

Portada

Menú rápido

# Programa de Doctorado en Ciencias del Mar, U P C.

Influencia de la Turbulencia y de la Dinámica de Interfaces  
de Densidad Sobre Organismos Planctónicos.

”Aplicación al estuario del Ebro”.

J. A. Carrillo<sup>†\*</sup>

\* Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, México.

Director: Dr. José Manuel Redondo Apraiz<sup>†</sup>

Co-director: Dr. Julio González del Río Rams<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> U. P. C. Dep. de Física Aplicada. Barcelona, España.

<sup>‡</sup> U. P. V. Dep. Ing. Hidráulica y Medio Ambiente. Valencia, España.

Barcelona, Septiembre 2002.

# Índice General

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.</b>	<b>21</b>
1.1	OBJETIVOS Y MOTIVACIÓN. . . . .	23
1.2	ÁREA DE ESTUDIO. . . . .	25
1.2.1	El delta del Ebro. . . . .	25
1.2.2	Aspectos generales. . . . .	25
1.2.3	Caudales históricos. . . . .	27
1.2.4	La cuña salina. . . . .	28
1.2.5	La salida al mar. . . . .	29
1.3	LA TURBULENCIA COMO AMBIENTE. . . . .	30
1.3.1	Las formas del fitopláncton y la energía. . . . .	31
1.3.2	Turbulencia a mesoescala y la ecofisiología planctónica . . .	32
<b>2</b>	<b>ECUACIONES BÁSICAS.</b>	<b>35</b>
2.1	SISTEMA DE REFERENCIA. . . . .	35
2.1.1	Clasificación de los flujos en laminar, turbulento y transi- cional. . . . .	36
2.2	CAPAS LÍMITE. . . . .	37
2.2.1	Capas límite turbulentas. . . . .	39
2.3	ESCALAS DE LONGITUD. . . . .	42
2.3.1	Dinámica de las escalas. . . . .	43
2.3.2	Escala de Kolmogorov. . . . .	43
2.3.3	Escala de Obukhov-Corrsin. . . . .	44
2.3.4	Escala de Batchelor. . . . .	44
2.3.5	Escalas aplicables a fluidos estratificados. . . . .	45
2.3.6	Escalas cinemáticas. . . . .	46
2.4	FUERZAS QUE INTERVIENEN. . . . .	48
2.4.1	Las fuerzas de empuje. . . . .	48
2.5	DESCRIPTORES. . . . .	51
2.5.1	El entrañamiento $E$ . . . . .	52
2.5.2	Números de Richardson. . . . .	54
2.5.3	Mezcla en fluidos estratificados con cizalladura. . . . .	57
2.5.4	Eficiencia de mezcla. . . . .	59
2.6	CLASIFICACIÓN DE INESTABILIDADES. . . . .	61

<b>3</b>	<b>EXPERIMENTOS DE CAMPO Y LABORATORIO.</b>	<b>65</b>
3.1	EXPERIMENTOS DE CAMPO. . . . .	65
3.1.1	Muestreo a lo largo de todo el estuario. . . . .	65
3.1.2	Estacionalidad de muestreo. . . . .	65
3.2	ESTACIONES FIJAS. . . . .	65
3.2.1	Mediciones para las estaciones fijas. . . . .	66
3.2.2	Parámetros biológicos. . . . .	68
3.2.3	Parámetros físicos. . . . .	69
3.2.4	Observaciones costeras por satélite. . . . .	71
3.3	EXPERIMENTOS DE LABORATORIO. . . . .	71
3.3.1	TURBULENCIA POR REJILLA OSCILANTE. . . . .	73
3.3.2	Ecuaciones básicas. . . . .	73
3.3.3	MEZCLA COSTERA HORIZONTAL. . . . .	77
3.3.4	Materiales y métodos. . . . .	77
3.3.5	LA PLUMA DEL EBRO. . . . .	78
3.3.6	Ecuaciones básicas. . . . .	78
3.3.7	Materiales y métodos. . . . .	81
3.3.8	SISTEMA DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES . . . . .	82
3.3.9	Soporte DigImage. . . . .	83
3.3.10	Tarjeta Digitalizadora. . . . .	83
3.3.11	Video Grabador. . . . .	83
3.3.12	Diagrama de flujo de la señal de video. . . . .	84
3.3.13	MODELO NUMÉRICO DE MESOESCALA. . . . .	85
3.3.14	Ecuaciones del modelo numérico. . . . .	86
3.3.15	Condiciones de inicio numéricas. . . . .	89
<b>4</b>	<b>RESULTADOS DE LA MEZCLA EN EL ESTUARIO.</b>	<b>91</b>
4.1	RESULTADOS: MEZCLA VERTICAL DE LABORATORIO. . . . .	91
4.1.1	Entrañamiento y eficiencia de mezcla. . . . .	92
4.1.2	Estructura vertical de las interfaces de densidades. . . . .	94
4.2	RESULTADOS: AMBIENTES EN EL ESTUARIO. . . . .	96
4.2.1	Visualización de la cuña salina y la pluma en el estuario. . . . .	96
4.2.2	Variabes estacionales medidas en el estuario. . . . .	98
4.2.3	Estructura de las velocidades cerca de la interface. . . . .	100
4.2.4	Criterios para determinar el inicio y final de una interface en una columna de agua estratificada. . . . .	108
4.3	RESULTADOS: LA DENSIDAD EN LA CUÑA ESTABLE . . . . .	111
4.3.1	Estabilidad de la cuña a lo largo de todo el estuario. . . . .	112
4.3.2	Profundidad de la interface y grosor de la capa de mezcla. . . . .	112
4.3.3	La cuña como funciones de densidades a lo largo del estuario. . . . .	113
4.3.4	Distancia de la cabeza de acuerdo a la densidad mínima de la columna de agua. . . . .	117
4.4	RESULTADOS: CAUDALES. . . . .	117
4.4.1	Variabilidad morfológica del estuario. . . . .	118

