30	31	2	0.7	0.00	2.34E-03	2.54
L02	45	58	2	1.2	0.00	1.20E-03	0.59
L03	60	20	4	0.6	0.00	1.90E-03	1.35
L04	30	58	2	1.2	0.73	1.21E-03	0.66
L05	150	58	2	1.2	0.73	9.55E-04	0.20
L06	45	20	4	0.6	0.50	2.71E-03	0.18
L07	135	20	4	0.6	0.50	3.24E-03	0.15
L08	60	58	2	1.2	1.45	1.27E-03	0.01
L09	120	58	2	1.2	1.45	9.83E-04	0.04
L10	45	20	4	0.6	1.00	2.29E-03	0.01
L11	135	20	4	0.6	1.00	1.42E-03	0.01
L14	60	20	4	0.6	1.67	1.92E-04	0.01
L15	120	20	4	0.6	1.67	1.50E-04	0.01

Como se puede observar, en la tabla aparecen los valores de diluciones y el valor del número de Richardson (R_i) para cada uno de los ensayos ejecutados. Por lo tanto, a partir de este parámetro es posible tener una estimación del potencial de dilución que almacena la corriente de gravedad en la localización final. Para una mejor representación se presenta la Figura 6.36.

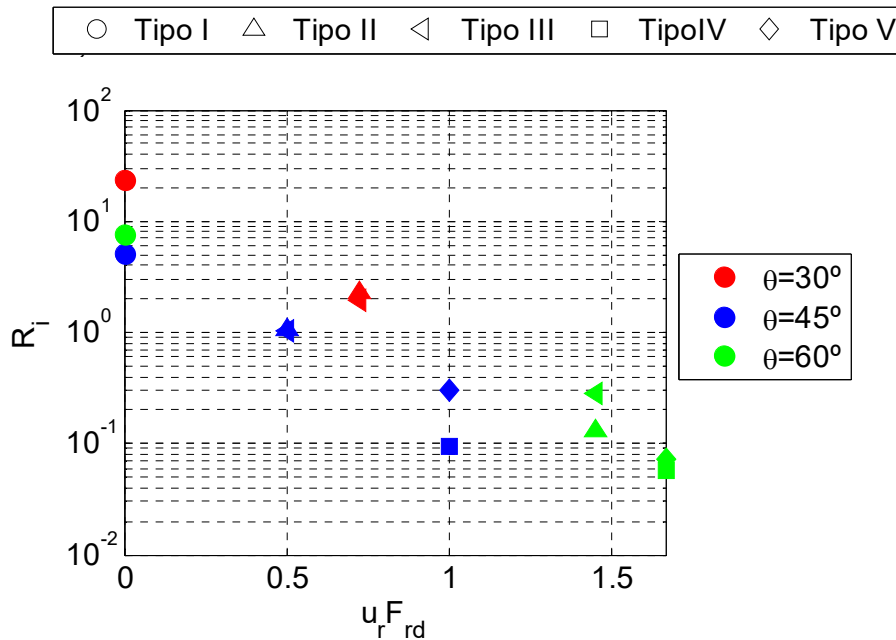


Figura 6.36. Variación del número de Richardson respecto a la velocidad del medio y la configuración de descarga, promediado de sondas S19, S20 y S21

Como se puede observar, se ha optado por una escala logarítmica en el eje de ordenadas, a fin de mostrar mejor la dispersión entre resultados correspondientes a la misma velocidad pero con diferente configuración de descarga. Se puede concluir que la corriente de gravedad para el ángulo de $\theta=30^\circ$, y corriente con poca hidrodinámica arroja un resultado por encima de la unidad. Este valor denota poca capacidad de dilución, generando una corriente de gravedad que se arrastra por el fondo, sólo afectado por la rugosidad del medio.

Sin embargo para velocidades del medio mayores y ángulos de $\theta \geq 45^\circ$ el parámetro obtenido es inferior a uno ($R_i \leq 1$), lo que implica que la cinética aún tiene peso en la corriente de gravedad, y se espera que el proceso de dilución siga aumentando para distancias mayores. No obstante, para entender mejor la evolución de la dilución en los ensayos analizados, se presenta la Figura 6.37, en la que se detalla la dilución alcanzada en varios puntos del vertido con $\theta=45^\circ$ y 60° . Estos puntos de análisis corresponden al punto de cota máxima del eje (S_m), punto de retorno (S_r), inicio del campo lejano (S_s) y punto final de la zona de estudio (aquí llamado S_f).

