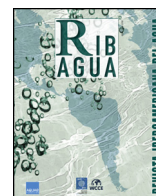




RIBAGUA

www.elsevier.es/ribagua



Jornadas de Puertos y Costas 2015

Caracterización experimental del campo lejano de los vertidos de salmuera al mar

B. Pérez-Díaz^{a,*}, P. Palomar^{a,b}, S. Castanedo^{a,c} y A. Álvarez^a^a Instituto de Hidráulica Ambiental, Universidad de Cantabria (Universidad de Cantabria-Fundación IH), Santander, España^b Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid, España^c Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente, Universidad de Cantabria, Santander, España

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del artículo:

Recibido el 15 de diciembre de 2015

Aceptado el 21 de julio de 2016

On-line el 8 de agosto de 2016

Palabras clave:

Medio ambiente

Salmuera

Campo lejano

Corriente de gravedad

Dilución

PIV-PLIF

R E S U M E N

Los vertidos de salmuera son flujos cuya evolución depende fundamentalmente de la diferencia de densidad existente entre el propio vertido y el medio receptor, el mar. Estos vertidos, que habitualmente proceden de las aguas de rechazo de las plantas desaladoras, son muy comunes en la naturaleza y tienen gran impacto sobre algunos ecosistemas protegidos. Se distinguen 2 zonas bien diferenciadas en el estudio del comportamiento de estos vertidos: la región de campo cercano, localizada en las cercanías del punto de descarga y caracterizada por altas tasas de dilución debido a los efectos turbulentos, y la región de campo lejano, objeto de estudio de este trabajo, donde la salmuera se convierte en una corriente de gravedad que viaja por el fondo con muy bajas tasas de dilución. La evolución y el comportamiento de dicha corriente de fondo son dependientes de las características del propio vertido en esta región (espesor, concentración de sal y momento), la batimetría (pendiente e irregularidades) y las características intrínsecas (temperatura y salinidad) e hidrodinámicas del medio receptor.

Este trabajo muestra la caracterización experimental de corrientes de gravedad generadas por vertidos de salmuera bajo condiciones controladas de laboratorio. Para ello se han utilizado las avanzadas técnicas ópticas de laboratorio *Particle Image Velocimetry* (PIV) y *Planar Laser Induced Fluorescence* (PLIF). Mediante dichas técnicas se han obtenido mediciones instantáneas de alta precisión de velocidad y concentración que han sido debidamente procesadas para obtener información de las propiedades cuasi-estacionarias del cuerpo de la corriente de gravedad generada por un efluente hipersalino constante. Se llevaron a cabo diferentes experimentos variando sus condiciones iniciales (en función del caudal, espesor, pendiente en el fondo y concentración de sal) en el tanque de estudio, de dimensiones $3 \times 3 \times 1$ m. A través del análisis de los resultados PIV-PLIF se han obtenido conclusiones importantes acerca de la influencia de estas variables en la mezcla con el medio receptor, como por ejemplo que la pendiente en el fondo y los mayores caudales iniciales favorecen la dilución, alcanzando tasas de dilución cerca de $6 \cdot 10^{-2}$ frente a la tasa de $2 \cdot 10^{-2}$ obtenida por el caso de comparación base (de pendiente casi nula y menor caudal).

Como producto de este trabajo se ha generado una base de datos experimental de alta resolución y calidad que permitirá calibrar y validar tanto herramientas numéricas simplificadas, basadas en la resolución de sistemas de ecuaciones integradas en vertical, como herramientas numéricas avanzadas (modelos hidrodinámicos) para la correcta predicción del comportamiento de estos vertidos.

© 2016 IAHR y WCCE. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Experimental characterization of the far field region of brine discharges

A B S T R A C T

Brine discharges are flows driven by the density difference between the environmental fluid, the seawater, and the discharge. They are generated by the rejected water of desalination plants, hence they are common in nature nowadays, and have a great impact on protected ecosystems. Two well-distinguished regions can be differentiated in the study of the behaviour of these discharges: the near field region,

Keywords:

Environment

Brine

Far field

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: perezdb@unican.es (B. Pérez-Díaz).

Gravity current
Dilution
PIV-PLIF

located in the vicinity of the discharge point and characterised by high dilution rates due to the turbulence effects; and the far field region, where the brine turns into a gravity current that flows down the seabed with low dilution rates. The behaviour of these gravity currents is dependent on the brine discharge characteristics, the bathymetry and the hydrodynamic conditions of the receiving water.

This work shows the experimental characterization of the far field region of brine discharges through advanced non-intrusive laser optical techniques PIV (Particle Image Velocimetry) and PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence), under controlled laboratory conditions. By means of synchronized PIV-PLIF techniques, high-quality accurate instantaneous measurements of velocity and concentration are obtained. The aim of these experiments is to study the quasi-steady flow properties of gravity currents generated by a constant flux release mimicking the far field of brine discharges. Different experimental set-ups with different initial conditions (flow rate, thickness, slope, salt concentration) were carried out in a 3×1 m tank. Through PIV-PLIF analysis, conclusions about the influence of these variables on the mixing at the interface between fluids have been obtained. As an example, keeping constant the rest of variables, steeper slopes and higher flow rates favour dilution, reaching stable entrainment values close to 5.10-2 against base case (with slope near zero and lower flow rate) values close to 2.10-2.

In addition, a high resolution and quality experimental database has been generated, which will allow to calibrate/validate both simplified tools, based on systems of integrated equations, and advanced hydrodynamic modelling tools.

© 2016 IAHR y WCCE. Published by Elsevier España, S.L.U. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

Los vertidos al mar de salmuera se han convertido en una preocupación medioambiental debido al incremento de la producción de agua desalada y a la evidencia de efectos negativos de la salmuera sobre ecosistemas protegidos sensibles [1–3]. El estudio del proceso de mezcla con el medio receptor de estos vertidos hiperdensos (salmuera) es complejo y constituye un gran reto científico en la ingeniería hidráulica actual, dada la multitud de variables que intervienen en él [4–6].

En la descripción del comportamiento de estos vertidos en el medio receptor se distinguen 2 regiones: el campo cercano y el campo lejano, que se diferencian principalmente por las fuerzas dominantes del flujo y las escalas espaciales y temporales en las que se producen los fenómenos. La región de campo cercano es la zona inicial de mezcla, donde el comportamiento del efluente depende principalmente del sistema de vertido y de las características físicas del efluente respecto al fluido receptor. A cierta distancia del punto de descarga se produce el colapso de las escalas mayores del espectro de turbulencia asociado al vertido y el flujo comienza a estratificarse, formando una corriente de gravedad hipersalina característica de la región de campo lejano. En el caso de que la tasa de dilución en la región de campo cercano no haya sido suficiente, dichas corrientes pueden propagarse lentamente a grandes distancias, afectando negativamente a fondos marinos protegidos muy alejados del punto de descarga.

Genéricamente, las corrientes de gravedad son flujos principalmente horizontales que se rigen por la diferencia de densidad (o flotabilidad) existente entre el medio receptor y el fluido de la propia corriente. Aunque este trabajo se centra en las corrientes producto del vertido de salmuera, pueden ser generadas por otras acciones naturales o antropogénicas, algunas de ellas reflejadas en [7–8]. Estos flujos horizontales son comúnmente clasificados según el signo de la diferencia de densidad respecto al medio receptor en corrientes de gravedad superficiales (flotabilidad positiva), neutrales (flotabilidad intermedia en la columna del medio receptor) y de fondo (flotabilidad negativa). Otra clasificación posible es aquella en función de la naturaleza del fluido de la corriente de gravedad: corrientes de sustancias disueltas (como las hipersalinas) o de partículas suspendidas (como las turbidíticas).