4.4.2	Estandarización de las medidas. . . . .	119
4.4.3	Cálculo de los caudales locales en las secciones de las estaciones fijas de R1 a R6. . . . .	121
4.4.4	Estadística básica de los caudales en las campañas de muestreo. . . . .	123
4.4.5	Posición de la interface respecto de los caudales locales de las capas. . . . .	125
4.4.6	Variación de los caudales históricos del río Ebro. . . . .	125
4.5	RESULTADOS: MEZCLA EN EL ESTUARIO. . . . .	132
4.5.1	Valores de las variables en las estaciones fijas. . . . .	132
4.5.2	Descriptores de la mezcla en el estuario. . . . .	136
4.6	RESULTADOS: BIOLÓGICOS . . . . .	144
4.6.1	Ausencia y recuperación de la cuña salina. . . . .	144
4.6.2	Scenedesmus. . . . .	144
4.6.3	Picocianobacterias. . . . .	145
4.6.4	Fitopláncton total. . . . .	147
4.6.5	Presencia de una cuña salina estable. . . . .	149

**5 RESULTADOS DE LA PLUMA. 151**

5.1	RESULTADOS: MODELOS EXPERIMENTALES. . . . .	151
5.1.1	Mezcla costera horizontal. . . . .	151
5.1.2	La pluma en el Ebro. . . . .	153
5.1.3	Series de tiempo. . . . .	153
5.1.4	Escalas características superficiales. . . . .	156
5.1.5	Flujo en la columna de agua. . . . .	156
5.1.6	Escalas características. . . . .	158
5.2	RESULTADOS: MODELO NUMÉRICO. . . . .	158
5.2.1	Salinidad superficial. . . . .	158
5.2.2	Velocidad superficial. . . . .	159
5.2.3	Longitudes características. . . . .	159
5.2.4	Variabilidad de la pluma en el tiempo. . . . .	162
5.3	RESULTADOS: OBSERVACIONES NATURALES. . . . .	162
5.3.1	Estructuras observadas en las campañas. . . . .	162
5.3.2	Estructuras estudiadas por observación remota. . . . .	163

**6 DISCUSIONES Y CONCLUSIONES 167**

6.1	DINÁMICA DE LA MEZCLA EN EL ESTUARIO. . . . .	167
6.1.1	Áreas tipo que se encuentran presentes en el estuario del delta del Ebro. . . . .	167
6.1.2	Determinación los valores de las variables de acuerdo a los caudales de las diferentes capas que intervienen en la mezcla a lo largo del estuario. . . . .	170
6.1.3	Establecer los valores de los principales parámetros hidrodinámicos que manejan la mezcla en el estuario. . . . .	175

6.1.4	Determinar la distancia de penetración de la cuña respecto de las densidades superficiales. . . . .	178
6.2	ORGANISMOS TRAZADORES. . . . .	180
6.2.1	Cuantificar la presencia de organismos nativos de ambientes de río y mar dentro del estuario. . . . .	180
6.2.2	Relacionar su presencia en la columna de agua de acuerdo a las características hidrodinámicas de las misma. . . . .	181
6.3	LA PLUMA. . . . .	182
6.3.1	Efecto de la variación del caudal. . . . .	183
6.3.2	Diferencias entre los tratamientos. . . . .	185
6.3.3	Calcular el área de impacto de la pluma bajo los diferentes caudales estacionales medidos. . . . .	185
6.3.4	Comparar los resultados para los diferentes escenarios experimentales de laboratorio, con las observaciones experimentales de campo, experimentaciones numéricas y observaciones remotas. . . . .	186
6.4	CONCLUSIONES. . . . .	187
7	Referencias	193

