

3. EL ESTUARIO DEL EBRO. CAMPAÑAS REALIZADAS

3.1. Clasificación de los Estuarios

Ha habido a lo largo del tiempo varios intentos para clasificar los estuarios en diferentes tipos, basados en las descripciones físicas y/o procesos biológicos o químicos que tienen lugar en ellos.

La definición más comúnmente aceptada de estuario, es la de Cameron y Pritchard (1963): “Un estuario es un dominio de agua costero semiconfinado, que tiene una conexión libre con el mar y donde el agua de mar se diluye con el agua dulce proveniente del desagüe continental” (Dyer, 1997).

3.1.1. Clasificación por mareas

Davies (1964) realizó una clasificación de los estuarios basada en sus rangos de mareas:

Micromareales	< 2 m
Mesomareales	< 4 m, > 2 m
Macromareales	< 6 m, > 4 m
Hipermareales	> 6 m

Existe otra clasificación (figura 3.1) basada en la relación entre la convergencia y la fricción:

Estuarios hipersíncronos: Donde la convergencia excede la fricción. Como consecuencia, el rango y las corrientes de marea, se incrementan hacia la cabeza del estuario, hasta que en la sección del río, la convergencia disminuye y la fricción tiene mayor efecto, disminuyendo la amplitud y la velocidad. Generalmente estos estuarios tienen forma de embudo.

Estuarios sincronos: La fricción y la convergencia tienen efectos iguales y opuestos en la marea, y el rango es constante a lo largo del estuario hasta que se alcanza la sección fluvial.

Estuarios Hiposíncronos: En éstos, la fricción excede los efectos de la convergencia, y el rango de marea disminuye a lo largo del estuario. Estos estuarios tienden a tener bocas angostas, y las mayores velocidades se dan en la boca.

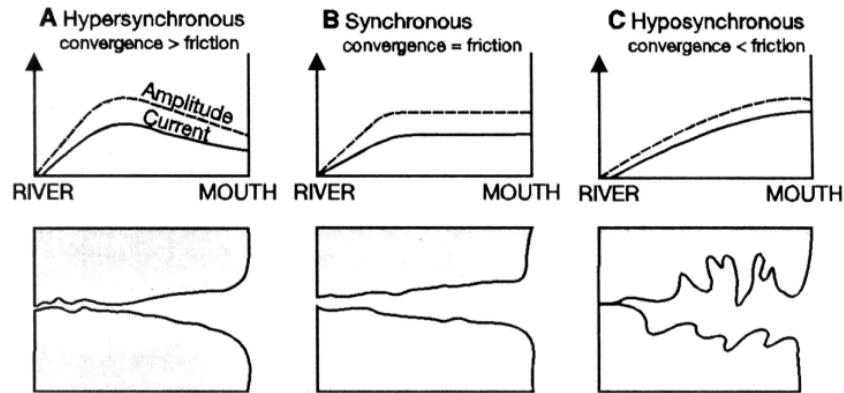


Figura 3.1. Variación del rango de mareas y la amplitud de velocidad de la corriente en estuarios con diferentes geometrías (tomado de Dyer, 1997).

3.1.2. Clasificación topográfica

Pritchard (1952) realizó una clasificación topográfica de los estuarios, dividiéndolos en 3 grupos: Estuarios de planicies costeras, Fiordos y Estuarios con barreras (figura 3.2).

Estuarios de planicies costeras: Fueron formados durante la trasgresión Flandriana por la inundación de valles. No hubo sedimentación durante la inundación, por lo que la topografía del estuario es muy parecida a la original del valle. Consecuentemente, las profundidades máximas de estos estuarios raramente exceden los 30 m. Se hacen más profundos y anchos hacia la boca. Su forma y sección transversal son regularmente triangulares.

Fiordos: Los fiordos fueron formados en áreas cubiertas por capas de hielo del Pleistoceno. La presión del hielo hizo más profundos y anchos los valles de los ríos preexistentes, dejando barras rocosas o elevaciones en su lugar, normalmente en las bocas o en las intersecciones de los fiordos. Debido a que se hicieron más profundos, los fiordos tienen una proporción anchura-profundidad pequeña, y una sección transversal casi rectangular. Su forma es también rectangular, pero angosta. La proporción anchura-profundidad es normalmente de 10:1. Normalmente tienen fondos rocosos y la sedimentación generalmente queda restringida a la cabeza del fiordo. La descarga del río es relativamente pequeña comparada con el volumen total del fiordo. Se encuentran principalmente en latitudes altas en regiones montañosas.

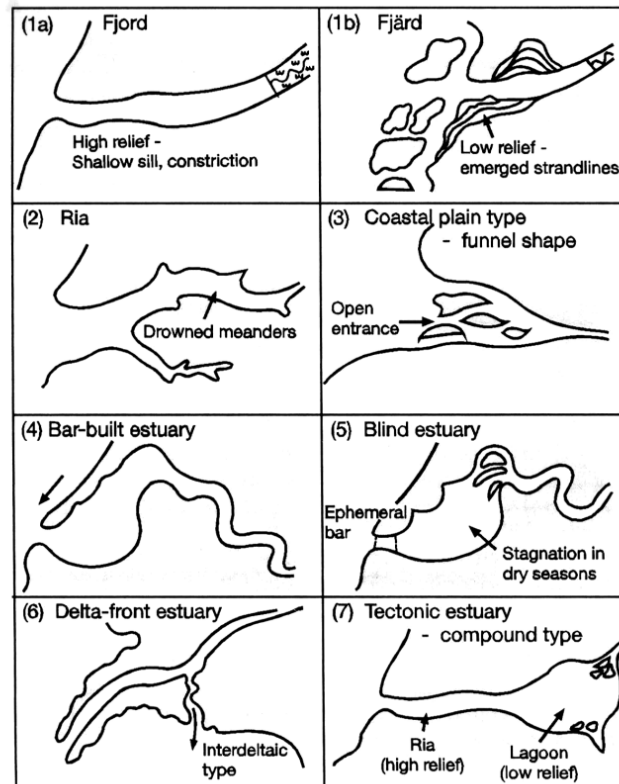


Figura 3.2. Diferentes geomorfologías de estuarios (tomado de Dyer, 1997)

Estuarios de barrera: También han sido formados por inundación de valles durante la glaciación, aunque sin embargo ha habido sedimentación reciente y tienen una barra característica transversalmente a la boca. Estos estuarios están generalmente asociados con costas de sedimentación. Generalmente tienen poca profundidad y tienen grandes lagunas y canales de agua poco profundos muy cercanos a la boca. Debido a la restricción del área transversal, las corrientes pueden ser rápidas en la boca, pero en las partes más anchas y alejadas disminuyen rápidamente. El flujo del río es grande y estacionalmente variable, y acarrea grandes volúmenes de sedimento por el río durante las inundaciones.

Otros tipos: Estos son los que no se pueden incluir dentro de las otras categorías. En estos se incluyen los estuarios originados tectónicamente, formados por fallas, deslizamientos de tierra o erupciones volcánicas.

3.1.3. Clasificación morfológica

Dalrymple et. al. (1992) han considerado el desarrollo morfológico como parte de una secuencia evolutiva, que es determinada por la influencia de la intensidad del río, el oleaje y las mareas.

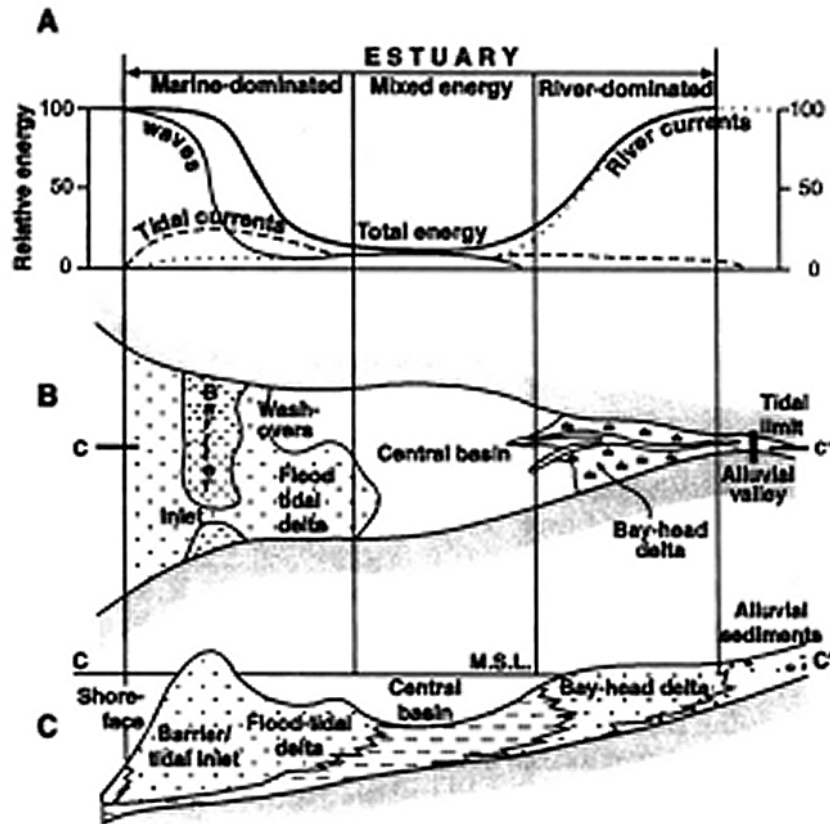


Figura 3.3. Energía relativa (A), morfología (B) y facies sedimentarias (C) en una sección longitudinal idealizada de un estuario (micromareal) dominado por oleaje Darlymple et al., 1992 (tomado de Dyer, 1997).

Estuarios dominados por oleaje: En éstos, las olas tienen un efecto importante en la boca, donde el sedimento erosionado de la línea de costa es transportado a lo largo de la playa formando una barra. Ésta estrecha la boca, y se formará hasta que las corrientes de marea, que aumentan gradualmente con la disminución de la sección transversal, lleguen a un equilibrio de modo que la erosión del sedimento de la punta de la barra sea tan rápida como lo es su depósito allí debido a la deriva litoral (figura 3.3).

Estuarios dominados por la marea: Se forman como resultado de corrientes de marea importantes respecto al efecto del oleaje. La boca generalmente tiene bancos de arena que son alineados con el flujo de la corriente y alrededor de los cuales circula el sedimento. En la cabeza del estuario la influencia de la marea disminuye y el flujo de río se vuelve dominante. Estos estuarios suelen ocurrir en zonas de condiciones macromareales e hipersíncronas (figura 3.4).

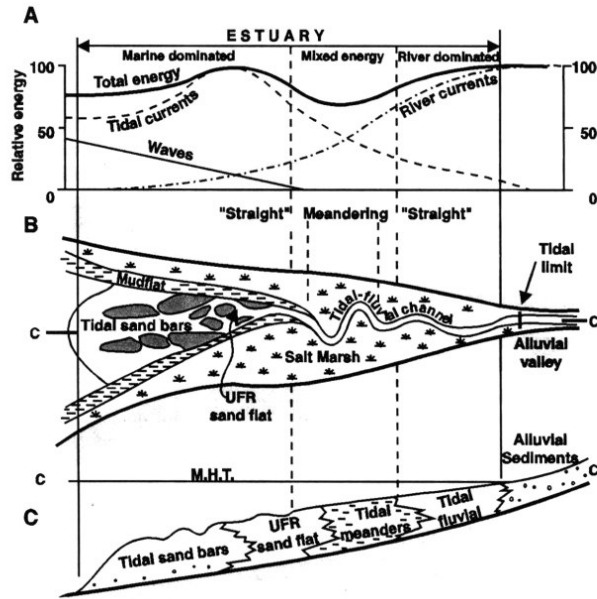


Figura 3.4. Energía relativa (A), morfología (B) y facies sedimentarias (C) en una sección longitudinal idealizada de un estuario dominado por la marea, Darlymple et al., 1992 (tomado de Dyer, 1997).

3.1.4. Clasificación por la salinidad

La mayoría de los estuarios estudiados caen dentro de la categoría de los estuarios de planicie costera y es obvio que dentro de este grupo ocurren grandes diferencias en los patrones de circulación, densidad, estratificación y procesos de mezcla. Por todo ello, se hizo necesaria una mejor clasificación basada en las características de distribución de salinidad y de flujo en los estuarios.

Pritchard (1955) y Cameron y Pritchard (1963) clasificaron los estuarios de acuerdo a su estratificación y las características de la distribución de la salinidad. Definen cuatro tipos principales de estuarios: altamente estratificados o estuarios de cuña salina, fiordos, parcialmente mezclados y homogéneos o bien mezclados.

Estuario altamente estratificado (del tipo de cuña salina): Si se considera un estuario que desemboca en un mar sin mareas, con una fuente de agua dulce en su parte superior, y que no existe fricción, se encuentra una situación en la que el agua dulce, al ser menos densa que el agua salada, fluye hacia el mar sobre la superficie de la capa de agua salada. La velocidad en la capa superior y su espesor disminuyen hacia la boca al ensancharse el estuario. La interfase entre el agua dulce y el agua salada (haloclina) debería ser horizontal y debería extenderse hacia la cabeza del estuario. No habría mezcla entre el agua dulce y salada y ningún movimiento en la cuña salina. Si se introduce la fricción en forma de

viscosidad, existirá ahora una fuerza de corte en el fluido cerca de la interfase que creará una fricción tanto en la cuña salina como en la capa superficial de agua dulce. La cuña salina será empujada aguas abajo hasta que tenga un ángulo suficiente para resistir esta fuerza. El frente de la cuña salina se abultará y el agua superficial se inclinará más abruptamente hacia el mar. Debido a la velocidad de corte a través de la interfase, una capa delgada en la parte superior de la cuña salina se desplazará hacia el mar. Cuando la fuerza de corte es suficientemente intensa se formarán olas que romperán en la interfase y el agua salada se mezclará con la capa de agua dulce superior, dando lugar a un proceso llamado “*entrainment*”. Para preservar la continuidad, se necesita un ligero flujo aguas arriba para compensar el agua que va pasando a la capa superior de agua dulce. Así que el fondo va perdiendo sal gradualmente en la capa superior. El “*entrainment*” añade volumen en el agua que fluye en la capa superficial hacia la boca, lo que provoca un aumento en la descarga hacia la boca del río. La haloclina es muy angosta, pero está claro que la velocidad cae hasta cero debajo de la superficie de la cuña salina, definida como el gradiente máximo de salinidad (figura 3.5). La posición de la cuña salina variará de acuerdo con el flujo del río, y el rango de mareas es normalmente micromareal. Para este tipo de estuario, la relación entre el caudal del río y el flujo de mareas debe ser grande y generalmente la proporción entre el ancho y la profundidad es relativamente pequeña (Dyer, 1997).

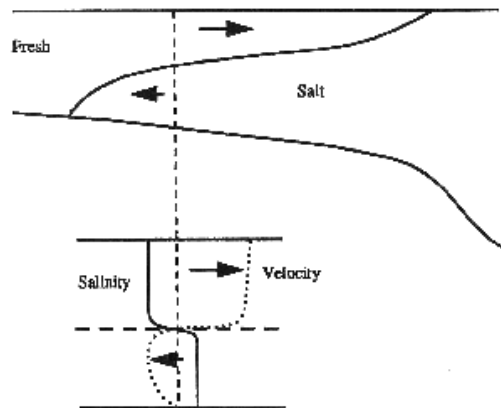


Figura 3.5. Forma característica y perfil de velocidades en un estuario con cuña salina (tomado de Lewis, 1997),

Estuarios altamente estratificados: Fiordos. Similares a los de cuña salina, sin embargo, la capa inferior es muy profunda. Al dominar el flujo del río sobre la marea, el “*entrainment*” es de nuevo el proceso de mezcla dominante entre el agua dulce y la salada. Cuando la descarga del río es grande, la capa superficial es casi homogénea y el gradiente máximo de salinidad ocurre debajo de la superficie (figura 3.6).

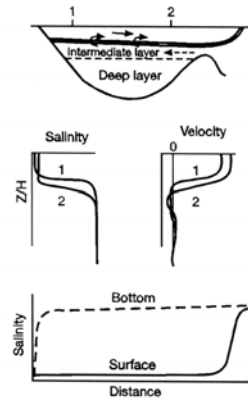


Figura 3.6. Salinidad y perfiles de velocidades en un Fiordo (Dyer, 1997)

Estuarios parcialmente mezclados. Si las mareas son importantes, el volumen del estuario oscilará de acuerdo con las pleamares y bajamares. La energía involucrada en estos movimientos es grande y es principalmente disipada en el estuario por la fricción con el fondo, provocando turbulencia, permitiendo la mezcla entre el agua dulce y la salada. Consecuentemente, la salinidad de la capa superficial se incrementa y para descargar un volumen de agua dulce igual al flujo del río, el flujo superficial hacia el mar aumenta. Esto causa un incremento de volumen en el flujo compensatorio aguas arriba. Como consecuencia, un sistema distinto del de dos capas se forma en los flujos medios. Existe una altura en la columna de agua donde el flujo medio es cero, el cual es llamado nivel de inmovilidad, y coincide con el gradiente de máxima salinidad vertical. Debido al eficiente intercambio entre agua dulce y salada, la estructura del estuario es diferente de la de un estuario con cuña salina. La salinidad superficial aumenta de forma constante hacia abajo del estuario, y el agua completamente dulce sólo ocurre en la cabeza del estuario. También se presenta un gradiente de salinidad longitudinal en el fondo. Como resultado, existe una gran sección en las mediciones de este tipo de estuario en donde los gradientes horizontales de salinidad son casi lineales. La forma del perfil vertical de salinidad no cambia mucho a lo largo del estuario (figura 3.7). En estuarios parcialmente mezclados, el rango de mareas puede cambiar significativamente entre mareas vivas y muertas. Las mareas vivas incrementan los intercambios turbulentos de agua y sal, y como consecuencia la circulación gravitacional vertical puede incrementarse y la estratificación disminuir. En momentos de alto caudal del río, el estuario puede volverse más altamente estratificado y la intensidad de la circulación debería disminuir. Dentro de un estuario parcialmente mezclado puede haber considerables cambios en la estructura a lo largo del estuario, con condiciones de alta estratificación cerca de la boca, donde la profundidad del agua y rango de mareas disminuyen, y el flujo del río se vuelve comparativamente más importante.

Además, pueden ocurrir condiciones de mezcla completa en la boca cuando las corrientes son mayores.

