

Circulación marina en la plataforma continental del Ebro determinada a partir de la distribución de masas de agua y los microcontaminantes orgánicos en el sedimento

J. FONT, A. JULIÀ, J. ROVIRA, J. SALAT y J. SÁNCHEZ-PARDO

Instituto de Ciencias del Mar. P. Nacional, s/n. 08003 Barcelona.

RESUMEN

El análisis hidrográfico de las masas de agua en la plataforma continental del Ebro y las concentraciones de diversos microcontaminantes orgánicos en los sedimentos en las proximidades del delta, permiten aportar conclusiones sobre el régimen de circulación marina. Las aguas del río son frenadas por la corriente procedente del NE, ocasionando que parte del material en suspensión sedimente en el centro de un giro anticiclónico que se forma cerca de la desembocadura. El resto del material particulado es arrastrado hacia el S y desplazado progresivamente hacia la costa.

Palabras clave: Hidrografía. Plataforma continental del Ebro. Circulación marina. Microcontaminantes orgánicos. Sedimentos.

SUMMARY

The continental margin of Ebro River delta lays in the region of the general southwestwards circulation of the Northwestern Mediterranean. South of parallel 41° N the continental shelf widens suddenly and causes a deflection of 90° in the direction of the isobaths. The continental slope becomes then a barrier for the progression of the main current. The important discharge of Ebro river waters also influences the circulation on the continental shelf.

Temperature and salinity analysis of waters in the E and NE of the delta show an upwelling to the surface layer of dense waters that were circulating along the continental slope. The fresh waters from the river are transported to the south while rapidly mixing with surrounding waters. They are impelled to the coast by the dominant circulation, although some filaments or lenses of these waters break off and develop small anticyclonic gyres in the slope region.

The organic microcontaminants present in the sediment in the delta vicinity are of agricultural or industrial origin. The former are due to the river discharge while the latter come with the water masses from the nearing Tarragona industrial area. The distribution patterns of substance discharged from the river show a maximum concentration NE of the delta, but not attached to the mouth. These values decrease rapidly to the NE, while the gradient is gradual to the E and S di-

rections. We conclude that suspended materials from the river discharge are trapped and sedimented in an anticyclonic vortex generated in the NE of the delta by the interaction of the main current with the coastal topography. The remaining substance are spread to the S and gradually deposited on the sediment along the continental shelf in the Gulf of Valencia.

Key words: Hydrography. Ebro continental shelf. Marine circulation. Organic microcontaminants. Sediments.

INTRODUCCIÓN

La estructura de la circulación a gran escala en el Mediterráneo Noroccidental es relativamente permanente debido a la distribución de las distintas masas de agua presentes en la región. Éstas se encuentran en equilibrio dinámico que genera una circulación termohalina ciclónica. En la zona de la costa catalana esta circulación se concreta en una corriente dominante hacia el suroeste.

Sobre la plataforma peninsular las aguas presentan una fuerte influencia continental (especialmente a causa de los aportes de los ríos Ródano y Ebro), siendo frías y de salinidad baja y variable. En cambio en la parte central del mar Catalán existen aguas más saladas y calientes, y de densidad siempre superior a la de las aguas de la plataforma continental (Salat y Cruzado, 1981). La separación entre estas masas de agua, que se produce en la zona del talud continental, se manifiesta en forma de frente hidrográfico. Los valores máximos de la corriente se encuentran ligados a los frentes, ya que en una circulación de tipo termohalino la intensidad es proporcional al gradiente de densidad. Por tanto en una sección vertical transversal desde la costa peninsular hasta el centro del mar Catalán podemos distinguir tres zonas desde

el punto de vista dinámico: sobre la plataforma continental la circulación general hacia el SW es fácilmente alterada por la influencia de los vientos locales y los efectos de las descargas continentales, dando esquemas de circulación altamente variables. A continuación hay una zona de frente donde la corriente es más definida, estable e intensa y con una trayectoria ligada a la topografía (talud continental). Por último, en la parte central los gradientes de densidad son mucho menos significativos y consecuentemente la circulación es débil (Font *et al.*, 1987).