# Índice de Figuras

1.1	Área de estudio. . . . .	26
1.2	Posiciones de la cuña correspondientes a los rangos de caudal en el río Ebro, de acuerdo a Ibáñez (1993). . . . .	30
1.3	Representación gráfica de la mandala de Margalef, donde las principales formas de vida fitoplanctónicas están colocadas en un espacio ecológico definido por concentración de nutrientes y turbulencia. . . . .	32
1.4	Especies y grupos de especies de acuerdo con sus coeficientes de correlación con el análisis del segundo (II) y el (III) tercer eje de componentes principales. . . . .	33
2.1	Sistema referencial de coordenadas donde $x, y$ y $z$ son las coordenadas de referencia; mientras que $u, v$ y $w$ son las magnitudes de la velocidad referidas a cada coordenada respectivamente. $U$ es la velocidad media del flujo. . . . .	36
2.2	Esquema representativo de la cuña idealizada a la que se dirige este estudio. . . . .	37
2.3	Escala de longitud, de difusión y convección en una capa límite laminar sobre una superficie plana. . . . .	38
2.4	Escala de longitud, de difusión y convección en una capa límite turbulenta sobre una superficie plana. . . . .	39
2.5	Perfiles típicos de la transferencia de tensión turbulenta ( $\tau$ ) en una capa límite turbulenta con una transferencia de tensión turbulenta alta (A) y baja (B) en una columna de agua con una velocidad característica $u$ . . . . .	40
2.6	Longitud de los remolinos que realizan la transferencia de tensión turbulenta en una columna tipo. En este ejemplo el remolino mayor transfiere la tensión turbulenta a la escala $\ell = A$ , mientras que el remolino menor lo hace a la escala $\ell = B$ . . . . .	41
2.7	Comportamiento de la velocidad $u$ respecto del $\ln h$ , evidenciando un proceso de transferencia de tensión turbulenta en una columna tipo (A), con una frontera en movimiento a favor en relación a la dirección de la velocidad característica (B) y en contra (C). . . . .	42

2.8	Ejemplos de gradientes de densidades en una columna de agua. A) Sin estratificar, B) Linealmente estratificada y C) estratificada con una interface abrupta de densidad. Para los tres casos la densidad ( $\rho$ ) se representa en el eje $x$ y la profundidad ( $z$ ) en el eje $y$ . . . . .	49
2.9	Inestabilidad de una masa de agua en una interface de densidad por una oscilación inercial. En un perfil de densidad sin perturbación (A), y un perfil de densidad que evidencia el paso de una onda interna (B). . . . .	51
2.10	Evolución en el tiempo de la oscilación de una interface de densidad para un ambiente estable. . . . .	52
2.11	Funciones del entranamiento respecto a diferentes números de Richardson global propuesta por Christodoulou (1986) y complementada por Fernando (1991). La simbología es la siguiente: +, experimentos sujetos a forzamiento superficial; $\Delta$ , corrientes de densidad; O, flujos superficiales en circuito abierto; X, evaluación del flujo; ET, Ellison y Turner (1959); DW, Deardorff y Willis (1982); NF, Narimousa y Fernando (1987); KP, Kato y Phillips (1969). . . . .	58
2.12	Número de Richardson de flujo contra número de Richardson global para diferentes experimentos compuesta por Linden (1979). • mezcla producida por la caída de una rejilla de barras cuadradas a través de una interface de densidades, $\nabla$ mezcla producida por vortices disparados en una interface de densidades, $\circ$ valores calculados de perfiles medidos en la estela de una plataforma vertical, $\square$ y $\triangle$ valores de $Ri_f$ medidos para la mezcla inducida por cizalladura. . . . .	61
2.14	Onda de K-H en una una interface de densidad para un ambiente localmente inestable. . . . .	61
2.13	Inestabilidad de Hölmboe en una una interface de densidad para un ambiente localmente inestable. . . . .	62
2.15	Diferentes tipos de inestabilidades identificadas en los experimentos de Redondo (1987). 1) Ondas internas, 2) Ondas de Hölmboe, 3) Filamentos proyectados por ondas solitarias, 4) K-H y 5) Turbulencia. . . . .	63
2.17	Inestabilidad K-H con filamentos proyectados por ondas internas para un fluido estratificado con cizalladura. Cortesía J. M. Redondo. . . . .	63
2.16	Espacio paramétrico dominado por los experimentos de Redondo (1987), donde las inestabilidades dominantes se representan por: $o$ no inestable (interface plana), $w$ ondas internas, $h$ Hölmboe o con cúspide y $k$ K-H. . . . .	64

