

Sedimentos prodeltaicos en el Delta emergido del Llobregat

M. MANZANO ARELLANO⁽¹⁾, M. D. PELAEZ ALBERO⁽²⁾, J. SERRA RAVENTÓS⁽¹⁾

(1) Departamento de Estratigrafía, Univ. de Barcelona

(2) Laboratorio de Ingeniería Nuclear, Univ. Politéc. de Cataluña. (Fallecida).

RESUMEN

La unidad de limos intermedios del delta del Llobregat corresponde a un ambiente prodeltaico en el que se han identificado, por comparación al modelo actual, subambientes de prodelta proximal, medio y medio-distal. Su agua intersticial es sinsedimentaria, hallándose en la actualidad parcialmente diluida.

Palabras clave: Prodelta. Limos. Facies. Agua intersticial. Dilución.

ABSTRACT

The intermediate silty unit of the subareal Llobregat delta is of prodeltaic origin by comparison with the actual delta. Proximal, medium and medium-distal prodeltaic facies have been identified. Pore water of silty unit is connate marine water which has been partially diluted during a past period of ascendent groundwater flow. Dilution becomes smaller as depth decreases.

Key words: Prodelta. Silts. Pore water. Dilution.

LOCALIZACIÓN Y GEOLOGÍA DE LA ZONA

El delta del Llobregat se halla situado al SO de la ciudad de Barcelona y a unos 10 km de ésta. El delta actual se desarrolla sobre los depósitos transgresivos holocenos posteriores a la última glaciación. Son estos depósitos holocenos los que constituyen el objeto del presente estudio.

En la columna litológica del delta del Llobregat se han diferenciado clásicamente cuatro unidades (MOP, 1966; Marqués, 1984), que de base a techo son (fig. 1):

1. — Margas azuladas y arcillas con fauna marina, de edad pliocena.

2. — Arenas y gravas localmente cementadas asimiladas a antiguas terrazas fluviales (Solé *et al.*, 1957; Solé, 1961 y 1963), de edad pleistocena. Esta unidad constituye el acuífero inferior del delta.
3. — Limos arcillosos negros con abundante materia orgánica, de ambiente marino y edad holocena subactual.
4. — Arenas limpias con acumulaciones locales de grava y arcillas lacustres con turba, de edad reciente. Esta unidad constituye el acuífero superior del delta.

La unidad 3, estudiada aquí, corresponde al depósito de materiales marinos en ambiente prodeltaico. Su extensión espacial presenta forma de cuña cuyo máximo espesor está localizado en la línea de costa (unos 40 m), espesor que disminuye tierra adentro y hacia los márgenes para desaparecer rápidamente hacia el N y S, y lentamente hacia el NO, donde llega hasta unos 15 km aguas arriba del curso fluvial.

Las características de la hidrología y de la dinámica litoral han sido estudiadas ampliamente por varios autores (MOP, 1966; Giresse, 1970).

CARACTERÍSTICAS SEDIMENTOLÓGICAS DE LA UNIDAD PRODELTAICA

Se han estudiado muestras de la unidad prodeltaica holocena procedentes de 14 sondeos que la atraviesan en su totalidad. De ellos, 9 fueron realizados entre 1969 y 1975, y el resto lo fueron durante 1985, obteniéndose en ambos casos testigos contenidos en camisas de PVC de 62 mm de diámetro.

Las técnicas de estudio que se han aplicado a estas muestras son:

- Análisis granulométrico de las fracciones gruesa y fina.
- Difracción de Rayos X de la fracción arcilla.
- Determinación del contenido en CO_3Ca mediante calcimetría.
- Observación de las estructuras sedimentarias mediante radiografía.
- Observación del contenido faunístico y de su variación mediante binocular.
- Determinación del contenido y características del polen en muestras seleccionadas.
- Datación isotópica mediante ^{14}C en fragmentos de carbón en uno de los sondeos.
- Análisis químico e isotópico (Tritio) del agua intersticial de los limos en todos los sondeos.

