

MEDICIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS, BIOLÓGICOS Y QUÍMICOS EN EL TRAMO ESTUARINO DEL RÍO EBRO

J.P. Sierra¹, J. González del Río², J.Flos³, A. Sánchez-Arcilla¹, E. Movellán¹, M. Rodilla²,
C. Mösso¹, R. Martínez¹, S. Falco², I. Romero², y M.J. Velasco¹

Resumen

En este artículo se describen las campañas de campo CYTMAR I y II realizadas en la primavera y el verano de 1997, con el fin de estudiar los procesos y los flujos físicos, biológicos y químicos en la zona del Delta del Ebro, tanto en el tramo estuarino del río como en la pluma de agua dulce que se forma en las cercanías de la desembocadura. Aquí el estudio se ha centrado en la zona estuarina, presentando algunos resultados preliminares y analizando las diferencias estacionales observadas.

Palabras clave: estuario, río Ebro, nutrientes, campañas de campo y calidad de aguas.

INTRODUCCIÓN

El comportamiento de los nutrientes en estuarios y zonas costeras habitualmente se considera que es un proceso dominado por factores biológicos y de degradación. Sin embargo, se han presentado evidencias de que no sólo los procesos biológicos están involucrados en la concentración de estos constituyentes cuando el río y el mar interactúan (Morris et al., 1981).

Los aspectos ecológicos de los estuarios y de las plumas (zonas de agua dulce situadas en el mar en las cercanías de la desembocadura del río) están condicionados hasta cierto punto por el intercambio entre las aguas de la plataforma y las aguas continentales (Smith, 1986). Esta dinámica de intercambio está fundamentalmente controlada por tres agentes distintos (Valle-Levinson, 1994):

- El flujo del río.

- La marea astronómica.
- La meteorología (viento, oleaje y presión atmosférica).

El transporte neto (nutrientes, sedimentos, salinidad, temperatura y contaminación) muestra características muy distintas según el agente de forzamiento. Así, el transporte relacionado con la marea astronómica tiene un comportamiento periódico fácilmente predecible, mientras que los fenómenos de transporte asociados a la meteorología tienen características aleatorias. La escala temporal de las mareas va desde 12 horas a periodos superiores (que están relacionados con interacciones no lineales de las mareas) mientras que los periodos de los intercambios asociados a la meteorología son generalmente mayores de 24 horas (Bruno et al., 1997).

El Río Ebro tiene una longitud de 930 Km y finaliza en el Mar Mediterráneo, formando un delta con forma de punta de flecha y una superficie de

(1)Laboratori d'Enginyeria Marítima, Universitat Politècnica de Catalunya, C/ Jordi Girona 1-3, Campus Nord Mòdul D-1, 08034 Barcelona

(2)Laboratorio de Tecnologías del Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, 46020, Valencia; Telf.: 96 387 76 16

(3)Departament d'Ecologia, Universitat de Barcelona, Av. Diagonal 645, 08028 Barcelona. Telf.: 93 402 15 13; Fax: 93 411 14 38

Artículo recibido el 24 de enero de 2000, recibido en forma revisada el 6 de abril de 2001 y aceptado para su publicación el 3 de septiembre de 2001.

Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

unos 320 Km². Como en el resto del Mar Mediterráneo (con excepción de la parte norte del Mar Adriático), el Delta del Ebro es un ambiente micro-mareal, con un rango máximo de marea astronómica de 25 cm, y un valor medio de 16 cm. Por el contrario, la marea meteorológica es un agente tan o más importante que la astronómica, con elevaciones del nivel del mar que pueden llegar a ser del orden de 1 m. En consecuencia, en este caso, las características del flujo en las inmediaciones de la desembocadura, estarán condicionadas fundamentalmente por la meteorología y el caudal del río.

El Río Ebro presenta un estuario con una cuña salina, que responde a la definición clásica de estuario altamente estratificado. Este tipo de estuarios se caracteriza por un alto nivel de estratificación en la columna de agua (con una marcada fase o haloclina), bajos niveles de marea y caudales del río variables. Estos caudales son suficientes para mantener un fuerte gradiente entre el agua dulce y la salada, a pesar de la acción de fuerzas mezcladoras generadas por viento y marea (Geyer y Farmer, 1989). La delgada interfase entre ambos tipos de agua actúa como un filtro donde tienen lugar los intercambios de nutrientes.

El Río Ebro presenta asimismo una pluma cuya morfología depende de la descarga del río y de la hidrodinámica local, que estará controlada fundamentalmente por el viento. En la pluma, en condiciones poco energéticas, la capa de agua dulce que fluye sobre el agua marina es muy delgada, con un espesor de alrededor de medio metro.

En el estuario y la pluma del Río Ebro se han llevado a cabo diversas campañas con el fin de analizar, en distintas estaciones climáticas, el comportamiento de los nutrientes y las características físicas de ambas áreas. Los datos obtenidos se espera que conduzcan a una mejor comprensión de los procesos físicos existentes y serán posteriormente empleados para calibrar distintos modelos numéricos.

En este trabajo se describen las dos primeras campañas de campo realizadas, denominadas CYTMAR Ebro-I y CYTMAR Ebro-II. Asimismo se exponen los parámetros medidos, centrándose en los datos registrados en el tramo estuarino. Finalmente se discuten los principales rasgos distintivos de estos datos y se exponen algunas conclusiones preliminares sobre las características del tramo estuarino del Río Ebro y los procesos observados en el mismo.

CAMPAÑAS DE CAMPO

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.

