

Capítulo 5

RESULTADOS DE LA PLUMA.

Alguna vez me imaginé que estaría en una situación parecida, pero entonces era un niño. -Le Pradet 2 de Junio de 2002.

5.1 Modelos experimentales.

5.1.1 Mezcla costera horizontal.

El frente turbulento generado por chorros (jets) provenientes de agua que se inyectaba y succionaba a la vez, por orificios con la ayuda de una bomba a través de un par de tubos. Generó un avance del frente turbulento mostrado en la figura 5.1 para el experimento §3.3.3

El avance de un frente turbulento de estas características puede hacerse evidente por medio de el análisis de la posición de frente como se muestra en la figura 5.2, esta muestra las posiciones del frente turbulento a los tiempos de 0, 2, 12, 22 cada 10 segundos hasta 172 segundos. Cabe hacer notar que la circulación generada en el tanque por los jets de succión-ejección presentaba un giro ciclónico, en el mismo sentido que el generado por el jet que produce la corriente general.

Se hace evidente que el avance del frente llega a un máximo y a partir del cual la posición respecto del eje x oscila, este experimento se repitió tres veces con una circulación general inicial forzada por la bomba pequeña y sin la circulación general inicial; de tal manera que la tendencia del área del frente respecto al tiempo es mostrada en la figura 5.3

La regresión de la función potencial del área que envuelve el frente turbulento respecto al tiempo, puede escribirse como:

$$a = \sqrt{kt}^{1/2} \quad (5.1)$$

donde a es el área como función del tiempo t y para este caso la constante $K = 0.01m^4s^{-1}$.

Por lo que el aumento del área cerca de la fuente de los jets, puede considerarse de manera exponencial respecto del tiempo, y lo consideraremos como la zona

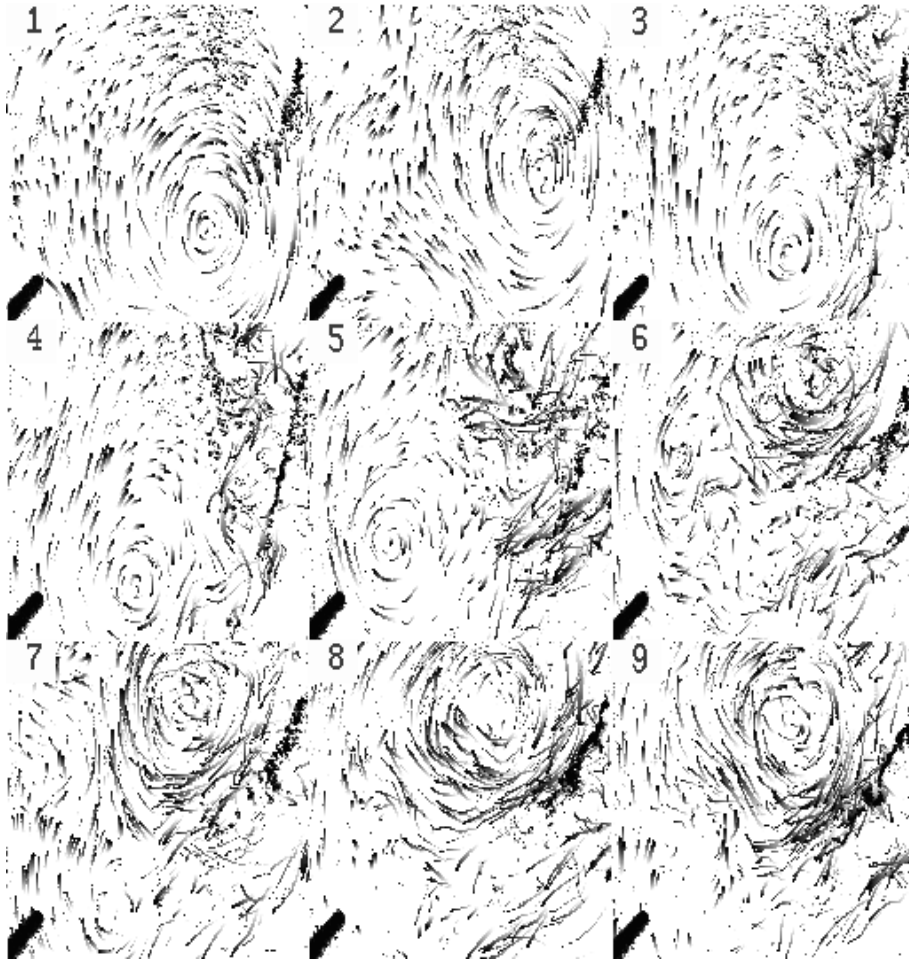


Figura 5.1: Serie de tiempo para el avance de un frente turbulento generado por jets de inyección y succión. Se muestran nueve fotogramas en los tiempos de 0, 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 y 15 segundos.

controlada por la fuerza del jet, mientras que fuera de esta, el área que engloba el frente turbulento esta controlada por el ambiente; en este caso la fuerza de la corriente general y las dimensiones del tanque.

Tomando en cuenta lo anterior se observa que el avance del frente turbulento se vió favorecido en sus condiciones por la presencia de la corriente litoral inducida por la bomba pequeña, mientras que para el experimento sin esta corriente litoral, el incremento inicial del área fue mayor; sin embargo alcanzó la misma área máxima ($\approx 6300\text{cm}^2$) para un tiempo similar que el del experimento donde la corriente litoral estuvo presente.

