

Capítulo 4

RESULTADOS DE PROCESOS DE LA MEZCLA EN EL ESTUARIO.

Acaso cuando te haces conciente del tiempo este toma represalias contra tí pasando de prisa?. Cuando eres niño pasa lentamente; después pasa cada vez más rápido, y al parecer llegará a pasar volando -Barcelona septiembre de 1996.

4.1 Medidas de entrafiamiento con experimentos con rejilla Oscilante.

Por medio de este tipo de experimentos es posible estudiar la estructura vertical de una interface de densidades y el desarrollo de esta en el tiempo.

La figura 4.1 muestra una interface de densidades vista en tiempo real en dos imágenes, la imagen superior es una fotograma del avance de la interface en la columna de agua, mientras que la imagen inferior representa el seguimiento de trazadores. La imagen superior es un fotograma convencional en blanco y negro que se puede observar en el TV. En esta el borde de la capa de mezcla aparece más iluminada que el resto, ya que se usa fluoresceina disuelta en la capa inferior y un haz de luz laser para marcarla; incluso es posible observar una onda interna justo en el centro de la capa y la capa superior aparece mas oscura que la capa inferior. La parte inferior de la imagen muestra el seguimiento del movimiento de las partículas de plyolita y de las capas durante un tiempo de cinco segundos.

La fuente turbulenta en este caso es una rejilla oscilante que se encuentra en la capa inferior. Se muestra claramente como las partículas que se encuentran dentro de la capa inderior tienen un movimiento significativamente mayor que el de la capa superior y que la capa de mezcla misma presenta un movimiento de oscilación, mostrado en la figura como una franja oscura al centro de la imagen. Las líneas que se observan en la capa inferior son la representación de los caminos seguidos por las partículas en los cinco segundo de *particle tracking*. En la figura 4.2 se muestra una secuencia de imágenes de video digitalizada de la interface ($\Delta t = 0.5s$)

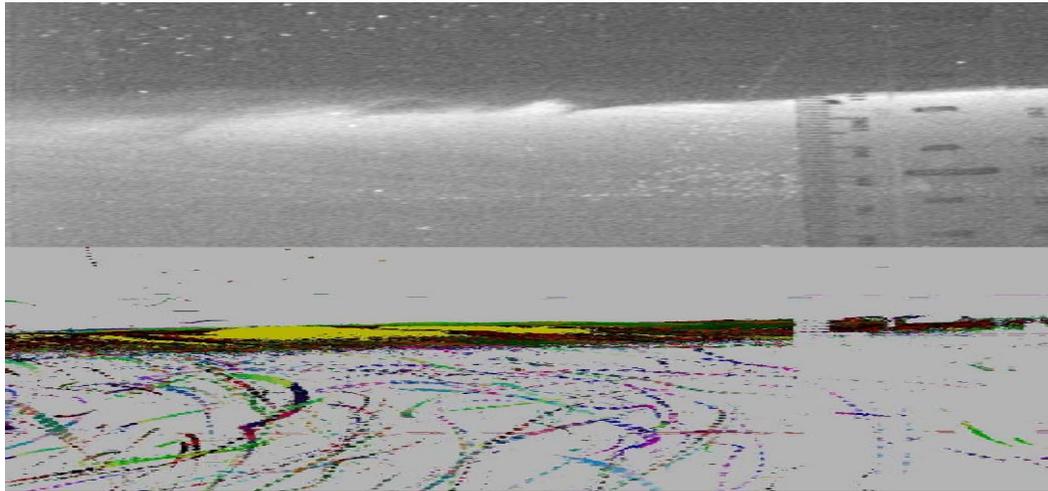


Figura 4.1: Vista lateral de una columna de agua estratificada. Arriba un fotograma del avance de la capa de mezcla. Abajo seguimiento del movimiento de partículas y capas en un tiempo de 5 segundos.

4.1.1 Entrañamiento y eficiencia de mezcla.

En esta sección se muestran los resultados de un experimento en el que se estudia a pequeña escala (centímetros) el fenómeno del entrañamiento en una interface de densidades con una $\Delta\rho = 64\text{kgm}^{-3}$, y una velocidad característica turbulenta de la capa inferior de 12cms^{-1} .

Una manera de entender el entrañamiento es como la medida en la que la capa de mezcla crece respecto de la velocidad ambiental, ya se ha definido que $E = v_e/u'$, donde v_e es la velocidad de entrañamiento expresada como el cambio de la posición de la interface en el tiempo $\partial D/\partial t$ y u' la velocidad característica que genera el fenómeno de mezcla.

Existen diversas técnicas para medir la velocidad vertical de la interface; una consiste en marcar bien con colorante o con fluoresceína. Los resultados son idénticos si se usa el *shadowgraph* con o sin colorante. La figura 4.3 muestra una secuencia del desarrollo mediante la técnica de *shadowgraph* del experimento de avance de una interface de densidades, producida por una rejilla oscilante durante un tiempo de cinco minutos, los resultados se enfocan a una escala de centímetros, cada línea de las colocadas a la derecha de las imágenes se encuentra separada de la otra a un centímetro.

El avance de la interface de densidades se observó y se puede cuantificar por medio del programa *DigImage*. La figura 4.4 izquierda muestra el resultado de una serie de tiempo de cinco minutos, donde se tomó una línea en el centro de la imagen cada 0.55 segundos, donde se hace evidente el avance de la interface de densidades en la columna de agua. Se nota claramente tanto la velocidad promedio como las oscilaciones puntuales de la interface asociadas a las inestabilidades locales, las ondas internas y los vórtices bipolares que penetran la interface tal

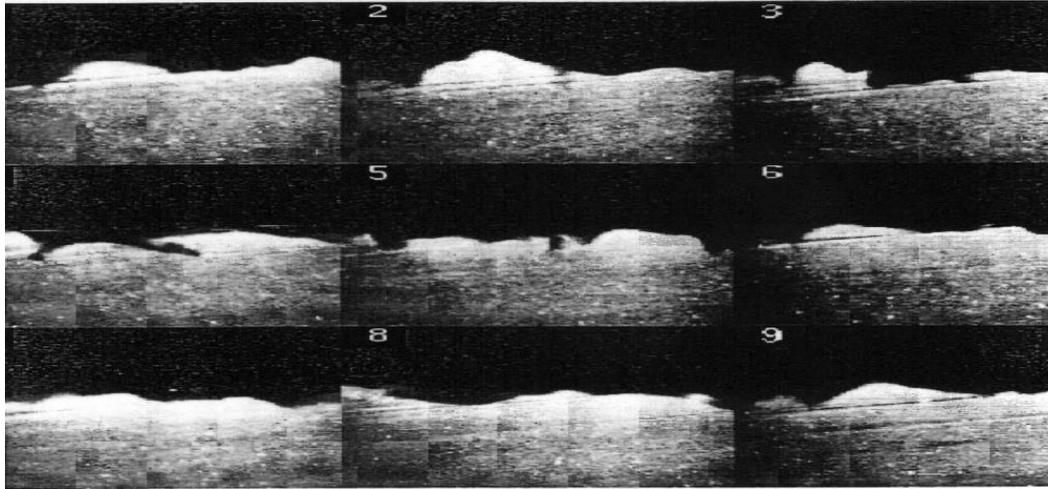


Figura 4.2: Secuencia de la evolución de una interface de densidades ($Ri = 350$ y $\Delta t = 0.5s$).

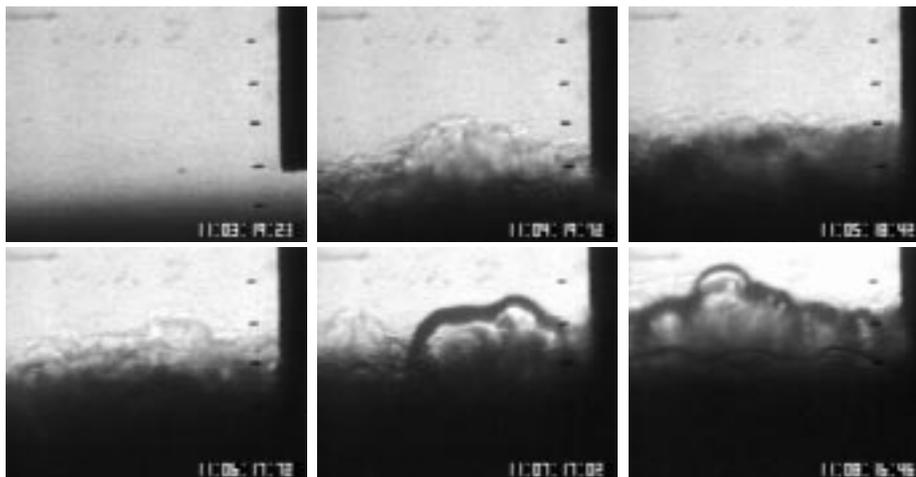


Figura 4.3: Serie de tiempo para el avance vertical de una interface de densidades en los tiempos de 0, 1, 2, 3, 4 y 5 minutos.

como se describe en Redondo et al (1996). Para esta figura, el final de la capa de mezcla e inicio de la capa superior corresponde con la intensidad de 180 en una escala de 256 niveles de gris, de tal manera que si se establece una isolinea con el valor de 180; estaremos observando la evolución de la posición de la interface en la serie de tiempo que se presenta. La figura 4.4 derecha muestra la isolinea de este valor, que representa la evolución de la posición del centro de la interface.

Con esta serie de datos y dado que la interface recorre una distancia $\Delta D = 2.52cm$, obtenemos una velocidad promedio de entranamiento $v_e = 0.0084cms^{-1}$, un entranamiento $E = 7 \times 10^{-4}$ de una interface de densidad con un número de

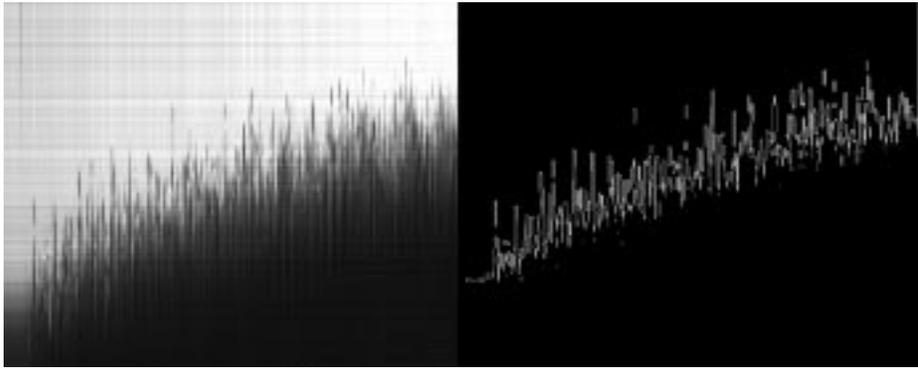


Figura 4.4: Izquierda: Serie de tiempo de cinco minutos para el avance vertical de una interface de densidades tomado como referencia la linea central de las imágenes. Derecha: Isolinea de intensidad de 160 para la serie de tiempo. Cada linea se toma cada 0.5515 segundos.

Richardson de gradiente $Ri_g = 0.44$.

Se han usado diferentes técnicas experimentales para resaltar las diferentes capas presentes, como colocar colorante en la capa inferior de tal manera que al iluminar la columna de agua, la capa superior resalte y pueda observarse el avance de la interface; también puede usarse la técnica del shadowgraph al mismo tiempo como es el caso de las imágenes mostradas anteriormente. Igualmente existe la posibilidad de aplicar fluoresceína a la capa inferior y hacer las mismas observaciones, mediante iluminación por laser la figura 4.5 muestra imágenes de esta técnica, donde se aprecia la microestructura y los filamentos de anchura comparables a unas pocas escalas de Kolmogorov (0.01 a 1mm).

4.1.2 Estructura vertical de las interfaces de densidades.

Los experimentos de laboratorio llevados a cabo sin flujo medio turbulento para interfaces de densidades creadas por temperatura y salinidad, para el tanque pequeño de $15 \times 10cm$ de base con una rejilla de malla $M = 0.8cm$ y un recorrido de la misma $s = 7cm$ de acuerdo a las variables descritas en §3.3.1. Donde se pudo medir el avance de la posición de la interface por medio de la técnica de shadowgraph mostrada en la figura 4.6 donde la gráfica de la izquierda muestra el desarrollo de la posición de la interface debida a la salinidad y la gráfica de la derecha por temperatura.

El entranamiento medio medido se comportó en relación con el número de Richardson como lo muestra la figura 4.7 lo que correspondio a una función del entranamiento de la siguiente manera:

$$E = CRi^{-n(Pr)} \quad (4.1)$$

Donde para los experimentos con sal esta expresión corresponde a $E = 3.52 \times$



Figura 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 $t=16:00$.

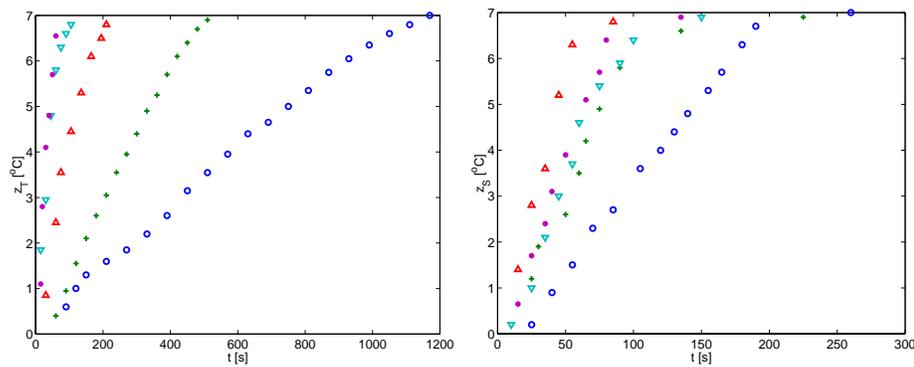


Figura 4.6: Evolución de la posición de la interface en el tiempo para interfaces de densidad para: Izquierda salinidad donde $\Delta\rho$ corresponde con \circ 42, $+$ 21, \triangle 11, ∇ 5 y $*$ 2kgm^3 . Derecha temperatura donde Δt ($^{\circ}\text{C}$ capa inferior - $^{\circ}\text{C}$ capa superior) corresponde con \circ 17-62, $+$ 36-54, \triangle 41-50, ∇ 21-42 y $*$ 31-46.

$Ri^{-0.84}$ y para los experimentos con temperatura $E = 4.66 \times Ri^{-0.4}$. Estos resultados son congruentes con los reportados por Redondo (1996), el término (Pr) indica la dependencia del número de Prandtl que a la vez depende de la difusividad molecular del soluto.

El entrañamiento como función de el número de Richardson de gradiente confirman por los resultados de Turner (1968, 1973) y muestran una dependencia a

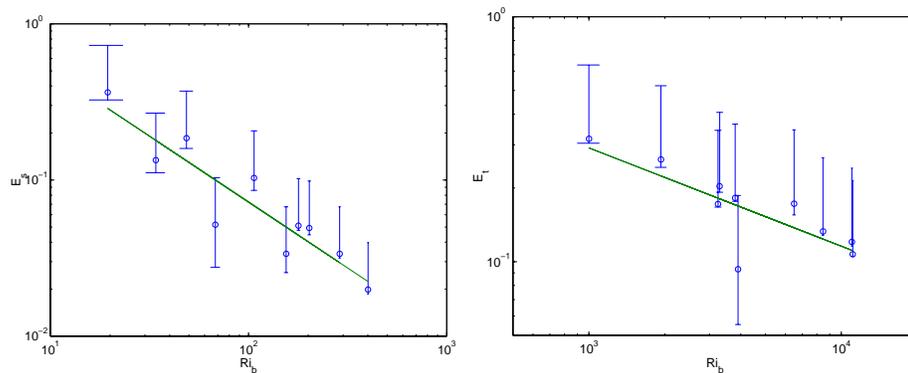


Figura 4.7: Entrañamiento medido en función del número de Richardson global y la eficiencia de mezcla para experimentos de laboratorio con números de Richardson de 10 a 400.

la ley exponencial con (4.1) para valores del número de Richardson en el caso de utilizar diferentes tipos de soluto, a primera vista puede parecer que el exponente n no concuerde con los resultados de Turner (1968), simplemente porque este autor usó un rango más amplio de números de Reynolds y el presente experimento solo tiende a usar un pequeño rango de Reynolds propio de las dimensiones del tanque, sin embargo está claro que las propiedades del soluto sí que tienen un efecto sobre el desarrollo de la mezcla en un fluido turbulento estratificado con media cero para este caso en particular.

4.2 LOS AMBIENTES PRESENTES EN EL ESTUARIO DEL DELTA DEL EBRO.

Estoy aquí porque no quiero que me cuenten de las enormes manadas de búfalos que corrian por los prados verdes, quiero ver las maravillas de la tierra con mis propios ojos. -Salida de la Ampolla 29 de Junio de 1997.

4.2.1 Visualización de la cuña salina y la pluma en el estuario.

La cuña salina.

La intrusión del agua marina dentro del cuerpo del río que se realiza por medio de una capa de agua densa que penetra hacia aguas arriba permite la formación de una interfase de densidades en el sentido horizontal, la capa de agua salada es llamada también cuña salina. La cuña detectada en la campaña de muestreo del día tres de julio de 1997 (*Cytmay2*), se presenta en la figura 4.8 donde se representan las líneas isohalinas por medio de la interpolación de las variables de salinidad obtenidas de los datos de CTD.

La cuña salina observada es representativa para condiciones de verano y va desde la desembocadura del río Ebro en aguas del Mediterráneo occidental hasta

la población de Amposta.

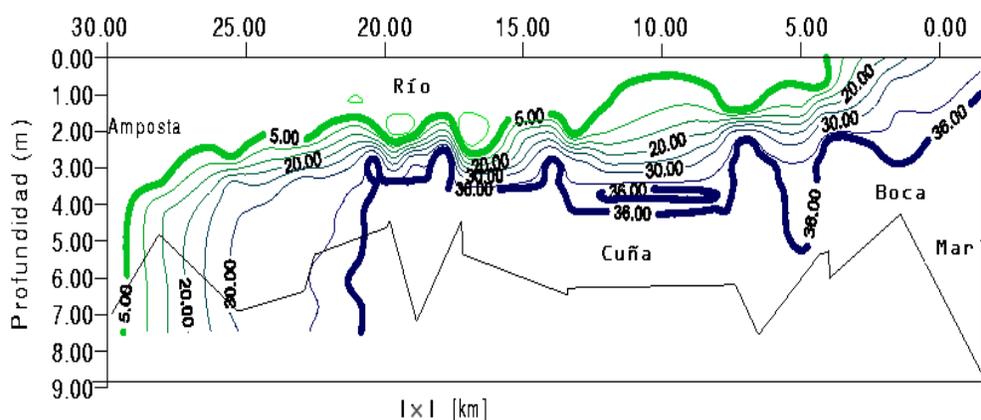


Figura 4.8: Visualización de la cuña salina a partir de los datos de salinidad de ctd de la primera campaña de verano (Cytmar II). Desde la desembocadura del río Ebro hasta la población de Amposta.

El contacto entre estas dos capas con diferentes salinidades y usualmente con diferentes velocidades produce mezcla vertical a lo largo de toda la cuña, esto genera una tercera capa entre ellas que denominaremos **capa de mezcla**; el grosor y la profundidad de esta capa de mezcla varía a lo largo de todo el estuario como se verá más adelante.

La pluma del Ebro.

Mientras que la entrada del agua salada en el ambiente propio de agua de río se produce por las capas inferiores en el cuerpo del estuario propiamente dicho, la salida del agua dulce del río se produce por la capa superior. En sentido horizontal la pluma es la zona donde el agua del río se mezcla con la del mar descargando en ella el contenido de las aguas dulces de origen continental. Al no estar presentes las paredes laterales del río que encajonan el flujo del agua menos densa, esta se derrama flotando sobre el agua más densa del mar. La influencia de las barreras en los márgenes del río, ahora se ven substituidas por el efecto del influjo de la corriente litoral, del oleaje presente en las aguas costeras y del viento. La posición de la interface en la columna de agua se desplaza a las capas más superficiales y conforme nos alejamos de la costa el agua superficial se va haciendo cada vez más y más salada, efecto logrado gracias a la dilución de el agua dulce en el ambiente marino.

La figura 4.9 resultado de una interpolación triangular lineal para estaciones repartidas en las diferentes masas de agua observadas *in situ* (ver §5.3) muestra la complicada forma de la pluma en la boca del río y las diferentes fases que presenta esta justo después de una tormenta en el área. Podemos observar que en la

desembocadura se encuentra el agua de menor salinidad, y que esta va aumentando conforme nos alejamos de la costa y hacia el sur de la desembocadura se mantienen las isolinas de salinidad paralelas a la costa. Existe un núcleo de agua dulce al norte de la desembocadura observado también *in situ*, probablemente como resultado de complicados procesos locales de circulación, que indirectamente reflejan la posición de un remolino en esa zona, en acuerdo con las observaciones de Carrillo et al. (2001) y Platonov (2002).

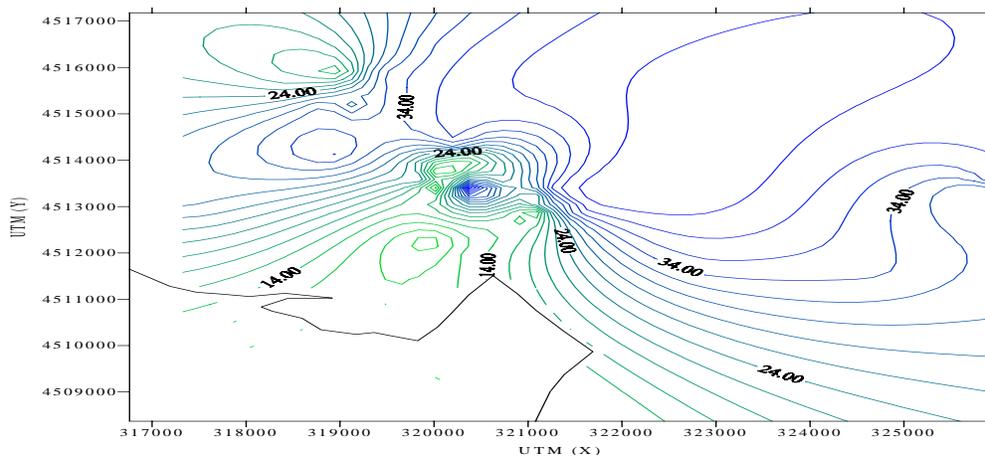


Figura 4.9: Visualización de la pluma para la primera campaña de verano (*Cytmar2*), en la desembocadura del Delta del Ebro, un día después de una tormenta en la zona.

4.2.2 Variables estacionales medidas en el estuario.

Durante el desarrollo de este trabajo, se utilizan diferentes variables medidas durante las diferentes campañas. Para poder utilizar estas medidas, es necesario el validar algunos de estos datos y mostrar la técnica de cálculo de algunos otros. En esta sección se verán los datos generales necesarios para calcular los caudales así como para estandarizar y adimensionalizar las diferentes medidas en el estuario.

Variabilidad de la salinidad en la columna de agua.

Una vez vista la forma general que puede presentar la cuña salina bajo condiciones de verano, observemos las variaciones que la salinidad puede presentar a lo largo de las estaciones fijas durante las diferentes campañas de muestreo descritas en §3.

Es evidente que existe una variación en la posición del inicio de la interface tanto entre las estaciones fijas como durante las campañas. La figura 4.10, presenta de forma gráfica las condiciones de la salinidad en la columna de agua para las estaciones fijas bajo condiciones de: primavera, verano, otoño e invierno.

