

#### 4. DINÁMICA DE LA CUÑA SALINA

##### 4.1. Factores que afectan a la dinámica de la cuña salina

Se considera que las características de un estuario y su grado de estratificación están determinados por dos factores fundamentales: la descarga de agua dulce, que tiende a mantener la estratificación frente al agua salina que penetra en el curso inferior del río, y la marea, que tiende a producir mezclado turbulento y por consiguiente a reducir la estratificación. La preponderancia de uno de estos factores frente al otro definirá el tipo de estuario y el nivel de mezcla y estratificación existentes en el mismo.

El Delta del Ebro es un ambiente micromareal, con mareas astronómicas que tienen un rango medio de unos 16 cm. Esto implica que el caudal de agua dulce predomina sobre el efecto mezclador de la marea y, por lo tanto, cuando hay intrusión de agua salina en el cauce del río, el estuario es altamente estratificado, caracterizándose por la presencia de una cuña salina con una haloclina perfectamente definida.

Por consiguiente, la localización y dinámica de la cuña salina en el tramo estuarino del río Ebro está controlada fundamentalmente por el caudal, aunque como se verá a continuación, la morfología del cauce del río juega también un papel determinante en la posición y dinámica de la cuña salina. Además, hay otros factores como son las variaciones del nivel del mar (especialmente mareas meteorológicas) y otros factores meteorológicos que, si bien juegan un rol de menor importancia, también intervienen en este proceso. La descripción que se realiza a continuación de los factores que influyen en la dinámica de las cuñas salinas en el Delta está basada principalmente en los trabajos de Guillén (1992), Ibáñez (1993) y del Laboratorio de Ingeniería Marítima de la UPC conjuntamente con el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente de la UPV (Martínez *et al.*, 1999, 2000; Mösson *et al.*, 1999, Movellán *et al.*, 1999, Sierra *et al.*, 2002).

Por su parte, el PHN (2000) indica que la geometría de la cuña salina depende de la morfología del cauce, del caudal circulante y del nivel del mar. Y que al ser pequeñas las sobreelevaciones del nivel medio del mar provocadas por las mareas (del orden de 20 cm) y muy puntuales las provocadas por otras causas como vientos persistentes y cambios de presión, el régimen dinámico de la cuña viene controlado principalmente por el caudal del río y la morfología del cauce. Sólo en las situaciones de caudales bajos y en los tramos cerca de la desembocadura (hasta unos 2 Km aproximadamente), la circulación mareal predomina sobre la gravitacional.

#### 4.1.1. Caudal del río

El caudal es un factor determinante en la localización de la cuña, tal como apuntan diversos autores. En general, según Guillén (1992) la cuña salina es expulsada del cauce del río por el flujo fluvial cuando los caudales son superiores a  $350\text{-}400\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . A medida que el caudal disminuye, la cuña puede penetrar más hacia tierra: para caudales entorno a  $250\text{-}350\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , la cabeza de la intrusión alcanza aproximadamente hasta Migjorn; con caudales de  $150\text{-}250\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , la cuña llega hasta el alto topográfico del fondo del lecho de la isla de Gracia y, finalmente, con caudales inferiores a  $150\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , el agua puede llegar hasta Amposta o incluso aguas arriba. Sin embargo, hay que tener en cuenta que estas cifras varían según los distintos autores, tal como se verá posteriormente.

Es importante señalar que si bien los mencionados límites de la cuña salina son los más habituales, en ocasiones los datos de campo no se corresponden con ellos, ya que aunque las variaciones del caudal del río y la morfología del cauce son los agentes fundamentales que controlan la posición de la cuña salina, existen otros factores que también pueden ser importantes para determinar la distribución y circulación de la cuña bajo determinadas condiciones. Así por ejemplo, en una campaña de medidas realizada en enero de 1990, con un caudal de  $200\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , se observó que la cuña salina se retiraba de la estación de medida situada en la Desembocadura, cuando de acuerdo con este caudal, el límite de la cuña debería estar situado en las proximidades de la Isla de Gracia.

Por su parte, Ibáñez (1993) describe que durante el periodo 1988-91, los numerosos datos obtenidos sobre la presencia de cuña salina indican que ésta no penetraba por la desembocadura con caudales superiores a  $400\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , que es el caudal medio de la década de los 80. Esta constatación empírica indicaría la existencia de un sistema de autorregulación entre la profundidad de la desembocadura y la penetración de la cuña salina en función de la magnitud del caudal fluvial. Es preciso recordar que la barra de la desembocadura es el primer obstáculo que ha de superar el agua marina para penetrar dentro del tramo estuarino. El sistema funcionaría del siguiente modo: cuando el caudal fluvial es superior al caudal medio, la cuña salina desaparece y en la desembocadura predominan los procesos erosivos, mientras que cuando el caudal es inferior se establece la cuña salina y predominan los procesos sedimentarios. Esta dinámica comporta que después de un largo periodo de caudales bajos o altos, la profundidad de la desembocadura se modifique sensiblemente y por lo tanto se modifique el caudal crítico a partir del cual penetra la cuña salina, teniendo tendencia a aproximarse al caudal promedio del periodo en cuestión. Es decir, el sistema tiene tendencia a mantener más o menos constante el tiempo de presencia de la cuña salina teniendo en cuenta que este sistema opera a escalas temporales de orden mensual o anual.

Obviamente, este sistema deja de operar si se modifica artificialmente la barra de la desembocadura mediante, por ejemplo, su dragado. Como ejemplo de este sistema, durante el periodo comprendido entre julio de 1988 y abril de 1990 se produjo una presencia permanente de la cuña salina debido a la baja descarga fluvial y esto implicó la reducción de la profundidad de la desembocadura de 2 m. a poco más de 0.5 m, lo cual comportó el dragado de la barra de la desembocadura para permitir el paso de las embarcaciones de pesca.

Otro indicador de que el principal factor que determina la dinámica hidrológica de la cuña salina es el caudal fluvial, lo proporciona el hecho de que existe una buena regresión lineal entre la profundidad a la que se encuentra la interfase y el caudal medio diario del río en Tortosa (ver figura 4.1), indicando claramente que los cambios de la interfase, y en consecuencia los movimientos de la cuña salina, están fundamentalmente determinados por los cambios del caudal fluvial.

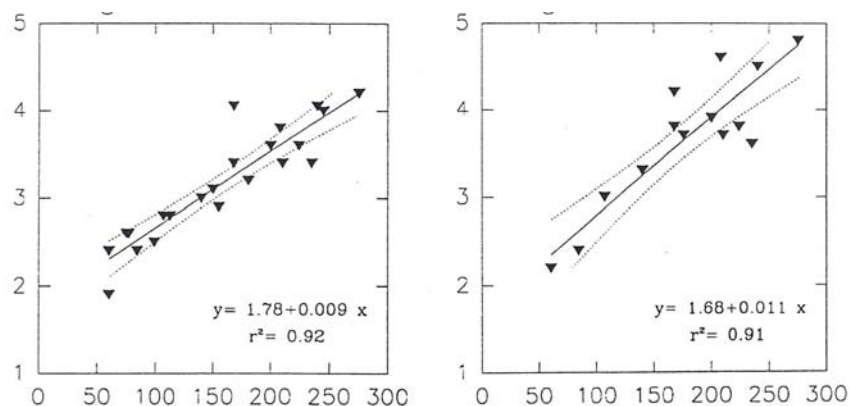
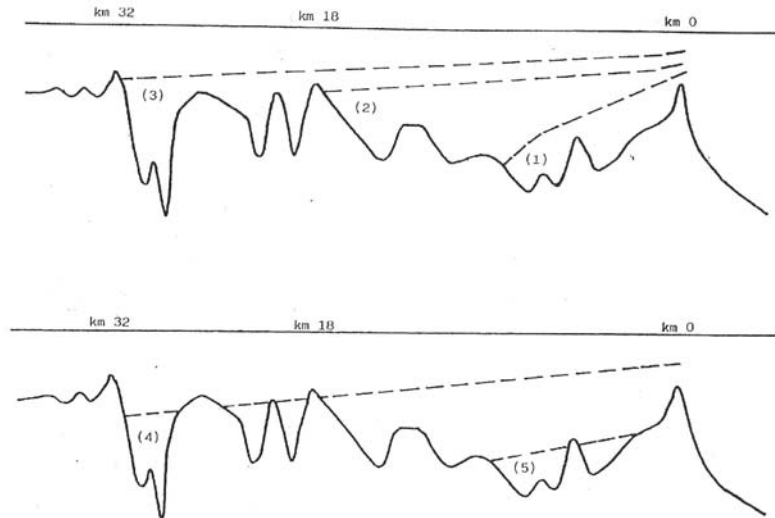


Figura 4.1. Regresión entre el caudal fluvial (abscisas, en  $m^3s^{-1}$ ) y la profundidad de la interfase (ordenadas en m.) en el Km 13 (izquierda) y en el Km 16 (derecha). Fuente: Ibáñez (1993).

Las desviaciones en la regresión se explican por el hecho de que ésta no se ha efectuado con el caudal instantáneo y local de la estación de muestreo sino con el caudal medio diario en Tortosa. Teniendo en cuenta que las oscilaciones diarias de caudal son importantes como consecuencia de la generación de energía hidroeléctrica, cabe prever cierta desviación entre el caudal instantáneo in situ y el caudal medio 20 Km río arriba. Otros factores que pueden generar desviaciones de la regresión son los cambios de nivel de mar, ya sea por mareas, vientos, cambios de presión atmosférica o cambios estacionales.



*Figura 4.2. La figura superior muestra las posiciones estacionarias más frecuentes de la cuña. El gráfico inferior esquematiza dos situaciones regresivas en las que la cuña ha quedado cortada. Fuente: Ibáñez (1993).*

Según Ibáñez (1993), en el Ebro se encuentran básicamente tres situaciones (ver figura 4.2) respecto a la posición de la cuña salina, aunque esporádicamente pueden detectarse otras posiciones estáticas y dinámicas (cambio entre dos posiciones estables). Estas posiciones son:

Para caudales fluviales superiores a  $300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , la cuña salina generalmente no se detecta en el tramo estuarino. Dependiendo del nivel del mar o de la dinámica reciente del río (como el hecho de haber tenido caudales inferiores durante los días anteriores), se puede detectar cuña salina o bolsas aisladas de agua salada en los últimos 5 Km del tramo estuarino con caudales de hasta  $400 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . El valor crítico de formación de la cuña salina se aproxima mucho al caudal medio anual del río, al igual que en otros ríos con cuña salina como el Ródano.

Cuando el caudal del Ebro es inferior a  $300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , la cuña salina penetra por la desembocadura y avanza rápidamente hacia la isla de Gracia, a 18 Km de la desembocadura, que es la posición más frecuente. Asimismo con caudales ligeramente inferiores a los  $300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  es posible encontrar posiciones transitorias en las que la cuña puede quedar confinada en algún tramo somero intermedio. La cuña salina no puede superar la isla de Gracia hasta que el caudal no baja de los  $100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .

Para caudales comprendidos entre  $80$  y  $100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , la cuña resta estacionaria en el siguiente obstáculo, que se encuentra en la isla de Sapinya (Km 20).

Para caudales inferiores a  $80 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  la cuña avanza hasta su límite máximo, a unos 32 Km de la desembocadura, que está situada aguas arriba de Amposta, a la altura del puente del gaseoducto, donde hay un tramo de muy poca profundidad (unos 2 m), debido a los depósitos de la confluencia con el barranco de la Galera.

Hay evidencias históricas de que, en años muy secos, cuando el río no estaba regulado por los embalses, la cuña podía avanzar hasta muy cerca de Tortosa (Aragón, 1943), que es el límite teórico de influencia marina del río Ebro.

Debido a la existencia de una relación lineal entre el caudal fluvial y la profundidad de la interfase, conociendo el primero, se puede conocer la posición de la cuña salina. De este modo, se puede calcular también de forma aproximada el tiempo medio de permanencia de la cuña en las diferentes posiciones a partir de datos de caudales. Ibáñez (1993) llega a la conclusión de que, según los datos de caudales mensuales de los años comprendidos entre 1960 y 1990, la cuña salina está, en promedio, ausente durante 6 meses, mientras que de los restantes 6 meses, 5 llega hasta la isla de Gracia y 1 hasta Amposta. Esto significa que el tramo estuarino funciona como un río durante la mitad del año y como un estuario durante la otra mitad, aunque dependiendo del año, esta proporción puede variar mucho.

Este mismo autor indica que durante la década 1980-90, debido a la disminución de caudales, la cuña salina ha estado presente, en promedio, durante 7.5 meses al año, de los cuales 2 meses aguas arriba de la isla de Gracia. La mayor persistencia de la cuña durante este periodo puede ser debida en parte al aumento progresivo de los consumos de la Cuenca y a la mayor regulación hidrológica durante los meses húmedos.

#### *4.1.2. Morfología del lecho fluvial*

Teniendo en cuenta datos batimétricos de 1988, la profundidad media del tramo estuarino del río Ebro es de 6.77 m, con una desviación típica de 1.8 m, un máximo de 13.5 m y un mínimo de 3.8 m. Cabe mencionar que las zonas con profundidades superiores a 10 m suelen coincidir con una especie de pozos denominados “peixeres” que en algunos casos son surtidores de agua dulce. El tramo Isla de Gracia-desembocadura tiene una profundidad media de 7.37 m, superior al tramo comprendido entre la Isla de Gracia y el límite superior de penetración de la cuña salina (5.87 m), que se sitúa, aproximadamente, a unos 4 Km aguas arriba de la villa de Amposta, donde se encuentra la desembocadura del barranco de la Galera y el río tiene una profundidad de 3 m. Los valores de profundidad máxima en el tramo Amposta - Isla de Gracia reflejan un máximo de 13.5 m y un mínimo de 3.8 m,

mientras que en el tramo Isla de Gracia - desembocadura son de 9.7 m y 4.0 m respectivamente.

En la batimetría realizada en 1999 se encontraron valores similares de profundidades. Así, en el tramo entre la Isla de Gracia y la desembocadura, la profundidad máxima fue de 9.5 m y la media de 7.35 m. En el tramo entre Tortosa y la Isla de Gracia, la máxima profundidad medida fue de 16.5 m y la media de 5.75 m.

A pesar de la existencia de una relación casi lineal entre la profundidad de la cuña salina y el caudal, el avance o retroceso del límite de la cuña salina no depende linealmente del caudal fluvial ya que, dentro de un amplio margen de variación del caudal, el límite de la cuña salina permanece constante. Eso es debido a la irregularidad del relieve del fondo del tramo estuarino, donde la existencia de tramos someros (como en la isla de Gracia) representa un obstáculo para el avance de la cuña salina y juegan un papel clave en su avance. En consecuencia, existen unas pocas posiciones estables para el límite de la cuña, donde ésta resta atrapada en un amplio intervalo de caudales fluviales. Por debajo de un valor crítico del caudal, la cuña avanza rápidamente hasta la siguiente posición estable. Por el contrario, cuando se supera el caudal crítico máximo para una posición determinada, la cuña comienza a retroceder hasta la anterior posición estable (o hasta la desembocadura).

El PHN también establece que el avance o retroceso de la cuña salina no depende linealmente del caudal del río. Este efecto de no linealidad se debe a la irregularidad del fondo del cauce, donde la existencia de singularidades (zonas de pequeño calado) representa un obstáculo al avance de la cuña salina, y juega un papel clave en su retroceso.

La figura 4.3 muestra un perfil del lecho del río y las principales posiciones de confinamiento de la cuña. Como puede verse, existen unas pocas posiciones umbrales dominantes (sobre todo 5, 18 y 32 Km) en los que el límite de la cuña se mantiene confinado para amplios rangos de caudales circulantes. Cabe mencionar que la batimetría es muy irregular. En consecuencia, un perfil longitudinal de la misma puede variar bastante según el transecto que se haya seguido.

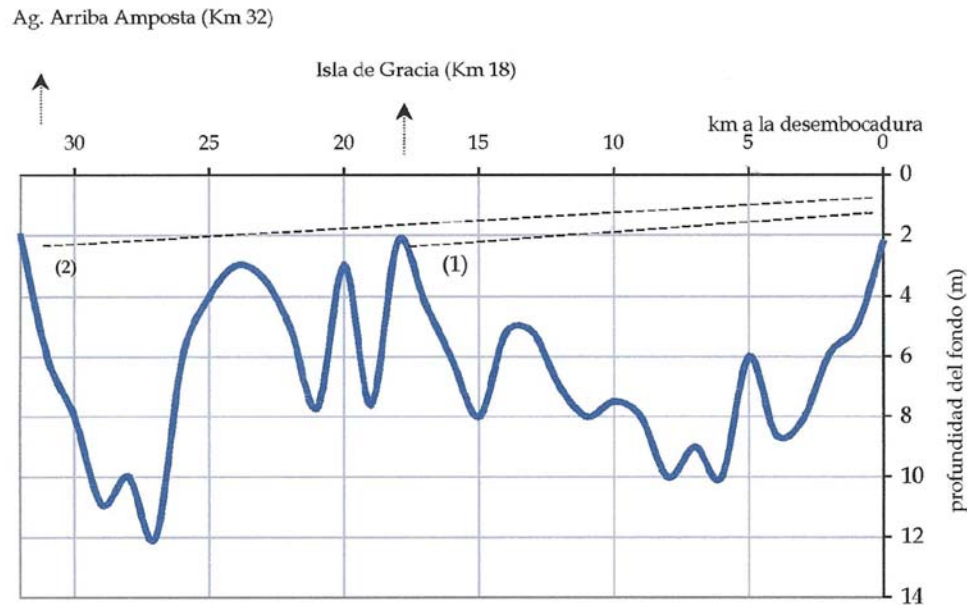


Figura 4.3. Fondo del cauce del río y posición de la cuña salina. Fuente: PHN.

#### 4.1.3. Nivel del mar.

Los estudios de comparación de los registros de mareas con los de velocidad y orientación del flujo muestran una buena correlación entre ambos. Durante el periodo de medición de octubre de 1989, las oscilaciones del nivel marino presentaron una variación máxima de 14 cm, que puede considerarse característica de la marea en el Delta del Ebro. Los periodos en los que el nivel del mar está alto se corresponden con el movimiento aguas arriba de la intrusión salina, mientras que el mínimo del nivel marino se corresponde con el desplazamiento aguas abajo de la cuña salina. Cuando el nivel marino está en una posición intermedia entre los máximos y los mínimos, la cuña salina no se desplaza por este efecto. Esta buena correlación entre la marea y la orientación del flujo de la cuña salina coincide con un periodo durante el cual el caudal del río Ebro permaneció constante.

En mediciones realizadas en enero de 1990, los resultados fueron idénticos a los anteriores, es decir que las oscilaciones del nivel marino guardaban una estrecha relación con los cambios de sentido del flujo de la cuña salina y que las máximas alturas de la marea se correspondían con desplazamientos aguas arriba de la cuña salina, mientras que las mínimas alturas de la marea se corresponden con desplazamientos aguas abajo.

Hay que tener en cuenta que además de su influencia sobre la circulación, las variaciones de nivel del mar (mareas astronómicas o meteorológicas) también pueden jugar un papel

importante en la distribución de la cuña salina bajo un caudal fluvial estable, a pesar del pequeño rango de marea que afecta a la zona. Así por ejemplo, en las campañas realizadas en enero y febrero de 1990, el caudal del río Ebro era inferior a  $250 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  y la cabeza de la cuña salina debería estar situada en la proximidad de la Isla de Gracia, según lo indicado anteriormente. Sin embargo, la cuña sólo alcanzaba hasta las proximidades de Migjorn, coincidiendo con un nivel marino situado 15 cm por debajo de lo habitual, originado por las altas presiones atmosféricas que suelen producirse en el Delta del Ebro durante el mes de enero.

Para condiciones de caudal bajo y estacionario, la circulación de la cuña salina está fuertemente afectada por el ciclo mareal en la zona próxima a la desembocadura, a pesar de que el rango mareal es sólo del orden de 20 cm. Este efecto es menos perceptible en el tramo estuarino más alejado de la desembocadura.

#### 4.1.4. Factores meteorológicos

Las observaciones de campo indican que cuando la dirección del viento favorece la circulación de la capa de agua dulce (vientos del NW), la cuña salina penetra más y el espesor de la capa de agua salada aumenta. Por el contrario, cuando el viento frena la circulación de la capa de agua dulce (vientos del E), ésta aumenta su espesor, al tiempo que la cuña salina puede penetrar menos hacia tierra y su espesor disminuye.

Estas observaciones parecen contradictorias con los datos sobre los cambios en la posición de la cuña salina en relación con las variaciones del nivel marino, puesto que los vientos procedentes del NW deben provocar un descenso del nivel marino en las proximidades de la costa y, en consecuencia, dificultan el desarrollo de la cuña salina, mientras que los procedentes del E elevarían el nivel medio del mar y favorecerían el desarrollo de la cuña. No obstante, el incremento de velocidad producido por un viento procedente del NW sobre la capa superficial de agua dulce provoca una reducción de la sección de paso de la capa de agua dulce y, puesto que la anchura del cauce se mantiene prácticamente constante, el aumento de la velocidad implica una reducción del espesor de la capa superficial que compensa con creces la variación del nivel marino por efecto del viento.

La influencia de otros factores como el oleaje, queda circunscrita a una zona cercana a la desembocadura, donde son perceptibles los efectos del mismo. Estos generalmente se traducen en un incremento de la turbulencia y en consecuencia, de la mezcla de agua dulce



y salada. La consecuencia de esto es que en las cercanías de la desembocadura, la anchura de la interfase es mayor, es decir, los gradientes verticales de salinidad son menores.

No existen estudios de la influencia de la temperatura en la dinámica de la cuña estuarina. Algunas mediciones efectuadas señalan que en las diferencias de temperatura entre el agua dulce de la capa superior y el agua salada de la cuña salina, oscilan entre 1 y 3 °C. En consecuencia, cabe suponer pues que el efecto de la temperatura es mínimo y su papel es secundario, ya que las diferencias de densidad que marcan la estratificación del estuario, vendrán dadas fundamentalmente por las diferencias de salinidad.

#### 4.1.5. *Importancia relativa de los distintos factores*

Los factores fundamentales que afectan a la dinámica estuarina son, como ya se ha visto en el apartado anterior, el caudal del río, la topografía del fondo y las variaciones del nivel del mar. Los dos primeros son los que definen, en la mayoría de los casos, la posición de la cuña salina, mientras que las variaciones del nivel del mar, al ser de rango limitado, sólo contribuyen con pequeñas desviaciones ocasionales a la dinámica de la cuña marcada por la descarga fluvial. La batimetría del río contribuye fijando unos puntos límite (de baja profundidad) entre los que se mueve la cuña en función del caudal. Otros factores como el viento y el oleaje sólo intervienen en zonas próximas a la desembocadura, incrementando la turbulencia y por lo tanto la mezcla entre agua dulce y salada, reduciendo algo la estratificación. Finalmente, el efecto de la temperatura sobre la dinámica de la cuña, está subordinado a la salinidad, que es el factor fundamental que contribuye a la estratificación.

Por otra parte, los factores principales que pueden afectar a la advección y la mezcla vertical son el caudal fluvial, el viento y la marea. Su influencia es distinta y compleja, en función de la escala temporal y la parte del estuario considerada. Además, mientras en los estuarios bien mezclados las mareas y los vientos suelen jugar un papel más importante en la mezcla, en los estuarios altamente estratificados esta importancia difiere. La advección de la cuña salina está en función del transporte de sal hacia el mar que se realiza en la capa superior y en la interfase (producido por el efecto de arrastre de la capa superior sobre la cuña salina) y de la magnitud del caudal fluvial. Por otro lado, entre los factores que afectan la mezcla, todo parece indicar que, por lo menos a escalas superiores al ciclo mareal, el viento es el más importante. Hay una tendencia general creciente de la mezcla en dirección a la desembocadura, lo cual es lógico por el efecto de las mareas y de los vientos cerca de la desembocadura. Esto implica una mayor energía dentro del sistema, lo que a su vez supone una mayor disipación turbulenta.

## 4.2. *Dinámica de la cuña salina del río Ebro*

### 4.2.1. *Antecedentes*

Aragón (1943) realizó el primer estudio completo del que se tiene noticia sobre la salinidad del agua del río Ebro, describiendo la intrusión salina durante los veranos de 1942 y 1943 y relacionándola con los caudales del río y el régimen de vientos. Según este autor, la intrusión salina puede alcanzar hasta Santa Cándida, población situada a 4 Km aguas abajo de Tortosa y a unos 35 Km de la desembocadura del río.

Guillén (1992) presentó los datos de once campañas estacionales de toma de datos hidrográficos y de muestras de agua y sedimento (mayo y septiembre de 1988; enero, julio y octubre de 1989; enero, febrero, julio y septiembre de 1990 y marzo y abril de 1991). En estas campañas se establecieron tres secciones: Amposta, Deltebre y Desembocadura, seleccionadas por presentar una sección de cauce quasi-rectangular y con pocas irregularidades. En cada una de ellas, se midió en tres perfiles situados en el margen derecho, el centro del río y el margen izquierdo. En estos 9 perfiles se realizó la toma de datos sistemática de cada campaña, que se completó con un muestreo más exhaustivo en aquellos casos y zonas de interés para el estudio. En cada uno de los perfiles, se obtuvieron la temperatura y la salinidad del agua, a intervalos de 1 metro desde la superficie hasta el lecho del río, mediante una sonda AANDERAA 3021A. Asimismo se realizaron mediciones de la velocidad del flujo mediante un correntímetro VALEPORT BRAYSTOKE BFM001. La toma de datos hidrográficos se completó durante las campañas de julio y octubre de 1989 y entre las campañas de enero y febrero de 1990, cuando se instalaron en la sección de la Desembocadura correntímetros AANDERAA RCM7, aproximadamente a 1 m sobre el fondo, lo que ha permitido obtener registros continuos de temperatura, salinidad, velocidad y orientación del flujo en la cuña salina. En la campaña de enero de 1990 se instaló, además del correntímetro de la Desembocadura, otro en la sección de Deltebre, de forma que se pudieran obtener medidas simultáneas en dos puntos diferentes.

En todas las campañas citadas se observó el desarrollo de una cuña salina, salvo en las de mayo de 1988 y marzo de 1991. Todas estas campañas tienen en común que el caudal del río Ebro era inferior a los  $300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , mientras que en las de mayo de 1988 y marzo de 1991 el caudal era superior a  $550 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . En la desembocadura del río, la capa superficial de agua dulce alcanzó un espesor mínimo de 1.5 m mientras que la capa profunda de agua salada llegó a un máximo de 4.5 m. La penetración de la cuña salina por el cauce del río varió entre 7 Km y 25 Km, aunque la máxima penetración aguas arriba, hasta Amposta, sólo se detectó en la campaña de Julio de 1989.