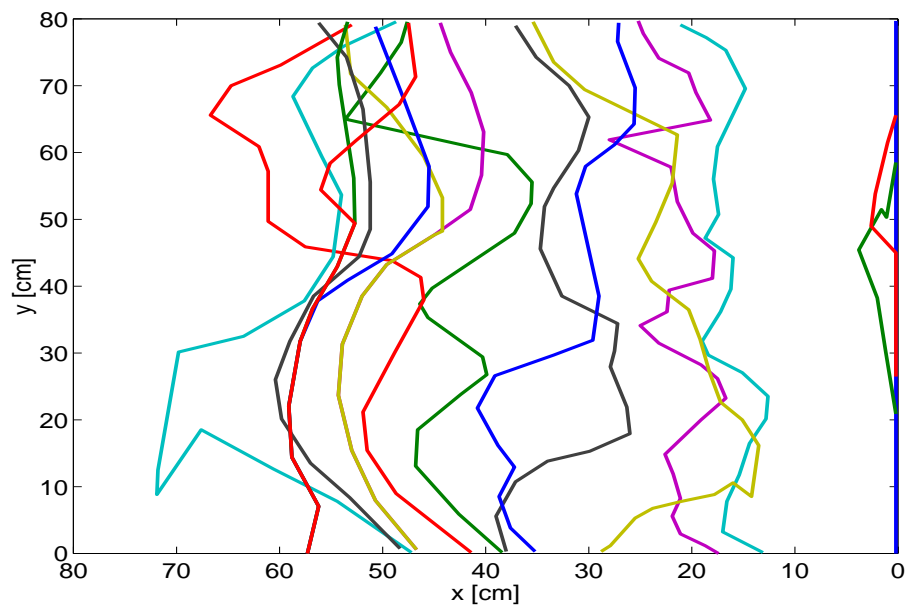


Figura 5.2: Serie de tiempo para el avance del frente turbulento a los tiempos: 0, 2, 12, 22..., 172 segundos.

5.1.2 La pluma en el Ebro.

La modelización experimental de la pluma en el delta del Ebro en la mesa rotatoria se llevó a cabo para condiciones de flujo similares a las observadas en el estuario. Sin embargo estas están condicionadas por los caudales de salida en la desembocadura. Como lo indica la tabla 5.1 donde se colocan los caudales por ordenados la magnitud de los mismos.

Tabla 5.1: Caudales utilizados para la modelación experimental de la pluma.

Caudal [m^3s^{-1}]	Condiciones
114.33	Verano
121.27	Primavera
287.00	Otoño
635.70	Invierno

5.1.3 Series de tiempo.

Este experimento se montó con dos tipos de observaciones diferentes, uno que permitía observar las estructuras presentes en la plataforma marina cercana a la desembocadura del estuario debidas a la presencia de los diferentes flujos que son los siguientes:

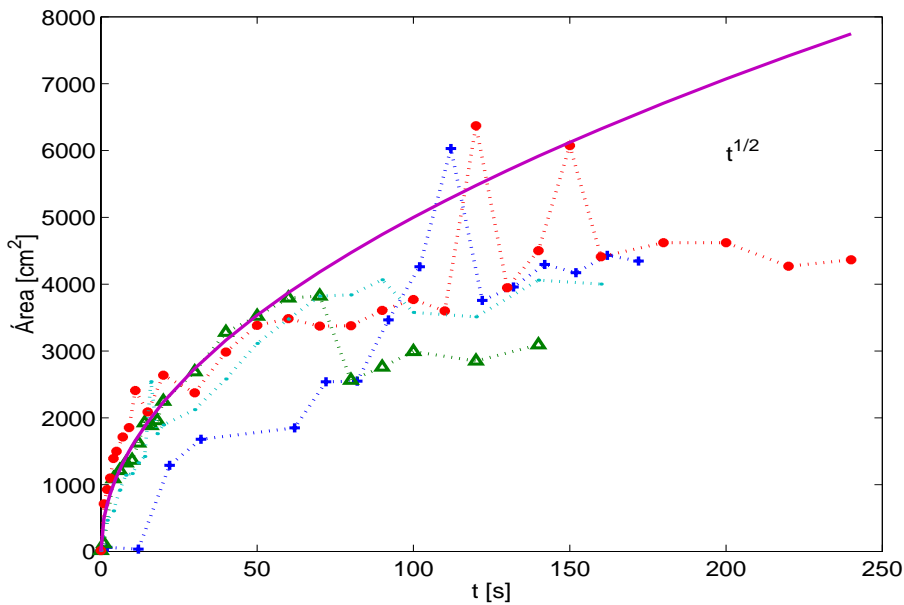


Figura 5.3: Área del frente turbulento para condiciones de corriente litoral (+, Δ , \bullet) y sin corriente litoral (*).

1. Las estructuras características desarrolladas en la superficie por medio de seguimiento de partículas de *plyolita*.
2. El desarrollo de la pluma en la plataforma cercana por medio de colorante colocado en el agua dulce de la pluma.

Flujo superficial.

La figura 5.4 representa la serie de tiempo para el caudal de $114.33 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, donde el delta del Ebro se encuentra a la derecha destacado en color blanco. Las líneas blancas son el seguimiento de partículas de *plyolita* por el método de *particle tracking* con la ayuda del software *DigImage* con un tiempo de 11.2 segundos. Todas las figuras mostradas en esta sección tienen las mismas características para el seguimiento de partículas. La filmación se hizo sobre un fondo negro.

Caudal $114.33 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Para esta serie de tiempo puede observarse que existe una intermitencia en en la formación de estructuras coherentes debido a la presencia del jet que se descarga por la desembocadura del delta. En el tiempo de 60 segundos podemos observar una estructura bipolar justo en la desembocadura. Por un lado el vórtice que se encuentra al norte interacciona con la costa haciendo que a los 120 segundos este se fragmente en dos para posteriormente seguir esta dinámica de formación y fragmentación en el norte entre los 180 y 240 segundos. Por otra parte el vórtice sur se elonga a lo largo de la costa de la barra del fanglar hasta generar una corriente longitudinal a los 240 segundos.