Tanto las corrientes de fondo hipersalinas como las turbidíticas han sido ampliamente estudiadas por la comunidad científica (desde [9] hasta [10–11]) bajo distintos enfoques: numérico [11–12], experimental [13–14] y de estudio de campo [15]. Muchos de estos estudios numéricos y experimentales se han centrado en

el frente de la corriente y su esparcimiento [16–17], habitualmente generados por una descarga puntual controlada [10], mientras que otros analizan efectos tangibles en estas corrientes de amplio rango de escalas espaciales y temporales, como el efecto Coriolis [18]. Finalmente, existen trabajos focalizados en el análisis del cuerpo estable de estas corrientes de gravedad comúnmente generadas por descargas constantes de caudal lateralmente confinadas, es decir, bidimensionales [19–21].

La creciente preocupación medioambiental respecto a los cada vez más comunes vertidos de salmuera, junto a la complejidad de las corrientes de gravedad de fondo, la falta de datos experimentales y de campo, y la carencia de herramientas de modelado fiables han motivado que, dentro del marco del Plan Nacional de I+D+i SALTICOR (2011–2012) se hayan llevado a cabo una serie de experimentos en el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria utilizando técnicas avanzadas de óptica laser. Estos ensayos complementan la base de datos experimental inicialmente generada dentro del marco del Plan Nacional de I+D+i MEDVSA (2009–2011), focalizado en la caracterización del campo cercano. Estos trabajos previos son descritos en [22–24] y fueron utilizados para el ejercicio de calibración de las herramientas «brIHne» [23,25] y desarrolladas en el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, siendo el trabajo pendiente el estudio de la región de campo lejano.

En este artículo se describen los ensayos realizados para la caracterización del campo lejano, el análisis de los resultados y sus conclusiones.

2. Método experimental

Para la caracterización del comportamiento de la pluma hipersalina de campo lejano, dentro del marco del Plan Nacional de I+D+i SALTICOR (2011–2013), se han llevado a cabo ensayos basados en técnicas ópticas no intrusivas PIV-PLIF, gracias a las cuales se obtienen los campos de velocidades y concentraciones instantáneas del plano de simetría longitudinal de todo el flujo sin alterar el comportamiento del mismo (véanse las referencias [23,26–27]). La selección de los parámetros de medición *Particle Image Velocimetry* (PIV) y *Planar Laser Induced Fluorescence* (PLIF) utilizados se detalla y justifica en el apartado 2.1. Los ensayos se han llevado a cabo en un tanque de $3 \times 3 \times 1$ m³, simulando un vertido sumergido constante de salmuera en un medio receptor homogéneo y en reposo. El dispositivo de vertido ha consistido en una arqueta de metacrilato con una ranura en el fondo de altura regulable apoyada sobre un falso fondo de plástico (rozamiento casi despreciable)

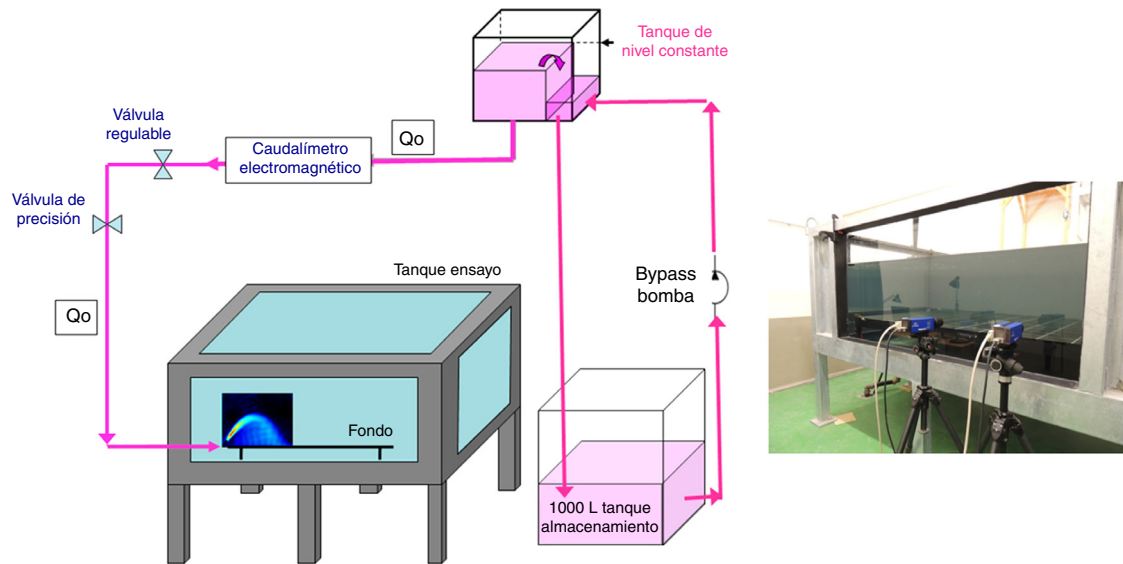


Figura 1. Sistema experimental (fuente: [23]) y fotografía del tanque y las 2 cámaras Imager ProX 4 M (CCD) utilizadas.

dispuesto a 30 cm del fondo real del tanque y a 20 cm de las paredes. De esta manera el vertido hipersalino queda almacenado bajo el falso fondo, sin riesgo de contaminación de la propia pluma y permitiendo así el estudio de plumas no confinadas, es decir, tridimensionales. Las paredes, el fondo y los conductos de descarga se pintaron de negro para evitar reflexiones del láser. La **figura 1** presenta un esquema del sistema experimental empleado, mientras que la **figura 2** presenta 2 fotografías del dispositivo de descarga y el tanque.

Se utilizaron 2 cámaras Imager ProX 4 M (CCD) con 2.048×2.048 píxeles para grabar las imágenes instantáneas PIV-PLIF. Ambas cámaras se colocaron contiguamente (**fig. 1**), con una pequeña zona de solape, para poder capturar la máxima extensión posible (~ 1.400 mm). Para cada caso PIV-PLIF se tomaron al menos 1.800 imágenes a 5 Hz de frecuencia. Previamente, para determinar este número de imágenes se llevó a cabo un análisis de la convergencia

estadística de las magnitudes medidas en estos experimentos (velocidad y concentración; **fig. 3**). Para realizar este análisis se evaluó la desviación entre la media total de todas las imágenes de la magnitud en cuestión y la media parcial obtenida gradualmente desde la primera imagen hasta la última. Dicha desviación se denomina error relativo (*RE*), calculado según la siguiente ecuación:

$$RE = \frac{1}{N} \frac{\sum_{i=1}^N (k_i - K)}{K} \quad (1)$$

donde, N es el número total de imágenes, k_i es el valor medio de la magnitud estudio obtenido a partir del número i de imágenes y K es el valor medio obtenido a partir de la totalidad de las imágenes N . Se estableció la correcta convergencia de estadísticos cuando el *RE* obtenido para cada variable tenía un valor menor de 0,05 (5%). Traduciendo este análisis de convergencia en número de imágenes, como resultado genérico para todos los casos estudiados, se determinó que aproximadamente las primeras 500 imágenes tenían que ser eliminadas para asegurar que el flujo había alcanzado el comportamiento estacionario del cuerpo de la pluma. Se ha de tener en cuenta que este análisis se llevó a cabo considerando aquellas imágenes en las que la pluma ya estaba totalmente desarrollada en el área de estudio.