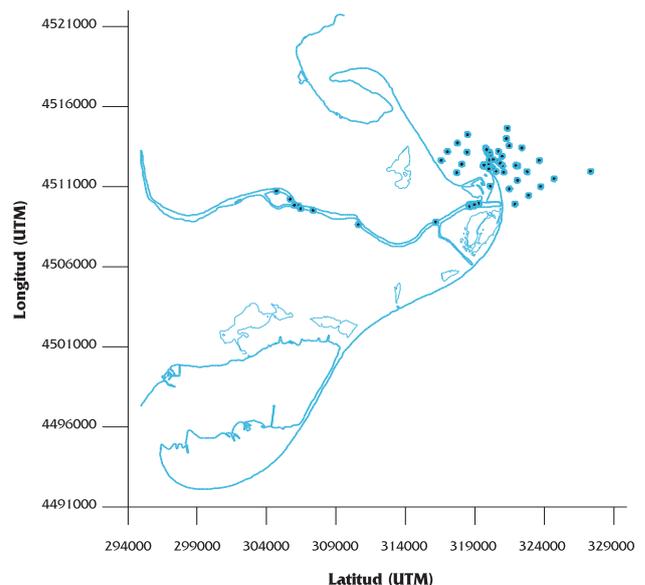


Figura 1. Estaciones de muestreo durante la campaña CYTMAR Ebro-I

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. En la figura 1 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.

El primer día de campaña (27 de Marzo), se obtuvieron muestras entre la desembocadura del río y la Isla de Gracia, situada a unos 18 Km aguas arriba. El segundo día (28 de Marzo), se adquirieron datos de salinidad, transmitancia y fluorescencia a lo largo del río junto a muestras de agua en la pluma del río. Los restantes días de campaña (29 de Marzo a 3 de Abril), se extrajeron muestras y se midió con el CTD a lo largo de la pluma. En total se tomaron 24 muestras en 5 estaciones a lo largo del río y 61 muestras en 35 puntos distintos a lo largo de la pluma.

En la figura 2 se muestran los caudales del río registrados durante esta campaña. Éstos se caracterizan por una gran irregularidad horaria, con unos flujos medios diarios comprendidos entre 144 y 267 m³/s, mientras que los valores horarios máximo y mínimo son de 348 y 125 m³/s respectivamente.

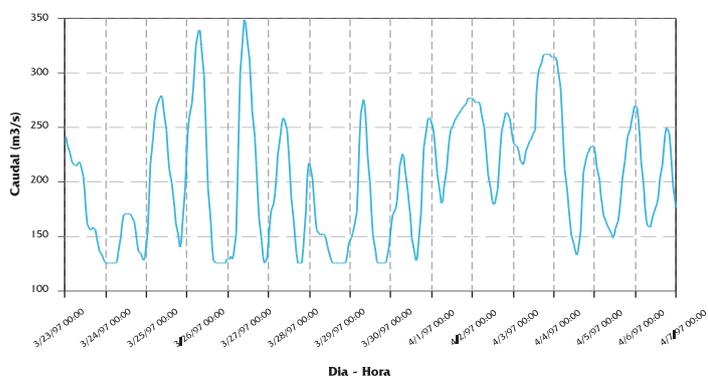


Figura 2. Caudales del río durante la campaña CYTMAR Ebro-I

Durante los tres primeros días de la campaña CYTMAR II (29 de Junio a 1 de Julio) se efectuaron medidas de CTD entre la Isla de Gracia y la desembocadura. El último día, las medidas de CTD se concentraron aguas arriba de la Isla de Gracia, para determinar la posición exacta de la cuña salina. Por otra parte, el 30 de Junio se tomaron muestras de agua en la pluma, a tres profundidades distintas, con el fin de estudiar su evolución vertical. El 1 y 2 de Julio, se extrajeron muestras de agua de la superficie de la pluma, tratando de seguir la forma de la misma. En la figura 3 se han representado

las localizaciones de las estaciones de muestreo durante esta segunda campaña. En total, durante la misma, se adquirieron 122 muestras en el río en 29 estaciones y 75 muestras en la pluma, en 63 puntos distintos (en muchos puntos sólo se extrajo una muestra dado el pequeño espesor de la capa de agua dulce).

La figura 4 muestra los caudales del río durante la campaña CYTMAR II. Puede apreciarse que el flujo del río permanece casi constante, con varios picos pequeños. El caudal medio durante la campaña fue de 141 m³/s.

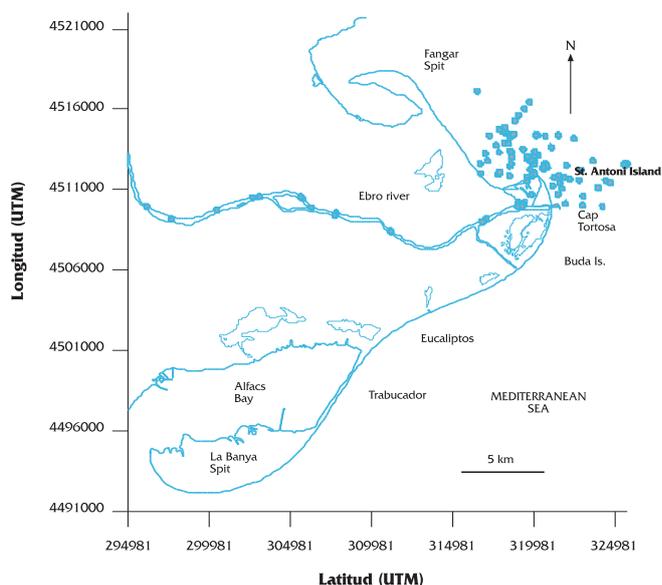


Figura 3. Estaciones de muestreo durante la campaña CYTMAR Ebro-II

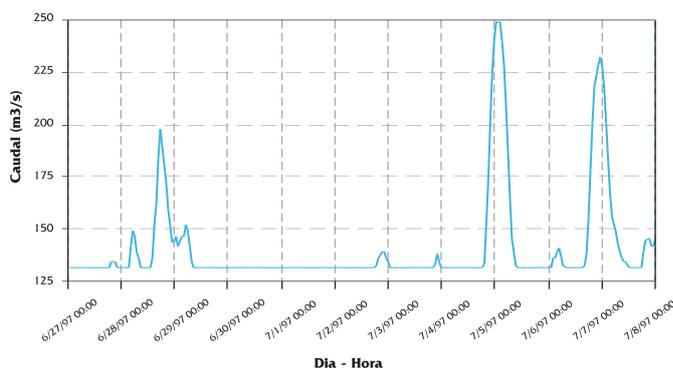


Figura 4. Caudales del río durante CYTMAR Ebro-II

ANÁLISIS DE DATOS

La información recogida durante las dos campañas tiene como finalidad el análisis de los procesos que afectan al estuario. Para ello, en primer lu-