2.18	Compilación espacio paramétrico experimental de varios autores hecha por Redondo (1987) para experimentos con inestabilidades inducidas por cizalladura en fluidos estratificados. La línea discontinua corta indica la transición entre interfaces estables y la aparición de ondas internas, ///// indica la transición entre ondas internas e inestabilidades de Hölmboe, xxx indica la transición entre Hölmboe y K-H. l.s. indica el límite de estabilidad lineal ( <i>linear stability</i> ), las regiones delimitadas por las líneas discontinuas largas y la línea punteada indica la zona de emparejamiento de ondas K-H según Torpe (1986). Los símbolos indican experimentos realizados por o Koop y Browand (1979), • Thorpe (1985); . Browand y Wang (1972) y + Gartrell (1982). . .	64
3.1	Posición de las estaciones fijas en los últimos 15 km del estuario del delta del Ebro desde R1 en la boca a R6 remontando el estuario. . .	66
3.2	Posiciones de las estaciones (+) donde se tomaron las secciones locales del lecho del Ebro en el delta. . . . .	70
3.3	Dependencia del número de Richardson respecto a la distancia de la interface de densidades y la fuente turbulenta, para condiciones de $\omega = 6Hz$ , $s = 1cm$ , $L = 5cm$ y $b = 15cm$ . . . . .	74
3.4	Dependencia del entrañamiento ( $E$ ) respecto a la distancia de la interface de densidades y la fuente turbulenta, para condiciones de $\omega = 6Hz$ , $s = 1cm$ , $L = 5cm$ , $b = 15cm$ y $\Delta\rho = 1$ . . . . .	75
3.5	Tipo de tanque utilizado en los experimentos de turbulencia generada por rejilla oscilante. Este con una base de $39 \times 39cm$ y una altura de $80 cm$ , es similar al usado por Turner (1973) y Redondo et al (1996).	76
3.6	Vista superior del tanque de $1 \times 1m$ para el avance de un frente turbulento frente a una corriente costera paralela a la costa, en un sistema estratificado. . . . .	77
3.7	Vista lateral del tanque de $1 \times 1m$ , donde A: tanque experimental, B: video cámara, C: video grabadora y D: fuente de iluminación. . . . .	78
3.8	Cubeta rectangular experimental de $4 \times 2m$ dentro de la mesa rotatoria de cinco metros de diámetro. . . . .	81
3.9	Simplificación geométrica del delta del Ebro usada para la experimentación. . . . .	82
3.10	Representación gráfica del área de estudio experimental dentro de la cuba de cuatro por dos metros. . . . .	83
3.11	Equipo informático utilizado para el procesado de las imágenes por medio del programa <i>DigImage</i> . . . . .	84
3.12	Diagrama de flujo de la señal de imagen dentro del sistema de procesamiento de Mecánica de Fluidos <i>DigImage</i> . . . . .	85
4.1	Vista lateral de una columna de agua estratificada. Arriba un fotograma del avance de la capa de mezcla. Abajo seguimiento del movimiento de partículas y capas en un tiempo de 5 segundos. . . .	92



4.2	Secuencia de la evolución de una interface de densidades ( $Ri = 350$ y $\Delta t = 0.5s$ ). . . . .	93
4.3	Serie de tiempo para el avance vertical de una interface de densidades en los tiempos de 0, 1, 2, 3, 4 y 5 minutos. . . . .	93
4.4	Izquierda: Serie de tiempo de cinco minutos para el avance vertical de una interface de densidades tomado como referencia la línea central de las imágenes. Derecha: Isolinia de intensidad de 160 para la serie de tiempo. Cada línea se toma cada 0.5515 segundos. . . . .	94
4.5	Algunos ejemplos de entrañamiento de una interface turbulenta, se observan procesos de engolfamiento en la imagen con $t=14:24$ , mientras que se puede observar rotura de una onda interna en la imagen $t=16:00$ . . . . .	95
4.6	Evolución de la posición de la interface en el tiempo para interfaces de densidad para: izquierda salinidad donde $\Delta\rho$ corresponde con $\circ 42$ , $+ 21$ , $\Delta 11$ , $\nabla 5$ y $* 2kgm^3$ . Derecha temperatura donde $\Delta t$ ( $^{\circ}C$ capa inferior - $^{\circ}C$ capa superior) corresponde con $\circ 17-62$ , $+ 36-54$ , $\Delta 41-50$ , $\nabla 21-42$ y $* 31-46$ . . . . .	95
4.7	Entrañamiento medido en función del número de Richardson global y la eficiencia de mezcla para experimentos de laboratorio con números de Richardson de 10 a 400. . . . .	96
4.8	Visualización de la cuña salina a partir de los datos de salinidad de ctd de la primera campaña de verano (Cytmar II). Desde la desembocadura del río Ebro hasta la población de Amposta. . . . .	97
4.9	Visualización de la pluma para la primera campaña de verano (Cytmar2), en la desembocadura del Delta del Ebro, un día después de una tormenta en la zona. . . . .	98
4.10	Variación de los perfiles de salinidad para las estaciones fijas de $R1$ a $R6$ para las campañas bajo condiciones de primavera, verano, otoño e invierno. . . . .	99
4.11	Perfiles de salinidad para las estaciones fijas de $R1$ a $R6$ en la campaña del día 3 de febrero. . . . .	100
4.12	perfiles salinidad (+) y velocidad (*) durante la campaña de primavera Pionner1, para las estaciones fijas $R1$ , $R2$ y $R3$ arriba y $R4$ , $R5$ y $R6$ abajo. . . . .	101
4.13	perfiles salinidad (+) y velocidad (*) durante la campaña de verano Pionner2, para las estaciones fijas $R1$ , $R2$ y $R3$ arriba y $R4$ , $R5$ y $R6$ abajo. . . . .	102
4.14	perfiles salinidad (+) y velocidad (*) durante la campaña de otoño Pionner3, para las estaciones fijas $R1$ , $R2$ y $R3$ arriba y $R4$ , $R5$ y $R6$ abajo. . . . .	102
4.15	perfiles salinidad (+) y velocidad (*) durante la campaña de invierno Pionner4, para las estaciones fijas $R1$ , $R2$ y $R3$ arriba y $R4$ , $R5$ y $R6$ abajo. . . . .	103