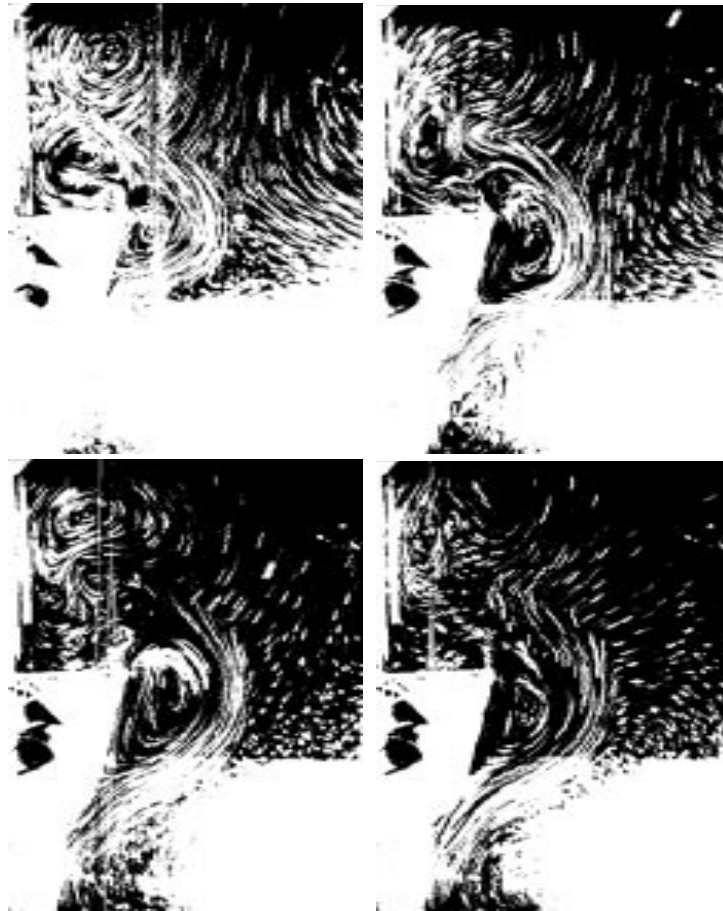


Figura 5.4: Estructuras presentes área cercana al delta del Ebro experimental bajo el caudal de $114.33 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para los tiempos 60, 120, 180 y 240 segundos.

Caudal $121.27 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Para el caudal de modelado $121.27 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ experimentalmente la serie de tiempo mostrada en la figura 5.5, presenta básicamente la interacción de dos vórtices a los 60 segundos, que se elongan a los 120 segundos y a los 180 el vórtice más proximo a la desembocadura se fragmenta e interacciona con un vórtice bipolar similar al formado en los primeros 60 segundos del caudal $114.33 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Finalmente a los 240 segundos el vórtice norte aparece claramente y comienza un incremento en el tamaño del vortice sur.

Caudal $287.00 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. En la figura 5.6 se destaca la presencia a los 60 segundos de un solo vórtice frente al delta del Ebro que permanece estable elongandose y creciendo a los 120 segundos. Este mismo a los 180 segundos se fracciona formando el vortice norte, sur y uno más central alejado de la costa y finalmente a los 240 segundos, forma nuevamente un vórtice principal que comienza a interactuar con otro vórtice formado por el ambiente.

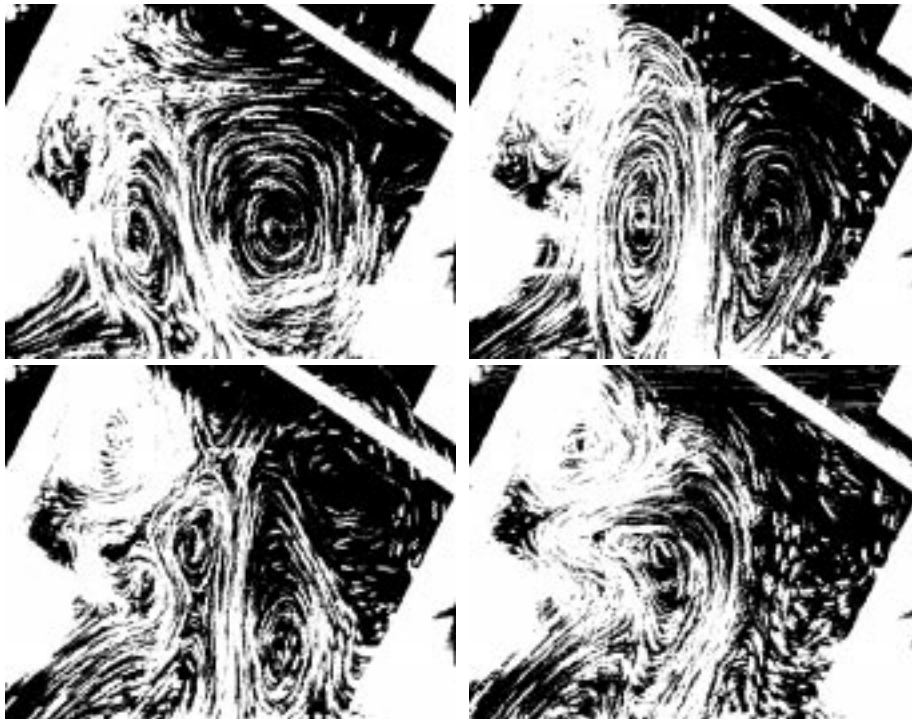


Figura 5.5: Estructuras presentes área cercana al delta del Ebro experimental bajo el caudal de $121.27 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para los tiempos 60, 120, 180 y 240 segundos.