gar, se ha estudiado el comportamiento de la cuña salina, teniendo en cuenta los datos de salinidad disponibles tanto en el río como en la desembocadura. A continuación se ha analizado la dinámica de los nutrientes, sobre la base de las muestras extraídas en el río. Con ello se pueden examinar los ciclos de los nutrientes tanto a lo largo del río como en la columna de agua. Este último punto es relevante si se tiene en cuenta el efecto de filtro de la interfase que aparece con la cuña salina.

Cuña salina

El estuario es un medio donde interaccionan agentes impulsores de origen marino y fluvial, de modo que la posición de la cuña salina es el resultado del equilibrio entre el caudal del río y las fuerzas marinas.

Entre los agentes impulsores marinos, el que más afecta a la dinámica estuarina es la marea. No obstante, como ya se mencionó anteriormente, en el río Ebro la marea astronómica no supera los 25 cm, por lo que su importancia es relativa y según Ibáñez (1993) sus efectos se limitan a la zona próxima a la desembocadura, cuando el caudal es bajo y estacionario. Por consiguiente, salvo en eventos puntuales (como las mareas meteorológicas producidas por el viento y gradientes de presión), el principal factor responsable de la estructura de la columna de agua es la descarga fluvial.

Según Ibáñez et al. (1997) hay tres localizaciones típicas de la cuña salina, determinadas por la topografía del fondo y la descarga del río. No obstante, debido a las irregularidades del fondo (figura 5), el límite de penetración y su movimiento hacia atrás y hacia delante no tienen una relación lineal con el caudal del río. Por el contrario, existen unos valores umbral que deben ser superados para modificar la estructura del estuario. Entre estos valores umbral, hay intervalos donde la posición del borde de la cuña salina es estable. Ibáñez (1993) estableció el flujo crítico en $300 \text{ m}^3/\text{s}$ indicando que por encima de este valor no hay intrusión de agua salada y la cuña salina no se desarrolla. El tramo comprendido entre la desembocadura y la Isla de Gracia (con una longitud de unos 18 Km) es una zona de poca profundidad donde a veces permanece la cuña salina. En consecuencia, cuando el caudal del río oscila entre 100 y $300 \text{ m}^3/\text{s}$ la cuña salina llega hasta la Isla de Gracia y permanece allí. Si la descarga fluvial desciende a un valor comprendido entre 80 y $100 \text{ m}^3/\text{s}$, el límite de la cuña salina llega hasta la Isla Sapinya (3,5 Km aguas arriba de la Isla de Gra-

cia). La mayor intrusión de agua salina llega a 32 Km de la desembocadura, cuando el caudal del río es inferior a $80 \text{ m}^3/\text{s}$, durante épocas de gran sequía. Hoy en día, debido a la construcción de varios embalses y la consiguiente regulación de caudal del río, esta última situación se produce muy raramente. En la figura 6 se muestra un esquema del delta del Ebro con las posiciones de la cuña según Ibáñez (1993).

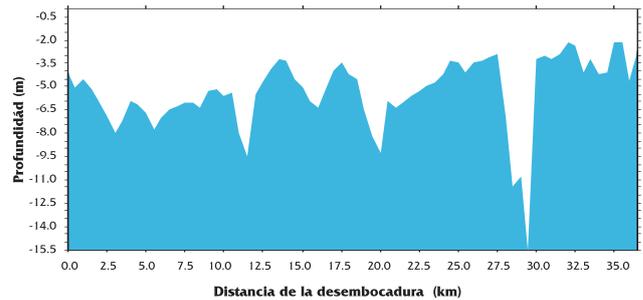


Figura 5. Batimetría del tramo estuarino del río

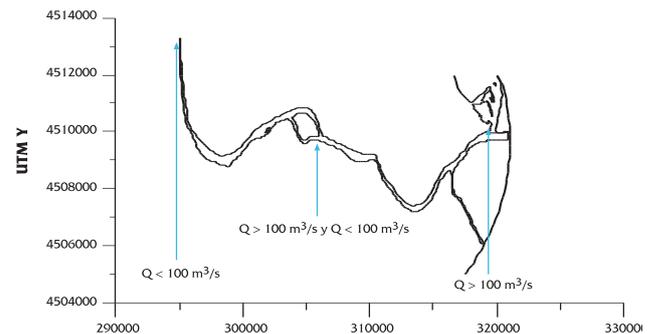


Figura 6. Posiciones de la cuña salina en función del caudal del río

Cuando la descarga del río se incrementa, la cuña salina va hacia delante y hacia atrás siguiendo el proceso inverso. En este caso, las áreas poco profundas son un obstáculo para el movimiento de la cuña salina y, como consecuencia, se forman algunas bolsas aisladas de agua salada. Por esta razón, se puede encontrar agua salada más allá de la posición límite correspondiente al caudal existente en un momento dado. Estas bolsas de agua salada, desaparecerán posteriormente por dilución con el agua del río.

