

## Estudio de la materia en suspensión en el Golfo de Cádiz

A. PALANQUES<sup>(1)</sup>, F. PLANA<sup>(2)</sup> y A. MALDONADO<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>U.E.I. de Geología Marina. Instituto de Ciencias del Mar. C.S.I.C. Paseo Nacional, s/n. 08003 Barcelona.

<sup>(2)</sup>Instituto Jaime Almera, C.S.I.C., Martí Franqués, s/n. 08028 Barcelona.

### RESUMEN

Las principales fuentes de aporte de material particulado en suspensión en el Golfo de Cádiz son los ríos Guadiana, Tinto-Odiel y Guadalquivir. Estos ríos generan plumas de material particulado que se desplazan arrastradas por las corrientes litorales paralelamente a la costa y por advección. En la plataforma, las suspensiones se concentran mayoritariamente en una capa de turbidez situada sobre el fondo. La sedimentación de partículas en la plataforma y la difusión hacia el mar abierto son procesos que hacen descender la concentración de materia en suspensión en el borde de la plataforma y en el talud. En la zona profunda se ha detectado un aumento de partículas hacia el sureste.

*Palabras clave:* Materia particulada en suspensión. Capa turbida. Golfo de Cádiz. Hidrografía. Dinámica sedimentaria.

### ABSTRACT

The Gulf of Cádiz receives suspended particulated matter from Guadalquivir, Tinto-Odiel and Guadiana rivers. Inputs from atmospheric processes and from the reworking of sea-bed sediments may also be important. Highest concentrations of suspended matter from these rivers forms advective plumes which flow parallel to the coast. Settling and sedimentation of the particles on the shelf and diffusive processes lower the nepheloid concentrations with time. Apparently there are larger amounts of particles which manage to bypass the shelf towards the south of Guadalquivir mouth than in the remaining areas. Shelf and slope near-bottom samples, shelf samples from the surface and intermediate sample of the south-oriental slope are made up of clay minerals, quartz, carbonate and feldspar. The samples from the surface at the continental slope stations contain large amounts of amorphous-organic matter, some skeletal biogenic particles, some organic debris and some inorganic particles. The amount of organic debris increases towards the northwest both in the shelf and in the slope. Near-bottom deep samples from the slope have more clorite and less kaolinite than samples from the shelf. Furthermore, these samples have a relative high content of calcite and dolomite and they have no feldspar. Particles from other source areas (Gibraltar Strait) or from the reworking of deep bottom sediments may exist in this area.

*Key words:* Suspended particulated matter. Turbid layer. Golf of Cádiz. Hydrography. Sedimentary dynamics.