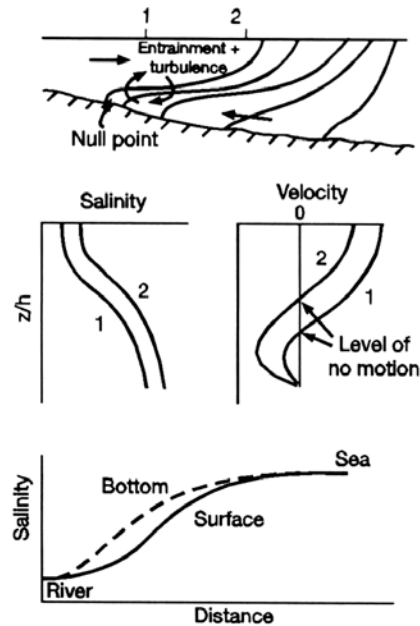


Figura 3.7. Salinidad y perfiles de velocidad en un estuario parcialmente mezclado, (Dyer, 1997)

Estuarios bien mezclados o estuarios verticalmente homogéneos. Cuando el rango de mareas es mayor en relación con la profundidad del agua, la turbulencia producida por la tensión en el fondo puede ser lo suficientemente importante para mezclar la columna de agua completamente y hacer el estuario verticalmente homogéneo (figura 3.8). En estos estuarios el flujo de las mareas debe ser mucho más grande que el flujo del río, por lo que se tienen que tener condiciones macromareales. Este tipo de estuarios se dividen a su vez en dos. Un tipo son los *Estuarios lateralmente No-Homogéneos*, que se presentan cuando un estuario es lo suficientemente ancho, de modo que las fuerzas de Coriolis y la centrífuga pueden causar una separación horizontal del flujo. De acuerdo con esto, el flujo neto hacia el mar puede ocurrir en todas las profundidades del lado derecho del estuario (en el hemisferio norte) y el flujo compensatorio aguas arriba por el lado izquierdo. En estuarios anchos, esta circulación horizontal puede desarrollarse de modo que exista un flujo residual hacia abajo del estuario en un lado, y un flujo hacia dentro por el otro lado, y una separación en el canal dominado por la marea alta y el canal dominado por la bajada de la marea. El segundo tipo son los *Estuarios Lateralmente homogéneos*, que ocurren en donde la anchura es menor, debido a que la tensión lateral puede ser lo suficientemente intensa para crear condiciones lateralmente homogéneas. La salinidad aumenta hacia la boca y el flujo medio es hacia el mar a través de las secciones transversales, con tendencia a llevar la sal hacia fuera del

estuario. Este tipo de estuario puede mostrar variaciones de sección a sección. Cerca de la cabeza, donde la amplitud de la marea puede ser reducida, el flujo del río puede dominar, el “entrainment” puede ser activo y puede darse como resultado una estructura altamente estratificada. Corriente abajo, las velocidades de las mareas pueden aumentar, la mezcla turbulenta puede ser más activa y se puede presentar una estructura parcialmente mezclada, mientras que cerca de la boca, donde las corrientes de marea pueden ser lo suficientemente fuertes, se pueden presentar condiciones de estuario bien mezclado.

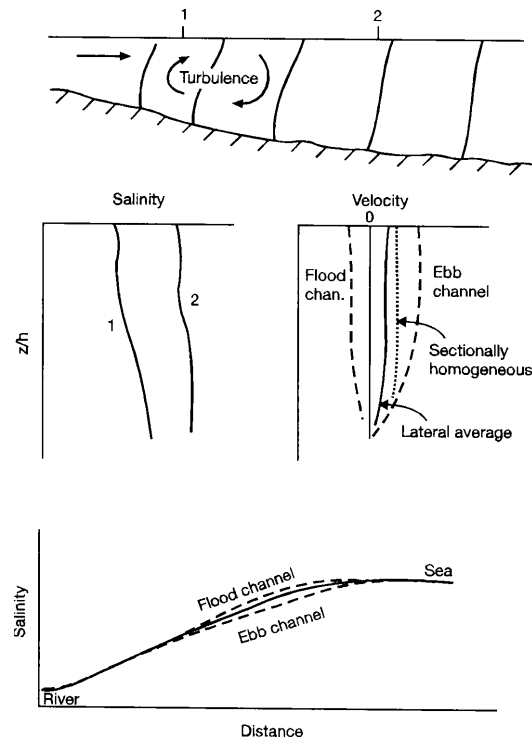


Figura 3.8. Salinidad y perfiles de velocidades en un estuario bien mezclado, (Dyer, 1997)

3.1.5. Clasificaciones cuantitativas

Basándose en la clasificación de salinidad de Pritchard (1955), se han obtenido varias técnicas de clasificación de los estuarios.

Simmons (1955) introdujo el concepto de índice de flujo (ecuación. 3.1), siendo Q el flujo del río, T el periodo de la marea y P el prisma de marea (que consiste en la diferencia de volumen del estuario entre la pleamar y la bajamar). Para valores del índice mayores de 1.0, el estuario es altamente estratificado, para valores menores de 0.10 el estuario es totalmente mezclado y con valores alrededor de 0.25 el estuario es parcialmente mezclado.

$$\text{Tasa de flujo} = \frac{Q \cdot T}{P} \begin{cases} \geq 1.00 & \text{Altamente estratificado} \\ \approx 0.25 & \text{Parcialmente mezclado} \\ \leq .010 & \text{Completamente mezclado} \end{cases} \quad (3.1)$$

Uncles *et al.* (1983) readaptaron el criterio anterior y sugirieron la relación entre la velocidad media del flujo del río, u_f , y la velocidad media cuadrática de la corriente de la marea, u_{Tms} , como un nuevo parámetro para clasificar los estuarios. De acuerdo a esta clasificación, para valores menores que 10^{-2} el estuario esta bien mezclado y con valores mayores a 10^{-1} es altamente estratificado.

$$\frac{u_f}{u_{Tms}} \begin{cases} > 10^{-1} \\ < 10^{-2} \end{cases} \quad (3.2)$$

Clasificaciones mas complejas que las anteriores (que dependen casi únicamente de los valores que entran en el estuario como las mareas, las velocidades de las corrientes y el flujo del río), fueron apareciendo posteriormente, como es el caso del número estuarino, como un acercamiento para definir a un estuario en términos de un número adimensional. El número del Estuario E_N , propuesto por Turner (1973), depende del número densimétrico de Froude (ecuación 3.3), donde h es la profundidad media del estuario, $\frac{\Delta p}{\rho}$ es la diferencia de densidades entre la densidad del mar y la densidad del flujo del río.

$$F_m = \frac{u_f}{\sqrt{g \cdot h \left(\frac{\Delta p}{\rho} \right)}} \quad (3.3)$$

$$N_e = \frac{P \cdot F_m^2}{Q \cdot T} \begin{cases} < 0.10 & \text{estratificado} \\ > 0.10 & \text{mezclado} \end{cases} \quad (3.4)$$

Posteriormente Fischer (1972) propuso la expresión del Número Estuarino de Richardson (R_{ie}) para clasificar el estuario en base a un criterio en la estructura de la salinidad (ecuación 3.5), donde h es la profundidad media del estuario. Aunque ha habido varias formas de expresarlo, este criterio siempre representa la relación entre la ganancia de energía potencial debido a la descarga del río y la capacidad de mezcla de las corrientes de la marea.

$$R_{ic} = \frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot \frac{g \cdot Q}{h \cdot u_{rms}} \begin{cases} > 0.80 \text{ Altamente estratificado} \\ 0.8 > R_{ic} > 0.08 \text{ Parcialmente mezclado} \\ < 0.08 \text{ Completamente mezclado} \end{cases} \quad (3.5)$$

A su vez, Prandle (1985) definió el número de estratificación, S_f (ecuación 3.6), y como en las clasificaciones anteriores, el criterio divide a los estuarios como estuarios altamente estratificados (valores menores de 100 de S_f), parcialmente mezclados (valores entre 100 y 400) y completamente mezclados (valores de S_f mayores de 400). Este criterio depende de un factor de fricción, k , cuyo valor usualmente es igual a 0.0025, la amplitud de las corrientes de mareas, U_0 , la longitud del estuario, L , y otros parámetros usados y definidos en las anteriores clasificaciones.

$$S_f = \frac{0.85 \cdot k \cdot U_0 \cdot L}{g \cdot h^2 \cdot (\Delta\rho/\rho) \cdot u_f} \quad (3.6)$$

Hansen y Rattray (1966) emplearon un método de clasificación de estuarios basado en las velocidades promediadas de las mareas asociadas con el aporte de agua dulce al sistema y la circulación vertical residual. Estos factores se representaron tomando la relación entre la circulación vertical y la velocidad media en la sección transversal, u_{0v} , debida al flujo del río. La estabilidad del sistema se consideraba usando la relación entre la diferencia de salinidad, Δs_0 , entre la superficie y el fondo, y la salinidad media de la sección transversal, s_0 .

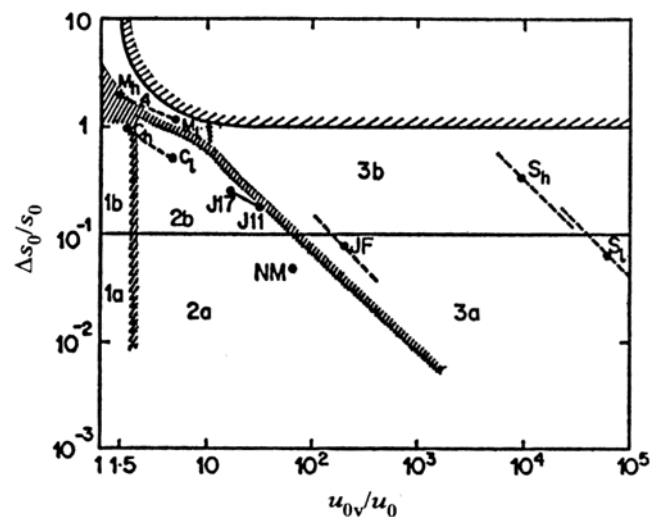


Figura 3.9. Diagrama de Hansen - Rattray. (tomado de Lewis, 1997)

El diagrama (figura 3.9), se separa en regiones correspondientes a las diferentes condiciones de flujo y difusión. En la región 1, el flujo residual se dirige al mar en todas las profundidades y el flujo de sal corriente arriba es puramente por difusión. En la región 2 del diagrama, el flujo residual cambia de dirección en algún punto de profundidad intermedia y el flujo aguas arriba es debido tanto a difusión como a circulación. En ambas regiones de esta figura, las categorías a y b se refieren respectivamente a sistemas bien mezclados o estratificados. La región 3 corresponde a estuarios del tipo fiordos, que dependen del “*entrainment*” para la transferencia vertical de la sal. La región 4 es característica de los estuarios de cuña salina. Aunque esta técnica de clasificación ha resultado ser útil, hay dudas en cuanto la teoría empleada por Hansen y Rattray para explicar la importancia de los parámetros seleccionados (Officer, 1976).

3.2. El Estuario del Ebro. Condiciones Hidrodinámicas

El río Ebro atraviesa el nordeste de la península Ibérica, siendo el segundo en longitud entre los ríos españoles y uno de los más mayores tributarios del Mar Mediterráneo. Tiene una longitud de aproximadamente 930 km y desemboca en la provincia de Tarragona. Este delta tiene la típica forma de triángulo orientada al este, situado entre las poblaciones de La Ampolla y San Carlos de la Rápita, donde está su base, mientras que la desembocadura está situada en el vértice (figura 3.10). La extensión del delta es de aproximadamente 320.59 km² de los cuales 186.46 corresponden al hemidelta derecho y 119.22 al izquierdo (Ibáñez, 1993).

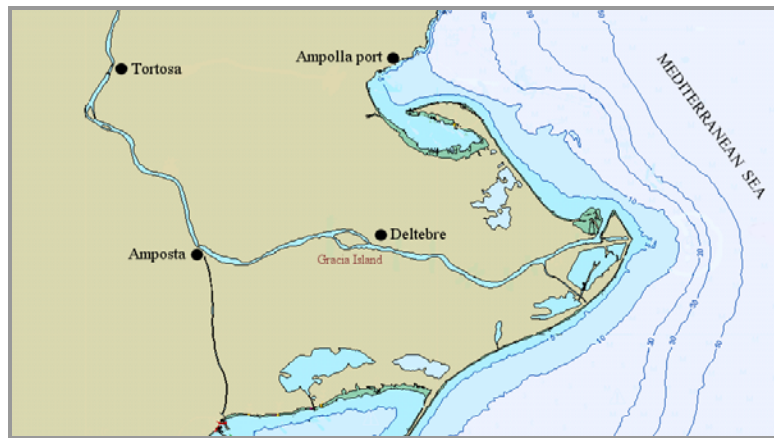


Figura 3.10. El Delta del Río Ebro

Su caudal medio anual ha descendido de 592 m³s⁻¹ al principio del siglo a 424 m³s⁻¹ en los últimos 30 años como resultado del uso intensivo de sus aguas y de la regulación a la cual se ha visto sometido (Ibáñez *et al.* 1997). La principal razón de esta disminución en la

descarga es el aumento en el uso del agua a lo largo de toda la cuenca del río, y se refleja en la construcción de presas en varios puntos del cauce principal y de sus tributarios. La capacidad de reserva se ha incrementado más de 57 veces desde principios de siglo, cuando era solo de 118 Hm³, hasta ahora con más de 6800 Hm³. Un descenso significativo de la descarga durante este periodo tuvo lugar durante los años sesenta debido a la construcción de la presa más grande de la cuenca, Mequinzenza (1533 Hm³), la de Canyelles (678 Hm³) y otras.

De acuerdo a las clasificaciones anteriores de los estuarios, según la clasificación de Dalrymple *et al.* (1992) el estuario del Ebro se encuentra dentro del grupo de estuarios dominados por el oleaje, ya que prácticamente las mareas son despreciables.

Por su estructura de salinidades, el Ebro es un estuario altamente estratificado (Pritchard, 1955) que presenta dos capas totalmente diferenciadas, una superior dulce y otra inferior salada (ver figura 3.11).

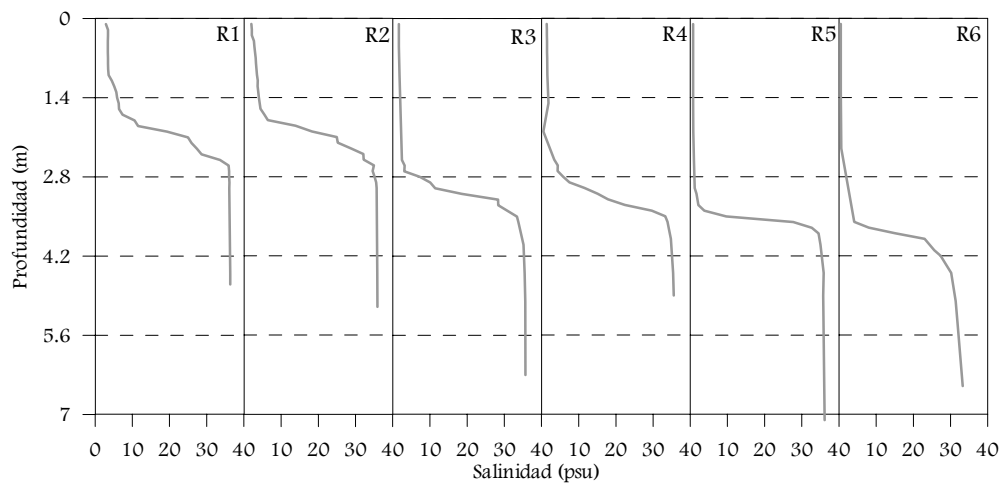


Figura 3.11. Distribución de salinidad en el estuario del Ebro.
Datos del 5 de abril de 1999.

Guillén (1992) en su trabajo de campo, observó la presencia de la cuña salina en todas sus campañas realizadas entre 1988 y 1991, excepto en mayo de 1988 y marzo de 1991, fechas en las cuales el caudal era superior a 550 m³s⁻¹. En el resto de las campañas el flujo no superó los 300 m³s⁻¹.

Según Ibáñez *et al.* (1997) existen tres posiciones típicas de la cuña salina, que no solo está influenciada por la descarga del río, sino también por la batimetría del río. Cuando la descarga del río es mayor a 400 m³s⁻¹ la cuña no se puede formar y el estuario se comporta

como un río. Con descargas por debajo de los $300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ la cuña salina avanza hasta alcanzar la isla de Gracia, a unos 18 km de la desembocadura, y si el caudal es menor a $100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ la cuña puede avanzar hasta las cercanías de Amposta, a unos 32 km de la desembocadura. Generalmente los puntos donde se detiene la cuña son por cambios en la batimetría, donde existen pozos. Al retirarse la cuña por un aumento del caudal no siempre lo hace completamente, sino que parte del agua salada queda atrapada en dichos pozos, que después son lavados poco a poco por el mismo caudal del río. Actualmente el caudal del río está regulado por centrales eléctricas por lo que casi todo el año se mantiene un caudal mínimo, a excepción de algún evento extraordinario, aunque el caudal algunas veces baja de los $100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Velasco, 1998).

En cuanto a los métodos cuantitativos de clasificación de los estuarios, se han hecho los cálculos para corroborar lo afirmado en las clasificaciones anteriores (Figueras, 2001). Para ello la profundidad promedio, ancho y área de la sección transversal fueron obtenidos de la campaña PIONEER II (julio 1999), y el caudal medio corresponde al promedio de los últimos 10 años. La onda de marea se caracteriza por un rango de marea de 20 cm y un periodo de marea M2 (semidiurna). Entonces se calculó el prisma de mareas como el volumen de un prisma con base triangular (Figueras, 2001).

- Características topográficas del estuario:

$$\bar{h} = 6.79m \quad \bar{b} = 297.42m \quad \bar{A} = 1156.71m \quad L = 42.559Km$$

- Principales características del flujo del río

$$\bar{Q} = 275m^3/s \quad u_f = \frac{\bar{Q}}{A} = 0.238m/s$$

- Características de la marea:

$$l = 2000m \quad \Delta h = 0.20m \quad T = 44700s \quad \rho_{ws} = 1026Kg/m^3$$

$$P = \frac{1}{2}l \cdot \Delta h \cdot \bar{b} = 59484m^3$$

$$U_0 = \frac{1}{T/2} = 0.089m/s \quad u_{rms} = 1.13U_0 = 0.101m/s$$

La Tabla III.1 muestra como el estuario del Ebro es un claro ejemplo de un estuario altamente estratificado. Sus valores de clasificación son entre 1 y 2 órdenes de magnitud mayores o menores dependiendo del criterio usado para su clasificación (Figueras, 2001).

Tabla III.1. Valores cuantitativos para un estuario altamente estratificado y valores obtenidos para el estuario del río Ebro, (Figueras, 2001).

Tipos de clasificación cuantitativa	Valores para un estuario altamente estratificado	Valor para el estuario del río Ebro
Índice de Flujo	1.00	206.7
u_f/u_{Tms}	$>10^{-1}$	2.36
Número estuarino (N_e)	<0.10	$1.58 \cdot 10^{-4}$
Número estuarino de Richardson (R_{ie})	>0.80	2.88

De acuerdo con el diagrama de estratificación-circulación de Hansen y Rattray, el Estuario del río Ebro queda clasificado como de tipo 4 -altamente estratificado- (figura 3.12). Sin embargo, Ibáñez *et al.* (1997), observaron las características del río Ebro para su clasificación de acuerdo al sistema empleado por Hansen y Rattray (1966), donde los estuarios con cuña salina quedan dentro de la categoría de estuarios del Tipo 4, y concluyen que según las condiciones en las que se forma la cuña salina en el estuario del río Ebro, éste debería ser clasificado entre las categorías 3b y 2b de la clasificación de Hansen y Rattray. También establecen una diferencia conceptual entre un estuario con cuña salina y uno con régimen de cuña salina. Un régimen de cuña salina se refiere a la situación hidrológica de alta estratificación que puede estar presente en diferentes tipos de estuarios bajo diferentes condiciones.