Para analizar las características de los posibles agentes impulsores en el tramo estuarino durante las dos campañas se dispone, además de los datos de caudales (figuras 2 y 4), de datos de presión (sólo durante cuatro días de la primera campaña, puesto que se agotó la batería) proporcionados por un CTD situado en la desembocadura a 8 m de profundidad. Las fluctuaciones de presión registra-

das por el aparato son representativas de las oscilaciones del nivel del mar, que son debidas a las mareas astronómicas y meteorológicas. Estas últimas se estima que deben ser despreciables, ya que las condiciones meteorológicas permanecieron muy estables durante ambas campañas. Por otra parte, las variaciones en la presión registran también el oleaje de corto periodo generado por el viento y por el paso de embarcaciones. Para eliminar estas oscilaciones de corto periodo, se filtraron los datos, promediando los valores contiguos durante una hora. El resultado puede verse en la figura 7, donde se aprecia la modulación producida por la marea y se constata que las oscilaciones tienen una amplitud de unos 10 cm, lo que indica que la hipótesis de que el efecto de la marea es prácticamente despreciable es correcta.

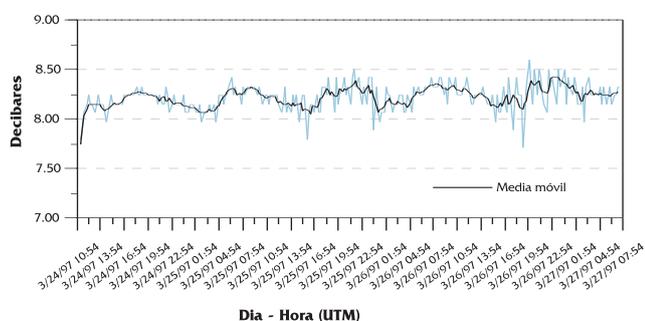


Figura 7. Presión medida por el CTD en la desembocadura

Durante la primera campaña se midieron datos de salinidad en el río durante los días 27 y 29 de marzo, aunque en este último caso centrados en la isla de Gracia, por lo que a efectos de obtener una representación longitudinal de la salinidad a lo largo del río sólo se ha considerado los datos del primer día. En la figura 8 se muestran estas curvas de salinidad, pudiendo comprobarse que el límite de la cuña salina está más arriba de la isla de Gracia, y por tanto a más de 18 Km de la desembocadura, aunque no se puede determinar su límite exacto. Si se analiza el caudal registrado durante este día (figura 2) se observa que experimentó una gran variación, con un ascenso en el que pasó de 125 m³/s a 348 m³/s y un descenso hasta llegar otra vez a 125 m³/s. En consecuencia, parecería ser que la cuña salina se encontraba más allá de los límites establecidos por Ibáñez et al. (1997) en función del caudal registrado, aunque hay que tener en cuenta la gran variabilidad de la descarga fluvial y la escasa duración de los caudales más grandes.

Otra conclusión que se puede extraer de la figura 8 está relacionada con el espesor de la interfa-

se, ya que éste disminuye a medida que se avanza aguas arriba en el río. La razón es que existe una mezcla mayor junto a la desembocadura, debido a que la acción del oleaje y el viento aumentan la turbulencia, ensanchando la zona de mezcla y por lo tanto disminuyendo el gradiente de salinidad.

Con respecto a la segunda campaña, se dispone de datos de salinidad en el río en cuatro días: 29 y 30 de junio, 1 y 2 de julio. Los tres primeros días se adquirieron datos a lo largo de los últimos 18 Km del río, mientras que el cuarto se tomaron datos alrededor de la zona donde se observaba el límite de la cuña.

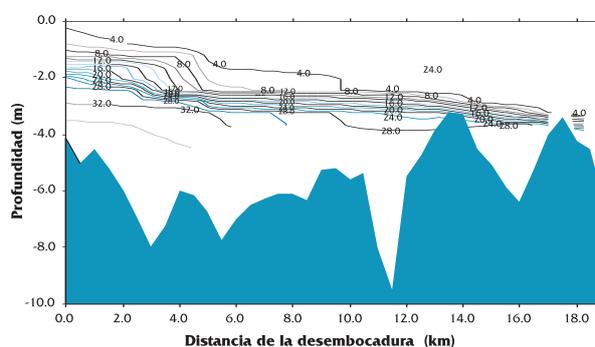


Figura 8. Perfil de salinidad en el río el día 27 de marzo de 1997 (salinidad en psu)

Comparando los datos de los tres primeros días se observa que la posición de la cuña permanece prácticamente inalterada en dicho periodo, lo cual es bastante lógico teniendo en cuenta que el caudal fue casi constante e igual a 132 m³/s durante esta campaña (ver figura 4). Teniendo en cuenta esto, se ha representado todos los datos tomados durante la campaña en un mismo gráfico (figura 9). En el mismo puede apreciarse que la cuña salina penetra alrededor de 25 Km en el río, que es un valor bastante superior al observado por Ibáñez et al. (1997), ya que con el caudal registrado, la cuña debería llegar sólo hasta los alrededores de la isla de Gracia (unos 7 Km aguas abajo). Asimismo se comprueba, al igual que en la campaña anterior, que la interfase se estrecha a medida que la cuña penetra en el río, debido a la menor mezcla al disminuir el efecto del oleaje. Finalmente, en la parte frontal de la cuña aparece una amplia zona de dilución, mientras que en la desembocadura se aprecia la existencia de una zona donde el agua dulce queda prácticamente detenida en la superficie por el agua de mar, debido al relativamente reducido caudal fluvial registrado.