### INTRODUCCIÓN

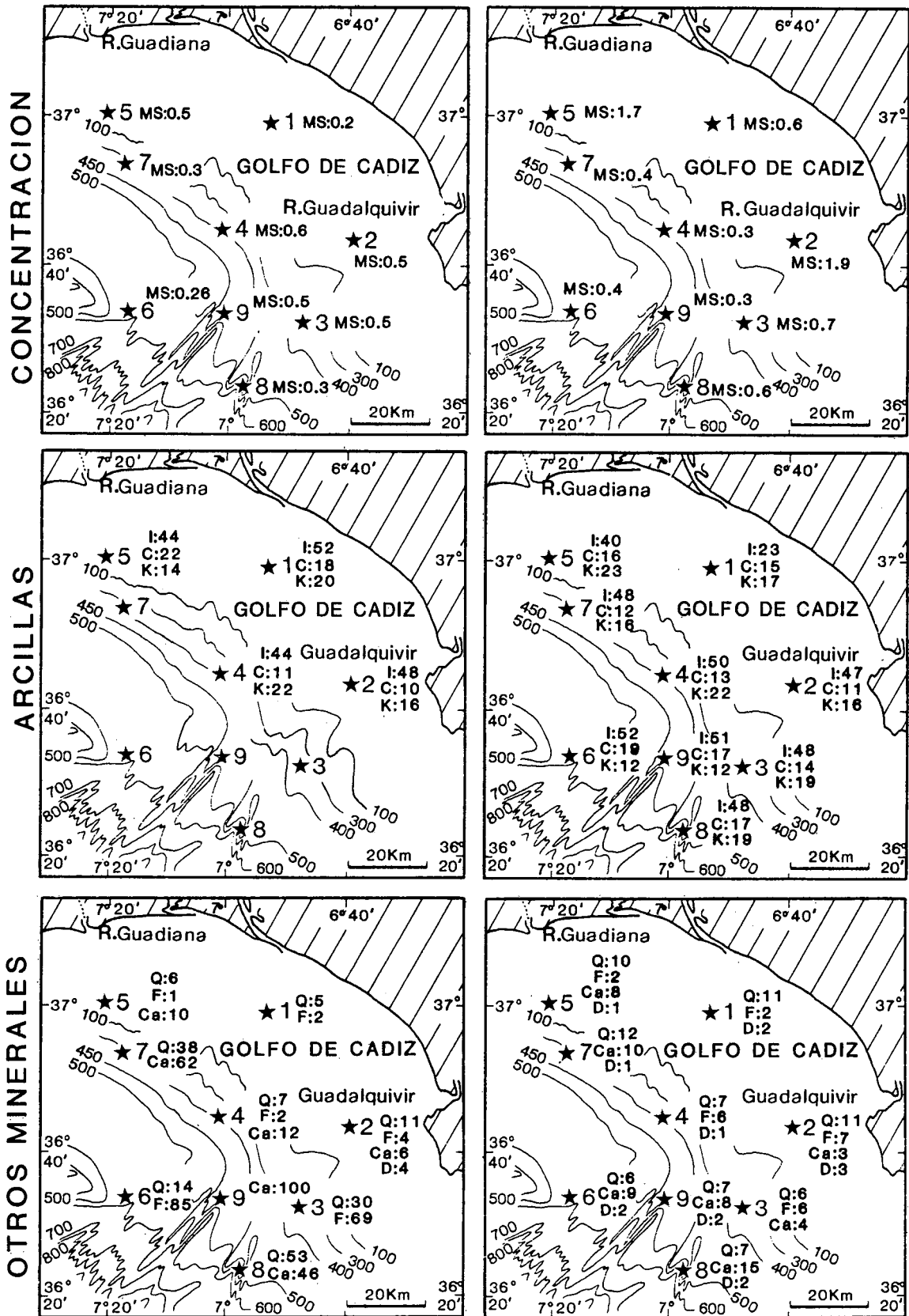
El análisis de los procesos de transporte del material particulado en suspensión en el medio marino requiere un estudio simultáneo de la climatología, la dinámica y disposición de las masas de agua, la dirección e intensidad de las corrientes, la productividad de la zona, las características de la materia en suspensión y las características de los sedimentos de fondo; todo ello durante períodos suficientemente representativos como para detectar la variabilidad de los distintos parámetros y sus interrelaciones. La complejidad y las dificultades técnicas que ello representa, implica muchas veces la imposibilidad de un análisis simultáneo, por lo que debe aplicarse el conocimiento dinámico e hidrográfico general de la zona, siendo conscientes de los límites que esta interpolación conlleva.

Este trabajo es un estudio de reconocimiento a gran escala de la distribución y dinámica de la materia en suspensión en el Golfo de Cádiz, partiendo de la aplicación de modelos hidrográficos e hidrodinámicos de la zona y de la obtención de muestras de material particulado en suspensión procedentes de distintos niveles de la columna de agua, tomadas durante el mes de diciembre de 1984.

### HIDROGRAFÍA DEL GOLFO DE CÁDIZ

El estudio de la circulación de las masas de agua mediterránea y atlántica en el Golfo de Cádiz ha sido abor-

MUESTRAS DE SUPERFICIE MUESTRAS CERCANAS AL FONDO



dado por diversos autores (Lacombe, 1961; Lacombe y Tchernia, 1969; Madelain, 1970; Zenk, 1974, 1975; Thorpe, 1976, etc.). El proceso de entrada y salida de agua atlántica y mediterránea a través del Estrecho de Gibraltar y su difusión, recibe una especial atención en la literatura científica.