Los datos de campo en los que se basa este trabajo incluyen dos proyectos que se realizaron en el Delta del Ebro. En primer lugar, las 4 campañas del proyecto europeo PIONEER (MAST III-CT98-0170) realizadas entre Abril de 1999 y Febrero del 2000. En estas campañas estuvieron involucradas varias instituciones que colaboraron tanto en los trabajos de campo, como en apoyo logístico y de laboratorio. Además se dispone de los datos de las 2 campañas correspondientes a un proyecto del programa CyTMAR de la CICYT (Sierra *et al.*, 2002; Mösson *et al.*, 1999; Martínez *et al.*, 1999; Movellán *et al.*, 2000).

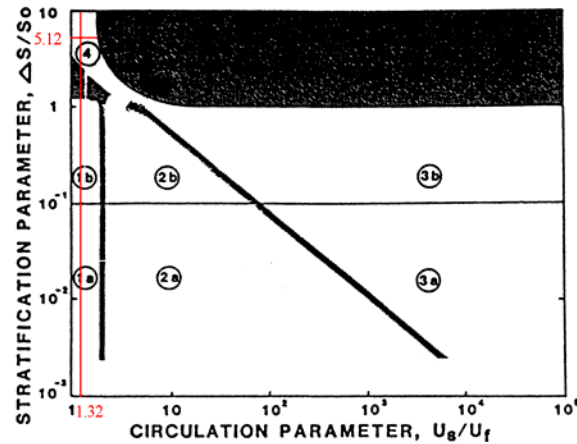


Figura 3.12. Parámetros de estratificación y circulación (rojo) para el 5-04-1999, a 11.588 km de la boca (Figueras, 2001).

3.3. Estudios realizados en el Ebro

Anteriormente a las campañas PIONEER, cuyos datos han sido utilizados para la realización de este trabajo, se han realizado diferentes estudios con objetivos diferentes. Los más recientes, son el trabajo de Ibáñez (1993) para la caracterización de la cuña del estuario, y sobre la dinámica hidrológica y funcionamiento ecológico en el mismo estuario, y el de Guillén (1992), que realizó un estudio sobre la dinámica sedimentaria y la hidrodinámica de la parte baja del río.

Las campañas realizadas en es estuario del Ebro tuvieron como uno de sus objetivos el de completar un ciclo anual para poder analizar el comportamiento de los nutrientes en el estuario, así como las condiciones hidrodinámicas presentes en las diferentes estaciones de año. Además, los datos obtenidos de los análisis de las muestras, se utilizaron en el calibrado del modelo numérico empleado en este trabajo.

Tabla III. 2. Fechas de las campañas PIONEER.

Campaña	Fecha
PIONEER I	3 - 7/abril/1999
PIONEER II	5 - 13/julio/1999
PIONEER III	5 - 10/octubre/1999
PIONEER IV	1 - 5/febrero/2000

Se realizaron cuatro campañas de medidas, procurando representar las cuatro estaciones del año, bajo el marco del proyecto PIONEER (Preparation and Integration of analysis tools

towards Operational forecast of Nutrients in Estuarios of European Rivers, contrato de la Unión Europea MAS3 - CT98 - 0170), tal como se muestra en la tabla III.2.

El trabajo de campo llevado a cabo durante las campañas PIONEER incluyó medidas hidrodinámicas y de calidad de agua en tres dominios diferentes:

- 1.- Río (flujo unidireccional: descarga del río) hasta la isla de Gracia (18 Km de la desembocadura), donde mas comúnmente se encuentra el límite de la cuña salina.
- 2.- Estuario (circulación estuarina influenciada por la descarga del río, las diferencias en densidades, las mareas y el viento) desde el límite de la cuña salina hasta la boca del río.
- 3.- Pluma del río (circulación marina influenciada por la descarga del río, el viento y las corrientes costeras).

También se contó con datos de los caudales horarios para todo el periodo comprendido entre la primera y última de las campañas. Estos datos fueron cedidos por la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE). Asimismo se utilizaron datos meteorológicos obtenidos de diferentes estaciones cercanas a la zona de estudio, y una batimetría detallada realizada durante la segunda campaña, abarcando desde la desembocadura hasta las cercanías de Tortosa, utilizada en la calibración del modelo (figura 3.13).

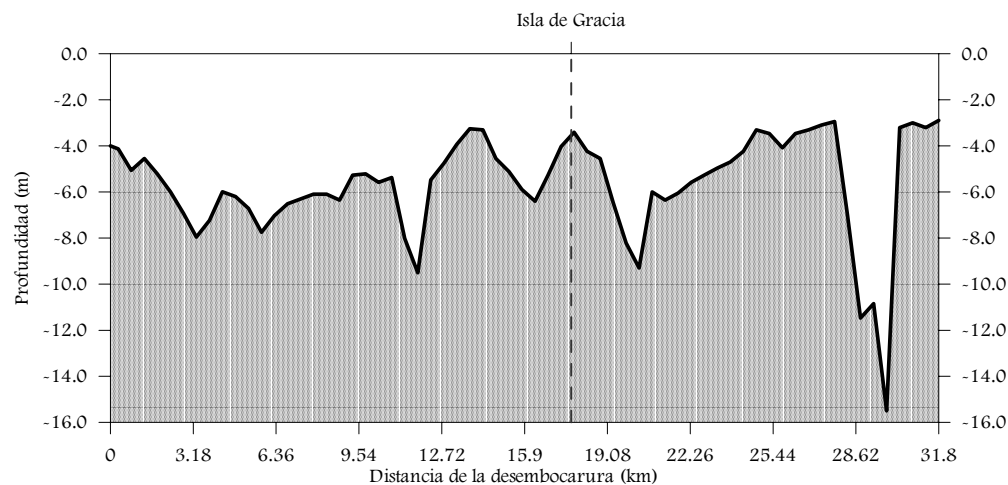


Figura 3.13. Batimetría de la parte baja del río Ebro, PIONEER II, julio 1999.

Las instituciones involucradas en este proyecto fueron:

El Laboratorio de Ingeniería Marítima de la Universidad Politécnica de Cataluña, el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia y el Centro de Estudios de Puertos y Costas, CEDEX, Madrid.

3.3.1. Medidas Hidrodinámicas

Desde un principio se contó con los datos (cedidos por la CHE) de caudales horarios en la estación de control de Tortosa, para el periodo de las campañas de medidas (figura 3.14).

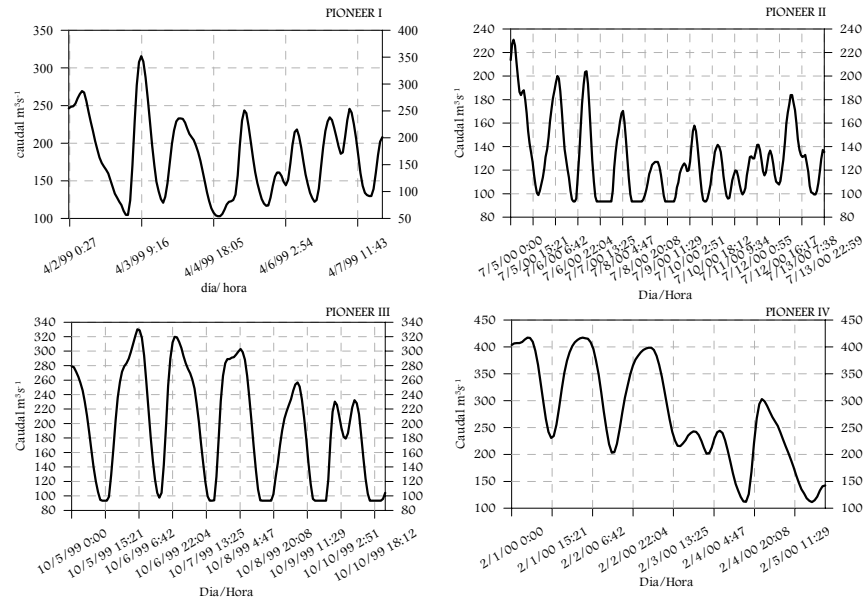


Figura 3.14. Caudales horarios para las campañas PIONEER

Otras medidas hidrodinámicas durante las campañas consistieron en perfiles detallados 2D y 3D de corrientes (con un correntímetro acústico Doppler ADP) en cada punto donde se tomaron muestras de calidad de agua. Con estos perfiles, se pudo encontrar la posición exacta de la cuña salina, debido a un claro cambio en la velocidad y en la dirección de la corriente. Aunque el ADP permite obtener perfiles precisos de velocidad, se tiene que tener en cuenta que el aparato tiene una estructura metálica de protección con una base de 3 soportes y una altura total de 52 cm sobre el fondo. Además tiene una zona de 20 cm por encima del aparato en que no toma medidas, y en las cercanías de la superficie hay una zona donde las medidas no son del todo fiables (la recomendación del fabricante es de ignorar o tomar con precaución el 10% de la parte superior del perfil). Por esta razón y dependiendo de la profundidad del lugar de muestreo, cerca de 1 o 1.5 m del perfil puede perderse durante la medición.

3.3.2. Medidas de calidad de agua

Para caracterizar la calidad del agua, se realizaron perfiles de CTD (en el estuario y en la pluma), perfiles de Hydrolab (en el estuario), se tomaron muestras de agua a diferentes profundidades (estuario y pluma) utilizando una bomba de agua y muestras de fitoplancton (estuario y pluma) tanto superficiales (con una red) como a diferentes profundidades.

En las estaciones del estuario las muestras de agua se tomaron a profundidades preestablecidas (0.0, 1.5, 3.5, 4 m), y de acuerdo a la profundidad de la interfase, localizada con el Hydrolab, se tomaron 3 muestras arriba de ella a 10, 20 y 30 cm, una en la interfase y 2 por debajo de la misma, a 10 y 20 cm. El día 7 de Octubre se tomaron muestras en dos secciones transversales del estuario.

Debido al poco espesor del agua dulce en la pluma, se utilizó un sistema de muestreo especial (SWAS) (ver figura 3.15), construido en colaboración por el Laboratorio de Ingeniería Marítima (UPC) y el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente (UPV) y con la ayuda del Laboratoire ARAGO de Banyuls, Francia. Básicamente consiste en una plataforma rígida de espuma con varios tubos con peso que toman muestras a diferentes profundidades (0, 0.05, 0.10, 0.20, 0.30, 0.50, 0.75 y 1m de profundidad). El agua es succionada a sus correspondientes recipientes con el uso de una bomba de vacío.



Figura 3.15. Sistema de muestreo de agua para la pluma del río, SWAS.

La zona estuarina se dividió en seis estaciones fijas, R1 a R6 (figura 3.16), donde se tomaron las muestras de agua y perfiles de Hydrolab, CTD y ADP en las cuatro campañas realizadas. Las posiciones de las estaciones del ambiente río-estuario se encuentran en la siguiente tabla (tabla III.3).

A su vez, en la pluma del río los muestreos se llevaron a cabo de acuerdo con las condiciones meteorológicas en el día de muestreo, ya que la distribución de la pluma en la zona es fácilmente distinguible a simple vista, y en cada caso se tomaron muestras de agua

como se ha descrito anteriormente, así como transectos donde se midió temperatura y conductividad.

Tabla III.3. Estaciones fijas para río-estuario para las campañas PIONEER.

Estación	UTM X	UTM Y
R1	320190.7	4511050
R2	319449.7	4509800
R3	316216.0	4508700
R4	314845.8	4507750
R5	310737.6	4508675
R6	307404.4	4509500

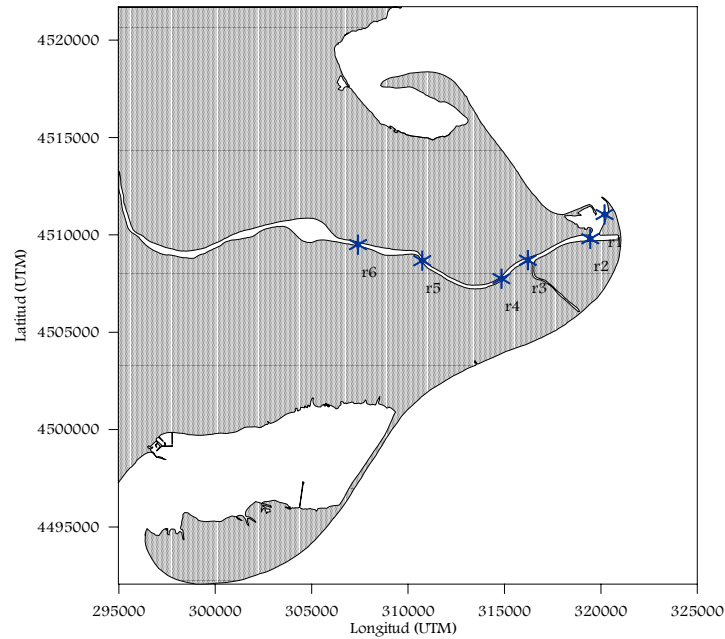


Figura 3.16. Posiciones de las estaciones de río para las campañas PIONEER.

3.3.3. Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos para las campañas se obtuvieron de los datos disponibles de las estaciones meteorológicas cercanas a la zona de los muestreos, propiedad de la Generalitat de Catalunya y gestionadas por la UPC, localizadas en L’Ampolla y San Carles de la Ràpita (figura 3.17).

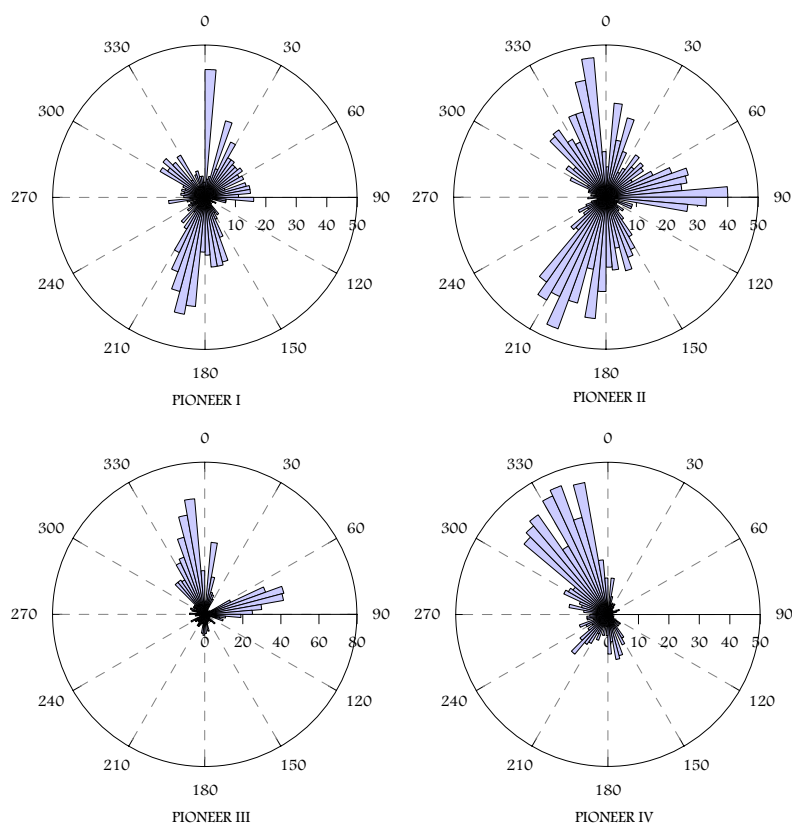


Figura 3.17. Rosas de viento para los días de las campañas PIONEER, (frecuencias direccionales.)

Puede apreciarse que en la campaña PIONEER I (primavera) los vientos más frecuentes fueron los del N y S y, en menor medida, los del E-NE y NW. En verano (PIONEER II) destacan los vientos de Mestral (NW), Llevant (E) y Garbí (SW), que son los más frecuentes en la zona (García *et al.*, 1995). En otoño (PIONEER III) los vientos predominantes fueron del NW-N y del NE-E. Finalmente, en invierno (PIONEER IV) los vientos registrados fueron de Mestral (NW).

3.4. Descripción de las campañas

i. PIONEER I

La campaña se realizó entre el 3 y el 7 de Abril de 1999 para establecer las condiciones del río, el estuario y la pluma en condiciones de primavera. Los permisos necesarios para trabajar en el río Ebro y en el área costera cercana al río fueron obtenidos de la autoridad portuaria de Tarragona.

Tres días antes del comienzo de la campaña, un correntímetro S4DW - PUV fue fondeado en un tetrápodo cerca de la desembocadura del río (figura 3.18) y una estación

meteorológica Aanderaa fue colocada en el faro de El Garxal cerca de la localidad de Riumar (con la colaboración del CEPYC-CEDEX, Madrid).



Figura 3.18.: Tetrápodo con el correntímetro S4DW.

Se realizaron 4 días de muestreo en río y estuario y uno en la pluma. El segundo día de campaña en río (4 de Abril) se interrumpió debido a un fallo en el Hydrolab, por lo que solo se tienen muestreos en dos estaciones (R1 y R2). Las posiciones de las estaciones de muestreo se presentan en la figura 3.19.

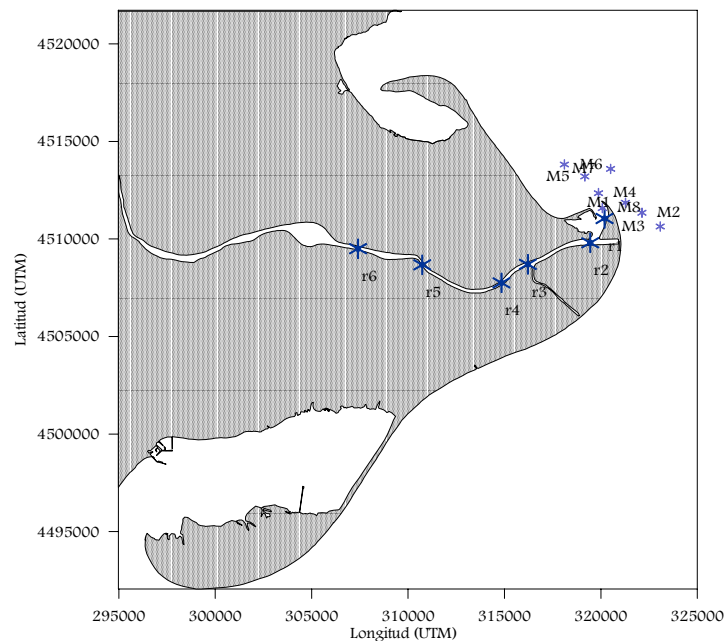


Figura 3.19. Posiciones de las estaciones de muestreo para PIONEER I, (Abril, 1999)

Se alquiló una zodiac de 5.5 m en el puerto de L'Ampolla, acoplada a su vez con otra zodiac de 4 m de eslora (propiedad del LIM-UPC) lo que permitió mayor facilidad para las mediciones en el estuario. Para las mediciones en la pluma de río, además se contó con la ayuda de un barco pesquero de la zona.

i.1. Perfiles de CTD

Los perfiles de CTD fueron tomados en la pluma (6 de Abril de 1999) y a lo largo de las estaciones del río (5 de Abril de 1999), registrando datos de conductividad, presión, temperatura y salinidad. Se utilizó un CTD modelo Seabird SBE-19 y los perfiles obtenidos se utilizaron para determinar la profundidad de la pluma (figura 3.20) así como la profundidad y penetración de la cuña salina en el estuario (figura 3.21).