Las características geográficas de la zona próxima al delta del Ebro hacen que allí la situación sea más com-

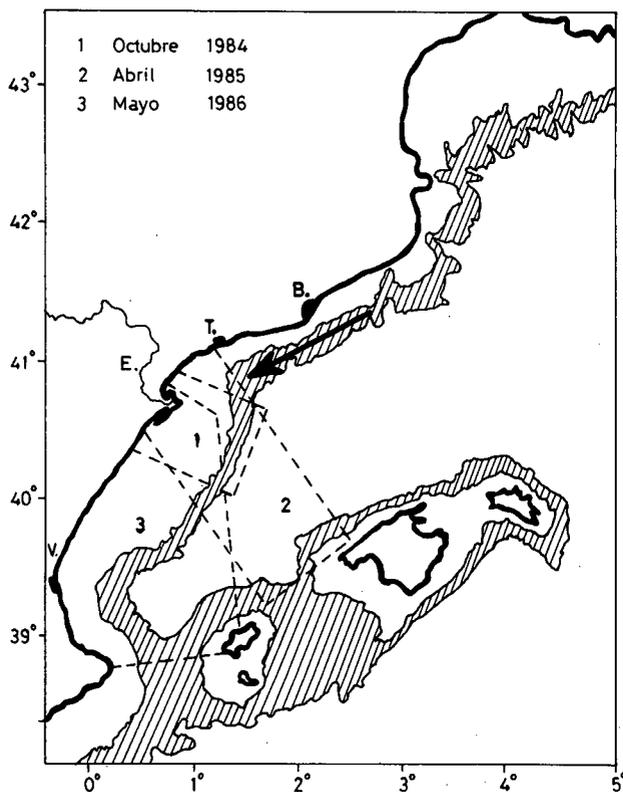


Figura 1. - El mar Catalano-Balear con indicación de las regiones de plataforma continental, talud (sombreado entre 200 y 1.000 m de fondo) y mar abierto. La flecha señala la dirección de la corriente general al llegar a la vecindad del delta del Ebro. Están marcadas las áreas cubiertas por las tres campañas oceanográficas.

Figure 1. - Catalano-Balearic Sea chart depicting the continental shelf, slope (shaded between 200 and 1.000 m depth) and open sea regions. The arrow shows the direction of the main current active in the Ebro delta region. The areas covered by the three oceanographic cruises are also indicated.

pleja y se produzca una fuerte interacción entre la circulación de la plataforma y la corriente ligada al frente. En este trabajo presentamos las conclusiones que sobre la circulación en la zona de influencia del Ebro pueden deducirse a partir del análisis de las masas de agua y del estudio de la distribución de microcontaminantes orgánicos en el sedimento.

MATERIAL Y MÉTODOS

En el marco de las primeras fases del programa EBROMS (Comité Hispano-Norteamericano Ref. CCA/8309-047) se desarrollaron tres campañas oceanográficas a bordo del B/O García del Cid durante las que se muestrearon perfiles verticales de alta resolución de presión, temperatura y salinidad hasta 400 m. La primera (EBROMS 2) tuvo lugar en octubre de 1984 con una malla densa de estaciones sobre la plataforma continental en los alrededores del delta. La segunda (EBROMS 6) se realizó en abril de 1985 cubriendo un rectángulo de unos 100 km de ancho desde la zona anteriormente muestreada hasta el canal de Mallorca. Finalmente la tercera (EBROMS 9), en mayo de 1986, abarcó el área comprendida desde la desembocadura del Ebro hasta el canal de Ibiza (fig. 1).

Paralelamente se efectuó un muestreo de sedimentos con draga *Van Veen* en una red de 22 puntos. Se determinaron las concentraciones de n-alcenos (C_{14} a C_{32}), pristano, fitano, hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), DDT's y PCB's. El protocolo del análisis se efectuó siguiendo las directrices de trabajos anteriores (Sánchez-Pardo y Rovira, 1985a, b). El análisis se efectuó mediante cromatografía de gases de alta resolución (H.R.G.C.) utilizando cromatógrafos DANI 3900 y 3800HR.

RESULTADOS

Con los datos recogidos se establecen las alteraciones que sufre la corriente hacia el SW en la región del delta del Ebro y sus posibles efectos sobre los mecanismos de sedimentación. La influencia del viento local es únicamente significativa en la zona más litoral, tal como demuestran los valores registrados en puntos cercanos al delta (Han y Kohler, 1982; Font, 1986), mientras que a gran escala, la vorticidad positiva del viento sobre el Mediterráneo Occidental durante todo el año no hace más que reforzar la circulación ciclónica. En cambio, la topografía y la salida de las aguas del Ebro sí tienen una influencia decisiva sobre la tendencia de la circulación, y en consecuencia sobre el proceso de sedimentación en el margen continental del Ebro.