4.16 Regresiones de la velocidad [ $ms^{-1}$ ] respecto al logaritmo neperiano de la distancia al centro de la interface ( $x_{z0}[m]$ ), para las estaciones <i>R1</i> , <i>R4</i> y <i>R5</i> durante la campaña de primavera. . . . .	104
4.17 Regresiones de la velocidad [ $ms^{-1}$ ] respecto al logaritmo neperiano de la distancia al centro de la interface ( $x_{z0}[m]$ ), para las estaciones <i>R1</i> , <i>R4</i> y <i>R5</i> durante la campaña de verano. . . . .	105
4.18 Regresiones de la velocidad [ $ms^{-1}$ ] respecto al logaritmo neperiano de la distancia al centro de la interface ( $x_{z0}[m]$ ), para las estaciones <i>R1</i> , <i>R4</i> y <i>R5</i> durante la campaña de otoño. . . . .	106
4.19 Regresiones de la velocidad [ $ms^{-1}$ ] respecto al logaritmo neperiano de la distancia al centro de la interface ( $x_{z0}[m]$ ), para las estaciones <i>R1</i> , <i>R4</i> y <i>R5</i> durante la campaña de invierno. . . . .	107
4.20 Izquierda: Valores de la pendiente de la salinidad (*). Centro: Frecuencia de Brunt-Väisälä (*) y Derecha: Valores del número de Richardson de gradiente (*). Respecto a la profundidad, para un perfil de salinidades (+). . . . .	109
4.21 Determinación del inicio y final de una interface mediante los valores críticos de $m_{crit} = 5 ppm/m$ , $BV_{crit} = 0.01 s^{-1}$ y $Ri_{crit} = 0.02$ para el perfil de referencia de <i>R6</i> de la campaña de primavera. . . . .	110
4.22 Variación estacional del grosor promedio de la capa de mezcla en las campañas de primavera, verano, otoño e invierno. . . . .	111
4.23 Estabilidad de la estratificación en la columna de agua a lo largo del estuario del delta del Ebro (arriba), calculado para la campaña de verano <i>Cytmar2</i> (abajo). . . . .	113
4.24 Arriba: Ancho de la interface a lo largo de todo el estuario ( <i>W</i> ). Abajo: Profundidad del inicio de la interface <i>D</i> en la columna de agua ( <i>x</i> ) y del final de la capa de mezcla (*) a lo largo del estuario del delta del Ebro durante la campaña de verano. . . . .	114
4.25 Regresión lineal de la evolución del inicio de la interface <i>D</i> , durante la campaña de verano. . . . .	115
4.28 Punto de máxima diferencia entre las densidades máximas (derecha) y mínimas (izquierda) localizado a 16.4478 km de la boca. . . . .	115
4.26 Densidades máximas (+), mínimas (o) y promedio (*) en la columna de agua para la cuña estable en condiciones de verano. . . . .	116
4.27 Diferencias de densidades entre las densidades mínimas y máximas de la columna de agua para la cuña salina en condiciones de verano. . . . .	117
4.29 Relación de la diferencia de densidades respecto de las densidades mínimas (arriba) y de las densidades máximas (abajo). . . . .	118
4.30 Densidades típicas calculadas (- -) para los valores de la columna de agua mínimos (o), máximos (+) y promedio (*) a partir de los valores de densidad observados (—). . . . .	119
4.32 Batimetría medida mediante la navegación sobre el río. . . . .	119
4.33 Batimetría máxima calculada a partir de las secciones locales medidas en el lecho del río. . . . .	120