Durante la primavera la profundidad de la cuña en la estación fija *R6* se encuentra cerca de los tres metros y medio, aproximándose a la superficie paulati-

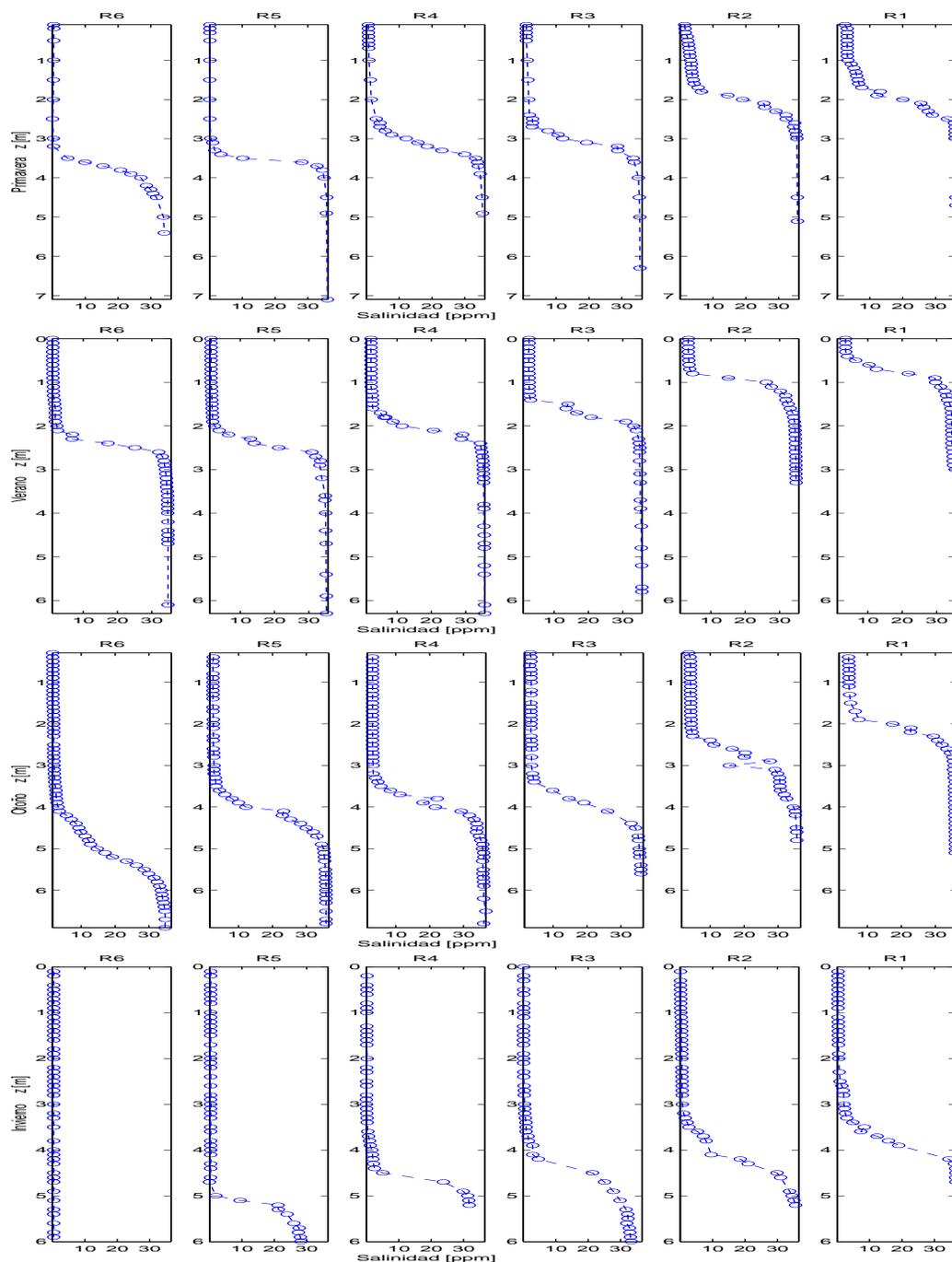


Figura 4.10: Variación de los perfiles de salinidad para las estaciones fijas de $R1$ a $R6$ para las campañas bajo condiciones de primavera, verano, otoño e invierno.

namente hasta cerca de los dos metros de profundidad en $R1$; durante el verano la profundidad de la cuña en la estación fija $R6$ se coloca cerca de los dos metros de profundidad y a lo largo del estuario en dirección de la desembocadura, se

acerca a la superficie hasta casi el medio metro de profundidad.

En otoño la cuña salina observada en la estación fija *R6* gana profundidad y se localiza cerca de los cuatro metros de la superficie y continua acercandose a la superficie a lo largo del estuario hasta muy cerca de los dos metros en la estación *R1*; por último para la campaña de invierno no se encuentra rastros de la cuña es la estación *R6*, es hasta la estación fija *R5* donde se localiza con una profundidad cercana a los cinco metros.

A pesar de que la tendencia general de la cuña salina a lo largo del estuario puede ser observada sin problemas, la evaluación de la profundidad del inicio de la interface y por tanto de la capa de mezcla son sin embargo subjetivas por lo que es necesario un criterio de evaluación de los inicios y finales de las interfaces presentes en los perfiles de salinidad a lo largo de una columna estratificada.

Ausencia de cuña salina.

Durante todas las campañas que se hicieron a lo largo del año se pudo observar la presencia de la cuña salina en el área de estudio. Adicionalmente se presentó la oportunidad de realizar una campaña justo después de una tormenta en la cuenca del Ebro, lo que ocasionó la total expulsión de la cuña salina en el área donde habitualmente puede ser observada. La figura 4.11 presenta la situación de la salinidad en la columna de agua observada en las estaciones fijas para el día 3 de febrero de 2000, después de que el mayor caudal hubo empujado la cuña salina hacia la desembocadura del río.

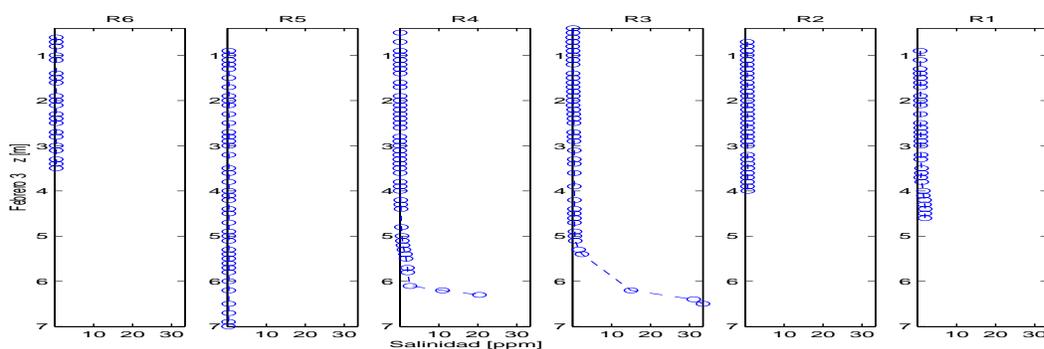


Figura 4.11: Perfiles de salinidad para las estaciones fijas de *R1* a *R6* en la campaña del día 3 de febrero.

A pesar de la ausencia de la formación de la cuña salina, en las estaciones *R3* y *R4* se detectó un atrapamiento agua salina en el fondo de las secciones.

4.2.3 Estructura de las velocidades cerca de la interface.

Como ya fue descrito en la §3, paralelamente a los perfiles de salinidad fueron tomados perfiles de velocidades en la columna de agua para las estaciones fijas. Estos perfiles se muestran en las figuras 4.12, 4.13, 4.14 y 4.15 para las campañas

de primavera, verano, otoño e invierno respectivamente. Puede observarse una destacada relación entre los perfiles de las velocidades y los perfiles de salinidad, ya que siempre que se encontró presente una interface, se hizo patente un cambio en el valor de las velocidades en las capas cercanas a la posición de la interface.

Puede observarse claramente a partir de los perfiles de velocidad y salinidad en las estaciones $R2$, $R3$, $R4$, $R5$ y $R6$ de la campaña de primavera y las estaciones $R3$ y $R5$ para la campaña de invierno; la presencia de máximos en el perfil de velocidades justo a la profundidad de la capa de mezcla.

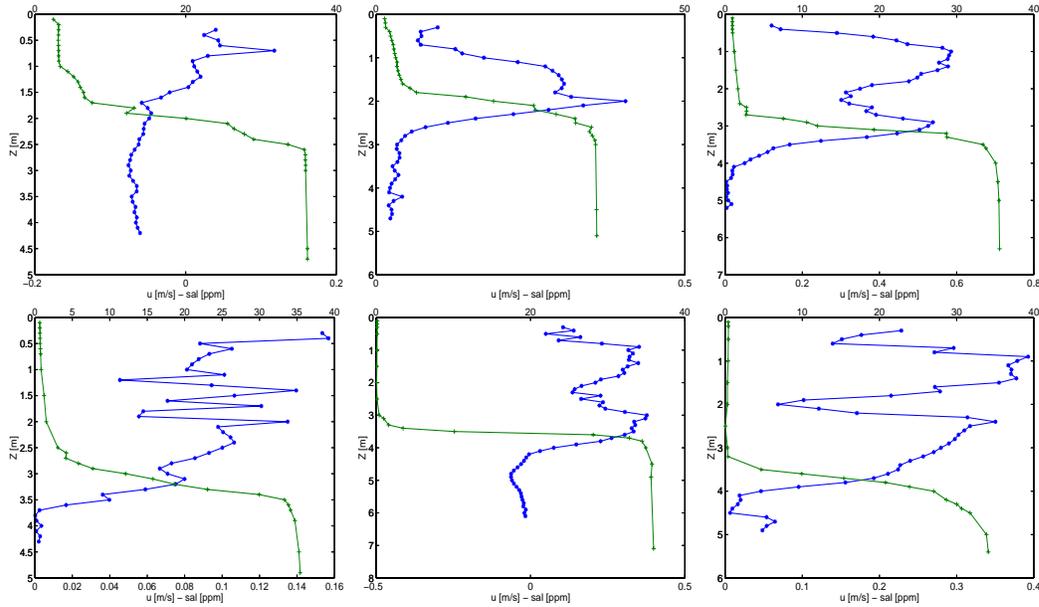


Figura 4.12: perfiles salinidad (+) y velocidad (*) durante la campaña de primavera *Pionner1*, para las estaciones fijas $R1$, $R2$ y $R3$ arriba y $R4$, $R5$ y $R6$ abajo.

Una vez establecidos los inicios y finales de la interface, donde los valores de la velocidad en una capa determinada (\bar{u}_h) cerca a los limites de una interface con esfuerzos de cizalladura, deben corresponderse a la función logarítmica como la descrita en (2.11), esta misma puede de igual manera ser escrita como:

$$\bar{u}_h = K \ln\left(\frac{h}{h_0}\right) = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{h}{h_0}\right) \quad (4.2)$$

Donde h en este caso es la distancia donde es medida la velocidad respecto de el centro de la capa de mezcla, K es la pendiente de la capa logarítmica ($K = u_*/k$) dada por la relación entre la velocidad de corte de la interface u_* y la constante de von Karman $k = 0.41$ y h_0 es el origen virtual del perfil logarítmico. Puede notarse un buen ajuste del perfil logarítmico de las velocidades en las capas superior e inferior cerca de la interface representadas en las figuras 4.16, 4.17, 4.18 y 4.19 por las líneas punteadas, estas estimaciones son congruentes por las realizadas por Charnock (1955) para perfiles de velocidades en una columna de

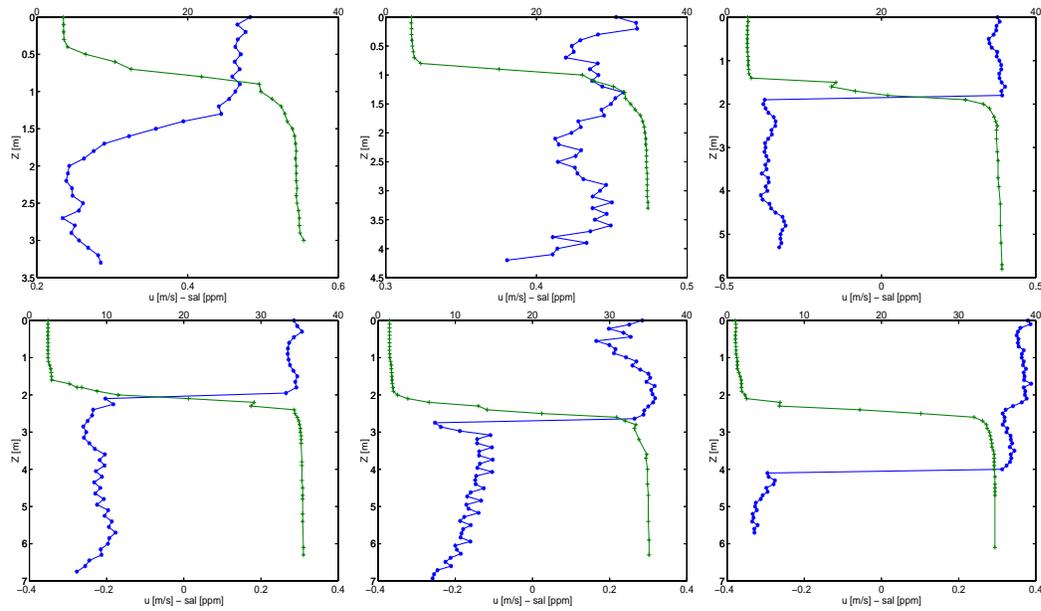


Figura 4.13: perfiles salinidad (+) y velocidad (*) durante la campaña de verano *Pionner2*, para las estaciones fijas *R1*, *R2* y *R3* arriba y *R4*, *R5* y *R6* abajo.

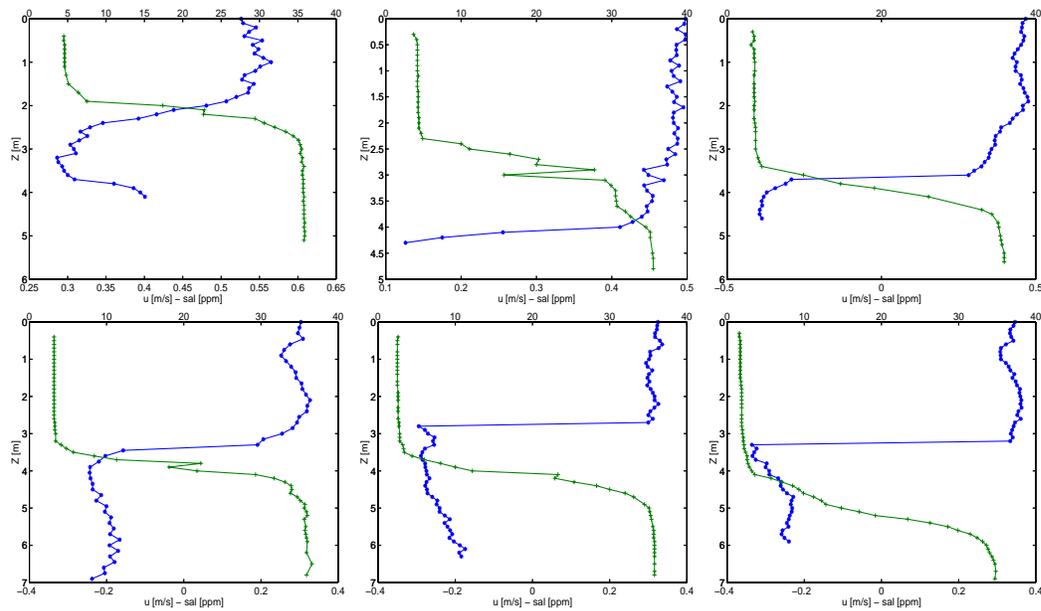


Figura 4.14: perfiles salinidad (+) y velocidad (*) durante la campaña de otoño *Pionner3*, para las estaciones fijas *R1*, *R2* y *R3* arriba y *R4*, *R5* y *R6* abajo.

agua inducidos por un esfuerzo cortante por viento.

Una columna de agua para un estuario ideal como el de Dyer (1997) donde la capa superior fluye con una velocidad media en sentido a la desembocadura,

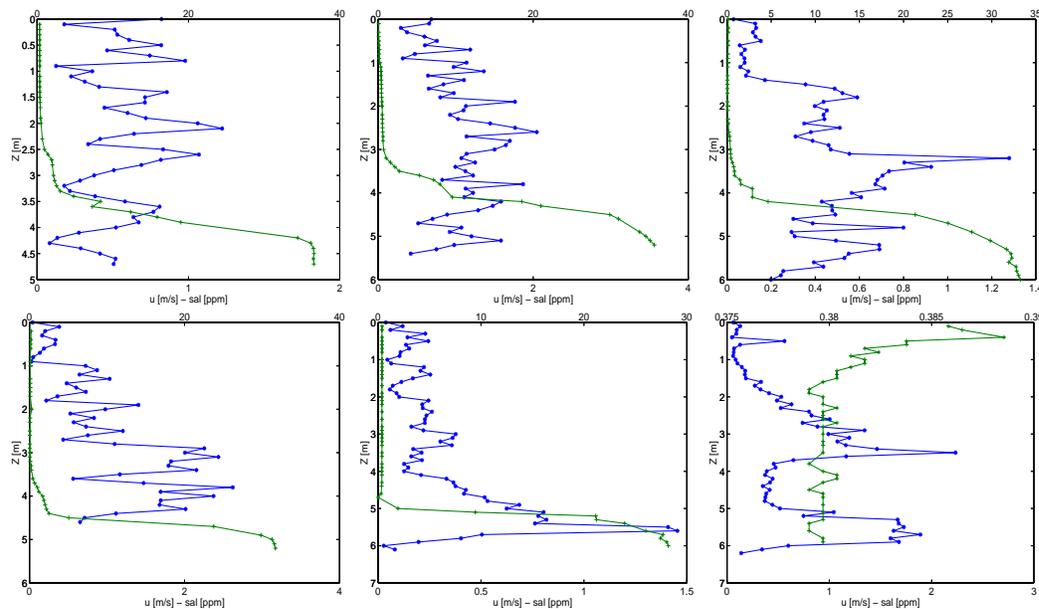


Figura 4.15: perfiles salinidad (+) y velocidad (*) durante la campaña de invierno *Pionner4*, para las estaciones fijas *R1*, *R2* y *R3* arriba y *R4*, *R5* y *R6* abajo.

la capa de mezcla tiene una velocidad media menor y en el mismo sentido y la capa inferior permanece inmóvil o tiene una velocidad menor que la de la capa de mezcla. La velocidad de las subcapas de acuerdo a la distancia de la capa límite para todas las condiciones bajo estudio que obedecen a la relación de un perfil logarítmico (4.2) reportada por varios autores (entre otros Tritton (1988), Kundu (1990) y Nielsen (1992)).

Para condiciones de capa límite en un estuario ideal se tienen dos condiciones de la siguiente manera:

1. Para la capa superior. La velocidad aumenta al alejarse del centro de la interface.
2. Para la capa inferior. La velocidad disminuye al alejarse del centro de la interface.

Estas condiciones típicas de un estuario ideal representan las relaciones mostradas en la figura 4.16 para la relación de estaciones fijas que se presenta a continuación: *R4* bajo condiciones de primavera, para las estaciones fijas *R1* y *R2* en condiciones de verano de la figura 4.17, las estaciones fijas de *R1*, *R2*, *R4* y *R5* en condiciones de otoño mostradas en la figura 4.18 y para las estaciones fijas *R1*, *R2* y *R3* para condiciones de invierno en la figura 4.19.

Relaciones de otro tipo también son evidentes, por ejemplo en sentido invertido para condiciones de primavera la estación fija *R1* y para condiciones de verano de las relaciones de las estaciones fijas *R3* y *R4*. Y el resto presenta relaciones variables, ya sea por que mientras el río fluye aguas abajo la cuña no fluye agua

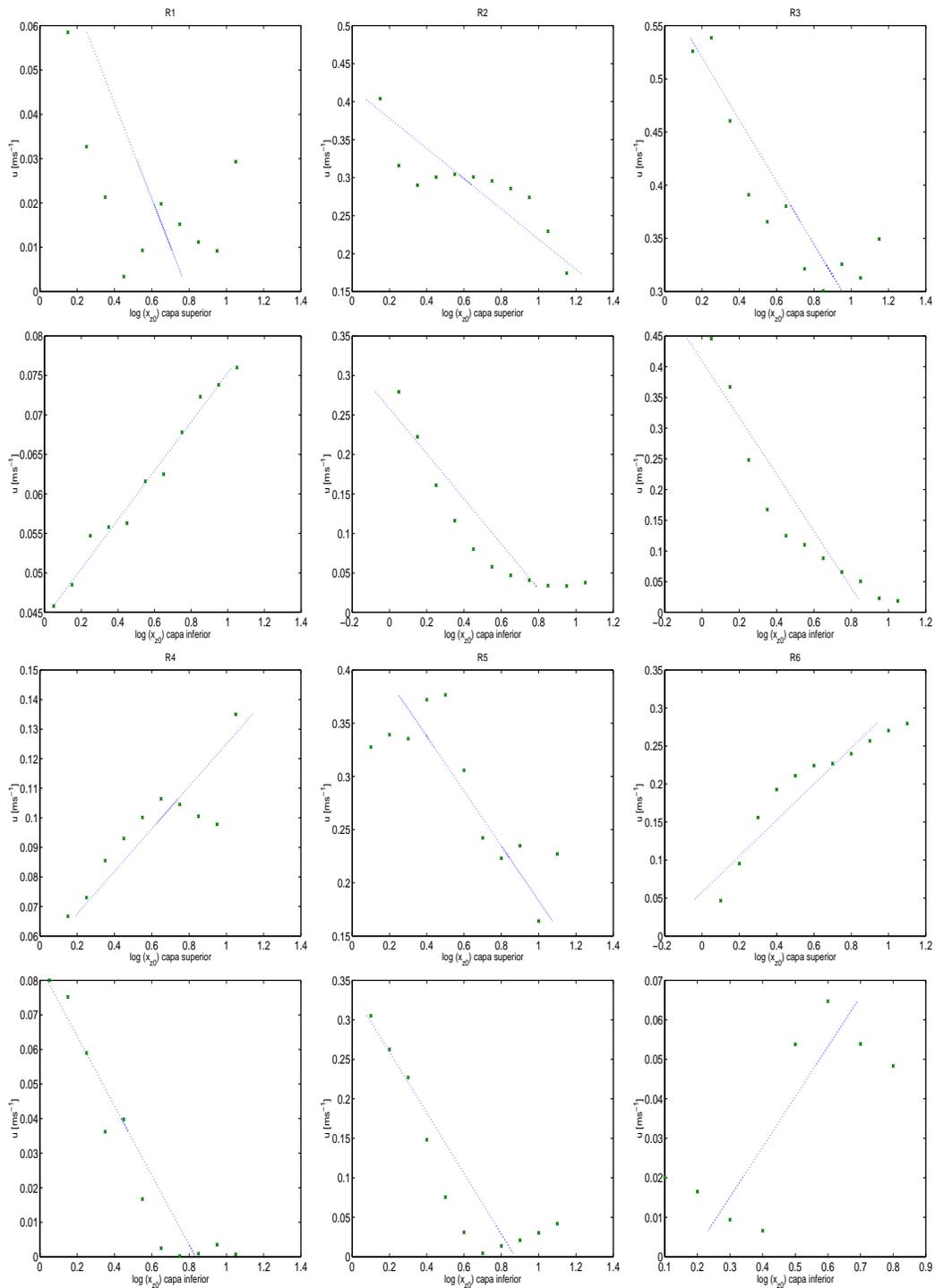


Figura 4.16: Regresiones de la velocidad [ms^{-1}] respecto al logaritmo neperiano de la distancia al centro de la interface ($x_{z0}[m]$), para las estaciones $R1$, $R4$ y $R5$ durante la campaña de primavera.

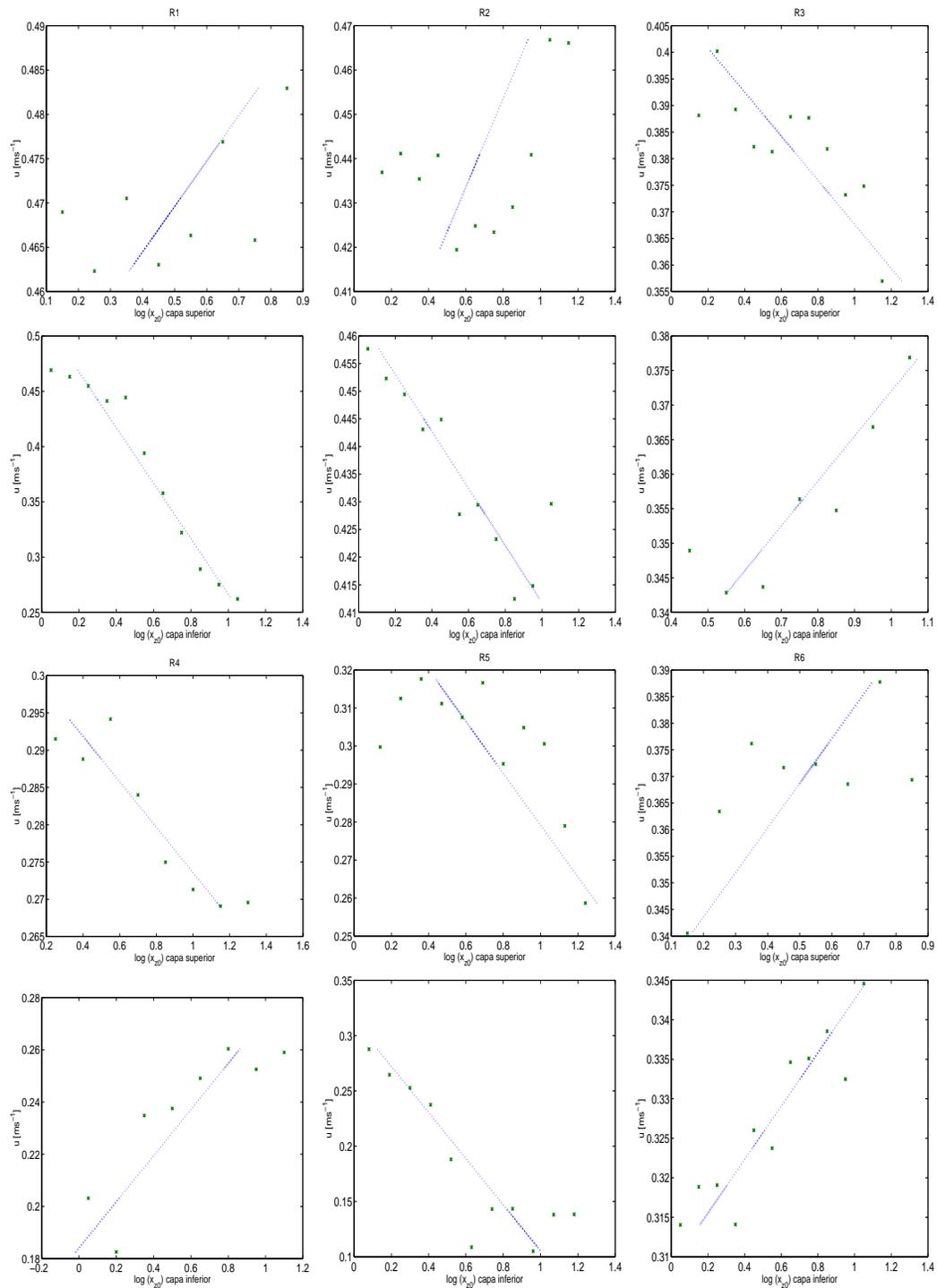


Figura 4.17: Regresiones de la velocidad [ms^{-1}] respecto al logaritmo neperiano de la distancia al centro de la interface ($x_{z0}[\text{m}]$), para las estaciones $R1$, $R4$ y $R5$ durante la campaña de verano.