Una posible explicación al hecho de que en ambas campañas la cuña se localizó más aguas arriba de lo que cabría esperar es que los datos que Ibá-

ñez et al. (1997) utilizaron para establecer los límites de penetración de la cuña salina fueron obtenidos entre 1988 y 1991, mientras que las campañas aquí analizadas son de 1997. Durante este tiempo y debido a una reducción casi constante de los caudales registrados en el río, es probable que la topografía del fondo se haya modificado sustancialmente, provocando un cambio en las condiciones de penetración de la cuña salina.

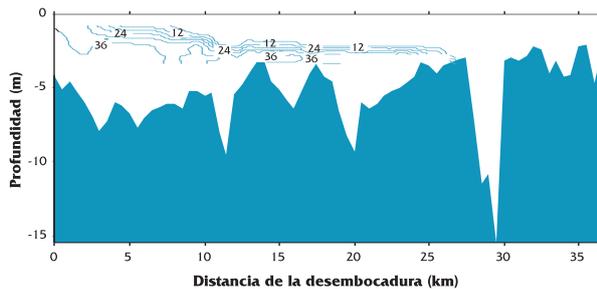


Figura 9. Perfil de salinidad durante la segunda campaña (salinidad en psu)

Nutrientes

El aporte de nutrientes a los ríos ha aumentado en los últimos años como consecuencia de una mayor explotación agrícola (Day et al., 1997). El excedente de los fertilizantes usados se evapora pasando a la atmósfera, se infiltra en el suelo o se desplaza por la superficie en forma de escorrentía (Zessner et al., 1996). Finalmente, cualquiera de las tres formas acaba en el río, por lo que estos nutrientes pasan a intervenir en los procesos que tienen lugar en el estuario.

En el tramo estuarino del río Ebro, la fuerte estratificación afecta directamente a los procesos biogeoquímicos asociados a la presencia de los nutrientes. La interfase que se forma entre la capa de agua dulce y la entrada de agua salada es el escenario del intercambio de materiales (y por tanto de nutrientes) entre los dos ambientes (Velasco, 1998). En este proceso de intercambio y mezcla predomina la componente vertical, por lo que es conveniente conocer la estructura vertical de los nutrientes en la columna de agua.

Por otra parte, la interfase se caracteriza por tener una función de filtro, a pesar de que en el tramo estuarino del río Ebro tiene un espesor reducido, del orden de 30 cm. Esta función de filtro es debida al fuerte gradiente de salinidad y por lo tanto de densidad que existe en dicha interfase. A consecuencia del mismo, la velocidad de caída de las partículas transportadas por el río disminuye al encon-

trarse con una capa más densa, lo que provoca una acumulación de partículas que se comportan como un filtro. La creación de este filtro dificulta el paso de la luz por lo que se inhibe la fotosíntesis (Huissman y Weissing, 1995). Además, la acumulación de materia orgánica por debajo de la interfase favorece los procesos de degradación de ésta.

Con el fin de analizar los anteriores procesos en el tramo estuarino del río Ebro se han analizado las muestras tomadas a distintas profundidades a lo largo del mismo, en las dos campañas mencionadas.

En la figura 10 se muestra la distribución de nitratos a lo largo del río durante la primera campaña. Puede apreciarse que las curvas de igual concentración recuerdan a las de salinidad obtenidas durante dicho día (figura 8), aunque con un gradiente inverso, detectándose un descenso brusco de nitratos por debajo de la interfase. El origen de este descenso hay que buscarlo en la procedencia de las aguas. El agua de las capas superiores proviene del río y, por lo tanto, está cargada de los nutrientes que se vierten a éste procedentes de los centros urbanos y de las explotaciones agrícolas y ganaderas. Sin embargo, por debajo de la interfase se encuentra la cuña salina de origen marino y con concentraciones órdenes de magnitud inferiores a las fluviales, por lo que prácticamente no está aportando nutrientes. Los valores detectados en profundidades mayores a 3 m son muy bajos, en torno a 10 (moles/l, y es plausible que en su mayor parte procedan del intercambio con el agua del río a través de la interfase. Por otra parte, las bolsas de nitratos que se observan pueden ser debidas a aportaciones puntuales de nutrientes al río.

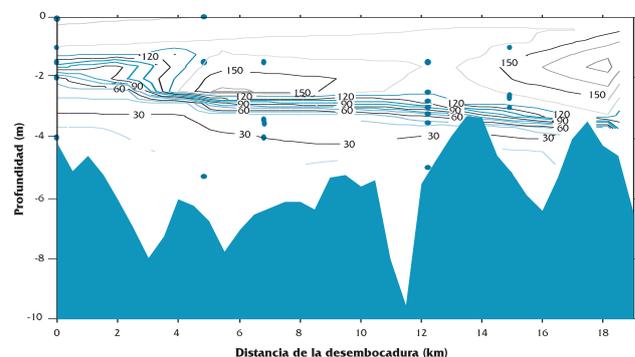


Figura 10. Perfil de nitratos en la primera campaña - 27/3/97 - ($\mu\text{mol/l}$)

En la figura 11 se ha representado las concentraciones de fósforo el mismo día 27 de marzo, detectándose, al igual que en el caso anterior una notable disminución por debajo de la interfase. Asi-

mismo, también se observa la presencia de bolsas con mayores concentraciones y una disminución del fósforo al acercarse a la desembocadura. Llama la atención el hecho de que los valores de fósforo son muy pequeños en comparación con los de nitrógeno (que es del orden de 100 a 200 veces superior), lo que parece indicar la importancia de las actividades agrícolas en la cuenca y el uso de fertilizantes nitrogenados.