Caudal $635.70 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Este último análisis experimental para el jet que forma las descargas del estuario bajo estudio presenta los resultados para el caudal de $635.70 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Inicialmente puede observarse que a los 60 segundos ya existe un gran vórtice que ocupa buena parte del área de estudio y comienza lentamente a interactuar con la costa formando un pequeño vórtice norte que esta claro a los 180 segundos. Es a los 240 segundos cuando este gran giro comienza a ser desplazado por el giro norte.

5.1.4 Escalas características superficiales.

La tabla 5.2 representa las longitudes características de la circulación inducida por la presencia de las descargas del estuario en el mar adyacente. Estas están hechas sobre un tiempo de 120 segundos. Puede observarse que conforme aumentan los caudales, la longitud de la circulación inducida se incrementa, mientras que para el caudal de $634.70 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ la longitud se mantiene similar a la inducida por el caudal de $287.00 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

5.1.5 Flujo en la columna de agua.

Las pluma formada por el modelo experimental bajo las diferentes condiciones alcanzó una estabilidad a diferentes tiempos dependiendo de la velocidad de sa-

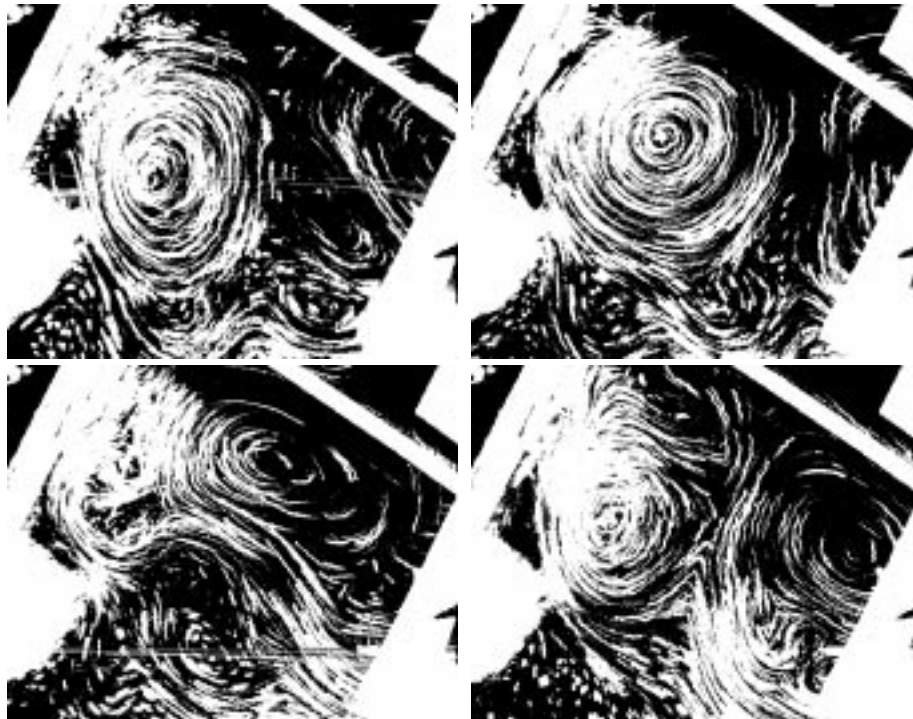


Figura 5.6: Estructuras presentes área cercana al delta del Ebro experimental bajo el caudal de $287.00 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para los tiempos 60, 120, 180 y 240 segundos.

lida del jet experimental del delta del Ebro, pero en todos los casos a los 120 segundos en el experimento que se corresponde con 44 horas en la naturaleza, donde las condiciones de la pluma permanecieron estables, la figura 5.8 muestra estas condiciones.

La referencia para esta figura es: La costa se encuentra en el margen izquierdo de la imagen y el delta del Ebro a escala se puede ver en la esquina inferior izquierda, la pluma es formada por el líquido coloreado que en las imágenes se muestra más oscuro. Todas las figuras comparativas entre condiciones presentarán el orden siguiente, arriba a la izquierda condiciones bajo el caudal de $114.33 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, arriba a la derecha condiciones bajo el caudal de $121.27 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, abajo a la izquierda condiciones bajo el caudal de $287.00 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y por último abajo a la derecha condiciones presentes con un caudal de $635.70 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Para las diferentes condiciones, se puede observar que en la pluma formada con caudales 121.27 , 287.00 y $635.70 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, forman un vórtice justo al centro de las imágenes mientras que la pluma bajo las condiciones de $114.33 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ queda atrapada en un vórtice mayor, pero no forma parte íntegra de él. La tabla 5.3, muestra las longitudes características de los vórtices observados en la experimentación, bajo estas referencias puede notarse que los vórtices de mayor a menor se agruparon de acuerdo a los valores de los caudales usados; para las condiciones que se desean representar.