Ambientes sedimentarios y facies

La comparación de los resultados obtenidos de estos análisis con los proporcionados por muestras del prodelta actual del Llobregat (Serra y Verdguer, 1983 y com.

pers.) ha permitido comprobar la existencia de una total similitud de ambientes sedimentarios entre ambos (Manzano, 1986). Los sub-ambientes identificados son:

Prodelta proximal. Caracterizado por las facies más arenosas (entre 20 y 25% de arena), con contenidos medios en CO_3Ca de 28% y contenido en fauna abundante aunque con pequeño número de especies. Abundan los fragmentos de macrofauna (bivalvos y gasterópodos) y los restos vegetales de gran tamaño y bien conservados. Sus muestras se sitúan preferentemente en los sectores VII y VI del diagrama CM de Passega aunque algunas aparecen en el sector III, denotando el predominio de procesos sedimentarios de alta energía (fig. 2, muestras 3, 4 y 5, sondeo C1; muestra 1, sondeo B5; muestra 4, sondeo A7').

Prodelta medio y medio-distal. Ambos tipos de ambientes se han diferenciado entre sí únicamente mediante la identificación de facies más distales a través de radiografías. Estas se caracterizan por la práctica ausencia de estructuras sedimentarias, salvo débiles laminaciones horizontales de espesor milimétrico y carácter local. Ningún otro parámetro las diferencia bien de las facies de prodelta medio, tratándose probablemente de las partículas decantadas en las partes más distales de éste.

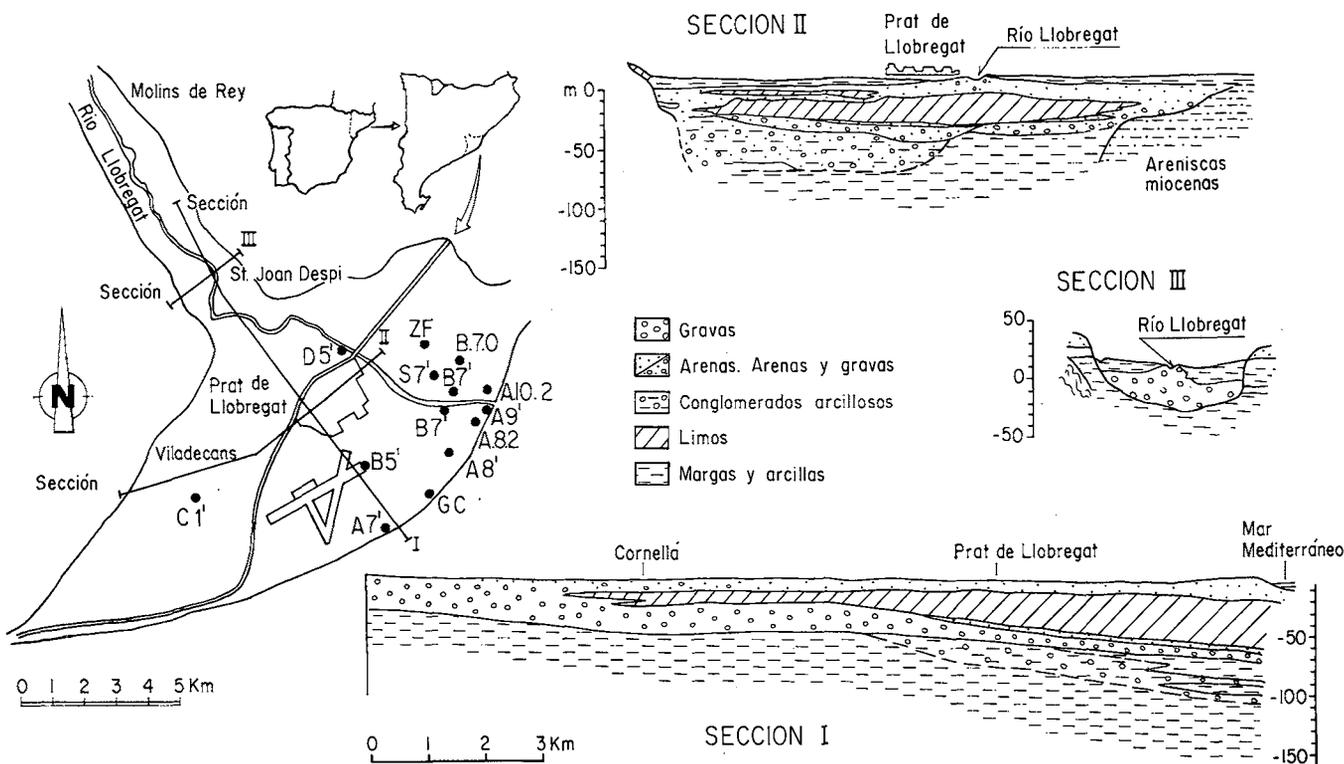


Figura 1. — Situación y geología del delta del Llobregat. Localización de los sondeos estudiados.