Masas de agua

Como resultado de los correspondientes análisis hidrográficos de las campañas se han podido identificar las características de las diferentes masas de agua. El primer hecho destacable es la aparición sobre la plataforma continental, al NE y E del delta, de aguas más frías y saladas que las de su entorno (fig. 2). En superficie la situación es aparentemente poco clara, ya que precisamente en dirección al NE desembocan las aguas del Ebro, dulces pero también más frías que las de la capa superficial del mar. Pero a medida que se analizan niveles más profundos vemos que la mancha del mínimo de salinidad (debida al río) y la del de temperatura no coinciden. Por debajo de los cuarenta metros en las inmediaciones del delta ya no hay ninguna influencia de las aguas fluviales que, al ser más ligeras, permanecen cerca de la superficie sin haberse mezclado con las circundantes. Al E del delta aparece claramente una mancha de agua densa, fría y salada, que hacia niveles más profundos va tomando la forma de una lengua procedente del NE. Este hecho, que se ha observado repetidamente, indica un afloramiento, sobre la plataforma, de aguas que por su densidad les corresponde estar a mucha más profundidad.

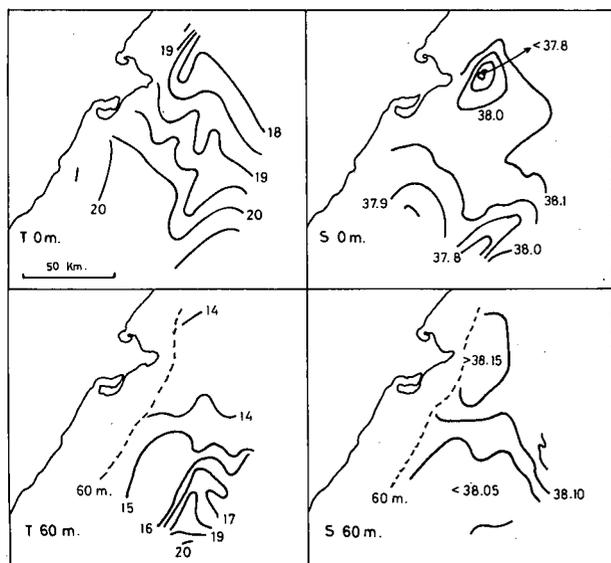


Figura 2. - Distribuciones horizontales de temperatura y salinidad en superficie y a la profundidad de 60 m en octubre de 1984.

Figure 2. - Horizontal distribution patterns of temperature and salinity at surface and at 60 m depth during the October 1984 cruise.

La plataforma continental al norte del paralelo 41° es estrecha, entre 15 y 25 km, pero al sur del cabo de Salou se ensancha hasta alcanzar 40 km frente al delta del Ebro y 60-70 km en la parte norte del golfo de Valencia (fig. 1). El ensanchamiento brusco de la plataforma produce un giro de casi 90° en la dirección de las isobatas, de manera que el talud continental pasa a convertirse en una barrera para la circulación hacia el SW en los niveles subsuperficiales. La consecuencia es el afloramiento observado de las aguas que circulaban con la corriente a lo largo del talud y que por inercia suben la pendiente al encontrarse el paso cerrado al frente, mientras que el resto del flujo se adapta a la constricción topográfica y se desvía hacia el S. Esta interpretación dinámica concuerda con los registros de corrientes efectuados en el límite de la plataforma continental, concretamente en la estación Casablanca situada unos 40 km mar adentro frente al delta del Ebro sobre un fondo de 165 m. Se ha observado que en los niveles superficiales la dirección predominante es hacia el SW, mientras que cerca del fondo es hacia el S (Font, 1986).