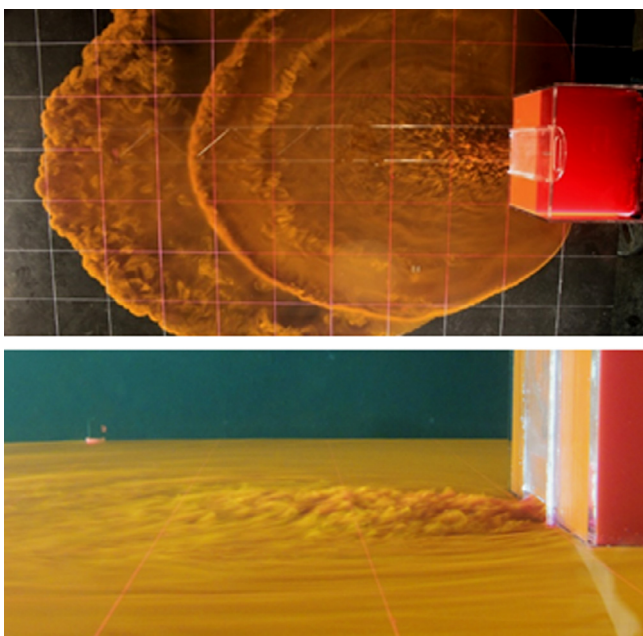


Figura 2. Fotografías de la planta y perfil del dispositivo de descarga en 2 instantes iniciales diferentes del vertido constante de salmuera.

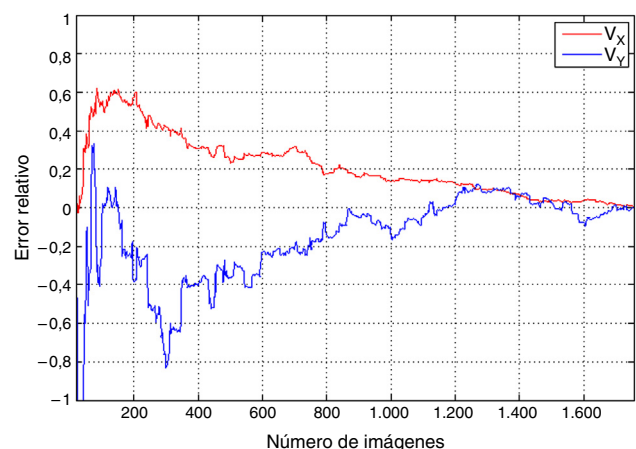


Figura 3. Análisis de la convergencia estadística de velocidad.

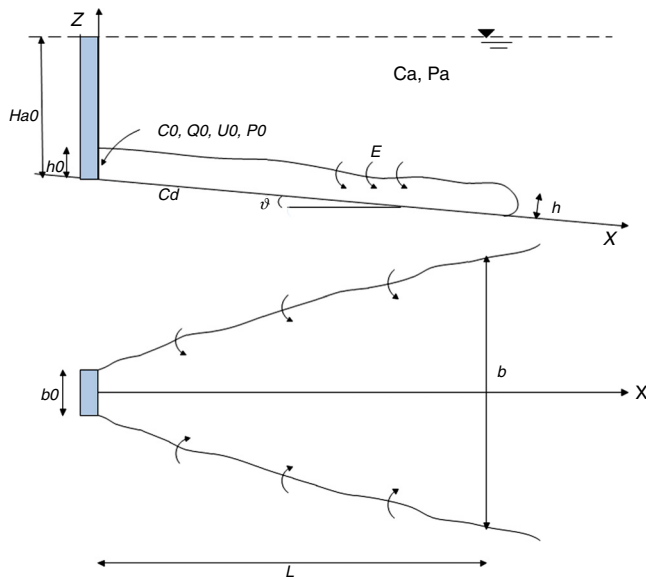


Figura 4. Esquema de una corriente de gravedad hipersalina tridimensional (es decir, no confinada lateralmente).

La **figura 4** muestra un esquema de las corrientes de gravedad generadas por este tipo de plumas hipersalinas, características del campo lejano de los vertidos de desaladoras. La nomenclatura utilizada en esta figura es la utilizada a lo largo de todo el artículo.

La **tabla 1** resume las condiciones experimentales y parámetros iniciales de las corrientes de gravedad experimentadas en este estudio. Para establecer esta casuística fueron necesarias pruebas previas que asegurasen buenas mediciones PIV-PLIF y al mismo tiempo un comportamiento de tipo pluma hipersalina característica de la región de campo lejano. Esto último se consiguió haciendo coincidentes las condiciones iniciales del flujo (velocidades de descarga, diferencias de densidad, caudal y espesor) con las características finales de la región de campo cercano definidas en los trabajos [23] y [28]. Además, la pendiente suave del fondo fue elegida tratando de imitar las pendientes de las plataformas costeras donde habitualmente se realizan los vertidos de salmuera. El CASO 1 es el caso base a partir del cual se generan el resto de casos, modificando únicamente una de sus variables objeto del estudio de sensibilidad: el espesor inicial del vertido (h_0), el caudal de descarga (Q_0), la pendiente en el fondo (θ) o la diferencia de densidad entre el medio receptor y el vertido ($\rho_a - \rho_0$). Además de estas variables, en la **tabla 1** se definen las magnitudes derivadas útiles a la hora de describir la caracterización del flujo (apartado de resultados 3) como son la velocidad de descarga U_0 , el flujo de

cantidad de movimiento Mf_0 , el flujo de flotabilidad Bf_0 , el número de Reynolds Re_0 y el número de Richardson Ri_0 :

$$U_0 = \frac{Q_0}{b_0 h_0} \quad (2)$$

$$Mf_0 = b_0 h_0 U_0^2 \quad (3)$$

$$Bf_0 = \frac{g(\rho_a - \rho_0)}{\rho_a} b_0 h_0 U_0 \quad (4)$$

$$Re_0 = \frac{U_0 h_0}{\nu} \quad (5)$$

$$Ri_0 = \frac{g(\rho_a - \rho_0)}{\rho_a} \frac{h_0 \cos \theta}{U_0^2} \quad (6)$$

donde ν es la viscosidad cinemática del fluido, aproximadamente $\nu \sim 1 \cdot 10^{-6}$ para todos los casos estudiados.

Cabe señalar que el diseño experimental (modelo físico) utilizado ha sido dimensionado, dentro de las limitaciones obvias de las instalaciones existentes, de manera que existiera similitud geométrica y dinámica con un caso prototipo teórico a tamaño real (p. ej., una pluma del campo lejano de un vertido de salmuera). En este caso, de sencilla geometría, la similitud geométrica es directa, mientras que la similitud dinámica se consigue garantizando la igualdad del número adimensional de Froude ($Frd_0 = 1/\sqrt[3]{Ri_0}$) por ser un flujo totalmente desarrollado (se ha de tener en cuenta que la viscosidad no es un parámetro escalable; véase la referencia [29] sobre flujos turbulentos a escalas de laboratorio).

2.1. Parámetros de medición PIV-PLIF

La selección de parámetros PIV y PLIF es esencial para asegurar la calidad de las mediciones de velocidad y concentración en el flujo (véase [23]). Las **tablas 2 y 3** resumen los valores adoptados en el presente trabajo tras haber realizado previos análisis de sensibilidad de cada parámetro según los procedimientos planteados en [23].

3. Resultados

A continuación se presenta un análisis pormenorizado de los resultados de los ensayos reflejados en la **tabla 1**, mediante el estudio de la evolución de las variables que gobiernan el comportamiento hidrodinámico y de mezcla en el flujo.