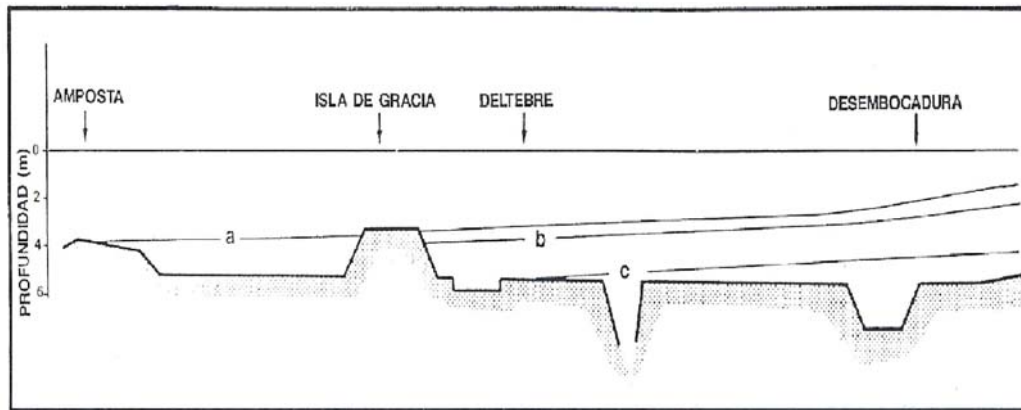


Figura 4.4. Esquema de la sección longitudinal del río Ebro, mostrando las posiciones características del límite de la cuña salina. Fuente: Guillén (1992).

El límite aguas arriba de la intrusión salina está controlado por la morfología del lecho del río. Los altos morfológicos de las islas de Gracia y Sapinya (ver figura 4.4) son los límites habituales de la intrusión salina y sólo son rebasados por la intrusión si se produce un ascenso importante de la interfase agua dulce-salada. Cuando la intrusión rebasa estos altos, la cuña no encuentra ningún otro obstáculo en su avance hasta llegar a Amposta.

Otro hecho destacado observado por Guillén (1992) es que si bien en julio de 1990 el límite superior de la intrusión de la cuña salina estaba situado en el alto morfológico de la isla de Gracia, entre este punto y Amposta seguían existiendo restos de agua salada en algunos lugares del cauce (ver figura 4.5). Ello es debido a que el agua salada en su avance va ocupando progresivamente todo el cauce del río y, al retirarse, deja bolsas de agua salada en las depresiones del cauce. Estas bolsas de agua salada se van diluyendo lentamente en el flujo fluvial y por ejemplo, la salinidad de las bolsas de agua salada observadas aguas arriba de la cabeza de la cuña salina era inferior a 10.

El mismo autor apunta que la interfase entre el agua dulce y salada se sitúa a 1.5-2 m de profundidad en la Desembocadura y cerca de los 3 m en la Isla de Gracia cuando la cuña salina está bien desarrollada. La pendiente longitudinal de la interfase es suave, aproximadamente de 0.0071%, presentando algunas ondulaciones en su recorrido, que parecen estar relacionadas con los pozos y altos morfológicos del lecho del río.

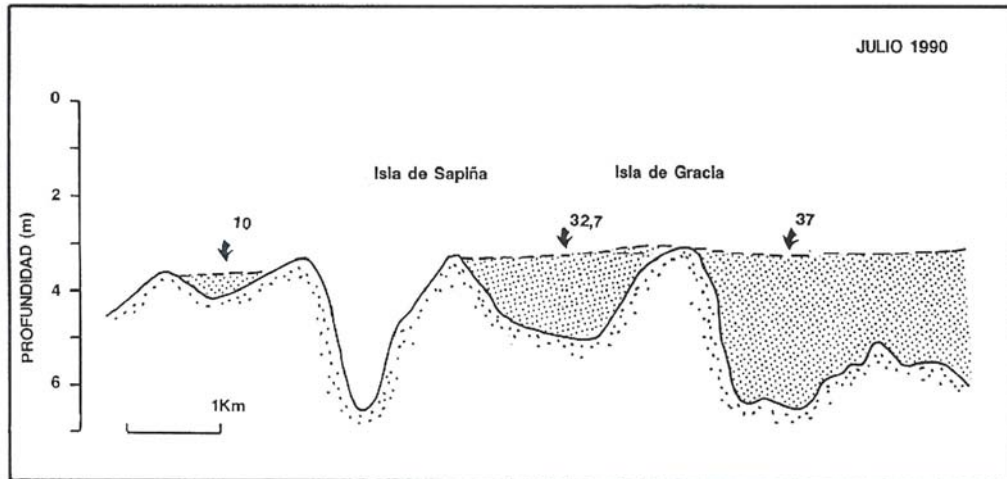


Figura 4.5. Sección longitudinal del río Ebro mostrando la distribución y salinidad del agua en Julio de 1990. Fuente: Guillén (1992).

Guillén (1992) también define la interfase como la zona donde se dan los máximos gradientes de salinidad e indica que el tránsito desde aguas dulces a marinas se produce aproximadamente en 1 m de columna de agua, pero la zona con los gradientes de salinidad máximos puede ser inferior a 0.20 m. Los gradientes de salinidad medios son del orden de 0.25-0.30 unidades por cm de columna de agua, aunque pueden ser inferiores a 0.10 si la cuña no está completamente desarrollada (febrero 1990) y superiores a 0.50 unidades por cm en la zona de máximo gradiente (octubre de 1989). En la campaña de octubre de 1989 se realizó un perfil detallado de la interfase en la isla de Gracia, con toma de datos cada 0.2 m, observándose que la cuña salina estaba situada entre 2.2 y 2.4 m de profundidad, con una salinidad que pasaba de 10 a 35 en este tramo y valores que se mantuvieron muy constantes tanto hacia la superficie como el lecho del río.

Utilizando datos de octubre de 1989, Guillén (1992) calculó las velocidades medias de flujo de la cuña salina. Cuando la cuña se desplaza hacia arriba, las velocidades medias oscilan entre 2.2 y 9.4  $\text{cms}^{-1}$ , mientras que cuando el desplazamiento de la cuña es aguas abajo, la velocidad media varía entre 5.7 y 9.1  $\text{cms}^{-1}$ . Durante los periodos de transición entre los ciclos de movimiento de la cuña, la velocidad está próxima a cero. La resultante neta diaria durante esta campaña fue que las entradas de agua marina al río fueron superiores a las salidas, con lo que se obtuvo una corriente residual dirigida aguas arriba de 1.42  $\text{cms}^{-1}$ . Durante los dos primeros días de la campaña de enero de 1990, las velocidades residuales fueron de 1.37 y 1.5  $\text{cms}^{-1}$ , en ambos casos dirigidas aguas arriba y muy similares a la calculada en octubre de 1989. Posteriormente el balance de entradas y salidas se fue

desequilibrando y a partir del décimo día la velocidad residual corresponde a un flujo de salida superior a 12 cms<sup>-1</sup>.

Las velocidades medias calculadas permiten estimar el volumen de agua que circula por la cuña salina. Los caudales máximos horarios en la sección de la Desembocadura fueron (en octubre de 1989) aproximadamente de 75 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>, tanto en el flujo aguas arriba como en el flujo hacia el mar, pero la resultante diaria dio un flujo dirigido aguas arriba de unos 11 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.

Ibáñez (1993) presentó una serie de datos correspondientes a perfiles longitudinales a lo largo del río y en los que se indica el límite alcanzado por la cuña salina (ver tabla 4.1). Este valor puede compararse con el caudal medio diario registrado en Tortosa durante las mediciones.

Puede apreciarse que en la mayoría de las ocasiones el límite de la cuña salina se sitúa a 18 Km de la desembocadura, donde existe un tramo de poca profundidad (3 m) a la altura de la Isla de Gracia. En pocas ocasiones la cuña superó este tramo, o bien fue inexistente o limitada a la proximidad de la desembocadura. En marzo de 1989 coincidiendo con un caudal medio diario muy bajo (60 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>) la cuña salina llegó hasta 30 Km de la desembocadura, en las cercanías de Amposta. En febrero y octubre de 1989, con unos caudales medios diarios de 84 y 60 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> respectivamente, la cuña llegó hasta unos 20 Km de la desembocadura, en las cercanías de la isla de Sapinya (tabla IV.1).

*Tabla IV.1. Valores de caudales y límites máximos de la cuña salina. Fuente: Ibáñez (1993).*

Fecha	Caudal (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Límite de cuña (km)
29-4-88	1091	0
10-6-88	414	6
14-6-88	699	0
22-6-88	1040	0
21-7-88	181	18
27-7-88	235	18
3-8-88	275	18
19-8-88	140	18
25-8-88	155	18
30-8-88	275	18

15-9-88	200	18
27-9-88	208	18
13-10-88	210	18
3-11-88	224	18
15-11-88	240	18
1-12-88	245	18
22-12-88	168	18
13-1-89	176	18
17-2-89	84	20
13-3-89	60	30
13-7-89	99	18
14-7-89	150	18
5-10-89	60	20
8-2-90	191	12
30-5-90	168	18
10-7-90	75	18
19-7-90	107	18
21-2-91	278	12
9-7-91	84	30
24-7-91	168	18
13-5-92	247	18

En la figura 4.6, se muestran ejemplos reales de perfiles de salinidad que corresponden a tres situaciones características. En la primera (junio de 1988), con un caudal elevado ( $414 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ) la cuña salina se halla cortada en la desembocadura y sólo resta una bolsa aislada en los últimos 6 Km. En la segunda (julio de 1990), la cuña salina llega hasta la Isla de Gracia y es la posición más frecuente, detectada en un 70% de los casos durante el periodo de estudio. La tercera posición (marzo 1989), con un caudal muy bajo ( $60 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ), la cuña llega hasta su límite máximo, aguas arriba de Amposta.

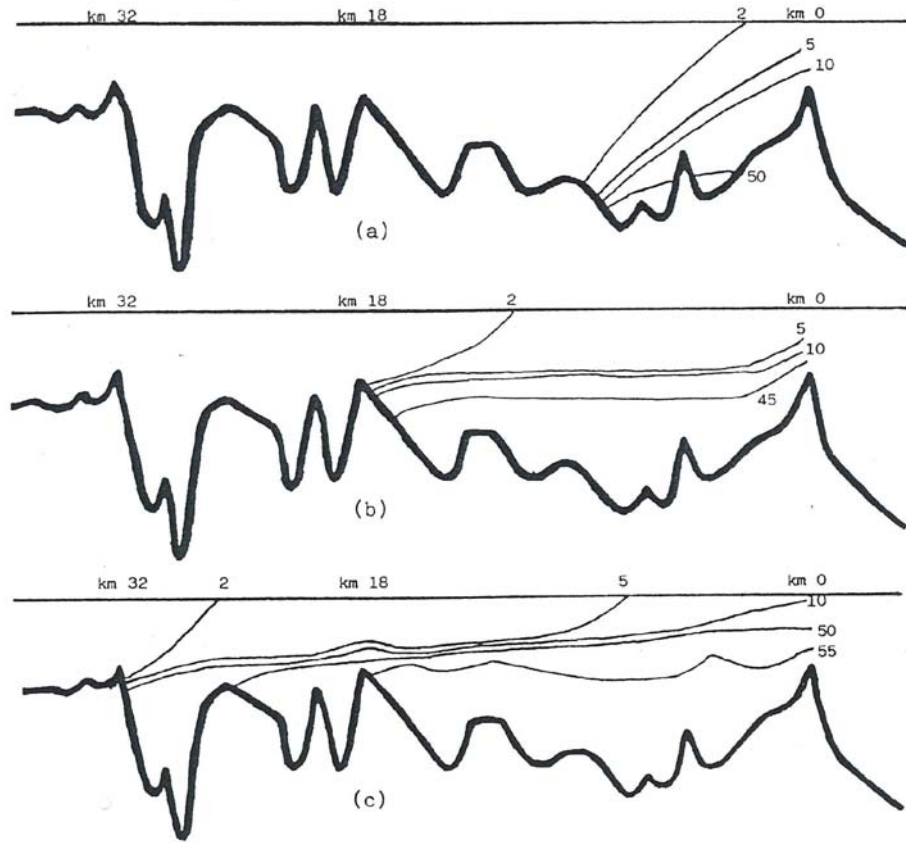


Figura 4.6. Perfiles longitudinales de salinidad. (a) cuña salina cerca de la desembocadura; (b) cuña salina en la isla de Gracia; (c) cuña salina hasta el límite máximo. Fuente: Ibáñez (1993).

#### 4.2.2. Campañas del LIM (UPC) y el LTMA (UPV)

El Laboratorio de Ingeniería Marítima de la Universitat Politècnica de Catalunya y el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente realizaron, entre 1997 y 2000 (Sierra *et al.*, 1999, 2001, 2002; Mösson *et al.*, 1999; Movellán *et al.*, 1999; Martínez *et al.*, 1999, 2000), seis campañas de campo en el estuario y la pluma del río Ebro. Estas campañas se realizaron con el fin de analizar, en distintas estaciones climáticas, la dinámica de la cuña salina, el comportamiento de los nutrientes y las características físicas de ambas áreas.

La primera campaña de medidas (CYTMAR Ebro-I) se realizó en la primavera de 1997, entre los días 27 de Marzo y 3 de Abril. La segunda (CYTMAR Ebro-II) se llevó a cabo durante el verano del mismo año, entre el 29 de Junio y el 2 de Julio. Durante ambas campañas se efectuaron dos tipos de mediciones. Por una parte, mediante un CTD modelo SEA BIRD 25, se registraron la salinidad (indirectamente a través de la conductividad), temperatura, transmitancia (que mide indirectamente la turbiedad y por tanto los sólidos en

suspensión) y presión del agua en los puntos de muestreo a distintas profundidades. Por otro lado, se tomaron muestras de agua mediante una bomba, que posteriormente fueron analizadas en el Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia. A partir de estas muestras se obtuvieron diversos parámetros físicos, químicos y biológicos, tales como sólidos en suspensión, salinidad, concentraciones de nutrientes (nitrógeno, fósforo y silicio) y parámetros biológicos como la concentración de bacterias, de células totales o de clorofila. Estas medidas se complementaron con datos de una estación meteorológica (presión y temperatura del aire, dirección y velocidad del viento) y registros de un correntímetro S4DW estacionado en la desembocadura del río, que midió niveles de agua y corrientes (velocidades y direcciones). Finalmente, se obtuvieron datos horarios de caudales del río, suministrados por la Confederación Hidrográfica del Ebro.

Durante la campaña CYTMAR Ebro-I se tomaron muestras en diversas estaciones a lo largo del río y en la zona de la desembocadura y la pluma (figura 4.7). En la figura adjunta se ha representado la posición de las distintas estaciones. El muestreo se efectuó a distintas profundidades, con el fin de obtener perfiles de los distintos parámetros analizados. Con respecto a los datos de salinidad en el estuario, durante el día 31 de marzo se obtuvieron muestras que se analizaron en el laboratorio.

Los caudales del río registrados durante esta campaña se caracterizan por una gran irregularidad horaria, con unos flujos medios diarios comprendidos entre 144 y 267 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>, mientras que los valores horarios máximo y mínimo son de 348 y 125 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> respectivamente.

En la figura 4.8 se han representado las localizaciones de las estaciones de muestreo durante la segunda campaña (CYTMAR-II). Durante la misma, se adquirieron muestras en el estuario durante los días 30 de junio, 3 y 5 de julio, complementadas con medidas del CTD el 3 de julio. Durante esta segunda campaña el flujo del río permaneció casi constante, con varios picos pequeños. El caudal medio horario durante la campaña fue de 133.2 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.



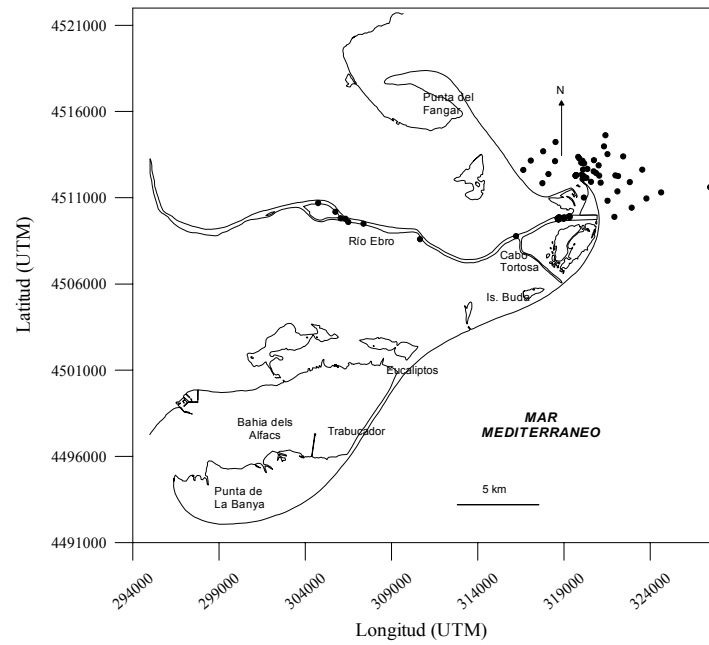


fig. . Estaciones de muestreo para la campaña CYTMAR I.

Figura 4.7. Estaciones de muestreo durante la campaña CYTMAR-I (primavera)

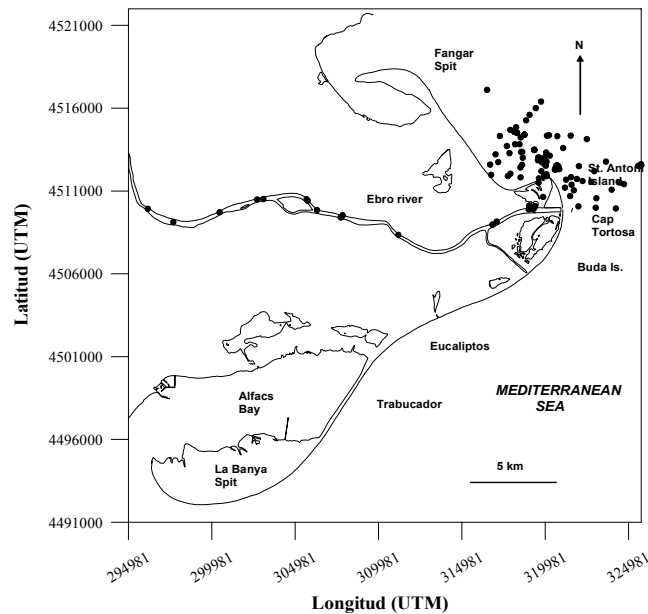


Figura 4.8. Estaciones de muestreo durante la campaña CYTMAR-II (verano)

Las cuatro campañas siguientes se realizaron en el marco del proyecto europeo PIONEER, descritas anteriormente en este capítulo, y las posiciones encontradas para la cuña salina se muestran en la Tabla IV.2.

Tabla IV.2. Posiciones de la cuña y caudales medios diarios durante las campañas del LIM.

Campaña	Fecha	Caudal ( $m^3s^{-1}$ )	Límite cuña (Km)
Cytmar I	31-3-97	219.0	20
Cytmar II	30-6-97	100.6	28
PIONEER I	3-4-99	196.2	18
PIONEER I	4-4-99	162.2	18
PIONEER I	5-4-99	161.7	18
PIONEER I	7-4-99	183.8	18
PIONEER II	7-7-99	126.6	28
PIONEER II	8-7-99	119.0	28
PIONEER II	9-7-99	110.4	28
PIONEER II	12-7-99	130.9	28
PIONEER III	5-10-99	187.0	18
PIONEER III	6-10-99	241.9	18
PIONEER IV	3-2-00	302.8	0*
PIONEER IV	5-2-00	186.4	12

En las figuras de las páginas siguientes (4.9 a 4.20) se han dibujado las isolíneas de salinidad correspondientes a los días en los que se realizaron mediciones. Cabe remarcar que en algunos casos las medidas realizadas incluyen solamente el tramo comprendido entre la isla de Gracia y la desembocadura. En el caso de que la cuña exceda dicha posición, se ha estimado su alcance máximo obteniendo la pendiente de la interfase y extrapolándola hasta que intersecta el fondo.

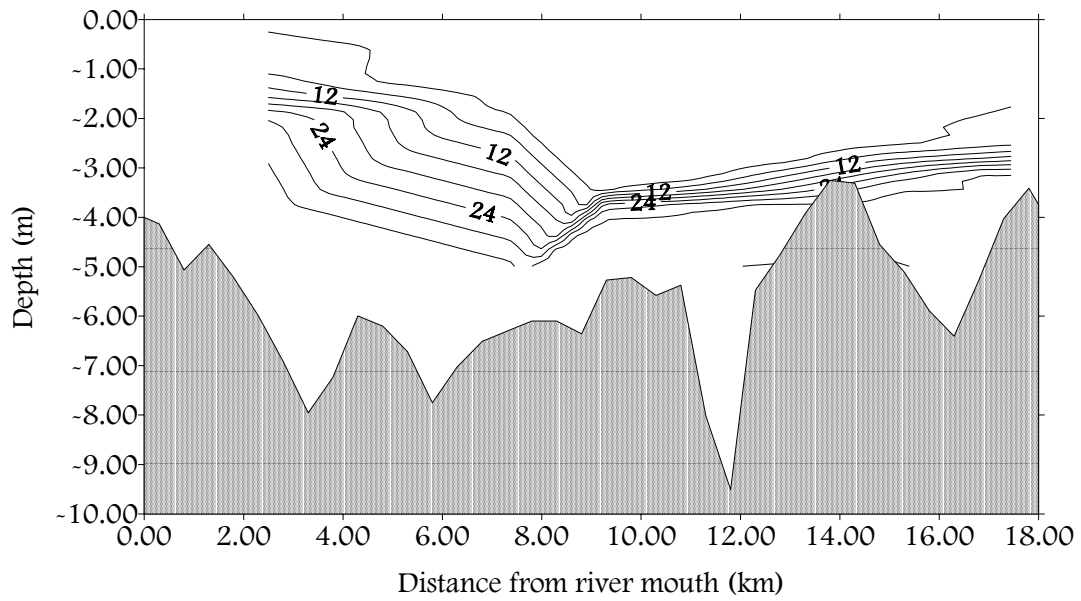


Figura 4.9. Isolíneas de salinidad. CYTMAR-I (30 de marzo de 1997).

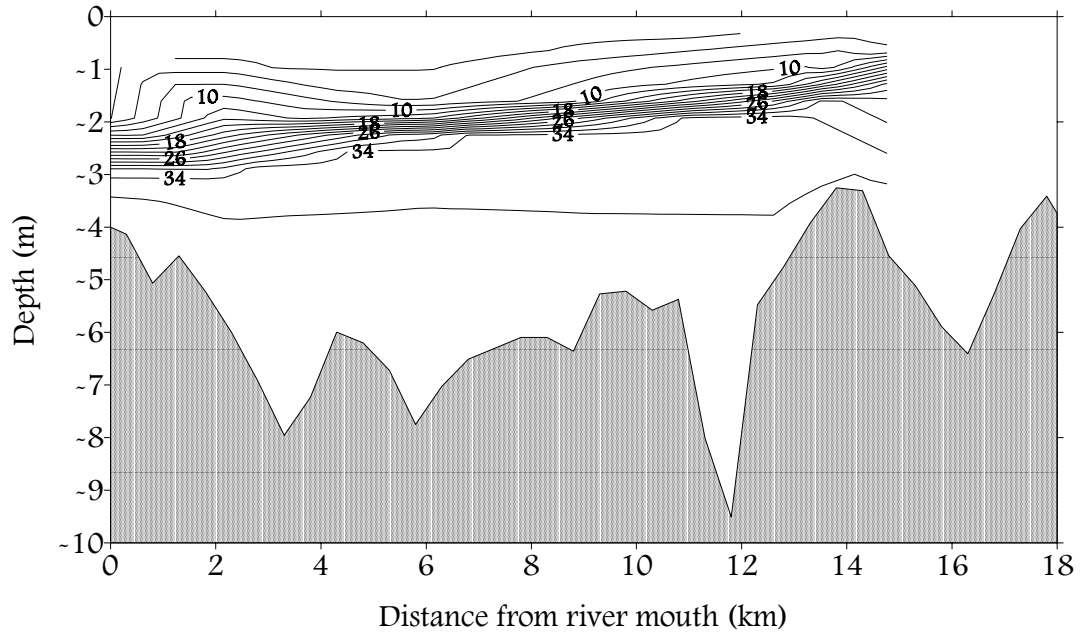


Figura 4.10. Isolíneas de salinidad. CYTMAR-II (30 de junio de 1997).

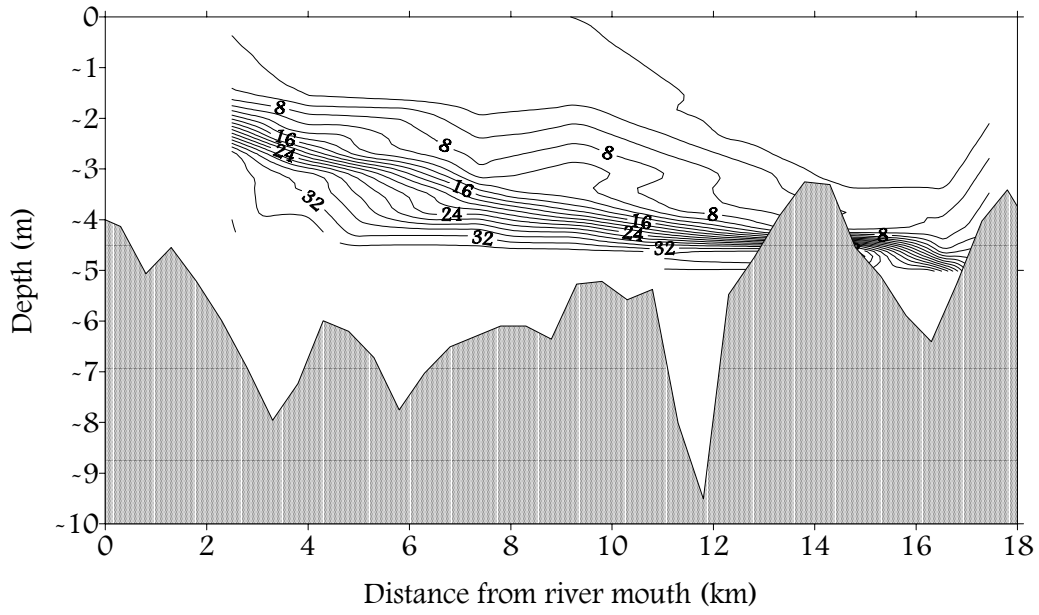


Figura 4.11. Isolíneas de salinidad. PIONEER-I (3 de abril de 1999).