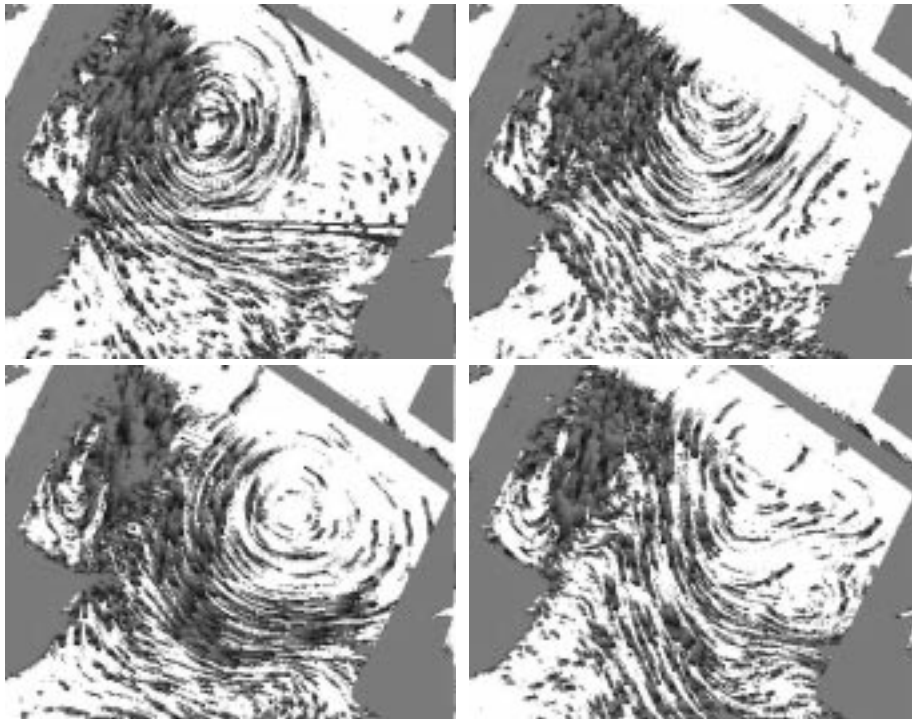


Figura 5.7: Estructuras presentes área cercana al delta del Ebro experimental bajo el caudal de $635.70 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para los tiempos 60, 120, 180 y 240 segundos.

5.1.6 Escalas características.

Bajo las circunstancias arriba descritas, las longitudes características de las manchas formadas por el marcador frente a las costas del delta, se muestran en la tabla 5.3, donde se toman las distancias del diámetro mayor, diámetro menor y la separación del vórtice principal de la desembocadura.

5.2 Modelo numérico.

Los resultados de la simulación con el modelo descrito en §3.3.14 muestra valores de carácter cualitativo y cuantitativo, de tal manera que podemos estudiar mejor el desarrollo de un trazador pasivo como la salinidad en este caso.

5.2.1 Salinidad superficial.

Los valores de la salinidad superficial modelados para las mismas condiciones experimentadas se encuentran plasmados en la figura 5.9, donde podemos apreciar que las isoclinas de los valores de salinidad de 10, 20, 25, 30 y 35 gkg^{-1} se encuentran presentes en todas las condiciones ocupando un espacio diferente en cada una de ellas.

Tabla 5.2: Longitudes características de la circulación inducida por las descargas del estuario en el mar adyacente modelado experimentalmente. A un tiempo de 120 segundos.

Caudal [m³s⁻¹]	L [km]
114.33	24.49
121.27	48.61
287.00	51.37
634.70	51.59

Tabla 5.3: Longitudes características de la pluma experimental expresadas como D= radio mayor, d= radio menor, s= distancia del inicio del vórtice formado por la pluma a la desembocadura del estuario.

Caudal [m³s⁻¹]	D [km]	d [km]	s [km]
114.33	35.83	14.30	13.65
121.27	75.73	31.40	16.18
287.00	85.91	66.34	59.02
635.70	104.97	63.41	57.48

5.2.2 Velocidad superficial.

La figura 5.10 presenta el campo de velocidades superficiales resultante de las modelaciones para los diferentes caudales bajo estudio matemático. Puede observarse que el campo de velocidades es muy similar en todos los casos, solo se diferencian en el área sobre la cual el campo causa efectos, principalmente es debido a que al parecer el caudal de salida menor necesita un tiempo mayor para alcanzar a afectar la una área determinada del que pueden lograr los caudales mayores.

5.2.3 Longitudes características.

Con el fin de poder comparar las longitudes características de las plumas resultantes de los diferentes tratamientos como lo son la experimentación de laboratorio y el modelado numérico, hemos calculado las longitudes características de la pluma modelada por medio de los valores donde la pluma modelada ha cambiado el valor de la salinidad de referencia ($37.7gkg^{-1}$), dando como resultado la representación de la figura 5.11, con las salinidades entre 4 y $37.5gkg^{-1}$. Los valores de las longitudes características de la pluma experimental observada bajo cada caudal, se pueden ver en la tabla 5.4 mientras que la figura 5.12 muestra las longitudes características observadas en el modelo numérico y experimental.

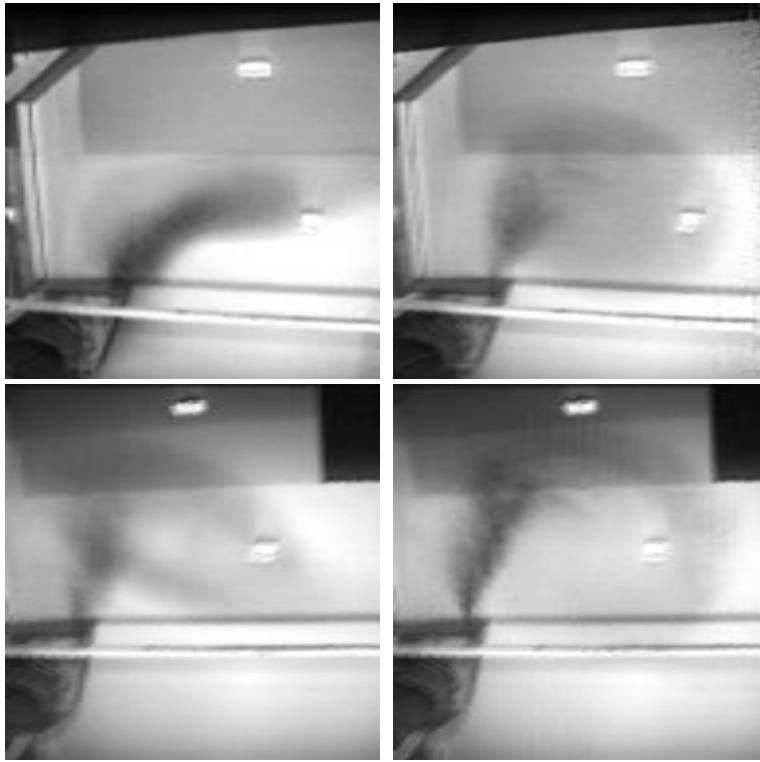


Figura 5.8: Condiciones experimentales para la pluma del río Ebro con caudales 114.33, 121.27, 287.00 y 635.70 $m^3 s^{-1}$ a los 120 segundos con rotación.