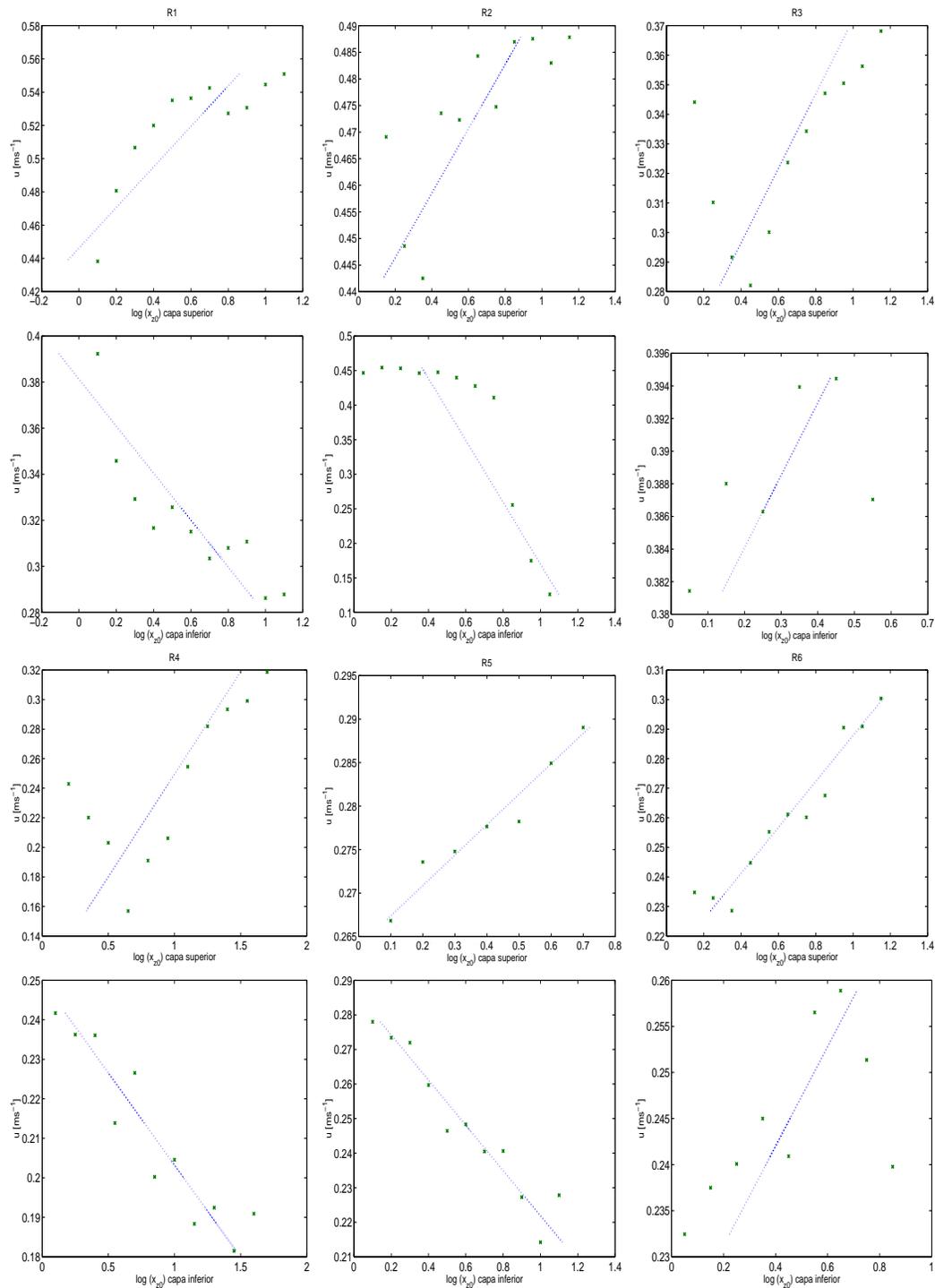


Figura 4.18: Regresiones de la velocidad [ms^{-1}] respecto al logaritmo neperiano de la distancia al centro de la interface ($x_{z0}[\text{m}]$), para las estaciones $R1$, $R4$ y $R5$ durante la campaña de otoño.

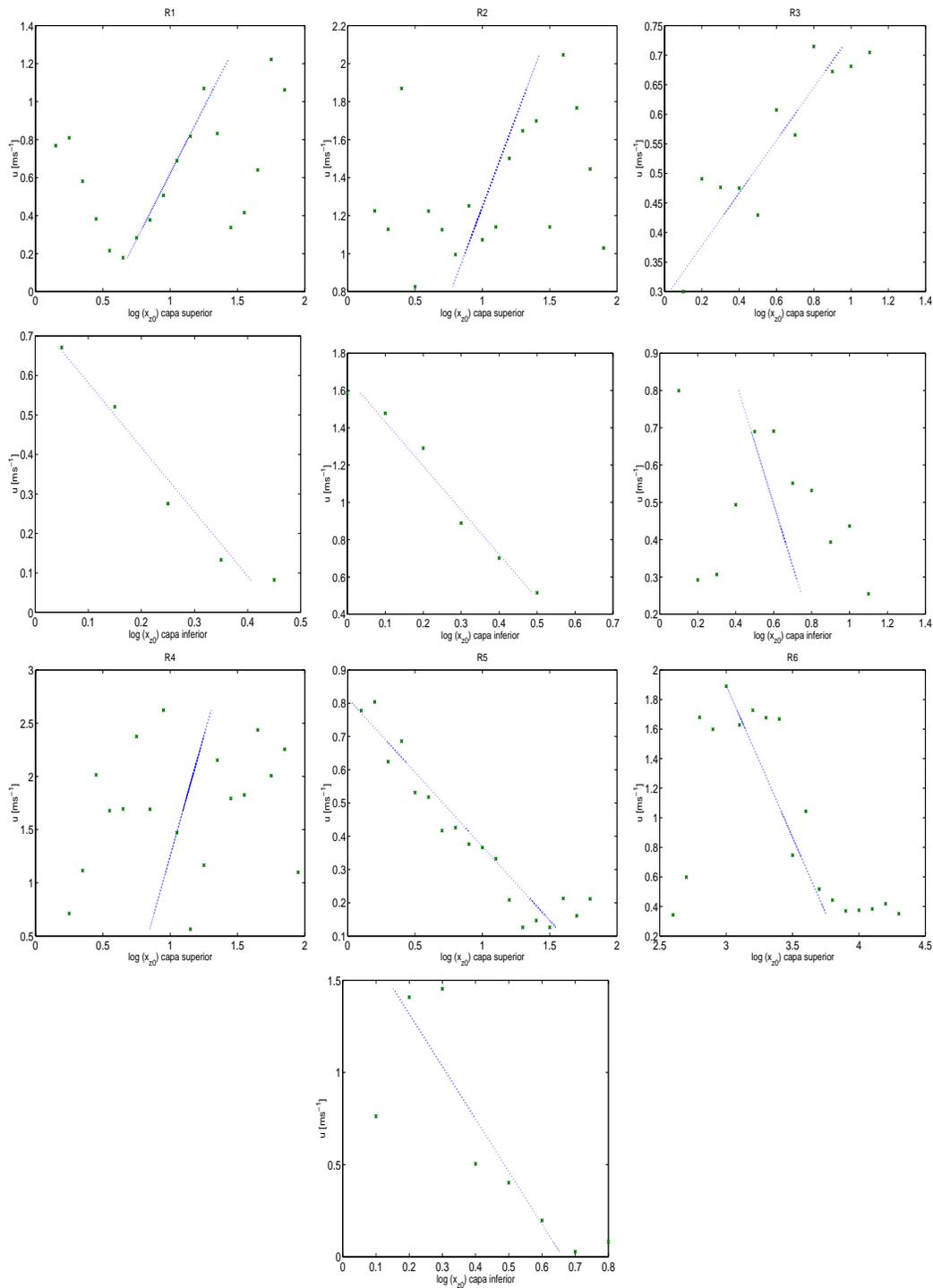


Figura 4.19: Regresiones de la velocidad [ms^{-1}] respecto al logaritmo neperiano de la distancia al centro de la interface ($x_{z0}[m]$), para las estaciones $R1$, $R4$ y $R5$ durante la campaña de invierno.

arriba o por que la capa de la cuña no tiene movimiento o este es muy pequeño.

4.2.4 Criterios para determinar el inicio y final de una interface en una columna de agua estratificada.

Es relativamente sencillo localizar una interface en un perfil de salinidades, pero donde comienza y termina realmente esta interface?. Con el fin de responder esta pregunta evaluamos tres posibles indicadores del inicio y final de la interface presente en una columna de agua estratificada.

Existen diferentes criterios para evaluar el inicio y final de una interface en la columna de agua, aqui se han elegido tres para aplicarlos a un mismo perfil de salinidad:

1. Gradiente de la salinidad respecto a la profundidad.
2. Valor de la frecuencia de Brunt-Väisälä.
3. Valor del número de Richardson de gradiente.

El primer criterio a analizar es el criterio empírico descrito por Legović (1991), de la pendiente de la salinidad como:

$$m = \frac{\Delta S}{\Delta z} \quad (4.3)$$

Donde: m es la pendiente de la salinidad, S la salinidad en [ppm] y z la profundidad en metros.

Considerando el valor empírico de $m_{crit} = 5$ [ppm/m] como el valor que determina el inicio y final de una interface de salinidad. Como ejemplo tenemos en la figura 4.20 izquierda representados estos valores para un perfil típico para la estación *R6* de la campaña de primavera *Pionner1*.

Para el mismo perfil de referencia, se calculan los valores de la densidad y con ellos el valor de la frecuencia de Brunt-Väisälä descrita en (2.28) como:

$$N^2 = \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (4.4)$$

Obtenemos así los valores de la frecuencia característica de los movimientos verticales en la interface debidos a la diferencia de densidades entre las capas; la figura 4.20 centro, presenta estos valores calculados para el mismo perfil de referencia.

Complementando el cálculo de las densidades en la columna de agua con el perfil de velocidades, calculamos el número de Richardson de gradiente descrito en §2.5 se tiene:

$$Ri_g = \frac{g}{\rho_0} \frac{\frac{\partial \rho}{\partial z}}{(\frac{\partial U}{\partial z})^2} \quad (4.5)$$

La figura 4.20 derecha muestra los valores calculados para el perfil de referencia de el número de Richardson de gradiente.

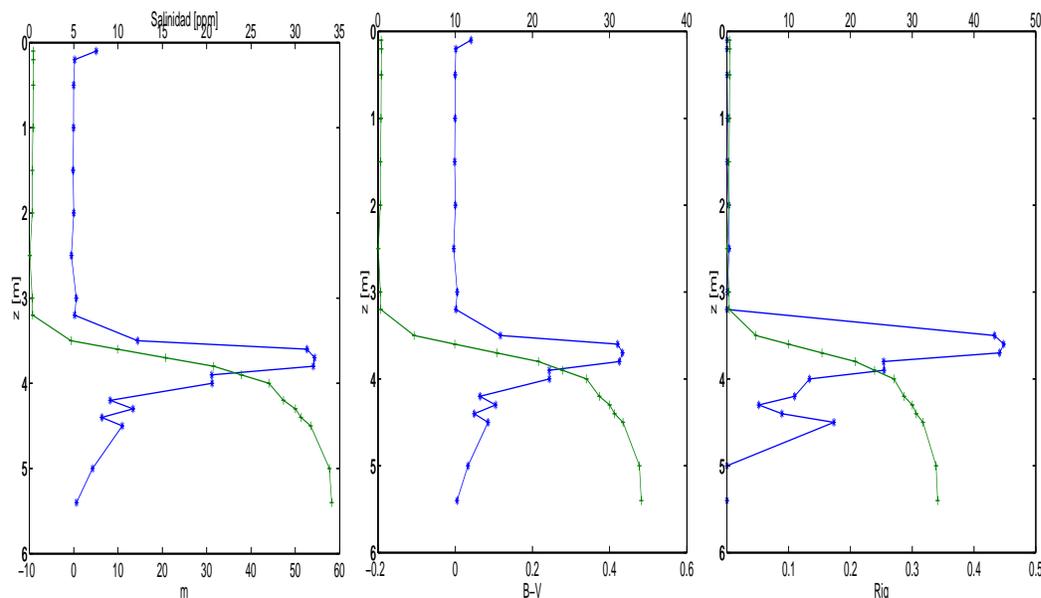


Figura 4.20: Izquierda: Valores de la pendiente de la salinidad (*). Centro: Frecuencia de Brunt-Väisälä (*) y Derecha: Valores del número de Richardson de gradiente (*). Respecto a la profundidad, para un perfil de salinidades (+).

Evaluación y comparación de los diversos criterios.

Estos tres criterios están claramente relacionados ya que si la salinidad domina las diferencias de densidad como ocurre en el agua de mar, $m \simeq \partial\rho/\partial z$ por lo tanto y recordando los principios establecidos en §2.5 $N = (gm/\rho)^{1/2}$ y de la misma manera $Rig = N^2/S^2$ donde $S = \partial u/\partial z$ es la cizalladura.

Los tres criterios describen la estabilidad entre dos capas en la columna de agua en el caso del número de Richardson de gradiente. Comparando las formas de los perfiles de los diferentes criterios, podemos observar que son similares y que solo presentan escalas diferentes, aunque el criterio de número de Richardson de gradiente proporciona más información al requerir los perfiles de velocidad además de los de densidad.

Tomando en cuenta lo anterior, es suficiente con tomar el valor adecuado del valor crítico para los criterios. El valor crítico de el número de Richardson para interfaces de densidades con cizalladura, $Rig_{crit} = 0.02$. Legović (1991) sugiere el valor crítico para su criterio de la pendiente de la salinidad respecto de la profundidad en $m_{crit} = 5 [ppm/m]$ y por último en este trabajo se sugiere el valor crítico equivalente para la frecuencia de Brunt-Väisälä de $BV_{crit} = 0.05 [s^{-1}]$.

La figura 4.21 presenta el uso de estos valores críticos, para los diferentes criterios establecidos en el perfil de referencia. Una vez establecida la compatibilidad de resultados de los diferentes criterios, en este trabajo se utilizará el criterio del número de Richardson de gradiente para establecer el inicio y final de la interface y con ello los límites de la capa de mezcla.

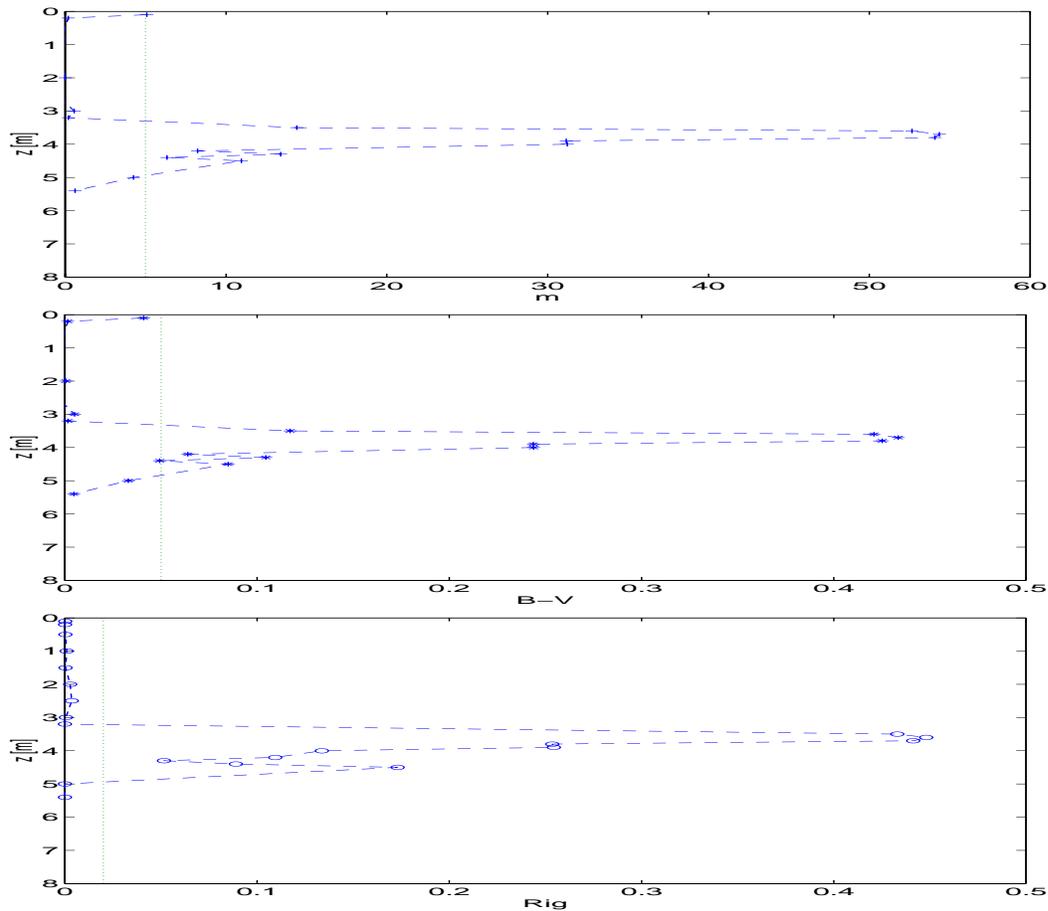


Figura 4.21: Determinación del inicio y final de una interface mediante los valores críticos de $m_{crit} = 5 \text{ ppm/m}$, $BV_{crit} = 0.01 \text{ s}^{-1}$ y $Ri_{crit} = 0.02$ para el perfil de referencia de $R6$ de la campaña de primavera.

Con el criterio del número de Richardson de gradiente se ha determinado el inicio y final de una interface de densidades y con ello el inicio y final de la capa de mezcla, y se ha elaborado la tabla 4.1 para las diferentes estaciones fijas en las diferentes campañas estacionales de *Pionner*. A la vez se ha evaluado el grosor de esta capa dentro del estuario del delta del Ebro.

El grosor de la capa de mezcla presenta una variación estacional climatológica a lo largo del año. La figura 4.22 muestra la variación estacional del gradiente del grosor de la capa de mezcla respecto de la distancia en estudio. En esta figura puede observarse que para las condiciones de primavera, verano y otoño los valores del gradiente del grosor de la interface en la fracción del estuario bajo este estudio, oscila alrededor de los 2.5 m; mientras que para las condiciones de invierno el gradiente del grosor de la interface es sensiblemente menor, debido sobre todo a que en la campaña del 3 de febrero, no se detectó la presencia de la cuña sin embargo si se detectaron atrapamientos de agua salada dentro de la

Tabla 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.

	Estaciones					
	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Primavera						
lim-sup.	1.0	1.6	2.7	2.5	3.0	3.2
lim-inf.	2.7	2.7	3.6	3.6	4.0	5.0
w-inter.	1.7	1.1	0.9	1.1	1.0	1.8
Verano						
lim-sup.	0.4	0.7	1.4	1.6	2.0	2.1
lim-inf.	1.3	1.8	2.3	2.5	2.9	2.8
w-inter.	0.9	1.1	0.9	0.9	0.9	0.7
Otoño						
lim-sup.	1.5	2.3	3.4	3.2	3.5	4.1
lim-inf.	2.9	4.2	4.7	5.0	5.1	6.0
w-inter.	1.4	1.9	1.3	1.8	1.6	1.9
Invierno						
lim-sup.	3.3	3.3	3.6	4.4	4.7	8.7
lim-inf.	4.4	5.1	5.8	5.1	5.9	8.7
w-inter.	1.1	1.8	2.2	0.7	1.2	0.0

zona de estudio.

Un análisis más detallado de los grosores de la capa de mezcla respecto de los caudales se presenta adelante.

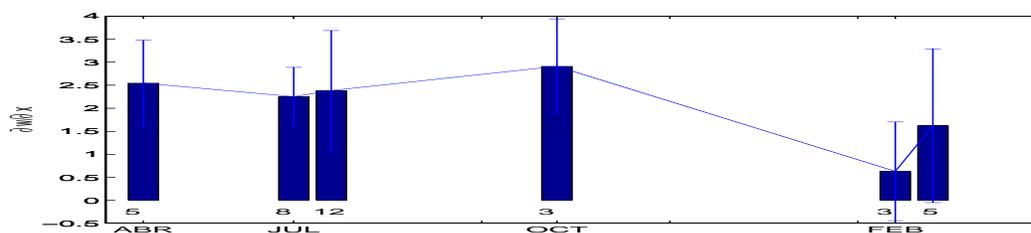


Figura 4.22: Variación estacional del grosor promedio de la capa de mezcla en las campañas de primavera, verano, otoño e invierno.

4.3 La cuña salina bajo condiciones de fuerte estratificación.

Se presentan tres tipos de análisis sobre los datos generales de la cuña salina.

1. Se resalta la necesidad de normalizar la profundidad de la posición de la interface de acuerdo a el áreas de la sección local calculada.
2. Un análisis de la estabilidad de la estratificación a lo largo de todo el estuario presente en condiciones de verano de los datos obtenidos en *Cytmar2*.
3. Un análisis empírico de las funciones de las densidades máximas y mínimas en la columna de agua a lo largo de todo el estuario.

Los valores de densidad fueron calculados usando los valores de temperatura y salinidad, y de acuerdo a la ecuación internacional de estado (SIGMA-T) descrita en 1980. Por medio de los cuales se calculan las funciones de las densidades en la cuña a lo largo del estuario.

4.3.1 Estabilidad de la cuña a lo largo de todo el estuario.

Usando como se define el número de Richardson de gradiente Ri_g en §2.5 y dado que este es un buen indicador de la estabilidad de la estratificación en la columna de agua, evaluamos las condiciones presentes a lo largo de toda la cuña salina. La figura 4.23 muestra que bajo condiciones de verano la cuña salina es estable ya que los valores de los números de Richardson calculados para las estratificaciones presentes a lo largo del estuario son mayores que el valor crítico que hemos considerado como $Ri_{crit} = 0.02$. Y que para las zonas cercanas tanto a la cabeza de la cuña como fuera de la desembocadura, los valores de los números son menores que el valor crítico.

4.3.2 Profundidad de la interface y grosor de la capa de mezcla.

En este apartado se observa el comportamiento de la profundidad (D) del inicio de la interface y del grosor de la capa de mezcla (w) que se interpreta fácilmente utilizando la profundidad de del inicio de la interface (D) a el final de la misma ($D + h$), donde h es el ancho de la capa de mezcla y la profundidad del centro de la interface (h_0), corresponderá a:

$$h_0 = D + \frac{h}{2} \quad (4.6)$$

La posición de la interface y el centro de esta usados en (4.6) y calculados directamente de los perfiles de salinidad, se muestran en la figura 4.24. Se puede observar el comportamiento general de estas dos variables para una cuña estable bajo condiciones de verano. Se observa que la cuña inicia en las capas profundas del estuario con un grosor mínimo, para cerca de los primero metros llegar a un espesor máximo y estabilizarse pronto en un grosor que se mantiene a lo largo de todo el estuario, al final cerca de la desembocadura vuelve a aumentar el grosor de la capa de mezcla y apartir de entonces disminuye hasta el mínimo fuera de la desembocadura del estuario.

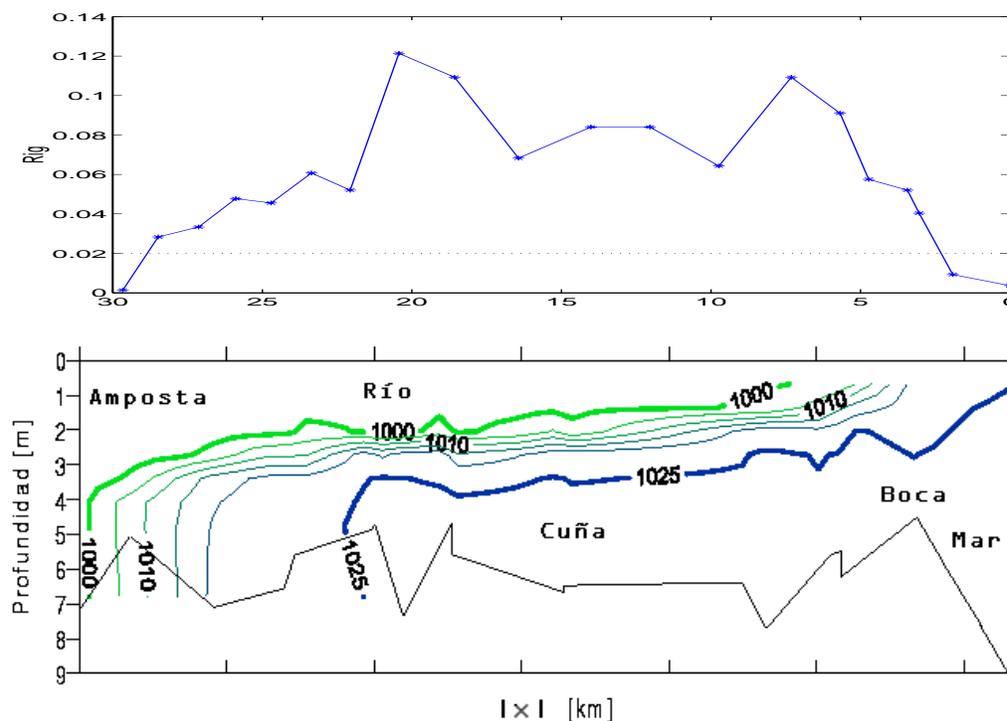


Figura 4.23: Estabilidad de la estratificación en la columna de agua a lo largo del estuario del delta del Ebro (arriba), calculado psara la campaña de verano *Cytmar2* (abajo).