El agua del Ebro, debido a la forma de la desembocadura, inicialmente fluye hacia el NE, pero pronto encuentra a su paso la corriente contraria que la desvía hacia el E y seguidamente hacia el S. Esta confrontación de flujos activa la mezcla y favorece la aparición de bolsas de agua poco salada rodeadas de agua más salada. Los datos de la campaña EBROMS 9, en el golfo de Valencia, muestran como el agua de origen continental se va degradando rápidamente hacia el sur al tiempo que queda confinada hacia la costa. Pero la situación dinámica es más compleja. A lo largo del talud, y rompiendo la estructura simple del frente superficial, aparecen filamentos o lentes de agua desgajada de la plataforma. Estos fenómenos de mesoescala, de origen todavía no bien determinado, pueden dar lugar a núcleos de circulación anticiclónica, ya que se trata de aguas ligeras rodeadas de aguas más densas (fig. 3). Actualmente se está desarrollando otro programa («Intercambio talud-plataforma», Comité Hispano-Norteamericano Ref. CCA/8510115) en el que estudiamos la circulación ligada al frente, y precisamente en junio de 1986 un experimento con flotadores nos permitió observar un fuerte movimiento anticiclónico (Wang *et al.*, 1988), probablemente relacionado con el giro ya detectado en la campaña de mayo.

Microcontaminantes orgánicos

Se han estudiado los valores de concentraciones de microcontaminantes orgánicos en los sedimentos al objeto de tener una mayor información de los procesos sedimentológicos cerca de la desembocadura.

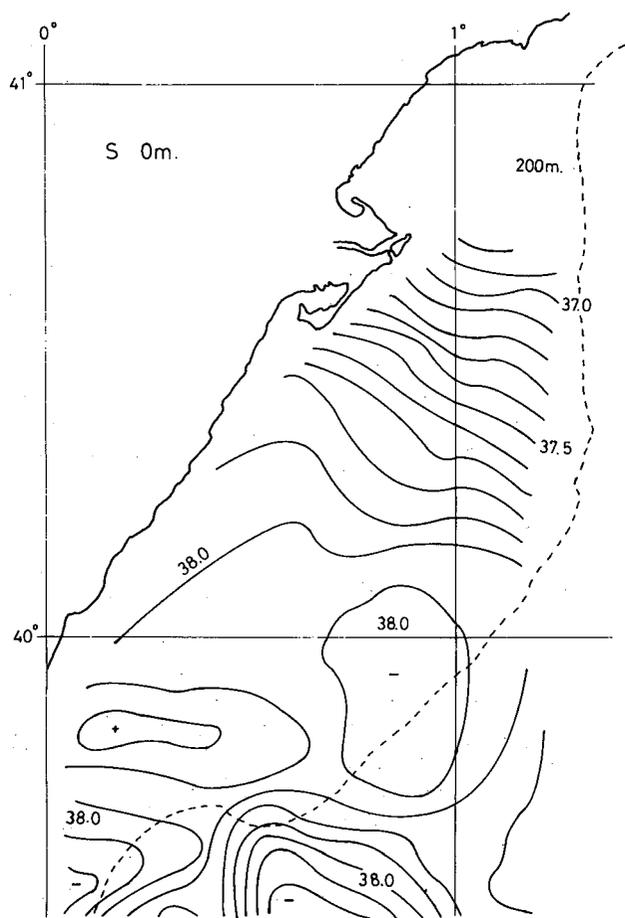


Figura 3. - Distribución superficial de salinidad en el sector septentrional del Golfo de Valencia durante la campaña de mayo de 1986.

Figure 3. - Surface salinity distribution patterns in the northern sector of the Gulf of Valencia during the May 1986 cruise.

En la figura 4 se representa la distribución de las concentraciones de n-alcenos (C_{14} a C_{32}) en sedimentos tomados con draga. Los valores máximos se encuentran al NE de la desembocadura, pero no en su entorno inmediato sino a unos 30 km de distancia, como ya había sido puesto de manifiesto anteriormente (Ballester *et al.*, 1986). Hacia el norte las concentraciones descienden drásticamente, mientras que hacia el este y el sur el gradiente es mucho más suave. La influencia del río hacia el SW se caracteriza por una zona en la cual el índice de preferencia de carbono C.P.I.₂₀₋₃₂ (no mostrado en la figura) se halla dentro del margen de 1 a 4 y con distribuciones