Figure 1. — Situation and geology of the Llobregat delta. Location of the studied cores.

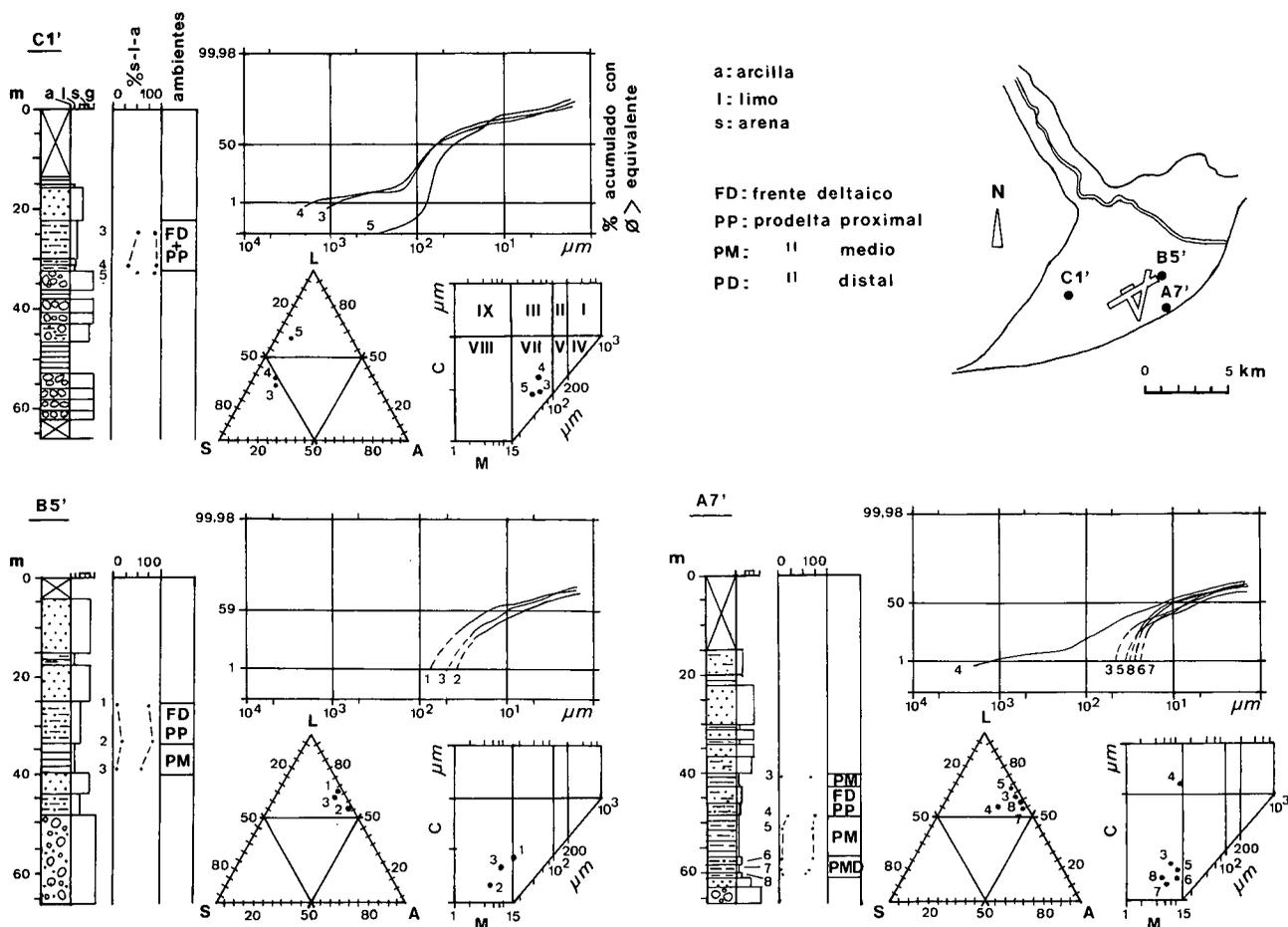


Figura 2. — Características granulométricas de las facies prodeltaicas.