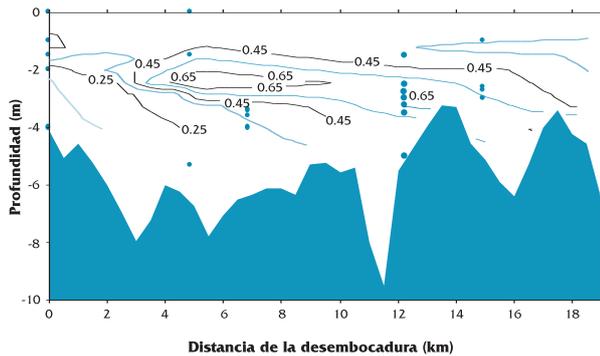


Figura 11. Perfil de fósforo soluble reactivo en la primera campaña - 27/3/97 - ($\mu\text{mol/l}$)

Con respecto a los sólidos en suspensión (figura 12) puede observarse que la mayor parte de los mismos se encuentra en la zona comprendida entre la interfase y el fondo, lo que parecería indicar la existencia de procesos de floculación de los sólidos en suspensión, agrupándose en sedimentos de mayor tamaño que tienden a desplazarse hacia el fondo. Además, junto a la desembocadura, existe una mayor cantidad de sedimentos en toda la columna de agua debido al aumento de turbulencia provocada por la mezcla de las dos masas de agua.

El fitoplancton precisa nitrógeno y fósforo para su desarrollo, aunque la génesis de la materia orgánica la realiza mediante la fotosíntesis, que depende del aporte lumínico. En consecuencia, el proceso de fotosíntesis estará condicionado por la presencia de sólidos en suspensión, ya que éstos no permiten el paso de la luz a capas inferiores. Por

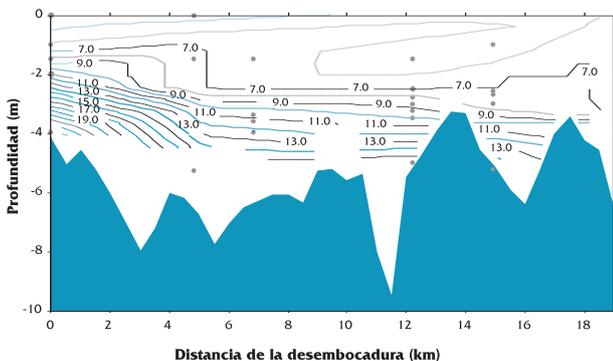


Figura 12. Perfil de sólidos en suspensión en la primera campaña - 27/3/97 - (mg/l)

otra parte un indicador de la actividad biológica del fitoplancton es la clorofila. En consecuencia, debería existir una cierta correlación entre la distribución de clorofila y la de sólidos en suspensión si éstos están compuestos por microalgas en su mayor parte.

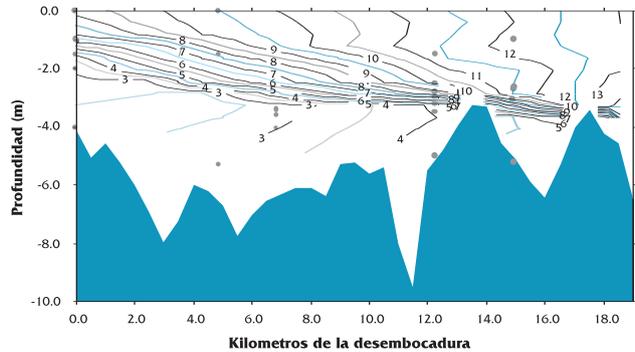


Figura 13. Perfil de clorofila en la primera campaña - 27/3/97 - ($\mu\text{g/l}$)

En la figura 13 puede apreciarse efectivamente que dicha correlación existe, ya que las mayores concentraciones de clorofila se encuentran en la superficie, por encima de la interfase. La existencia de valores claramente inferiores por debajo de la interfase cabe achacarla a dos razones, el bajo nivel de nutrientes y la elevada presencia de sólidos en suspensión en la cuña salina y en la parte superior de la columna de agua, que limitan la fotosíntesis al dificultar el paso de la luz. También puede apreciarse que cuanto más cerca se está de la desembocadura, se observan dos fenómenos. En primer lugar que la zona con elevadas densidades de clorofila queda limitada cada vez más en superficie, debido a la disminución de espesor de la capa de agua dulce. Segundo, que hay una clara disminución de la concentración, fenómeno que cabe achacar a la muerte y sedimentación del fitoplancton de agua dulce al aumentar la salinidad por el intercambio de materiales entre las dos fases. Esta pérdida parece que no puede ser compensada por el crecimiento de especies adaptadas a las nuevas condiciones osmóticas, a pesar de que disponen de suficientes nutrientes.

Otro componente importante de la comunidad biológica es la población bacteriana. En la figura 14 puede comprobarse como también el número de bacterias desciende bruscamente al encontrar el agua salada, ya que la salinidad incrementa su mortalidad. También puede verse que la mayor concentración de bacterias se encuentra entre los kilómetros 4 y 10, donde también se ha detectado una concentración de nitratos y fósforo (figuras 10 y 11), lo

que permite corroborar que la mayor disponibilidad de nutrientes favorece el crecimiento de bacterias, o que en esta zona hay un acúmulo de materia orgánica que favorece este crecimiento.

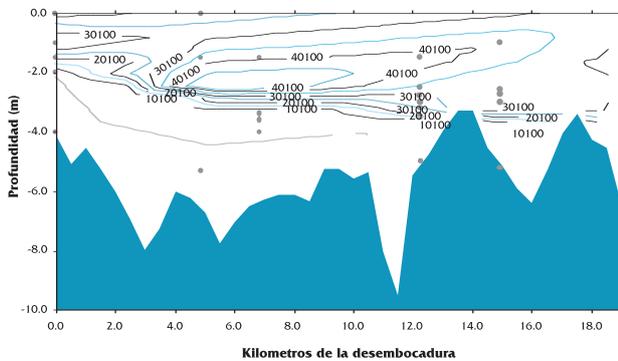


Figura 14. Distribución de bacterias en la primera campaña - 27/3/97 - (bacterias/ml)

En la segunda campaña las muestras se tomaron durante el 1 de julio. Los diagramas de los nutrientes (figuras 15 y 16) son similares, en cuanto a la forma, a los obtenidos durante la primera campaña. No obstante, en este caso, al estar la interfase situada a una profundidad del orden de los 2 m, los nutrientes quedan confinados en una zona más superficial. Además se observa una concentración de nitratos ligeramente superior, mientras que los valores de fósforo son el doble de los registrados el 27 de marzo.