La masa atlántica fluye hacia el estrecho por encima de la masa de agua mediterránea y tiene un espesor variable según la zona. La masa de agua mediterránea se hunde por debajo de la masa atlántica hacia la zona profunda sin introducirse en la plataforma continental por donde fluye únicamente agua atlántica. Gran parte del flujo mediterráneo sufre una inflexión hacia el norte al entrar en el Golfo de Cádiz y sigue las isobatas hasta que en la zona profunda del talud se divide encauzándose en los cañones submarinos que allí existen (Madelain, 1970; Zenk, 1975; Fernández y Ortega, 1984). Este flujo se separa en varias capas a distinta profundidad en su camino hacia el Atlántico (Madelain, 1970; Ambar y Howe, 1979). En invierno, durante la época lluviosa, el flujo de agua mediterránea alcanza su máximo desarrollo, mientras que la masa atlántica disminuye de espesor hacia el estrecho.

En la zona más superficial existen dos corrientes generales, de S a N y de N a S según el viento reinante, que se reorientan al chocar con la línea de costa. Los vientos de levante, vientos que soplaban durante la toma de muestras, provocan el movimiento de las aguas superficiales hacia el oeste.

## METODOLOGÍA

En la plataforma continental se realizaron perfiles de transmisividad en la columna de agua y se tomaron muestras de agua con botellas «Nisking» de 20 l, en superficie y cerca del fondo, frente a la desembocadura de los ríos Guadalquivir, Tinto-Odiel y Guadiana en la isobata de 40 m (fig. 1). En el talud se tomaron muestras de agua en superficie, en aguas intermedias y cerca del fondo en las isobatas de 300 y de 500 m (fig. 1).

Las muestras de agua fueron filtradas utilizando membranas «Millipore» de 0,45  $\mu\text{m}$  de diámetro de poro y membranas «Nucleopore» de 0,4  $\mu\text{m}$  de diámetro de poro. Sobre estos filtros se calculó la concentración de materia particulada (peso/volumen). También se realizó un análisis mineralógico por difracción de R-X y un análisis de las partículas mediante un microscopio electrónico de barrido y un equipo de energía dispersiva de rayos-X (EDAX).

## DISTRIBUCIÓN Y DINÁMICA DEL MATERIAL EN SUSPENSIÓN

En la plataforma continental, los ríos son generalmente las principales fuentes de aportes de materia particulada en suspensión. La mayoría de los ríos importantes descargan «nubes de materia particulada en suspensión que son arrastradas por las corrientes litorales paralelamente a la costa, formando «plumas» de turbidez más o menos permanentes (McCave, 1972; Drake, 1976) cuyo desarrollo va íntimamente ligado al régimen fluvial y al régimen marino en la desembocadura. La mayor concentración de materia en suspensión en la plataforma se da en una capa turbida, normalmente situada sobre el fondo, cuyo espesor y concentración suele disminuir al alejarse de la zona de influencia fluvial, debido a la sedimentación, difusión y advección de las partículas (Curry, 1960).

Aunque de modo más discontinuo, también tiene una repercusión importante sobre el espesor de la capa turbida de fondo el efecto de resuspensión de partículas a partir del retrabajamiento de sedimentos de fondo por olas de tormenta, olas internas, corrientes litorales, etc., fenómenos éstos que van íntimamente ligados a las condiciones meteorológicas de la zona (Drake, 1976). El viento y la lluvia también aportan material particulado y en períodos de alta productividad, las partículas biógenas son predominantes en ciertas zonas.

En el área estudiada, las estaciones realizadas son insuficientes para establecer la dimensión y características de las capas turbidas generadas por la descarga de estos

Figura 1. — Situación de las estaciones y características físicas y mineralógicas de la materia particulada en suspensión. La concentración viene expresada en mg/l. El contenido de las fases minerales presentes se expresa en porcentajes respecto al total de la fracción sólida cristalina. M. S.: materia en suspensión, I: illita, C: clorita, K: caolinita, Q: cuarzo, F: feldespato, Ca: calcita, D: dolomita.