3.1. Campos de variables fundamentales

Los campos instantáneos de velocidades y concentraciones obtenidos en el plano de simetría de las plumas hipersalinas

Tabla 1
Casuística experimental

	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5	CASO 6
Invariables						
Profundidad del agua (m) H_{a0}	0,460	0,460	0,460	0,460	0,460	0,460
Ancho de la ranura (m) b_0	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
Variables sujetas a estudio						
Espesor de la ranura (m) h_0	0,0256	0,0156	0,0256	0,0256	0,0256	0,0256
Pendiente (%) θ	1,000	1,000	1,000	2,500	4,500	1,000
Diferencia de densidad (kg/m^3) $\rho_a - \rho_0$	3,145	3,100	3,130	3,070	3,140	11,080
Caudal de descarga (l/min) Q_0	14,600	15,100	19,200	14,980	14,090	14,890
Magnitudes derivadas						
Velocidad de descarga (m/s) U_0	0,095	0,164	0,125	0,098	0,098	0,097
Flujo de cantidad de mov. (cm^4/s^2) Mf_0	2.289,225	4.112,200	3.979,167	2.470,659	2.488,802	2.397,652
Flujo de flotabilidad (cm^4/s^3) Bf_0	748,682	764,607	983,525	752,644	775,458	2700,170
N.º de Reynolds Re_0	2.423,717	2.515,134	3.197,285	2.494,175	2.512,490	2.498,929
N.º de Richardson Ri_0	0,088	0,017	0,050	0,082	0,082	0,296

Tabla 2

Parámetros utilizados en el proceso de calibración PIV

Parámetro PIV	Valor y justificación
Partículas	PSP-50, partículas de poliamida, diámetro 50 μm y densidad 1.030 kg/m^3 . Diámetro efectivo 2-3 píxeles, dentro del rango recomendado por [30]
Tamaño de la ventana de interrogación	16 $\times$ 16 píxeles ² con superposición del 50%. Entre 5 y 10 partículas deben permanecer entre las 2 ventanas de interrogación [31]
Separación entre pares de imágenes PIV	Fueron necesarios 2 tiempos entre pulsos: 1) $\text{dt} = 15.000 \mu\text{s}$, para los primeros 600-800 mm, 2) $\text{dt} = 30.000 \mu\text{s}$ para la zona más alejada. La norma dice que el desplazamiento de la partícula entre pulsos debe ser menor que $\frac{1}{4}$ de la ventana de interrogación
Post proceso	Función de correlación «standard cyclic FFT» con paso múltiple de 2 iteraciones

Tabla 3

Parámetros utilizados en el proceso de calibración PLIF

Parámetro PLIF	Valor y justificación
Trazador	Rodamina 6G, utilizada en trabajos previos por su baja toxicidad, por presentar menos fotoblanqueamiento, y por su insensibilidad a las variaciones de temperatura [32]
Concentración de trazador	12 $\mu\text{g}/\text{l}$. Esta concentración cumple los 2 requisitos básicos: 1) nivel de fluorescencia detectable en todo el flujo, 2) únicamente una pequeña zona cercana al punto de descarga afectada por efectos de atenuación [33]
Correcciones de imagen	Es necesario corregir las imágenes antes de transformarlas en campos de concentraciones: 1) restar el <i>background</i> o fondo de la imagen oscura de la cámara 2) correcciones transversales (distribución gaussiana del haz de luz) y longitudinales por atenuación de la luz láser
Procedimiento de calibración	Utilizando urnas de cristal de 2 y 5 l se calcularon curvas de calibración para valores de concentración de rodamina 6G entre 0 y 15 $\mu\text{g}/\text{l}$ para cada ensayo. Procedimiento descrito en [33]

generadas resultan de la correcta interpretación y el acople de las parejas de imágenes contiguas tomadas por las cámaras descritas en la sección 2. La figura 5 muestra un ejemplo de campos de concentración de la cámara 1 y 2 para distintos instantes en la evolución del CASO 1, donde se puede observar la alta resolución PLIF y, aunque no es el objeto de estudio de este trabajo, la evolución del frente de la corriente.

Puesto que el objetivo de estudio de este artículo es la caracterización de las corrientes de gravedad una vez alcanzan su estado completamente desarrollado (es decir, el cuerpo de la corriente y no la cabeza de esparcimiento) y estacionario (véase fig. 3), se obtienen los campos medios de las variables fundamentales de estos flujos: las componentes horizontal y vertical de la velocidad media (U_x y U_z), las componentes vertical y horizontal de las fluctuación de la velocidad media (U'_x y U'_z), la concentración media (C), la fluctuación de la concentración media (C') y la dilución media (S). Estas variables son obtenidas a partir de los campos instantáneos correspondientes de la siguiente manera:

$$U_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{xi} \quad (7)$$

$$U_z = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{zi} \quad (8)$$

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c_i \quad (9)$$

$$U'_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(u_{xi} - U_x)^2} \quad (10)$$

$$U'_z = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(u_{zi} - U_z)^2} \quad (11)$$

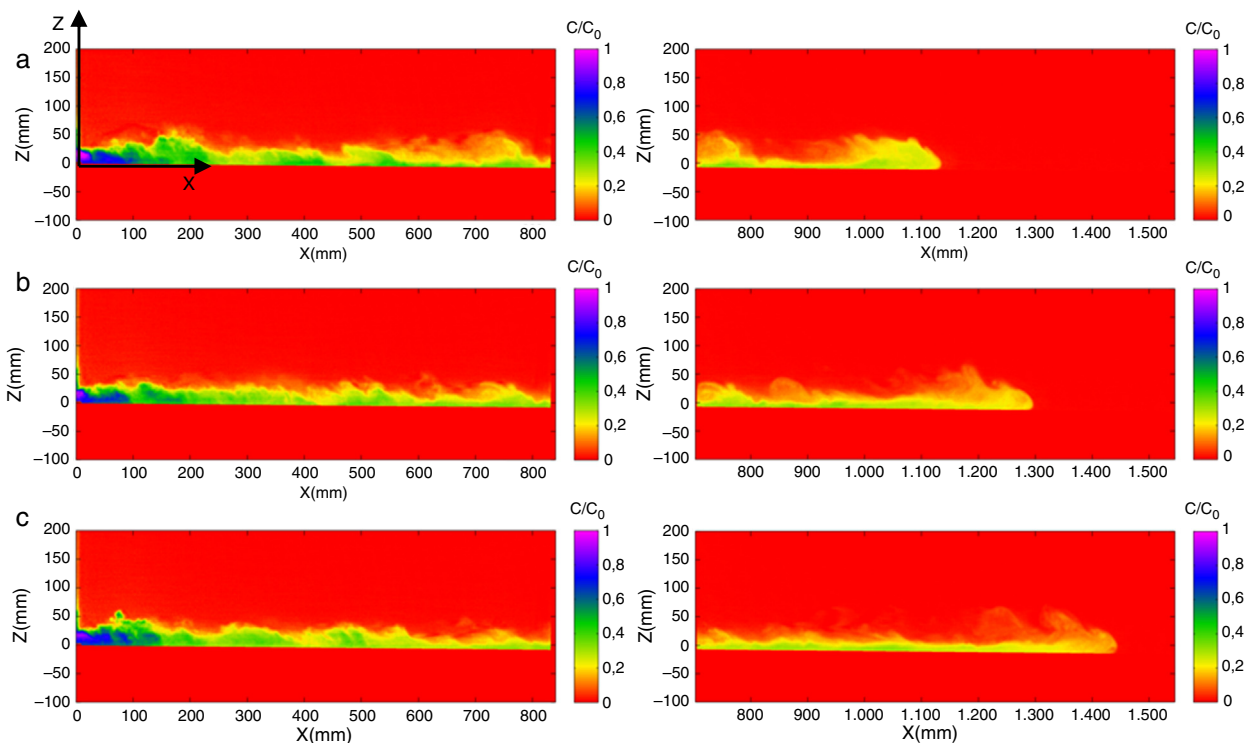


Figura 5. Campos instantáneos de concentración normalizada del CASO 1 de los instantes: a) 20 s; b) 30 s, y c) 40 s. Los campos de la columna de la izquierda corresponden a la cámara 1, y los de la derecha, a la cámara 2.