Para el comportamiento de la posición de la interface en la columna de agua, se observa una tendencia a disminuir su profundidad conforme nos aproximamos hacia la desembocadura. La figura 4.25 muestra la regresión lineal de la evolución de la posición de la interface:

$$D = 0.1607x + 0.0932 \quad (4.7)$$

Donde x es la distancia a la desembocadura en kilómetros. Para realizar esta regresión (4.7) no se toma en cuenta los extremos de la cuña, donde ocurre un cambio brusco.

4.3.3 La cuña como funciones de densidades a lo largo del estuario.

Dado que la estabilidad de una interface en la columna de agua depende en gran medida del gradiente de la densidad, y a la vez este determinará la estabilidad de la cuña a lo largo del estuario. Se han analizado las características de la diferencia de las densidades en la columna de agua a lo largo del estuario bajo condiciones de verano para la campaña del tres de julio de 1997 *Cytmar2*.

Las densidades mínimas, máximas y promedio en la columna de agua a lo largo

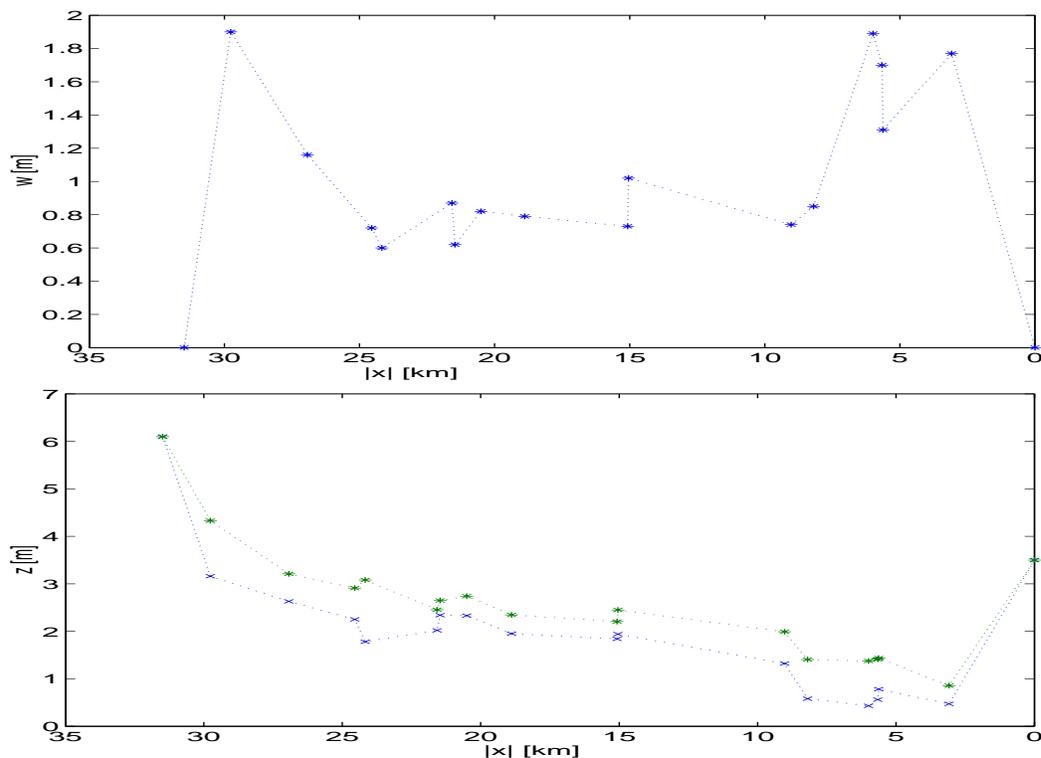


Figura 4.24: Arriba: Ancho de la interface a lo largo de todo el estuario (W). Abajo: Profundidad del inicio de la interface D en la columna de agua (x) y del final de la capa de mezcla ($*$) a lo largo del estuario del delta del Ebro durante la campaña de verano.

de todo el estuario, representadas en la figura 4.26 son analizadas bajo diferentes puntos de vista.

En el primero se observa que las diferencias de densidades representadas en la figura 4.27, presentan un aumento a partir de la cabeza del estuario ($x = 32.6 km$), ya que antes toda la columna de agua es de la misma densidad. En el cuerpo del estuario la diferencia de densidades se mantiene alrededor de las $25 kgm^{-3}$, para posteriormente disminuir en la desembocadura ($x = 0 km$) a valores alrededor de $5 kgm^{-3}$.

También observamos que las diferencias de densidad presentan un máximo como punto de inflexión respecto a las densidades mínimas y máximas (figura 4.28) este punto se localizó a una distancia de $16.4 km$ del inicio del transecto realizado en el estuario, y que aparentemente este punto separa dos regiones en las que se presenta un ordenamiento de las estaciones con la distancia a la boca salvo una que no presenta dicho orden monótonico, respecto a cada una de las relaciones analizadas con las mínimas y máximas densidades.

Por ejemplo para las densidades mínimas en la columna de agua, el punto de máxima diferencia de densidades separa a los perfiles más lejanos de $16.4 km$

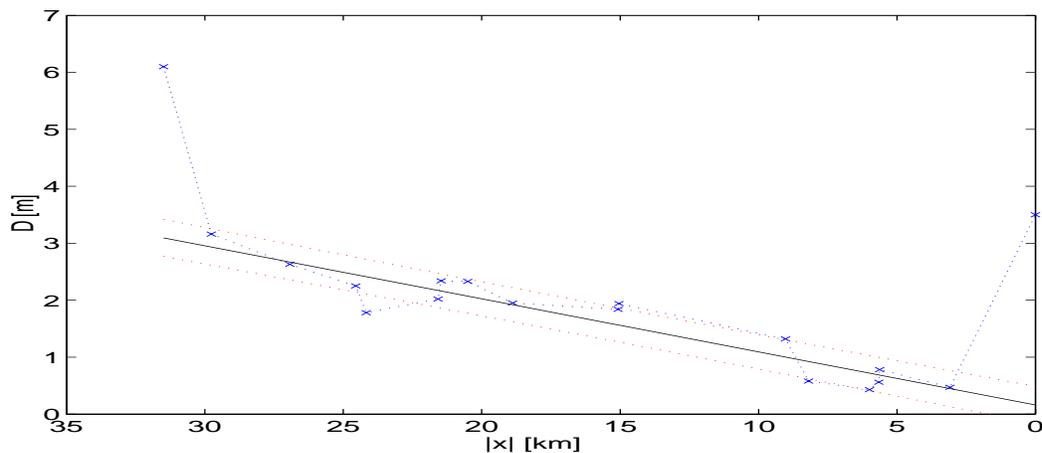


Figura 4.25: Regresión lineal de la evolución del inicio de la interface D , durante la campaña de verano.

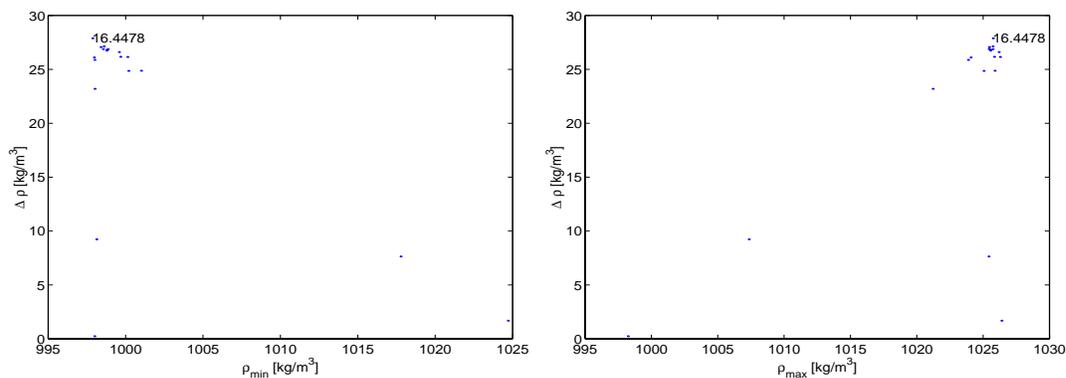


Figura 4.28: Punto de máxima diferencia entre las densidades máximas (derecha) y mínimas (izquierda) localizado a 16.4478 km de la boca.

como grupo no ordenado respecto a la distancia a la desembocadura de el grupo ordenado donde las estaciones de distancia a la boca menos a 16.4 km se ordenan de mayor a menor distancia a la desembocadura.

Por otra parte el punto de máxima diferencia de densidades divide a la zona ordenada donde se localizan las distancias mayores de 16.4 km de la zona no ordenada donde las distancias son menores a 16.4 km.

Las funciones de la cuña representada por las densidades máximas, mínimas y promedio de cada perfil a lo largo del estuario bajo condiciones de verano, tal y como se presenta en la figura 4.26. Muestra que la variación de las densidades máximas esta bien representada por medio de una función de la tangente hiperbólica de la siguiente forma:

$$\rho_{maxcalc} = \rho_{mintot} + (\Delta p_{tot} \tanh(Fp)) \quad (4.8)$$

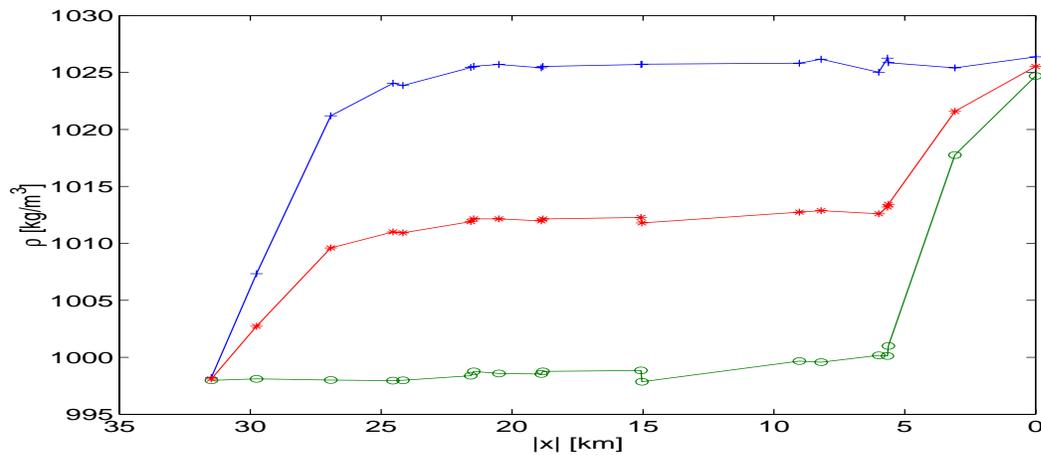


Figura 4.26: Densidades máximas (+), mínimas (o) y promedio (*) en la columna de agua para la cuña estable en condiciones de verano..

Donde: ρ_{mintot} es el valor mínimo de la densidad de toda la cuña salina (998.2230), $\Delta\rho_{tot}$ es la diferencia de densidades entre los valores mínimos y máximos totales en todo el estuario y Fp corresponde al factor de posición de la estación dentro del estuario, determinado por:

$$Fp = \frac{Lc - x}{4.8} \tag{4.9}$$

Donde: Lc es la longitud máxima de la cuña observada desde la desembocadura, x es la distancia de la sección donde se ha tomado los datos y 4.8 es el valor empírico que determina parte de ajuste de la función muy proximo a $1/6$ de $\Delta\rho$

De la misma manera la función que describe la densidad mínima de la columna, se representa por una función del tipo seno hiperbólico de la forma:

$$\rho_{mincalc} = \rho_{mintot} + \frac{\sinh(Fc)}{1/2\Delta\rho} \tag{4.10}$$

Por último el promedio de las densidades máximas y mínimas, sigue siendo el mismo de manera que:

$$\rho_{meancalc} = (\rho_{maxcalc} + \rho_{mincalc})/2 \tag{4.11}$$

La figura 4.30 representa las funciones calculadas para las densidades máximas, mínimas y promedio partiendo de las ecuaciones arriba mencionadas basadas en las funciones de tangente hiperbólica, seno hiperbólico y promedio respectivamente.

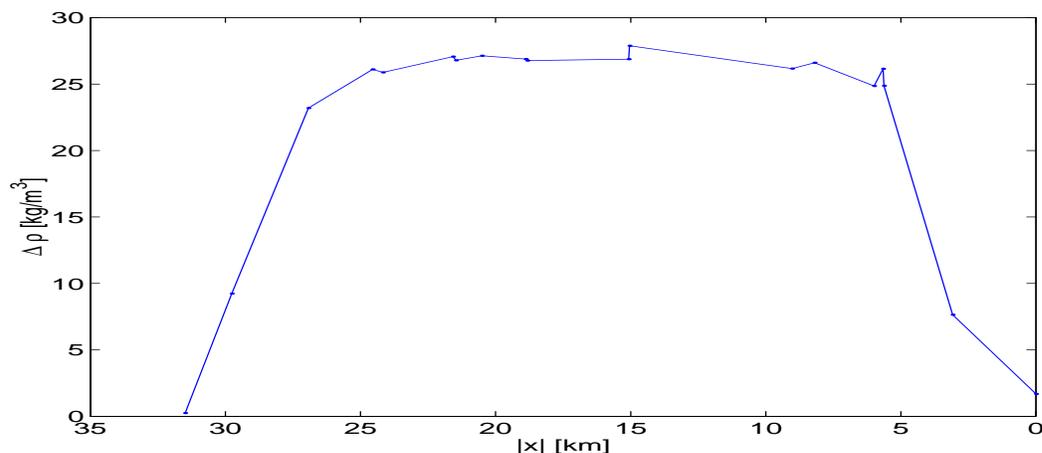


Figura 4.27: Diferencias de densidades entre las densidades mínimas y máximas de la columna de agua para la cuña salina en condiciones de verano.

4.3.4 Distancia de la cabeza de acuerdo a la densidad mínima de la columna de agua.

Una vez calculados los valores de las densidades máximas y mínimas a partir de las funciones mencionadas en (4.8) y (4.10), podemos también establecer una ecuación empírica para la distancia a la cual se encuentra la boca bajo condiciones de verano en el estuario del delta del Ebro.

Partiendo de 4.10 y tomando la densidad mínima total como la densidad del agua del río antes de entrar en el estuario, tendremos que la distancia de la cabeza de la cuña estará representada por:

$$Dc = a \sinh((\rho_{mc} - \rho_{mintot})^{1/2} (\Delta\rho))^{4.8} \quad (4.12)$$

Donde: Dc es la distancia a la que se encontrará la cabeza de la cuña, ρ_{mc} la densidad mínima de la columna de agua medida, ρ_{mintot} la densidad mínima de todo el estuario.

Partiendo de (4.12), se han calculado las distancias de la cabeza de la cuña, aguas arriba, bajo condiciones de verano para las densidades presentes en *Cytmar2* las cuales se encuentran representadas en la tabla 4.2.

4.4 RESULTADOS: CAUDALES.

En esta sección veremos los resultados de las medidas y del cálculo de los caudales locales, partiendo las secciones, perfiles de salinidad y velocidades en la columna de agua. Todas ellas variables medidas en las posiciones indicadas en §3.

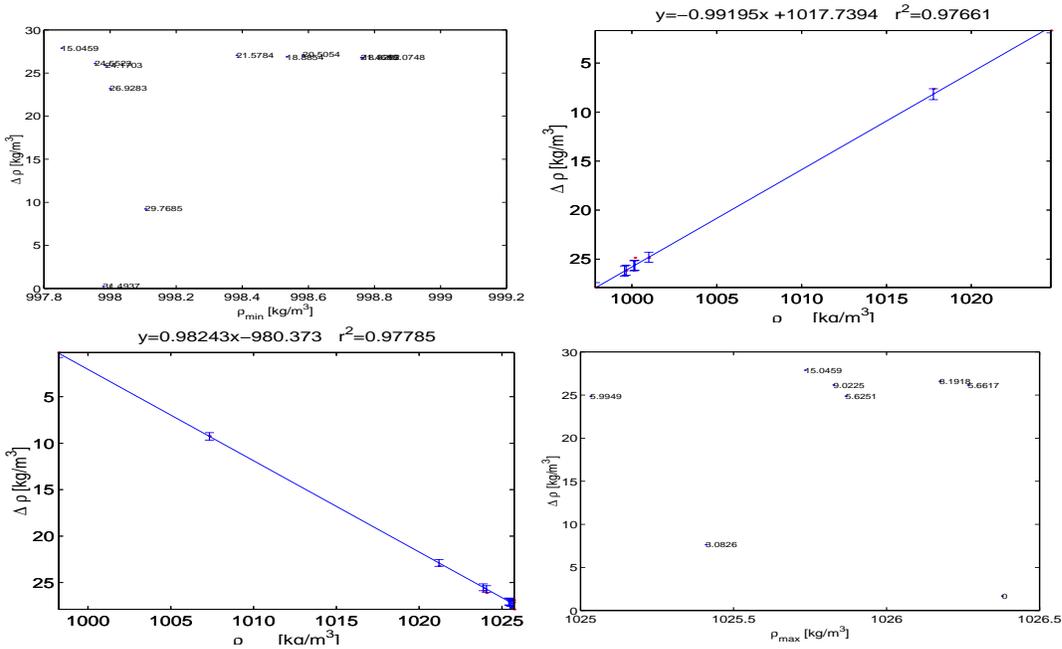


Figura 4.29: Relación de la diferencia de densidades respecto de las densidades mínimas (arriba) y de las densidades máximas (abajo).

4.4.1 Variabilidad morfológica del estuario.

La morfología del cauce del río, tanto en lo ancho como en la profundidad presenta grandes variaciones a lo largo de todo el estuario. La figura 4.31 muestra la variación del ancho del río a lo largo de todo el delta. En este caso desde la desembocadura del río en el mar hasta el embalse de Mezquinenza, de acuerdo a las secciones medidas.

Batimetría del estuario.

Así también la batimetría del lecho del estuario, presenta grandes variaciones e incluso diferentes resultados dependiendo de la manera de evaluarla. La figura 4.32, presenta una batimetría medida por medio de una ecosonda colocada en una barca que navegó a lo largo de todo el río en el estuario.

Otra manera de establecer una batimetría de referencia, es partiendo de las secciones medidas a lo largo de todo el delta del Ebro, para ello se calcula la batimetría de las profundidades máximas de las secciones (figura 4.33) y la batimetría resultante de la media de las profundidades de cada sección (figura 4.34).

Secciones locales.

Las diferentes secciones locales medidas para las estaciones fijas a lo largo de las diferentes campañas que se analizan denominadas $R1$, $R2$, $R3$, $R4$, $R5$ y $R6$ se

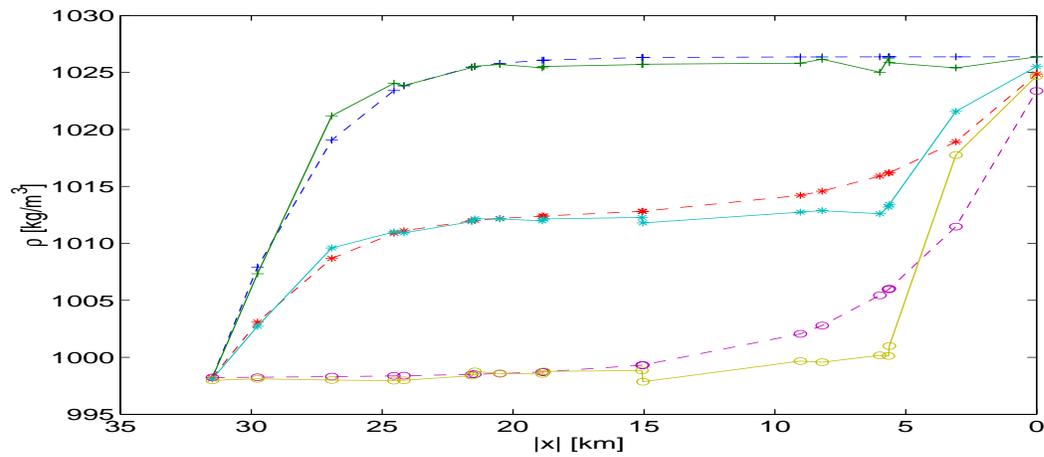


Figura 4.30: Densidades típicas calculadas (- -) para los valores de la columna de agua mínimos (o), máximos (+) y promedio (*) a partir de los valores de densidad observados (—).

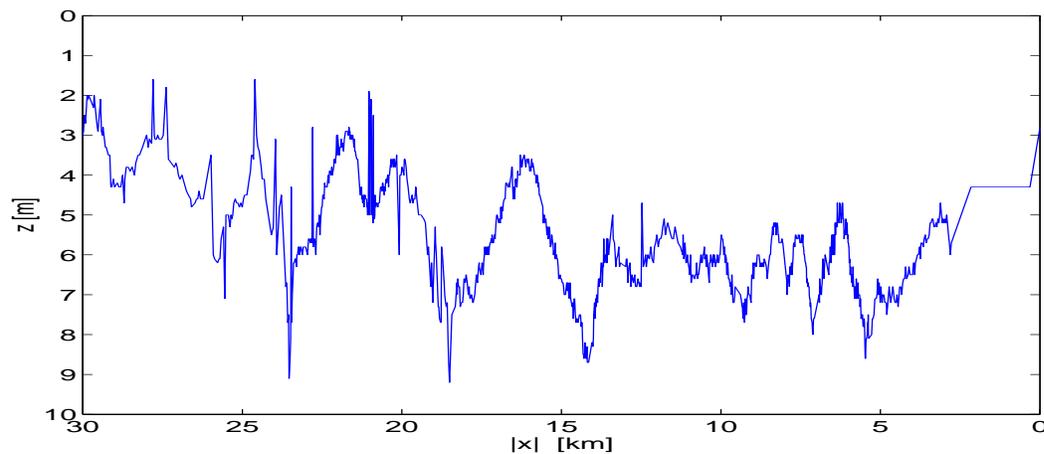


Figura 4.32: Batimetría medida mediante la navegación sobre el río.

presentan en la figura 4.35, donde se muestra la gran variabilidad morfológica existente entre ellas.

La variabilidad de la anchura de las secciones también es evidente en la zona de estudio, la figura 4.36 muestra como existe una tendencia desde la estación $R6$ hacia la estación $R1$ de incrementar el ancho de las secciones.

4.4.2 Estandarización de las medidas.

Otra manera de representar la batimetría, así como todas las medidas en las que intervengan los caudales y las áreas de las secciones, es por medio de una estandarización de acuerdo un ancho de canal fijo; en este caso se establece un

Tabla 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 usando (4.12) para el estuario del delta del Ebro en condiciones de fuerte estratificación (verano).

ρ_{\min}	Distancia[km]	ρ_{\min}	Distancia[km]
998.5	9.9271	1008.0	26.9559
999.0	14.8106	1009.0	27.4233
999.5	17.1891	1010.0	27.8493
1000.0	18.7733	1011.0	28.2404
1000.5	19.9626	1012.0	28.6021
1001.0	20.9151	1013.0	28.9385
1001.5	21.7095	1014.0	29.2528
1002.0	22.3910	1015.0	29.5478
1002.5	22.9876	1016.0	29.8257
1003.0	23.5183	1017.0	30.0883
1003.5	23.9960	1019.0	30.5742
1004.0	24.4305	1021.0	31.0153
1004.5	24.8289	1023.0	31.4193
1005.0	25.1968	1025.0	31.7919
1005.5	25.5385	1027.0	32.1377
1006.0	25.8574	1029.0	32.4602
1007.0	26.4380	1030.0	32.6137

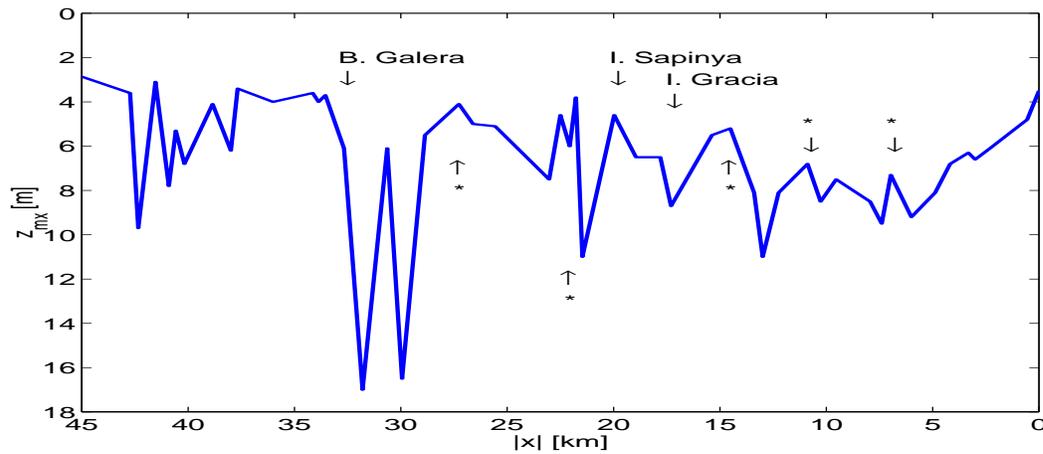


Figura 4.33: Batimetría máxima calculada a partir de las secciones locales medidas en el lecho del río.