Figure 2. — Granulometric features of the prodeltaic facies.

Las facies de prodelta medio y medio-distal son poco arenosas (menos de un 10% de arena) y muy arcillosas (36% de contenido medio en arcilla); tienen un contenido medio en carbonato cálcico del 24% y el número de especies faunísticas e individuos es mucho mayor que en el prodelta proximal. Abundan los fragmentos vegetales de pequeño tamaño que en muchos casos se hallan piritizados, al igual que ocurre con numerosos foraminíferos y ostrácodos. Es característica del prodelta medio la textura vacuolar originada por la formación de gases de degradación de la materia orgánica. Las muestras de ambos subambientes se sitúan en los sectores VIII, VII y VI del diagrama CM, aunque existe cierta tendencia, entre las muestras estudiadas, a encontrar en el sector VIII las muestras identificadas como más distales (fig. 2, muestras 2 y 3, sondeo B5; muestras 3, 5, 6, 7 y 8, sondeo A7').

Los sondeos más cercanos a la costa muestran alternancias de facies de prodelta medio-distal y prodelta proximal, como se observa en el sondeo A7' (fig. 2). En

cambio, tierra adentro y hacia los márgenes de la cuña, las facies se hacen más proximales apareciendo alternancias de proximales y medias hacia la mitad del delta (sondeo B5' de la fig. 2) y de muy proximales y de frente deltaico hacia los extremos (sondeo C1' de la fig. 2), o incluso de abanicos aluviales de procedencia lateral interdigitados con el cuerpo deltaico principal (caso del sondeo C1').

Mineralogía de la fracción arcilla

El estudio de la mineralogía de las arcillas por difracción de Rayos X, siguiendo el método de Biscaye (1964), ha proporcionado resultados muy homogéneos, sin presentar variaciones tendenciales significativas tanto en sentido vertical como horizontal (tabla 1).

El componente arcilloso principal es el mineral illita, presente entre un 78% y un 82% en todas las muestras. Le siguen, en proporciones muy semejantes entre sí situadas entre un 7% y un 12%, los minerales clorita y caolinita.

TABLA 1. — Mineralogía de la fracción arcilla de la unidad prodeltaica. Cuantificación realizada en base a las líneas de difracción de la cara (001).

TABLE 1. — Mineralogy of the clay fraction of the prodeltaic unit. Quantification has been done with the diffraction lines of the (001) face.

SONDEO	COTA (m)	ILLITA %	CLORITA %	CAOLINITA %
A7'	22,5	80	11	9
	33,6	82	10	8
	41,1	80	11	9
	48,9	80	10	10
	51,4	84	9	7
	57,6	80	11	7
	59,7	82	9	9
GC	60,6	82	9	9
	20,1	77	12	10
	24	79	11	10
	28,1	84	9	7
	35,2	81	10	9
	39,9	81	10	9
	46	78	11	11
A8	49,5	79	12	10
	52,1	78		10
	24,1	79	11	10
	26,6	82	9	8
	49,2	85	8	7
A9'	54	80	12	8
	62,8	80	12	8
	22,5	78	12	10
	24,5	75	13	12
	34,7	73	13	14
A.10.2	42	79	11	19
	49,7	79	12	9
	15,5	63	19	17
	54,8	80	10	10
B5'	56	78	10	12
	58,25	73	14	13
	15,5	78	11	11
	25,4	83	9	8
	32,9	84	10	10
	38,4	79	8	8
B7	44,2	84	11	10
	48	8	8	8
B7'	31,3	83	9	8
	56,8	78	8	12
	39,3	82	9	8
S7'	44,8	79	11	10
	48,4	85	8	7
	13,5	76	12	12
	25	78	12	10
	44,7	82	10	8
S7'	52	72	16	12
	61	81	10	9
	64	83	10	7

nita. La presencia de montmorillonita y demás minerales hinchables es mínima, estando situada en todos los casos por debajo de un 5% del total de minerales arcillosos.