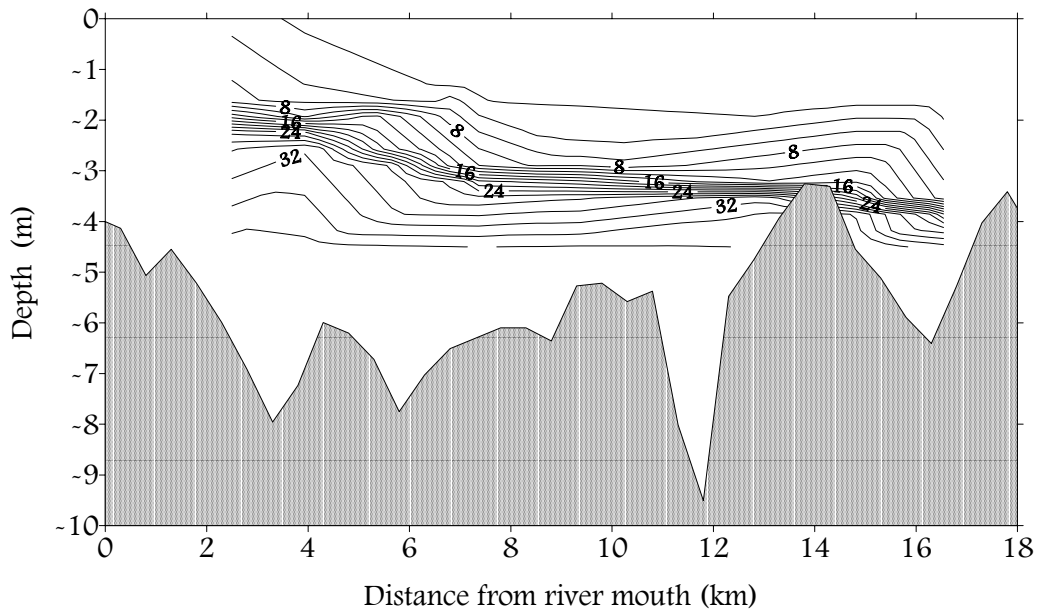


Figura 4.12. Isolíneas de salinidad. PIONEER-I (5 de abril de 1999).

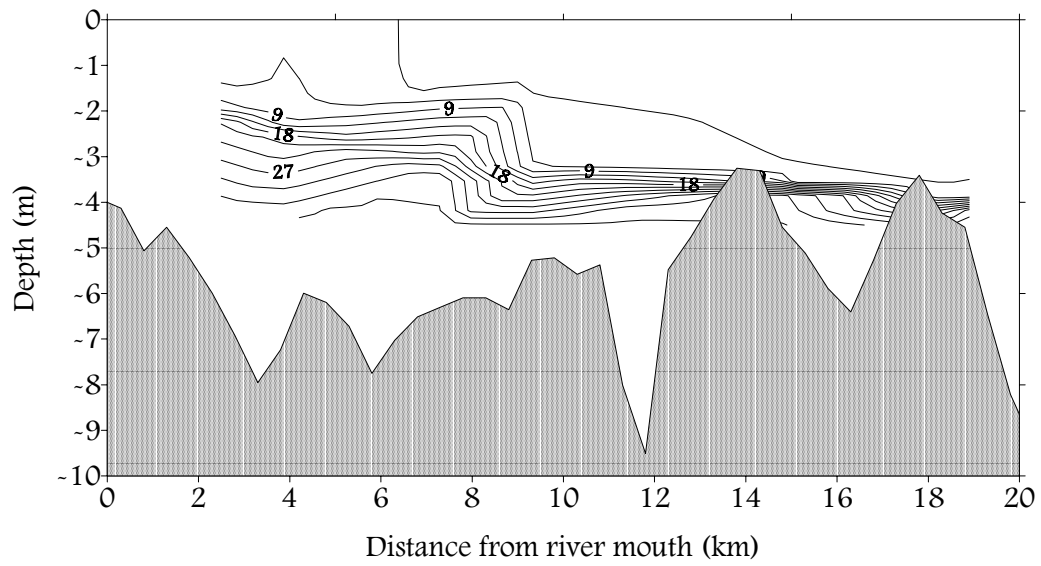


Figura 4.13. Isolíneas de salinidad. PIONEER-I (7 de abril de 1999).

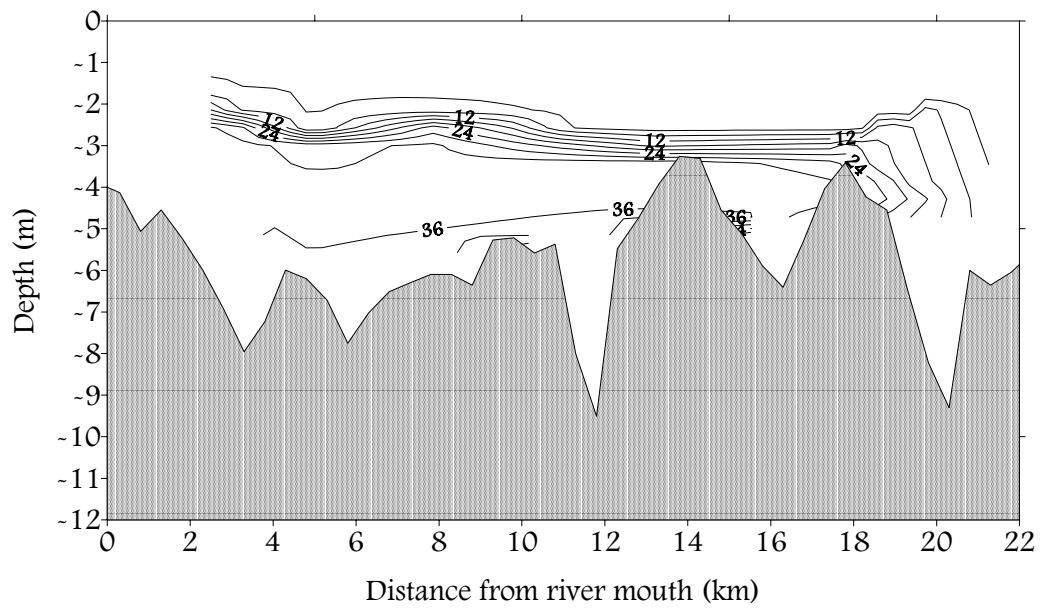


Figura 4.14. Isolíneas de salinidad. PIONEER-II (7 de julio de 1999).

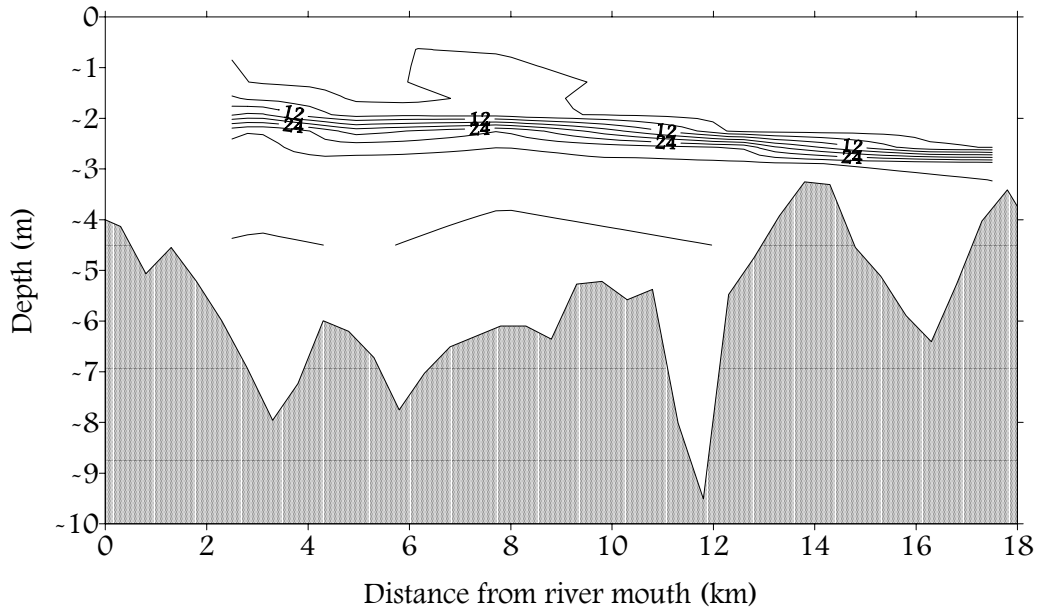


Figura 4.15. Isolíneas de salinidad. PIONEER-II (8 de julio de 1999).

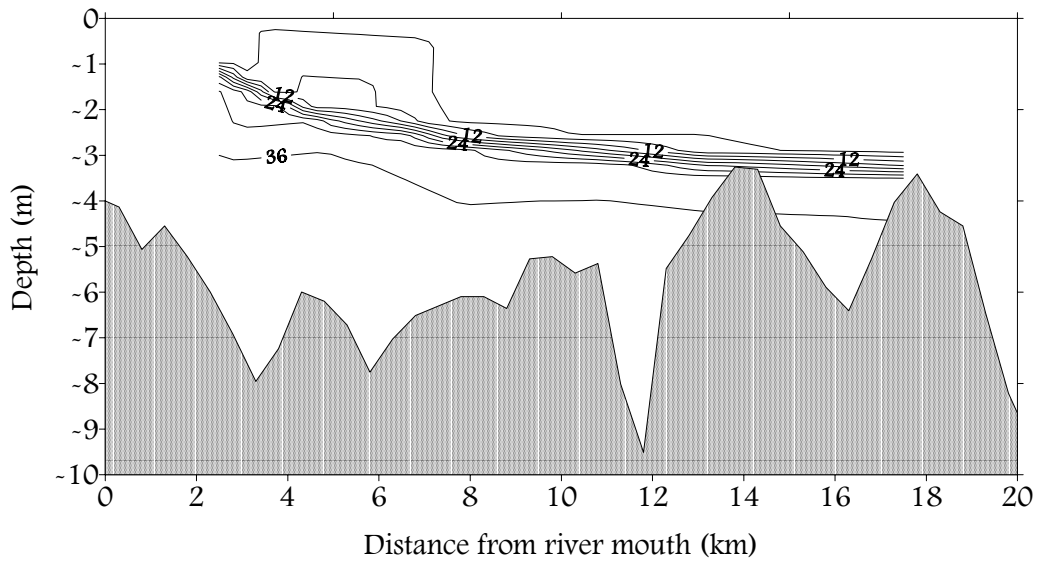


Figura 4.16. Isolíneas de salinidad. PIONEER-II (12 de julio de 1999).

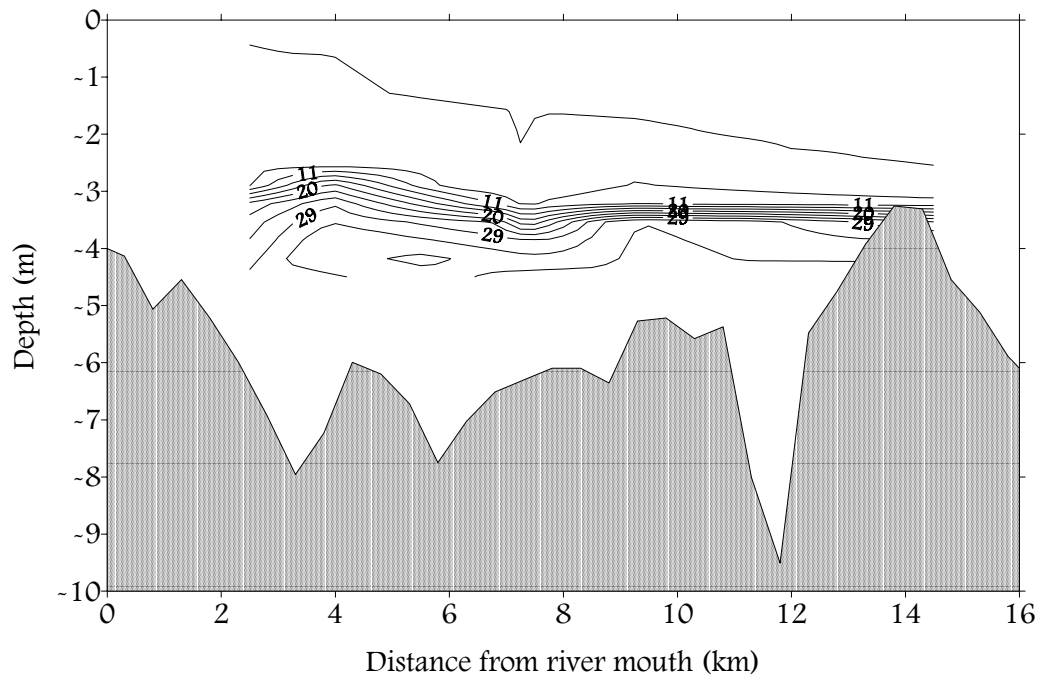


Figura 4.17. Isolíneas de salinidad. PIONEER-III (5 de octubre de 1999).

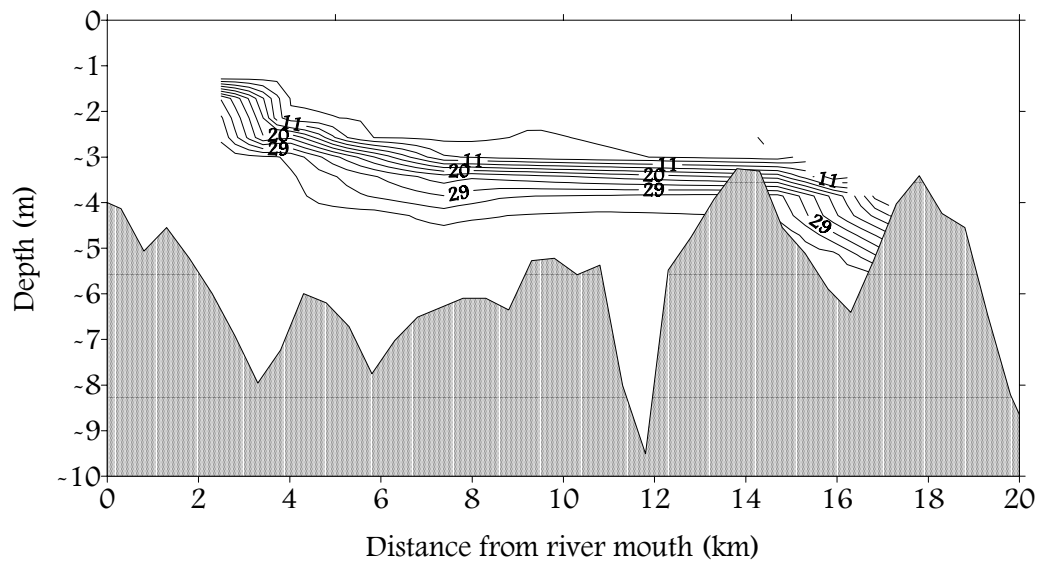


Figura 4.18. Isolíneas de salinidad. PIONEER-III (6 de octubre de 1999).

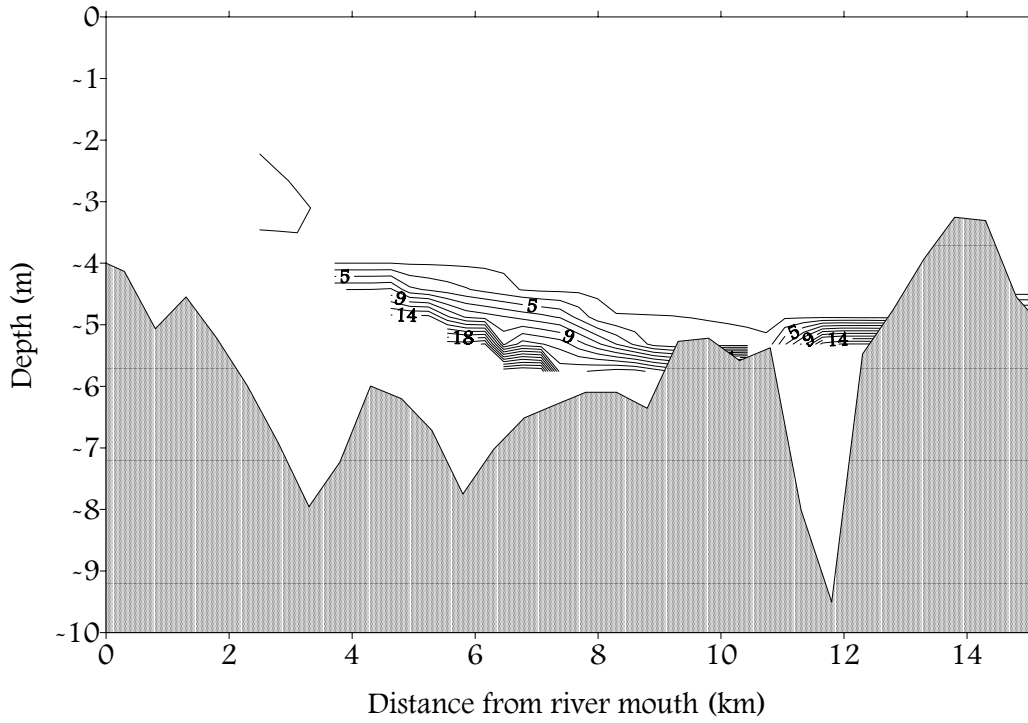


Figura 4.19. Isolíneas de salinidad. PIONEER-IV (3 de febrero de 2000).

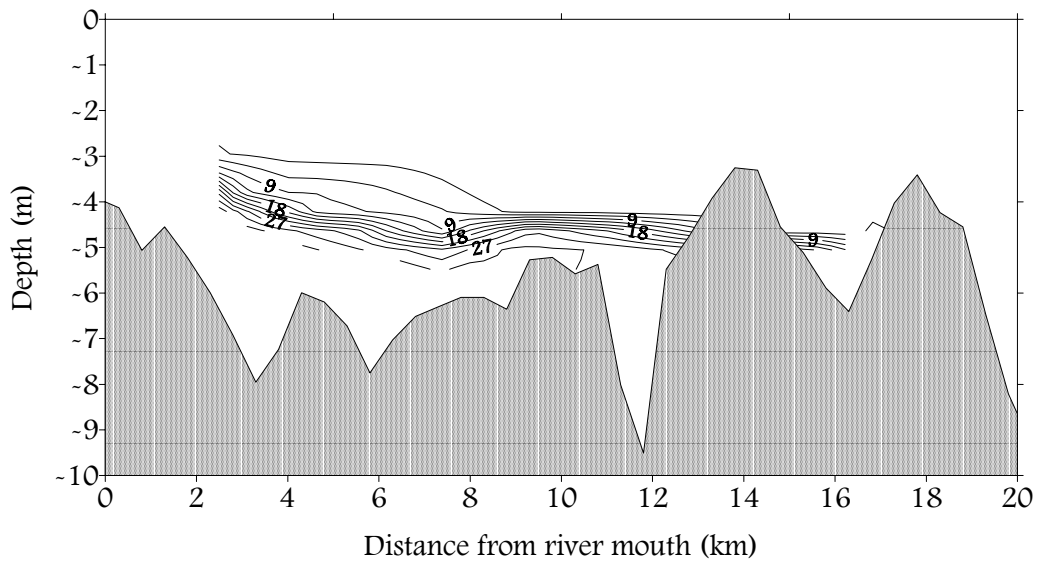


Figura 4.20. Isolíneas de salinidad. PIONEER-IV (5 de febrero de 2000).



Otro ejemplo indicativo de las medidas realizadas en la cuña salina está constituido por las figura adjunta (4.21), en la que se muestran diversos perfiles de velocidad de la corriente, registradas mediante el correntímetro acústico doppler (ADF).

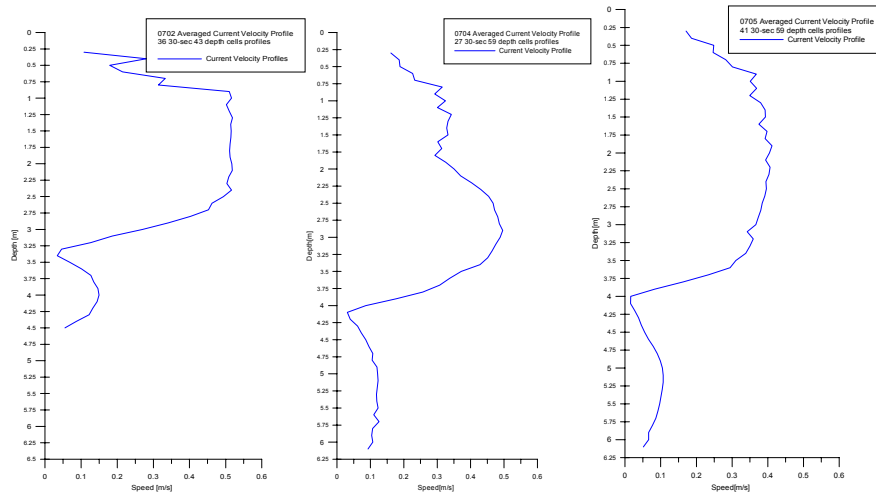


Figura 4.21. Perfiles de velocidad de la corriente

En estas figuras, la velocidad está indicada en valor absoluto, sin tener en cuenta la dirección de la corriente. En ellas la localización de la interfase entre agua dulce y salada puede determinarse fácilmente, ya que en la misma la velocidad debería ser muy cercana a cero. Los perfiles de corriente muestran una capa superior, con velocidades del orden de  $0.5 \text{ ms}^{-1}$ . La velocidad de esta capa va disminuyendo progresivamente hasta llegar a ser casi cero (punto donde se encontraría la interfase). Finalmente, existe una capa inferior, que corresponde a la cuña salina, donde la velocidad es mucho más pequeña (del orden de  $0.1 \text{ ms}^{-1}$ ).

En la figura 4.22 se muestran los perfiles de salinidad medidos en las distintas estaciones de medida del río el día 5 de abril de 1999 con el CTD. En los mismos puede apreciarse claramente la fuerte estratificación existente en el estuario, pues la salinidad se mantiene prácticamente constante en las capas superior e inferior. La zona de transición entre ambas capas, de salinidad variable, tiene un espesor aproximado de 0.5 m. También se observa que a mayor distancia de la desembocadura, más profunda se encuentra la cuña salina.

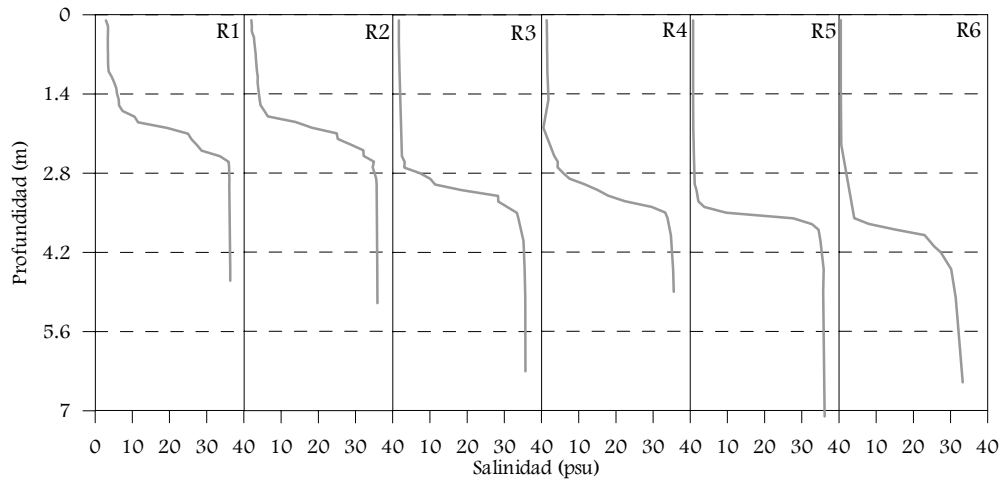


Figura 4.22. Perfiles de salinidad en distintos puntos del estuario el día 5 de abril de 1999.

#### 4.2.3. Análisis del PHN

Basándose en los datos de Ibáñez (1993), el PHN menciona que parece existir una relación lineal entre los caudales medios diarios registrados en la estación de aforos de Tortosa y la profundidad de la interfase agua dulce-salada en dos puntos de control situados a 6 y 13 Km de la desembocadura (ver figura 4.23). Las ligeras dispersiones respecto a la recta de regresión son debidas a la no consideración de otros factores que también intervienen en la dinámica de la intrusión marina, aunque en menor medida, tales como cambios en el nivel del mar debidos a las mareas, el viento, etc.

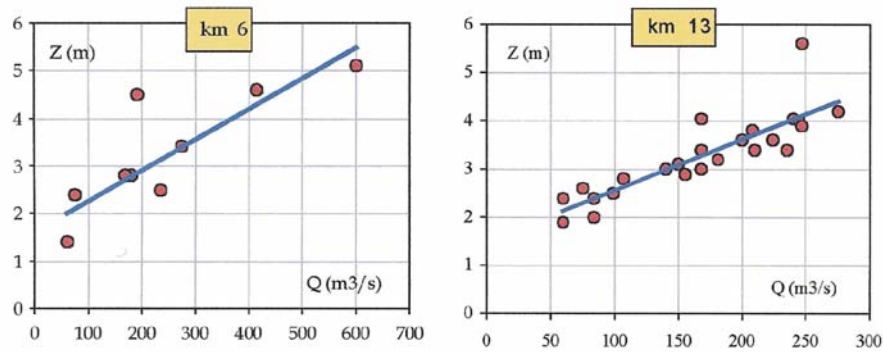


Figura 4.23. Relación entre el caudal en Tortosa y la profundidad de la interfase a 6 y 13 Km de la desembocadura. Fuente: PHN (2000).

Por lo demás, el PHN al basarse en los datos de Ibáñez (1993) llega a las mismas conclusiones que éste respecto a la dinámica de la cuña salina.

#### 4.2.4. Análisis de los datos disponibles

Los datos disponibles, basados en tres fuentes distintas (Guillén, 1992; Ibáñez, 1993; LIM-LMTA, 1997-99 en Sierra *et al.*, 1999, 2001, 2002), pueden resumirse en la Tabla IV.3, en la que se indican las posiciones típicas de la cuña salina y los rangos de caudales para los que se han observado dichas posiciones según las distintas fuentes.

Tabla IV.3. Rangos de caudales y posiciones de la cuña según distintas fuentes.