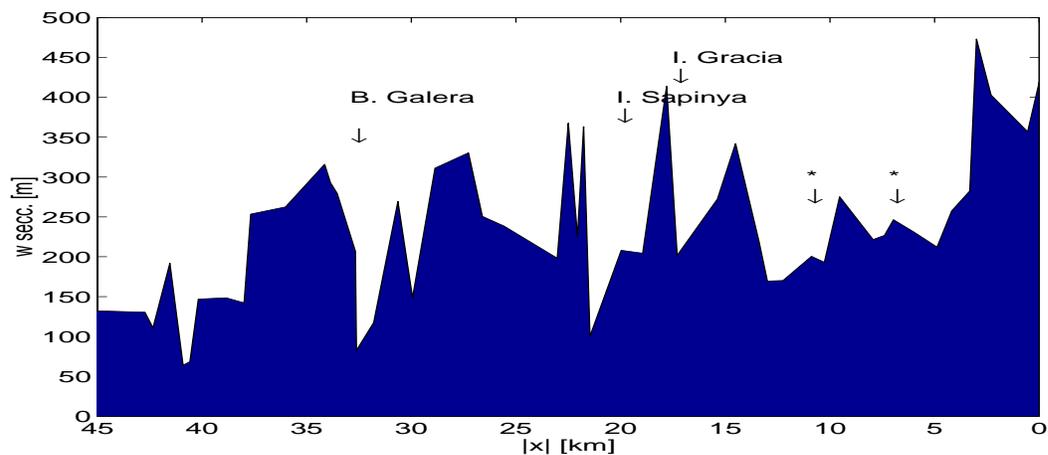


Figura 4.31: Anchura del río a partir de las secciones medidas.

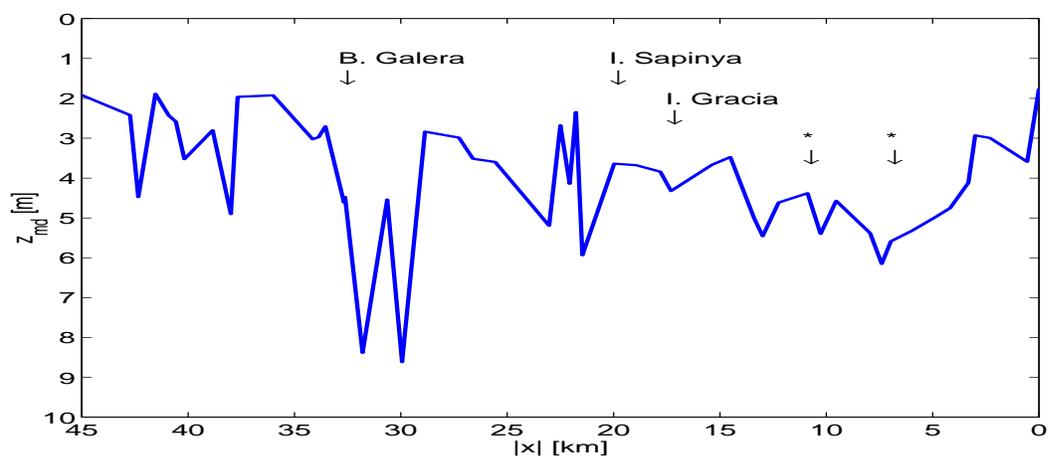


Figura 4.34: Batimetría promedio calculada a partir de las secciones locales medidas en el lecho del río.

ancho de 100 metros de medida estandar ante la facilidad de dividir por 100 el área de una sección y establecer así la profundidad estandar de esta. Esta medida nos da una relación general de la profundidad y el área de las secciones de tal manera que evidencia la presencia de cambios en la batimetría que puedan hacer las funciones de una gran barrera en el avance y la posición de la cuña salina. La figura 4.37 presenta la batimetría para un ancho de río estandar.

4.4.3 Cálculo de los caudales locales en las secciones de las estaciones fijas de R1 a R6.

Una vez determinados los límites superior e inferior de la interface en cada sección del estuario, podemos dividir la columna de agua en tres diferentes capas. Así la capa superior estará delimitada por la superficie y el límite superior, la capa

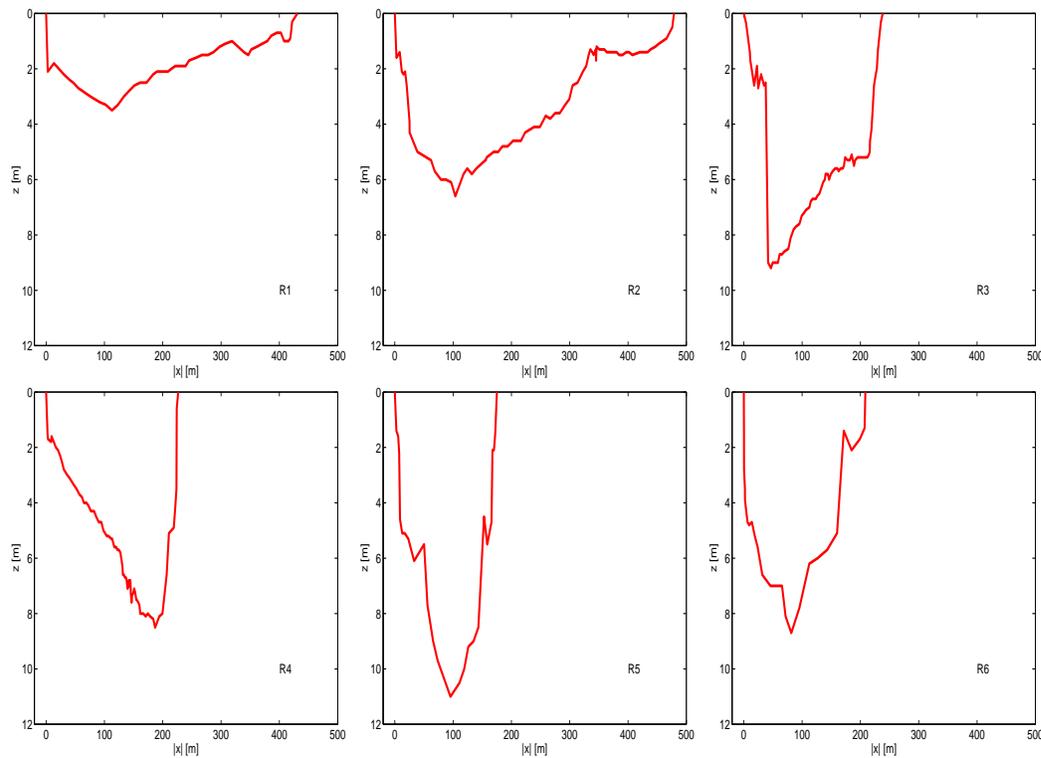


Figura 4.35: Secciones de las estaciones fijas correspondientes a R1 hasta R6.

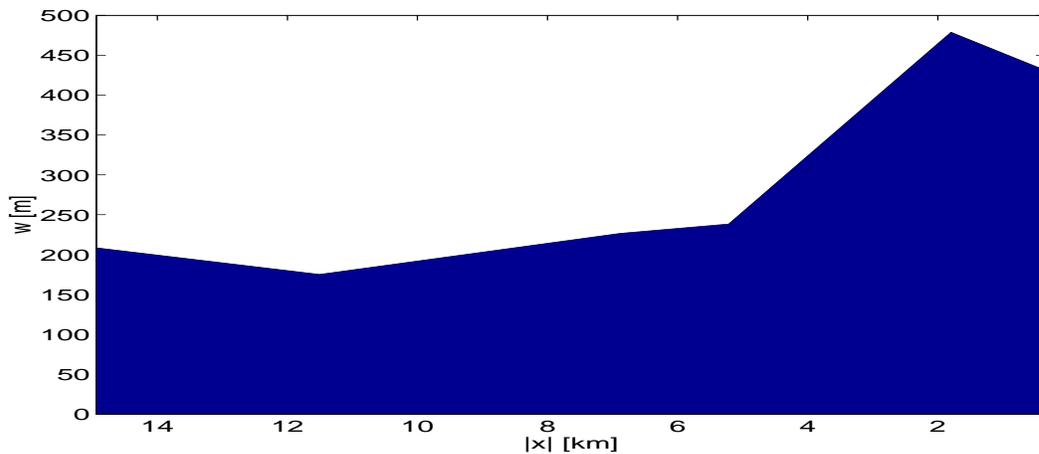


Figura 4.36: Variación de la anchura del río en las estaciones fijas.

de mezcla estará comprendida entre el límite superior e inferior mientras que la capa inferior irá desde el límite inferior hasta el fondo de la sección.

El área de las diferentes capas estará determinada entonces por la posición de los límites de cada una de ellas respecto a las secciones de cada estación fija representados en la figura 4.35 calculados de la forma:

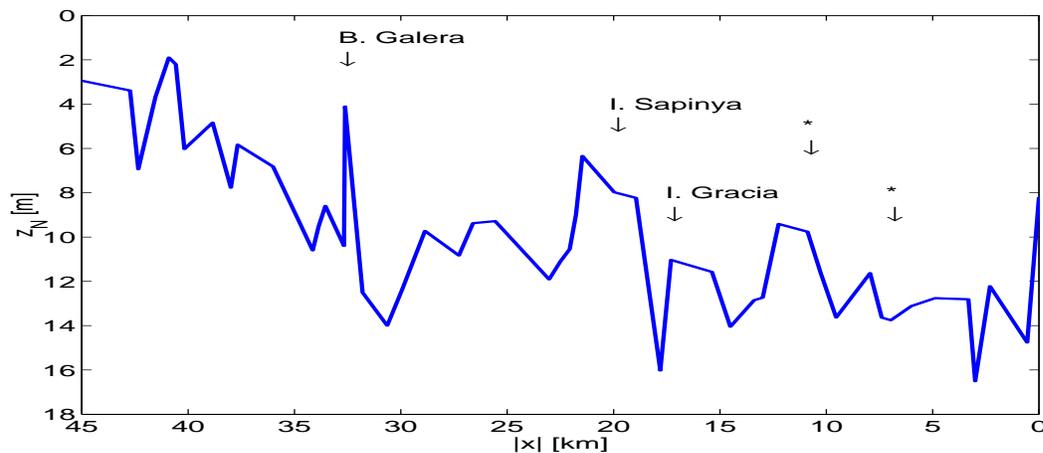


Figura 4.37: Batimetría estandar calculada a partir del área calculada de las secciones locales medidas en el lecho del río.

$$A = \int_{mi}^{md} d_i d_l(d_i) \quad (4.13)$$

Donde: A es el área de la capa en la sección, mi y md son los márgenes izquierdo y derecho respectivamente, d_i la distancia con la que se integra en nuestro caso 10 cm y d_l la distancia de los límites de la capa tomando en cuenta la batimetría de la sección. A partir de las secciones y las velocidades locales medidas para cada estación, el caudal local corresponde con:

$$Q_c = A \bar{u}_c \quad (4.14)$$

Donde Q_c es el caudal local medido para capa de la sección y \bar{u}_c es el promedio de la velocidad medida en cada una de las capas, c en este caso toma los valores de s, m, i para denotar las capas superior, de mezcla y inferior respectivamente.

4.4.4 Estadística básica de los caudales en las campañas de muestreo.

Una vez establecidos los límites de las capas superior, de mezcla e inferior; y calculadas las velocidades locales para cada capa en la columna de agua, se han calculado los caudales locales de cada capa para las diferentes estaciones fijas de muestreo a partir de las secciones de estos mostrados en §4.4.1.

Los caudales totales de cada estación en las diferentes campañas de muestreo en el estuario del delta del Ebro, se reportan en la tabla 4.3.

La tabla 4.4 muestra las variaciones de los caudales promedio del río en la capa superficial (\bar{q}_s), capa de mezcla (\bar{q}_m), capa inferior (\bar{q}_i) y sus desviaciones estandar (σ); en el estuario del delta del Ebro para las diferentes estaciones fijas de muestreo. Los promedios de cada estación están calculados para todas las campañas que se disponían.

Tabla 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.

	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Campañas						
	Capa superior					
P1	39.7	94.3	466.1	51.2	148.5	229.4
P2.08	221.5	84.0	137.9	190.2	92.9	115.8
P2.12	66.6	110.1	225.7	95.3	110.2	205.5
P3	283.3	374.1	580.9	186.8	226.2	357.0
P4.05	666.8	1091.1	522.6	862.5	187.5	666.8
P4.03	1467.4	1725.2	919.1	513.7	394.8	453.9
	Capa de mezcla					
P1	23.9	82.8	132.5	14.1	60.3	28.2
P2.08	16.6	301.9	34.6	41.3	115.3	19.5
P2.12	143.4	165.2	136.0	43.4	53.9	60.7
P3	198.2	219.7	121.7	54.0	46.5	17.2
P4.05	127.0	305.5	177.9	37.8	0.7	0.0
P4.03	0.0	0.0	6.6	0.0	0.0	0.0
	Capa inferior					
P1	34.8	13.6	9.5	0.3	2.4	0.0
P2.08	250.0	150.7	546.6	104.4	84.2	238.2
P2.12	267.4	300.6	291.05	89.7	50.1	124.5
P3	144.2	7.3	0.0	3.9	0.0	0.0
P4.05	2.1	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0
P4.03	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

La tabla anterior muestra que los caudales mayores calculados fueron siempre mayores para la capa superficial, mientras que las desviaciones estandar respecto al promedio mayores se presentan en la capa inferior.

Por otra parte la tabla 4.5 que muestra las variaciones de los caudales promedio del río en la capa superficial (\overline{qs}), capa de mezcla (\overline{qm}), capa inferior (\overline{qi}) y sus desviaciones estandar (σ); en el estuario del delta del ebro durante las campañas, esta tabla muestra un comportamiento en los caudales calculados similar al mostrado por los promedios de las estaciones en los caudales calculados para la capa superior, y en general valores bajos de caudal para la capa inferior exceptuando P2 para los día 8 y 12 mientras que las mayores desviaciones estandar respecto al promedio se presentan en la capa inferior.

Tabla 4.4: Promedio y desviación 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.

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	prom.
\overline{qs}	457.553	579.798	475.386	316.631	193.357	338.065	393.465
$\sigma(qs)$	543.538	680.864	278.059	312.767	110.199	200.310	137.516
\overline{qm}	84.907	179.230	101.602	31.812	46.131	20.971	77.442
$\sigma(qm)$	82.015	121.878	66.166	20.407	42.995	22.499	58.739
\overline{qi}	116.452	78.730	141.340	33.085	22.806	60.461	75.479
$\sigma(qi)$	122.254	123.419	229.704	49.813	36.046	100.326	46.527

Tabla 4.5: Promedio y desviación 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.

	P1	P2.08	P2.12	P3	P4.05	P4.03	prom.
\overline{qs}	171.551	140.392	135.540	334.727	666.222	912.356	393.465
$\sigma(qs)$	160.306	54.968	64.308	140.674	306.233	566.715	324.626
\overline{qm}	57.017	88.258	100.492	109.597	108.190	1.101	77.442
$\sigma(qs)$	45.020	110.748	53.492	84.546	120.317	2.696	42.125
\overline{qi}	10.145	229.073	187.261	25.917	0.478	0.0	75.479
$\sigma(qi)$	13.257	169.733	111.646	58.022	0.865	0.0	104.051

4.4.5 Posición de la interface respecto de los caudales locales de las capas.

Dado que la posición de la interface en la columna de agua (y el gradiente de densidad en ella) nos brinda una buena idea de la estabilidad de la estratificación en la columna de agua y en busca de una relación que explique el desarrollo de la mezcla en la columna de agua a lo largo del estuario del delta del Ebro, se han analizado las relaciones entre los caudales de las diferentes capas respecto a la posición de la interface en las estaciones *R1* a *R6*.

4.4.6 Variación de los caudales históricos del río Ebro.

Se realiza el análisis de dos grupos de datos de caudales históricos reportados la Confederación Hidrográfica del Ebro, para el embalse de Mezquinenza (CHEBRO, 2000), el primero para los datos comprendidos en el período de 1912 a 1986 y el

segundo con los datos más recientes de los que se tiene disponibilidad. La figura 4.38 muestra la representación histórica de los caudales medios diarios.

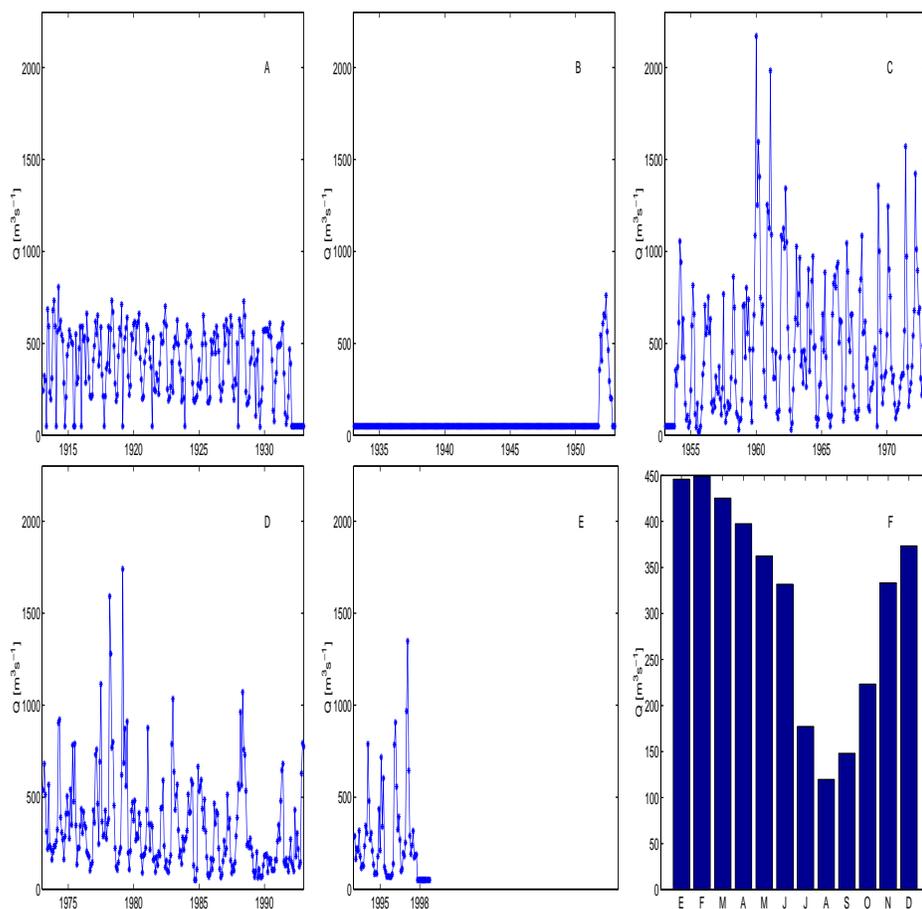


Figura 4.38: Caudales históricos para el período comprendido de 1912 a 1986 (x) y promedios mensuales para el mismo período (barras).

En general puede observarse que en el promedio anual de este período se presenta una el un alto caudal del río en los meses de principios de año en primavera, luego este desciende hasta el mínimos en meses de verano y vuelve a incrementarse durante el otoño e invierno. Estos cambio son sobre todo debidos a la periodicidad de la epoca de lluvias en la cuenca del río Ebro. La tabla 4.6, presenta los caudales promediados cada cinco años durante los últimos 35 años, donde se puede observar una disminución general en los caudales promedio mensuales medidos en la estación de Mezquinenza.

Caudales horarios previos a los días de las campañas de muestreo.

El segundo grupo de datos de caudales analizados, son el grupo de datos de caudales que se refieren a los caudales horarios reportados por CHEBRO (2000)

Tabla 4.6: Caudales promedio [$m^3 s^{-1}$] para los últimos 35 años del período de 1912 a 1998.

Mes	Años					
	69-73	74-78	79-83	84-88	89-93	94-98
oct	304.172	282.085	215.421	169.240	236.899	142.084
nov	331.780	357.162	376.932	349.407	304.315	232.828
dic	441.752	359.765	449.518	336.641	342.765	334.006
ene	649.761	390.512	611.221	360.451	229.611	738.042
feb	745.608	727.272	647.112	610.203	168.965	484.036
mzo	532.571	669.839	460.175	421.329	192.478	354.096
abr	700.188	610.890	461.812	525.501	309.578	198.316
may	749.695	512.556	350.992	480.349	303.547	197.357
jun	624.442	571.401	350.999	385.321	171.597	167.666
jul	281.333	276.636	170.589	214.684	135.714	94.226
ago	173.804	161.648	104.289	107.379	119.124	100.393
aep	254.345	208.310	198.734	118.891	114.026	116.786

durante los días previos y el día propio de la campaña que se analizan en este trabajo.

En la figura 4.39 podemos observar nuevamente la estacionalidad de los valores de los caudales de la siguiente manera: caudales moderados en primavera, bajos en verano continuando con bajos y moderados en otoño para presentar caudales altos en invierno. La tabla 4.7 representa los caudales medios, desviación estandar y caudales máximo y mínimo de los días previos a cada campaña de *Pionner* 1 a 4.

Tabla 4.7: Valores promedio, desviación estandar, máximo y mínimo de los caudales [$m^3 s^{-1}$] reportados por la Confederación Hidrográfica del Ebro para el embalse de Mequinenza durante los días previos de las campañas de muestreo.

Caudal	P1	P2	P3	P4
\bar{Q}	220.4608	127.9068	156.7910	260.5300
σ_Q	82.9194	31.7851	74.1120	103.2822
Q_{max}	387.0000	230.9000	330.3000	417.4500
Q_{min}	103.0000	93.4000	93.4000	105.4000

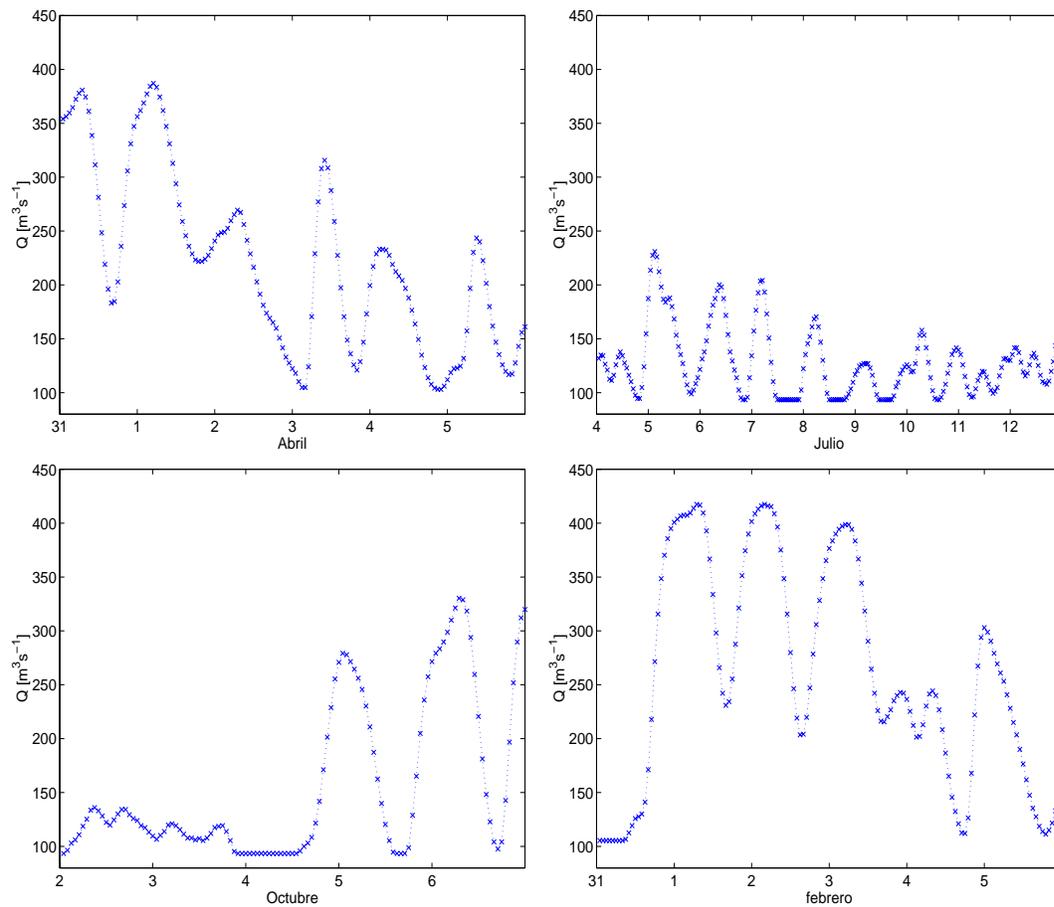


Figura 4.39: Caudales horarios para los días previos a las campañas de primavera, verano, otoño e invierno, reportados para la presa de Mequinenza por la Confederación Hidrográfica del Ebro.

Regresión lineal de la posición de la interface respecto al caudal local del río.

Las figuras 4.40, 4.41 y 4.42 dan clara cuenta de que la posición de la profundidad de la interface en la columna de agua tiene una mejor relación respecto de los caudales de la capa superior, capa que es básicamente el caudal local del río. Un análisis de correlación entre los caudales de las capas y la profundidad de la interface (tabla 4.8), muestra una mejor correlación de los caudales de la capa superficial con la posición de la interface que las resultantes de las capas de mezcla y la capa inferior con la posición de la interface en la columna de agua de las estaciones fijas $R1$ a $R6$. Sin embargo los resultados de un análisis de autocorrelación entre los caudales de las diferentes capas reportados en la tabla 4.9 muestra una independencia entre los caudales de las capas superficial, de mezcla e inferior.

Tabla 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.

Q vs. d	r
qs	0.6167
qm	-0.4623
qi	-0.6311

Tabla 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.

Caudal de la capa	qs	qm	qi
qs	.	-0.0761	-0.3802
qm	.	.	0.1437
qi	.	.	.