Figure 1. — Station locations, total suspended solids in mg/l («concentración») and content in percentage of every mineral phase that compounds suspended sediment matter with relation to the total crystalline content of each sample. I: illite, C: clorite, K: kaolinite, Q: quartz, F: feldspar, Ca: calcite, D: dolomite. Surface samples («muestras de superficie») are represented on the left-side maps and near-bottom samples («muestras cercanas al fondo») are represented on the right-side maps.

tres ríos, si bien puede deducirse que las suspensiones siguen las corrientes generales paralelas a la costa con dirección al estrecho. Durante la campaña de muestreo, en la isobata de 40 m, la capa turbida de fondo alcanzaba un espesor de 12 m frente al Guadalquivir, de 9 m frente al Gadiana y de 5 m frente al Tinto-Odiel; asimismo, la concentración de materia en suspensión a  $5 \pm 1$  m sobre el fondo era de 1,9, 1,7 y 0,6 mg/l respectivamente (fig. 1). Estos datos indican cierta similitud en la magnitud de las plumas del río Gadiana y del río Guadalquivir, si bien sería necesaria la realización de un estudio más detallado de la zona para comprobarlo. El aporte de materia en suspensión procedente del río Tinto-Odiel es mucho menor. Por encima de la capa turbida de fondo la columna de agua presenta una transmisividad muy constante hasta la superficie donde las concentraciones son de 0,5 mg/l frente a los ríos Gadiana y Guadalquivir y de 0,2 mg/l frente a los ríos Tinto-Odiel (fig. 1).

En el talud, los aportes de materia particulada en suspensión proceden principalmente de la capa turbida de fondo de la plataforma continental (Carson, 1986). Esta capa desciende pegada al fondo dispersándose mar adentro. En varios estudios se han detectado capas turbidas intermedias que se generan a partir del borde de la plataforma o a partir de discontinuidades en la columna de agua, desplazándose por advección (Bouma *et al.*, 1969; Drake *et al.*, 1972; Nelson *et al.*, 1973; Pierce, 1976). Las partículas atmosféricas así como las partículas de origen biógeno pueden alcanzar concentraciones notables, sobre todo en superficie. Otros procesos generadores de «nubes» de materia en suspensión en el talud son los procesos gravitativos (Piper, 1978), las corrientes de fondo y las olas internas.

En el talud de la zona estudiada, las concentraciones de materia en suspensión en la columna de agua son más bajas que en la plataforma y la capa turbida de fondo está mucho más diluida y dispersa, presentando concentraciones muy similares a las del resto de la columna de agua. Cerca del fondo, las concentraciones más altas se detectaron en las estaciones orientales, 0,7 mg/l cerca de la isobata de 300 m y 0,6 mg/l en la isobata de 450 m. Este fenómeno puede interpretarse como resultado de la reorientación del material en suspensión que se escapa de la plataforma al sur de la zona de Cádiz, hacia el noroeste y el oeste por el flujo de salida del Mediterráneo unido a la mayor intensidad de la corriente en esa área. En el resto de la zona de talud, las concentraciones sobre el fondo oscilaban entre 0,3 y 0,4 mg/l (fig. 1). En superficie, las concentraciones más altas correspondían a las estaciones más cercanas a la costa nororiental que presentaban entre 0,5 y 0,6 mg/l, debido en parte

al aporte de partículas eólicas transportadas por el viento de levante y a la corriente que éste genera. En el resto de las estaciones las concentraciones oscilaban entre 0,2 y 0,3 mg/l (fig. 1). En aguas intermedias del talud, las concentraciones oscilaban entre 0,2 y 0,3 mg/l. Las pequeñas variaciones en la concentración de materia particulada en la columna de agua no permiten identificar la existencia de ninguna capa turbida intermedia, aunque la zona de interfase entre el agua atlántica y el agua mediterránea es, en potencia, una discontinuidad propicia para que éstas se generen.