Situación	Guillén (1992)	Ibáñez (1993)	LIM-LMTA (1997-99)
No cuña	350-400 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	> 400 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	*
Migjorn	250-350 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	300-400 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	> 250 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
Gracia	150-250 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	100-300 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	130-250 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
Sapinya	~	80-100 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	~
Amposta	< 150 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	< 80 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	< 130 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>

El asterisco indica que, en sus campañas, el LIM-LMTA sólo detectaron una vez la ausencia de cuña salina en el estuario (el 3 de febrero de 2000) con un caudal medio diario de 302.8 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>. Sin embargo, se encontraron bolsas de agua salada entre los Km 5 y 9 (contados a partir de la desembocadura) ya que el caudal en los días anteriores fue mayor (331.4 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> y 351.6 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>) y pudo haber barrido la cuña, pero dejando atrás masas de agua salada atrapadas.

Así pues, los umbrales de caudales mínimos para la localización de la cuña, según los datos actuales presentan ciertas variaciones, de acuerdo con los diversos estudios y pueden establecerse dentro de los siguientes rangos (Tabla IV. 4):

Tabla IV.4. Rangos de caudales mínimos para la presencia de la cuña salina.

Ausencia de cuña:	350 - 400 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
Migjorn:	250 - 300 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
Isla de Gracia:	100 - 250 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> .
Amposta:	<80 - <150 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> .

Analizando los datos contenidos en la tabla anterior parecen existir ciertas discrepancias entre las distintas fuentes a la hora de definir los rangos de caudales que dan lugar a una posición determinada de la cuña salina. No obstante, existe bastante concordancia entre las

observaciones de Guillén y del LIM-LMTA. Ibáñez indica que la cuña llega a Amposta con unos caudales mucho más bajos que las otras fuentes.

Una posible explicación a estas discrepancias, además de factores secundarios como la elevación del nivel del mar, radica en el hecho de que la cuña salina en sus desplazamientos aguas arriba o abajo del estuario, tiene una cierta inercia. Esto significa que la posición de la cuña salina no depende únicamente del caudal medio diario que se registra durante la realización de las medidas, sino que también depende del caudal de los días anteriores.

#### 4.2.5. Efectos de la cuña salina

Según el PHN la presencia de la cuña salina tiene unas consecuencias ambientales diversas. Éstas pueden resumirse indicando que, en la cuña salina, las aguas eutróficas, con exceso de algas, producen, entre otros efectos indeseables, la anoxia (agotamiento del oxígeno) del fondo, lo que provoca la asfixia de los animales y limita la vida a bacterias y algunos organismos muy resistentes a la falta de oxígeno (Ibáñez *et al.*, 1999). El mismo PHN menciona que con aguas no eutróficas, la presencia de la cuña salina se trata de un fenómeno natural del que no cabe esperar un perjuicio por salinización de las tierras agrícolas adyacentes. No obstante, este aspecto no está demostrado y debería ser comprobado. Tal como se indicó al principio de este capítulo, el Delta del Ebro se enmarca en un entorno de aguas muy salinas y los acuíferos, tanto superficiales como profundos, especialmente en la zona cercana a la costa, presentan una problemática de intensa intrusión salina.

Según Ibáñez *et al.* (1999) existe la posibilidad de salinización de los pozos próximos al río tras periodos prolongados de presencia de la cuña salina. Este fenómeno ya se detectó en los años 1989 y 1990, cuando la cuña salina estuvo presente casi de forma permanente. En aquella ocasión, el aumento de salinidad se notó en pozos próximos al río aguas arriba de Amposta, cerca del límite máximo de penetración de la cuña salina. En las zonas donde hay arrozales cerca del río, la columna de agua dulce evita la penetración de agua salada desde la cuña salina. No obstante, en el caso de que se sustituyeran los arrozales por otros cultivos no inundados, éstos podrían salinizarse si la cuña salina permanece mucho tiempo en el estuario.

Además del incremento de la salinidad en los acuíferos, la presencia de la cuña salina comporta, según Ibáñez *et al.* (1995) la proliferación del fitoplancton por un exceso de nutrientes (eutrofia), especialmente durante el periodo cálido. Esto conlleva una gran

acumulación de materia orgánica en el fondo de la cuña salina que implica un consumo importante de oxígeno durante dicho periodo cálido. Esto puede llegar a ocasionar el agotamiento total del oxígeno (anoxia) en la cuña salina, excepto en la zona próxima a la desembocadura, lo cual implica una desaparición total de la fauna y vegetación acuáticas. Según estos autores, la presencia continuada de la cuña salina junto a la eutrofización del agua del río, ocasiona un deterioro general del ecosistema y un agotamiento del oxígeno de la cuña.

En las campañas realizadas por el LIM y el LTMA, se observó que las mayores concentraciones de clorofila se producían en la zona situada por encima de la interfase, debido a la mayor incidencia de la luz solar, que favorece la producción primaria. No obstante, en varios casos, se observan mayores concentraciones de amonio cerca del fondo, lo que parecería indicar la existencia de un proceso de mineralización del nitrógeno, debido a la sedimentación de materia orgánica. En dichas campañas no se midió oxígeno disuelto, por lo que no se puede confirmar la existencia del proceso de anoxia descrito por Ibáñez *et al.* (1999).

#### 4.3. Modelo Hidrodinámico de la cuña salina

El modelo descrito anteriormente (Capítulo 2) es un modelo que trabaja con un flujo estratificado de dos capas con ecuaciones de continuidad y momentum para cada una de ellas, y se deben establecer para cada capa condiciones de contorno en puntos extremos del estuario. En las condiciones de contorno de la cabeza del estuario, en Tortosa, se cuenta con los datos de la descarga del río, y se puede establecer una condición de contorno de descarga cero en este punto. Pero en la boca del estuario solo se cuenta con datos del nivel de agua superficiales, y se desconocen los valores de la elevación de la interfase en este punto. Por esto, en el modelo estuarino se han añadido unos 10 km hacia el norte de la boca para establecer un punto verticalmente homogéneo donde la interfase y el nivel superficial coincidieran, y así poder obtener datos de temperatura y salinidad directamente de los valores de la elevación superficial y las mediciones de temperatura y salinidad. Los únicos datos complementarios han sido los campos de viento, ya que a lo largo del estuario no se presentan tributarios relevantes.

##### 4.3.1. Batimetría

Durante PIONEER II (Julio, 1999) se realizó una batimetría, consistente en 46 secciones transversales, separadas entre ellas aproximadamente 1 Km, entre el 6 y el 12 de Julio de

1999, e incluye la topografía del fondo desde Tortosa hasta la boca del estuario. 23 de esas secciones transversales están distribuidas entre Tortosa y la Isla de Gracia (llamadas curso superior) dos en el canal izquierdo de la Isla, una en el canal derecho y las 21 restantes están distribuidas entre la Isla de Gracia y la boca del estuario (curso inferior). Finalmente hay 6 secciones transversales en los primeros 10 Km de la pluma del estuario obtenidas de una carta náutica del Instituto Hidrográfico de la Marina (1976). Los niveles de superficie están referidos al sistema de referencia de la CHE y si los valores se quieren referir al nivel medio del mar, se les tienen que añadir 52 cm, que es la diferencia entre ambos sistemas de referencia (Velasco y Vila, 1999) -ver figura 4.24-.

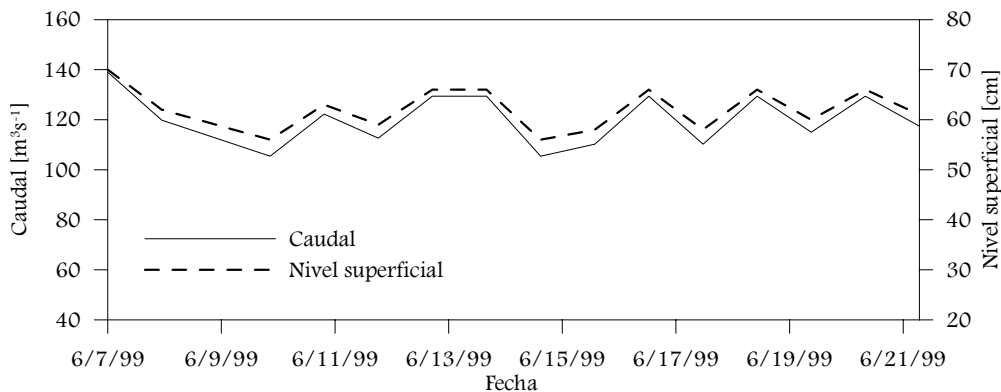


Figura 4.24. Series temporales del caudal y nivel superficial (referido a CHE).

Como se muestra en la figura, las descargas de Tortosa son mas o menos constantes durante el periodo en que se hizo la batimetría. La descarga promedio fue de  $120 m^3s^{-1}$ , con un máximo de  $139 m^3s^{-1}$ , y un mínimo de  $105 m^3s^{-1}$ , mientras que el nivel de superficie de la CHE fue de 60 cm, lo que significa que la diferencia total entre el nivel superficial de Tortosa y el nivel medio del mar es de 1.12 m.

Se han efectuado las siguientes hipótesis:

1. Se considera el río como un flujo de una sola capa en un canal abierto, ignorando los efectos de la cuña salina.
2. Se considera una descarga constante durante toda la campaña y a lo largo de todo el estuario, desde Tortosa hasta la desembocadura de  $120 m^3s^{-1}$ .
3. Se considera un nivel superficial constante en el tiempo en cada punto del estuario. Durante el periodo de mediciones de todas las secciones transversales, el nivel superficial es igual al nivel de referencia de la embarcación.
4. Se considera que el nivel del mar abierto y el nivel del mar en la boca del estuario es igual a 0.00 m durante el periodo de las campañas, lo cual es aproximadamente cierto, porque el nivel medio del mar durante el periodo citado fue casi igual a cero.

La ecuación de Manning para un flujo estable uniforme (ec. 4.1) se ha aplicado en cada sección transversal obteniendo la inclinación de la superficie libre,  $S$ , para cada una de ellas. Esta ecuación depende del radio hidráulico,  $R$ , el área de la sección transversal,  $A$ , el caudal,  $Q$ , y el número de rugosidad de Manning, que es el único valor desconocido.

$$S = \left( \frac{Qn}{A} \right)^2 R^{4/3} \quad (4.1)$$

La diferencia entre el nivel superficial en la boca del río y el nivel superficial en Tortosa se puede obtener de la integración de la ecuación de Manning a lo largo del curso del estuario. Y ya se conoce esta diferencia del nivel, 1.12 m. Pero falta por conocer todavía un parámetro, el número de rugosidad de Manning. Si se considera un número de rugosidad constante a lo largo del estuario, entonces este parámetro puede ser obtenido de acuerdo con la ecuación 4.2, donde la diferencia del nivel de superficie es conocida,  $\Delta H$ , así como la descarga del río y el término integral que depende de las características de la sección transversal.

$$\Delta H = H_{Tortosa} - H_{boca} = \int_{Boca}^{Tortosa} S dx = n^2 Q^2 \int_{Boca}^{Tortosa} \frac{R^{4/3}}{A^2} dx \quad (4.2)$$

El valor obtenido del número de rugosidad de Manning,  $n$ , es 0.074 ( $M = n^{-1} = 13.514$ ). Este valor corresponde a un cauce natural con una fuerte irregularidad del fondo, frecuentes variaciones de sección transversal, presencia menor de obstáculos, baja presencia de vegetación y apreciable cantidad de meandros, de acuerdo con la tabla de coeficientes de rugosidad,  $n$ , propuesta por Chow (1959). Esta descripción se ajusta bien al curso del Ebro porque la mayor anchura promedio durante condiciones de flujo normales es de 297 m y las secciones transversales presentan una marcada irregularidad, así como en sus valores de profundidad.

Una vez que se conoce el valor de  $n$ , la elevación de cualquier sección transversal entre Tortosa y la boca del estuario, puede ser obtenida procediendo de la misma manera que anteriormente. La elevación de cualquier sección intermedia  $H_{ST}$  ha sido calculada de la integración de las inclinaciones de la superficie del agua de las secciones transversales de la boca hasta el punto deseado según la ecuación 4.3.

$$H_{ST} = H_{Boca} + \int_{Boca}^{Seccion} S dx = n^2 Q^2 \int_{Boca}^{Seccion} \frac{R^{4/3}}{A^2} dx \quad (4.3)$$

La tabla IV.5 muestra las características principales (localización, anchura máxima, máximo punto de elevación y profundidad máxima) de las secciones transversales 1 a 45 del estuario obtenidas de la campaña batimétrica y las seis secciones transversales, de la 46 a la 50, obtenidas de la carta náutica.

*Tabla IV.5. Características principales de las secciones transversales*

Perfil	Rama	km de Tortosa	ancho [m]	Elevación max [m]	Profundidad [m]
1	Curso superior	0.000	216	1.12	2.8
2	Curso superior	2.379	230	0.82	3.6
3	Curso superior	2.764	124	0.81	9.7
4	Curso superior	3.574	230	0.74	3.1
5	Curso superior	4.224	80	0.61	5.3
6	Curso superior	4.737	168	0.54	5.23
7	Curso superior	5.984	160	0.49	6.75
8	Curso superior	6.834	160	0.45	4.06
9	Curso superior	8.244	338	0.42	6.17
10	Curso superior	10.108	333	0.25	3.6
11	Curso superior	10.387	362	0.23	4
12	Curso superior	10.689	351	0.23	3.7
13	Curso superior	11.579	239	0.22	6.1
14	Curso superior	12.426	144	0.21	17
15	Curso superior	13.573	309	0.21	6.1
16	Curso superior	14.294	194	0.21	16.5
17	Curso superior	15.330	354	0.2	5.5
18	Curso superior	17.082	349	0.18	4.1
19	Curso superior	17.923	271	0.17	5
20	Curso superior	19.046	286	0.13	5.1
21	Curso superior	21.535	214	0.13	7.5
22	Curso superior	21.871	399	0.12	3.8
23	Curso superior	22.172	245	0.12	6
24-A	Canal izquierdo	23.654	233	0.1	11
25	Canal izquierdo	24.601	214	0.1	4.6
24-B	Canal derecho	24.364	168	0.09	6.5
26	Curso inferior	25.664	567	0.08	6.5
27	Curso inferior	26.114	231	0.06	8.7
28	Curso inferior	28.020	309	0.06	5.5



29	Curso inferior	28.885	381	0.05	5.2
30	Curso inferior	29.888	240	0.05	8.1
31	Curso inferior	30.182	181	0.05	11
32	Curso inferior	30.971	187	0.04	8.1
33	Curso inferior	32.333	234	0.03	6.8
34	Curso inferior	32.996	317	0.03	8.5
35	Curso inferior	33.818	448	0.03	7.5
36	Curso inferior	35.513	287	0.02	8.86
37	Curso inferior	36.063	302	0.02	9.5
38	Curso inferior	36.453	259	0.02	7.3
39	Curso inferior	37.353	292	0.02	9.2
40	Curso inferior	38.547	247	0.01	8.1
41	Curso inferior	39.214	303	0.01	6.8
42	Curso inferior	40.032	319	0.01	6.3
43	Curso inferior	40.603	687	0.01	6.6
44	Curso inferior	42.296	437	0	4.8
45	Curso inferior	42.559	540	0	3.5
46	Mar añadido	44.059	1539	0	12.57
47	Mar añadido	45.559	2538	0	23.18
48	Mar añadido	47.559	3870	0	38.06
49	Mar añadido	50.059	5535	0	50
50	Mar añadido	52.559	7200	0	50

#### 4.3.2. Condiciones de contorno

##### i. Tortosa

Las condiciones de contorno impuestas en Tortosa han sido, la descarga, y las series de tiempo de temperatura y salinidad del agua para ambas capas. Pero la cuña normalmente no llega físicamente hasta Tortosa, ya que sólo lo hace en periodos de descarga excepcionalmente muy bajos (Aragón, 1943), y el modelo empleado requiere condiciones de contorno para ambas capas aunque alguna de ellas no exista en realidad. Para resolver este problema se han considerado los mismos valores de salinidad y temperatura en ambas capas, así como una descarga nula para la capa inferior, mientras que las series temporales de las descargas en la capa superior concuerdan con los caudales medidos por la CHE en este punto. La descarga promedio durante el periodo de estudio ( $227.55 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ), del 1 de

Enero de 1999 al 29 de Febrero del 2000 (figura 4.25), fue inferior al promedio de los últimos 10 años ( $275.3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ) y mucho menor que el promedio de los últimos 30 años ( $358.3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ) o el promedio del siglo ( $464.7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ). El caudal mínimo ( $96 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ) registrado durante el periodo de estudio, se registró tres veces, el 16 de Junio, y el 27 y el 28 de Julio, y solamente un día, 24 de Diciembre, el caudal sobrepasó los  $500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  ( $518.11 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ). El periodo de descargas mínimas es principalmente durante el verano, aunque durante primavera y los últimos días de Febrero del 2000 se registraron episodios de descargas bajas. Durante el otoño y el invierno se presentan descargas más moderadas ( $200 - 400 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ) así como en buena parte de la primavera.

A su vez, la CHE toma medidas de conductividad y temperatura en Tortosa, y para adecuar estos datos al modelo, la conductividad ha sido transformada en salinidad, aplicando la formula de la Escala Práctica de Salinidad, que calcula salinidad a partir de datos de conductividad y temperatura (figura 4.26).

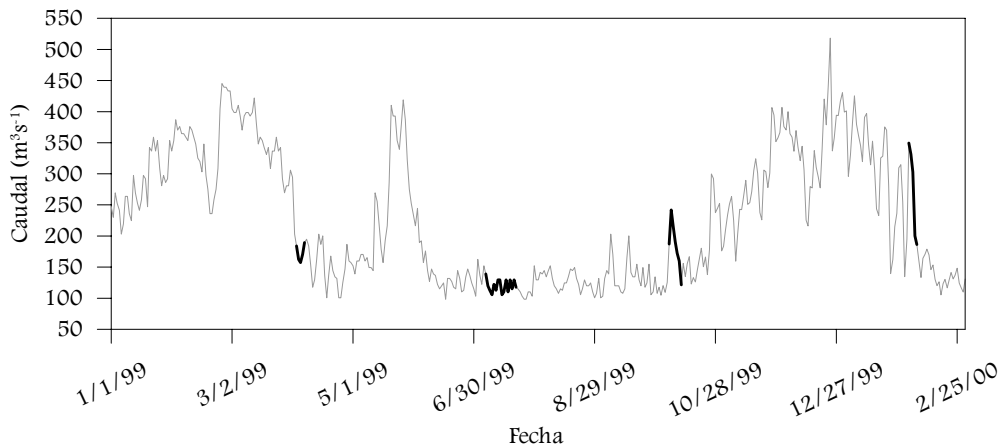


Figura 4.25. Series temporales de caudales en Tortosa (del 1 de Enero de 1999 al 29 de Febrero del 2000). Campañas PIONEER en línea oscura.

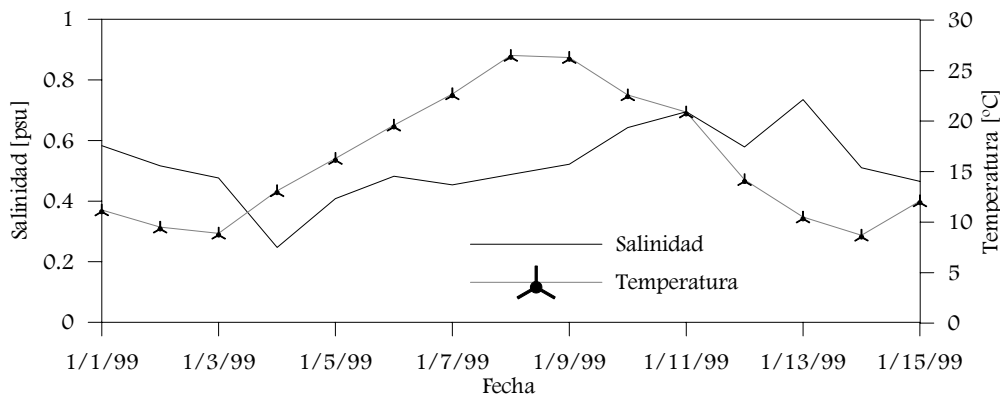


Figura 4.26. Series temporales de Salinidad y Temperatura en Tortosa (del 1 de Enero de 1999 al 14 de Febrero del 2000).

*ii. Mar Abierto*

Las condiciones de contorno fijadas para el mar abierto son los niveles superficiales y de la interfase del agua, así como la temperatura y la salinidad durante el periodo de estudio. Se ha colocado esta condición de contorno a 10 Km al norte de la desembocadura, y se considera como un punto verticalmente homogéneo. El problema surge cuando el modelo tiene que considerar una capa con un espesor mínimo, por lo que se ha adoptado una capa superior de 10 cm en este punto, lo que significa que el nivel de las series temporales de la interfase ha sido de obtenida de la sustracción de 10 cm de las series temporales de los niveles de superficie.

Los datos disponibles son el nivel de mar y las medidas de temperatura tomadas en puerto de L'Ampolla, localizado a 15 Km al noroeste de la desembocadura. Las medidas obtenidas en este punto pueden ser consideradas representativas del estado del mar en esta zona. Estas medidas de nivel de superficie y de temperatura fueron tomadas automáticamente cada 10 minutos y esto da una gran cantidad de datos, que son demasiados para la capacidad del modelo.

Por otra parte, en una simulación de 14 meses, las variaciones en el tiempo tan pequeñas no interesan al tener otras condiciones de contorno que tienen una precisión diaria (descarga del río) o mensual (series de tiempo de salinidad y temperatura). Entonces, estos datos registrados cada 10 minutos fueron filtrados cada 3 horas, permitiendo así que el modelo pudiera usarlos sin perder la forma semidiurna de las series temporales del nivel superficial del agua.

Se encontró el problema de que las variaciones del nivel del mar habían sido medidas sin un nivel de referencia, por lo que se aplicó la hipótesis de que el valor medio del nivel del mar durante el periodo estudiado (2.085 m) corresponde con el nivel medio del mar ( $\pm 0$  m), así que las series de tiempo del nivel del mar fueron corregidas sustrayendo el valor promedio del nivel medio del mar de cada medición de nivel (figura 4.27).

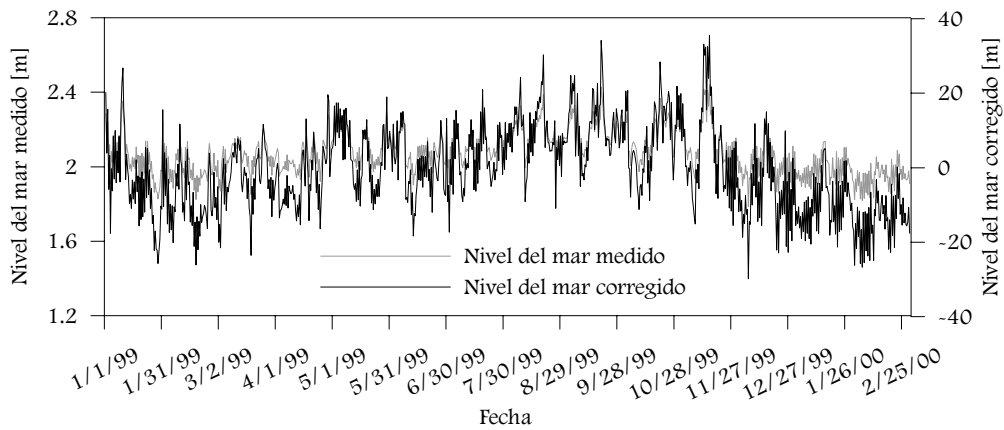


Figura 4.27. Series temporales del nivel del mar (medida y corregida) del 1 de Enero de 1999 al 29 de Febrero del 2000.

La máxima altura alcanzada por la superficie del mar fue de 38.5 cm sobre el nivel de referencia y la altura menor fue de 35 cm por debajo de ese mismo nivel. La serie de tiempo de temperatura presenta una variación estacional similar a que se presenta en Tortosa (figura 4.28).

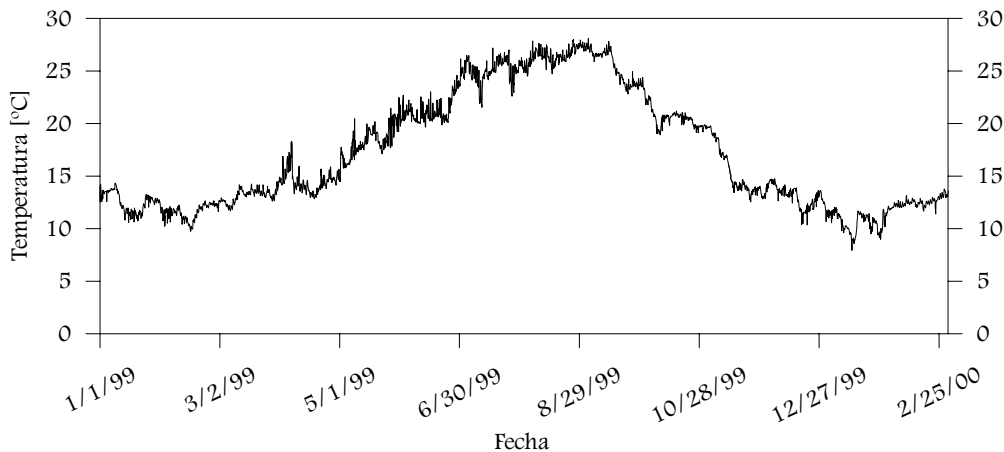


Figura 4.28. Serie temporal de temperatura para el agua de mar durante el periodo de estudio.

*iii. Viento*

Los datos de viento medidos provienen de tres estaciones meteorológicas, localizadas en Deltebre, Amposta y L’Ampolla. La localización de la estación de Deltebre (figura 4.29) es la más representativa de las condiciones del estuario, pero sólo se cuenta con datos de 1999 y éstos presentan muchos huecos, por lo que sólo se han obtenido datos para 114 días.

Debido a su localización, la estación de Amposta es la segunda en representatividad. Al igual que la estación de Deltebre, sólo hubo datos para 1999, pero la serie estaba completa y sus

datos fueron usados para llenar los huecos de la estación de Deltebre. Los datos correspondientes a Enero y Febrero del 2000 fueron obtenidos de las mediciones en la estación de L'Ampolla (figura 4.29).