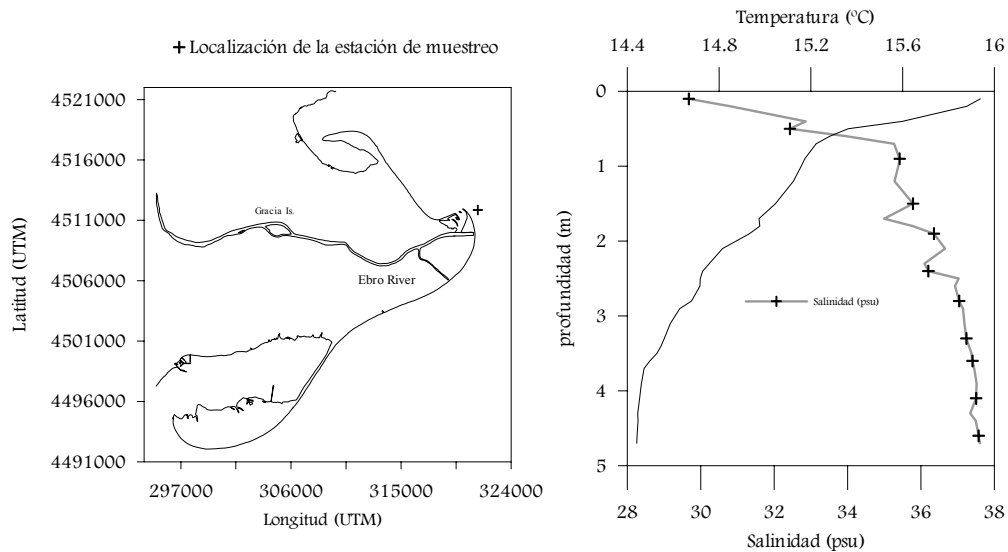


Figura 3.20. Perfil de CTD medido en la pluma del río (Estación M1), 6 de Abril de 1999.

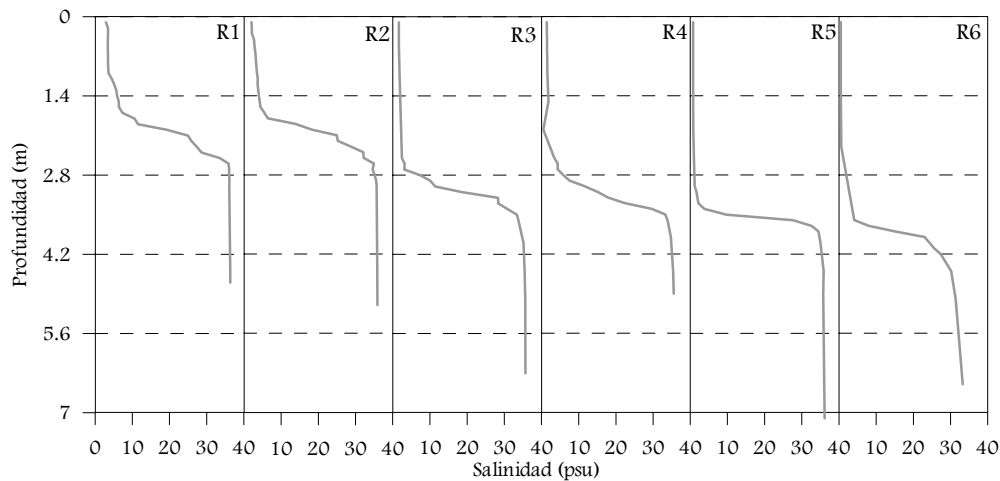


Figura 3.21. Posición de la cuña salina en el estuario del río Ebro, 5 de Abril de 1999.

i.2 Perfiles de Hydrolab

Las mediciones con Hydrolab se hicieron exclusivamente en el ambiente río-estuario, tomándose datos de temperatura, conductividad, presión, potencial Redox y pH. Las medidas fueron tomadas cada 10 cm desde la superficie hasta el fondo. Estos datos se

utilizaron para hacer distribuciones espaciales de las mediciones tomadas y su observar su comportamiento a lo largo de la cuña (figura 3.22).

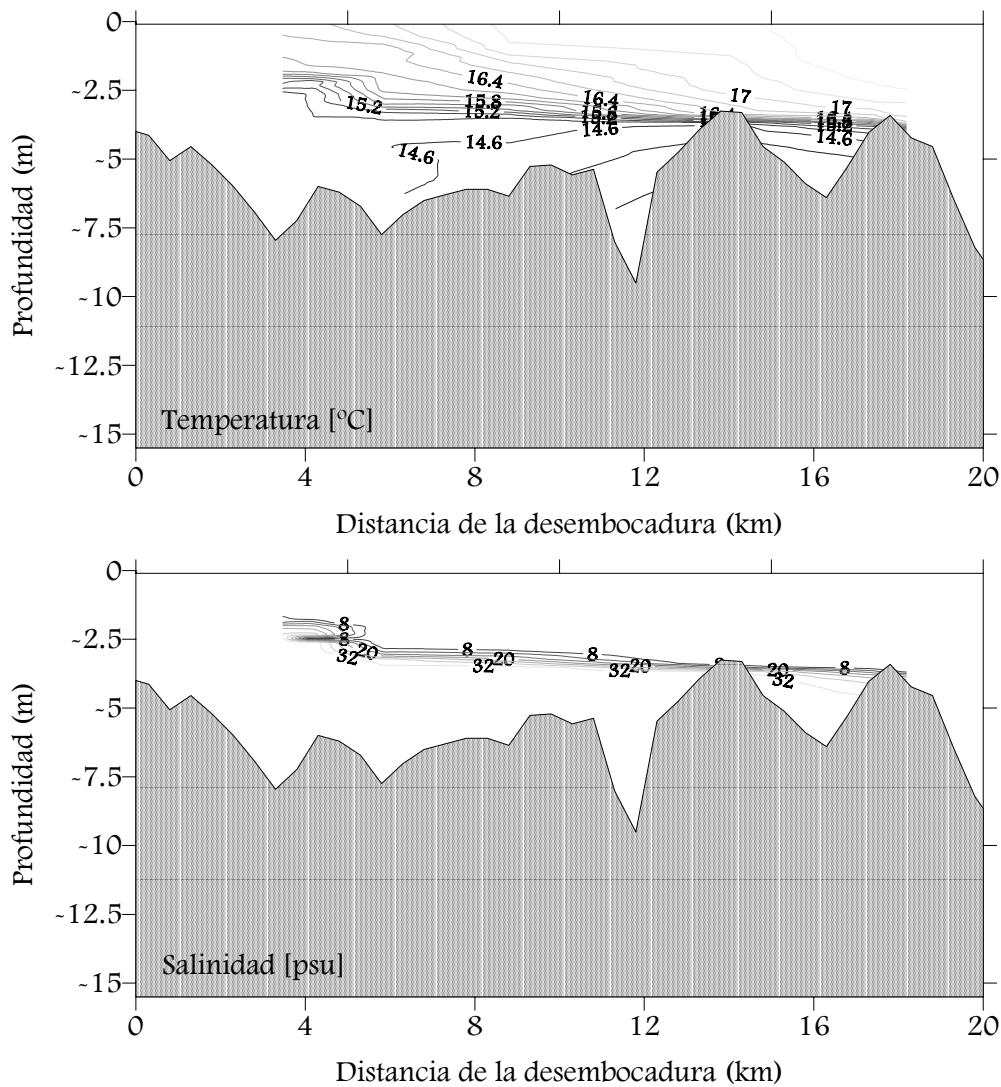


Figura 3.22. Algunas mediciones hechas con el Hydrolab (temperatura y salinidad) en el estuario, 05 de Abril de 1999.

i.3 Calidad de Agua

Para las mediciones de calidad de agua, el Hydrolab se empleó solamente en el estuario, mientras que el CTD se usaba en ambos ambientes. Además se utilizó la bomba de agua para tomar muestras de diferentes profundidades (ver figuras 3.23 y 3.24). Existe el mismo número de perfiles de Hydrolab que de ADP, mientras que solo hay 15 perfiles de CTD. Se tomaron un total de 210 muestras de agua que fueron llevadas al Laboratorio de Tecnología del Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia para su análisis.



Figura 3.23. Toma de muestras de calidad de agua

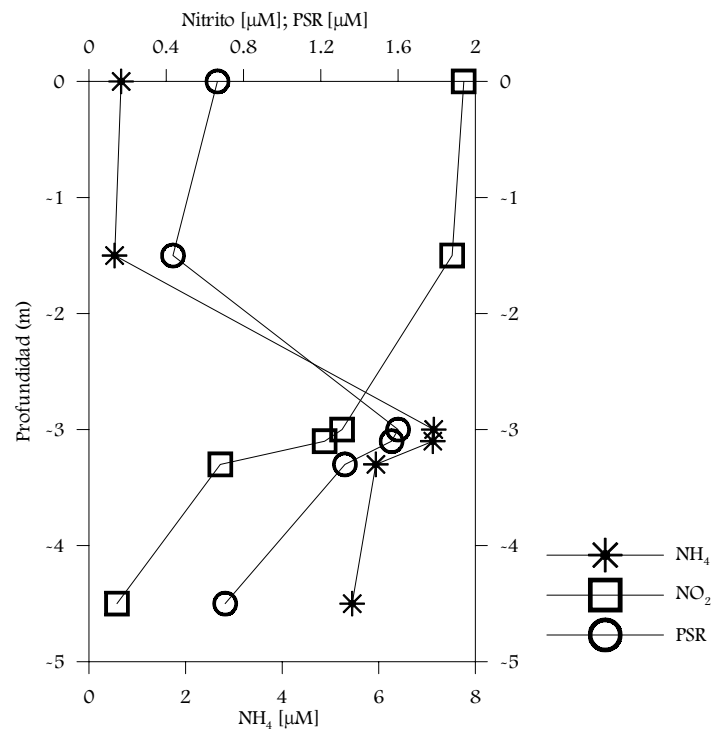


Figura 3.24. Algunos parámetros de calidad de agua registradas en el estuario durante PIONEER I (R3, 5 de Abril, 1999).

Para la toma de medidas de calidad de agua en la pluma, se utilizó el SWAS (descrito anteriormente).

ii. PIONEER II

La campaña PIONEER II se realizó entre los días 5 y 13 de Julio de 1999. Los experimentos de campo que se llevaron a cabo incluyeron medidas hidrodinámicas y de calidad de agua en los 3 ambientes identificados en el río en las campañas anteriores.

La figura 3.25 muestra la zona de estudio y las estaciones de muestreo realizadas durante la campaña.

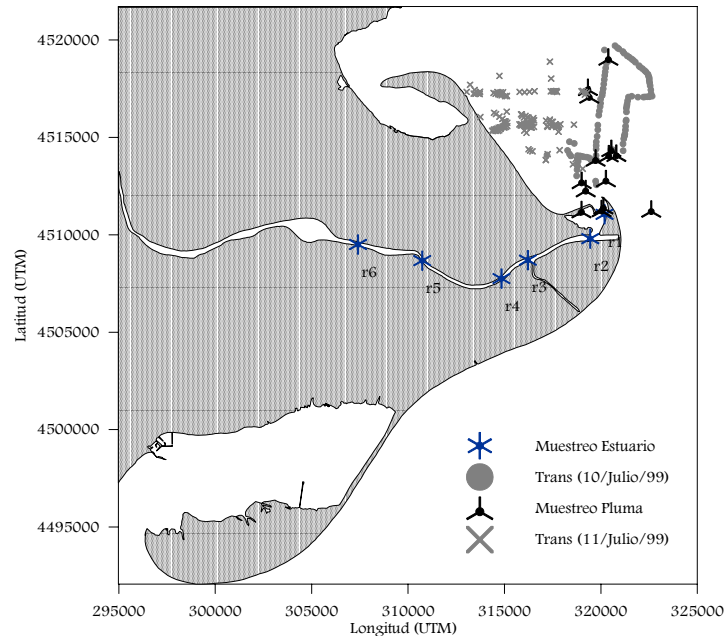


Figura 3.25. Posiciones de las estaciones de muestreo para PIONEER II, (Julio, 1999).

Las medidas se dividieron de la misma manera que en PIONEER I: Hidrodinámicas, una batimetría detallada del río (desde la desembocadura hasta la ciudad de Tortosa), y medidas de calidad de agua. Se tomaron muestras durante 3 días en río y estuario, 2 días en la pluma (7, 8 y 12 de Julio se realizaron muestreos en el estuario, mientras que en los días 10 y 11 de Julio se tomaron las muestras en la pluma), y se efectuaron muestreos superficiales de temperatura y conductividad, y durante 5 días se realizó de la batimetría.

ii.1 Perfiles de Corrientes

Las medidas hidrodinámicas consistieron, en perfiles de velocidad detallados 2D y 3D con un correntímetro Doppler Nortek (ADP), en casi todos los puntos donde se tomaron parámetros de calidad de agua (figura 3.26). En total se tomaron 34 perfiles durante la campaña en series de tiempo de 10 - 20 minutos a 1 Hz (figura 3.27).



Figura. 3.26. Correntímetro Doppler Nortek (ADP), instalado en embarcación para tomar muestras en el estuario.

Con los perfiles que se lograron registrar, se pudo encontrar la posición de la cuña salina, que coincide con los datos del CTD. Ésta se observa con un cambio claro en la velocidad o la dirección de la corriente.

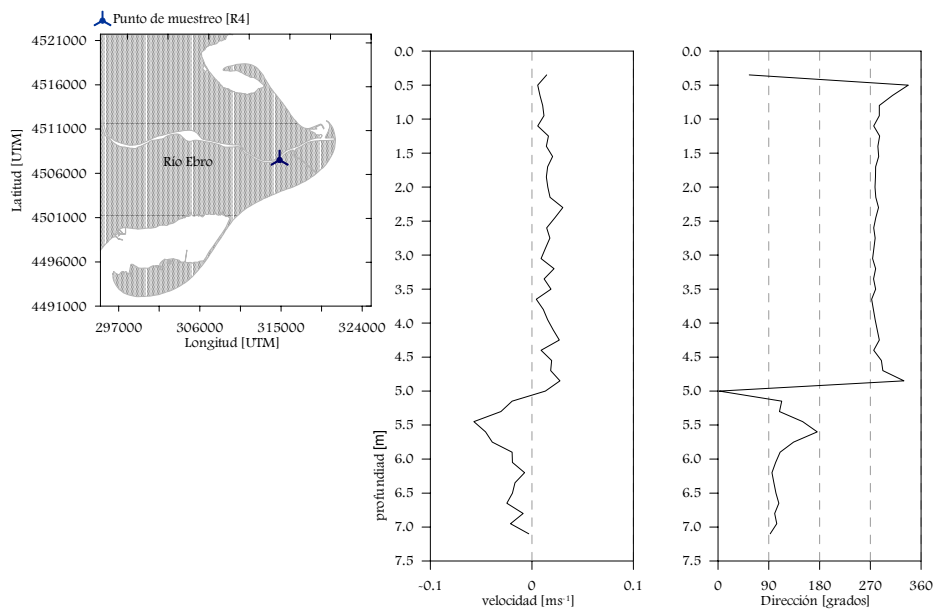


Figura 3.27.- Perfil de velocidad y de dirección (ADP Nortek) para el 12 de Julio de 1999, R4.

ii.2 Perfiles de CTD

Los perfiles de CTD obtenidos a lo largo del río (7, 8 y 12 de Julio) sirvieron para localizar la profundidad y la situación de la cuña salina en el estuario, junto con los datos obtenidos del ADP y muestras de agua. También se tomaron perfiles de CTD en las estaciones de la pluma (10 y 11 de Julio).

La intrusión de la cuña salina en el estuario llegó hasta aproximadamente a la Isla de Gracia, a unos 18 km de la desembocadura con una profundidad media de 3 m el 7 de Julio y de aproximadamente 4 m para el 8 de Julio (figura 3.28). La temperatura se hace más homogénea en la columna de agua al acercarse a la desembocadura. De acuerdo con la posición encontrada de la cuña salina en estos días, se esperaría que el caudal del río se encontrase entre los 100 y los 300 m³s⁻¹ (Ibáñez et al, 1997).

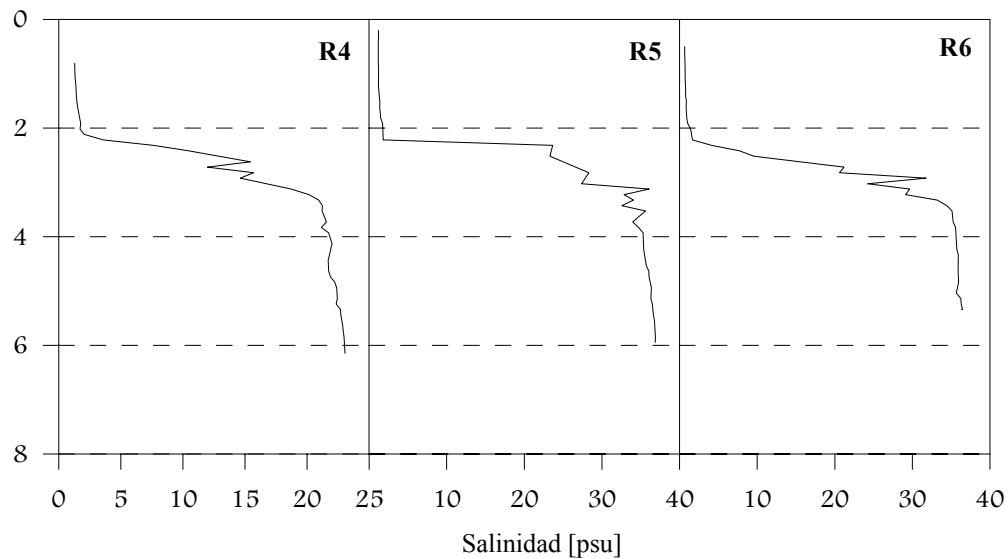


Figura 3.28. Perfiles de Salinidad del CTD para el 7 de Julio de 1999 en las estaciones del río (faltan medidas de estaciones R1 - R3).

Los perfiles de CTD en la pluma mostraron el agua del río desde la desembocadura hacia el mar (figura 3.29), con un espesor de cerca de 1 m de profundidad, expandiéndose principalmente hacia el Norte y al N-NW bajo condiciones de vientos fuertes, alcanzando en los límites un espesor de unos 50 cm.