4.31	Anchura del río a partir de las secciones medidas. . . . .	121
4.34	Batimetría promedio calculada a partir de las secciones locales medidas en el lecho del río. . . . .	121
4.35	Secciones de las estaciones fijas correspondientes a R1 hasta R6. . . . .	122
4.36	Variación de la anchura del río en las estaciones fijas. . . . .	122
4.37	Batimetría estandar calculada a partir del área calculada de las secciones locales medidas en el lecho del río. . . . .	123
4.38	Caudales históricos para el período comprendido de 1912 a 1986 (x) y promedios mensuales para el mismo período (barras). . . . .	126
4.39	Caudales horarios para los días previos a las campañas de primavera, verano, otoño e invierno, reportados para la presa de Mequinenza por la Confederación Hidrográfica del Ebro. . . . .	128
4.40	Regresiones lineales para la posición de la interface para las estaciones fijas de R1 a R6, de acuerdo a los caudales de la capa superior a lo largo de un año tipo. . . . .	129
4.41	Regresiones lineales para la posición de la interface para las estaciones fijas de R1 a R6, de acuerdo a los caudales de la capa de mezcla a lo largo de un año tipo. . . . .	130
4.42	Regresiones lineales para la posición de la interface para las estaciones fijas de R1 a R6, de acuerdo a los caudales de la capa inferior a lo largo de un año tipo. . . . .	130
4.43	Regresiones del tipo tangente hiperbólica para la posición de la interface de las estaciones fijas de R1 a R6, respecto a los caudales de la capa de superior. . . . .	131
4.44	Espesor de la capa de mezcla de las estaciones fijas de R1 a R6, respecto a los caudales de la capa de superior. . . . .	132
4.45	Profundidad de la interface (D) de acuerdo a las regresiones de los caudales en las secciones de las estaciones fijas. . . . .	133
4.46	Profundidad del final de la interface (D+W) de acuerdo a los caudales locales de las secciones de las estaciones fijas. . . . .	133
4.47	Grosor de la interface (W) de acuerdo a los caudales locales de las secciones de las estaciones fijas. . . . .	134
4.48	Gradiente de densidades en la interface de acuerdo a los caudales locales de las secciones de las estaciones fijas. . . . .	134
4.49	Velocidades y Áreas de la capa superior calculadas para los caudales locales de las secciones fijas de R1 a R6. . . . .	135
4.50	Tiempo estimado para la medida del entrañamiento desde una sección desde su inmediata superior en el estuario. . . . .	136
4.51	Entrañamiento calculado para los caudales en las secciones de las estaciones fijas R1 (o), R2 (+), R3 (◊), R4 (△) y R5 (▽). . . . .	137
4.52	Dispersión turbulenta calculado en el eje Z para las secciones de las estaciones fijas R1 (o), R2 (+), R3 (◊), R4 (△) y R5 (▽). . . . .	138