de componentes no resueltos en GCL centradas en torno a C_{25} , lo cual indica un origen de ceras de vegetales superiores (García-Regueiro *et al.*, 1983; Grimalt, 1983) contenidas en los detritus vegetales que puede transportar el río. En la zona existente entre la Ampolla y el cabo de Salou el índice de preferencia de carbono es inferior a la unidad, indicando una preferencia de la serie alifática par, lo que concuerda con una acción bacteriana. Esta distribución sugiere de nuevo la imagen del agua del río frenada y desviada por la corriente general, pero con la novedad de que en el golfo de Sant Jordi (entre el delta y el cabo de Salou) la interacción de la corriente con el obstáculo del delta debe generar un remolino anticiclónico (Losada y Medina, 1986) con el correspondiente movimiento descendente y la sedimentación de sustancias en suspensión en las aguas ligeras atrapadas en su centro. De hecho un remolino de estas características ya había sido observado a partir de medidas de corriente efectuadas en el golfo (Salat *et al.*, 1978; Ballester y Castellví, 1980).

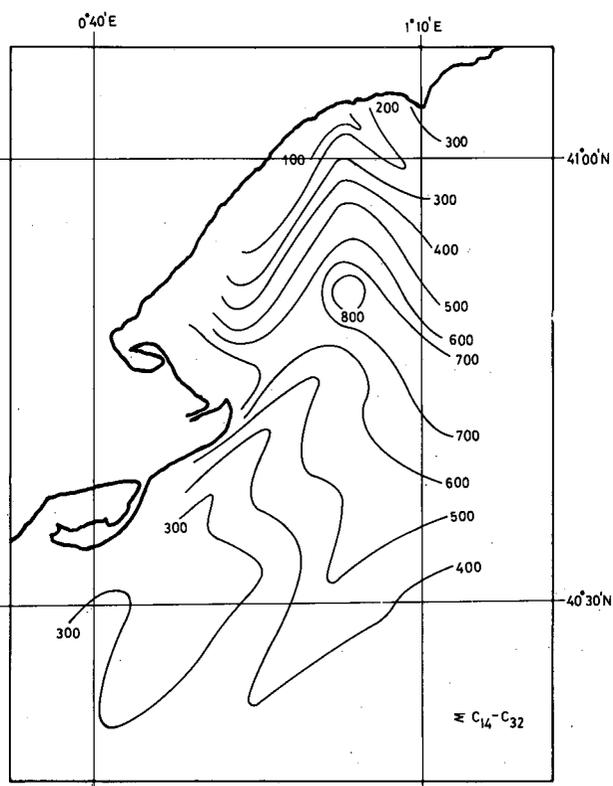


Figura 4. - Distribución de las concentraciones de hidrocarburos alifáticos totales (C_{14} a C_{32}) en ng/g, en sedimentos de la zona del delta del Ebro.

Figure 4. - Distribution of aliphatic hydrocarbon concentrations (C_{14} to C_{32}) in ng/g, in sediments from the Ebro delta area.

En cuanto a los hidrocarburos aromáticos policíclicos, se determinaron el benzo(a)antraceno, fenantreno, fluoranteno y criseno entre otros. Las distribuciones de las concentraciones de estos hidrocarburos (fig. 5a) muestran, en general, mínimos cerca de la desembocadura del

río, y con concentraciones crecientes en la dirección hacia el cabo de Salou. Esta diferencia con la distribución de n-alcanos podría explicarse por la entrada de residuos procedentes de la zona industrial de Tarragona. La procedencia de estos contaminantes es industrial y obvia-