### ANÁLISIS DE LAS PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN

En cuanto a su composición, la materia particulada en suspensión puede dividirse en dos grupos según predominen los componentes de origen terrígeno o los componentes de origen biógeno.

En la zona estudiada predominan las partículas de origen terrígeno en todas las muestras tomadas a pocos metros por encima del fondo. Estas muestras tienen de un 75 a un 85% de minerales arcillosos, predominando la illita con un porcentaje próximo al 50% en todas ellas. En las muestras más profundas del talud, el porcentaje de clorita es algo mayor (17%-19%) y el porcentaje de caolinita es menor (8,7 y 12,7) que en el resto de las muestras tomadas cerca del fondo (clorita: 11-17%; caolinita: 16-23%) (fig. 1). El resto de los minerales que componen estas muestras son: cuarzo, calcita, feldespato y dolomita (fig. 1). El cuarzo presenta un porcentaje algo mayor en plataforma (10-11%) que en el talud (5,7-7,5%). Las concentraciones de calcita más elevadas se dan en las muestras más profundas del talud (9-15,5%) y en las muestras más occidentales (8,5-10%), siendo menor del 5% en el resto de las estaciones. Las concentraciones más elevadas de feldespato se dan en la zona más próxima a la desembocadura del río Guadalquivir (6,7%), mientras que frente a los ríos Tinto-Odiel el contenido de feldespato no rebasa el 3% y en las muestras más profundas del talud el contenido de este mineral es nulo. La dolomita presenta porcentajes superiores al 2% en la estación de plataforma situada frente al Guadalquivir (3,1%) y en las muestras más profundas del talud (2,1-2,4). En el resto de la zona apenas alcanza el 1%. También corresponden a este primer grupo las muestras de superficie tomadas en la zona de plataforma y en la zona central del inicio del talud y la muestra tomada en aguas intermedias de la zona suroriental del talud (estación 8).

Las partículas de origen biógeno predominan en la mayor parte de las muestras tomadas en superficie y en aguas intermedias del talud. El mayor componente en volumen