Resultados del análisis palinológico

De las muestras seleccionadas para el estudio del polen sólo 4 han dado resultados positivos. Son las siguientes:

- Sondeo D5', muestra a —18,5 m: aparecen pocos granos y deteriorados, todos ellos de *Pinus*, principalmente *P. tipo sylvestris* y alguno de *Abies*.
- Sondeo D5', muestra a —27,05 m: también hay pocos granos, todos de *Pinus* tipo *sylvestris* salvo uno de *Rosaceae*.
- Sondeo B7, muestra a —47,4 m: abundantes restos vegetales, tanto tejidos como polen y esporas. Estos dos constituyen un 83% del total correspondiendo un 70% a *Pinus* tipo *sylvestris* y un 4% a *Abies*. Abundan también los granos de angiospermas (*Rosaceae*, *Gramineae* y *Polygonaceae*) y los quistes de algas dinofíceas (*Spiniferites*, *Spiniferites mirabilis*, *Operculodinium israelianum* y *Hemicystodinium zoharyi*). Todos están bien conservados y corresponden a depósitos algo alejados de la línea de costa. Las condiciones climáticas que sugieren son parecidas a las actuales.
- Sondeo B7, muestra —54 m: también abundan los restos vegetales. Polen y esporas constituyen un 84% de ellos, correspondiendo un 66% a *Pinus sylvestris* y un 14% a *Abies*. Las angiospermas encontradas son *Rosaceae* y *Liliaceae*. *Asphodelus* y los quistes de dinofíceas corresponden a *Spiniferites ramosus*, *Spiniferites membranaceous* y *Lingulodinium machaerophorum*. La conservación de todos ellos es también buena. El aumento del porcentaje de *Abies* sugiere un clima más frío que el de la muestra anterior.

Resultados de la datación con ¹⁴C

Se dispone de una datación en la que se ha determinado la edad de unos fragmentos de carbón diseminados en unos 10 cm de testigo del sondeo S7', situados entre —34,1 y —34,2 m de profundidad. Las determinaciones han dado como resultado una edad de 2300 ± 1200 años de antigüedad para dicha muestra. Considerando que la muestra datada se halla a 14 m por debajo del techo de la unidad prodeltaica, la tasa mínima (sin considerar otros factores, como la compactación) de sedimentación de estos 14 m, estaría entre 127 y 40 cm/100 años.

HIDROQUÍMICA DE LA UNIDAD PRODELTAICA

Las unidades 2 y 4 constituyen magníficos acuíferos aunque ambos se encuentran afectados por problemas de intrusión marina, especialmente grave en el caso del acuífero inferior (unidad 2). La unidad 3, objeto del presente estudio, constituye un acuitardo situado entre ambos acuíferos y actúa de nivel confinante sobre el profundo, dificultando la comunicación hidráulica entre ambos debido a su pequeña permeabilidad vertical, del orden de 10^{-5} m/día (Peláez, 1983).

La composición del agua intersticial de esta unidad ha sido estudiada por primera vez por Peláez (1983), y lo está siendo en la actualidad por el primero de los firmantes de este trabajo. Los métodos de estudio difieren en ambos casos, ya que en el primer estudio se utilizó el método de dilución y en el presente se está utilizando el de compactación con cámara de aire. No obstante, los resultados obtenidos por ambos métodos son comparables, si bien el método de dilución aumenta notablemente las concentraciones de algunos iones al forzar la dilución de pequeñas partículas sólidas.

Los resultados obtenidos permiten afirmar el carácter marino congénito del agua intersticial de los limos prodeltaicos estudiados. Las altas concentraciones en Cl^- (fig. 3) y Na^+ , comparables a las del agua del mar en la zona, sólo se pueden explicar mediante el paso de agua marina a través de alguno de los acuíferos o, mediante la suposición del origen sinsedimentario de dicha agua. El primer supuesto se desecha rápidamente por las siguientes razones:

— Por un lado, si el agua procediese del acuífero profundo sería menos salina de lo que es por efecto de dilución, ya que las máximas concentraciones de Cl^- en éste no llegan a 13.000 mg/l.

— Por otro, si procediese del acuífero superficial contendría más actividad de Tritio por ser sus aguas más recientes, mientras que las actividades medidas en el agua intersticial de los limos son pequeñas, estando incluso por debajo de los mínimos detectables, lo cual asegura un largo tiempo de permanencia para estas aguas (Peláez, 1983).