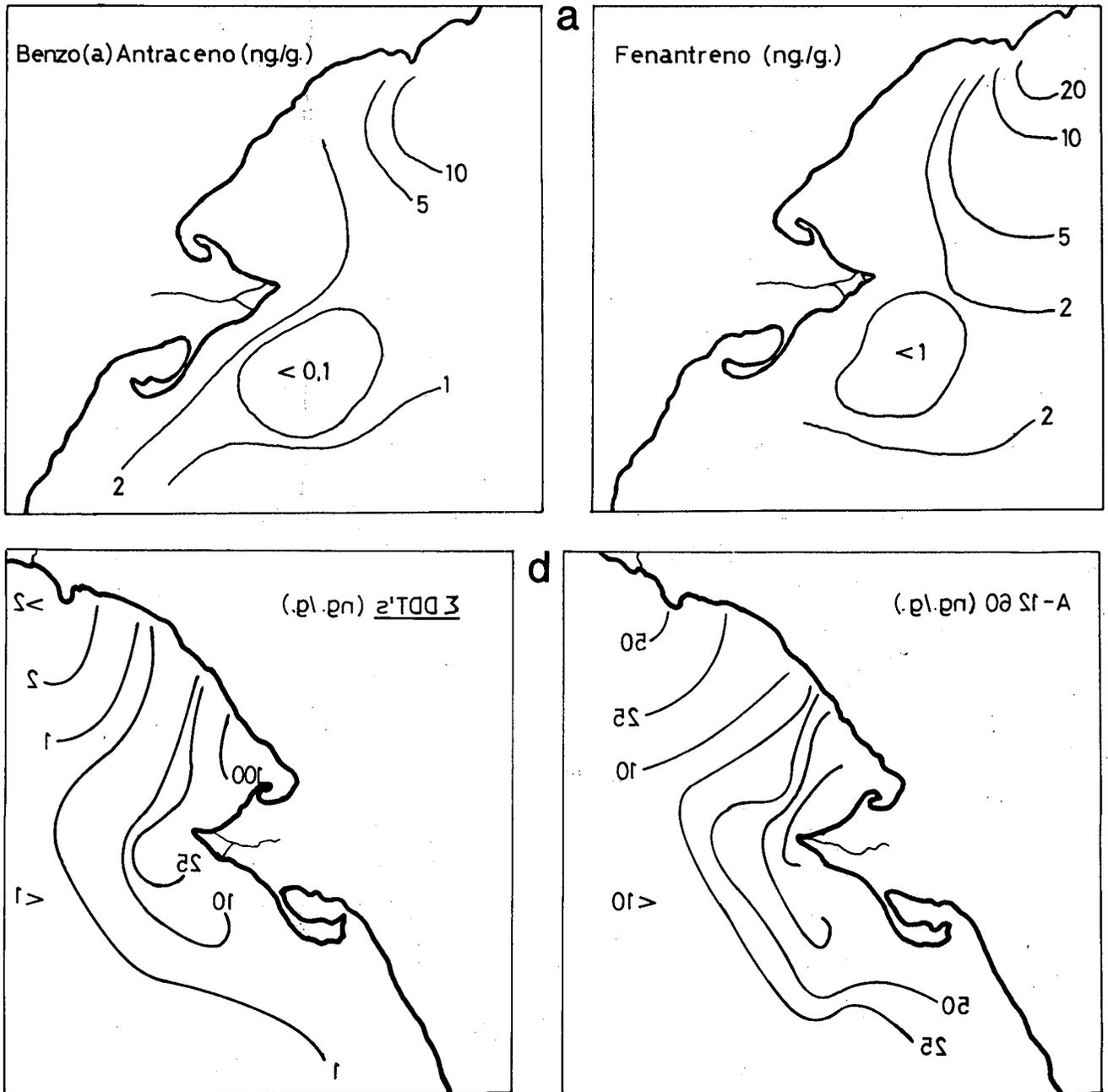


Figura 5. - Distribuciones de (a) hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH's) y (b) DDT's y PCB's en ng/g, en sedimentos de la zona del delta del Ebro.

Figure 5. - Distribution of (a) aromatic polycyclic hydrocarbon (PAH's) and (b) DDT's and PCB's in ng/g, in sediments from the Ebro delta area.

mente la contribución del río es despreciable. En la figura 5b se observa la distribución de DDT's (de origen agrícola), y PCB's (de origen industrial). Otra vez tenemos un comportamiento diferente, coincidiendo con su origen diferente. En el caso de los DDT's se determinó el p,p'-DDT y sus metabolitos más importantes (p,p'-DDE y p,p' DDD), y en el caso de los policlorobifenilos (PCB's) se determinó su concentración como AROCLOR 1260. La relación A-1260/ Σ DDT's presenta valores bajos en los sedimentos más externos, sobre todo en los cercanos a Tarragona, confirmando los argumentos expuestos anteriormente, esto es, la influencia predominante del Ebro en los compuestos de origen agrícola y la de las actividades industriales en torno a la zona de Tarragona. Por otra parte, las relaciones p,p'-DDT/METABOLITOS y p,p'-DDD/p,p'-DDE son superiores a la unidad en las muestras cercanas a la desembocadura e inferiores a la unidad en las muestras más exteriores, indicando un aporte relativamente reciente de p,p'-DDT en la zona del delta y un predominio de procesos de degradación de tipo anaerobio.