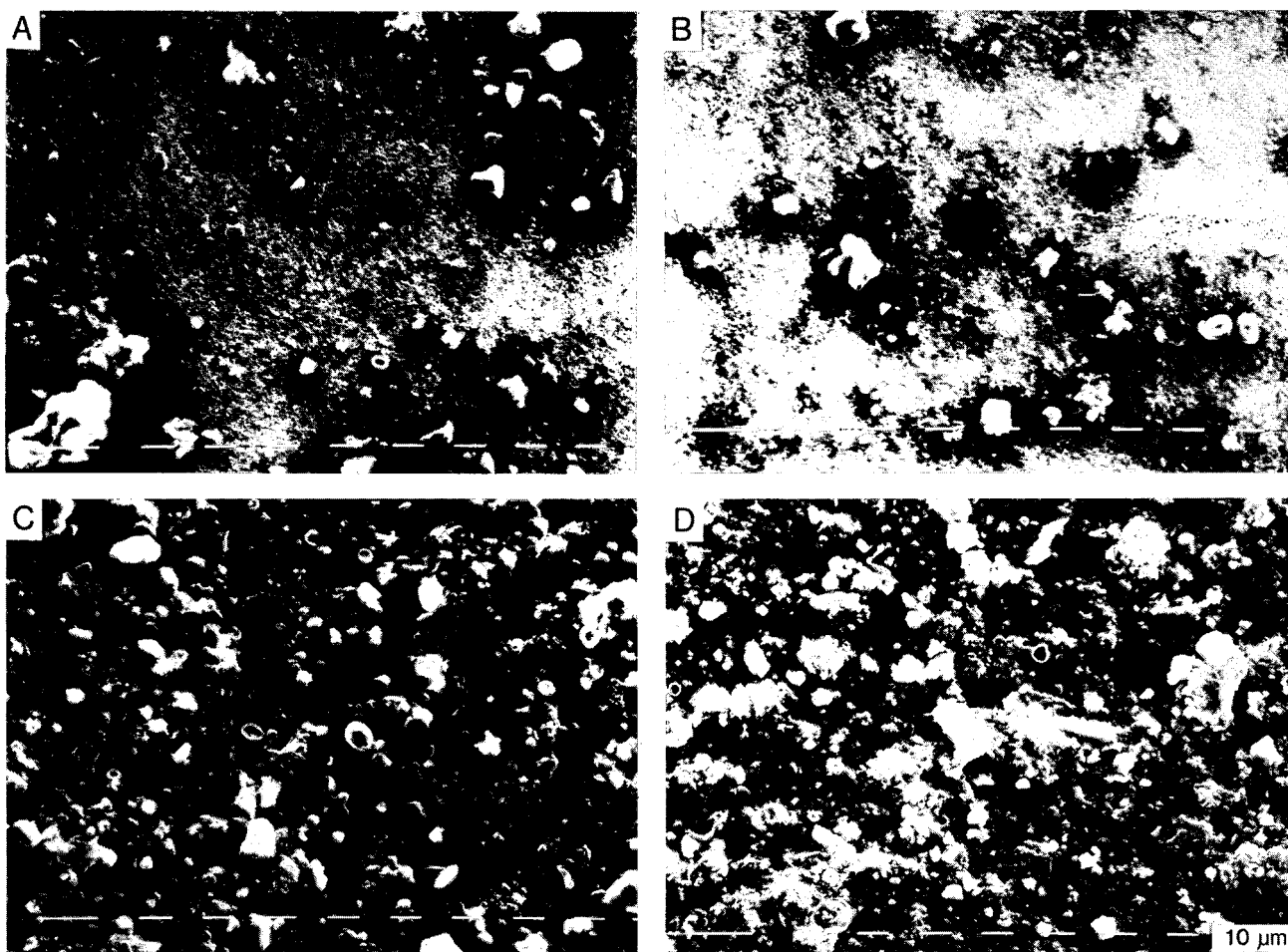


LÁMINA I. Fotografías de partículas al microscopio electrónico de barrido.

Figura A. — Estación 5 superficie: agregados arcillosos, partículas individuales preferentemente de cuarzo y carbonato. Cocolitos.

Figura B. — Estación 8 fondo: destacan los agregados arcillosos y cocolitos diversos.

Figura C. — Estación 5 fondo: predominan los agregados arcillosos, láminas individuales de filosilicatos y cocolitos diversos.

Figura D. — Estación 2 fondo: predominio de agregados arcillosos grandes y compactos.

PLATE I. SEM photomicrograph of suspended particles.

Figure A. — Station 5 surface sample: clay aggregates and single particles of quartz and carbonate.

Figura B. — Station 8 near-bottom sample: clay aggregates and coccoliths.

Figure C. — Station 5 near-bottom sample: clay aggregates, single clay laminae and coccoliths.

Figura D. — Station 2 near-bottom sample: big and tight clay aggregates.

es materia orgánica amorfa y en peso son partículas biógenas silíceas y carbonatadas junto con algunas partículas de origen atmosférico.

En cuanto a la naturaleza de las partículas pueden distinguirse tres tipos (Lám. I):

1) Partículas individuales: son partículas principalmente de cuarzo y de carbonato de origen biógeno y terrígeno junto con láminas individuales de filosilicatos.

2) Agregados arcillosos: están formados principalmente por láminas de filosilicatos. La atracción entre partí-

culas se debe a fuerzas electromagnéticas principalmente.

3) Aglomerados orgánicos, son masas amorfas de geles orgánicos donde pueden adherirse partículas minerales.