A pesar de la baja permeabilidad vertical de la unidad, parece que ha existido un cierto lavado o dilución de su tramo inferior por paso de agua más dulce del acuífero infrayacente. Esta dilución se pone de manifiesto por la variación vertical de las concentraciones en Cl^- , las cuales decrecen con la profundidad en la columna de limos hasta alcanzar valores semejantes a los hallados en las aguas del acuífero inferior.

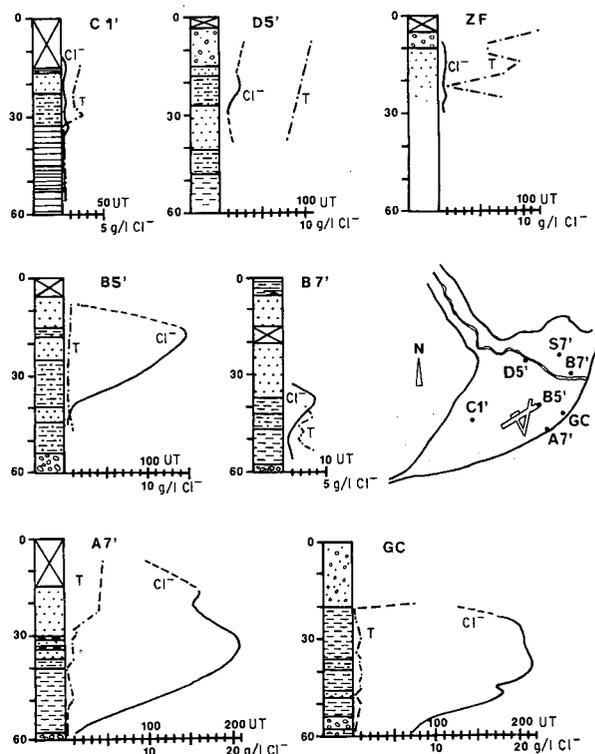


Figura 3. — Evolución vertical del contenido en Cl^- y tritio del agua intersticial de los limos en varios sondeos representativos.

Figure 3. — Vertical evolution of the Cl^- and tritium contents of the pore water of silty unit in some representative cores.

El lavado se ha debido producir a lo largo de un extenso período de tiempo, como respuesta al hecho de existir, hasta antes de 1950, un gradiente piezométrico entre ambos acuíferos favorable al flujo vertical ascendente (MOP, 1966; Custodio *et al.*, 1971; Custodio, 1981). Dados los bajos valores de permeabilidad de la unidad, el paso de agua dulce desde el acuífero inferior se ha debido producir por difusión molecular más que por dispersión mecánica.

La dilución ha sido casi total en las zonas marginales de la unidad de limos, donde la heterogeneidad de los materiales proporciona un incremento de la permeabilidad (sondeos C1', D5' y ZF de la fig. 3). En el centro del delta, donde la permeabilidad es menor, la dilución es más restringida (sondeos B5' y B7'). Por último, cerca de la costa, donde la permeabilidad alcanza sus valores menos elevados, la dilución es casi nula (sondeos A7' y GC) y está localizada en la base de la unidad.