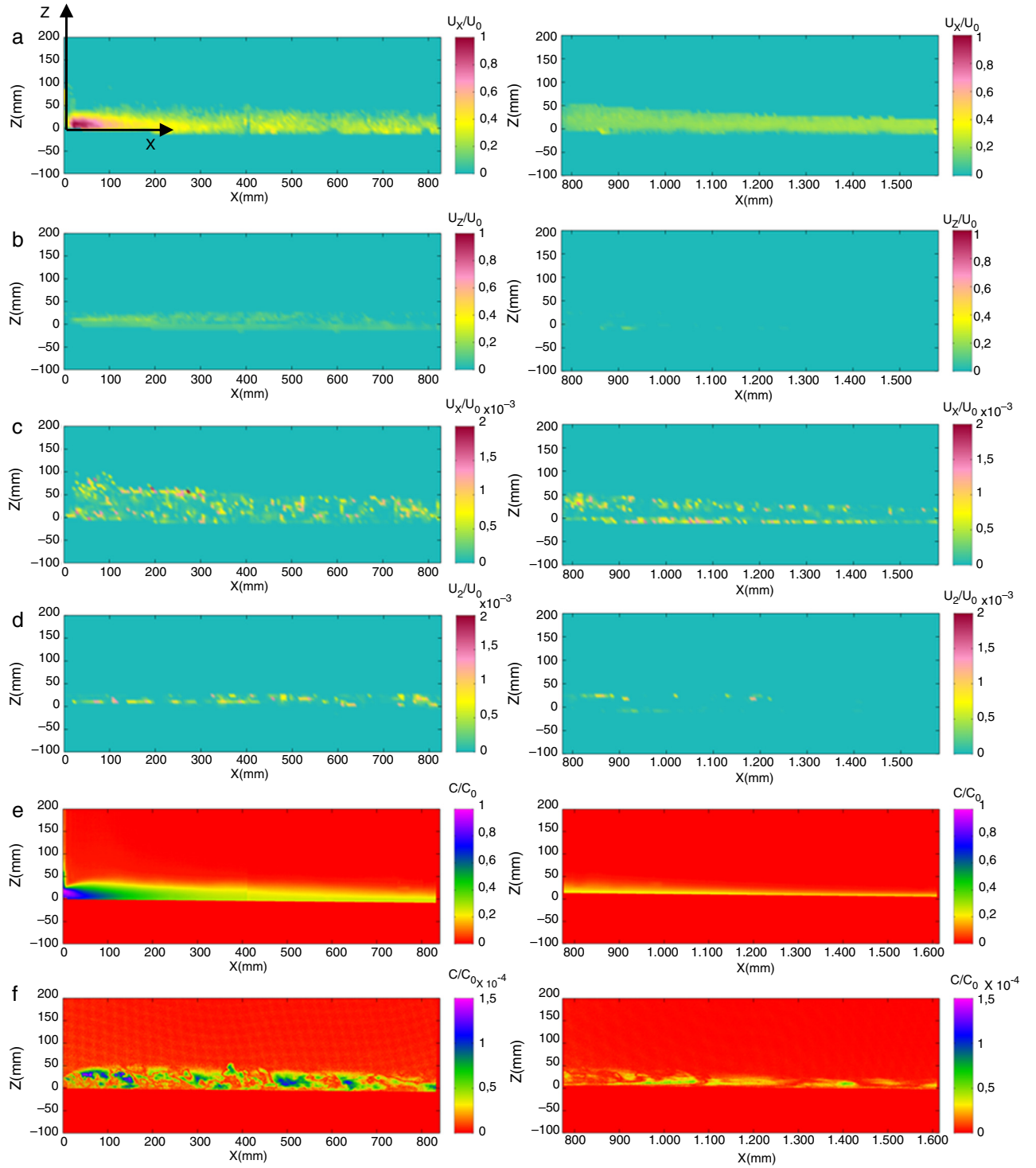


Figura 6. Campos medios de las variables normalizadas del CASO 1: a) velocidad media horizontal; b) velocidad media vertical; c) fluctuación de la velocidad media horizontal; d) fluctuación de la velocidad media vertical; e) concentración media, y f) fluctuaciones de concentración media. Los campos de la columna de la izquierda corresponden a la cámara 1, y los de la derecha, a la cámara 2.

$$C' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(c_i - C)^2} \quad (12)$$

$$S = \frac{C_0 - C_a}{C - C_a} \quad (13)$$

siendo: u_{xi} y u_{zi} los valores instantáneos de las componentes horizontal y vertical de la velocidad; c_i el valor instantáneo de concentración; N el número de imágenes; C_0 la concentración

de sal, y C_a la concentración de sal del medio receptor (en este caso, nula). Tras la visualización de todos los campos de variables citados para cada uno de los experimentos detallados (véase la [fig. 6](#), donde se muestran todas las variables promediadas para el CASO 1) se pueden extraer algunas conclusiones independientes del caso estudio debido a la gran similitud visual de estos campos. Las corrientes de gravedad estudiadas son flujos principalmente horizontales, siendo su componente vertical de la velocidad casi despreciable. La velocidad de las corrientes, al igual que sus fluctuaciones, disminuye

abruptamente en los primeros centímetros debido a la fricción con el fondo y con el agua en reposo en la zona superior. La última observación indica el colapso de las mayores escalas del espectro de turbulencia esperado en este tipo de flujos. Análogamente a los campos de velocidad, las concentraciones medias y sus fluctuaciones disminuyen rápidamente, siendo muy bajas aguas abajo. En términos de dilución, esto último se traduce en altas diluciones al final de las corrientes de gravedad estudiadas, lo cual es debido a la mezcla vertical y lateral con el fluido del medio receptor.

3.2. Perfiles longitudinales y transversales

Aprovechando las ventajas que ofrecen las técnicas PIV-PLIF frente a las clásicas medidas puntuales en el espacio, este estudio caracteriza el comportamiento de las corrientes de gravedad de manera continua en el espacio. De esta manera se han podido extraer perfiles longitudinales (fig. 7) de las variables más representativas de los flujos estudiados: la componente horizontal máxima de la velocidad horizontal normalizada ($U_{x\max}/U_0$) y la dilución mínima ($S_{\min}$). La figura 7 confirma las observaciones citadas en el apartado anterior: existen grandes gradientes en los perfiles longitudinales de velocidades y dilución (primeros 400–600 mm) hasta alcanzar un estado cuasi-estable a partir del cual la tasa de dilución es mínima y se mantiene en un valor casi constante. Este estado se denominará «estado normal» a lo largo del resto de documento, y es debido a 2 razones fundamentales: 1) la corriente de gravedad comienza a ser insensible al esparcimiento lateral en su plano de simetría longitudinal (eje de mayores concentraciones, y por tanto menores diluciones), y 2) la estratificación vertical estable que se alcanza debido al intercambio entre las fuerzas inerciales y de flotabilidad (véase [34]).

En la literatura científica (p. ej., [13,35–37]) la tasa de mezcla debida a la incorporación del fluido del medio receptor en la corriente de gravedad es comúnmente denominada coeficiente de «entrainment», E . Un gran número de publicaciones científicas (p. ej., [9] y [36]) han centrado sus investigaciones en la caracterización de esta tasa de dilución para corrientes de gravedad bidimensionales (lateralmente confinadas), por tanto en la caracterización del coeficiente E vertical. Dicha caracterización ha consistido fundamentalmente en la búsqueda de parametrizaciones del coeficiente E vertical en función del número adimensional de Richardson (Ri), que representa la relación entre la energía potencia y cinética del flujo. Algunas de estas parametrizaciones quedan reunidas en trabajo de [38], coincidiendo todas que a mayores números Ri existe

Tabla 4

Coficiente E_N medido una vez alcanzado el «estado normal» vs coeficiente E_w calculado mediante la ecuación (13) [19]

Casos	Ri_N	E_N	E_w
CASO 1	0,3229	0,0172	0,0108
CASO 2	0,1178	0,0274	0,0328
CASO 3	0,0961	0,0602	0,0395
CASO 4	0,1945	0,0277	0,0193
CASO 5	0,1283	0,0430	0,0301
CASO 6	0,3364	0,0124	0,0102

menor coeficiente E (es decir, menor dilución), llegando a ser inexistente para $Ri > 1$.