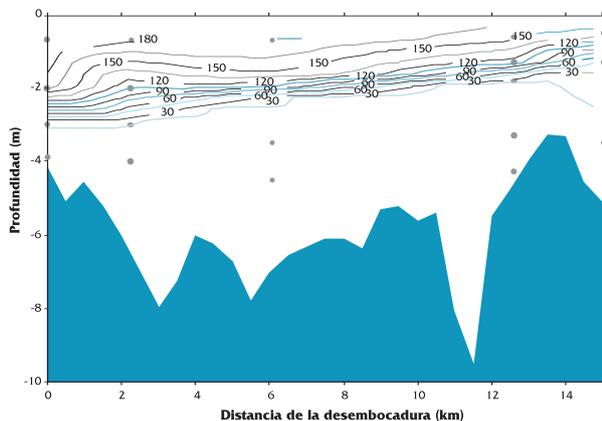


Figura 15. Perfil de nitratos en la segunda campaña - 1/7/97 - (µmol/l)

En cuanto a los sólidos en suspensión (figura 17), se mantiene una estructura similar a la indicada en la primera campaña, es decir, la mayor parte están situados por debajo de la interfase. Tanto los valores generales como el máximo han disminuido con respecto a la primera campaña, lo que se explica porque en esta época el caudal se mantuvo constante y bajo en relación con los valores alcanzados

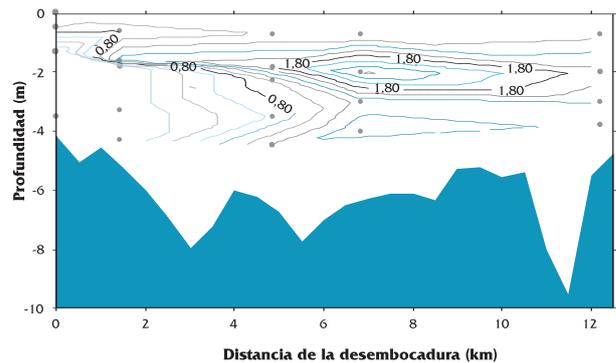


Figura 16. Perfil de fósforo soluble reactivo en la segunda campaña - 1/7/97 - (µmol/l)

en primavera. En cambio, durante la primera campaña se registraron fuertes oscilaciones de caudal, con el consiguiente incremento de la cantidad de sólidos arrastrados al aumentar éste.

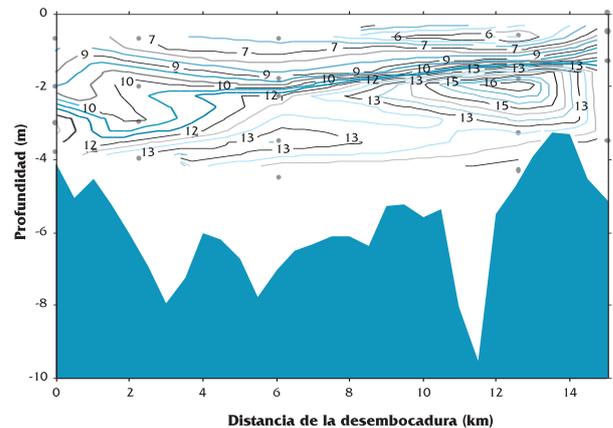


Figura 17. Perfil de sólidos en suspensión en la segunda campaña - 1/7/97 - (mg/l)

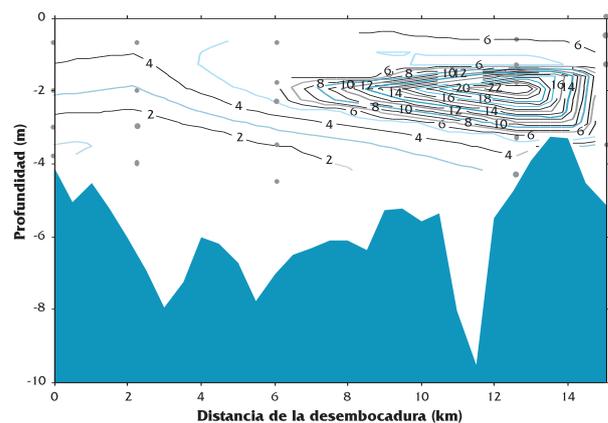


Figura 18. Perfil de clorofila en la segunda campaña - 1/7/97 - (µg/l)

Por su parte, el diagrama de la clorofila (figura 18) es muy distinto al observado en primavera (figura 13), ya que como puede apreciarse, la máxima concentración no está en la superficie sino jun-

to a la interfase. Ello parece deberse a que las células fitoplanctónicas, al morir por el aumento de la salinidad, sedimentan y en este proceso se acumulan, al menos en parte, en la zona de la interfase. La semejanza de la distribución de clorofila y sólidos suspendidos en este aspecto parece corroborar la suposición de que éstos, al menos en su mayor parte, están compuestos por células fitoplanctónicas.

Finalmente, cabe indicar que el número de bacterias por ml (figura 19) ha aumentado en un orden de magnitud. Las causas de esta variación son difíciles de explicar y quizás habría que pensar en algún aporte de aguas residuales.