En resumen, las distribuciones cuantitativas de todos estos microcontaminantes siguen una pauta confirmatoria de los mecanismos discutidos a partir de los datos hidrográficos, teniendo en cuenta la existencia de dos vectores de entrada en el medio marino.

CONCLUSIONES

Por primera vez se ha realizado un estudio oceanográfico cubriendo toda la plataforma continental del Ebro y áreas adyacentes con una densa red de estaciones hidrográficas. Las distribuciones de los valores de temperatura y salinidad del agua a distintas profundidades, conjuntamente con el análisis de la concentración de ciertos microcontaminantes orgánicos en el sedimento de la zona más inmediata al delta, permiten establecer el esquema de circulación presentado en la figura 6.

Las aguas del Ebro, al entrar en contacto con la corriente general que se dirige hacia el SW siguiendo el talud continental, se ven frenadas y mezcladas con las aguas densas que han aflorado sobre la plataforma. En parte se ven atrapadas en un remolino anticiclónico en el golfo de Sant Jordi y mayoritariamente son desviadas hacia el S. En el golfo de Valencia se ven desplazadas hacia la costa, al mismo tiempo que núcleos de esta agua poco densa se separan del flujo principal y generan movimientos de carácter anticiclónico en la zona del talud.

A pesar de constituir éste un buen esquema general, quedan aspectos de la circulación que todavía no están lo suficientemente claros. ¿Cómo se forman estas man-

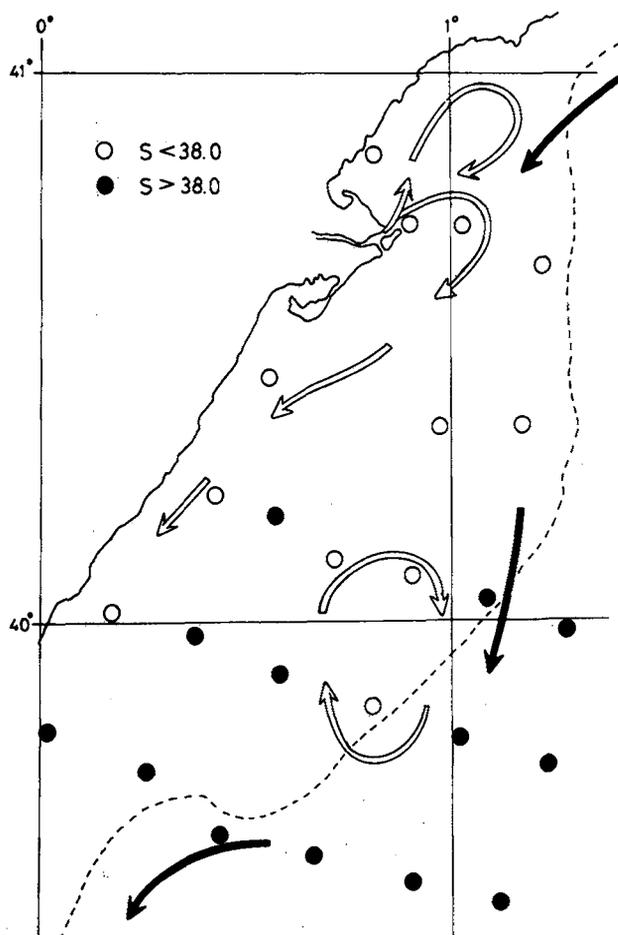


Figura 6. - Esquema interpretativo de la circulación sobre la plataforma del Ebro a partir de los datos presentados en este trabajo. Se indican las estaciones en las que se encontraron en mayo de 1986 salinidades inferiores a 38 en algún punto de la columna de agua.

Figure 6. - Interpretative diagram of the circulation patterns as deduced from the data described in this paper. Stations with salinity values below 38 in some point of the water column during 1986 cruise are also indicated.

chas de agua ligera en medio de las densas? ¿Es un fenómeno estacionario o se desplazan? ¿Qué ocurre con el frente del talud en el sur del Golfo de Valencia? ¿Qué papel juega el flujo a través del canal de Ibiza, por dónde pueden penetrar aguas ligeras de influencia atlántica? Para responder a estas preguntas y ampliar el conocimiento obtenido sobre la circulación, habría que concretar los esfuerzos futuros en nuevas metodologías todavía no usadas en la zona. Perfiles verticales con una

resolución horizontal suficiente para detectar bien los remolinos, obtención continuada de imágenes desde satélite, instalación de cadenas de correntímetros en el canal de Ibiza, son ejemplos de las actividades que hay que emprender en cualquier estudio que pretenda mejorar los resultados logrados hasta ahora.