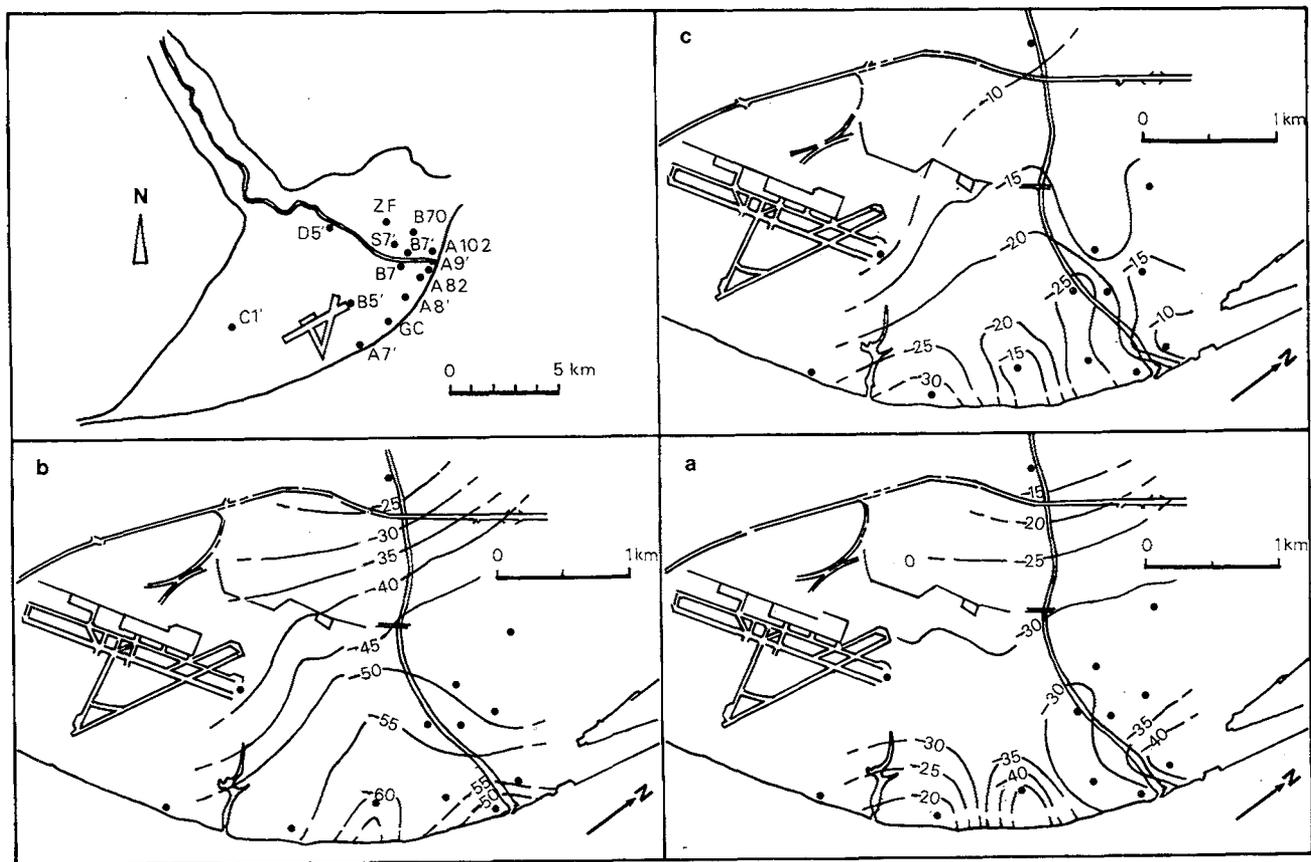


Figura 4. — a) Isobatas del techo de la unidad prodeltaica. b) Isobatas del muro de la unidad prodeltaica. c) Isopacas de la unidad prodeltaica.
 Figure 4. — a) Isobaths of the bottom of the prodeltaic unit. b) Isobaths of the top of the prodeltaic unit. c) Isopachs of the prodeltaic unit.

GEOMETRÍA DE LOS LÍMITES VERTICALES DE LA UNIDAD

La superficie del techo de la unidad de los limos presenta una configuración suavemente inclinada hacia la parte externa del delta, donde se localizan pequeñas depresiones, posiblemente correspondientes a antiguos cauces (fig. 4c). Dos de ellos dan lugar a sendos lóbulos deltaicos cuyas barras de desembocadura están bien delimitadas en la línea de costa, a ambos lados del sondeo GC, en el cual, el techo de los limos se halla a menos de 35 m de profundidad (fig. 4c).

La superficie de la base de la unidad se hunde progresivamente hacia el mar, aunque en la línea de costa el sustrato se eleva localmente en los sondeos GC y A9', provocando una ondulación marcada de la base de los limos que delimita un surco entre ambos sondeos, el cual se halla a -65 m (fig. 4b).

El espesor de la unidad crece gradualmente desde los márgenes de la cuña de limos hacia el mar, salvo en el caso del margen nororiental, donde disminuye bruscamente de espesor hasta casi desaparecer en una distancia de apenas 500 m. El máximo espesor de la unidad se encuentra en el sondeo GC, donde aparecen cerca de 40 m de espesor de limos. A ambos lados de éste el espesor disminuye cerca de 20 m, al ser erosionados los limos por los paleocauces antes mencionados (fig. 4a).

CONCLUSIONES

Las principales conclusiones que se derivan del presente estudio son las siguientes:

- 1) Existe una total similitud entre las facies y ambientes deposicionales en los sedimentos prodeltaicos actuales del Llobregat (descritos en trabajos anteriores) y los

subactuales aquí estudiados, habiéndose identificado en estos niveles de prodelta proximal, prodelta medio y prodelta medio-distal.