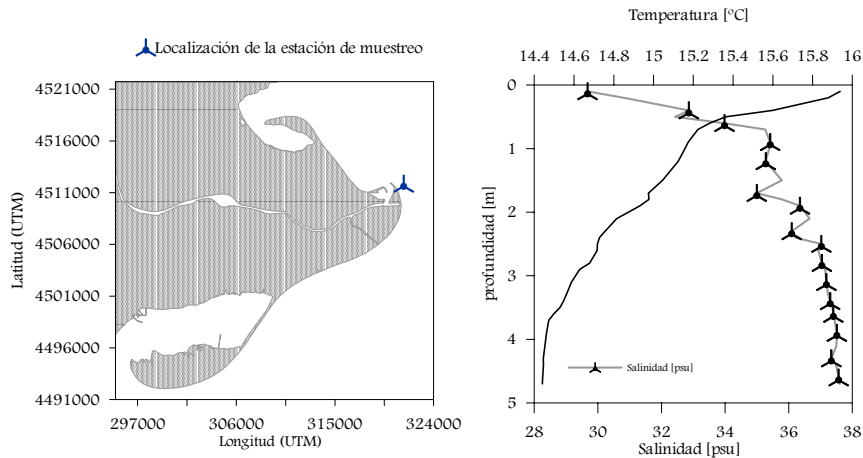


Figura 3.29. Perfil de CTD en la pluma del río, M1 (11 de Julio de 1999).

ii.3 Perfiles de Hydrolab

La salinidad, el pH, la conductividad y la temperatura se midieron con el Hydrolab (figura 3.30), en todas las estaciones del río para caracterizar el comportamiento de estos parámetros en la cuña salina y encontrar con una precisión mayor que la del CTD la profundidad de la interfase entre el agua dulce y la marina. De acuerdo con estas mediciones se tomaban las muestras de agua con el uso de la bomba.

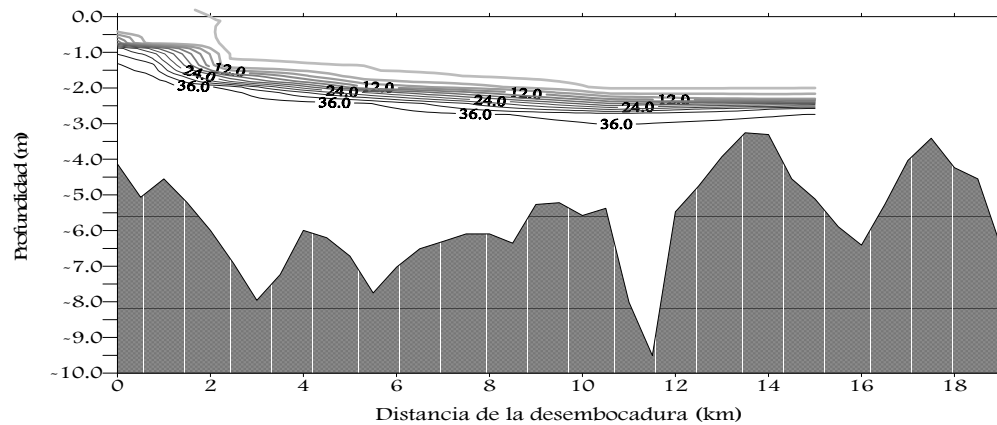


Figura 3.30. Condiciones de Salinidad en el estuario, medidas con el Hydrolab para PIONEER II, 12 de Julio, 1999.

ii.4 Calidad de Agua

Las condiciones biogeoquímicas de la zona estuarina y marina del Ebro se obtuvieron con el CTD, el Hydrolab y las muestras de agua. Con el CTD y el Hydrolab se realizaron perfiles en las estaciones del estuario y las muestras se tomaron de acuerdo a la localización de la interfase con los datos obtenidos por el Hydrolab in situ. Las muestras de calidad de agua en la pluma se realizaron con el SWAS, además de perfiles de CTD (el Hydrolab solo fue usado en las estaciones del río).

Además de los muestreos de agua en la pluma con el uso del SWAS, se hicieron transectos de mediciones de salinidad y temperatura siguiendo la forma de la pluma, para observar el cambio en estos parámetros al mezclarse el agua del río con el agua marina (figura 3.31).

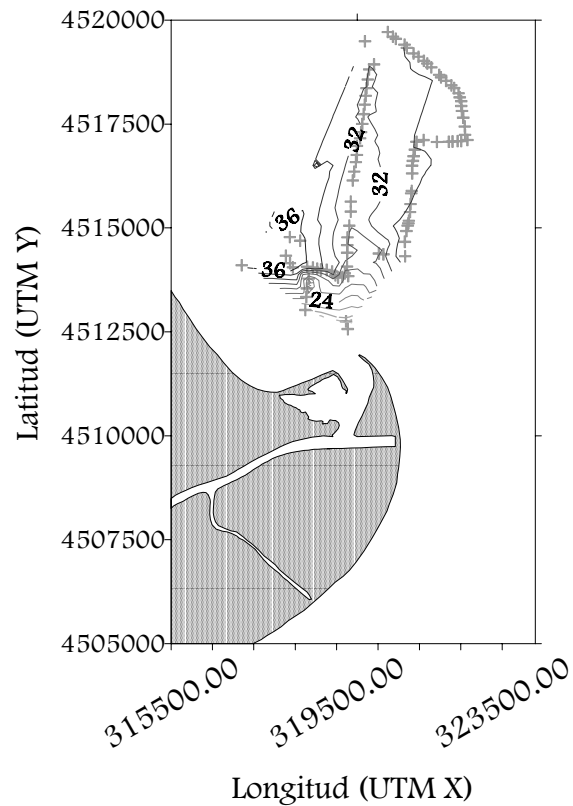


Figura 3.31. Salinidad superficial obtenida de los transectos en la pluma, 10 de Julio, 1999.

Todas las muestras de agua obtenidas en los muestreos se transportaron al laboratorio de la Universidad Politécnica de Valencia, donde se llevaron a cabo los análisis de nutrientes, conductividad, contenido de fitoplancton, y demás parámetros.

ii.5 Batimetría del Río

Del 6 al 21 de Julio de 1999, se realizó una batimetría detallada desde la desembocadura del río hasta Tortosa, cubriendo aproximadamente 42 Km. Se efectuaron medidas de la profundidad en secciones transversales al río en cada cambio importante de la morfología del río. Las medidas fueron tomadas con una ecosonda manual y los resultados pueden verse en la figura 3.32.

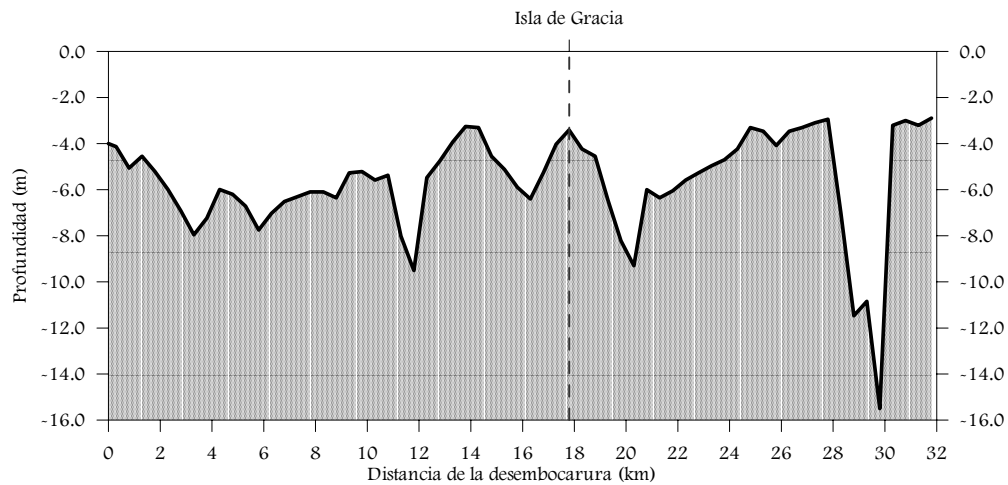


Figura 3.32. Batimetría del río Ebro, desde la desembocadura hasta 32 km aguas arriba..

iii. PIONEER III

La campaña PIONEER III se realizó entre el 5 y el 10 de Octubre de 1999 para medir las características del estuario bajo condiciones de otoño. Las medidas se hicieron al igual que en las campañas anteriores en los mismos ambientes de río, estuario y pluma del río Ebro, (ver figura 3.33).

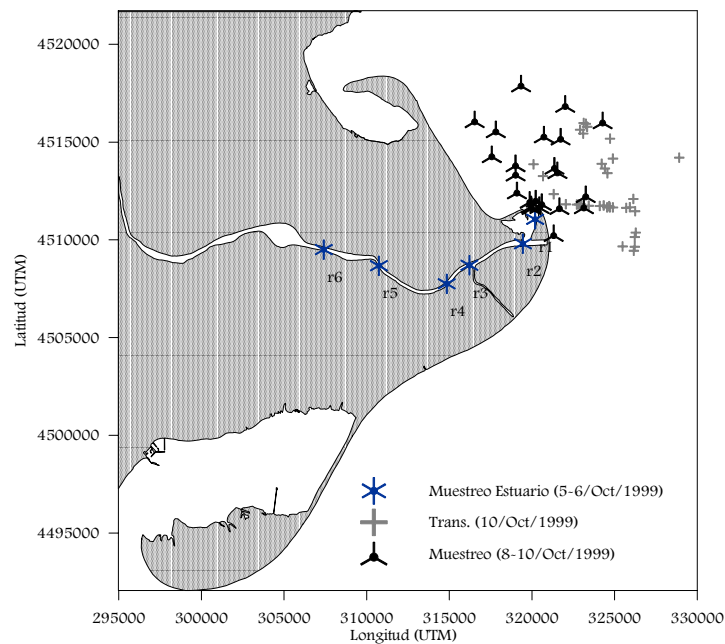


Figura 3.33 Posiciones de las estaciones de muestreo para PIONEER III, (Octubre, 1999).

iii.1 Perfiles de corrientes

Los perfiles fueron hechos en todas las estaciones donde se tomaron muestras de calidad de agua en el río. Los perfiles realizados en el río y estuario durante la campaña eran de series de 700 - 900 perfiles promediados cada 2 s. Estas medidas permitieron obtener perfiles de velocidad y dirección en las estaciones en el momento de tomar las muestras de agua (ver figura 3.34).

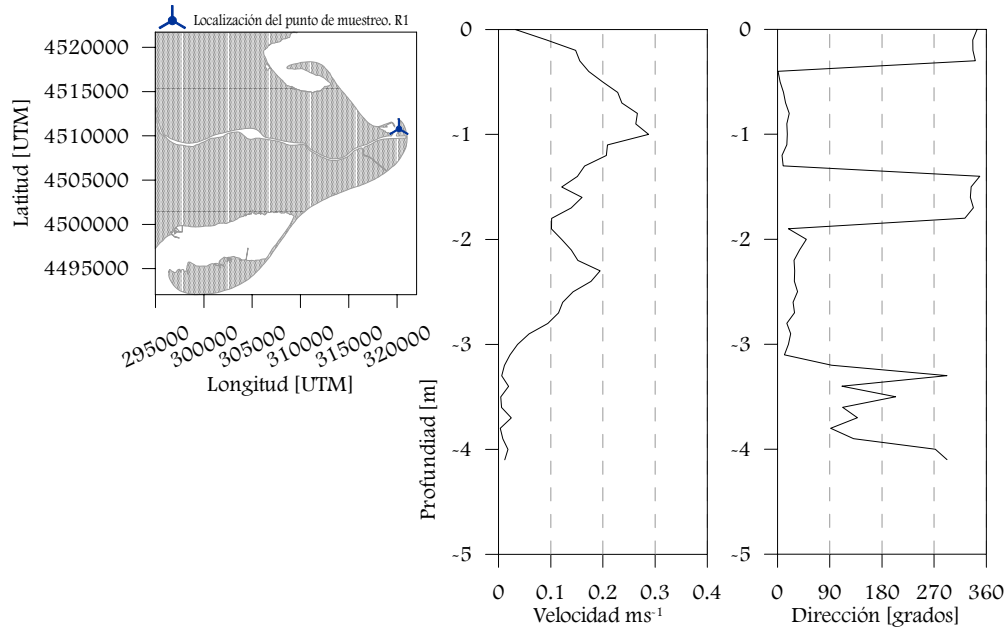


Figura 3.34.- Perfil de velocidad y de dirección para el 6 de Octubre 1999, R1.

iii.2 Perfiles de CTD

Los perfiles de CTD se llevaron a cabo tanto en el estuario como en la pluma (el 6 y el 7 de Octubre en el estuario y del 8 al 10 de Octubre para la pluma del río). No hay perfiles para el 5 de Octubre. En el estuario, la presencia de la cuña se refleja principalmente con las medidas de salinidad (figura 3.35) y su intrusión hasta la Isla de Gracia fue detectada a 3 m de profundidad. A su vez, se realizaron perfiles transversales en dos secciones del río el día 7 de Octubre, la primera sección cerca de la desembocadura y la segunda entre las estaciones R4 y R5.

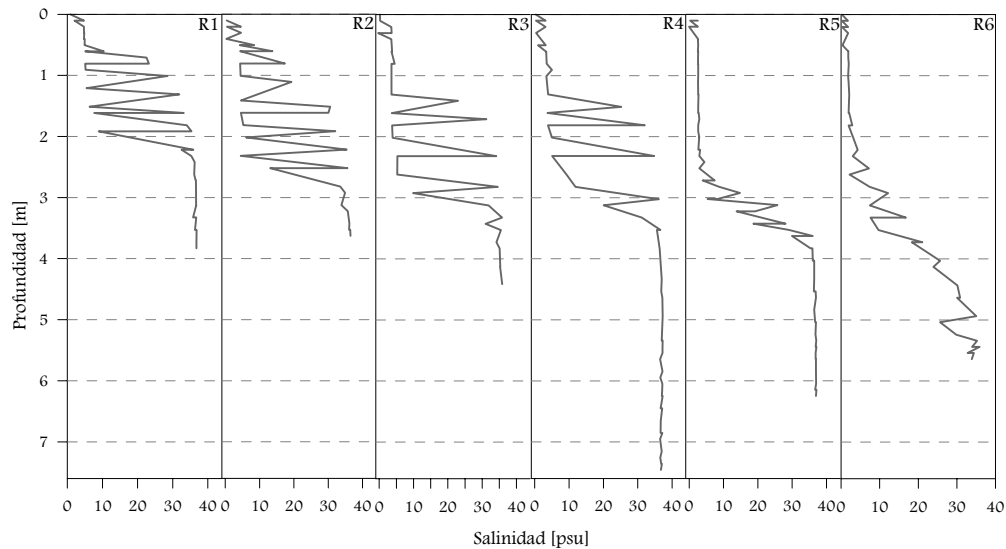


Figura 3.35. Perfiles de CTD mostrando la posición de la cuña salina en el estuario del río Ebro, 6 de Octubre de 1999.

Durante los muestreos en la pluma realizados el 8 de Octubre, solo se pudieron realizar perfiles en 3 estaciones, principalmente debido al estado de la mar, que presentaba un fuerte oleaje de fondo y fuerte viento. Se observaron condiciones de mezcla en los dos siguientes días -9 y 10 de Octubre- (ver figura 3.36).

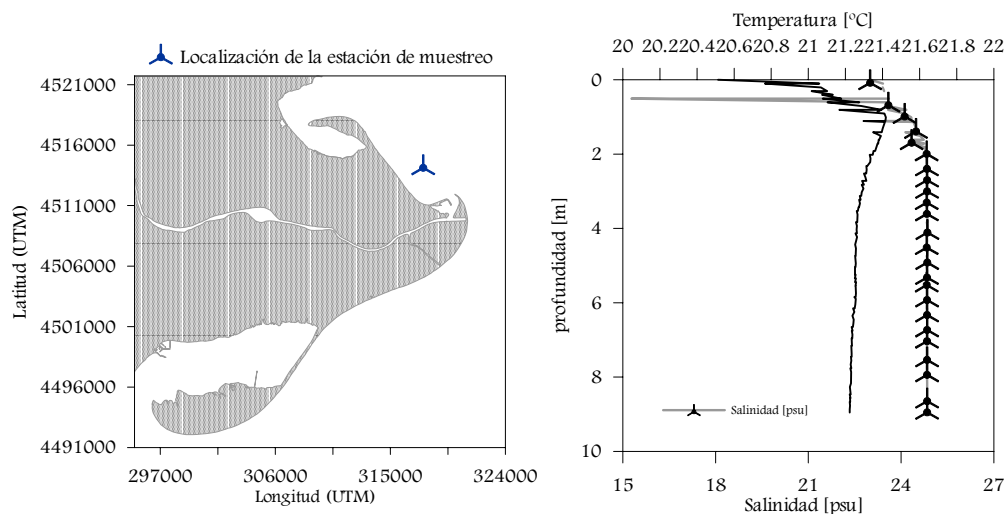


Figura 3.36. Perfil de CTD en la estación de la pluma (M5, 10 de Octubre de 1999).

iii.3 Perfiles de Hydrolab

Las medidas con el Hydrolab se llevaron a cabo en las estaciones del río los días 5 y 6 de Octubre (figura 3.37). Con el Hydrolab también se hicieron perfiles en las estaciones de las

secciones transversales descritas anteriormente. Al igual que en los casos anteriores, estos datos sirvieron para situar la cuña salina en el estuario en esta época del año.

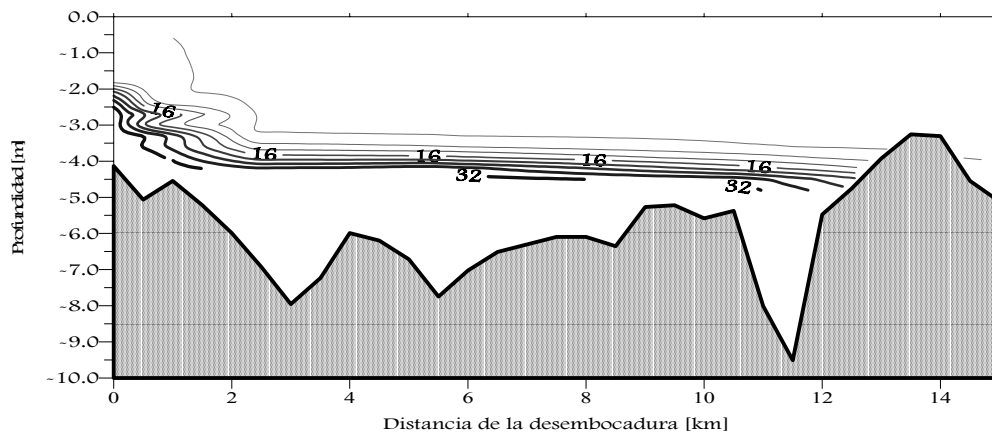


Figura 3.37. Condiciones de Salinidad en el estuario, medidas con el Hydrolab para PIONEER III, 6 de Octubre, 1999.

iii.4 Calidad de Agua

Para las medidas de calidad de agua, además de las tomas de muestras en las estaciones de río y pluma como en las campañas anteriores, se utilizaron también el CTD (río y pluma) y el Hydrolab (solo en río). En las estaciones de río las muestras de agua se tomaron a profundidades preestablecidas (0.0, 1.5, 3.5, 4.0 m) y de acuerdo a la profundidad de la interfase, localizada con el Hydrolab, se tomaron 3 muestras arriba de ella, a 10, 20 y 30 cm, una en la interfase y 2 por debajo de la misma, a 10 y 20 cm. El día 7 de Octubre se tomaron muestras en dos secciones transversales. Igualmente, se tomaron muestras de fitoplancton superficial. En la pluma del río las muestras se tomaron con el uso del SWAS (descrito anteriormente).

iv. PIONEER IV

La campaña PIONEER IV tuvo lugar entre los días 1 y 6 de Febrero del 2000. Al igual que las 3 campañas anteriores, el objetivo era el de caracterizar las condiciones del estuario del Ebro, aunque en este caso bajo condiciones de invierno. Los días 2 días 3 y 5 de Febrero fueron utilizados para muestreos en el río, y el 1 y 4 de Febrero para muestreos en la pluma (figura 3.38).