Para calcular el valor de dicho coeficiente E vertical de los ensayos realizados, a partir de la distancia aguas abajo en la que se puede asumir el «estado normal» (fig. 7) se utilizó el procedimiento descrito en [39], basado en la conservación de volumen y la hipótesis de autosimilitud entre perfiles transversales [19]. A modo de comprobación de esta hipótesis se analizaron los perfiles transversales debidamente adimensionalizados de las corrientes de gravedad estudiadas a distintas distancias del punto de descarga (véase algunos ejemplos en la fig. 8), confirmando que todos ellos quedan representados por una misma curva, es decir, son autosimilares. Dicho procedimiento de cálculo del coeficiente E vertical mediante datos experimentales queda resumido según la siguiente ecuación:

$$E = -\frac{h}{C_{\max}} \frac{dC_{\max}}{dx} \quad (14)$$

donde h y $C_{\max}$ son el espesor de la capa y la máxima concentración del perfil transversal de estudio (a una determinada distancia x en la horizontal), y $dC_{\max}$ y dx representan las diferencias de concentración máxima y distancia entre el perfil transversal de estudio y su consecutivo.

La tabla 4 reúne las parejas de valores de $Ri_N - E_N$ obtenidos de los experimentos de corriente tridimensional objeto de este estudio. El subíndice N indica que son valores estables a partir de la distancia aguas abajo en la que se asume «estado normal». Además, en la tabla 4 se presentan los valores de E obtenidos de la parametrización (15) propuesta por [19] a través de sus ensayos de pluma bidimensionales:

$$E_w = \frac{0.075}{(1 + 718 Ri^{2.4})^{0.5}} \quad (15)$$

Teniendo en cuenta que los valores de E_N obtenidos son coincidentes en orden de magnitud y tendencia (a mayor Ri_N , menor E_N) con los valores resultado de la parametrización (15), que fue establecida a través de ensayos de corrientes bidimensionales, se puede concluir que efectivamente la región caracterizada como «estado normal» en el plano de simetría de estas corrientes de gravedad tiene comportamiento de pluma bidimensional, es decir, su principal mecanismo de mezcla es a través del flujo vertical. Además, comparando los valores de E_N obtenidos para los casos experimentados en este estudio (tabla 4) se llega a la conclusión de que aquellos con mayores flujo de cantidad de movimiento M_f (es decir, con mayores velocidades iniciales generadas por menores espesores iniciales y mayores caudales, CASO 2 y CASO 3) y mayores pendientes (CASO 4 y CASO 5) favorecen la dilución frente al caso base (CASO 1). En cambio, en el caso con mayor diferencia de densidad, es decir, mayor flujo de flotabilidad B_f (CASO 6) se obtiene menor tasa de dilución. El rango de valores que toma E_N para todos los casos estudiados es de $2 \cdot 10^{-2}$ a $6 \cdot 10^{-2}$, valores correspondientes al CASO 6 y al CASO 3, respectivamente. Estos resultados coinciden con datos experimentales de estudios previos [9,19,37].

La figura 8 presenta los perfiles transversales adimensionalizados a distintas distancias del punto de descarga, tanto para concentración como para velocidad, de 2 de los casos estudiados.

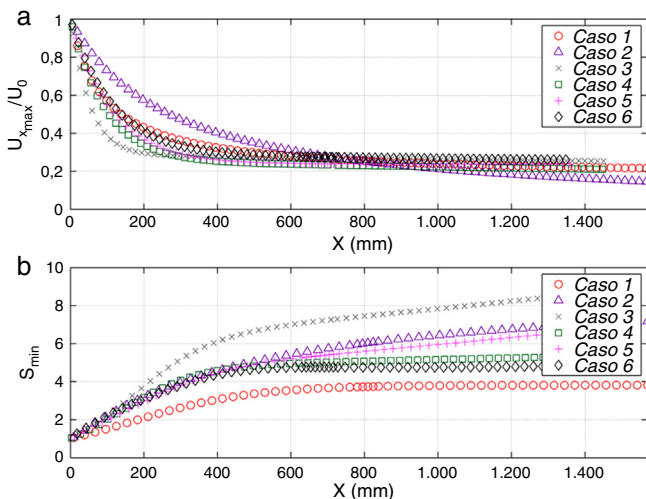


Figura 7. Perfiles longitudinales de todos los casos estudiados: a) máxima velocidad media horizontal normalizada, y b) mínima dilución media.

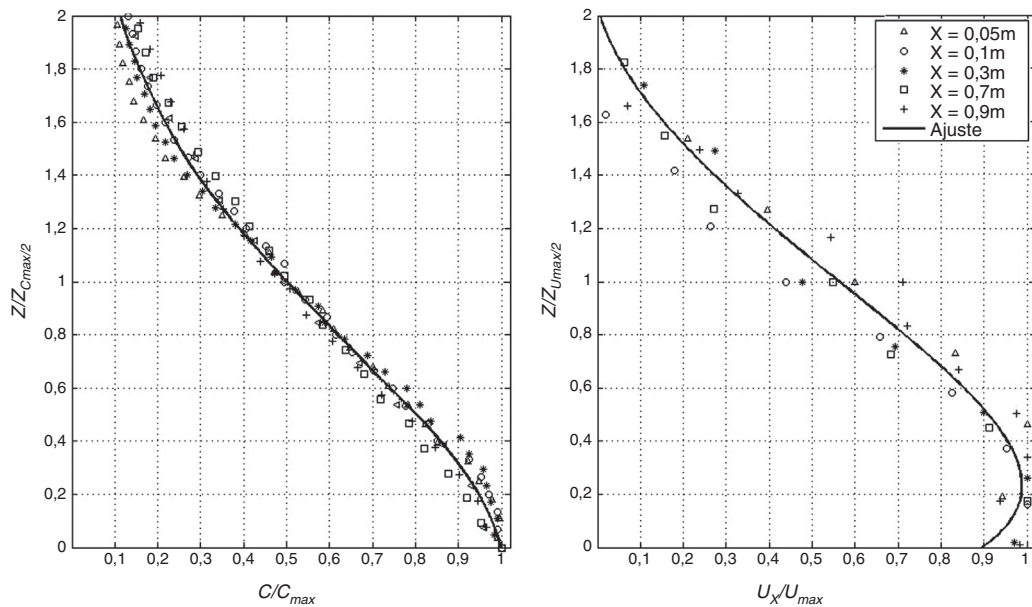


Figura 8. Autosimilitud de los perfiles transversales para el CASO 1 y curva polinómica de ajuste.