En la zona estudiada, la materia en suspensión de origen terrígeno está compuesta principalmente por agregados arcillosos y por partículas individuales (lám. I, fig. D). Las muestras del área oriental presentan agregados minerales grandes y compactos junto con pocas partículas individuales, mientras que en las muestras del área occidental los agregados arcillosos son menores y hay una mayor proporción de partículas individuales (lám. I, figs. A y C). La materia en suspensión de origen biógeno consiste principalmente en agregados orgánicos y en menor grado en partículas individuales silíceas y carbonatadas (lám. I, figs. B y C).

## CONCLUSIONES

La mayor concentración de materia en suspensión en el Golfo de Cádiz se registra en la capa turbida de fondo de la plataforma continental frente a los ríos Guadiana y Guadalquivir. Estos ríos generan sendas plumas de material en suspensión que son arrastradas por el flujo de agua atlántica hacia el este y hacia el sureste. La concentración disminuye gradualmente debido a dos fenómenos: 1) la incorporación progresiva de partículas en suspensión a los sedimentos de fondo y 2) la difusión y advección de las partículas a lo largo de la plataforma y hacia el talud.

Las partículas de la capa turbida de fondo que se escapan de la plataforma son reorientadas en la zona del talud hacia el noroeste y el oeste por el flujo de salida del Mediterráneo. El escape de partículas al sur del Guadalquivir es mayor que en el resto de la zona dando lugar a una mayor concentración de partículas en suspensión en la zona cercana al fondo del talud oriental.

La intensidad de las corrientes de fondo en esta zona del talud impide la deposición del material fino en suspensión según se deduce de la distribución superficial de sedimentos (Díaz *et al.*, 1985).

No se ha detectado con claridad la existencia de capas turbidas intermedias. Sin embargo, en la estación más suroriental (8), las muestras tomadas en la interfase entre los flujos de agua mediterránea y atlántica presentan una mineralogía predominantemente terrígena, muy similar a la de las muestras de la capa turbida de fondo de la plataforma. Si tenemos en cuenta además que es precisamente en esta zona donde se ha detectado un mayor escape de partículas, podemos deducir la existencia

de una capa turbida intermedia en esta zona. El resto de muestras tomadas en aguas intermedias están compuestas mayoritariamente por materia orgánica amorfa y componentes biógenos.

Las muestras cercanas al fondo tomadas a mayor profundidad (estaciones 6, 9 y 8) presentan diferentes porcentajes de arcillas que las muestras del inicio del talud y de plataforma. Estas muestras tienen más clorita y menos caolinita, así como un contenido relativamente elevado de calcita y de dolomita y un contenido nulo de feldespato. Estos datos indican la existencia de material particulado procedente de otras zonas, como el Estrecho de Gibraltar, o del retrabajamiento de los materiales de fondo.

Para un mejor conocimiento de la dinámica sedimentaria en el Golfo de Cádiz son necesarios estudios más frecuentes, detallados y extensos, teniendo en cuenta que para abordar problemas concretos es necesario desarrollar acciones pluridisciplinarias que permitan detectar simultáneamente los factores implicados en un determinado proceso.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Alberto Tejero y a la tripulación del Buque Nerva que hizo posible la toma de muestras. Asimismo, agradecemos también a Montserrat Marsal del Departamento de Metalurgia de la Universidad Politécnica de Cataluña, por la labor efectuada con el microscopio electrónico.

## BIBLIOGRAFÍA

- AMBAR, I. y HOWE, M.R., 1979: Observation of the Mediterranean outflow I. Mixing in the Mediterranean outflow. *Deep Sea Research* 26: 535-554.
- BOUMA, A., REZAK, R. y CHMELIK, R.F., 1969: Sediment transport along oceanic density interfaces. *Geol. Soc. Am. Abstract*, 7: 259-260.
- CARSON, B., BAKER, E.T., HICKEY, B.M., NITTROUER, C.A., DEMASTER, D.J., THORBJAMARSON, K.W. y SNYDER, G.W., 1986: Modern sediment dispersal and accumulation in Quinault submarine canyon - A summary. *Marine Geology* 71: 1-13.
- CURRAY, J.R., 1960: Sediments and history of Holocene transgression continental shelf, northwest Gulf of Mexico. In F. P. Shepard, F. B. Phleger and T. H. Van Andel, eds. *Recent Sediments Northwest Gulf of Mexico* pp. 221-266, Tulsa, Am. Assoc. Pet. Geol.
- DIÁZ, J.I., FARRAN, M. y MALDONADO, A., 1985: Superficial sediment distribution patterns in the Gulf of Cadiz controlled by the geomorphic features and physical oceanographic parameters. *International Association of Sedimentologists*, pp. 129-132, Lleida, Institut d'Estudis Ilerdencs. Universitat Autònoma de Barcelona.
- DRAKE, D. E., 1972: Suspended matter in Santa Barbara channel, California. Ph. D. Tesis, University of Southern California, Los Angeles, 357 p.