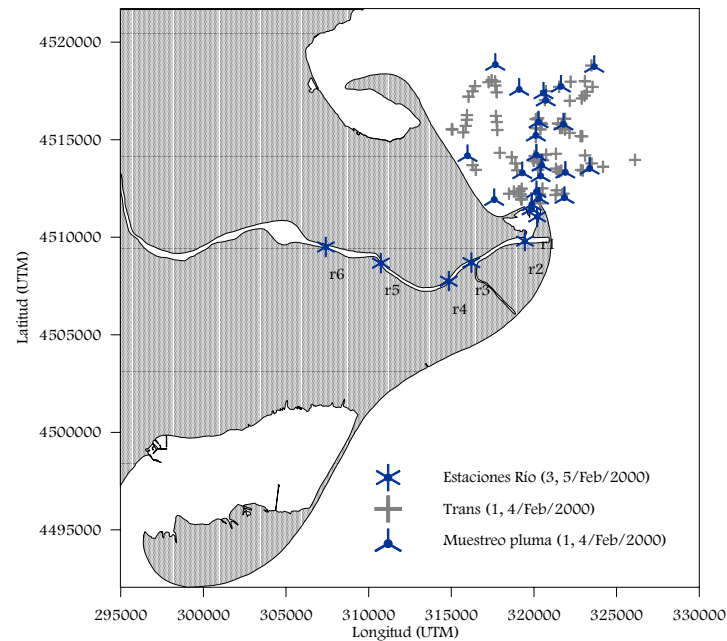


Figura 3.38. Posiciones de las estaciones de muestreo para PIONEER IV, (Febrero, 2000)

La descarga del río varió entre los 111.4 y los 417.4 m^3s^{-1} durante toda la campaña. Tuvo un promedio de 274.4 m^3s^{-1} . En los muestreos del río, la descarga varió entre los 215 y 398 m^3s^{-1} el 3 de Febrero y entre 111 y 398 m^3s^{-1} el 5 de Febrero. Se tiene que tener en cuenta que hay un cierto desfase entre el momento en que se mide el caudal en la estación de control (Tortosa) y el momento en que se hacen los muestreos.

iv.1 Perfiles de corrientes

Las medidas hidrodinámicas consistieron en perfiles de corrientes detallados 2D y 3D, tomados con el ADP. A diferencia de los resultados de la calidad de agua, el CTD y el Hydrolab, que mostraron la presencia de la cuña salina a unos 5 o 6 km de la desembocadura, los perfiles de ADP no mostraron de manera clara dicha presencia en ninguna de las estaciones. La presencia de agua marina detectada por los otros aparatos fue en zonas muy cercanas al fondo, por lo que el ADP no pudo obtener esas medidas debido a sus características de medición y la altura de la estructura protectora (ver figura 3.39).

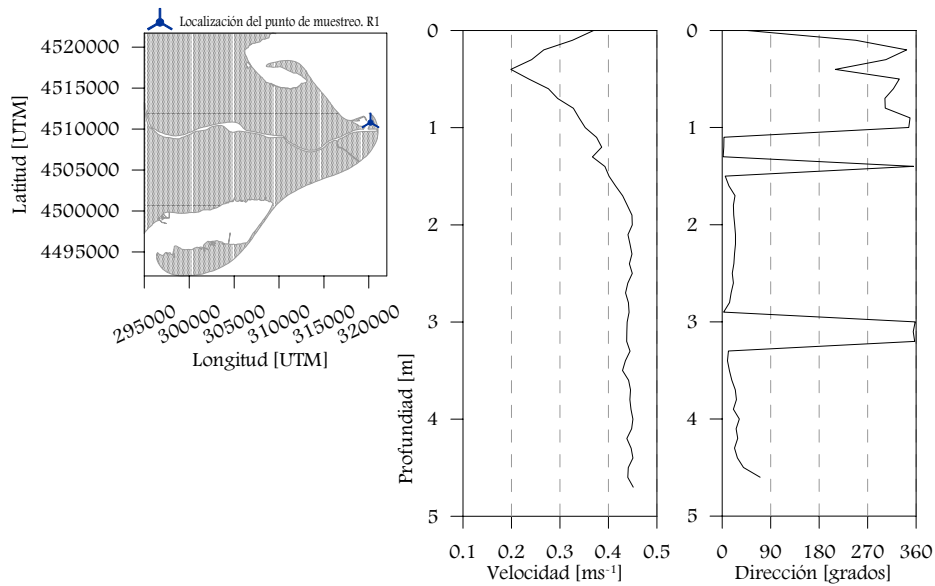


Figure 3.39. Velocidad y dirección medida por el ADP en R1 3 de Febrero del 2000.

iv.2 Perfiles de CTD

Los perfiles de CTD se llevaron a cabo en las dos zonas de estudio, los días 3 y 5 de Febrero para la zona del estuario y los días 1 y 4 de Febrero para la zona de la pluma. Los perfiles obtenidos con el CTD durante PIONEER IV, muestran la casi ausencia de la cuña salina. Solo en las partes más cercanas al fondo y cerca de la desembocadura se encuentran aguas de origen marino, con salinidades aproximadas a 30 ‰. En las estaciones mas alejadas de la desembocadura solamente se encuentra agua salobre en las capas profundas, y en la última estación (R6), la columna de agua presentaba prácticamente solo agua del río, con salinidades inferiores a 1 ‰ (ver figura 3.40).

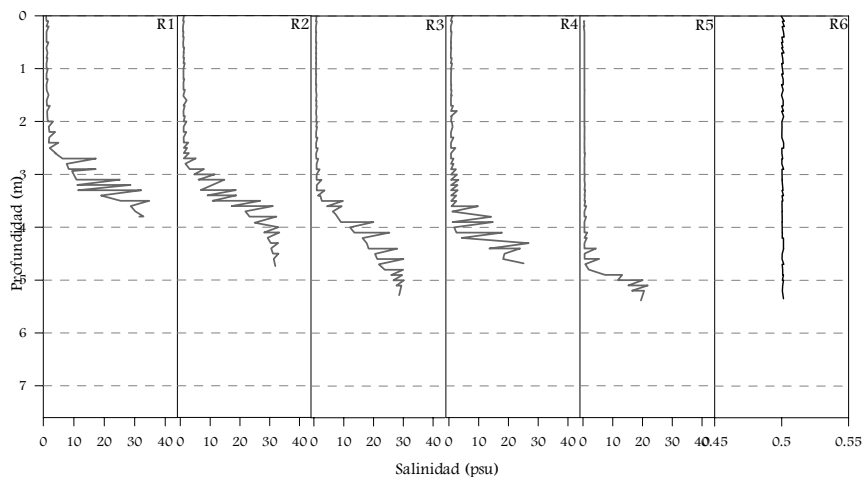


Figura 3.40. Perfiles de CTD en el estuario para el 5 de Febrero del 2000.

iv.4 Calidad de Agua

Como en todas las campañas PIONEER, se tomaron muestras de agua tanto en el estuario como en la pluma. El sistema de muestreo fue el mismo empleado en todas las campañas anteriores. La figura 3.43 muestra la distribución de la salinidad superficial en la pluma para el 4 de Febrero del 2000, donde se ve que lleva una dirección predominantemente hacia el norte de la desembocadura y ligeramente hacia la costa.

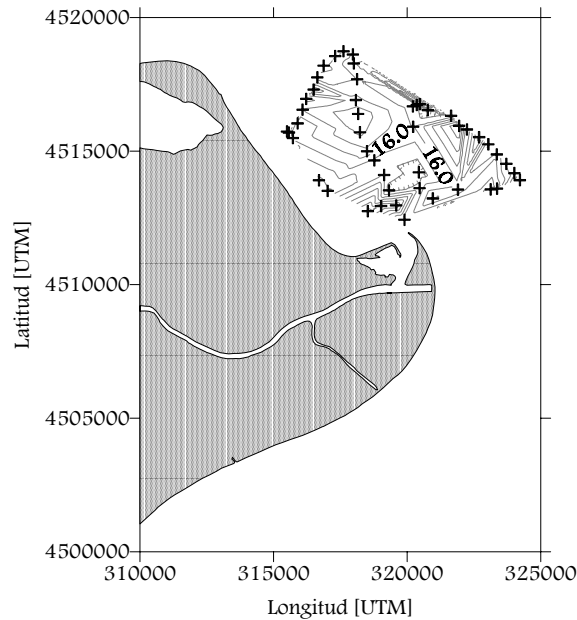


Figura 3.43. Salinidad superficial en la pluma, de los transectos superficiales del 4 de Febrero del 2000.

3.5. Parámetros físicos y químicos

Otro aspecto a tener en cuenta son los sólidos en suspensión. En base a las campañas de 1988, Ibáñez (1993) informó de unos valores de sólidos en suspensión en superficie comprendidos entre 6.4 y 16.2 mg/l, con medias de 12.03 mg/l en Deltebre y 10.48 mg/l, en la isla de Gracia. Los datos del fondo indican una mayor concentración de sólidos en suspensión, con valores medios de 45.53 y 44.3 mg/l respectivamente. El incremento de la turbiedad en la cuña salina es debido a la poca renovación y consiguiente acumulación de material particulado que sedimenta desde la capa superior, ya sea en forma orgánica (plancton) o inorgánica.

Estas concentraciones de sólidos en suspensión son muy bajas si se comparan con valores de épocas anteriores, ya que más del 96% de los materiales particulados quedan retenidos en los embalses de Ribarroja y Mequinzenza.

Por su parte el PHN (2000) menciona que con la construcción de los embalses de Mequinenza y Ribarroja el transporte por arrastre de fondo se retiene totalmente por los embalses y según Guillén y Palanques (1992) era prácticamente nulo en el periodo 1988-92. Asimismo indican que el transporte por suspensión se ha reducido notablemente con la construcción de los citados embalses, con lo que la aportación media anual que llega al Delta es inferior al 5% de la que existía a principios de siglo.

El mismo PHN, con datos de calidad de aguas registrados entre 1990 y 1997, llega a la conclusión de que la materia en suspensión supera el límite de la normativa de vida piscícola en Tortosa en un 5.32% de las ocasiones.

Finalmente, para completar este estudio de las características físicas se analiza someramente la circulación en la cuña salina. Según Guillén (1992), la capa superficial de agua dulce aumenta su velocidad desde Amposta hasta la desembocadura del río Ebro, como consecuencia de la disminución de la sección de paso del agua dulce cuando la cuña salina está presente. Las velocidades características del flujo en la capa superficial son de 0.10 a 0.25 ms⁻¹ en Amposta y de 0.3 a 0.8 ms⁻¹ en la Desembocadura. En el perfil vertical, las velocidades disminuyen rápidamente desde la superficie hasta la interfase agua dulce-salada, donde la velocidad es nula. Las velocidades del flujo en la capa de agua salada son inferiores a 0.15 ms⁻¹, y se suceden los periodos de movimiento de la cuña (hacia aguas arriba o aguas abajo) con periodos de quietud.

Por otra parte, este mismo autor también detectó oscilaciones de la velocidad en registros realizados en Deltebre. Dichas oscilaciones serían debidas a que, cuando la intrusión salina se desplaza aguas abajo o no se mueve, la velocidad de la capa de agua dulce es máxima, mientras que cuando la intrusión se desplaza aguas arriba, las velocidades del agua dulce son mínimas. Los valores de velocidad del flujo están afectados por el sentido de desplazamiento de la intrusión y no pueden considerarse representativos de toda la capa de agua dulce. El desplazamiento aguas arriba de la cuña salina frena el movimiento de la capa de agua dulce en la zona más próxima a la interfase y, por lo tanto, debe acelerarse el flujo en el resto de la capa de agua dulce, por lo que el perfil de velocidades en la misma es menos homogéneo. Por el contrario, cuando la intrusión salina se desplaza aguas abajo, este efecto de frenado no se produce y el perfil de velocidades en la capa de agua dulce es más homogéneo. Asimismo, sugiere que cuanto mayor es el contraste de velocidades, más elevado es el gradiente de salinidad de la interfase y, por el contrario, cuando los dos flujos se desplazan en el mismo sentido o el contraste de velocidades es bajo, el perfil de salinidad presenta un menor gradiente vertical.

Ibáñez (1993) indicó que, además de las situaciones dinámicas generadas por el avance o retroceso de la cuña salina, existe una circulación advectiva o gravitacional, característica de todos los estuarios estratificados. Esta circulación se genera por efecto de los aportes de agua continental al estuario, que producen una capa superior más o menos salobre (dependiendo de la mezcla) que fluye hacia el mar, y una capa inferior más salada que fluye en sentido inverso. Asimismo, indica que la circulación advectiva predomina sobre la mareal, aunque el efecto de ésta no es despreciable respecto a la primera. Cuanto menores son los caudales, más predominan los efectos difusivos sobre los advectivos. El hecho de que los efectos difusivos de la marea no sean despreciables, a pesar de que las mareas existentes en el Mediterráneo tienen un rango muy pequeño, se debe a que la circulación advectiva es débil en los estuarios altamente estratificados (debido a que la mezcla es escasa) y a que la sección del estuario es pequeña, lo que incrementa el efecto de las velocidades mareales. Para caudales fluviales bajos y cerca de la desembocadura, la circulación mareal de la cuña salina predomina sobre la advectiva (Guillén *et al.*, 1990). Estos autores indican que la cuña salina se mueve a razón de unos 10 cms^{-1} en sentido estuarino cuando la marea sube y en sentido fluvial cuando baja, mientras que la velocidad residual durante todo el ciclo mareal es del orden de 1.5 cms^{-1} en sentido estuarino, que sería la velocidad advectiva. Teniendo esto en cuenta, la longitud de la excursión mareal es del orden de 2 Km, de modo que sólo esta pequeña parte final de la cuña salina está sometida a una renovación rápida del agua por efecto de la marea, mientras que el resto se mueve hacia arriba y abajo, con una tendencia neta en sentido estuarino debido a la advección.

Finalmente, con respecto a la dinámica de la cuña salina, cabe apuntar que Ibáñez *et al.* (1997) señalan que cabe la posibilidad de que exista un mecanismo de retroalimentación que tienda a minimizar el aumento de la presencia de la cuña salina en el estuario, ya que la persistencia de caudales bajos tiende a disminuir la profundidad de la barra sumergida en la desembocadura y, de este modo se reduciría el caudal crítico que permite la formación y mantenimiento de la cuña salina. Este valor, según estos autores es de $400 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

En base a las campañas de 1988, Ibáñez (1993) indica que los valores de concentración de oxígeno disuelto en la superficie oscilan entre 7.2 y 9.6 mg l^{-1} en Deltebre y alrededor de 8 mg l^{-1} en la Isla de Gracia. En el fondo, la concentración disminuye rápidamente al formarse la cuña, con valores entre 0.3 y 6.5 mg l^{-1} (media de 3.11 mg l^{-1}) en Deltebre y un valor medio de 1.64 mg l^{-1} en la Isla de Gracia. Esta hipoxia o anoxia del estuario se debe a la descomposición de materia orgánica que se acumula en el fondo, donde la tasa de renovación del agua es pequeña.

El PHN (2000), con datos de calidad de aguas medidos entre 1990 y 1997, indica que en Tortosa, en ningún caso el oxígeno disuelto se situaba en valores inferiores a los mínimos de la normativa de vida piscícola, cosa que si sucede en los embalses situados aguas arriba (entre un 10 y un 20% de las ocasiones).

Por lo que respecta a los nutrientes, Ibáñez (1993) indicó que en las campañas de 1988 las concentraciones de ortofosfato disuelto en la superficie fueron en promedio de 1.80 μM en Deltebre (1.71 μM en Gracia y 1.32 μM en la desembocadura), con una tendencia general creciente (aunque irregular) desde principios de verano hasta diciembre. La disminución de ortofosfato en la primavera suele estar ligada al consumo del mismo por el fitoplancton. En la cuña los valores fueron superiores en Gracia y Deltebre (5.60 μM y 2.68 μM respectivamente) pero no en la desembocadura (0.60 μM), indicando que cuanto más cerca del límite de la cuña, mayor concentración de ortofosfato.

Las concentraciones de nitrito+nitrato en el mismo periodo y en superficie muestran una tendencia similar a la del ortofosfato, aunque con ciertas desviaciones. El valor medio fue de 138.05 μM en Deltebre (máximo de 208.7 μM y mínimo de 72.3 μM) y 169.48 μM en Gracia. En el fondo, las concentraciones de nitratos+nitritos fueron más bajas, con un valor medio de 25.1 μM en Deltebre, 20.08 μM en Gracia y 5.44 μM en la desembocadura).

Por su parte, el PHN (2000) menciona que se observa un aumento progresivo del nivel de fosfatos y nitratos desde comienzos de los 70 debido al desarrollo de las actividades agrícolas e industriales en la cuenca y a sus efluentes urbanos. Desde finales de los 80 el proceso parece estabilizarse e incluso mejorar en los años más recientes.

Basándose en datos medidos entre 1990 y 1997, el PHN indica que el amonio registrado en Tortosa (con valores medios superiores a 0.5 mg/l) excede la normativa de vida piscícola el 4.35% de las veces. El valor medio de fosfatos no llega a 0.7 mg/L, incumpliendo la normativa de prepotables un 21.28% de las ocasiones, aunque en los últimos años se había detectado una mejora, de modo que en 1997 la concentración media fue inferior a 0.2 mg l^{-1} . La distribución mensual de los fosfatos es muy irregular.

Respecto a otros parámetros químicos, en el PHN se analiza la calidad de las aguas en 4 puntos del Bajo Ebro (Mequinenza, Ribarroja, Ascó y Tortosa) teniendo en cuenta datos obtenidos entre 1990 y 1997. Considerando los datos registrados en Tortosa, el contenido en sales más importante lo constituyen los sulfatos, con un valor medio de 198 mg/l y un

incumplimiento de la normativa de prepotables del 22.34%. En general, en invierno y primavera las condiciones son mejores, con concentraciones inferiores a 200 mg/l, que se incrementan a partir del mes de julio hasta diciembre. El comportamiento de los cloruros es muy similar al de los sulfatos, con valores medios de 116.79 mg/l en Tortosa y un mejor comportamiento estacional en invierno y primavera.