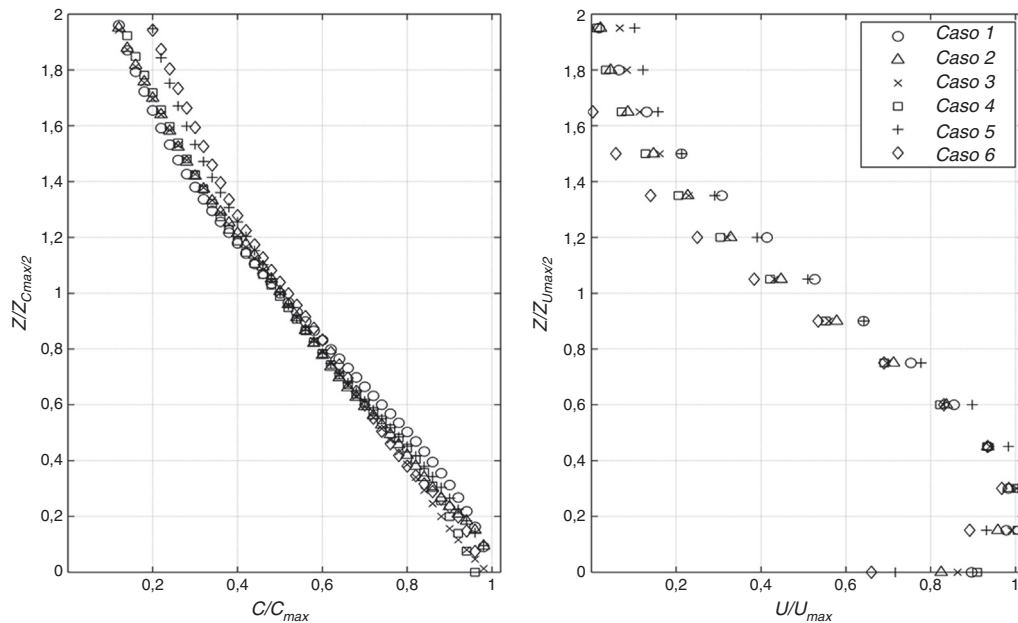


Figura 9. Autosimilitud de todos los perfiles transversales.

Como se observa todos ellos son autosimilares, convergiendo en una misma curva de ajuste polinómica. Se ha de señalar que las velocidades en la zona de contacto con el fondo son siempre cero, pero debido a la resolución de la técnica PIV y a las características geométricas de las plumas generadas, no se alcanza a medir en detalle esta zona. La figura 9 presenta todas las curvas polinómicas superpuestas, de manera que queda relegada la gran similitud entre ellas (autosimilitud entre secciones y entre las corrientes de gravedad generadas). Dicha autosimilitud generalizada para todos los casos permite establecer unos coeficientes de forma (descritos en [9,19,21]), S_1 y S_2 , que definen la distribución vertical de estas corrientes hipersalinas. S_1 y S_2 se calculan mediante el procedimiento explicado en [21], donde es necesaria la adecuada definición del espesor de la corriente de gravedad en cada perfil transversal aguas abajo del vertido. En este caso, el espesor se calculó como la distancia sobre el fondo a partir de la cual el valor de concentración

es menor que el 10% de la concentración máxima inicial. Para todos los casos experimentados, una vez alcanzado el «estado normal», los coeficientes de forma toman valores del rango 0,7–0,86 y 0,57–0,77, respectivamente. Estos valores corresponden a perfiles suaves de concentración y velocidad, más comunes para corrientes salinas que turbidíticas, que suelen asumir la aproximación «top-hat» (para perfiles más bruscos, con una zona de gran gradiente vertical; véase [19]), es decir, valores de S_1 , $S_2 \sim 1$.

4. Conclusiones

Se ha llevado a cabo un estudio experimental para caracterizar el comportamiento de las corrientes de gravedad tridimensionales generadas por un efluente hipersalino, tratando de reproducir el tipo de flujo característico del campo lejano de los vertidos de salmuera al mar. Dicho estudio ha tenido en cuenta un amplio rango de

diferentes condiciones iniciales lo más realistas posible (procedentes de la de la región predecesora, campo cercano) resultado de la variación del espesor inicial (0,015–0,025 m), el caudal de descarga (14,6–19,2 l/min), la pendiente en el fondo (1–4,5%) y la diferencia de densidad entre el vertido y el medio receptor (3,07–11,08 kg/m³). Mediante el correcto estudio de las diferentes corrientes de gravedad generadas se establecen importantes conclusiones referentes al estado del conocimiento de las plumas hipersalinas resumidas a continuación.

El análisis de los campos de concentración y velocidad en el plano de simetría de las corrientes generadas, así como los perfiles longitudinales extraídos de ellos, revelan una abrupta caída de sus valores, tanto en velocidad como en concentración: la velocidad queda reducida aproximadamente en un 80% respecto a sus valores iniciales en todos los casos, mientras que la concentración tiene un mayor rango de valores según el caso de estudio, reducciones desde un 75% hasta un 87,5% (en términos de dilución, desde 4 a 8). Las fluctuaciones de las variables anteriores muestran un comportamiento similar, revelando el esperado colapso de las mayores escalas del espectro de turbulencia característicos del campo lejano. Fruto de estas observaciones se establece un «estado normal» a una distancia aproximada de 600 mm aguas abajo de la descarga (distancia común para todos los casos), que se caracteriza por una estabilización de la tasa de variación de la velocidad, así como por una tasa de dilución o coeficiente «*entrainment*» cuasi constante (E_N). Se evaluaron los valores de los coeficientes E_N para cada caso de estudio y se compararon con parametrizaciones existentes en función del número de Ri_N extraídas del análisis de corrientes de gravedad bidimensionales (confinadas lateralmente). La similitud de ambas parejas de valores indica que una vez alcanzado el «estado normal», las corrientes de gravedad tridimensionales estudiadas tienen un comportamiento de pluma bidimensional en su plano de simetría, es decir, su principal mecanismo de mezcla es a través del flujo vertical. En base a los valores del coeficiente E_N se hizo el análisis de sensibilidad a las variables estudiadas, revelando que las pendientes del fondo más acentuadas y las mayores velocidades iniciales favorecen la dilución, alcanzando valores del coeficiente E_N 2 veces mayores que el caso base (CASO 1). Atendiendo al análisis de los perfiles transversales, se confirma la autosimilitud entre secciones de concentración y velocidad a distintas distancias del punto de descarga, y se aporta un rango de valores aproximado de los parámetros de forma de cara a futuras calibraciones.

Finalmente, gracias a estos ensayos se ha completado la base de datos experimentales de alta resolución iniciada con los ensayos de campo cercano desarrollados en el marco del proyecto MEDVSA [40]. La base de datos de campo cercano se utilizó para calibrar las herramientas de modelado numérico de vertidos de salmuera «*brIHne*» [23,25] desarrolladas en IH Cantabria, que aplican las ecuaciones de gobierno integradas y análisis dimensional. Con la nueva base de datos de campo lejano presentada en este artículo se podrá realizar el trabajo análogo de calibración de herramientas numéricas para predicción del campo lejano de estos vertidos. Se podrán calibrar tanto herramientas numéricas simplificadas basadas en las ecuaciones de gobierno integradas en vertical [9,13,37], que aportan un orden de magnitud de la dilución obtenida a lo largo de todo el cuerpo de la pluma hipersalina, como herramientas numéricas avanzadas (sistemas de modelado hidrodinámicos como Delft3D [41] y Telemac3D [42–44]) que pueden simular el comportamiento de estas plumas en condiciones del medio receptor más realistas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido llevado a cabo gracias a la financiación de los planes nacionales de I+D+i MEDVSA (2009–2011) y SALTICOR

(20011–2012), así como a la beca Formación de Personal de Investigación (FPI) concedida por el Ministerio de Economía y Competitividad mediante el Programa Estatal de Promoción del Talento y su Empleabilidad en I+D+i (subprograma Estatal de Formación). Para realizar los experimentos se han utilizado las instalaciones del Laboratorio de Ingeniería de Costas, Oceanografía e Hidráulica (IHLab Hidro) de IH Cantabria.