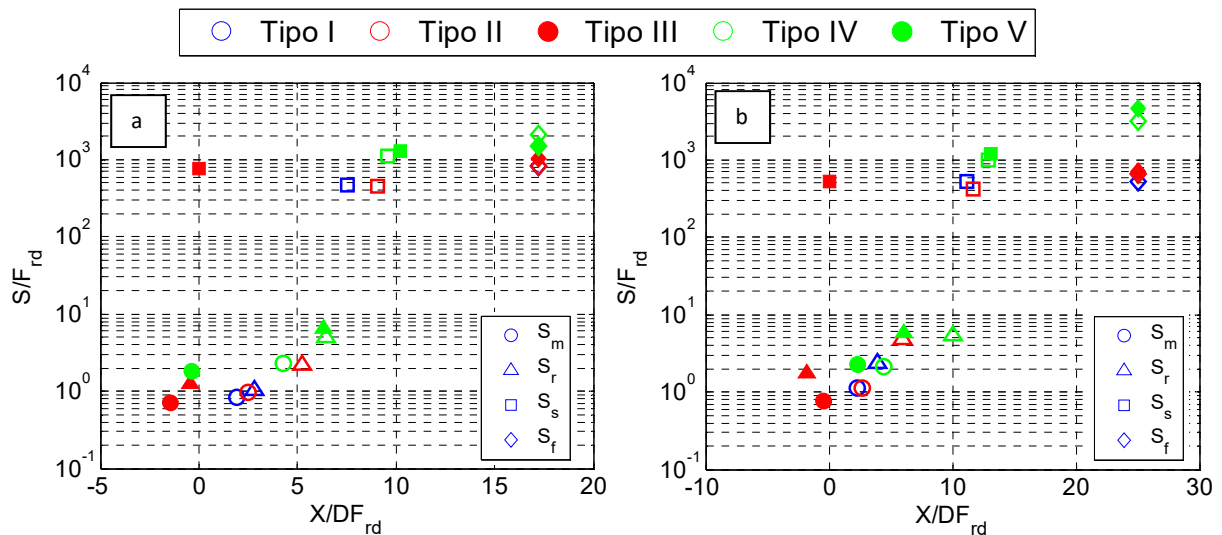


Figura 6.37. Evolución de las diluciones para vertidos con $\theta=45^\circ$ (a) y 60° (b), para los distintos tipos de descargas analizadas en este trabajo

En el primer caso ($\theta=45^\circ$), se observa que la dilución en el punto de cota máxima del eje (S_m) se mantiene casi constante para los diferentes tipos de vertido, aunque sí se aprecia un incremento para los vertidos tipo V, donde la hidrodinámica del medio es mucho mayor. El comportamiento de las demás diluciones presentadas es similar, alcanzando mayores valores para velocidades del medio más importantes. Nótese que las diluciones para X_m y X_r , se sitúan en valores negativos en el eje de abscisas, ya que corresponden a vertidos tipo III (vertidos counter-flow sin inversión). Este mismo comportamiento se ha observado en descargas con $\theta=60^\circ$.

Sin embargo, lo más reseñable de este análisis es la diferencia en la evolución de la dilución entre el punto de inicio de campo lejano (X_s), y el final de la zona de estudio (X_f). Es de destacar que el vertido con ángulo menor la variación de la dilución entre estos dos puntos no es significativa para ninguno de los casos estudiados. No obstante, de la dilución en el mismo tramo de estudio para ángulos mayores ($\theta=60^\circ$), tiende a crecer de forma significativa para descargas tipo IV y V, que corresponden con los ambientes receptores con velocidades más altas. Esto quiere decir que el potencial de dilución de la salmuera en el fondo en ambientes más energéticos tiene mayor potencial, sin que llegue a formarse una corriente de gravedad homogénea como sucede en los demás tipos de flujos hiperdensos.