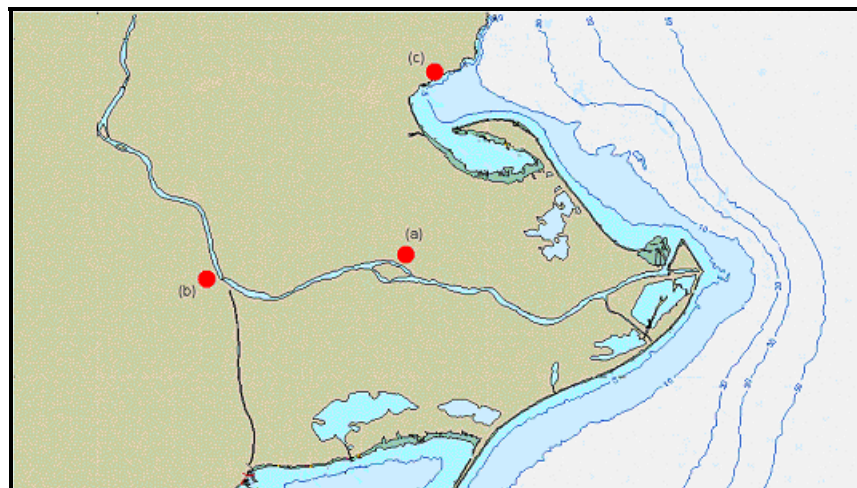
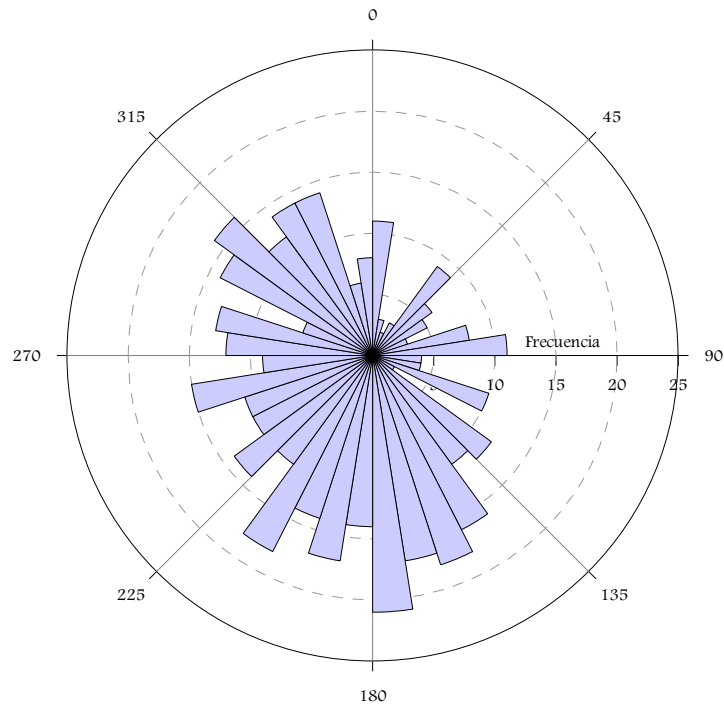


Figura 4.29. Estaciones meteorológicas, (a) Deltebre, (b) Amposta y (c) L'Ampolla

La tabla 4.6 muestra las direcciones, frecuencias y velocidades del viento durante el periodo de estudio. La dirección predominante de vientos es el sur (21%) aunque su velocidad promedio solo es de 2.2 ms<sup>-1</sup>. Las rachas y velocidades medias mayores son de los vientos provenientes de Norte y del Noroeste. En la figura IV.6 se muestra la distribución por direcciones de los vientos durante el periodo analizado.

Tabla IV.6. Resultado de la serie temporal del viento (Enero 1999 a Febrero del 2000).

Dirección	Número de días	Frecuencia (%)	Vel. Promedio (ms <sup>-1</sup> )	Vel. Máxima (ms <sup>-1</sup> )
N	35	8%	3.7	9.5
NE	25	6%	1.8	3.3
E	37	9%	1.9	5.6
SE	49	12%	2.1	5.6
S	88	21%	2.2	4.9
SW	67	16%	2.4	4.2
W	57	13%	3	7.9
NW	67	16%	3.8	10



*Figura 4.30. Rosa de viento para las frecuencias de la serie de tiempo del campo de velocidades (1 de Enero de 1999 al 29 de Febrero del 2000).*

#### 4.3.3. Calibrado del modelo mediante la salinidad

El primer paso que se ha seguido, ha sido la calibración de los diferentes parámetros que utiliza el modelo, y se han tratado de ajustar, de la mejor manera posible, las series temporales de salinidad de la capa superior e inferior durante el periodo de estudio (1 de Enero 1999 - 29 de Febrero del 2000) con los valores obtenidos durante las campañas PIONEER. Una vez conocidos los parámetros, se procedió con el análisis de los datos obtenidos de la simulación. El siguiente paso fue el análisis de sensibilidad de los diferentes parámetros así como de las condiciones de contorno (caudales, variación del nivel del mar, viento).

La tabla IV.7 muestra los valores calibrados de los parámetros más importantes del modelo. Es necesario hacer notar que el modelo numérico tiene un número considerable de parámetros internos, lo que significa que si alguno de ellos es modificado para mejorar los resultados, puede provocar que se vean afectados otros resultados, probablemente de manera negativa. El hecho de que suceda esto al manipular los parámetros para mejorar los resultados refleja el alto grado de no-linealidad entre los parámetros del modelo y todos los resultados obtenidos durante el proceso.

Tabla IV.7. Valor de los principales parámetros (Figueras, 2001).

Parámetros	Valores	Comentarios
$\Delta x$	1250 m/2500 m	Rama inferior / resto del dominio Resultados guardados cada 4 horas
$\Delta t$	3'	
M	13.514	
$f_w$	0.0024	
$f_i$	0.0060	
$D_0$	280 m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	
$D_1$	110 m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	
$R_0$	0.001/0.100	Desde Tortosa hasta 7.045 km de la boca / de aquí a mar abierto
$R_1$	0.100	

El primero de los parámetros,  $\Delta x$ , es la distancia máxima entre dos secciones transversales consecutivas (puntos h), lo que significa que si la distancia entre estas dos secciones es mayor que el valor establecido, entonces se generarán por el modelo una o más secciones transversales entre ellas hasta que la distancia entre estas dos secciones consecutivas sea menor a la distancia establecida. Este valor se usa para incrementar la resolución espacial de la batimetría. Por esta razón el valor se ha establecido en 2500 m en todo el dominio excepto en la rama inferior (curso bajo) donde se ha establecido la mitad del valor anterior porque la resolución espacial de la batimetría es lo suficientemente buena en todo el dominio. Además, la cuña salina permanece la mayor parte del tiempo en el tramo final de río, por lo que la resolución espacial se ha incrementado en esta parte. Con estos valores solo se han creado cuatro nuevas secciones transversales, todas ellas en el tramo final del río.

El segundo de los parámetros que se muestran en la tabla 4.7 es el tiempo que transcurre entre dos cálculos consecutivos,  $\Delta t$ . En el modelo se ha utilizado un tiempo de 3' porque es el valor más alto donde se sigue un patrón más sensitivo. A su vez, con el uso de este intervalo de tiempo el número de Courant (ec. 2.56) solamente excede su valor límite (1.0) dos veces durante la simulación del periodo, 12.17 horas después de iniciada la simulación a los 42.248 Km de Tortosa, debido a la transición de las condiciones iniciales a la simulación real, y a las 9627.92 horas de simulación a 28.453 Km de Tortosa. Los resultados de la simulación se guardaron cada 4 horas.

El tercero de los parámetros es el número de Manning, que es el inverso del número de rugosidad de Manning,  $n$ . El número de Manning fue igual a 13.514 ( $n = 0.074$ ) durante el proceso de la determinación de las elevaciones de las secciones transversales.

El siguiente parámetro es el factor de fricción del viento,  $f_w$ , que fue establecido con un valor de 0.0024, que es valor usado por el modelo. El valor de fricción para la interfase,  $f_i$ , fue establecido con un valor de 0.0060. Este valor toma parte en las ecuaciones de momentum bajo la fuerza de fricción de la interfase,  $T_i$ , y tiene gran influencia en la longitud de la cuña salina. El valor del factor de fricción de la interfase es altamente dependiente del número de interfase de Reynolds,  $Re_{e,i}$  (ver figura 4.31).

Los coeficientes de dispersión longitudinal  $D_0$  y  $D_I$  controlan la distribución longitudinal de la salinidad y la temperatura en cada capa. Valores altos permiten una transición suave entre los valores de las condiciones de contorno en cada extremo, mientras que valores bajos inducen a una distribución más acusada a lo largo del estuario. En este caso, el coeficiente de dispersión para la capa superior fue establecido en  $110 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  y el de la capa inferior en  $280 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  para poder así obtener valores en la capa inferior de salinidad mas constantes que en la capa superior. Sánchez-Cabeza y Pujol (1999) establecieron el rango de coeficientes de dispersión longitudinal para el del Ebro entre  $67 \pm 20$  a  $294 \pm 36 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ . Estos valores se refieren a los coeficientes de dispersión de la capa superior, ya que el estudio se llevo a acabo aguas arriba de Tortosa, donde no existe la cuña salina.

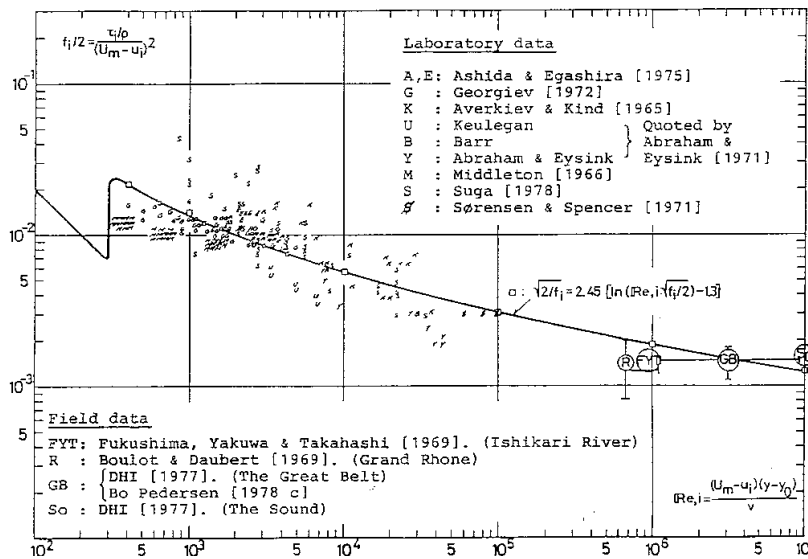


Figura 4.31. Correlación entre la fricción en la interfase ( $f_i$ ), y el número de Reynolds ( $Re_{e,i}$ ), (DHI 1992).



Los parámetros calibrados en último lugar corresponden a los factores de flujo de Richardson  $R_o$  y  $R_I$  que controlan el *entrainment* hacia arriba y hacia abajo, respectivamente. El DHI (1992) establece un rango entre 0 y 0.30, donde 0.05 es el valor recomendado para flujos subcríticos y 0.15 es el valor usado para las secciones de control donde ocurren resaltos hidráulicos internos.  $R_o$  fue establecido en 0.100 para todo el dominio, lo que significa que el *entrainment* hacia arriba está activado a lo largo de todo éste;  $R_I$  (*entrainment* hacia abajo) se estableció en 0.001 desde Tortosa hasta 7.045 km de la desembocadura, que corresponde con la estación R4, y de este punto hasta la condición de contorno de mar abierto,  $R_I$  tuvo un valor de 0.100, igual que  $R_o$ . Esta situación hace del *entrainment* un agente de mezcla, y es el único desde Tortosa hasta el punto mencionado anteriormente, mientras que más allá de este punto, el *entrainment* y la difusión turbulenta son los agentes mezcladores entre las dos capas debido a que los factores de flujo de Richardson son los mismos para las dos capas (figura 4.32).

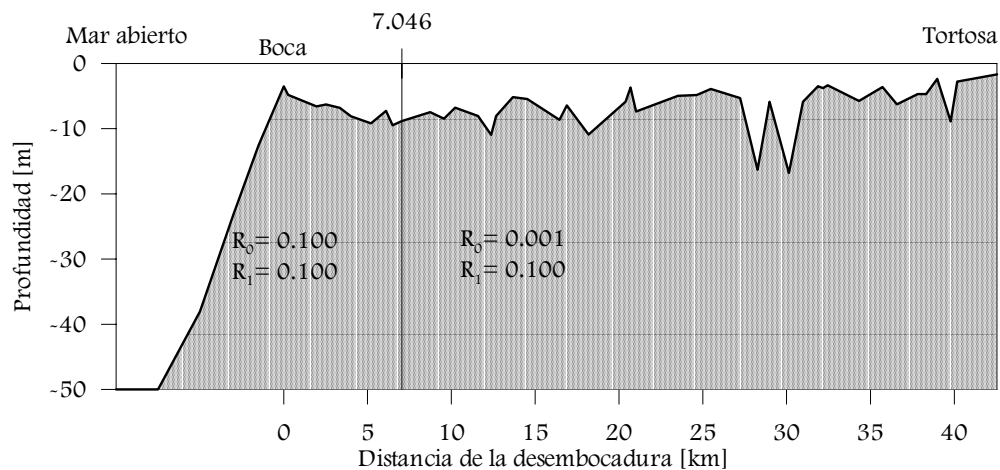


Figura 4.32. Distribuciones de los factores de flujo de masa de Richardson.

Una vez se obtuvieron los valores de los parámetros después del proceso de calibración, se procedió a comparar los resultados de la calibración con los valores obtenidos en las campañas PIONEER.

En la tabla IV.8 se muestran los días con medidas de salinidad disponibles en el estuario para cada campaña, el día de su muestreo y el caudal medio para cada día.

Tabla IV.8. Resumen de días con medidas disponibles en el estuario.

Campaña	Fecha	Caudal medio (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
PIONEER I	03-04-99	196.2
	05-04-99	161.7
PIONEER II	07-07-99	126.6
	08-07-99	119
	12-07-99	130.9
PIONEER III	05-10-99	187.0
	06-10-99	241.9
PIONEER IV	03-02-00	302.8
	05-02-99	186.4

Las dos tablas IV.9 y IV.10 resumen los valores de salinidad medidos en la capa superior y la inferior respectivamente.

Tabla IV.9. Valores de salinidad (en PSU) medidos en la capa superior en las 6 estaciones.

Fecha	r1	r2	r3	r4	r5	r6
03-04-99	3.92	3.25	1.33	1.45	0.34	0.34
05-04-99	3.83	2.58	1.00	0.59	0.42	0.34
07-07-99	3.44	3.02	2.85	2.66	1.43	0.94
08-07-99	4.67	4.12	3.12	2.80	1.50	1.14
12-07-99	2.61	2.57	1.80	1.63	0.88	0.58
05-10-99	5.57	5.26	4.78	4.60	3.81	-
06-10-99	4.80	4.29	3.56	3.34	2.69	2.19
03-02-00	1.16	0.83	0.61	0.62	0.49	0.49
05-02-00	1.14	0.77	0.68	0.55	0.49	0.49

Las casillas en las que no aparece ningún valor indican que, por diversas razones, ese día no se efectuaron medidas en la citada estación.

Tabla IV.10. Valores de salinidad (en PSU) medidos en la capa inferior en las 6 estaciones.

Fecha	r1	r2	r3	r4	r5	r6
03-04-99	35.47	35.68	34.92	34.27	35.42	27.84
05-04-99	36.23	35.77	35.42	35.05	35.85	33.02
07-07-99	34.32	34.84	35.08	35.34	36.09	35.3
08-07-99	33.76	34.27	34.16	34.61	34.21	34.23
12-07-99	35.95	35.73	36.46	36.45	35.87	35.70
05-10-99	29.9 (?)	19.30 (?)	35.58	36.01	35.37	-
06-10-99	35.49	33.52	35.41	35.65	35.12	33.92
03-02-00	*	*	32.31	15.4	*	*
05-02-00	36.7	35.22	31.82	30.84	27.12	*

Los asteriscos indican que en dicha estación ese día no pudo obtenerse medida de salinidad de la capa inferior por no existir cuña salina en dicho punto. Los datos seguidos por un interrogante se considera que son valores dudosos, ya que su magnitud no se corresponde con la de las otras estaciones. Por consiguiente estos datos no se tendrán en cuenta en el proceso de calibrado. Finalmente, cabe remarcar que el día 3 de febrero de 2000, aparentemente la cuña salina había sido expulsada del estuario, pero que en las estaciones r3 y r4 se detectó la presencia de agua salada. Esta agua salada parece pertenecer a bolsas residuales que quedaron atrapadas en el estuario durante el proceso de barrido de la cuña hacia el mar.

Las comparaciones entre los valores medidos en las campañas y los obtenidos por la calibración del modelo, se presentan en las figuras 4.33 a 4.44, mostrando los valores de las series de tiempo de salinidad (línea continua) y los valores de las campañas (puntos) (Figueras, 2001).

Aunque los valores obtenidos en las simulaciones no encajan exactamente con los valores de las mediciones en el campo, se puede observar que estos siguen las mismas tendencias que presentan las muestras y que las diferencias son relativamente pequeñas.

En la capa inferior, las series de tiempo tienen un rango de salinidad entre 31.5 y 37.5 psu, y los valores medidos están dentro de este rango. Las ligeras diferencias observadas en las estaciones más cercanas a la desembocadura pueden ser debidas al efecto de otros agentes de mezcla que no han sido tenidos en cuenta, como la mezcla por la rotura de las olas en la

boca del estuario. Río arriba, las diferencias son todavía menos importantes y gran parte de los valores de los muestreos están sobre la línea de los resultados de la simulación.

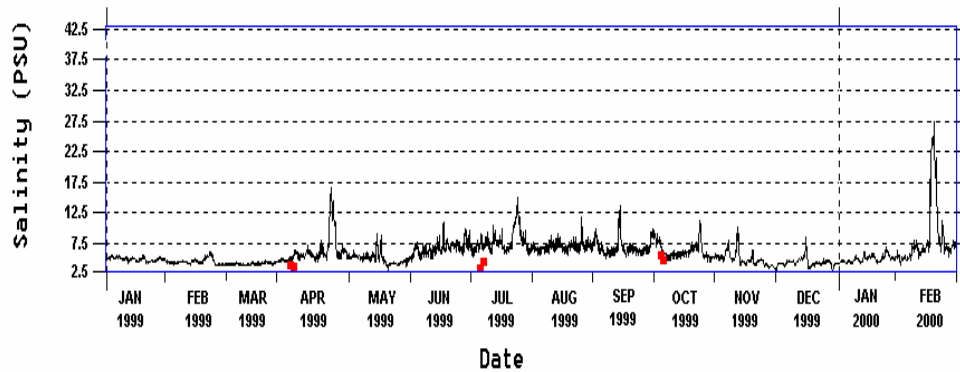


Figura 4.33. Salinidad simulada para la capa superior de las series de tiempo y valores del Hydrolab. R1.

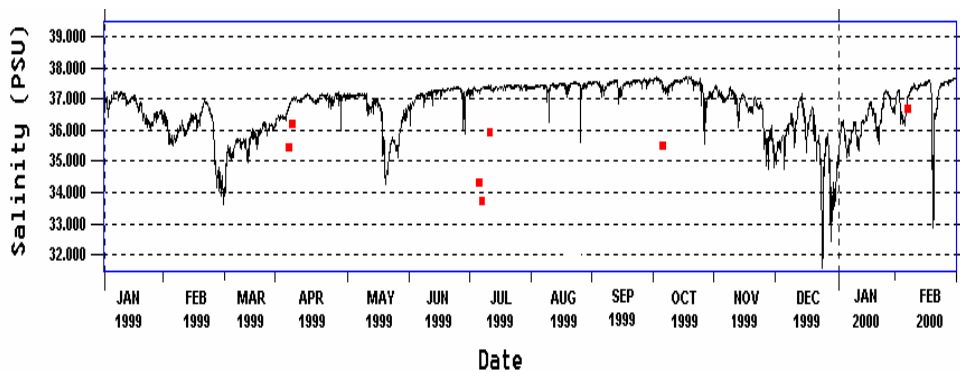


Figura 4.34. Salinidad simulada para la capa inferior de las series de tiempo y valores del Hydrolab. R1.

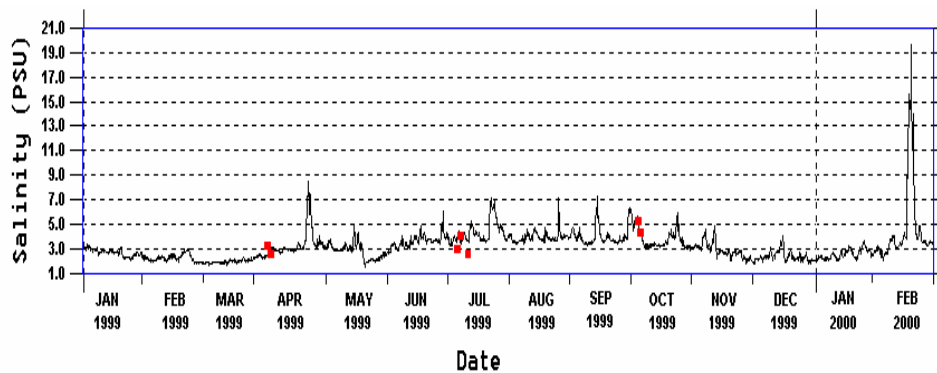


Figura 4.35. Salinidad simulada para la capa superior de las series de tiempo y valores del Hydrolab. R2.

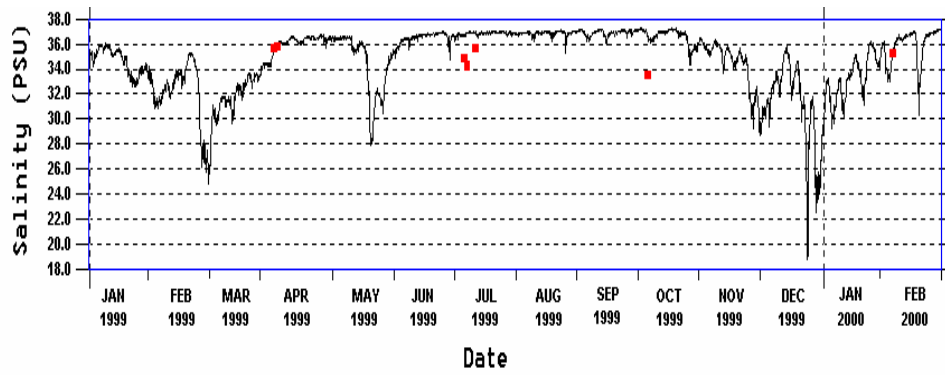


Figura 4.36. Salinidad simulada para la capa inferior de las series de tiempo y valores del Hydrolab. R2.

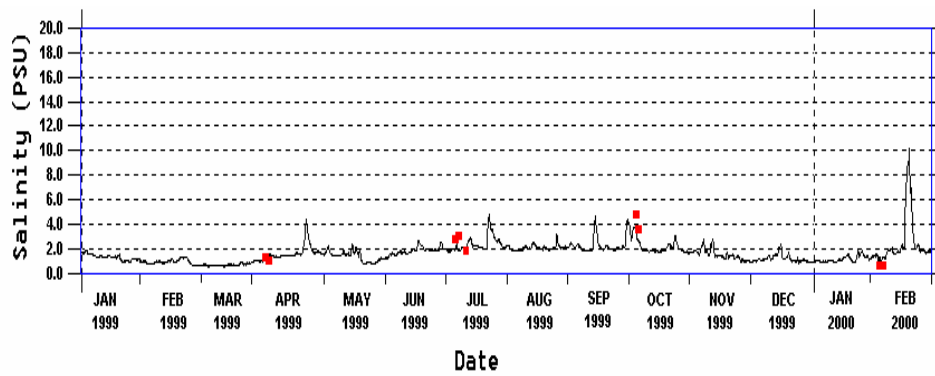


Figura 4.37. Salinidad simulada para la capa superior de las series de tiempo y valores del Hydrolab. R3.

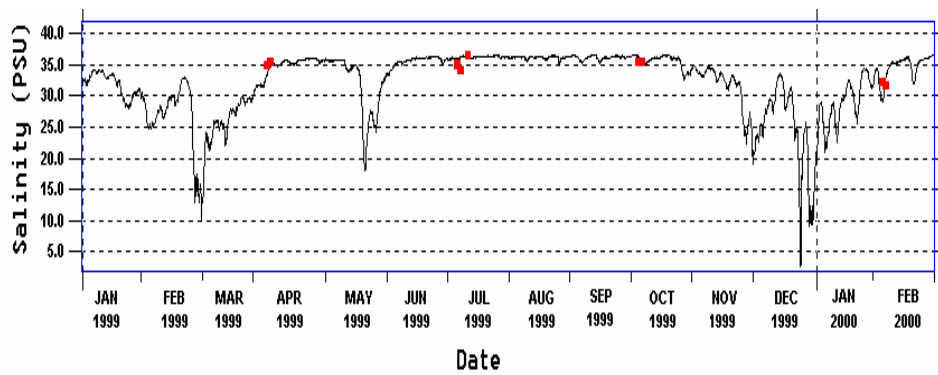


Figura 4.38. Salinidad simulada para la capa inferior de las series de tiempo y valores del Hydrolab. R3.

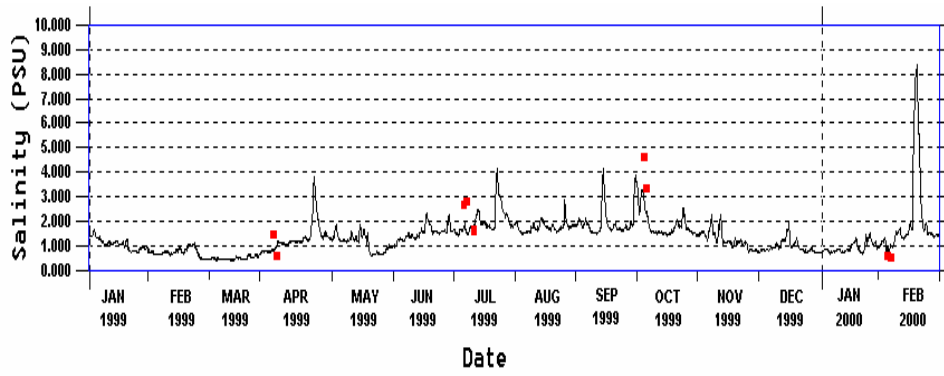


Figura 4.39. Salinidad simulada para la capa superior de las series de tiempo y valores del Hydrolab. R4.