4.53	Números de Richardson de gradiente (arriba) y global (abajo) calculados para las secciones de las estaciones fijas en el área de estudio. R1 (o), R2 (+), R3 (◊), R4 (△), R5 (▽) y R6 (□) . . . . .	138
4.54	Número de Richardson de gradiente frente al $Ri_b$ calculado para las estaciones fijas R1 (o), R2 (+), R3 (◊), R4 (△) y R5 (▽) en el estuario del delta del Ebro. . . . .	139
4.55	Número de Richardson global calculado para las estaciones fijas R1 (o), R2 (+), R3 (◊), R4 (△) y R5 (▽) en el estuario del delta del Ebro, donde se espera la presencia de inestabilidades dominantes en la interface de densidades de acuerdo al caudal local. . . . .	140
4.56	Relación del entrañamiento respecto del número de Richardson global para los caudales locales en las secciones de las estaciones fijas R1 (o), R2 (+), R3 (◊), R4 (△) y R5 (▽) de la zona de estudio. . . . .	141
4.57	Relación de la eficiencia de mezcla ( $\eta$ ) respecto del número de Richardson global para los caudales locales en las secciones R1 (o), R2 (+), R3 (◊), R4 (△) y R5 (▽) de las estaciones fijas de la zona de estudio. . . . .	142
4.58	Localización de las condiciones paramétricas de las estaciones de muestreo durante las campañas de <i>Pionner</i> . Las letras indican los límites empíricos para las inestabilidades dominantes, A zona estable con una interface plana, B ondas internas, C ondas de Hölmböe, D inestabilidades K-H y E región de transición turbulenta. . . . .	143
4.59	Cuña salina para los días 3 y 5 de febrero. . . . .	145
4.60	Dos aspectos de <i>Scenedesmus acuminatus</i> . . . . .	145
4.61	Izq. <i>Scenedesmus opaliensis</i> (3500x) y der. <i>Scen. panonicus</i> (3500x). . . . .	146
4.62	Izq. <i>Scenedesmus platydiscus</i> y der. <i>Scen. arcuatus</i> (40x). . . . .	146
4.63	Abundancia de <i>Scenedesmus</i> [cel/l] en el estuario para los días 3 (*) y 5 (o) de febrero. . . . .	147
4.65	Abundancia de picocianobacterias [cel/l] en el estuario para los días 3 (*) y 5 (o) de febrero. . . . .	147
4.64	Abundancia de <i>Scenedesmus</i> [cel/l] en la columna de agua del estuario para los días 3 (arriba) y 5 (debajo) de febrero. . . . .	148
4.66	Abundancia de picocianobacterias [cel/l] en la columna de agua del estuario para los días 3 (arriba) y 5 (debajo) de febrero. . . . .	149
4.67	Abundancia del fitopláncton total [cel/l] en el estuario para los días 3 (*) y 5 (o) de febrero. . . . .	149
4.68	Abundancia del fitopláncton total [cel/l] en la columna de agua del estuario para los días 3 (arriba) y 5 (debajo) de febrero. . . . .	150
4.69	Abundancia de las pcb [cel/l] en la columna de agua del estuario para el día 12 de junio de 1999 bajo condiciones de una cuña salina estable. . . . .	150
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. . . . .	152

5.2	Serie de tiempo para el avance del frente turbulento a los tiempos: 0, 2, 12, 22..., 172 segundos. . . . .	153
5.3	Área del frente turbulento para condiciones de corriente litoral (+, $\Delta$ , $\bullet$ ) y sin corriente litoral (*). . . . .	154
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.155	
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.156	
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.157	
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.158	
5.8	Condiciones experimentales para la pluma del río Ebro con caudales $114.33, 121.27, 287.00$ y $635.70 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a los 120 segundos con rotación.160	
5.9	Isolneas de salinidad superficial calculadas con el modelo matemático, para caudales de $114.33, 121.27, 287.00$ y $635.70 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Tiempo de experimentación 33 horas. . . . .	161
5.10	Campo euleriano de velocidad superficial calculadas con el modelo matemático, para caudales de $114.33, 121.27, 287.00$ y $635.70 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Tiempo de experimentación 33 horas. . . . .	161
5.11	Área de influencia de la pluma para un Tiempo de cálculo de 33 horas con el modelo matemático, para caudales de $114.33, 121.27, 287.00$ y $635.70 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . . . . .	162
5.12	Longitudes características de la pluma modelada ( <i>o</i> ) 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). . . . .	163
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 $35 \text{ ppm}$ para incrementos de 4.1 horas. Derecha: Regresión de los valores de las áreas (+) respecto del tiempo de cálculo. . . . .	163
5.14	Interpolación de la pluma superficial para el día 01 de julio de 1997. . . . .	164
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. . . . .	164
5.16	Imagen SAR del área del delta del Ebro de $\approx 100 \times 100 \text{ km}$ . Del día 27 de agosto de 1997. . . . .	165
5.17	Imagen SAR del área del delta del Ebro de $\approx 100 \times 100 \text{ km}$ . Del día 01 de octubre de 1997. . . . .	166

6.1	Localización de las condiciones paramétricas de las estaciones de muestreo durante las campañas de <i>Pionner</i> y los experimentos de otros autores. El área dentro de la línea punteada indica los experimentos realizados por Redondo (1987) y el área dentro de la línea continua delimita la zona de los valores medidos en el campo para el estuario del Ebro. . . . .	178
6.2	Abundancias de pcb en el estuario del río Ebro bajo diferentes condiciones de número de Reynolds (izquierda) y salinidad (derecha), para los días 3 (*) y 5 (o) de febrero de 2000. Las regresiones de la salinidad respecto de las abundancias son: $y = 2.49 \times 10^{-6}x + 2.93$ para el día 3 de febrero y $y = 1.22 \times 10^{-6}x + 6.36$ para el día 5 de febrero.	182
6.3	Abundancias de pcb en el estuario del río Ebro bajo diferentes números de Reynolds para el día 12 de junio de 1999. . . . .	183
6.4	Relaciones lineales de abundancia de organismos y salinidad de acuerdo a las diferentes estaciones fijas para el día 12 de junio de 1999. . . .	184
6.5	Imágenes (tipo) de la influencia de la pluma del delta del Ebro en la productividad orgánica primaria para costas del Mediterráneo oriental, de acuerdo a los pigmentos observados los días 3 (izquierda) y 4 (derecha) de abril de 1983. . . . .	187