6.6 Conclusiones

En este capítulo se han estudiado dos zonas características de la descarga hiperdensa (zona de transición y campo lejano), y un análisis integrado de todo el vertido, por ello se exponen a continuación las conclusiones diferenciando entre los campos analizados. Por tanto, se hace referencia a los tipos de datos obtenidos mediante las técnicas PIV y LIF por un lado, y por otro los mapas de salinidad obtenidos con el sistema de conductivímetros.

Vertido integrado

- Los campos vectoriales obtenidos muestran una clara influencia de la hidrodinámica del medio receptor sobre el comportamiento del vertido. Los resultados más característicos hacen referencia a las descargas en counter-flow (Tipo III y V), con estructuras complejas en torno al chorro.
- Se han analizado por separado las componentes de la velocidad, y se ha podido determinar la influencia de éstas sobre el cuerpo del vertido. Los vertidos en co-flow muestran menos interferencias por el medio receptor, mientras que para vertidos en counter-flow, toman relevancia las componentes verticales del campo.

- Los campos de diluciones analizados muestran las trayectorias, y se ha prestado especial atención a la dilución del campo en el punto de impacto (S_i). Se ha concluido que los vertidos que más dilución experimentan en la zona del chorro son los del tipo V. El resto de las tipologías siguen comportamientos similares, y cuanto mayor es la velocidad del medio, más dilución se alcanza en el punto de impacto (X_i)

Zona de transición

- La determinación del límite entre campo cercano y lejano (X_s) se ha realizado a partir de las fluctuaciones de la concentración. Se ha evaluado su comportamiento dependiendo de la velocidad del medio. Se ha comprobado que el planteamiento desarrollado por Roberts et al. (1997), sólo es válido para $\theta=60^\circ$ con medios receptores estacionarios.
- Se han obtenido valores (X_s) para las velocidades ensayadas y se ha podido comprobar que cuanto mayor es la velocidad del medio, los límites obtenidos para co-flow y counter-flow convergen para los medios más energéticos, sea cual sea el ángulo o la configuración de descarga (tipos IV y V).
- Para velocidades mayores, el espesor de la capa de salmuera en la zona de transición tiende a disminuir.

Campo Lejano

- Para la caracterización de la corriente de gravedad en alzado (técnicas PIV/LIF) se han empleado perfiles verticales, que muestran una tendencia de convergencia para distancias mayores desde el origen del vertido.
- El análisis del número de Richardson (R_i) para definir el comportamiento de las corrientes de gravedad, se ha efectuado tanto en puntos singulares, inicio y fin de la zona analizada del campo lejano (X_s y X_f respectivamente), como del promedio del flujo bicapa.
- Se ha concluido que, cuanto mayor es la velocidad del medio, la corriente de gravedad se acopla al ambiente receptor y por tanto $R_i \ll 1$, lo que indica un alto potencial de dilución.
- Para ángulos de descarga mayores ($\theta=60^\circ$) R_i decrece, lo que indica mayor capacidad de mezcla con el ambiente del campo lejano.
- Se ha estudiado la evolución de la dilución entre el inicio y fin de la zona caracterizada de campo lejano, y se observó que para ángulos de 45° la variación es mínima, sea cual sea la configuración de descarga. Por otro lado, para $\theta=60^\circ$, los vertidos tipo IV y V muestran una gran dispersión respecto a la evolución para vertidos tipo I, II y III.

BIBLIOGRAFÍA

- Altinakar, M.S., Graf, W.H. & Hopfinger, E.J., 1996. Flow structure in turbidity currents. *Journal of Hydraulic Research*, 34(February), pp.713–718.
- Hallworth, M.A. et al., 1996. Entrainment into two-dimensional and axisymmetric turbulent gravity currents. *Journal of Fluid Mechanics*, 308, pp.289–311.
- Palomar Herrero, P., 2014. *Optimización experimental y numérica de vertidos hipersalinos en el medio marino*. Universidad de Cantabria, Tesis doctoral.
- Roberts, P.J.W., Ferrier, A. & Daviero, G., 1997. Mixing in Inclined Dense Jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(8), pp.693–699.
- Shao, D. & Law, A.W.K., 2010. Mixing and boundary interactions of 30° and 45° inclined dense jets. *Environmental Fluid Mechanics*, 10(5), pp.521–553.