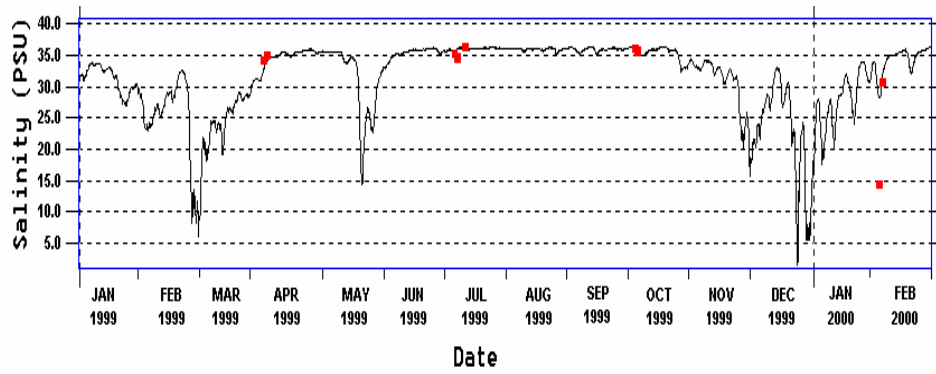


Figura 4.40. Salinidad simulada para la capa inferior de las series de tiempo y valores del Hydrolab. R4.

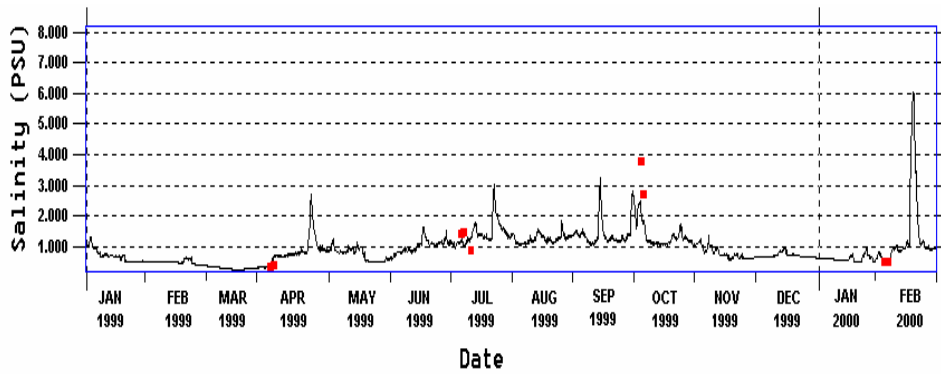


Figura 4.41. Salinidad simulada para la capa superior de las series de tiempo y valores del Hydrolab. R5.

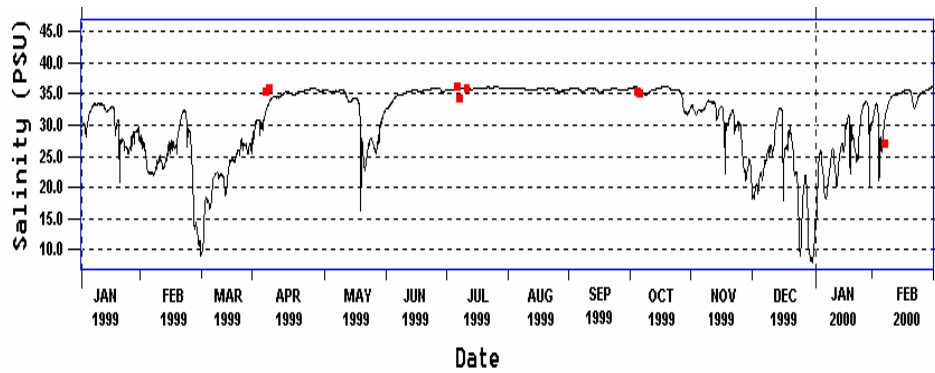


Figura 4.42. Salinidad simulada para la capa inferior de las series de tiempo y valores del Hydrolab. R5.

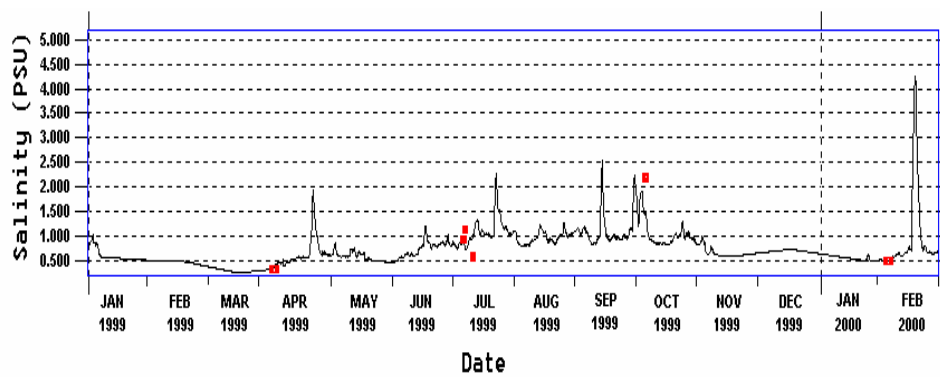


Figura 4.43. Salinidad simulada para la capa superior de las series de tiempo y valores del Hydrolab. R6.

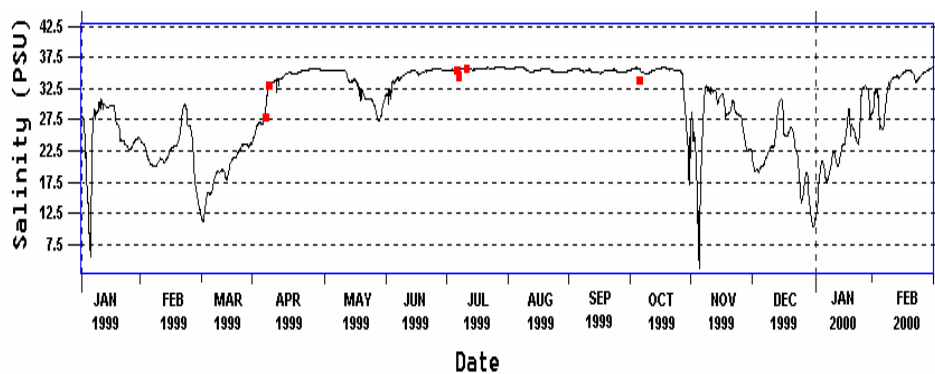


Figura 4.44. Salinidad simulada para la capa inferior de las series de tiempo y valores del Hydrolab. R6.

En general, las series de tiempo de la simulación parecen ajustarse de una forma aceptable a los valores obtenidos en las campañas, aunque éstos no son suficientes, ni están bien distribuidos a lo largo del tiempo, ya que el número de muestras es demasiado pequeño y el tiempo entre campañas parece demasiado largo. Se debería adoptar unas mediciones en el campo con una periodicidad mas acorde a lo que se quiere simular. Sin embargo, esta

solución implicaría la instalación de aparatos de muestreo varias veces al año con el consiguiente aumento de los costes de adquisición.

#### 4.4. Análisis de la dinámica de la cuña salina

##### 4.4.1. Dinámica en función de los datos disponibles

En la figura 4.45 se resumen los datos existentes en la literatura relativos a caudales medios diarios en Tortosa y posición de la cuña salina.

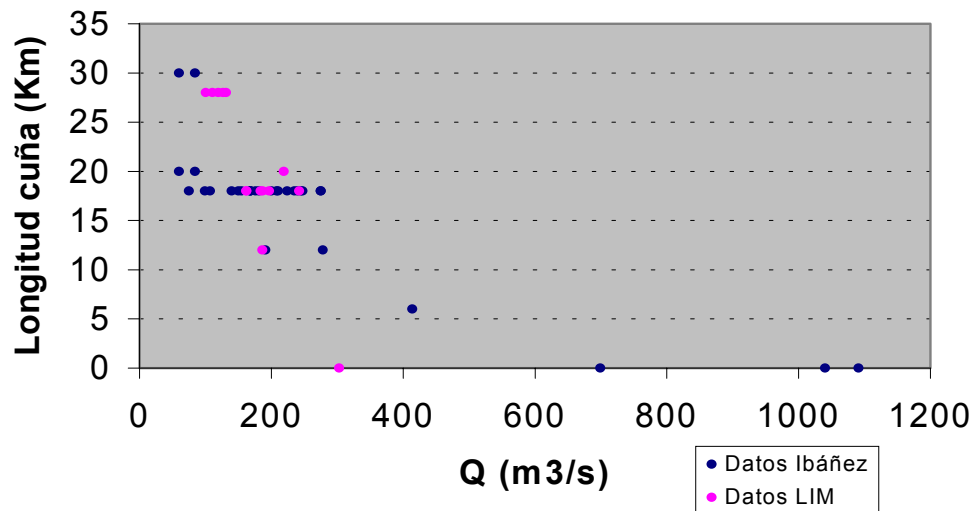


Figura 4.45. Posiciones de la cuña salina observadas durante las campañas

Puede constatar que el extremo de la cuña se sitúa en 5 posiciones fundamentalmente:

Entre los 28 y 30 Km (alrededores de Amposta). Los rangos de caudales en los que se observa en esta posición varían entre 60 y 84  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$  en los datos de Ibáñez (1993) y 100 a 131  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$  en los datos del LIM-LTMA (Sierra *et al.*, 1999, 2001b, 2002c).

Entre los 18 y 20 Km (alrededores de la Isla de Gracia). Los caudales para los que se han observado estas posiciones son de 100 a 275  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$  según Ibáñez y 162 a 242  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$  según LIM-LTMA.

A los 12 Km Se ha apreciado que en algunas ocasiones la cuña no llega directamente hasta la Isla de Gracia sino que queda confinada en una posición intermedia entre dicha isla y Migjorn, donde también hay una zona de baja profundidad. Ibáñez menciona esta posición en dos ocasiones, con caudales de 191 y 278  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$  mientras que LIM-LTMA lo observaron para 186  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ .



A los 6 Km (Migjorn). Sólo hay una observación de esta posición y corresponde a los datos de Ibáñez, con  $414 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .

Ausencia de cuña salina del estuario. Esta circunstancia se menciona 3 veces en los datos de Ibáñez (caudales entre  $699$  y  $1091 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ) y una vez en los datos del LIM ( $303 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ). Cabe mencionar que este último corresponde a un caso muy particular, como ya se mencionó en el apartado de calibrado, ya que la cuña ha sido barrida del estuario pero quedan bolsas de agua salada en el interior del mismo.

Los diversos autores asumen la hipótesis de que la posición de la cuña salina está fundamentalmente condicionada por los caudales y la topografía del fondo y, en menor medida, por el nivel del mar. Está comprobado que el estuario existen una serie de puntos de poca profundidad, que retienen a la cuña entre un rango determinado de caudales. Las distintas fuentes que proporcionan datos sobre la dinámica de dicha cuña salina, discrepan a la hora de fijar estos rangos de caudales.

Una posible explicación de parte de estas diferencias en las observaciones radica en el hecho de que la dinámica de la cuña salina podría depender no sólo del caudal medio diario observado durante las mediciones, sino también de los caudales registrados en los días anteriores. Así por ejemplo, en las medidas realizadas por el LIM se aprecia que el día 31 de marzo de 1997, el límite de la cuña excedía claramente la Isla de Gracia pese a que el caudal medio diario fue de  $219 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , que corresponde a un valor que según todas las fuentes debería haber retenido la cuña en la Isla de Gracia. Analizando los caudales medios diarios registrados previamente se observa que el día anterior fue de  $186.6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  y dos días antes se registró un caudal de  $146.8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Esto podría indicar que la cuña estaba situada aguas arriba de la Isla de Gracia y que el incremento de caudal la arrastró hacia la desembocadura (sin descartar otros factores como las posibles variaciones del nivel del mar).

El día 30 de junio de 1997 se detectó la cuña salina en las inmediaciones de Amposta (unos 28 Km aguas arriba de la desembocadura). Durante la semana anterior, los caudales medidos estuvieron comprendidos entre  $110$  y  $122 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , con la excepción de un día en que llegaron a  $142 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .

Durante la campaña de primavera de 1999, se midió la salinidad en los días 3, 4, 5 y 7 de abril. En todas ellas se comprobó que la cuña salina quedaba retenida en la Isla de Gracia.

Los caudales medios diarios medidos durante estos días variaron entre 162 y 196 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>. Los caudales registrados durante los 5 días anteriores variaron entre 200 y 300 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.

En la campaña de verano de 1999, se detectó la presencia de la cuña en las inmediaciones de Amposta durante los días en que se midió en el estuario (7, 8, 9 y 12 de julio). Los caudales registrados durante esta época se muestran en la tabla IV.11. Se observa que durante los días de mediciones el caudal varió entre 110 y 131 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> y que durante el periodo previo osciló entre 113 y 165 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>, por lo que la existencia durante varios días de caudales relativamente bajos, favoreció la llegada de la cuña a Amposta, pese a la alternancia con caudales algo superiores que la deberían haber arrastrado aguas abajo.

*Tabla IV.11. Caudales medios diarios registrados durante la campaña PIONEER-II (verano de 1999).*

Fecha	Caudal (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
1/07/99	113.4
2/07/99	165.4
3/07/99	150.1
4/07/99	123.2
5/07/99	159.5
6/07/99	144.0
7/07/99	126.6
8/07/99	119.0
9/07/99	110.4
10/07/99	123.6
11/07/99	113.9
12/07/99	130.9

No obstante, esta aparente dependencia de la posición de la cuña salina respecto a los caudales registrados en los días anteriores no se corresponde con lo observado durante la campaña de otoño de 1999. En la misma, la cuña se mantuvo en los alrededores de la Isla de Gracia (días 5 y 6 de octubre). Los caudales medidos en Tortosa durante estos días se presentan en la tabla IV.12:

*Tabla IV.12. Caudales medios diarios registrados durante la campaña PIONEER-III (otoño de 1999).*

Fecha	Caudal ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ )
1/10/99	104.8
2/10/99	120.3
3/10/99	104.2
4/10/99	125.5
5/10/99	187.0
6/10/99	241.9

Se constata que sí bien, durante los días de las mediciones, los caudales de 187 y 241.9  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$  se corresponden con la posición de la cuña salina (en la Isla de Gracia), en los días anteriores los caudales fueron lo suficientemente bajos como para mantener la cuña salina aguas arriba de la citada Isla. Esto parece indicar que el patrón de comportamiento de la cuña es más complejo y que además del caudal y de la topografía del fondo, puede haber otros factores (variaciones del nivel del mar) condicionando la posición de la cuña salina. Asimismo también podrían influir las grandes oscilaciones horarias que tiene el caudal del río, ya que debido a las mismas, el caudal medio diario podría ser solamente un valor de referencia de las tendencias de la cuña, aunque no lo suficientemente indicativo.

*Tabla IV.13. Caudales medios diarios registrados durante la campaña PIONEER-IV (invierno 2000).*

Fecha	Caudal ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ )
31/01/00	190.9
1/02/00	351.6
2/02/00	331.4
3/02/00	302.8
4/02/00	200.0
5/02/00	186.4

Finalmente, durante la campaña de invierno, los caudales medidos en Tortosa fueron los que se muestran en la tabla IV.13. Puede observarse que durante el primer día de campaña y los días previos los caudales son lo suficientemente grandes ( $> 300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ) como para haber arrastrado la cuña hasta las cercanías de la desembocadura. Sin embargo, en los días posteriores, se produjo una fuerte disminución de los caudales hasta 200 y 186.4  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ , que empezaron a arrastrar la cuña hasta la Isla de Gracia (el día 5 se encontraba a unos 12 Km de la desembocadura).

Para analizar de forma análoga los datos de Ibáñez (1993), éstos se han sintetizado en las tres tablas IV.14, IV.15 y IV.16, donde se agrupan según la distancia alcanzada por el límite de la cuña salina. En las mismas, Q es el caudal en  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$  y (d) se refiere a la fecha en la que se midió la posición de la cuña, mientras que (d-1) indica el día anterior, (d-2) se refiere a dos días antes de la fecha (d) y así sucesivamente.

*Tabla IV.14. Datos de Ibáñez (1993). Cuñas salinas situadas aguas abajo de la Isla de Gracia*

Fecha (d)	Cuña Km	Q (d)	Q (d-1)	Q (d-2)	Q (d-3)	Q (d-4)	Q (d-5)
29-4-88	0	1091	1187	1198	1193	1292	1558
10-6-88	6	414	396	532	566	437	405
14-6-88	0	699	430	454	543	414	396
22-6-88	0	1040	1220	1253	1264	1138	1107
8-2-90	12	212	215	209	186	191	221
21-2-91	12	127	130	113	105	81	84

Del análisis de los datos de la tabla 4.14 se desprende que series continuadas de más de 400  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$  arrastran la cuña fuera del estuario, aunque se presentan excepciones como el día 10-6-88, en los que la cuña quedó alrededor de la Gola de Migjorn con caudales continuos cercanos o superiores a los 400  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ . El día 8-2-90 los caudales registrados durante esta fecha y los 5 días anteriores (entre 186 y 221  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) deberían situar la cuña en la Isla de Gracia, mientras que según Ibáñez está en una posición intermedia entre dicho punto y la desembocadura. Por su parte, el día 21-2-91, la cuña se encontraba también en una posición intermedia, cuando según los caudales registrados en dicha fecha, y sobre todo en las anteriores, la cuña salina debería estar en la Isla de Gracia o incluso más allá de la misma.

En la tabla siguiente se recogen los días en los que la cuña salina estaba situada en la Isla de Gracia según Ibáñez (1993), junto con los caudales de los 5 días anteriores. Puede observarse una cierta discrepancia entre los caudales proporcionados por Ibáñez y los de la columna Q(d) que son los proporcionados por la Confederación Hidrográfica del Ebro. Puede apreciarse que salvo en los días 10 y 19 de julio de 1990, el resto de observaciones tiene los caudales medios diarios del día de la medición y de los 5 días anteriores comprendidos entre 100 y 300  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ , que son los valores entre los cuales la cuña debería estar situada en la Isla de Gracia según Ibáñez. El día 19 de julio esto también se cumple para el día de la medición y los 3 días anteriores. Sin embargo, los datos del 10 de julio

muestran un caudal medio diario de  $90 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  el día de las mediciones. Para este caudal, la cuña debería estar en la Isla de Sapinya, cosa que no sucede, quizás porque el día anterior se registró un caudal de  $134 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , que llevó la cuña hasta la Isla de Gracia.

*Tabla IV.15. Datos de Ibáñez (1993). Cuñas salinas situadas en la Isla de Gracia*

Fecha (d)	Cuña Km	Q (d)	Q (d-1)	Q (d-2)	Q (d-3)	Q (d-4)	Q (d-5)
21-7-88	18	202	234	239	295	145	142
27-7-88	18	256	248	215	258	261	258
3-8-88	18	298	306	258	250	210	139
19-8-88	18	161	231	253	269	256	258
25-8-88	18	176	137	133	149	184	191
30-8-88	18	298	301	256	250	186	176
15-9-88	18	221	239	269	264	261	253
27-9-88	18	229	286	278	301	226	272
13-10-88	18	231	229	226	231	253	215
3-11-88	18	258	245	242	272	245	237
15-11-88	18	261	258	272	278	286	275
1-12-88	18	267	281	286	283	306	289
22-12-88	18	189	194	253	258	237	239
13-1-89	18	197	194	204	194	186	171
13-7-89	18	118	166	168	178	156	163
14-7-89	18	171	118	166	168	178	156
30-5-90	18	189	107	105	134	144	144
10-7-90	18	90	134	77	94	75	94
19-7-90	18	127	130	113	105	81	84
24-7-91	18	168	184	194	194	194	194
13-5-92	18	247	281	197	218	264	294

Finalmente, en la tabla IV.16 se muestran los datos de caudales en los casos de cuñas salinas observadas por Ibáñez aguas arriba de la Isla de Gracia.

Tabla IV.16. Datos de Ibáñez (1993). Cuñas salinas aguas arriba de la Isla de Gracia

Fecha (d)	Cuña Km	Q (d)	Q (d-1)	Q (d-2)	Q (d-3)	Q (d-4)	Q (d-5)
17-2-89	20	84 ?	83	~	75	77	~
13-3-89	30	60 ?	74	88	~	105	~
5-10-89	20	74	74	74	77	77	86
9-7-91	30	84	84	84	86	86	86

Los interrogantes en dicha tabla son debidos a que Ibáñez da como caudal medio diario la cifra indicada, mientras que la Confederación Hidrográfica del Ebro indica que no hay datos registrados durante estos días. En la tabla anterior puede apreciarse que el día 5 de octubre de 1989 y en los 4 días anteriores se midieron caudales inferiores a  $80 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , por lo que la cuña, en lugar de estar en la Isla de Sapinya debería estar en Amposta. Lo contrario sucedió el 9 de julio de 1991, puesto que ese día y los 5 anteriores se registraron caudales superiores a  $80 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , por lo que la cuña debería estar en la Isla de Sapinya y no en Amposta.

Todo lo anterior puede sintetizarse remarcando que el comportamiento de la cuña salina es más complejo de lo que algunos esquemas simplistas (basados únicamente en los caudales medios diarios) pretenden indicar.

Esto puede ilustrarse teniendo en cuenta los datos de variación del nivel del mar, registrados durante las campañas PIONEER, tal como se muestran en la tabla IV.17. En la misma, además del caudal medio diario y de la posición de la cuña, se indican los niveles medio, máximo y mínimo registrados durante el día.

Tabla IV.17. Caudales, posiciones de la cuña y niveles del mar durante las campañas PIONEER

Fecha	Q ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ )	Posición cuña (Km.)	NMM (cm.)	NMM max(cm.)	NMM min(cm.)
03/04/99	196.2	18	-8.9	-3	-16.5
04/04/99	162.2	18	-8.8	0	-12.3
05/04/99	161.7	18	-9.2	-3.4	-13
07/04/99	183.8	18	-9	-5.5	-13.7
07/07/99	126.6	28	-5.6	-1.1	-11
08/07/99	119	28	-6.8	-1.9	-11.1
09/07/99	110.4	28	0.2	4.7	-7.6
12/07/99	130.9	28	13.2	21.8	5.7

05/10/99	187	18	3.5	13.9	-7.9
06/10/99	241.9	18	8.7	17.2	3.8
03/02/00	302.8	0	-18.3	-8.6	-25.9
05/02/00	186.4	12	-17.6	-10.2	-25.6

Los niveles del mar bajos explicarían que la cuña estuviera más cerca de la desembocadura de lo que le correspondía según el caudal en los días 3 y 5 de febrero de 2000. El nivel alto explicaría porque el día 12 de julio de 1999 la cuña llegaba hasta Amposta con un caudal relativamente alto ( $130.9 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ) para dicha posición.

Basándose en la relación entre el caudal y la posición de la cuña salina y en los caudales medios mensuales del periodo comprendido entre 1970 y 1996, el PHN (2000) deduce que la cuña está presente en la Isla de Gracia en promedio unos 6.6 meses, de los cuales 1.2 meses ha superado la isla. El PHN sugiere que se podrían controlar los flujos y la salinidad del Delta mediante una adecuada explotación de los embalses de Ribarroja y Mequinenza.

#### 4.4.2. Dinámica en función de las simulaciones

Se ha simulado, mediante el modelo numérico, la dinámica de la cuña durante el periodo de enero de 1999 a febrero de 2000, con el fin de tener una idea general del comportamiento y movimiento de la cuña. En las figuras 4.46 a 4.51 se muestran las series temporales de salinidad en distintos puntos del estuario (Amposta, Isla de Gracia y Migjorn), analizándose su comportamiento. Así, en Amposta (a unos 14.3 Km. de Tortosa, se aprecia como la cuña permanecería durante todo el verano (un 36.6% del año 1999 y un 31.4% del tiempo estudiado).

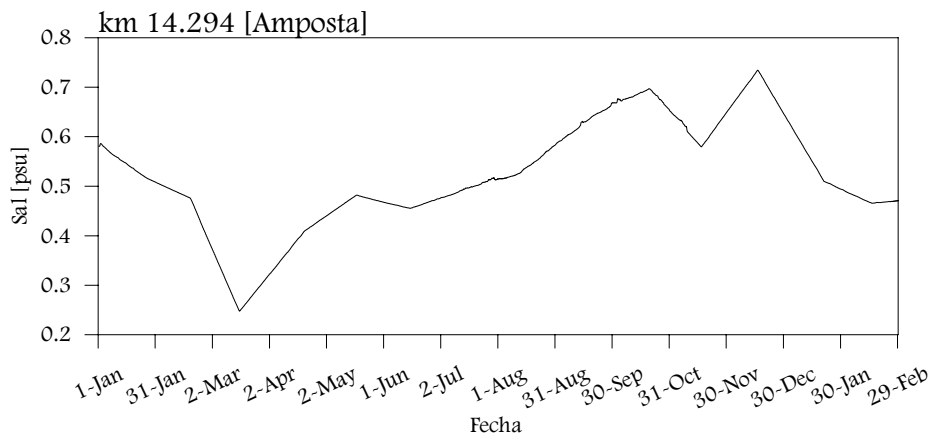


Figura 4.46. Serie temporal de salinidad para la capa superior a 14.3 Km de Tortosa (en Amposta).

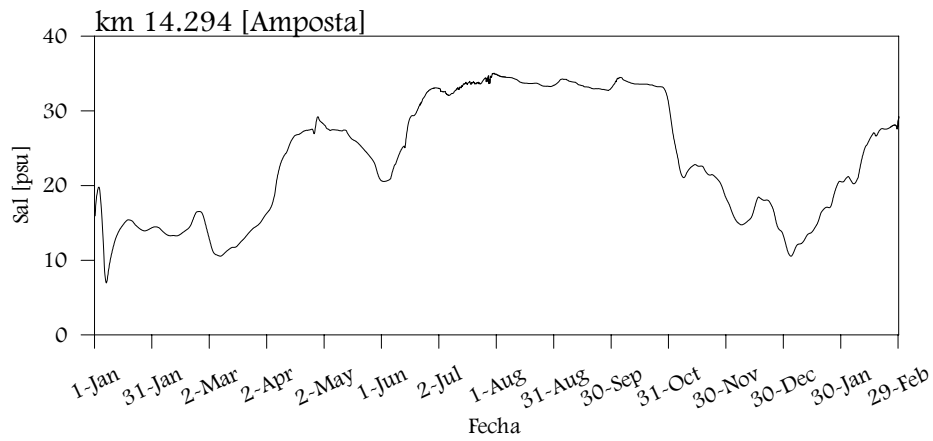


Figura 4.47. Serie temporal de salinidad para la capa inferior a 14.3 Km de Tortosa (en Amposta).

Por su parte, en la Isla de Gracia, el tiempo de permanencia de la cuña según la simulación sería del 58.4% del año 1999 y del 57.2% del periodo de 14 meses estudiado. Se observa que, según la simulación, la cuña permanece en la Isla de Gracia entre abril y octubre, con un ligero paréntesis en la segunda quincena de mayo.