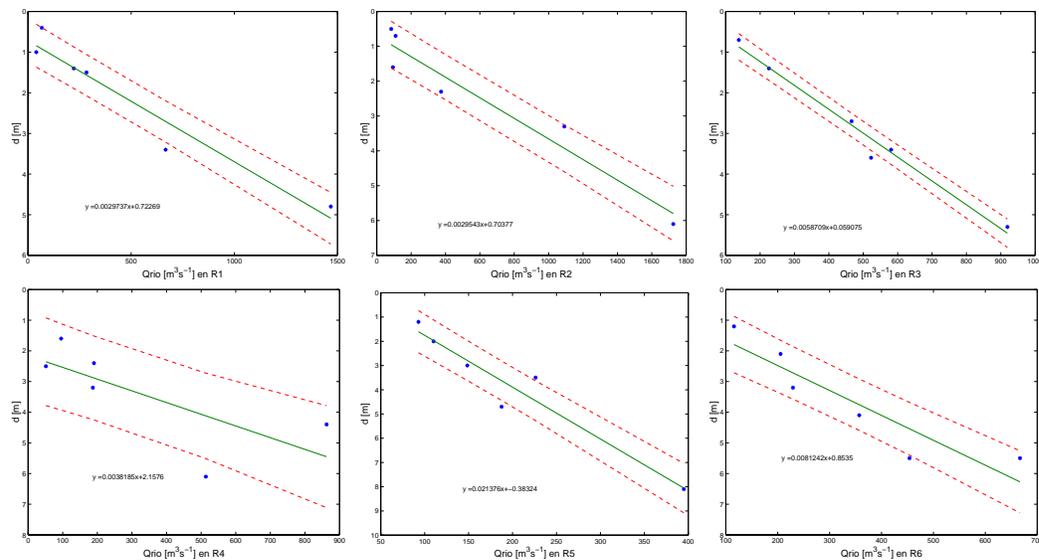


Figura 4.40: Regresiones lineales para la posición de la interface para las estaciones fijas de *R1* a *R6*, de acuerdo a los caudales de la capa superior a lo largo de un año tipo.

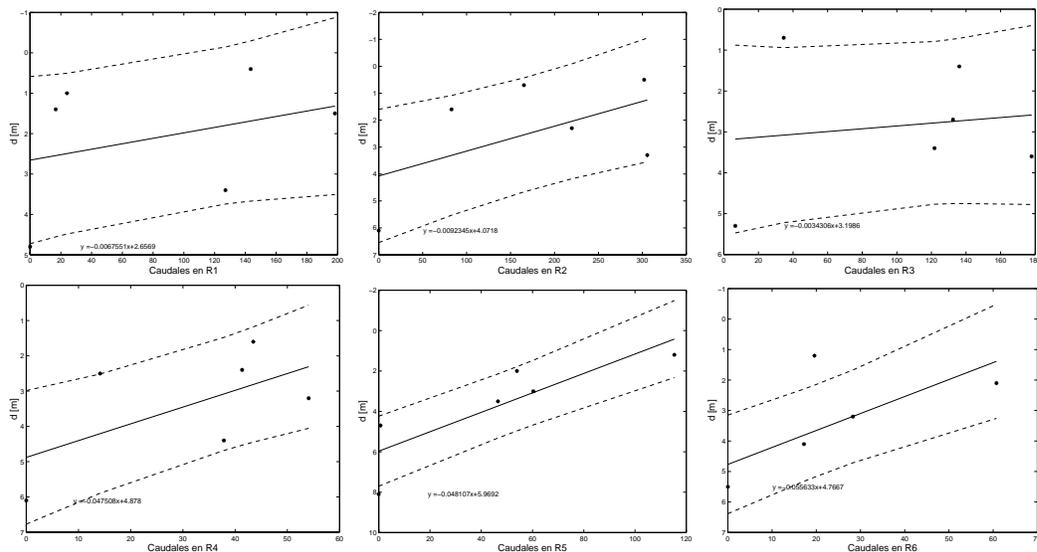


Figura 4.41: Regresiones lineales para la posición de la interface para las estaciones fijas de $R1$ a $R6$, de acuerdo a los caudales de la capa de mezcla a lo largo de un año tipo.

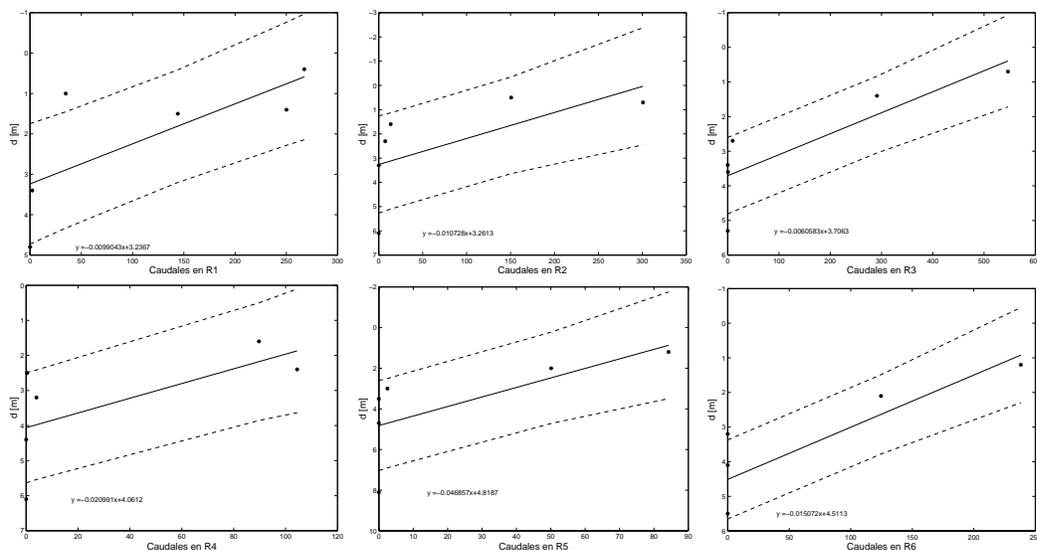


Figura 4.42: Regresiones lineales para la posición de la interface para las estaciones fijas de $R1$ a $R6$, de acuerdo a los caudales de la capa inferior a lo largo de un año tipo.

Regresión \tanh de la posición de la interface respecto al caudal del río.

Otra relación presente en las distribuciones de la posición de la interface de densidad respecto de los caudales es del tipo tangente hiperbólica (\tanh). Esta relación

nos da una buena aproximación para la estación $R1$, decreciendo hacia $R2$ y $R3$, siendo prácticamente inexistente a partir de $R4$; la figura 4.43 muestra estas relaciones. Cabe mencionar que a estos análisis se han hecho para las diferentes capas, pero nuevamente son las distribuciones de los caudales superiores las que muestran una mejor relación con la posición de la interface en la columna de agua.

La función de \tanh para la posición de la interface (d) a lo largo de todas las estaciones fijas respecto de el caudal de la capa superior en el estuario es de la forma:

$$D = z_{max} \tanh(q/q_{max})(q_{max}/q_{maxe}) \quad (4.15)$$

Donde: D es la profundidad de la interface, z_{max} profundidad máxima de la sección, q_{max} caudal máximo observado, q el caudal local y q_{maxe} caudal máximo estable.

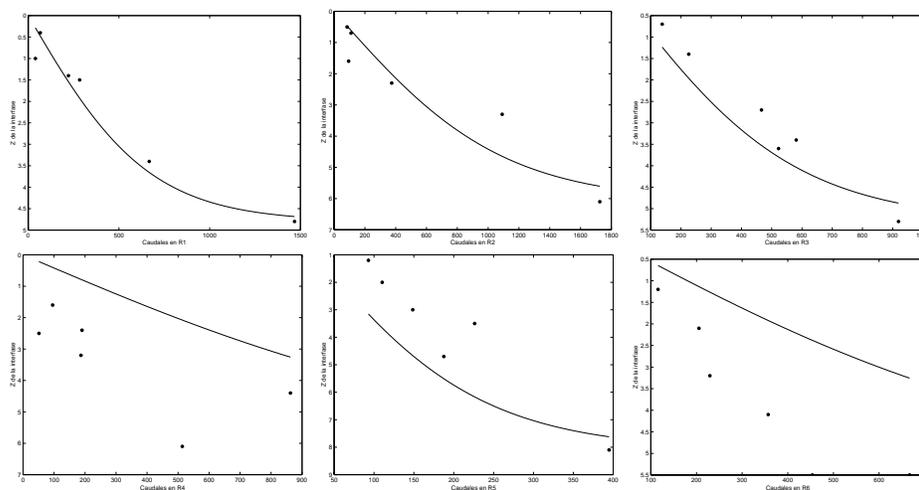


Figura 4.43: Regresiones del tipo tangente hiperbólica para la posición de la interface de las estaciones fijas de $R1$ a $R6$, respecto a los caudales de la capa de superior.

Grosor de la interface respecto al caudal del río.

El grosor de la interface es una variable de la cual dependen los gradientes a través de la capa de mezcla, esta se retroalimenta a la vez tanto de la dinámica de la mezcla como en la eficiencia de la misma. Las regresiones que corresponden al grosor de la capa de mezcla respecto de los caudales locales para las estaciones fijas figura 4.44, resaltan que las relaciones lineales de las estaciones $R3$ y $R4$ son diferentes de las tendencias presentadas por las demás estaciones fijas. Básicamente este comportamiento es debido a el agua atrapada que se detectó para la campaña en la que no se observó cuña salina en el estuario.

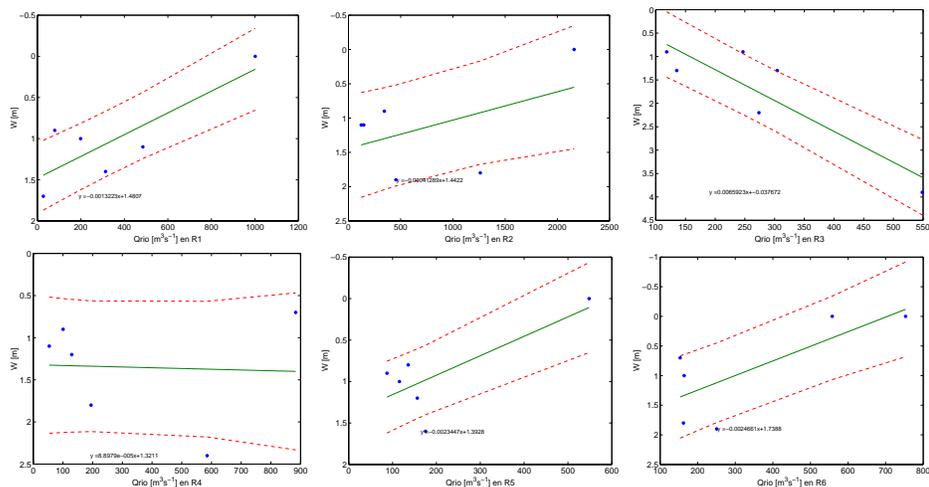


Figura 4.44: Espesor de la capa de mezcla de las estaciones fijas de $R1$ a $R6$, respecto a los caudales de la capa de superior.

4.5 VALORES DE LAS VARIABLES E INDICADORES DE LA MEZCLA EN EL ESTUARIO.

En esta sección se muestran las regresiones de algunas variables respecto de los caudales. Partiendo de estos valores se calcularán los descriptores de la mezcla para la porción del estuario en estudio comprendido entre las estaciones fijas $R1$ a $R6$ presentadas en esta sección, los cálculos se han hecho con incrementos de caudal de $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ hasta $2000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; sin embargo gráficamente se representan incrementos de $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

4.5.1 Valores de las variables en las estaciones fijas.

Para el cálculo de los descriptores de la mezcla en el estuario es necesario a su vez el cálculo de las diferentes variables de los cuales depende estos descriptores, aquí se presenta estos resultados.

Posición de la interface en la columna de agua.

La posición de la profundidad de la interface es una variable que depende del caudal local y de la distancia a la desembocadura, las posiciones del inicio de la interface para cada estación se presenta en la figura 4.45 para incrementos de caudales cada $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Es posible observar que para la porción de estuario estudiado, con la presencia de caudales de $300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y menores podemos encontrar una cuña salina estable en toda el área, mientras que para caudales del orden de 400 y $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ se puede observar el inicio de la cabeza de la cuña salina dentro del área, con caudales mayores la cuña salina tiene una penetración cada vez de menor longitud, así para

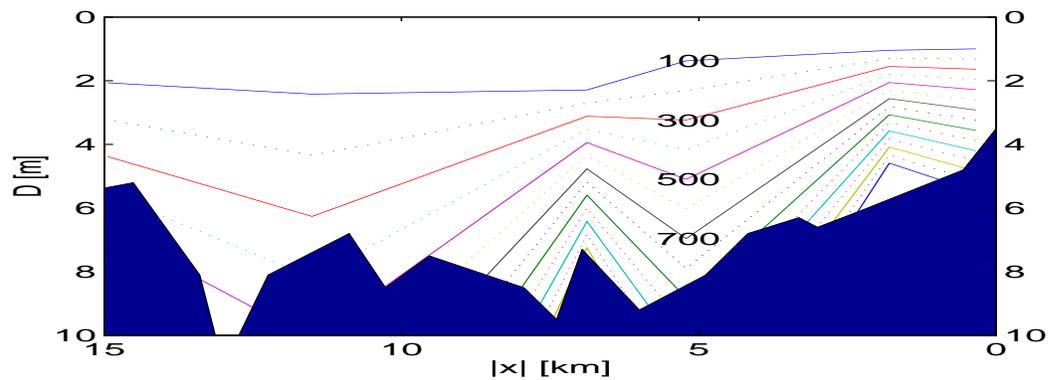


Figura 4.45: Profundidad de la interfaz (D) de acuerdo a las regresiones de los caudales en las secciones de las estaciones fijas.

caudales del orden de $1,000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ solo se encontró presencia de la cuña salina en las estaciones $R3$ y $R4$, probablemente debido a que la batimetría permite este efecto.

Sin embargo para la estación $R3$ con un caudal de $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ el final de la interfaz se encuentra en el fondo del estuario (figura 4.46). Esto es el resultado de la presencia de agua salada en el fondo de la interfaz, cuando la cuña salina no se encontró en las estaciones cercanas a la desembocadura.

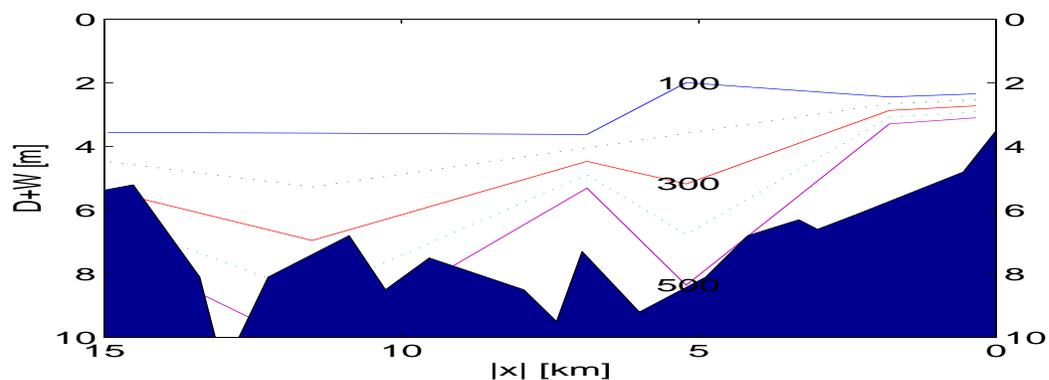


Figura 4.46: Profundidad del final de la interfaz ($D+W$) de acuerdo a los caudales locales de las secciones de las estaciones fijas.

El grosor de la capa de mezcla para los diferentes caudales, nos muestra para todas las estaciones que mientras el caudal aumenta, el grosor de la capa disminuye, excepto para la estación $R3$, donde esta relación se invierte. La figura 4.47 muestra esta relación.

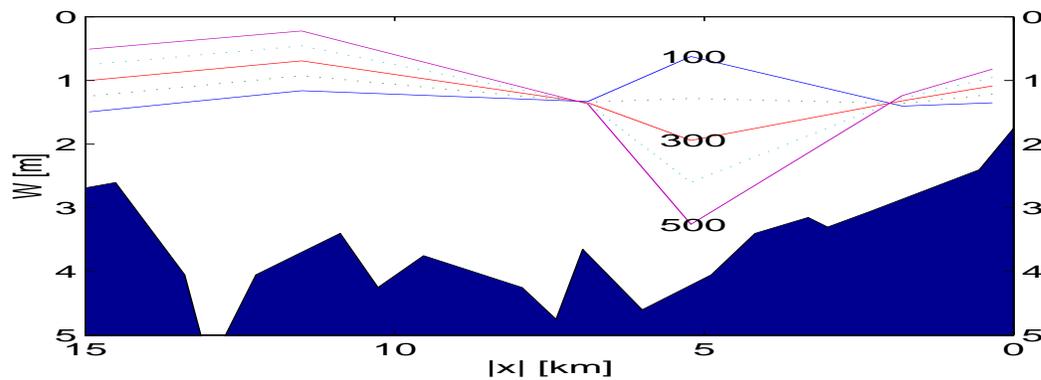


Figura 4.47: Grosor de la interface (W) de acuerdo a los caudales locales de las secciones de las estaciones fijas.

Gradiente de densidad.

El gradiente de densidad en la capa de mezcla es sumamente importante ya que es el resultado combinado de la mezcla entre las capas de agua dulce y salina, del cual depende en gran medida el empuje entre las dos capas y controla conjuntamente con el gradiente de las velocidades características los valores que determinan la mezcla. La figura 4.48 muestra las variaciones de el gradiente de la densidad en la capa de mezcla calculado para los caudales en las estaciones fijas de la porción del estuario en estudio. Se observa claramente un cambio en el gradiente de densidades fuerte para la estación $R3$ el cual puede ser debido a que esta sea un área límite de la influencia de las algunas mareas, ya que este fenómeno puede ser debido a fuerte mezcla en la interface.

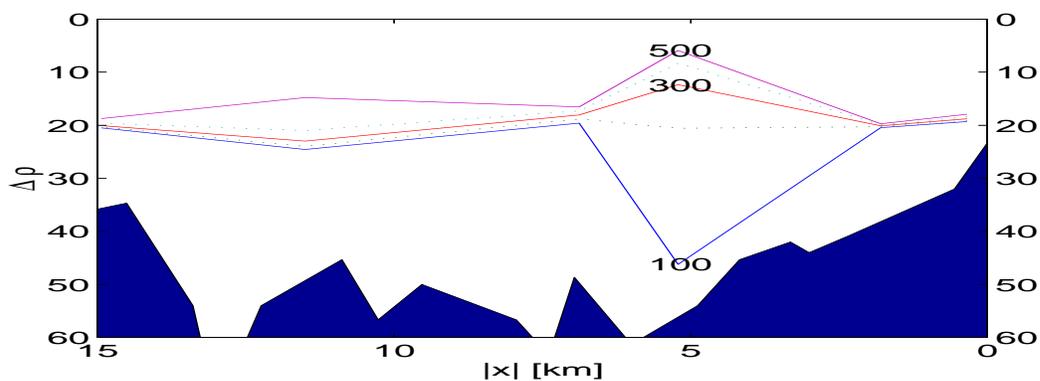


Figura 4.48: Gradiente de densidades en la interface de acuerdo a los caudales locales de las secciones de las estaciones fijas.

Área y velocidades de la capa superior.

El cálculo de los caudales locales requiere conocer con precisión el área de la capa superficial, esta se calcula a partir de la posición de la interface e integrando el área de acuerdo a las secciones locales. La figura 4.49 presenta tanto las áreas como las velocidades teóricas del estuario de acuerdo a los caudales locales.

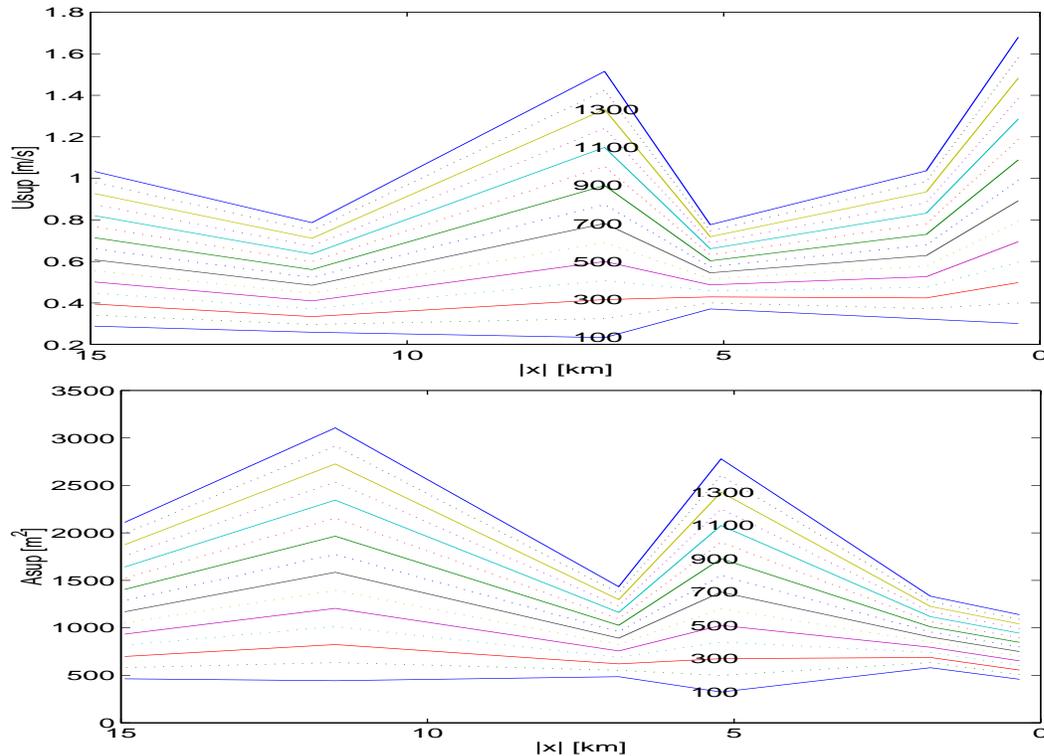


Figura 4.49: Velocidades y Áreas de la capa superior calculadas para los caudales locales de las secciones fijas de $R1$ a $R6$.

Las velocidades medidas en la capa superior corresponden en forma a la misma distribución que la presentada por el ancho de las secciones en la figura 4.36 de la sección §4.4.1 debido principalmente a que la capa superior en la zona de estudio es un ancho de sección delimitada por las paredes estables y por lo que para un mismo caudal local la velocidad tendrá una relación directa con el ancho de la sección. Solo en la estación $R4$ donde la batimetría cobra importancia al hallarse un bajo justo en esta estación, las velocidades tienen un incremento respecto a lo esperado por el ancho de las secciones.

Por su parte el área en cada estación fija a lo largo del estuario tiene un comportamiento inverso al de las velocidades, para la misma estación, esto no es nada sorprendente debido a que el hecho mismo de las paredes fijas mencionado arriba es válido también para el área, la batimetría cobra un rol importante de igual manera en la estación $R4$.

Tiempo de residencia.

El tiempo que tarda una porción de la capa superior en viajar la distancia ($dist$) que separa una sección de la siguiente en sentido del flujo, donde la velocidad característica de cada una de las capas superiores \bar{u} y \bar{u}' será:

$$\Delta t = \frac{\bar{u} + \bar{u}'}{2dist} \quad (4.16)$$

La figura 4.50 muestra los tiempos promedio que se mantiene una porción de agua de la capa superior entre la zona del estuario comprendida entre una sección y su inmediata siguiente en el sentido del flujo de la capa superior.

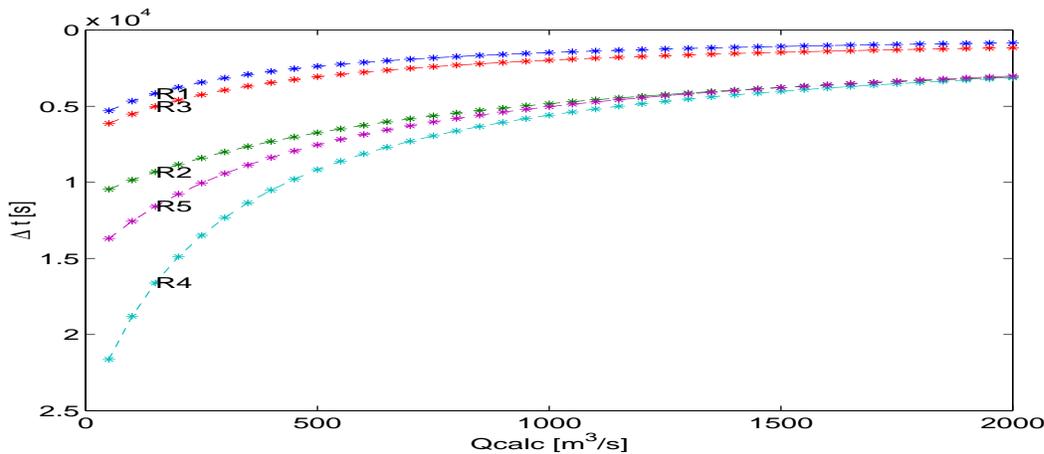


Figura 4.50: Tiempo estimado para la medida del entrañamiento desde una sección desde su inmediata superior en el estuario.

Las relaciones de los tiempos de residencia entre las secciones del área de estudio respecto del caudal, son una función directa de la distancia que les separa y del área de ellas mismas.

4.5.2 Descriptores de la mezcla en el estuario.

Los descriptores correspondientes a la mezcla producida en el estuario respecto de los caudales son los valores de entrañamiento, dispersión vertical en la columna de agua, los números de Richardson de gradiente, de flujo y global.

Entrañamiento.

Los valores de entrañamiento local en las secciones de estudio reportados en la figura 4.51 muestran valores muy estables para la sección cercana a la desembocadura, valores intermedios para las secciones $R2$, $R4$ y $R5$ esta última solo presenta valores hasta los $600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ claramente porque sobre estos valores la

cuña salina no se encuentra en esta estación; los valores mayores de entrañamiento se han calculado para la estación *R3*, donde la batimetría toma importancia en la posición de la interface.