La diferencia de las relaciones parece ser debida a las escalas características de cada experimento. Debido sobre todo a que el experimento numérico se desarrolla en la parte baja de la mesoescala, mientras que el experimento en rotación tiene un dominio en la parte alta de la mesoescala y la parte baja de la gran escala. Este tipo de comportamiento concuerda con el observado con los resultados del avance de un frente turbulento donde la primera parte del experimento se encuentra bajo el dominio del jet (caso numérico) y la segunda parte del avance se encuentra bajo el dominio del ambiente (caso experimental).

Tabla 5.4: Longitudes características de la pluma calculada con el modelo experimental expresadas como D = radio mayor, d = radio menor.

Q [$m^3 s^{-1}$]	D [km]	d [km]
114.33	33.79	31.46
121.27	35.04	21.98
287.00	37.08	20.06
635.70	42.02	26.46

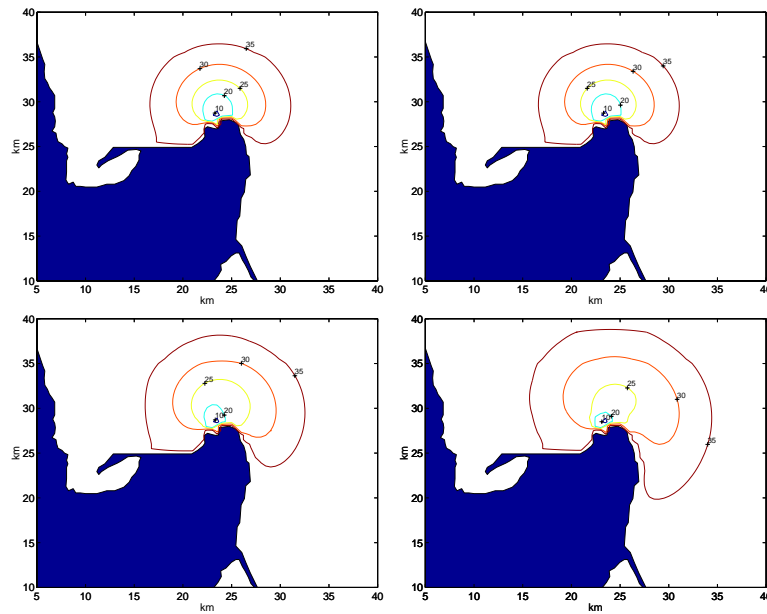


Figura 5.9: Isolinias de salinidad superficial calculadas con el modelo matemático, para caudales de 114.33, 121.27, 287.00 y 635.70 $m^3 s^{-1}$. Tiempo de experimentación 33 horas.

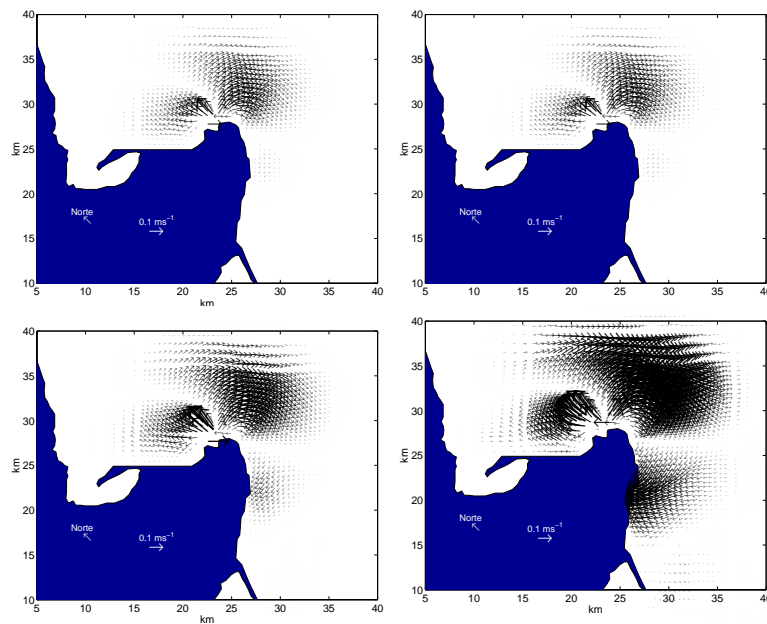


Figura 5.10: Campo euleriano de velocidad superficial calculadas con el modelo matemático, para caudales de 114.33, 121.27, 287.00 y 635.70 $m^3 s^{-1}$. Tiempo de experimentación 33 horas.