Bibliografía

- [1] Buceta JL, Fernandez-Torquemada Y, García E, Invers O, Mas J, Romero J, et al. Investigación conjunta sobre la tolerancia de *Posidonia oceanica* a incrementos de salinidad. Ingeniería Civil 2003;132:111–6.
- [2] Fernández-Torquemada Y, Sánchez-Lizaso JL. Effects of salinity on leaf growth and survival of the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica* (L.) Delile. J Exp Mar Bio Ecol 2005;320:57–63.
- [3] Piro A, Marín-Guirao L, Serra IA, Spadafora A, Sandoval-Gil JM, Bernardeau-Esteller J, et al. The modulation of leaf metabolism plays a role in salt tolerance of *Cymodocea nodosa* exposed to hypersaline stress in mesocosms. Front Plant Sci 2015;6:464.
- [4] Palomar P, Losada IJ. Desalination in Spain: Recent developments and recommendations. Desalination 2010;255:97–106.
- [5] Palomar P, Lara JL, Losada IJ, Rodrigo M, Álvarez A. Near field brine discharge modelling part 1: Analysis of commercial tools. Desalination 2012;290:14–27.
- [6] Palomar P, Lara JL, Losada IJ. Near field brine discharge modeling part 2: Validation of commercial tools. Desalination 2012;290:28–42.
- [7] Simpson JE. Gravity currents in the laboratory, atmosphere, and ocean. Annu Rev Fluid Mech 1982;14:213–34.
- [8] Huppert HE. Gravity currents: A personal perspective. J Fluid Mech 2006;554:299.
- [9] Ellison TH, Turner JS. Turbulent entrainment in stratified flows. J. Fluid Mech 1959;6:423.
- [10] Bombardelli FA, Cantero MI, García MH, Buscaglia GC. Numerical aspects of the simulation of discontinuous saline underflows: The lock-exchange problem. J Hydraul Res 2009;47:777–89.
- [11] Meiburg E, Radhakrishnan S, Nasr-Azadani M. Modeling gravity and turbidity currents: Computational approaches and challenges. Appl Mech Rev 2015;67:40802.
- [12] Nasr-Azadani MM, Meiburg E. Gravity currents propagating into ambient with arbitrary shear and density stratification: Vorticity-based modeling. Q J R Meteorol Soc Jan 2016;142:1359–70.
- [13] Alavian V. Behavior of density currents on an incline. J Hydraul Eng 1986;112:27–42.
- [14] Hosseini SA, Shamsai A, Ataie-Ashtiani B. Synchronous measurements of the velocity and concentration in low density turbidity currents using an Acoustic Doppler Velocimeter. Flow Meas Instrum 2006;17:59–68.
- [15] Portillo E, Ruiz de la Rosa M, Louzara G, Quesada J, Ruiz JM, Mendoza H. Dispersion of desalination plant brine discharge under varied hydrodynamic conditions in the south of Gran Canaria. Desalin Water Treat 2013;52:164–77.
- [16] Cantero MI, Balachandrar S, García M, Bock D. Turbulent structures in planar gravity currents and their influence on the flow dynamics. J Geophys Res 2008;113:C08018, <http://dx.doi.org/10.1029/2007JC004645>.
- [17] Cantero MI, Lee JR, Balachandrar S, García MH. On the front velocity of gravity currents. J Fluid Mech 2007;586:1.
- [18] Salinas JS, Cantero MI, Dari EA. Simulación directa de turbulencia en corrientes de gravedad con efecto Coriolis. RIBAGUA – Rev Iberoam Agua 2014;1:26–37.
- [19] Parker G, García M, Fukushima Y, Yu W. Experiments on turbidity currents over an erodible bed. J Hydraul Res 1987;25:123–47.
- [20] Turner JS. Turbulent entrainment: The development of the entrainment assumption, and its application to geophysical flows. J Fluid Mech 1986;173:431.
- [21] García MH. Hydraulic jumps in sediment-driven bottom currents. J Hydraul Eng 1993;119:1094–117.
- [22] Tarrade JL, Palomar L, Losada P, Lara IJ. Non-intrusive optical techniques for the experimental modelling of brine discharges. In EDS (European Desalination Society) Congress: Desalination for the Environment, Clean Water and Energy 2012.
- [23] Palomar Herrero P. Optimización experimental y numérica de vertidos hipersalinos en el medio marino [tesis doctoral]. Universidad de Cantabria; 2014.
- [24] Tarrade JL, Palomar LP, Lara JL. Técnicas experimentales avanzadas para caracterizar los vertidos de salmuera. Calibración de modelos numéricos. Ponencia: Jornadas de Puertos y Costas XXII 2013.
- [25] Disponible en: <http://www.brihne.ihcantabria.com/> [consultado 15 Ene 2016].
- [26] Martin JE, García MH. Combined PIV/PLIF measurements of a steady density current front. Exp Fluids 2008;46:265–76.
- [27] Liao Q, Cowen EA. Relative dispersion of a scalar plume in a turbulent boundary layer. J Fluid Mech 2010;661:412–45.
- [28] Palomar P, Lara JL, Losada IJ. PIV-PLIF experimental study of the spreading layer arisen from brine jet discharges. En preparación 2016.

- [29] Brethouwer G, Billant P, Lindborg E, Chomaz J-M. Scaling analysis and simulation of strongly stratified turbulent flows. *J Fluid Mech* 2007;585:343.
- [30] Willert C. The fully digital evaluation of photographic PIV recordings. *Appl Sci Res* 1996;56:79–102.
- [31] Keane RD, Adrian RJ. Optimization of particle image velocimeters. I. Double pulsed systems. *Meas Sci Technol* 1990;1:1202–15.
- [32] Crimaldi JP. Planar laser induced fluorescence in aqueous flows. *Exp Fluids* 2008;44:851–63.
- [33] Ferrier AJ, Funk DR, Roberts PJW. Application of optical techniques to the study of plumes in stratified fluids. *Dyn Atmos Ocean* 1993;20:155–83.
- [34] Britter RE, Linden PF. The motion of the front of a gravity current travelling down an incline. *J Fluid Mech* 1980;99:531–43.
- [35] Morton BR, Taylor G, Turner JS. Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources. *Proc R Soc A Math Phys Eng Sci* 1956;234:1–23.
- [36] Parker G, Fukushima Y, Pantin HM. Self-accelerating turbidity currents. *J Fluid Mech* 1986;171:145.
- [37] Fukuoka Y, Fukushima S. Reservoir, On Dynamic Behavior of the Head of the Gravity Current in a Stratified. En: In: *Proceedings of Second International Symposium on Stratified Flow, IAHR*. 1980. p. 224–7.
- [38] Chowdhury MR, Testik FY. A review of gravity currents formed by submerged single-port discharges in inland and coastal waters. *Environ Fluid Mech* 2014;14:265–93.
- [39] Dallimore CJ, Imberger J, Ishikawa T. Entrainment and turbulence in saline underflow in Lake Ogawara. *J Hydraul Eng* 2001;127:937–48.
- [40] Disponible en: www.medvsa.es, [consultado 15 Ene 2016].
- [41] Roelvink JA, Van Banning KFM. Design and development of DELFT3D and application to coastal morphodynamics, *Hydroinformatics*, 94. The Netherlands: Balkema Rotterdam; 1994. p. 451–5.
- [42] Hinkelmann R. Efficient numerical methods and information-processing techniques for modeling hydro- und environmental systems. *Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics*, 21. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag; 2005.
- [43] Hervouet JM. *Hydrodynamics of Free Surface Flows, Modelling with the Finite Element Method*. England: John Wiley and Sons Ltd; 2007.
- [44] LNHE, National Hydraulics and Environment Laboratory (2007), *Telemac Modeling System: Telemac-3D Code, Operating manual* [consultado 10 Feb 2013]. Disponible en: <http://www.opentelemac.org/downloads/MANUALS/TELEMAC-3D/manualt3d.v5p8.v4.gb.pdf>.