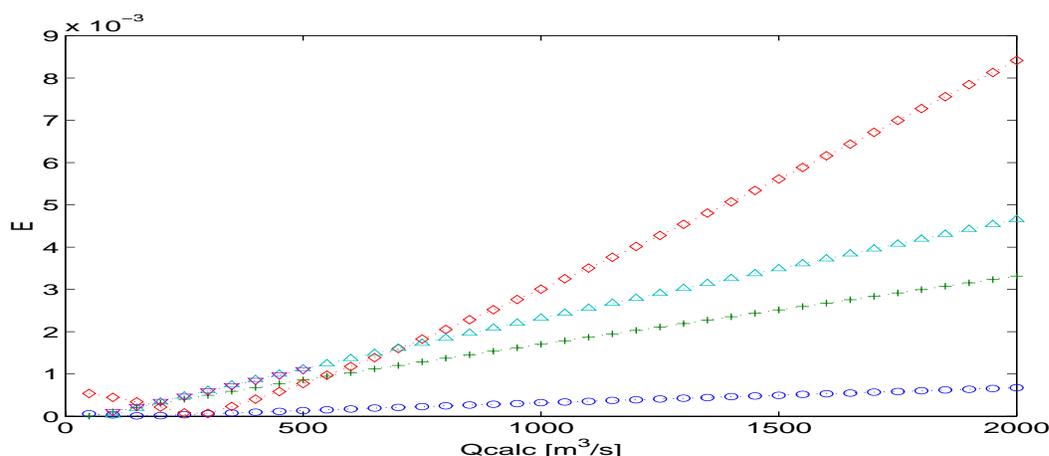


Figura 4.51: Entrañamiento calculado para los caudales en las secciones de las estaciones fijas R1 (o), R2 (+), R3 (◇), R4 (△) y R5 (▽).

Dispersión en la vertical.

La medida de la dispersión vertical (k_z) en la columna de agua representada en la figura 4.52 muestra una tendencia de los valores muy parecida a la del entrañamiento debido sobre todo a que este valor depende directamente de los valores de entrañamiento E (Tennekes y Lumley, 1994) como:

$$k_z = E u_{sup} W \quad (4.17)$$

Donde u_{sup} es la velocidad característica de la capa superior y W la anchura de la interface.

De esta figura puede destacarse la presencia de puntos en los que aparece cambios en la tendencia de las funciones de las dispersiones verticales respecto de los caudales.

Números de Richardson.

Ya se ha establecido que los números de Richardson de gradiente y global representan la estabilidad de la columna de agua y la inducción de la energía procedente de la cizalladura de la capa superior (en este caso) hacia la interface. La figura 4.53 representa el desarrollo de estos dos valores respecto de los caudales locales en las secciones de las estaciones fijas. En general puede notarse que conforme aumenta el caudal local y con ello la velocidad en la capa superior, la capa de mezcla presenta valores menores de los números de Richardson.

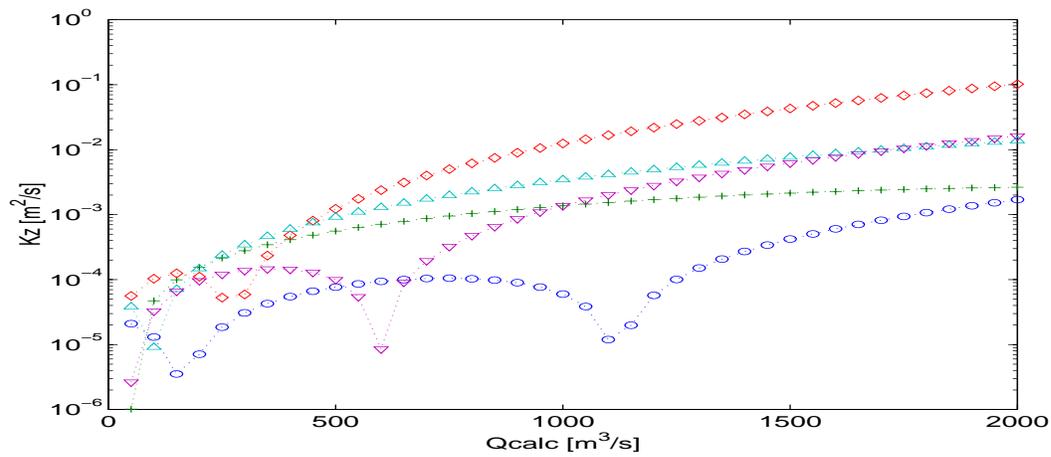


Figura 4.52: Dispersión turbulenta calculado en el eje Z para las secciones de las estaciones fijas R1 (o), R2 (+), R3 (◊), R4 (△) y R5 (▽).

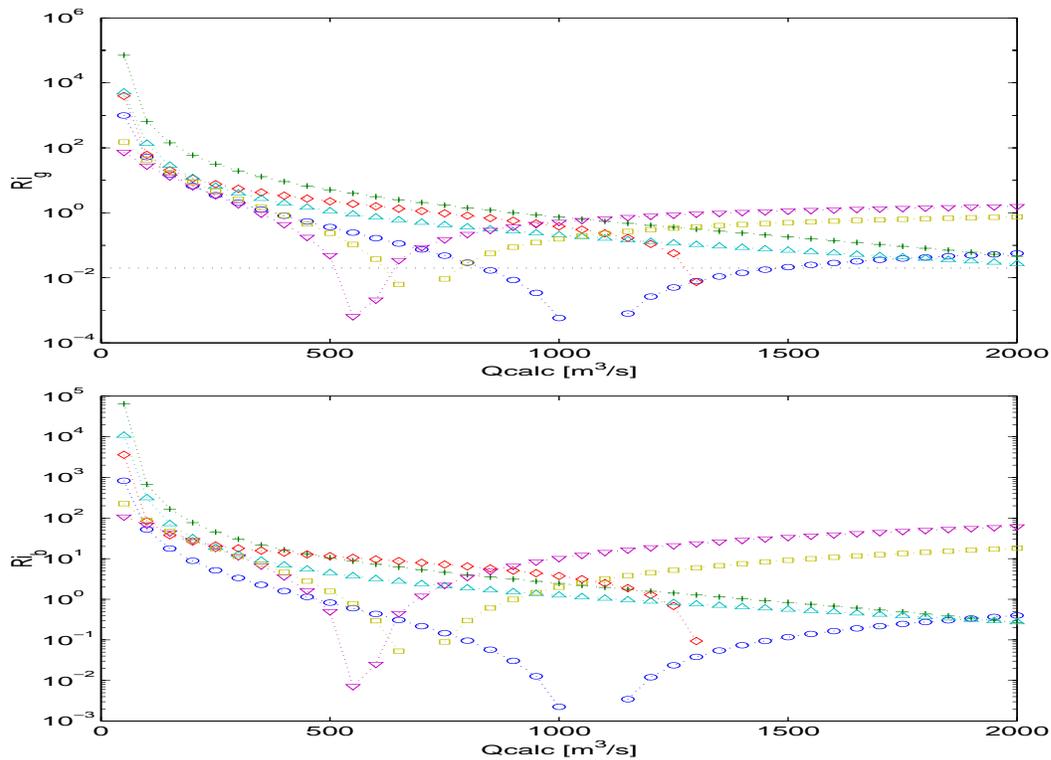


Figura 4.53: Números de Richardson de gradiente (arriba) y global (abajo) calculados para las secciones de las estaciones fijas en el área de estudio. R1 (o), R2 (+), R3 (◊), R4 (△), R5 (▽) y R6 (□)

De los valores de Ri_g y tomando el valor $Ri_{g_{crit}} = 0.02$ podemos establecer los caudales para los cuales la interface puede encontrarse en estado inestable, para

la estación $R6$ son muy cercanos a $600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, cerca de $550 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para la sección $R5$ y muy proximos a 1000 para la estación $R1$, mientras que para las estaciones $R2$, $R3$ y $R4$ solo presentan valores de Ri_g muy bajos debido a que es $R2$ la estación con la sección mas ancha y donde se presentan las menores velocidades, por otra parte en $R3$ y $R4$ se encontró agua salada atrapada cuando la cuña no fue detectada en el resto de las secciones.

Inestabilidades en la capa de mezcla.

La relación entre estos los dos números de Richardson presentada en la figura 4.54, muestra un comportamiento similar a el reportado para situaciones experimentales por Strang y Fernando (2001), en donde se establece una cizalladura unicamente de la capa superior y la capa inferior permanece sin movimiento.

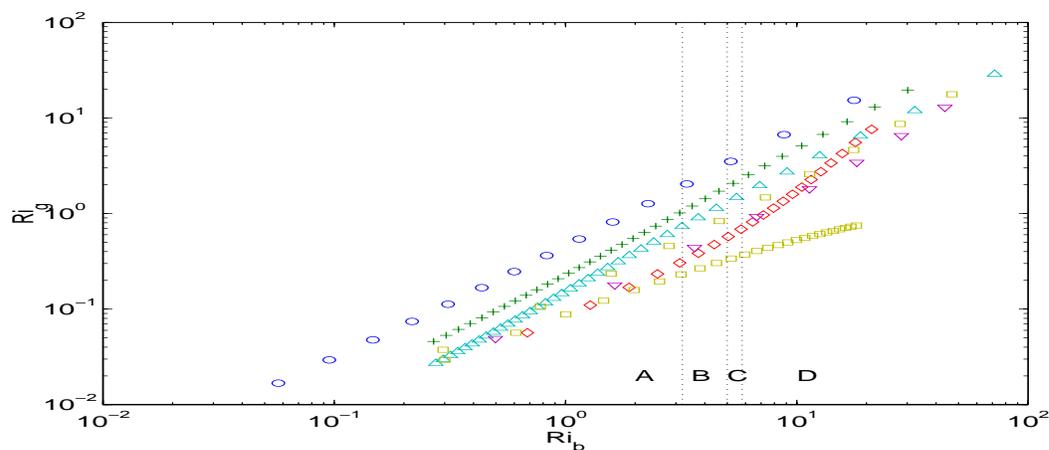


Figura 4.54: Número de Richardson de gradiente frente al Ri_b calculado para las estaciones fijas $R1$ (o), $R2$ (+), $R3$ (◇), $R4$ (△) y $R5$ (▽) en el estuario del delta del Ebro.

Las zonas que se marcan en esta figura con letras mayúsculas corresponden a situaciones donde podrian ser observadas inestabilidades del tipo ondas asimétricas, Kelvin-Helmholtz (K-H) según se describe en §2.6, simétricas y Hölmboe, la figura 4.10 presenta las inestabilidades dominantes esperadas en el estuario de acuerdo al número de Richardson de gradiente y global medidos.

Por lo arriba mencionado pueden establecerse las zonas en la que se se espera la presencia dominante de estas inestabilidades en el estuario, la figura 4.56 resalta las franjas respecto del número de Richardson global.

Eficiencia de mezcla en el estuario.

Descrito el Entrañamiento como la relación entre la difusividad y la viscosidad de los remolinos turbulentos cerca de la interface, la relación de la medida del

Tabla 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).

Ri_b	Inestabilidades dominantes	Zonas
$1.5 < Ri_b < 3.2$	K-H	A
$3.2 < Ri_b < 5.0$	K-H y asimétricas	B
$5.0 < Ri_b < 5.8$	Asimétricas	C
$5.8 > Ri_b$	Hölmboe y simétricas	D

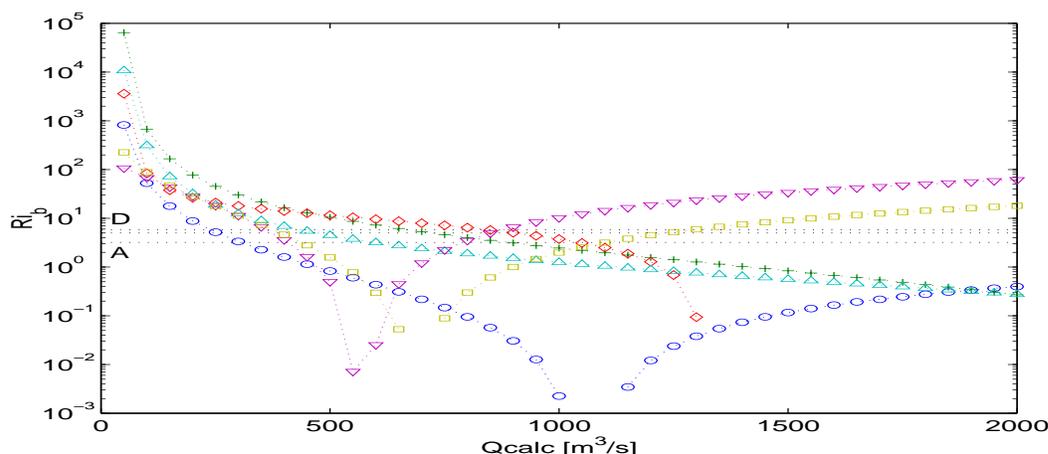


Figura 4.55: Número de Richardson global calculado para las estaciones fijas R1 (o), R2 (+), R3 (\diamond), R4 (\triangle) y R5 (∇) en el estuario del delta del Ebro, donde se espera la presencia de inestabilidades dominantes en la interface de densidades de acuerdo al caudal local.

entrañamiento con el número de Richardson global (figura 4.56) nos evalúa directamente la eficiencia de la mezcla producida por la cizalladura de la capa superior.

El entrañamiento respecto de el Ri_b es consistente con el medido para las secciones de acuerdo a el caudal local, los mayores entrañamientos se presentan en la sección R3, los menores para la estación R1 y valores intermedios para las estaciones R2, R4 y R5.

Los resultados de las medidas del entrañamiento respecto del número de Richardson global, son comparados por las relaciones particulares para las diferentes zonas de mezcla recopiladas y establecidas por Christodoulou (1986). Muestran un rango de valores muy similar con el reportado para experimentos con cizalla superficial como fuente principal de mezcla hechos por varios autores. Los valores de las regresiones características para las zonas con Ri_b pequeños (P), intermedios

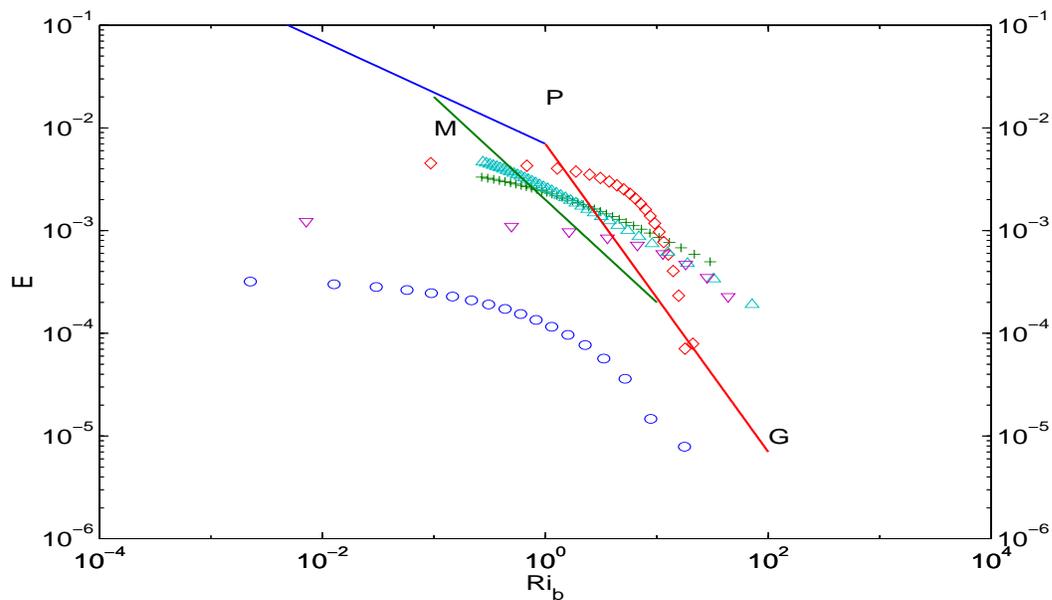


Figura 4.56: Relación del entrañamiento respecto del número de Richardson global para los caudales locales en las secciones de las estaciones fijas R1 (o), R2 (+), R3 (\diamond), R4 (\triangle) y R5 (∇) de la zona de estudio.

(M) y grandes (G) se presentan en la tabla 4.11

Tabla 4.11: Valores de las regresiones de los entrañamientos respecto de Ri_b pequeños (P), intermedios (M) y grandes (G).

Ri_b	Zona	Regresión
$0.5 < Ri_b < 1$	P	$E = 0.007 Ri_b^{-1/2}$
$0.1 < Ri_b < 10$	M	$E = 0.002 Ri_b^{-1}$
$1.0 < Ri_b < 100$	G	$E = 0.007 Ri_b^{-3/2}$

Los valores de la eficiencia de mezcla o número de Richardson de flujo ($\eta = Ri_f$) pueden entonces medirse como $\eta = E Ri_b$.

Dado que el entrañamiento puede también ser escrito en relación del Ri_b y tomando como n el exponente de esta relación, la eficiencia de mezcla puede ser también escrita como:

$$\eta = Ri_b^{1-n} \quad (4.18)$$

Por otra parte las relaciones de la eficiencia de mezcla del estuario respecto de los valores de Ri_b pueden representarse por las regresiones derivadas de la expresión propuesta para estuarios por Dyer (1988) de la forma:

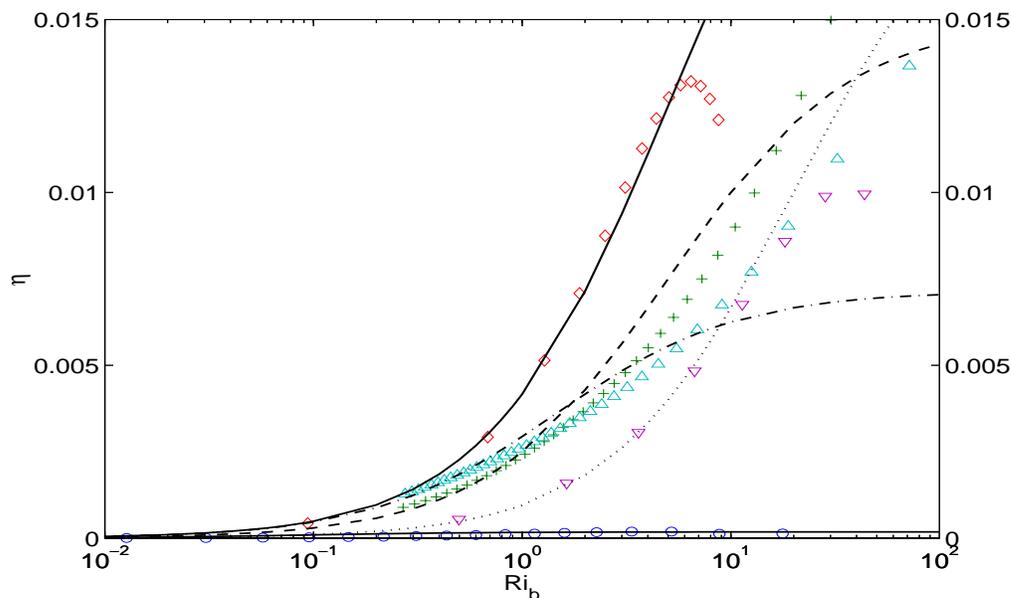


Figura 4.57: Relación de la eficiencia de mezcla (η) respecto del número de Richardson global para los caudales locales en las secciones R1 (o), R2 (+), R3 (\diamond), R4 (\triangle) y R5 (∇) de las estaciones fijas de la zona de estudio.

$$\eta = \frac{\alpha Ri_b}{(1 + \beta Ri_b)^n} \quad (4.19)$$

Las regresiones para cada sección representadas en la figura 4.57 se calculan a partir de los valores para α y β de la tabla 4.12.

Tabla 4.12: Valores de la variables usadas para las regresiones de las eficiencias de mezcla en las secciones de estudio.

Sección	α	β	n
R1	0.002	11	1
R2	0.003	0.2	1
R3	0.005	0.2	1
R4	0.005	0.7	1
R5	0.001	0.05	1

Las figura 4.56 y 4.57 resaltan el hecho de que el entranamiento y la eficiencia de la mezcla amayores a lo largo de las campañas, se evaluo en la estación fija R3, el entranamiento y la eficiencia de mezcla menor se calculo en la estación R1 mientras que las estaciones R2, R4 y R5 muestran valores promedio.

Campo paramétrico Re vs Ri.

En la sección donde se describen las inestabilidades para una área paramétrica §2.5 según las zonas recopiladas por Redondo (1987) la disposición de las características de las estaciones fijas en las campañas de *Pionner* mostradas en la figura 4.58, presentan un amplio espectro dentro del campo paramétrico.

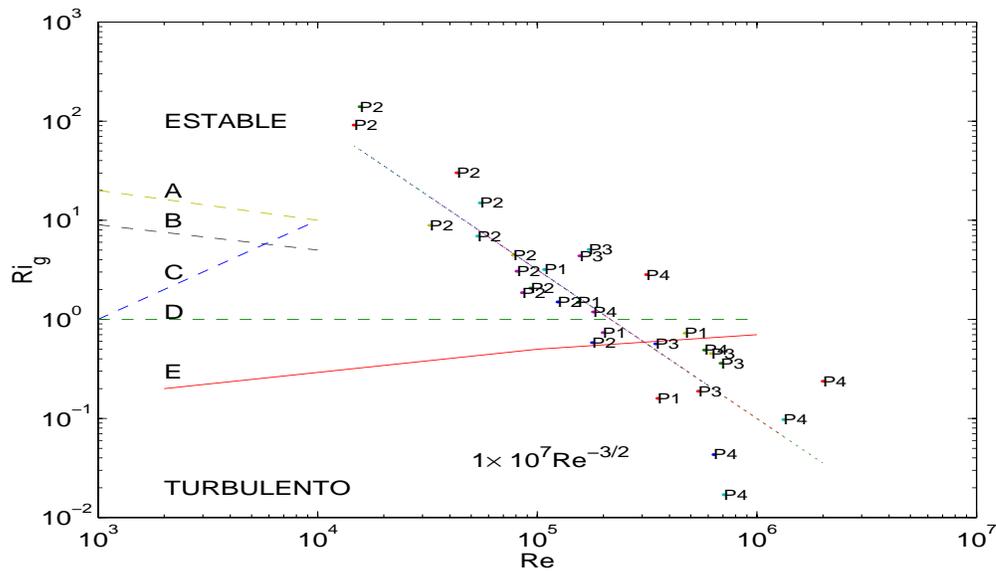


Figura 4.58: Localización de las condiciones paramétricas de las estaciones de muestreo durante las campañas de *Pionner*. Las letras indican los límites empíricos para las inestabilidades dominantes, A zona estable con una interface plana, B ondas internas, C ondas de Hölmböe, D inestabilidades K-H y E región de transición turbulenta.

Este efecto sin duda es logrado por las características de escala real del estuario y el continuo aporte del agua del río, que difícilmente puede ser reproducido en el laboratorio. Cabe resaltar el ordenamiento en el campo paramétrico de las campañas bajo las condiciones hidrodinámicas ambientales medidas. De tal manera que las condiciones de verano donde existen números de Reynolds bajos presentan altos valores para el número de Richardson, mientras que las campañas con los máximos caudales en febrero de 2000 se colocan en la zona de altos números de Reynolds y bajos valores del número de Richardson. Es interesante resaltar la dependencia exponencial empírica cercana a $-3/2$ del valor del número de Richardson respecto a los valores del número de Reynolds.

4.6 TRAZADORES BIOLÓGICOS.

Un ecosistema puede ser comparado a una gran máquina biológica, creo yo, y caso de que dicha analogía se desarrolle lógicamente, la humanidad debe ser vista como parte de tal máquina. -Tuf a la maestra de Puerto Toni Mune (Martin, 1988).

En esta sección se presenta la distribución de dos grupos de organismos característicos de los dos diferentes ambientes y el fitopláncton total presentes en el estuario bajo estudio. Los grupos de organismos son:

1. Picocianobacterias (pcb), organismos típicamente marinos.
2. *Scenedesmus sp.*, organismos típicos dulceacuícolas.
3. Fitopláncton total, todo el fitopláncton observado en las muestras de agua.

A su vez se analizan las abundancias de los organismos en dos escenarios diferentes para las estaciones fijas. A) Durante la ausencia y la recuperación de la cuña salina (3 y 5 de febrero de 1999) y B) Durante la presencia de una cuña salina estable (12 de julio de 1999).

4.6.1 Ausencia y recuperación de la cuña salina.

Se analiza la abundancia de estos organismos para los días 3 y 5 de febrero de 1999, para las estaciones fijas desde *R1* a *R6*. Para estos días, la figura 4.59 muestra que el día 3 de febrero, la cuña salina se encontró ausente de la zona de muestreo y que se evidenció la presencia de atrapamientos de agua salina en las estaciones *R3* y *R4*. Mientras que para el día 5 de febrero, la cuña salina se encontró presente.

4.6.2 *Scenedesmus*.

En este grupo se incluyen algunas de las especies de agua dulce como lo son *Scenedesmus acuminatus* (figura 4.60), *Scen. opaliensis*, *Scen. panonicus* (figura 4.61), *Scen. platidiscus* y *Scen. arcuatus* (figura 4.62),

Las abundancias de *Scenedesmus* en el estuario respecto de la profundidad y la salinidad presente en la figura 4.63, muestra la presencia de estos a diferentes profundidades y salinidades en todo el estuario y lo largo de toda la columna de agua.

Sin embargo la figura 4.64 muestra que estos organismos se encontraron tanto en la capa superficial de agua dulce como en la capa de mezcla (se puede observar la figura de la cuña salina para estos días) y prácticamente ausente en la capa de agua salada.