AGRADECIMIENTOS

Queremos manifestar nuestro agradecimiento a la tripulación del B/O García del Cid, a todos los que participaron en el trabajo de campo y a nuestros colegas del United States Geological Survey que procesaron los datos de la primera campaña. Todas las figuras han sido dibujadas por P. Sacristán del Instituto de Ciencias de Mar. Este trabajo ha sido realizado y presentado dentro del programa «Investigación oceanográfica sobre el encuadre geológico, dinámica sedimentaria, riesgos ambientales y recursos del margen continental español» (Cté. Conj. España-USA n. 83/047).

BIBLIOGRAFÍA

- BALLESTER, A. y CASTELLVÍ, J., 1980: Estudio hidrográfico y biológico de las plataformas continentales españolas. I. Efectos de los efluentes de una planta de energía nuclear en el golfo de San Jorge (febrero 1975 - octubre 1976). *Informes Técnicos I. I. P.*, 76: 1-70.
- BALLESTER, A., MODAMIO, X., SÁNCHEZ-PARDO, J., GRIMALT, J. y ALBAIGÉS, J., 1986: Estudio comparativo de los contaminantes presentes en los deltas de la costa catalana en relación con el delta del Ebro. *Res. Sem. El Sistema Integrado del Ebro*, ISBN 84-358-7293-3: 597-623.
- FONT, J., 1986: *La circulació general a la Mar Catalana*. Tesis doctoral, Univ. Barcelona, 323 p.
- FONT, J., SALAT, J. y TINTORÉ, J., 1988: Permanent features in the circulation of the Catalan Sea. *Oceanolog. Acta* (en prensa).
- GARCÍA-REGUEIRO, J. A., ROVIRA, J. y SÁNCHEZ-PARDO, J., 1983: Microcontaminantes orgánicos en sedimentos de la plataforma continental mediterránea española. In *Estudio Oceanográfico de la Plataforma Continental*. Sem. Cádiz. J. Castellví ed., Barcelona: 305-332.
- GRIMALT, J., 1983: Geoquímica orgánica dels sistemes deltaics. Res. Tesi doctoral. Publ. Univ. Aut. Barcelona, 55 p.
- HAN, G. y KOHLER, K., 1982: Observed and modelled circulation on the Spanish continental shelf near río Ebro. *NOAA, SAI project 1-424-12-500 Final Report*.
- LOSADA, M. y MEDINA, R., 1986: Movimientos de masas de agua en la plataforma continental del delta del Ebro. *XI Congreso Español de Sedimentología. Resúmenes de Comunicaciones*, Barcelona: 102.
- SALAT, J. y CRUZADO, A., 1981: Masses d'eau dans la Méditerranée Occidentale. Mer Catalane et eaux adjacentes. *Rapp. Comm. int. Merc. Médit.*, 27(6): 201-209.
- SALAT, J., MANRÍQUEZ, M. y CRUZADO, A., 1978: Hidrografía del golfo de Sant Jordi. Campaña Δ (abril 1970). *Inv. Pesq.*, 42(2): 255-272.
- SÁNCHEZ-PARDO, J. y ROVIRA, J., 1985a: Hidrocarburos alifáticos, DDT's y PCB's en sedimentos marinos de la zona catalano-baleár (Mediterráneo occidental). *Inv. Pesq.*, 49(4): 521-536.
- SÁNCHEZ-PARDO, J. y ROVIRA, J., 1985b: Hidrocarburos alifáticos (C₁₄ a C₂₄), DDT's y PCB's en sedimentos y organismos del delta del Ebro (Mediterráneo occidental). *Inv. Pesq.*, 49(4): 637-651.
- WANG, D. P., VIEIRA, M., SALAT, J., TINTORÉ, J. y LA VIOLETTE, P. E., 1988: A shelf-slope filament of the Northeast Spanish coast. *J. Mar. Res.*, 46: 321-332.