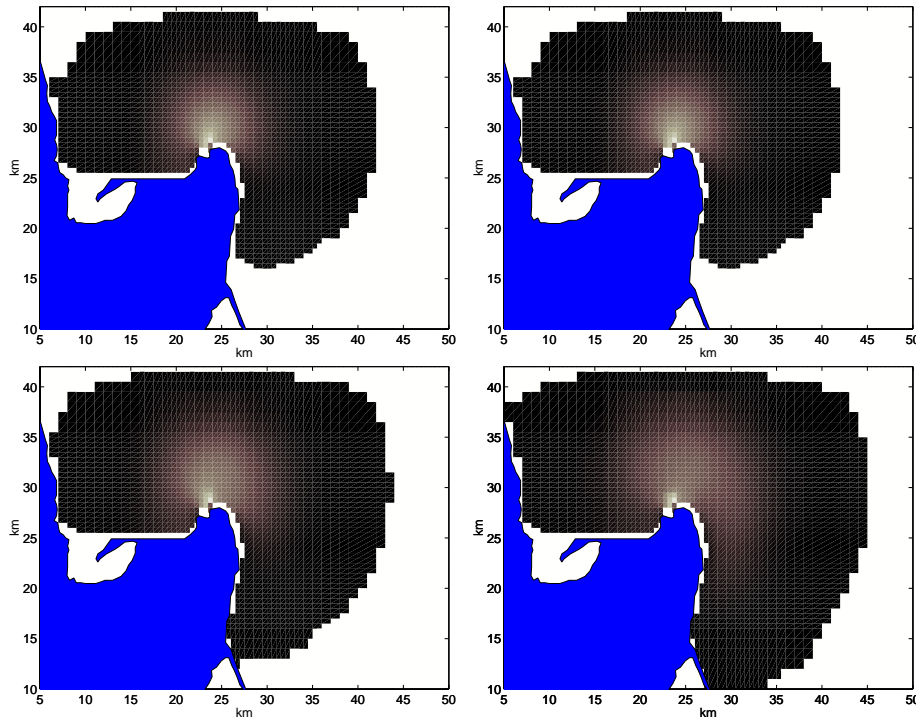


Figura 5.11: Área de influenciade la pluma para un Tiempo de cálculo de 33 horas con el modelo matemático, para caudales de 114.33, 121.27, 287.00 y 635.70 $m^3 s^{-1}$.

5.2.4 Variabilidad de la pluma en el tiempo.

Se llevó a cabo una simulación numérica con el caudal de $114.33 m^3 s^{-1}$, que fue el menor usado en este trabajo, con el fin de observar el compartamiento de la isolinea de $35 gkg^{-1}$ en el tiempo. Con este fin el cálculo se hizo durante un tiempo de 66 horas (figura 5.13), que es el doble del tiempo de las modelizaciones presentadas.

En esta figura podemos observar que conforme avanza el tiempo, las líneas se van separando cada vez con menor distancia que la anterior, de forma radial, aunque como se ve la variacion del area aumenta cada vez mas rapidamente de manera consistente con la ley de Richardson.

5.3 Observaciones naturales.

5.3.1 Estructuras observadas en las campañas.

Durante la campaña del 29 de junio fue posible observar la pluma de diferentes maneras localmente, mediante la interpolación de las salinidades superficiales tomadas de muestras de agua (figura 5.14) y por medio de fotografías desde una barca de camino hacia la desembocadura desde el poblado de la Ampolla (figura 5.15).

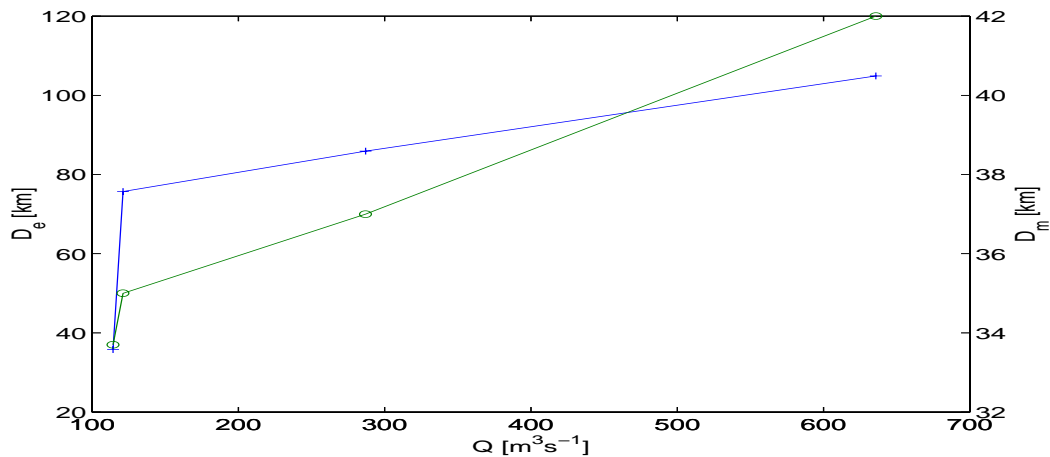


Figura 5.12: Longitudes características de la pluma modelada (o) respecto del caudal para un tiempo de cálculo de 66 horas, y longitudes características para el modelo experimental (+) para un tiempo de 120 segundos (44 horas).

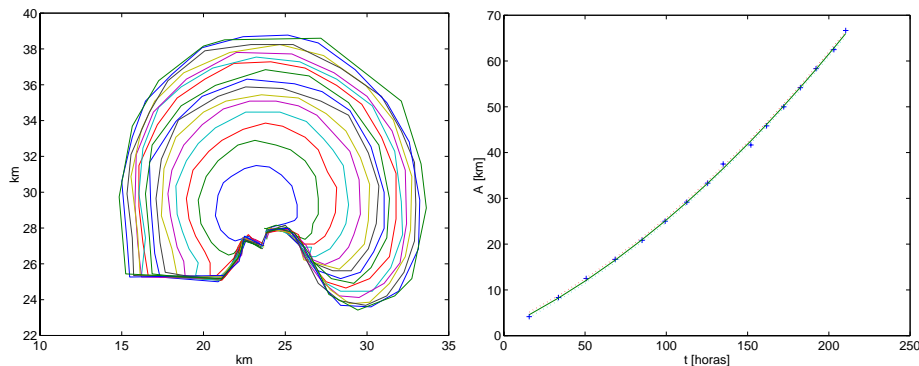


Figura 5.13: Desarrollo en el tiempo del área de influencia de la pluma modelada para un tiempo de cálculo de 66 horas con un caudal de $114.33 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Izquierda: Isolneas para el valor de la salinidad de 35 ppm para incrementos de 4.1 horas. Derecha: Regresión de los valores de las áreas (+) respecto del tiempo de cálculo.