Por su parte, el LIM y la UPV en las seis campañas realizadas también llevaron a cabo mediciones de nutrientes en el estuario. En la figura 3.44 puede observarse por ejemplo la distribución de nitratos durante la campaña de primavera de 1997.

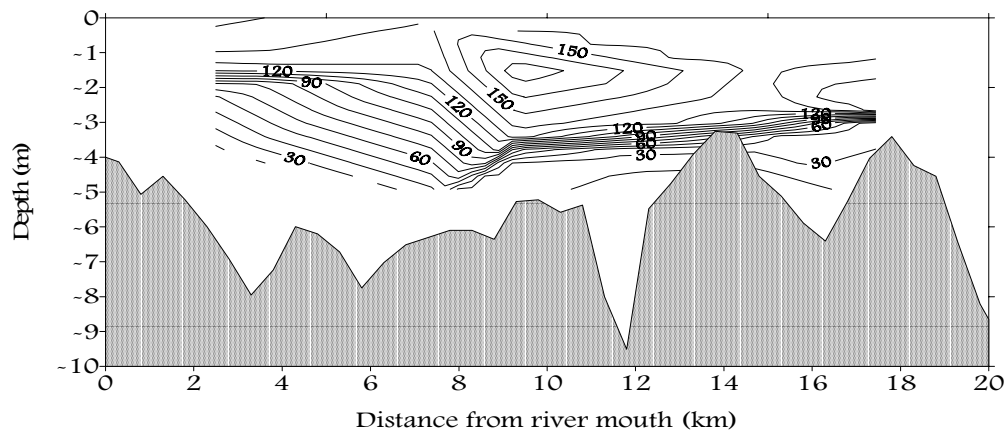


Figura 3.44. Nitratos en el estuario (μM), 31 de marzo de 1997.

En esta figura se observa como las concentraciones de nitratos disminuyen en la cuña salina. La concentración media de nitratos en la cuña salina fue de 38 μM ., con un máximo de 83 μM . y un mínimo de 5.6 μM . En el resto del estuario esta concentración osciló entre 114 y 178 μM . con un valor medio de 140 μM .

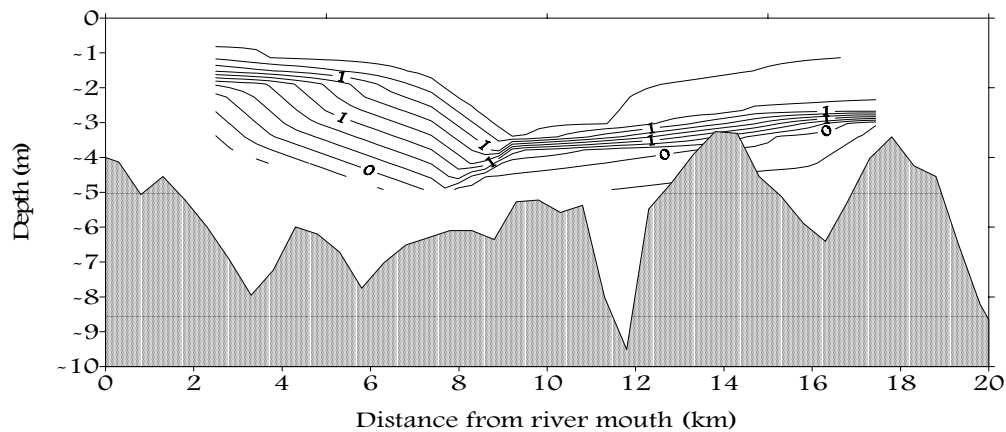


Figura 3.45. Nitritos en el estuario (μM). 31 de marzo de 1997.

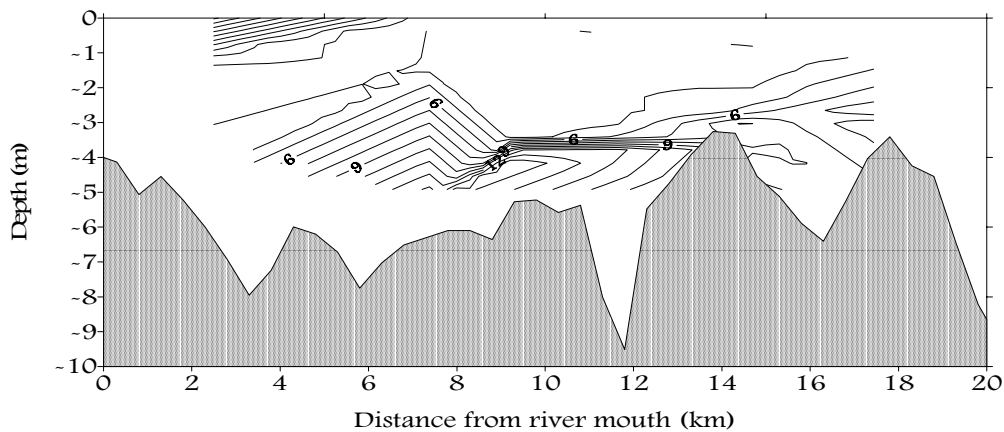


Figura 3.46. Amonio en el estuario (μM). 31 de marzo de 1997.

Las dos figuras anteriores (3.45 y 3.46) muestran respectivamente la distribución de nitritos y amonio en el estuario durante la campaña de primavera de 1997. Se aprecia que las concentraciones de estos compuestos de nitrógeno son muy inferiores a las de nitratos.

Por otra parte, también se midió el fósforo soluble reactivo o PSR (ortofosfato). La figura 3.47 muestra las isólinas de concentraciones del mismo en dicha campaña.

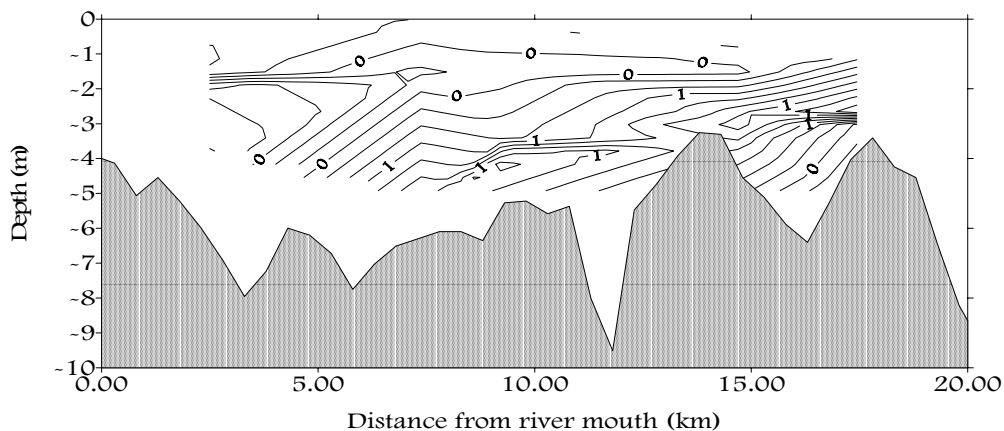


Figura 3.47. PSR (ortofosfato) en el estuario (μM). 31 de marzo de 1997

Las concentraciones de PSR oscilaron entre 0.09 y 0.73 μM en la cuña salina (promedio de 0.44 μM) mientras que en el resto del estuario variaron entre 0.29 y 0.79 μM (media de 0.50 μM).

El último nutriente que se midió fue el silíceo (ácido ortosilícico). En la figura 3.48, se muestran las concentraciones de dicho compuesto en el estuario, el día 31 de marzo de 1997.

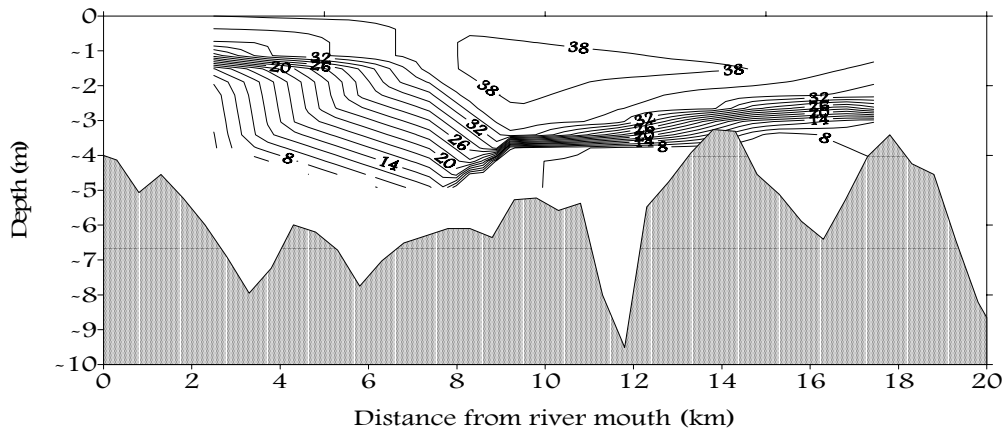


Figura 3.48. Ácido ortosilícico en el estuario (μM). 31 de marzo de 1997

Durante las otras campañas se efectuaron medidas similares. Así, el 30 de junio de 1997, la distribución de nitratos en el estuario era la que se muestra en la figura 3.49.

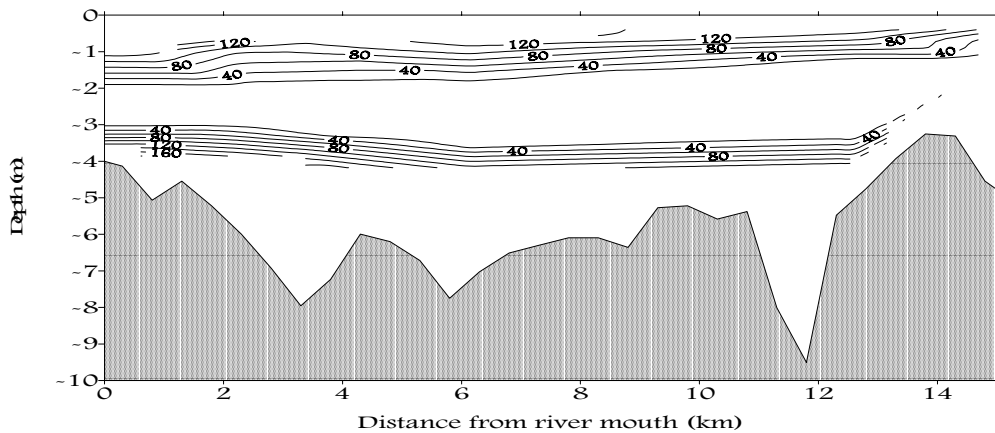


Figura 3.49. Nitratos en el estuario (μM). 30 de junio de 1997

Las concentraciones de nitratos durante el verano (al igual que las de silicatos) fueron un 15 a un 40% superiores a las de la primavera. Por el contrario, las de fósforo fueron del orden del doble. En las figuras siguientes (3.50 y 3.51 respectivamente) se muestran respectivamente las concentraciones de nitritos y amonio.

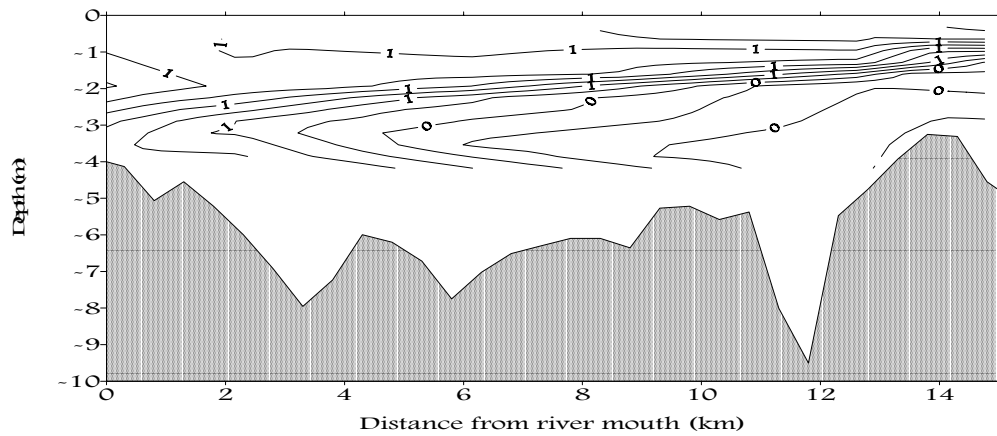


Figura 3.50. Nitritos en el estuario (μM). 30 de junio de 1997

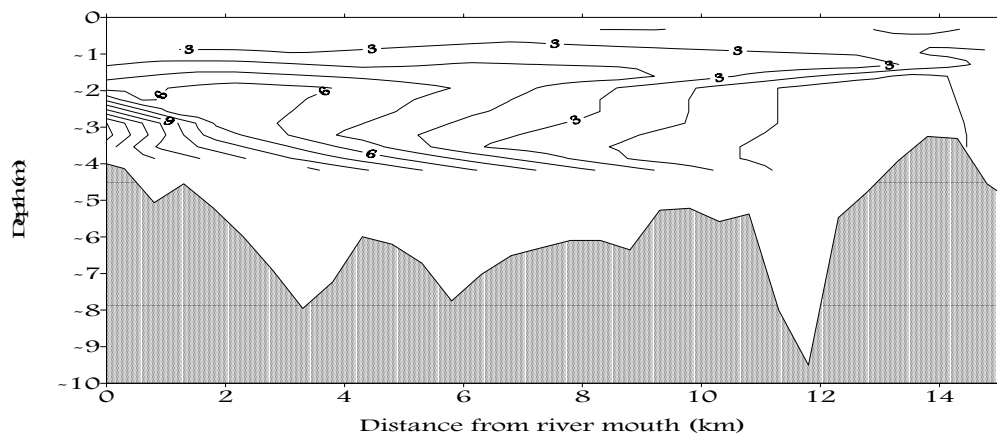


Figura 3.51. Amonio en el estuario (μM). 30 de junio de 1997

Durante las campañas PIONEER se tomaron igualmente medidas de nutrientes en el estuario del río (Nitratos, Nitritos, Amonio, PSR y Ac. Ortosilícico).

Estas mediciones se resumen en las figuras siguientes, en las que se han representado las concentraciones de los distintos nutrientes con respecto a la salinidad (figuras 3.52 a 3.56).

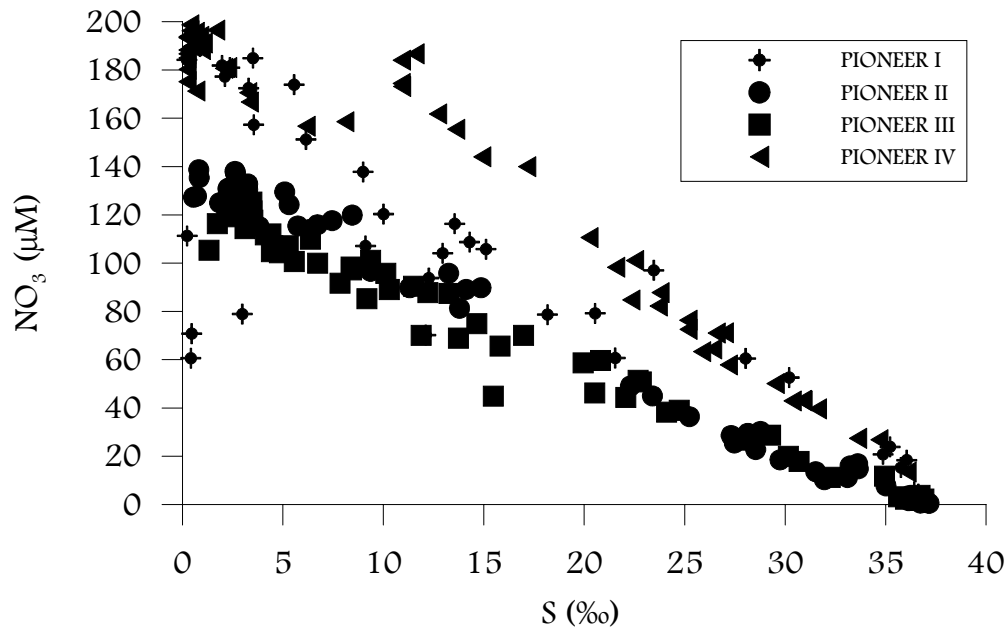


Figura 3.52. Concentraciones de nitratos con respecto a la salinidad. Campañas PIONEER.

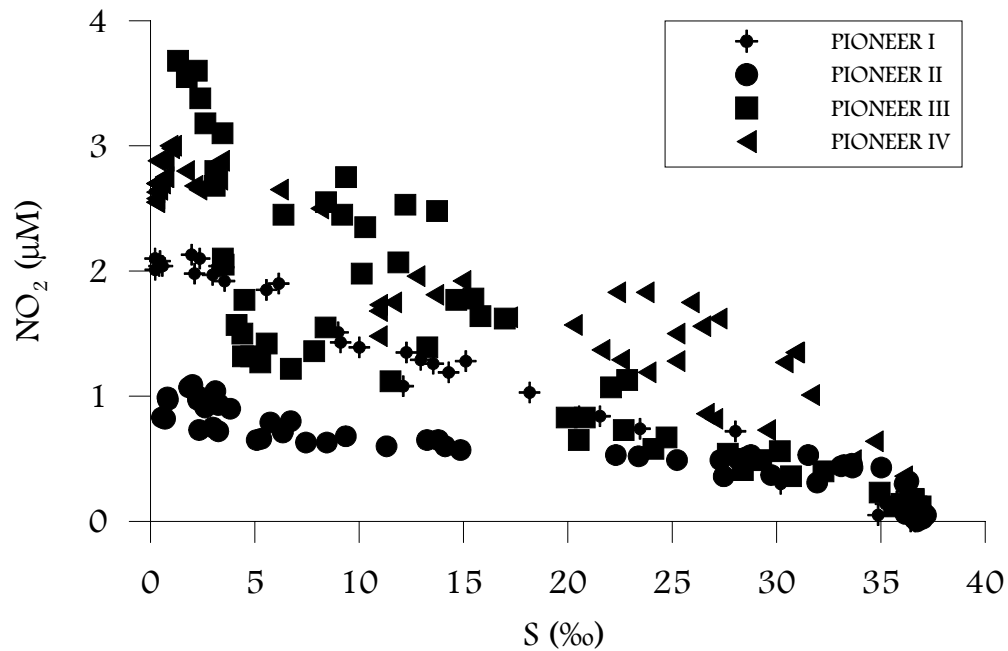


Figura 3.53. Concentraciones de nitritos con respecto a la salinidad. Campañas PIONEER.