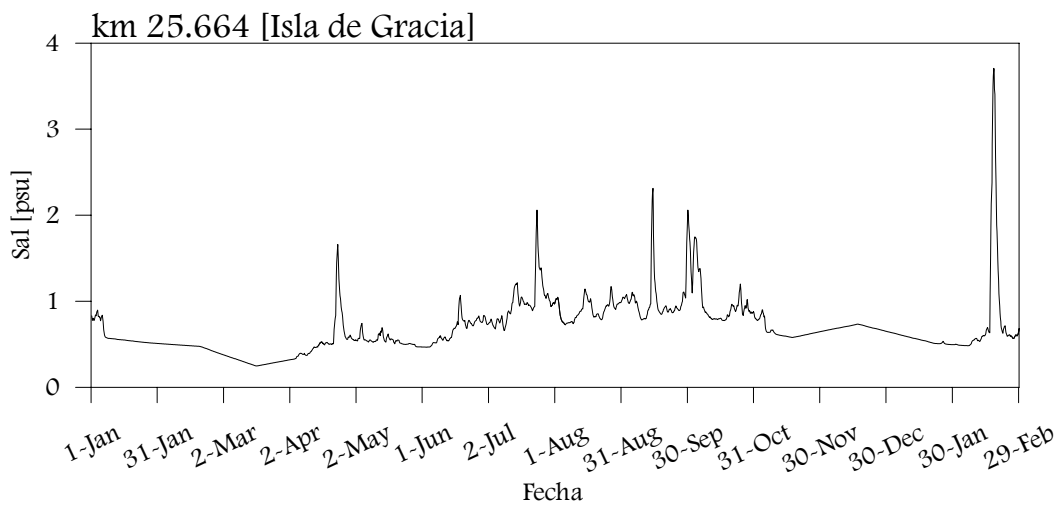


Figura 4.48. Serie temporal de salinidad para la capa superior a 25.7 Km de Tortosa (Isla de Gracia).



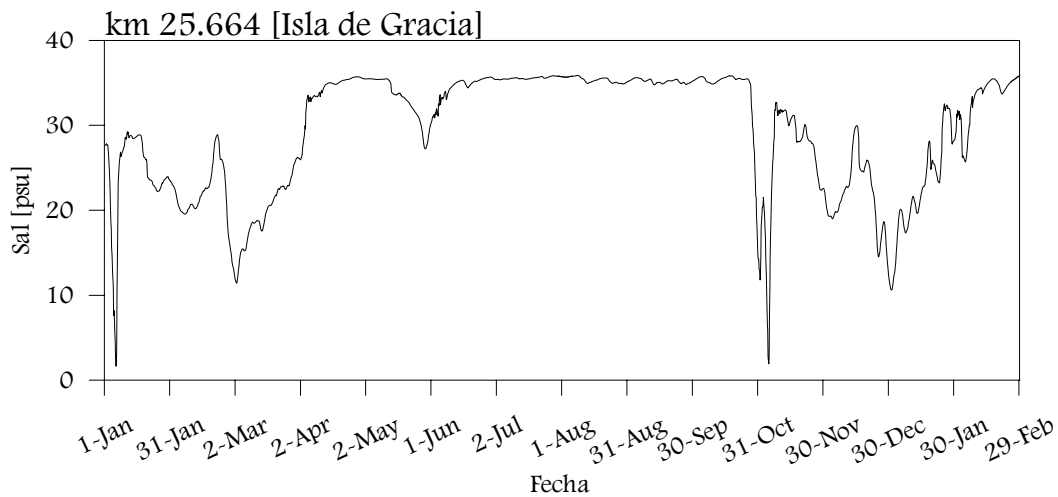


Figura 4.49. Serie temporal de salinidad para la capa superior a 25.7 Km de Tortosa (Isla de Gracia).

Finalmente, en la zona de Migjorn, en la simulación se detecta que la cuña está presente el 73.3% del año 1999 y el 72.1% del tiempo total. Solamente en breves intervalos de otoño e invierno, así como en la segunda quincena de mayo, la cuña estaba situada aguas abajo de esta zona.

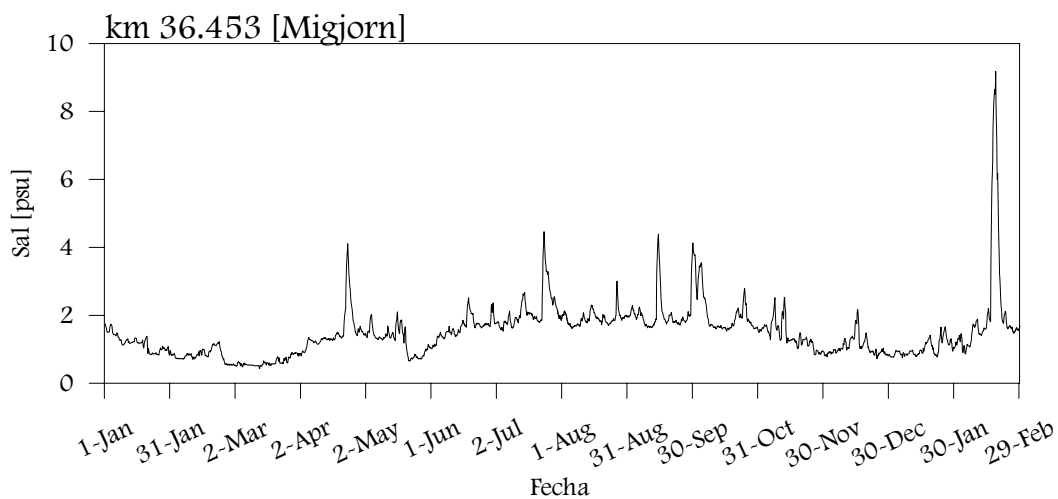


Figura 4.50. Serie temporal de salinidad para la capa superior a 36.5 Km de Tortosa (Migjorn).

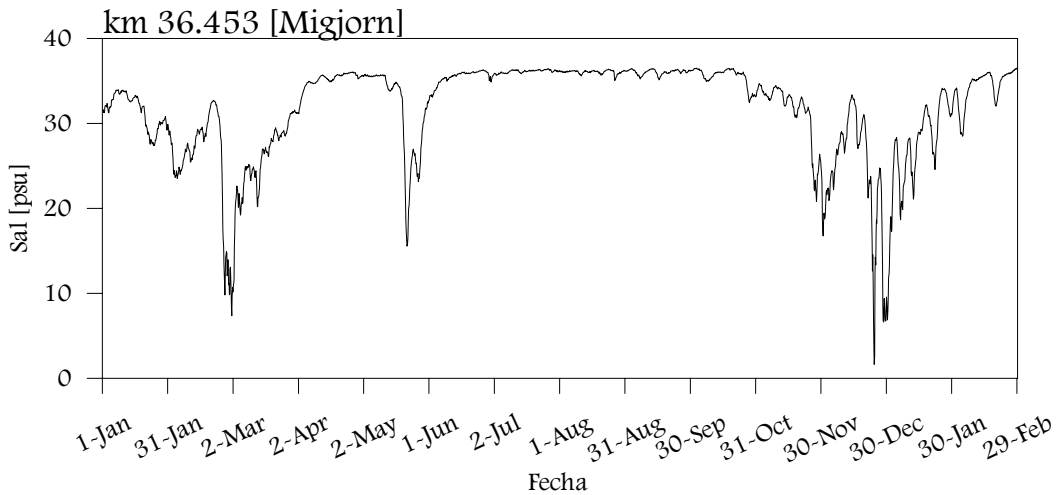


Figura 4.51. Serie temporal de salinidad para la capa superior a 36.5 K. de Tortosa (Migjorn).

A continuación se presentan distintas posiciones típicas de la cuña salina, obtenidas durante el proceso de simulación. En la figura 4.52 puede verse la interfase entre las capas de agua dulce y salada en una posición cercana a Amposta.

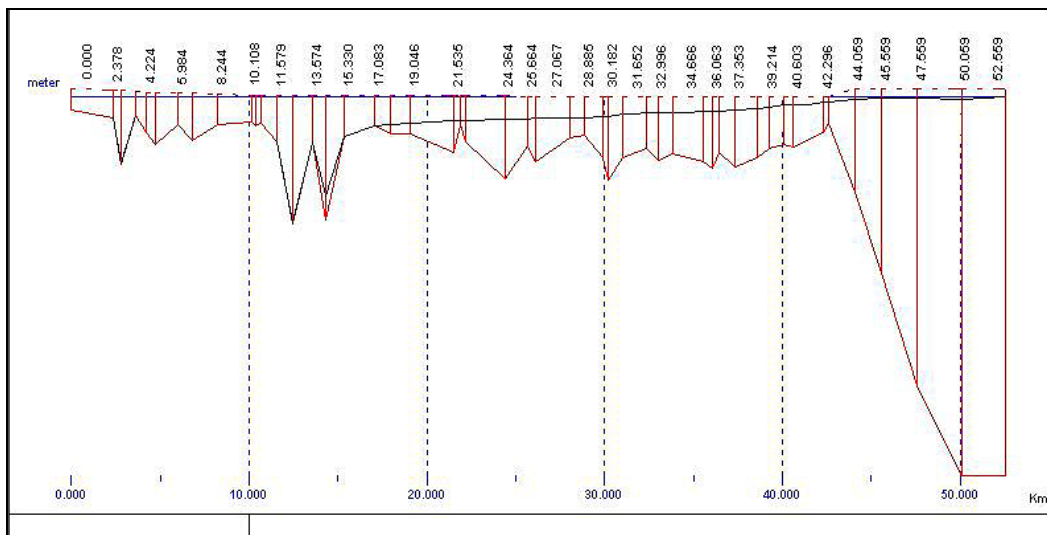


Figura 4.52. Posición de la cuña salina cerca de Amposta.

En la figura 4.53 se ve la cuña situada cerca de la Isla de Gracia y en la 4.54 se ve la cuña en los alrededores de Migjorn. Obsérvese como en esta última ha quedado una bolsa de agua salada atrapada en las cercanías de la Isla de Gracia (Km 22 a 25 de Tortosa).

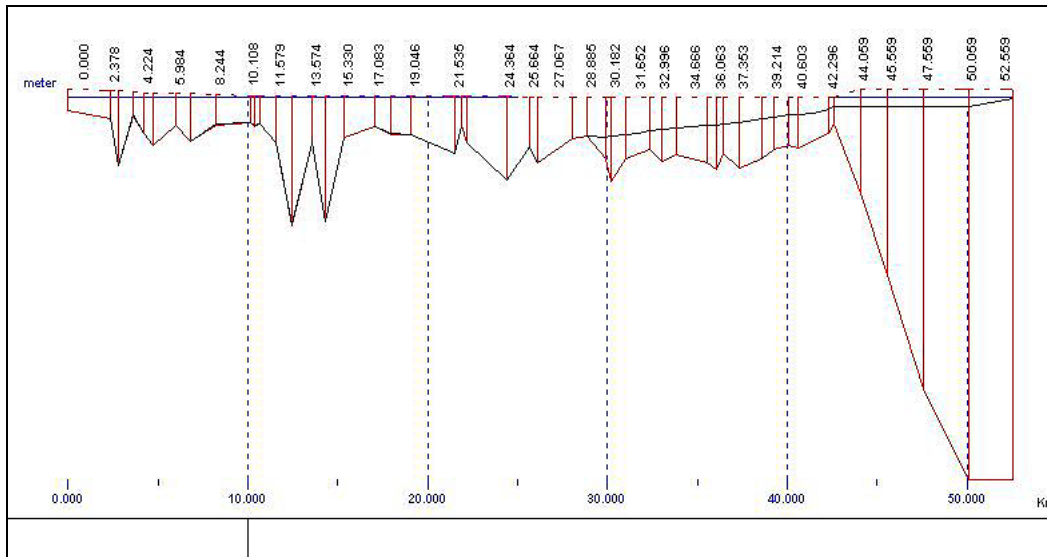


Figura 4.53. Posición de la cuña salina cerca de la Isla de Gracia.

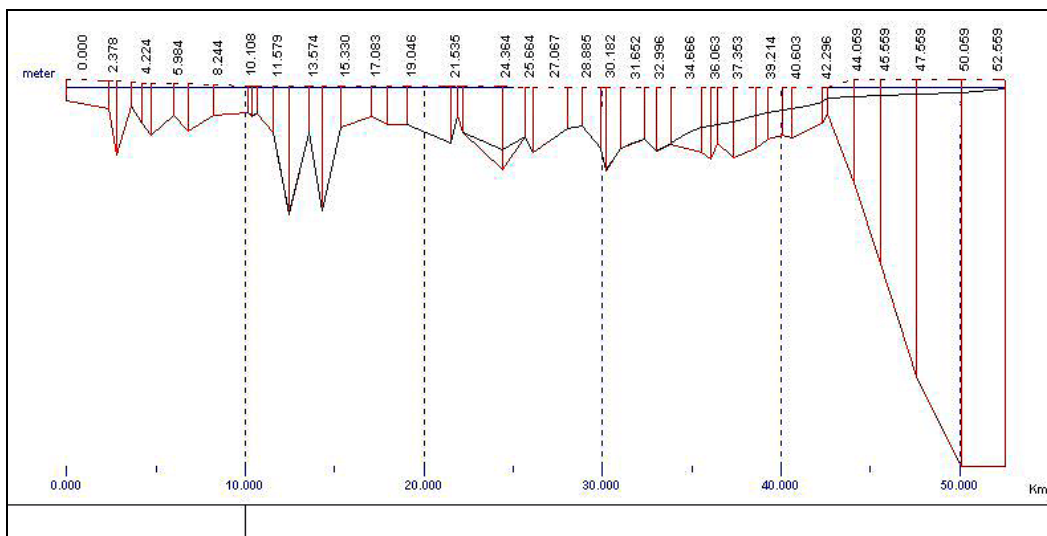


Figura 4.54. Posición de la cuña salina cerca de MIgjorn

En la figura 4.55 se muestran los resultados resumidos de la simulación durante el periodo estudiado (Enero 1999 – Febrero 2000). En ella se han representado las longitudes de la cuña con respecto a los caudales medios diarios. Puede apreciarse que la mayoría de los casos (representados por un punto) siguen un patrón de comportamiento similar al observado en las campañas de medidas.

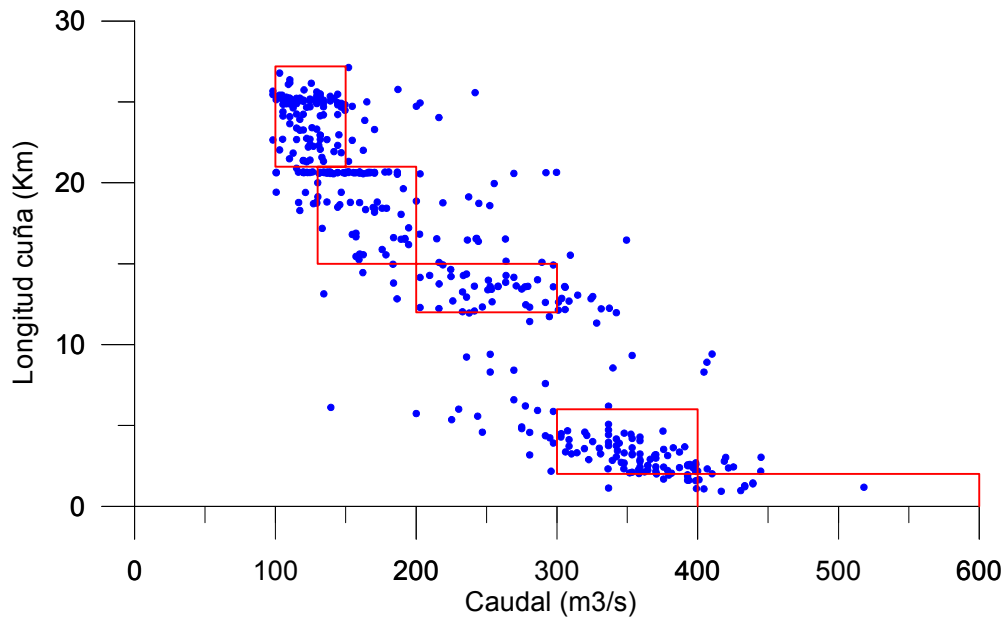


Figura 4.55. Longitud de la cuña salina con respecto al caudal medio diario

Se constata también la existencia de cinco zonas donde se acumulan “la mayoría de las posiciones de la cuña salina” y que, en general, se obtienen para unos rangos determinados de caudales (estas zonas y rangos de caudales se han dibujado en forma de cuadrados en el gráfico anterior).

De la Isla de Sapinya a Amposta (Km 21 a 28 desde la desembocadura). Corresponden a las posiciones alcanzadas cuando se supera la Isla de Sapinya y se han obtenido para rangos de caudales entre 100 y 150  $m^3s^{-1}$ .

Alrededores de la Isla de Gracia (Km 15 a 21 desde la desembocadura). Estas posiciones se registran, en la mayoría de las ocasiones, para caudales entre 130 y 200  $m^3s^{-1}$ .

Posición intermedia entre Gracia y Migjorn (Km 12 a 15 desde la desembocadura). La cuña a veces permanece entre las dos mencionadas localizaciones. Según la simulación numérica esto sucede, en general, para valores entre 200 y 300  $m^3s^{-1}$ .

Alrededores de Migjorn (Km 2 a 6 desde la desembocadura). Esta situación se presenta, según el modelo, para caudales comprendidos entre 300 y 400  $m^3s^{-1}$ .

Cuña fuera del estuario. Puede considerarse que no hay cuña salina cuando su extremo está a menos de 2 Km de la desembocadura. El proceso de simulación ha detectado que, en general, esto sucede para caudales mayores de 400  $m^3s^{-1}$ .

Los puntos aislados que no siguen el patrón antes mencionado corresponden a posiciones transitorias de la cuña, que está desplazándose hacia delante o hacia atrás hasta una de sus localizaciones estables.

Otro aspecto importante de la dinámica de la cuña es la determinación del punto donde se estabiliza ésta cuando se mantiene un caudal constante. Si el caudal es de  $100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  la cuña permanece confinada en Amposta, tal como puede verse en la figura 4.56.

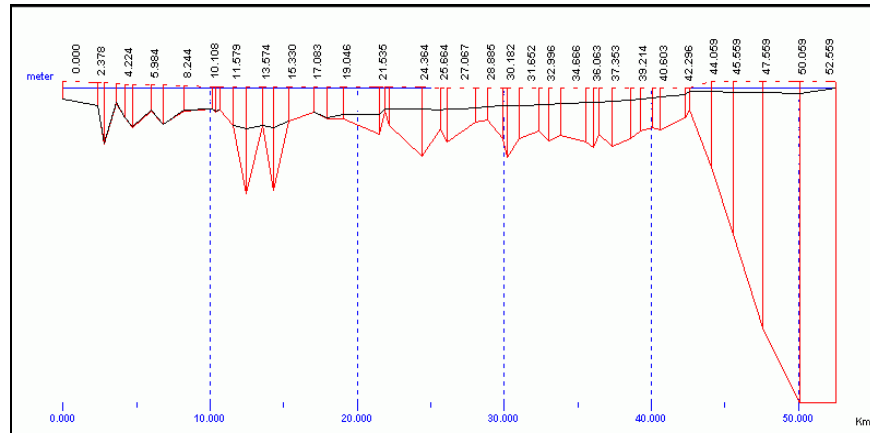


Figura 4.56. Posición de la cuña salina para un caudal constante de  $100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .

Si el caudal aumenta hasta  $130 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  la cuña se estabiliza en los alrededores de la Isla de Gracia. Lo mismo ocurre si se aumenta el caudal hasta  $150 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Para caudales constantes de alrededor de  $300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , la cuña permanece en un punto intermedio entre la Isla de Gracia y Migjorn, tal como se muestra en la figura 4.57.

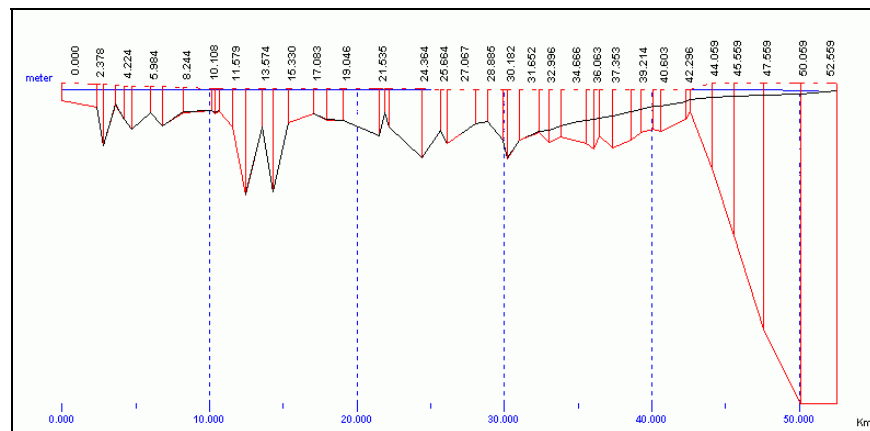


Figura 4.57. Posición de la cuña salina para un caudal constante de  $300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .

Finalmente, para caudales constantes del orden de  $350 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , la cuña permanece en las cercanías de Migjorn.

4.5. Posibles efectos del cambio climático (CC) en la cuña salina

Para analizar los posibles efectos del cambio climático (CC) se ha efectuado una simulación consistente en asumir que el nivel del mar ha ascendido 50 cm. Este efecto se ha logrado considerando las mismas condiciones (batimetría, caudales y viento) que en el caso de calibración, pero asumiendo que las variaciones del nivel del mar tenían un valor 50 cm mayor que las del citado caso de calibración. Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 4.58 a 4.65, en forma de series temporales de salinidad para diversos puntos.

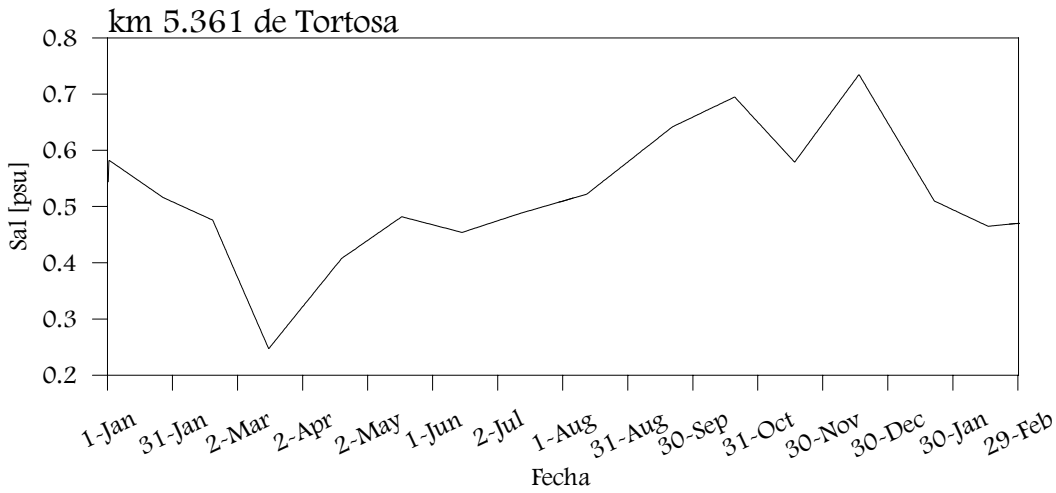


Figura 4.58. Salinidad en la capa superior a 5.36 Km de Tortosa

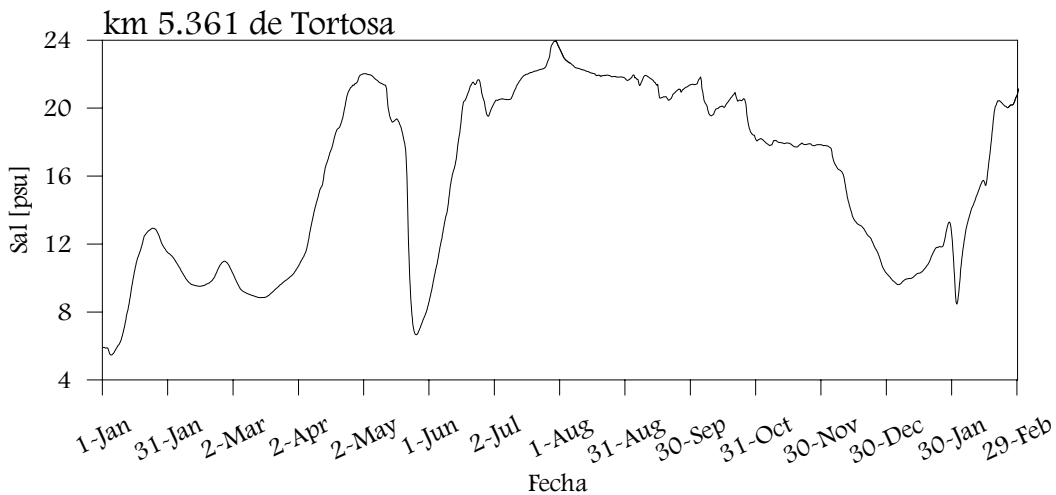


Figura 4.59. Salinidad en la capa inferior a 5.36 Km de Tortosa

Se aprecia que la subida del nivel del mar hace que, en un punto situado a unos 5.3 Km de Tortosa, se empiece a notar la influencia de la cuña salina, ya que la capa inferior, en algunos casos, tiene salinidades superiores a 20 PSU, lo que indica que el agua sería bastante salobre en esta zona.