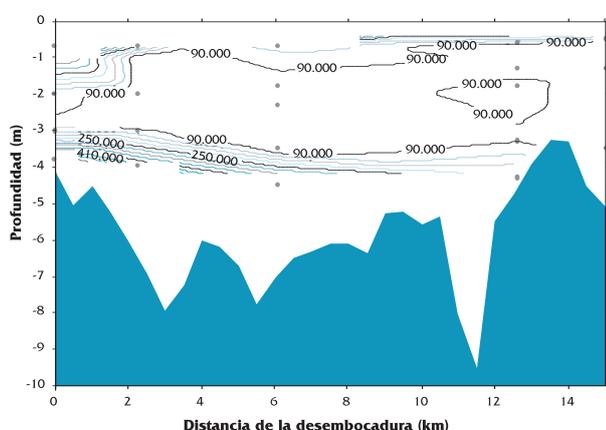


Figura 19. Distribución de bacterias en la segunda campaña - 1/7/97 - (bacterias/ml)

CONCLUSIONES

En el presente artículo se analizan diversos parámetros físicos, químicos y biológicos representativos de la calidad de las aguas en el tramo estuarino del río Ebro. Los datos utilizados fueron obtenidos durante dos campañas de campo realizadas durante la primavera y el verano de 1997.

Entre las conclusiones fundamentales que pueden extraerse del presente estudio, cabe destacar las siguientes:

- El Tramo estuarino del río Ebro se comporta como un estuario altamente estratificado, en el que destaca la presencia de una cuña salina. Dado el escaso rango de marea existente en la zona del Delta del Ebro la penetración de dicha cuña salina depende de la topografía del fondo y de la descarga del río.

- Los límites de penetración de la cuña salina observados durante las dos campañas son superiores a los observados por otros autores bajo condi-

ciones similares de caudal, con datos recogidos entre 1988 y 1991. Estas diferencias pueden ser debidas a modificaciones significativas en la topografía del fondo del río, o a cambios estructurales en el comportamiento del tramo estuarino debido a las progresivas reducciones de los caudales medios registrados durante las últimas décadas.

- La interfase, definida como la zona de transición entre la capa superior de agua dulce y la capa inferior de agua salada se caracteriza por su pequeño espesor (del orden de medio metro) y, en consecuencia, alto gradiente de salinidad. Su espesor aumenta a medida que se acerca a la desembocadura, al aumentar los procesos de mezcla.

- Con respecto a la entrada de nutrientes en el tramo estuarino, a pesar de que el agua de mar contiene pequeñas cantidades de los mismos, se ha comprobado que la mayor parte proviene del río, cuya composición nutricional muestra la importancia de los aportes de las aguas residuales urbanas y de las actividades agrícolas y ganaderas.

- Los gráficos de distribución de nutrientes y clorofila a lo largo del río demuestran el efecto filtro de la interfase, al aparecer acumulaciones en la misma.

- Esta acumulación en la interfase da lugar a que en el caso del fósforo y la clorofila los máximos se alcancen en esta zona y no en superficie.

- De la comparación de los datos de primavera y verano, se concluye que en verano hay una mayor cantidad de nutrientes, lo que junto a la mayor intensidad luminosa, provoca un gran incremento de la actividad biológica.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del proyecto FANS (contrato No. MAS3-CT95-0037) del Programa MAST-III de la Unión Europea y del proyecto MAR96-1856 del Programa CYTMAR de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT). También se agradece la contribución de todos los que participaron en las campañas de campo. Finalmente cabe destacar la colaboración de la Confederación Hidrográfica del Ebro, que proporcionó los datos de caudales del río y del Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEPYC) del CEDEX, que prestó algunos de los equipos utilizados en las campañas.

REFERENCIAS

- Bruno, M., Fraguela, B., Alonso, J.J., Ruiz Cañavate, A., Mañanes, R. and Rico, J. (1997). Atmospheric pressure variations and water mass exchange between the continental shelf and the Bay of Cadiz. *Scientia Marina*, 61, pp. 379-387.
- Day, J.W., J.F. Martin, L. Cardoch and P.H. Templet (1997). System functioning as a basis for sustainable management of deltaic ecosystems. *Costal Management*, 25, pp. 115-153.
- Geyer, W.R. and Farmer, D.M. (1989). Tide induced variation in the dynamics of a salt wedge estuary. *J. Physical Oceanography*, 19, pp. 1060-1072.
- Huisman, J. and Weissing, F.J. (1995). Competition for nutrients and light among phytoplankton species in a mixed water column: theoretical studies. *Water Sci. Tech.*, 32, pp. 143-147.
- Ibáñez, C. (1993). Dinámica hidrológica y funcionamiento ecológico del tramo estuarino del río Ebro. Tesis doctoral, Universidad de Barcelona, 196 p.
- Ibáñez, C., Pont, D. and Prat, N. (1997). Characterization of the Ebre and Rhone estuaries: A basis for defining and classifying salt-wedge estuaries. *Limnol. Oceanogr.*, 42, pp. 89-101.
- Morris, A.W., Bale, A.J. and Howland, R.J.M. (1981). Nutrient distributions in an estuary: evidence of chemical precipitation of dissolved silicate and phosphate. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 12, pp. 205-216.
- Smith, N.P. (1986). Subtidal Exchanges between Corpus Christi Bay and Texas Inner Shelf Waters. *Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies*. Ed. Van Kreeke, Springer Verlag, 16, pp. 143-152.
- Valle-Levinson, A. (1995). Observations of barotropic and baroclinic exchanges in the lower Chesapeake Bay. *Continental Shelf Research*, 15, pp. 1631-1647.
- Velasco, M.J. (1998). Descripción de los procesos hidro-bio-geoquímicos en el Delta del Ebro. Tesina de graduación. Universitat Politècnica de Catalunya, 133p.
- Zessner, M. et al. (1996). Regional materials accounting of nitrogen in upper Austria. *Water Sci. Tech.*, 33, pp. 89-97.