# Índice de Tablas

1.1	Caudales máximos registrados en Tortosa antes y después de la puesta en funcionamiento de los embalses de Mequinenza y Riba Roja en el siglo pasado. Capacidad de encauzamiento en Tortosa $\simeq 2800 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .	28
1.2	Magnitudes características de las diferentes escalas presentes en los fluidos turbulentos en el océano. . . . .	30
2.1	Escalas de longitud relevantes para flujos turbulentos con cizalladura como los de este trabajo. . . . .	47
2.2	Fuerzas que intervienen en la dinámica básica de un fluido estratificado.	48
2.3	Valores de los rangos pequeño, intermedio y grande para el $Ri_b$ propuestos por Christodoulou (1986). . . . .	59
2.4	Inestabilidades dominantes bajo diferentes números de Richardson global en un fluido estratificado con cizalladura producida por el movimiento de la capa superior Strang y Fernando (2001). . . . .	63
3.1	Caracterización de las condiciones estacionales para las campañas del delta del ebro. . . . .	66
3.2	Posición y distancia de las estacionales fijas respecto a la desembocadura del estuario del delta del ebro. . . . .	67
3.3	Profundidades fijas y variables donde se tomaron muestras de agua, para las estacionales fijas dentro del estuario del delta del ebro. . . .	67
3.4	Exponentes de la dependencia del entrañamiento respecto de la a la distancia de la interface de densidades y la fuente turbulenta generada por rejilla oscilante para diferentes solutos y temperatura reportados por Redondo (1996). . . . .	75
3.5	Notación de variables usadas para las ecuaciones del modelo numérico.	86
3.6	Características principales de los sistemas de advección en el modelo.	89
4.1	Límites [ $m$ ] superior, inferior y grosor ( $w$ ) de la interface de la interface calculados para las campañas de primavera, verano, otoño e invierno de acuerdo al criterio del número de Richardson de gradiente. . . . .	111
4.2	Valores calculados de la distancia de la cabeza de la cuña salina de acuerdo con la densidad mínima local de la columna de agua para el estuario del delta del Ebro en condiciones de fuerte estratificación (verano). . . . .	120



4.3	Caudales locales de para las diferentes capas de las estaciones fijas en las diferentes campañas de muestreo en el estuario del delta del Ebro.	124
4.4	Promedio y desviacion estandar de los caudales locales de las capas superior, mezcla e inferior en el estuario del delta del Ebro, en las diferentes estaciones fijas de muestreo para todas las campañas. . . .	125
4.5	Promedio y desviacion estandar de los caudales locales de las capas superior, mezcla e inferior en el estuario del delta del Ebro, en las diferentes campañas de muestreo a lo largo del año tipo. . . . .	125
4.6	Caudales promedio [ $m^3 s^{-1}$ ] para los ultimos 35 años del período de 1912 a 1998. . . . .	127
4.7	Valores promedio, desviación estandar, máximo y mínimo de los caudales [ $m^3 s^{-1}$ ] reportados por la Confederacion Hidrográfica del Ebro para el embalse de Mequinenza durante los días previos de las campañas de muestreo. . . . .	127
4.8	Valores de las correlaciones de los caudales de agua locales para las capas superficial, de mezcla e inferior a lo largo del estuario del delta del Ebro en un año tipo. . . . .	129
4.9	Autorrelacion de los caudales de agua locales para las capas superficial a lo largo del estuario del delta del Ebro en un año tipo. . . . .	129
4.10	Inestabilidades dominantes bajo diferentes números de Richardson global en el estuario del delta del Ebro de acuerdo con los valores experimentales establecidos por Strang y Fernando (2001). . . . .	140
4.11	Valores de las regresiones de los entrañamientos respecto de $Ri_b$ pequeños (P), intermedios (M) y grandes (G). . . . .	141
4.12	Valores de la variables usadas para las regresiones de las eficiencias de mezcla en las secciones de estudio. . . . .	142
5.1	Caudales utilizados para la modelación experimental de la pluma. . .	153
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. . . . .	159
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. . . . .	159
5.4	Longitudes características de la pluma calculada con el modelo experimental expresadas como $D$ = radio mayor, $d$ = radio menor. . . . .	160
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. . . . .	165
6.1	Puntos que se presentan como barreras potenciales ala penetración de la cuña salina. Tomando como referencia la distancia a la desembocadura. * Indica puntos por describir. . . . .	173

6.2 Abundancias de pcb para diferentes áreas geográficas. DCM = Profundidad de máximo de clorofila (*deep chlorophyll maximum*), PPP = picofitopláncton, Syn = *Synecococcus*. . . . . 191