La fragmentación de la pluma en varios núcleos se observó de manera clara en el campo, la imagen de la derecha corresponde con la primera porción de la pluma que pudimos observar y que estaba separada de la pluma principal. Esto se puede constatar en la misma figura para la imagen de la izquierda.

5.3.2 Estructuras estudiadas por observación remota.

Las estructuras naturales observadas por imágenes de satélite son estudiadas de dos imágenes SAR (*Sintetic Aperture Radar*) de $\approx 100 \times 100 \text{ km}$ de la colección de imágenes del proyecto Clean Seas 96-98. La figura 5.17 corresponde al día 27 de agosto de 1997 y la figura 5.16 al día 01 de octubre del mismo año.

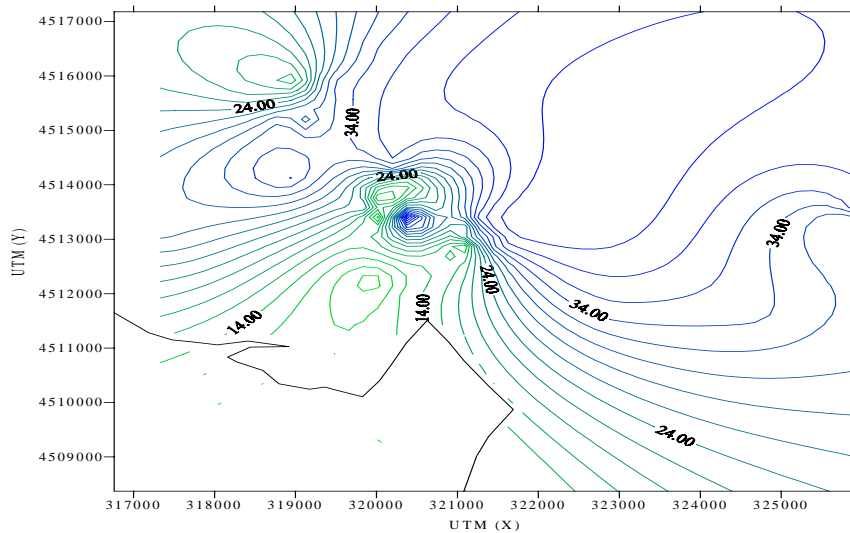


Figura 5.14: Interpolación de la pluma superficial para el día 01 de julio de 1997.



Figura 5.15: Dos aspectos de las capas límite de la pluma fragmentada observada desde una embarcación con trayecto desde el poblado de la Ampolla hacia la desembocadura del Ebro. Derecha: Primera porción de la pluma observada e izquierda: Segunda fracción perteneciente al final de la pluma principal de la desembocadura.

Estas figuras corresponden con un caudal medio de tres días (dos días previos y el día de la imagen) con $\bar{Q}_{agosto28} = 165.33$ y $\bar{Q}_{octubre01} = 117.66 \rightarrow 150.33 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Para estos caudales promedio, las longitudes características de las estructuras generadas de muestran en la tabla 5.5

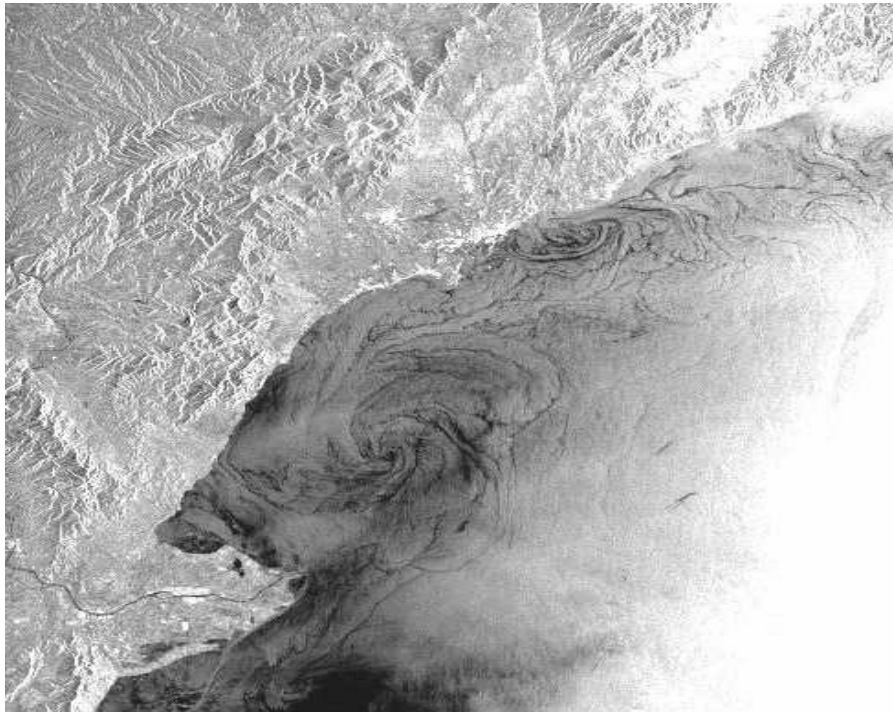


Figura 5.16: Imágen SAR del área del delta del Ebro de $\approx 100 \times 100$ km. Del día 27 de agosto de 1997.

Tabla 5.5: Longitudes características de las estructuras observadas para los días 27 de agosto y 1 de octubre de 1997, expresadas como D = radio mayor, d = radio menor, s = distancia a la desembocadura del inicio de la estructura.

Caudal [m³s⁻¹]	D [km]	d [km]	s [km]
165.33	34.002	19.347	8.252
117.66	19.472	11.265	4.540



Figura 5.17: Imágen SAR del área del delta del Ebro de $\approx 100 \times 100$ km. Del día 01 de octubre de 1997.