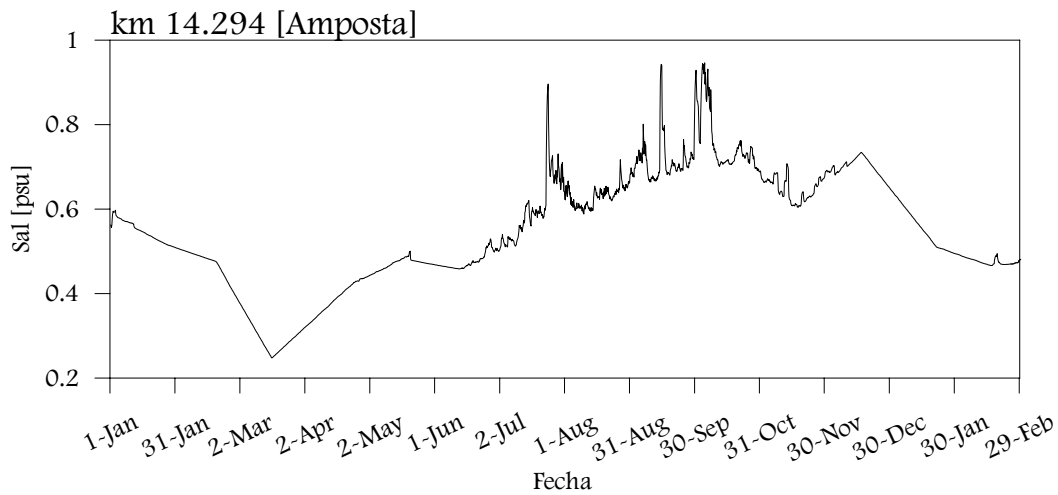


Figura 4.60. Salinidad en la capa superior a 14.3 Km de Tortosa (Amposta)

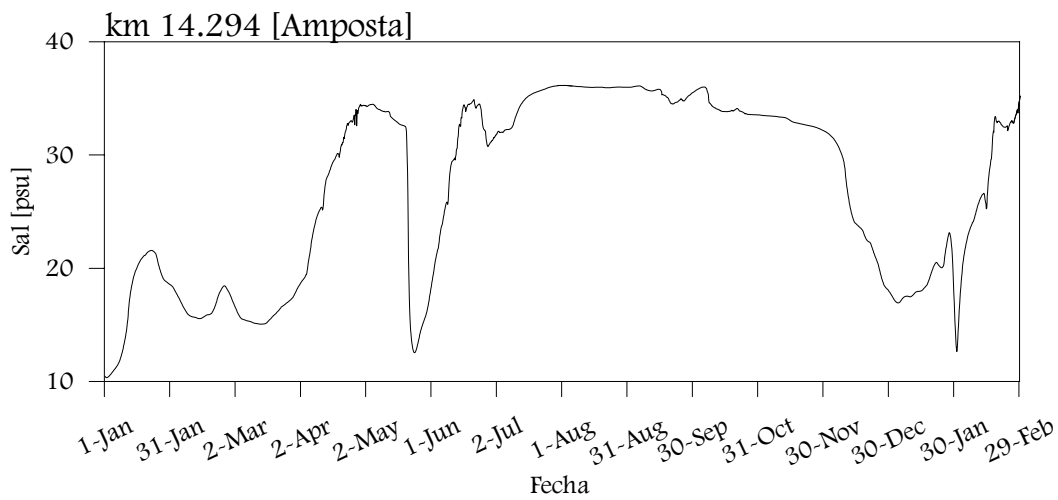


Figura 4.61. Salinidad en la capa inferior a 14.3 Km de Tortosa (Amposta)

En Amposta, la elevación del nivel del mar en +0.50 m produciría la presencia de la cuña salina durante largos periodos del año: más de un mes en primavera y luego todo el verano y parte del otoño.

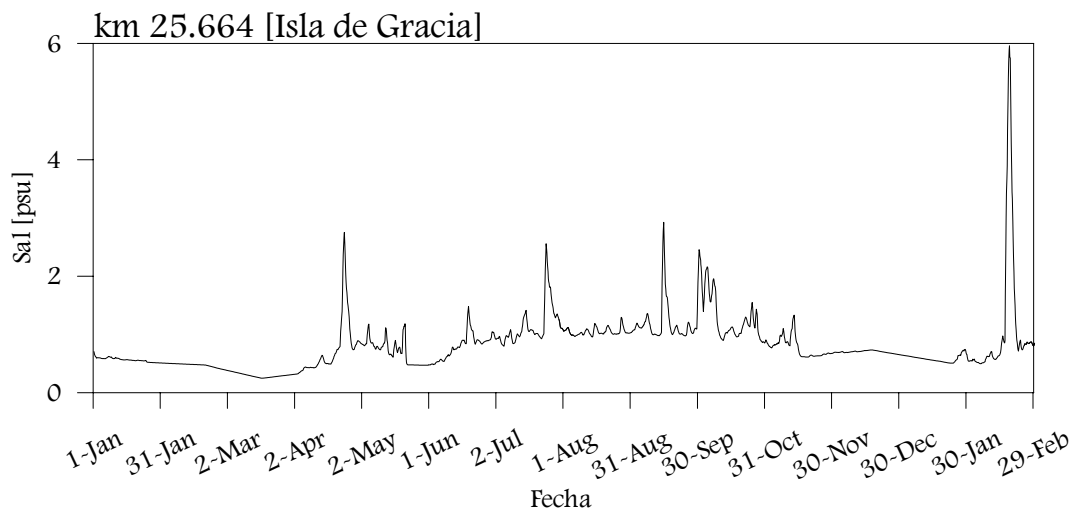


Figura 4.62. Salinidad en la capa superior a 25.7 Km de Tortosa (Isla de Gracia)

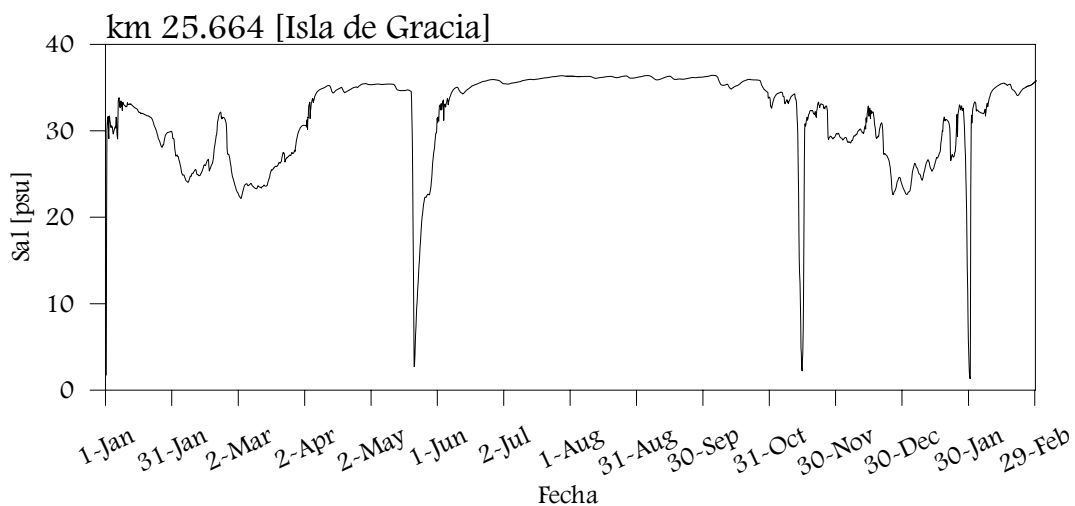


Figura 4.63. Salinidad en la capa inferior a 25.7 Km de Tortosa (Isla de Gracia)

Puede apreciarse que con esta sobreelevación del nivel del mar, la cuña salina permanecería en la Isla de Gracia durante gran parte del año.



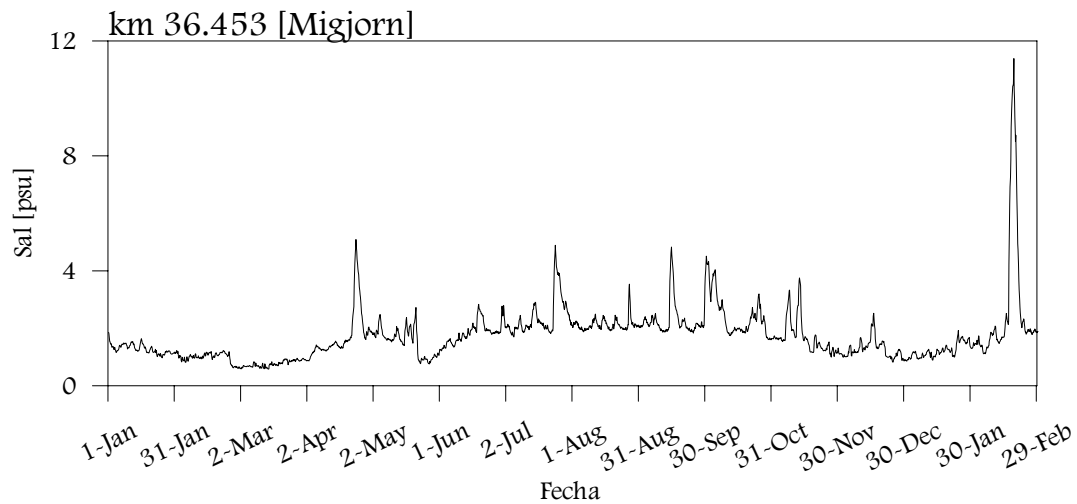


Figura 4.64. Salinidad en la capa superior a 36.5 Km de Tortosa (Migjorn)

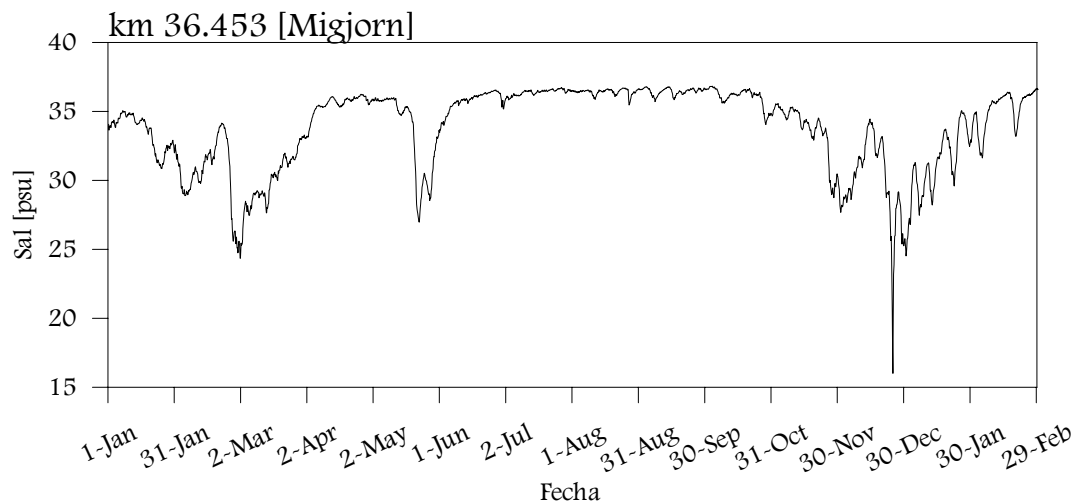


Figura 4.65. Salinidad en la capa inferior a 36.5 Km de Tortosa (Migjorn)

La cuña salina permanece en Migjorn durante casi todo el año. Sólo es expulsada con caudales relativamente grandes ( $500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ). Esta es otra conclusión importante de esta simulación de la sobreelevación del nivel del mar. Si ésta es de  $+0.50 \text{ m}$ , el caudal necesario para expulsar la cuña salina del estuario ya no es de unos  $400 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  sino de  $500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .

En la tabla IV.18 se resume, para la simulación realizada (Enero 1999 – Febrero 2000), el tiempo de permanencia de la cuña en distintas zonas del estuario, adoptando como criterio que la cuña está presente cuando la salinidad es igual o superior a 30 PSU.

*Tabla IV.18. Porcentaje de presencia de la cuña salina en distintos puntos del estuario, con una elevación del nivel del mar de +0.50 m. Fuera del paréntesis se consideran los 14 meses de simulación y dentro del paréntesis los resultados sólo para el año 1999. El \* indica que si bien la cuña no llegaría hasta este punto, el agua sería salobre, con una salinidad superior a 15 PSU el 57.5 % del tiempo total (61.7% del año 1999) y superior a 20 PSU el 36.5% del tiempo total (39.4% del año 1999).*

Punto	Posible efecto CC % permanencia cuña	Situación actual % permanencia cuña
5.3 Km de Tortosa	0 (*)	0
Amposta	53.0 (57.9)	31.4 (36.6)
Isla de Gracia	70.0 (71.4)	57.2 (58.4)
Migjorn	85.8 (85.9)	72.1 (73.3)

Puede observarse que los posibles efectos del CC supondrían un aumento importante de la penetración y presencia de la cuña salina, que para el año simulado tendría un 22% de incremento en su permanencia en Gracia y un 58% en Amposta.

También se ha simulado el efecto de una sobreelevación del nivel del mar de +0.5 m sobre las posiciones que alcanza la cuña salina para un caudal constante, obteniéndose los resultados que se describen a continuación.

Para un caudal constante de  $100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  y una elevación de +0.5 m., la cuña permanece en las cercanías de Amposta. El efecto del incremento del nivel del mar se traduce en un incremento de la salinidad, sobre todo en la capa inferior, de unos 2 o 3 PSU, lo que hace que el agua sea más salobre a partir de Amposta.

Si el caudal constante es de  $130 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , la elevación del nivel del mar de +0.5 m hace que la cuña avance su posición, llegando a las cercanías de Amposta. Un incremento similar del nivel con un caudal de  $150 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  implica que la cuña llegue más allá de la Isla de Gracia, hasta la Isla Sapinya. Esta misma posición también se alcanza con caudales constantes de hasta  $300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , en el caso de que se incremente el nivel del mar en +0.5 m.

Finalmente, una sobreelevación del nivel como la indicada con un caudal constante de  $350 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  haría que la cuña avanzase también su posición desde Migjorn y se estacionase en los alrededores del Km 12, antes de llegar a la Isla de Gracia.

En definitiva, un incremento del nivel del mar de +0.5 m produciría un avance muy significativo de las posiciones estáticas de la cuña en todos los casos estudiados, excepto

para  $100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , en los que la cuña permanecería en las cercanías de Amposta, aunque la salinidad aguas arriba de ese punto se incrementaría, haciendo que el agua fuera más salobre.

#### 4.6. Barrido de la cuña

Otra característica importante de la cuña es el tiempo necesario para expulsarla del estuario una vez está situada en una posición determinada. Para ello se ha efectuado una serie de simulaciones tendentes a determinar dicho tiempo.

Para estas simulaciones se han utilizado los mismos datos que en el apartado de calibrado, variando únicamente la descarga del río en Tortosa. Esta última se ha fijado constante durante unos días hasta que la cuña alcanzaba una posición fija y se mantenía allí. Posteriormente, se ha introducido un nuevo caudal utilizando distintos valores ( $500$  y  $600 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ) y manteniéndolo constante hasta que la cuña era expulsada del estuario. En la tabla IV.19 se resumen los tiempos necesarios para expulsar la cuña del estuario, en función del caudal inicial, que determina la posición de la cuña, y el caudal final.

*Tabla IV.19. Tiempos necesarios para expulsar la cuña en función de su posición inicial y del caudal*

Q ini. ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ .)	Posición cuña (Km)	Q final ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ .)	Tiempo expulsión
100	28.8 – Amposta	500	4 días y 4 h.
100	28.8 – Amposta	600	3 días y 16 h.
130	20 – Gracia	500	2 días y 20 h.
130	20 – Gracia	600	1 día y 20 h.
150	20 – Gracia	500	2 días y 20 h.
150	20 – Gracia	600	1 día y 20 h.
300	12	500	1 día y 19 h.
300	12	600	1 día y 7 h.
350	6 – Migjorn	500	1 día y 12 h.
350	6 - Migjorn	600	1 día

Analizando la dinámica de la cuña mientras es impulsada aguas abajo durante las simulaciones, se observa que es arrastrada con relativa rapidez, sobre todo para caudales de  $600 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . En la figura 4.66 se muestra la posición de la cuña en el momento de ser expulsada del estuario.

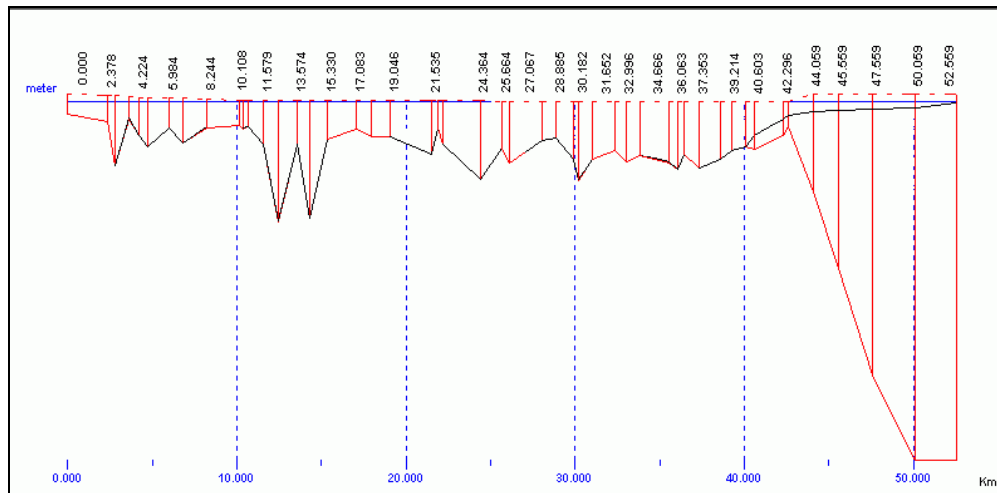


Figura 4.66. Imagen de la cuña salina en el momento de ser barrida del estuario.

#### 4.7. Efecto de las reducciones de caudal sobre la dinámica de la cuña salina

En este apartado se analizan los efectos de la reducción de caudales sobre la dinámica de la cuña salina. Estas reducciones son de dos tipos: las debidas a la construcción de presas de regulación aguas arriba durante la segunda mitad del siglo XX y las debidas a un eventual trasvase de aguas, como el que se prevé en el PHN (2000).

Las simulaciones se han efectuado análogamente a las anteriores, cambiando únicamente el valor del caudal en Tortosa. Por consiguiente, el resto de condiciones de contorno (nivel del mar, viento, temperatura y salinidad del agua) son las mismas que las utilizadas en el calibrado. Se ha tomado como base un periodo de simulación de un año.

##### 4.7.1. Efecto de las reducciones debidas a presas de regulación

El análisis de la reducción de caudales se ha efectuado comparando los resultados obtenidos de la simulación con diversas series temporales de caudales, correspondientes a la primera mitad del siglo XX, con los resultados de las simulaciones correspondientes al año 1999 y a un año medio representativo del periodo 1990-99. Este año medio (obtenido promediando día a día los caudales de todos los años) se ha utilizado para tener en cuenta el hecho de que el año 1999 (el utilizado en la calibración) podía tratarse de un año anómalo, con caudales inferiores a los normales. Los valores medio, mínimo y máximo de estos años de referencia (1999 y promedio de 1990-99) se muestran en la tabla IV.20.

Tabla IV.20. Caudales medio, mínimo y máximo de los años 1999 y 1990-99

Año	Q medio (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	Q mínimo (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	Q máximo (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )
1999	226.23	98.20	518.11
1990-1999	278.54	107.68	740.24

Las series temporales disponibles antes de que se construyeran las presas reguladoras aguas arriba de Tortosa corresponde a los años entre 1918 y 1931. Se han adoptado los años con el segundo caudal medio anual mayor (1919) y menor (1931), evitando los valores extremos. También se ha realizado una simulación con una serie temporal promedio de todo el periodo (1913-31). Los valores medios, mínimos y máximos de estos años se presentan en la tabla IV.21.

Tabla IV.21. Caudales medio, mínimo y máximo de 1913 a 1931 y del año promedio 1913-31

Año	Q media (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	Q mínimo (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	Q máximo (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )
1913	434.18	12.00	1242.41
1914	506.35	20.53	1318.37
1915	481.59	12.00	1090.90
1916	413.78	12.00	1005.48
1917	431.98	12.00	981.68
1918	473.09	45.40	1253.13
1919	492.72	12.00	1090.90
1920	461.27	12.00	990.97
1921	377.48	30.37	975.89
1922	418.70	12.00	81.68
1923	416.82	12.00	991.00
1924	374.97	12.00	990.97
1924	382.28	30.37	981.68
1926	431.60	15.42	975.89
1927	449.81	12.00	981.68
1928	442.03	12.00	981.68
1929	351.63	33.80	899.00
1930	430.12	12.00	987.00
1931	362.73	12.00	987.50
1913-1931	428.98	168.68	743.07

La tabla IV.22 resume los tiempos de penetración de la cuña salina (en %) para 7 diferentes localizaciones a lo largo del estuario. La primera posición indica que la cuña ha sido expulsada del estuario.

Analizando los resultados, la primera sorpresa es que, aunque el caudal medio del año 1919 fue superior al del año virtual 1913-31, según la simulación el estuario estuvo libre de la presencia de la cuña salina durante este año virtual que en 1919. Esto se explica por el hecho de que al tratarse de un promediado, el periodo 1913-31 suaviza los datos y no tiene valores extremos, mientras que el año 1919 tiene algunos periodos con valores de caudales extremos (superiores a  $410 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ), que expulsan la cuña del estuario. El año 1931, con caudales más bajos, registra una penetración superior de la cuña, llegando hasta las cercanías de Tortosa (38.58 Km desde la desembocadura) debido a caudales extremadamente bajos (del orden de  $12 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ).

*Tabla IV.22. Tiempo de penetración (%) de la cuña salina para 5 simulaciones distintas*

Penetración de la cuña salina	1919	1931	1913-1931 año promedio	1999	1990-1999 año promedio
<1.954 km	55.24 %	40.79 %	62.69 %	4.48 %	17.15 %
<5 km	69.78 %	53.77 %	70.87 %	22.86 %	30.73 %
<10 km	74.62 %	56.47 %	72.89 %	27.39 %	36.08 %
<15 km	84.28 %	62.09 %	86.24 %	43.39 %	60.49 %
<20 km	98.90 %	70.78 %	99.86 %	54.82 %	70.32 %
<25 km	100 %	75.49 %	100 %	87.38 %	92.32 %
25 km <	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
Máximo	24.832 km	38.580 km	20.521 km	28.399 km	25.484 km

Analizando los resultados de penetración de la cuña salina de la tabla 4.22, puede apreciarse que los resultados de principio y finales de siglo son completamente distintos. En las tres simulaciones de principios de siglo, el estuario estuvo libre de cuña salina alrededor de la mitad del año (55.24% en 1919, 40.79% en 1931 y 62.69% en 1913-31), mientras que durante el año medio 1990-99 el estuario estuvo afectado por la intrusión de la cuña salina alrededor de 9 meses (82.85%) y para la simulación del año 1999, el estuario estuvo libre de cuña salina sólo el 4.48% del tiempo.

Un efecto positivo de la regulación del río es que, debido a que se mantiene un caudal mínimo de alrededor de  $100 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , se evita que la cuña penetre más allá de Amposta (unos 28 Km desde la desembocadura del río) y alcance posiciones cercanas a Tortosa, como en el año 1931. Es decir, la regulación, con el mantenimiento de un caudal mínimo, evita penetraciones extremas de la cuña.

4.7.2. Efecto de las reducciones de caudal previstas en el PHN

Se han tomado como base las series temporales de caudales de los años 1999 y del año medio 1990-99, para estudiar como afectaría el Plan Hidrológico Nacional a la dinámica actual de la cuña salina. Dicho plan prevé una transferencia a otras cuencas de  $1050 \text{ Hm}^3$ , aguas arriba de Tortosa, lo que significa aproximadamente una reducción del caudal medio anual de  $31.5 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ . El PHN establece también un caudal mínimo, denominado ecológico, de  $100 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , que debe preservarse siempre. Con esta base se han considerado tres hipótesis de reducción de caudal, del 50, 75 y 100% del volumen total previsto inicialmente ( $1050 \text{ Hm}^3$ ). Estas reducciones se han distribuido equitativamente entre todos los caudales medios diarios, pero respetando el caudal ecológico mínimo de  $100 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , de modo que si al efectuar la reducción se obtenía un valor inferior a los  $100 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , el caudal a reducir se distribuía entre los valores más altos de la serie. Los resultados de las simulaciones se presentan en las tablas IV.23 (considerando el año 1999) y 4.24 (considerando el año 1990-99).

Tabla IV.23. Tiempo (%) de penetración de la cuña salina para el año 1999 y sus reducciones

Penetración de la cuña	0 $\text{Hm}^3$	525 $\text{Hm}^3$	787.5 $\text{Hm}^3$	1050 $\text{Hm}^3$
<1.954 km	4.48 %	1.33 %	0.27 %	0.00 %
<5 km	22.86 %	16.87 %	15.09 %	7.64 %
<10 km	27.39 %	22.50 %	20.21 %	11.29 %
<15 km	43.39 %	40.97 %	38.87 %	34.75 %
<20 km	54.82 %	52.26 %	51.81 %	49.47 %
<25 km	87.38 %	73.85 %	69.50 %	63.56 %
25 km <	100 %	100 %	100 %	100 %
Máximo	28.399 km	30.938 km	31.613 km	31.244 km

Tabla IV.24. Tiempo (%) de penetración de la cuña salina para el año 1990-99 y sus reducciones

Penetración de la cuña	0 Hm <sup>3</sup>	525 Hm <sup>3</sup>	787.5 Hm <sup>3</sup>	1050 Hm <sup>3</sup>
<1.954 km	17.15 %	14.49 %	12.39 %	10.79 %
<5 km	30.73 %	26.20 %	24.01 %	20.44 %
<10 km	36.08 %	31.09 %	27.57 %	24.55 %
<15 km	60.49 %	59.67 %	57.66 %	56.33 %
<20 km	70.32 %	69.64 %	68.91 %	68.08 %
<25 km	92.32 %	78.78 %	76.73 %	75.86 %
25 km <	100 %	100 %	100 %	100 %
Máximo	25.484 km	26.586 km	31.563 km	32.100 km

Como puede apreciarse al analizar la tabla IV.23 las reducciones previstas en el PHN producirían un fuerte impacto negativo en la intrusión de la cuña salina. El estuario iría de una situación en la que está libre de cuña salina 16 días a otra con presencia permanente de la cuña salina dentro del mismo (para una reducción de 1050 Hm<sup>3</sup>). Por otra parte, la cuña aumentaría su presencia en la isla de Gracia un 10% del tiempo aproximadamente y permanecería más allá del Km 25 (cerca de Amposta) 133 días (36.44%) frente a los 46 (12.62%) actuales. Por otro lado, el límite máximo de penetración aumentaría unos 3 Km (de 28.4 a 31.2 Km).

Del análisis de la tabla IV.24 se deducen conclusiones similares para el periodo 1990-99. El tiempo total en que la cuña está fuera del estuario se reduce sensiblemente (10.79% de un trasvase de 1050 Hm<sup>3</sup> frente al 17.15% sin trasvase), la presencia de la cuña en la Isla de Gracia se incrementa un 4% y en Amposta un 16.5% (24.14% con trasvase y 7.68% sin trasvase). La penetración máxima de la cuña se incrementa en 6.5 Km (de 25.48 a 32.1 Km).