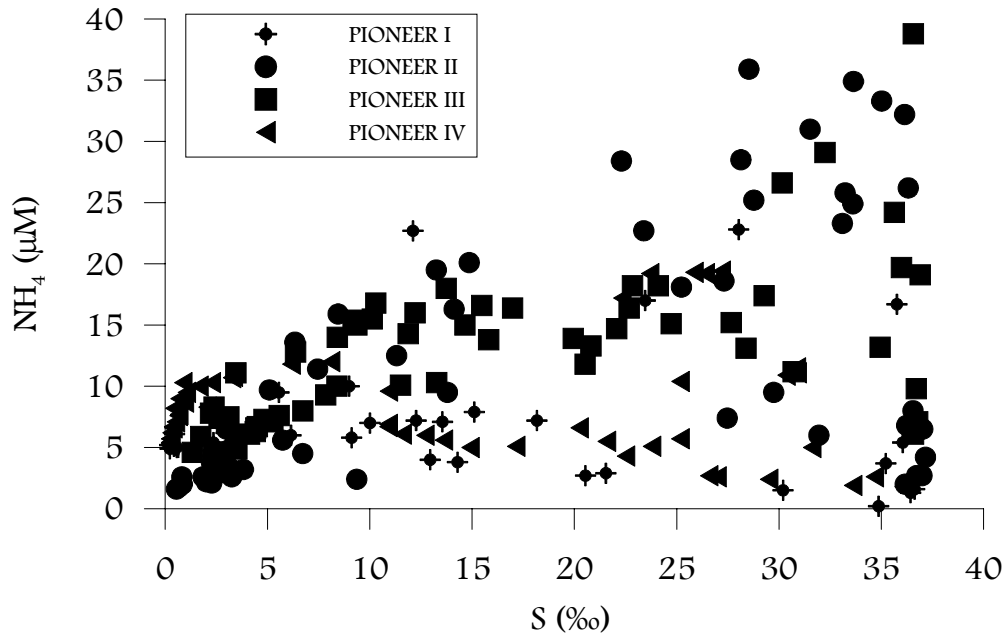


Figura 3.54. Concentraciones de amonio con respecto a la salinidad. Campañas PIONEER.

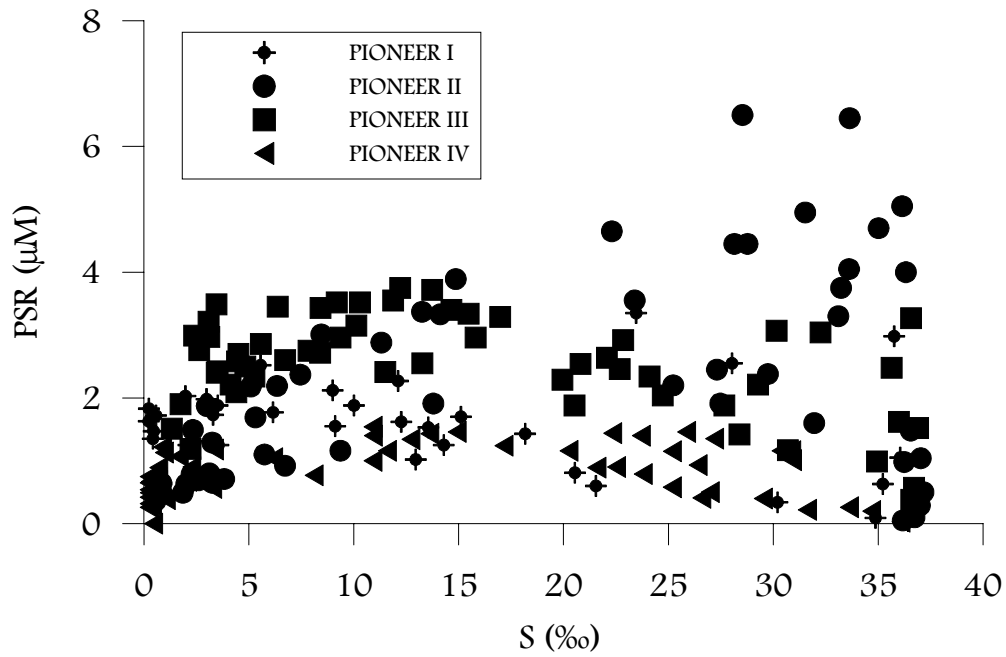


Figura 3.55. Concentraciones de PSR con respecto a la salinidad. Campañas PIONEER.

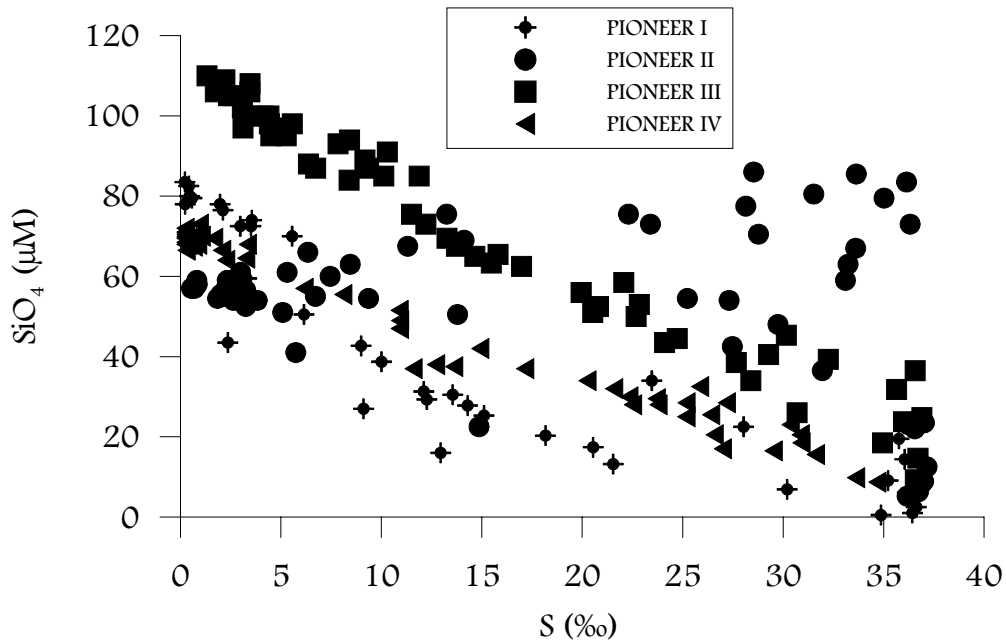


Figura 3.56. Concentraciones de ácido ortosilícico con respecto a la salinidad. Campañas PIONEER.

Se comprueba que los nutrientes, en algunos casos, siguen un comportamiento conservativo con respecto a la salinidad. Esto implica que existe una relación casi lineal e inversa entre el nutriente y la salinidad, por lo que a mayor salinidad, menor concentración de nutriente y a menor salinidad, mayor concentración. La tabla III.4 muestra el comportamiento de los nutrientes con respecto a la salinidad en las distintas estaciones. “Si” indica que el comportamiento es conservativo (existe la relación lineal inversa) y “No” que no lo es. En los casos en que aparecen ambos términos, el comportamiento conservativo se siguió sólo en algunos puntos de medida (generalmente cerca de la desembocadura).

Tabla III.4. Comportamiento conservativo de los nutrientes respecto a la salinidad

Nutriente	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
Nitrato	Si	Si	Si	Si
Nitrito	Si	Si	Si	Si
Amonio	No	No	No	No
PSR	No	No	Si-No	No
Silicato	Si-No	No	Si	Si

Se constata que el nitrito y el nitrato siguen siempre dicho comportamiento conservativo, mientras que el amonio nunca, el PSR sólo en algunos puntos en otoño y el silicato en otoño, invierno y algunos puntos en primavera. Todo ello está relacionado con los procesos de

producción primaria (crecimiento del fitoplancton) y mineralización del nitrógeno, así como con el hecho de que, aparentemente, el fósforo es el nutriente limitante en el estuario.

3.6. Parámetros biológicos

En base a las campañas de 1988, Ibáñez (1993) informó de los valores de concentración de clorofilas totales (a+b+c) registrados en Deltebre y la Isla de Gracia. Tanto los valores de superficie como los del fondo siguen la misma tendencia, con un fuerte incremento en superficie hasta finales de agosto ($300.7 \mu\text{g l}^{-1}$ en Deltebre y $34.5 \mu\text{g l}^{-1}$ en la isla de Gracia) y un posterior descenso hasta diciembre, con valores mínimos de $2.2 \mu\text{g l}^{-1}$ en Deltebre y 3.5 en Gracia y valores medios de 18.21 y $18.22 \mu\text{g l}^{-1}$ respectivamente. En el fondo los valores fueron mucho más bajos que en la superficie, con medias de $4.88 \mu\text{g l}^{-1}$ en Deltebre y $3.43 \mu\text{g l}^{-1}$ en Gracia, con máximos de 12.8 y $6.2 \mu\text{g l}^{-1}$ respectivamente y un mínimo absoluto de $1.3 \mu\text{g l}^{-1}$ en Deltebre. La proporción de clorofila a con respecto a las totales fue en promedio del 84.8% en superficie y 80.0% en el fondo.

El LIM y la UPV, en sus campañas, también obtuvieron datos de clorofila a. En la figura 3.57, se muestran las concentraciones medidas el día 31 de marzo de 1997.

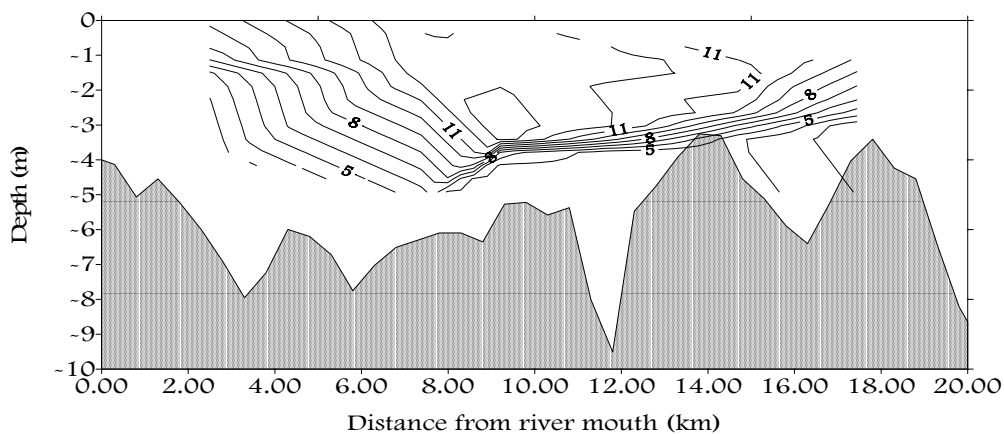


Figura 3.57. Concentraciones de clorofila a ($\mu\text{g l}^{-1}$). 31 de marzo de 1997.

Se constata que las mayores concentraciones están cerca de la superficie debido a que la luz solar incide más directamente favoreciendo la fotosíntesis. Las concentraciones de clorofila a en el estuario oscilaron entre 2 y $13.5 \mu\text{g l}^{-1}$, con un promedio de $7 \mu\text{g l}^{-1}$.

En la figura 3.58 muestra las concentraciones de clorofila el día 30 de junio de 1997. Las concentraciones medidas de clorofila *a* oscilaron entre 0.9 y 35.9 $\mu\text{g l}^{-1}$, con un promedio de 8.9 $\mu\text{g l}^{-1}$.

Durante las campañas PIONEER también se midió clorofila *a*. Las figuras 3.59 a 3.62 muestran las isolíneas de concentraciones durante dichas campañas.

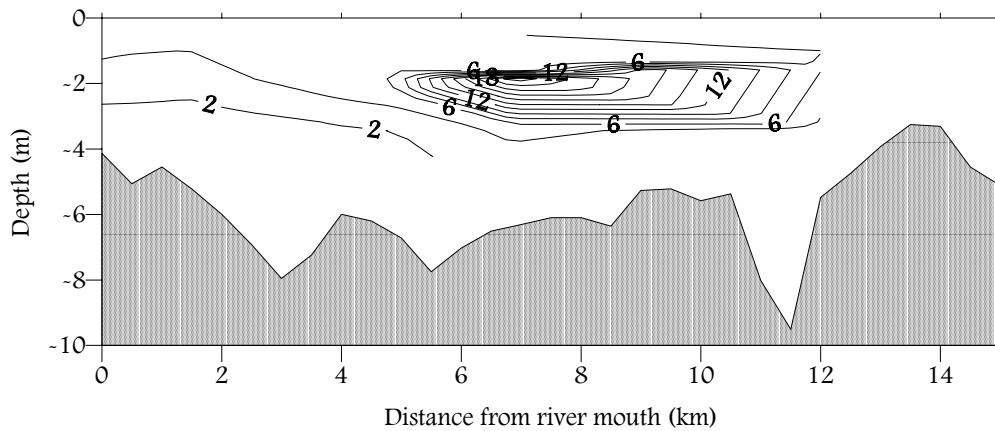


Figura 3.58. Concentraciones de clorofila *a* ($\mu\text{g l}^{-1}$). 31 de marzo de 1997.

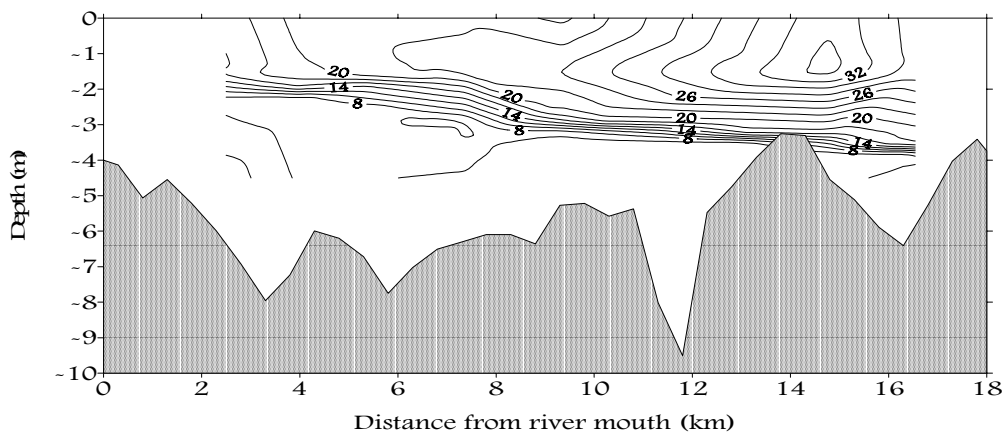


Figura 3.59. Concentraciones de clorofila *a* ($\mu\text{g l}^{-1}$). 5 de abril de 1999.

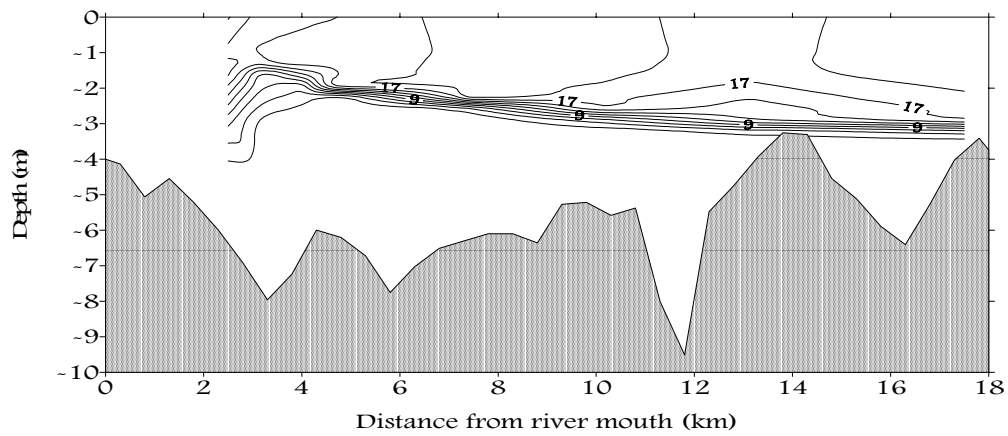


Figura 3.60. Concentraciones de clorofila a ($\mu\text{g l}^{-1}$). 12 de julio de 1999.

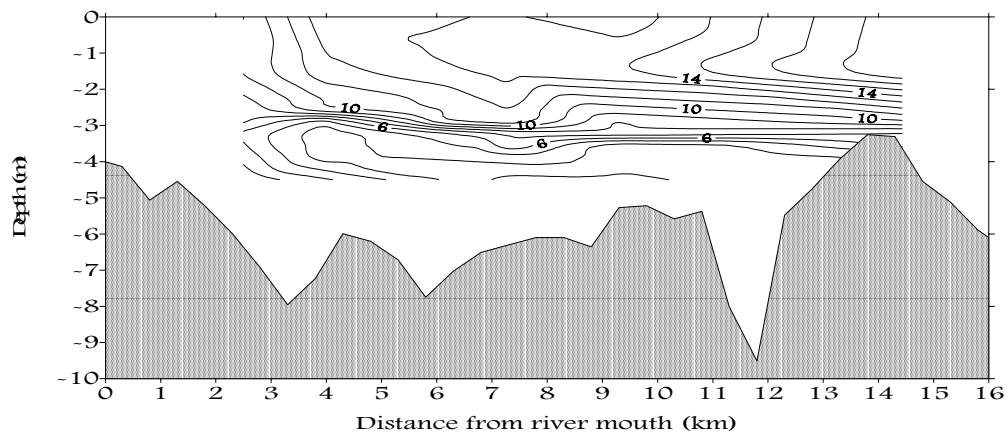


Figura 3.61. Concentraciones de clorofila a ($\mu\text{g l}^{-1}$). 5 de octubre de 1999.

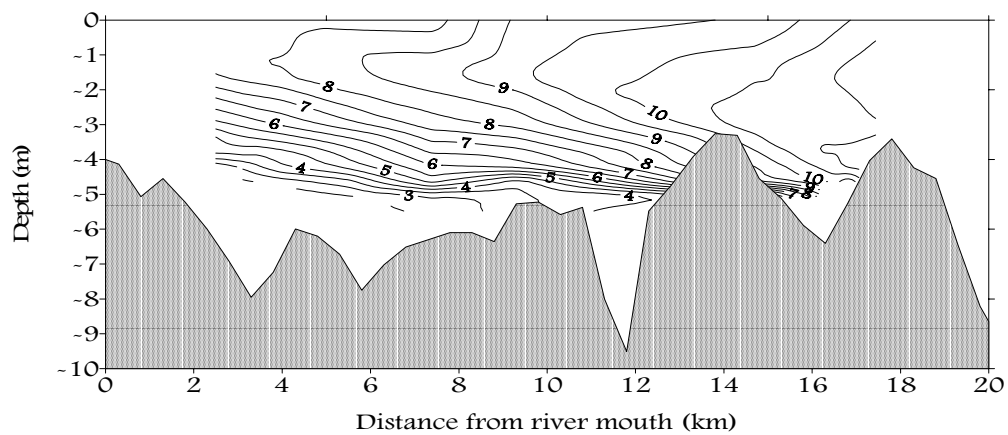


Figura 3.62. Concentraciones de clorofila a ($\mu\text{g l}^{-1}$). 5 de febrero de 2000.

En estas figuras se constata que las mayores concentraciones se producen en primavera y verano, que es cuando hay mayor productividad debido a la mayor radiación solar. Estas concentraciones son algo inferiores en otoño y sobre todo en invierno.