- DRAKE, D.E., 1976: Suspended sediment transport and mud deposition on continental shelves. In D. J. Stanley and D. J. P. Swift, eds. *Marine Sediment Transport and Environmental Management* pp. 127-158, New York, Wiley.
- DRAKE, D. E., KOLPACK R. L. y FISCHER P. J., 1972: Sediment transport on Santa Barbara-Oxnard Shelf, Santa Barbara Channel, California. In D. J. P. Swift, D. B. Duane and O. H. Pilkey, eds. *Shelf Sediment Transport: Process and Pattern*, pp. 307-332 Stroudsborg, Pa. Dowden, Hutchinson & Ros.
- FERNÁNDEZ, J.M. y ORTEGA, E., 1984: Initial Analysis of some measurements taken in the Gulf of Cadiz during ¿Dónde va? project. Preliminary results of «Dónde va» meeting in Fuengirola, Málaga, Octubre 1983, *Inf. Téc. Ins. Esp. Oceanografía* 11-24.
- LACOMBE, H., 1961: Contribution a l'étude de regime du detroit de Gibraltar. I. Etude dynamique. *Cahiers Oceanographiques*, 8 (2): 12-34.
- LACOMBE, H. y TCHERNIA, P., 1969: Liste des stations M.O.P. calypso 176 a 234 pour servir a l'étude des échanges entre la Mer Méditerranée et l'Océan Atlantique. *Cahiers Oceanographiques*, 12 (3): 204-235.
- MADELAIN, F., 1970: Influence de la topographie du fond sur l'écoulement Méditerranée entre le Détroit de Gibraltar et le Cap St. Vicent. *Cahiers Oceanographiques* 22 (2): 43-61.
- McCAVE, I.N., 1972: Transport and escape of fine grained sediments from shelf areas. In D. J. P. Swift, D. B. Duane and O. H. Pilkey, eds. *Shelf Sediment Transport: Process and Pattern*, pp. 225-248 Stroudsborg, Pa. Dowden, Hutchinson & Ros.
- NELSON, D.D., PIERCE, J.W. y COLQUHOUN, D.D., 1973: Sediment dispersal by cascading coastal water. *Geol. Soc. Am. Abstr. Programs*, 8: 423-242.
- PIERCE, J.W., 1976: Suspended Sediment Transport at the Shelf Break and over the Outer Margin. In D. J. Stanley and D. J. P. Swift, eds. *Marine Sediment Transport and Environmental Management*, pp. 437-458, New York, Wiley.
- PIPER, D.J.W., 1978: Turbidite muds and salts on deep sea fans and abyssal plains. In D. J. Stanley and G. Kelling, eds. *Sedimentation in Submarine Canyons, Fans and Trenches*, pp. 163-176 Stroudsborg, Pa. Dowden, Hutchinson & Ross.
- THORPE, S., 1976: Variability of the Mediterranean Undercurrent in the Gulf of Cadiz. *Deep Sea Res.*, 23: 711-727.
- ZENK, W., 1974: Some current and temperature observation in the Mediterranean outflow west of Gibraltar, a data report. *Meteor Forschungsergebnisse A* (1): 20-48.
- ZENK, W., 1975: On the Mediterranean Outflow west of Gibraltar. *Meteor Forschungsergebnisse A* (16): 23-24.