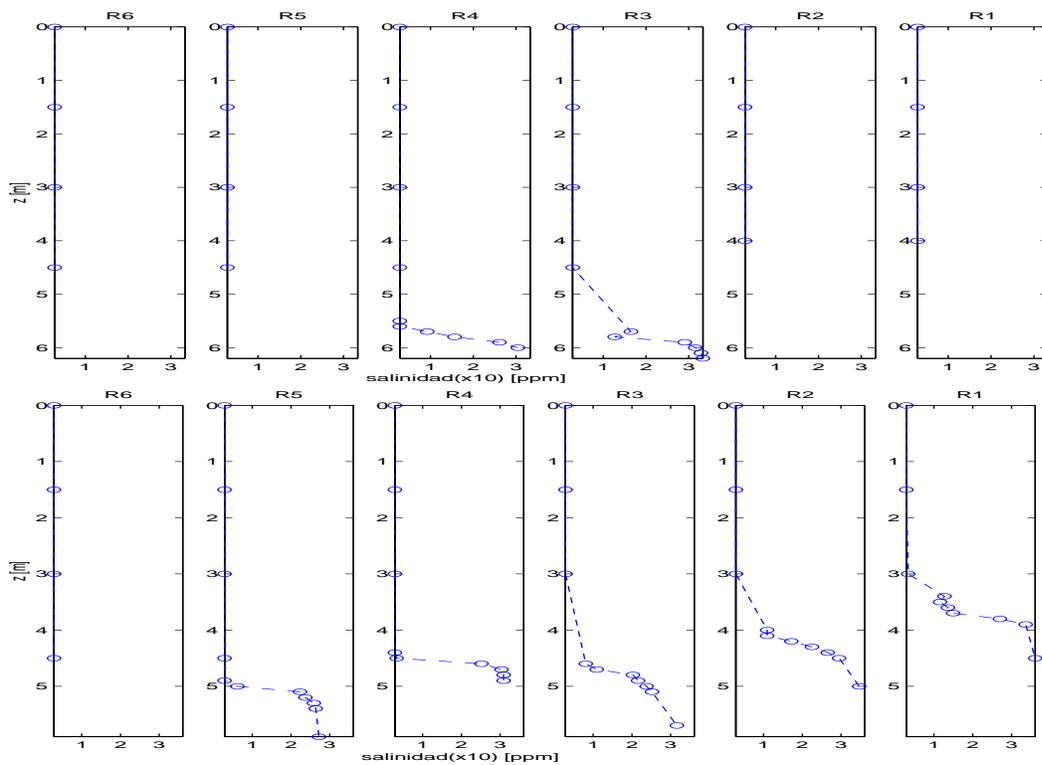


Figura 4.59: Cuña salina para los días 3 y 5 de febrero.

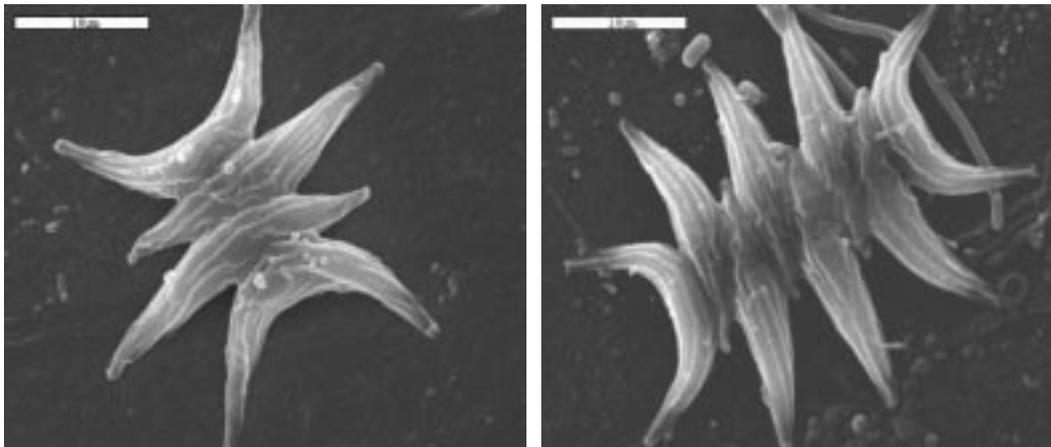


Figura 4.60: Dos aspectos de *Scenedesmus acuminatus*.

4.6.3 Picocianobacterias.

Por su parte las abundancias de las picocianobacterias en el estuario del delta del Ebro respecto de la profundidad y de la salinidad mostradas en la figura 4.65, demuestran una clara correlación con las distintas capas de diferente densidad, así se observa la mayor abundancia en profundidades entre los 4 y los 6 metros,

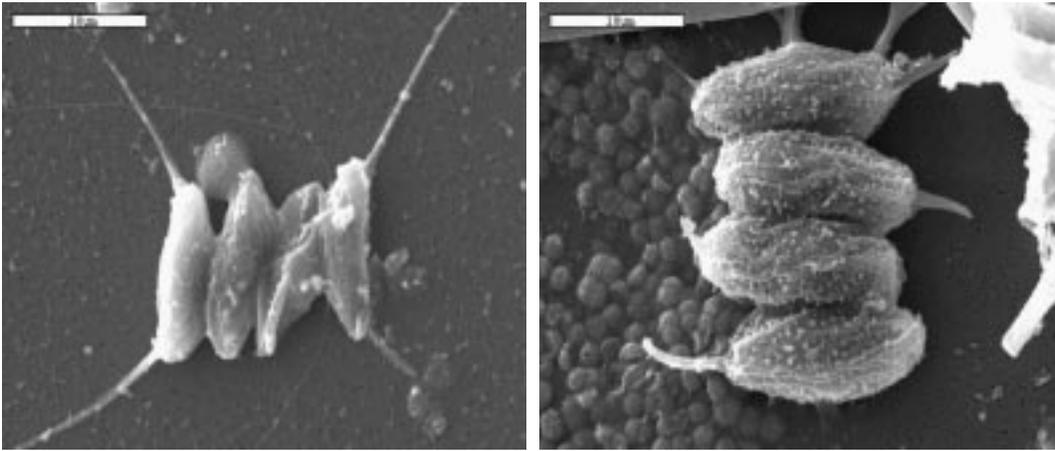


Figura 4.61: Izq. *Scenedesmus opaliensis* (3500x) y der. *Scen. panonicus* (3500x).

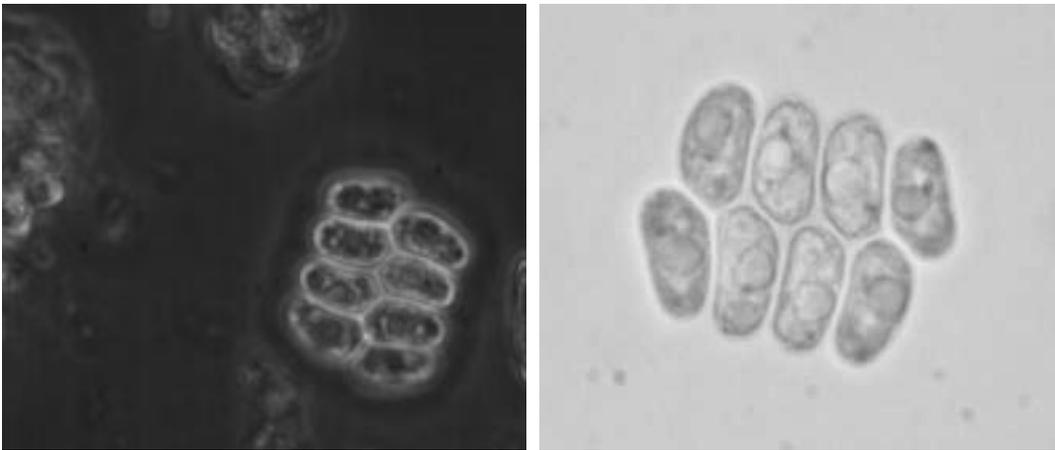


Figura 4.62: Izq. *Scenedesmus platydiscus* y der. *Scen. arcuatus* (40x).

y una relación directa de las abundancias picocianobacterianas con la salinidad.

Las abundancias respectivas muestran que la presencia de estas células solo se hizo patente por debajo de los dos metros y que el día 3 se encontraron estas células a mayor profundidad, debido al atrapamiento de agua salada en las estaciones fijas *R3* y *R4*. Respecto a la salinidad, la presencia de las picocianobacterias, presentan una relación lineal respecto a la salinidad, a mayor salinidad, mayor número de células, sin embargo se encontraron presentes también algunas células a bajas salinidades (figura 4.65).

Analizando la presencia de las picocianobacterias en la columna de agua, la figura 4.66 muestra que las abundancias de estas células de carácter marino que los máximos de abundancia en la columna de agua se presentó sobre todo al nivel de la interface 4.66 como se ha evidenciado en la figura 4.59.

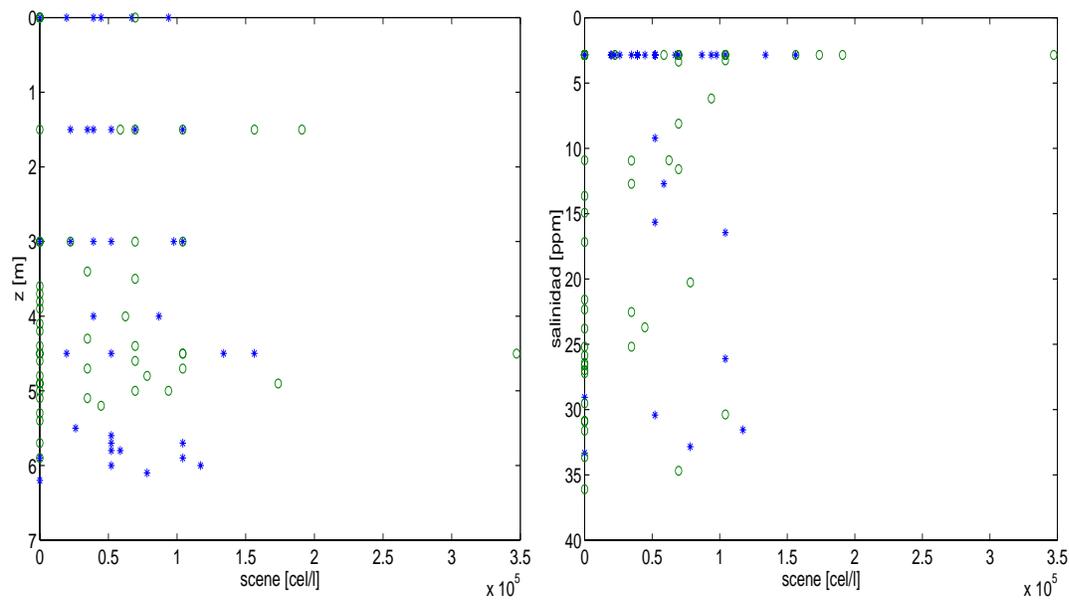


Figura 4.63: Abundancia de *Scenedesmus* [cel/l] en el estuario para los días 3 (*) y 5 (o) de febrero.

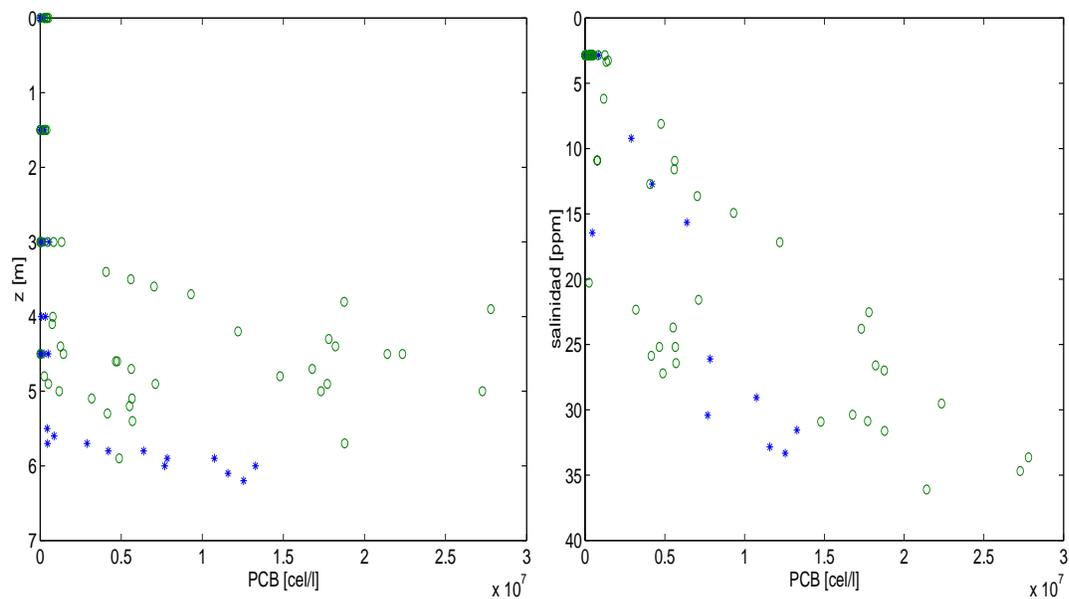


Figura 4.65: Abundancia de picocianobacterias [cel/l] en el estuario para los días 3 (*) y 5 (o) de febrero.

4.6.4 Fitopláncton total.

Las abundancias del fitopláncton total en el estuario respecto de la profundidad y la salinidad mostradas en la figura 4.67 muestra la presencia de organismos

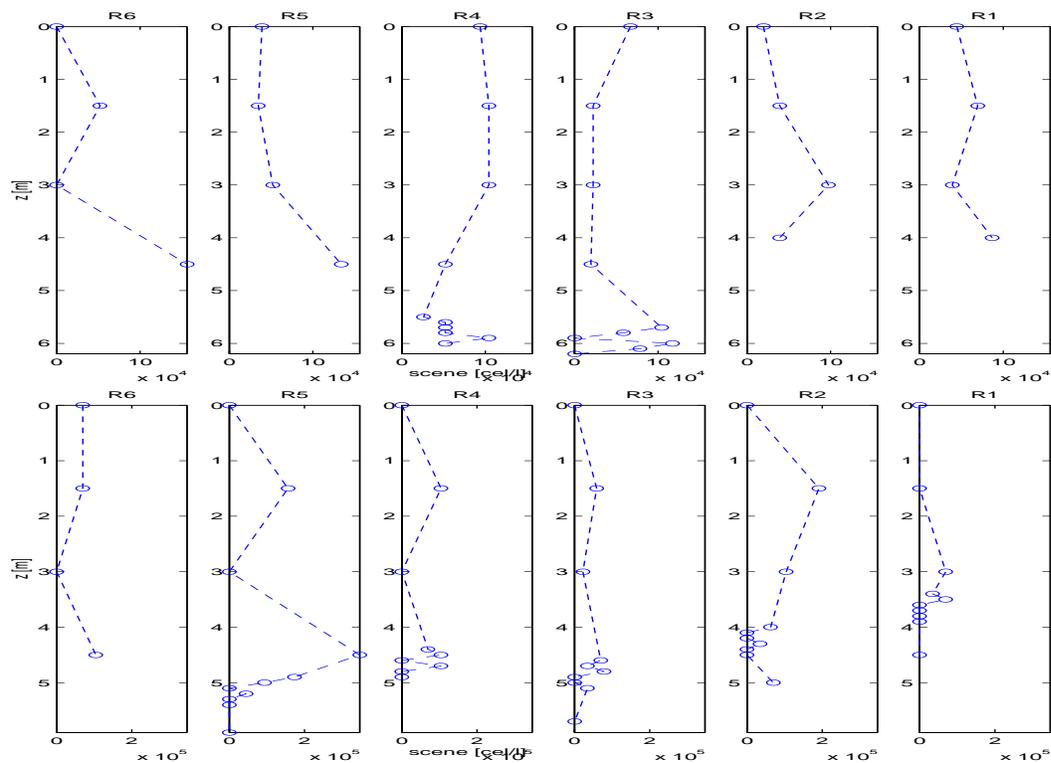


Figura 4.64: Abundancia de *Scenedesmus* [cel/l] en la columna de agua del estuario para los días 3 (arriba) y 5 (debajo) de febrero.

fitoplanctónicos a lo largo de toda la columna de agua y en todas las salinidades esto debido a que en este grupo se incluyen organismos de los dos ambientes, de agua de río y organismos marinos.

Puede observarse que las mayores abundancias en la profundidad se presentan el día 5 de febrero y que las abundancias de estos organismos respecto de la salinidad también es lineal de la misma forma que la presentada por las picocianobacterias.

También las distribuciones de la abundancia del fitopláncton total en la columna de agua de la figura 4.68, muestra una distribución sumamente similar a la de las picocianobacterias, debido sobre todo porque estas son el principal componente del fitopláncton total, puede observarse el aporte que las células de *Scenedesmus* hacen a las abundancias totales, sobre todo para el día 3 donde prácticamente no se encontraron picocianobacterias.

Este grupo muestra un comportamiento muy similar al de las picocianobacterias, debido a que sobre este grupo se forma la base de las abundancias del fitopláncton total.

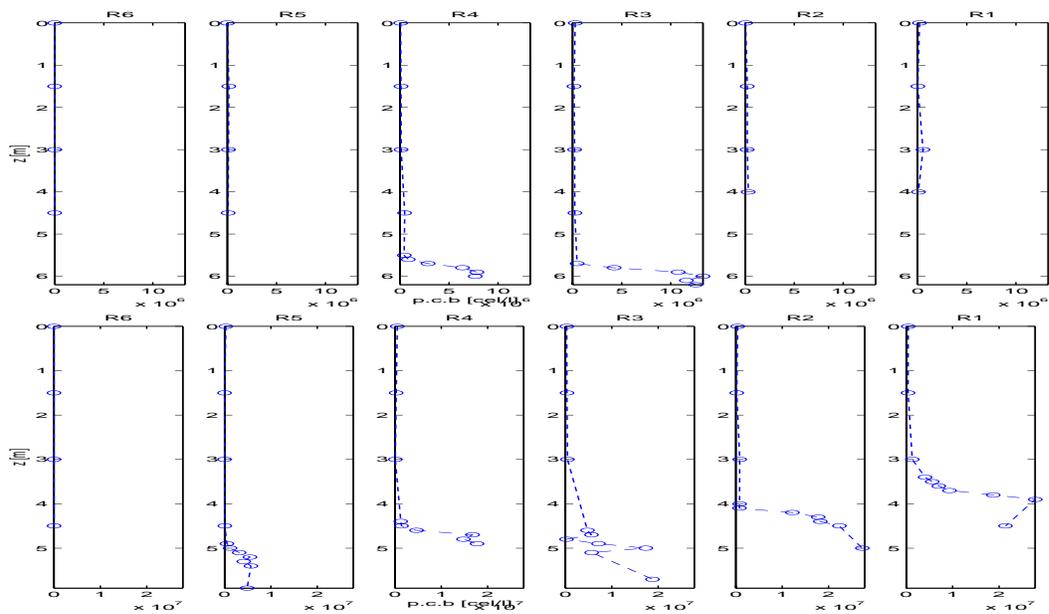


Figura 4.66: Abundancia de picocianobacterias [cel/l] en la columna de agua del estuario para los días 3 (arriba) y 5 (debajo) de febrero.

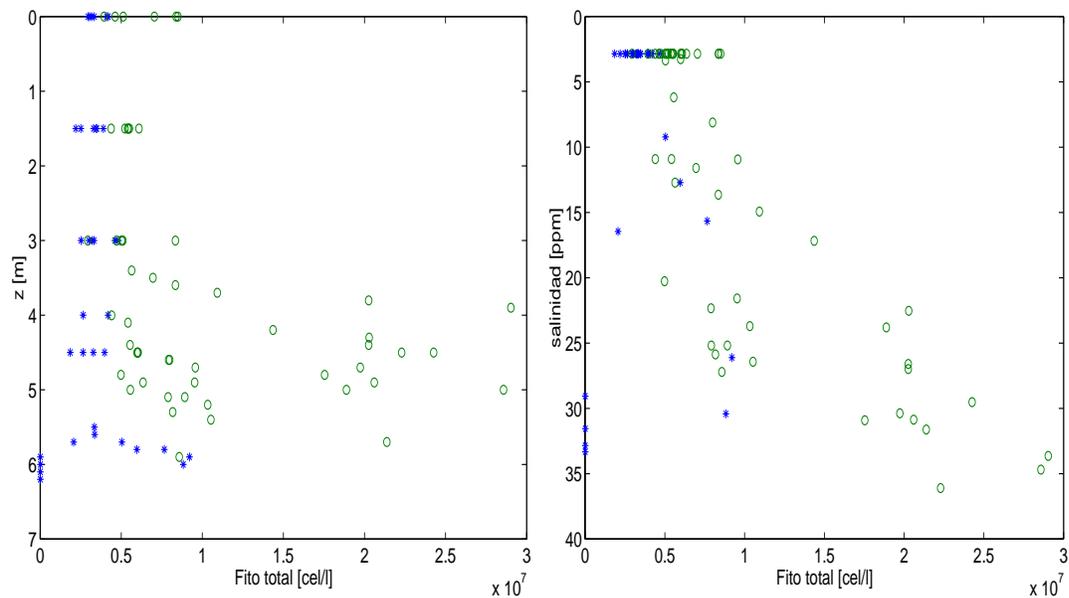


Figura 4.67: Abundancia del fitoplácton total [cel/l] en el estuario para los días 3 (*) y 5 (o) de febrero.

4.6.5 Presencia de una cuña salina estable.

El análisis de las abundancias de la pcb en el estuario del Ebro durante la presencia de una cuña salina estable muestra un gradiente acusado similar al mostrado

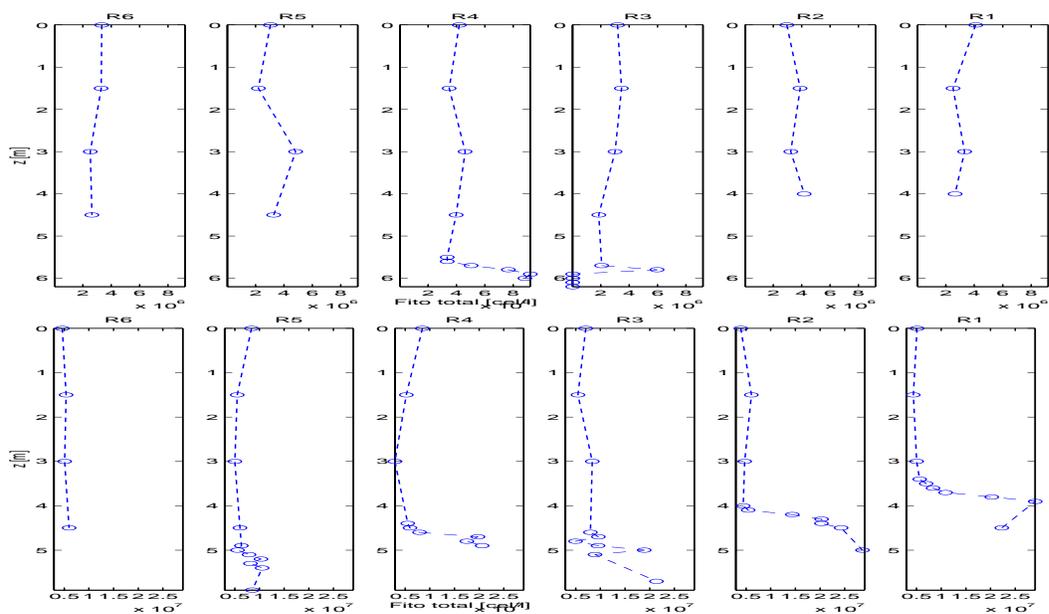


Figura 4.68: Abundancia del fitopláncton total [cel/l] en la columna de agua del estuario para los días 3 (arriba) y 5 (debajo) de febrero.

en la figura 4.10 para condiciones de verano en el número de células por litro por debajo de la interface de densidades detectado en la columna de agua. Las abundancias presentes en las estaciones $R1$ a $R3$ tienen una relación directa con la salinidad, mientras que las de las estaciones muestran una relación inversa con la salinidad y un máximo justo por debajo de la interface de densidades como lo muestra la figura 4.69.

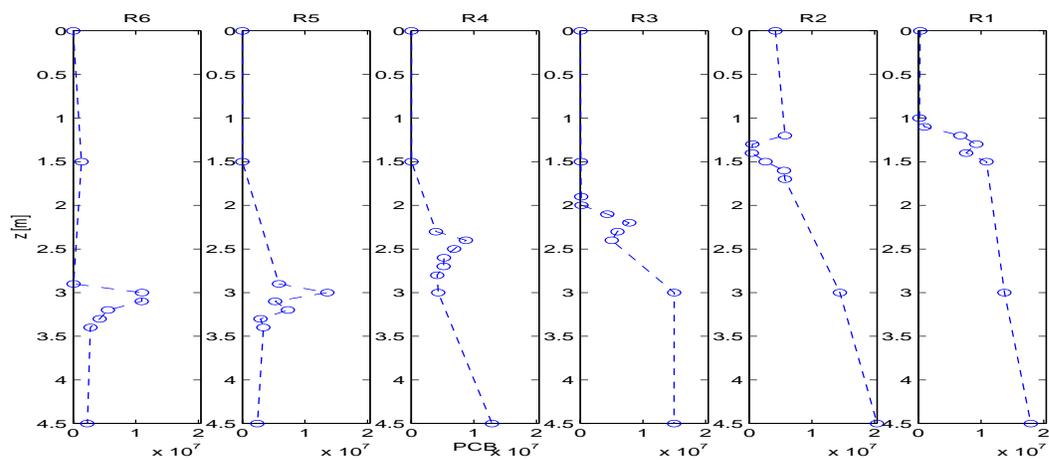


Figura 4.69: Abundancia de las pcb [cel/l] en la columna de agua del estuario para el día 12 de junio de 1999 bajo condiciones de una cuña salina estable.