2) La mineralogía de la fracción arcilla de la unidad estudiada es bastante homogénea y no parece mostrar ninguna tendencia evolutiva en sentido vertical u horizontal. Esta homogeneidad podría explicarse por la constancia de las condiciones de aporte y deposicionales del medio, durante la formación de la unidad.

3) El método de compactación utilizado para extraer el agua intersticial de los limos se muestra más apropiado que el de dilución, el cual parece favorecer ciertos procesos físico-químicos que incrementan la concentración de algunos iones en el agua.

4) La composición química de este agua indica que su origen es marino y sinsedimentario, hallándose en la actualidad diluida verticalmente por haber sufrido un proceso de mezcla con agua más dulce procedente del acuífero inferior. Este proceso ocurrió en una época anterior a la actual, por existir un gradiente hidráulico favorable al mismo. El proceso de dilución ha sido menor en la costa que tierra adentro, condicionado por las variaciones texturales y de la permeabilidad de los materiales.

5) La unidad se dispone en forma de cuña que disminuye lentamente de espesor hacia sus márgenes, salvo en lo que concierne al margen izquierdo donde el espesor disminuye bruscamente hasta hacer desaparecer la unidad en una corta distancia, al entrar ésta en contacto con un potente nivel de arenas. La mayor competencia de éstas, impidió el depósito de la unidad de limos en la zona situada al pie del macizo de Montjuic.

6) Los datos palinológicos no proporcionan, en este caso, gran información, pues al corresponder las muestras a distintos sondeos y no disponer de dataciones absolutas de las mismas, no podemos establecer la evolución paleoclimática durante el depósito de la unidad de limos.

7) Los altos valores de sedimentación deducidos por datación isotópica, deben ser considerados como una aproximación ya que no se han tenido en cuenta factores como la compactación de los limos o el depósito de la unidad superior de arenas, ocurrido dentro del intervalo de tiempo considerado para el cálculo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la ayuda prestada para la realización de este estudio a las siguientes personas y entidades: al Dr. Emilio Custodio, de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, que ha impulsado su realización; a la Dra. Núria Solé, del Departamento de Paleontología de la Universidad de Barcelona, que ha realizado las determinaciones palinológicas; al Sr. Salvador Balagué, del Laboratorio Químico de la Confederación Hidrográfica del Pirineo Oriental, que ha realizado los análisis químicos; al Sr. Ramón Castilla, del Departamento de Estratigrafía de la Universidad de Barcelo-

na, que ha realizado gran parte de los ensayos de laboratorio; al Servei de Datació per Radiocarboni de la Facultat de Química de Barcelona que ha realizado las determinaciones de ^{14}C ; a la Confederación Hidrográfica del Pirineo Oriental y a la Sociedad General de Aguas de Barcelona, que han suministrado abundante información sobre el delta y facilitado el acceso a los sondeos aquí estudiados, y al Comité Conjunto Hispano-Norteamericano para la Cooperación Científica y Tecnológica, que ha financiado el estudio, integrándose éste en el programa por él patrocinado titulado «Integración de procesos geoquímicos y de transporte de masa y energía en los sistemas regionales de flujo de agua subterránea».

BIBLIOGRAFÍA

- BISCAYE, P.E., 1964: Distinction between chlorite and kaolinite in recent sediments by X-ray diffraction. *Amer. Mineral.*, 49: 1281-1289.
- CUSTODIO, E., 1981: Sea water encroachment in the Llobregat and Besós areas, near Barcelona (Catalonia, Spain): Intruded and Relict Groundwater of Marine Origin. *Proc. VII Salt Water Intrusion Meeting, SWIM 81*. Upsala p. 120-152.
- CUSTODIO, E.; BAYO, A. y PELÁEZ, M.D., 1971: Geoquímica y datación de aguas para el estudio del movimiento de las aguas subterráneas en el delta del Llobregat (Barcelona). *I Congreso Hispano-Luso-Americano de Geología Económica*. Sección 6. Madrid. pp. 51-80.
- GRESSE, P., 1970: Les limites de la province sédimentaire littorale du delta du Llobregat, *Cahiers Océanographiques*, 22:581-612.
- MANZANO, M., 1966: *Estudio sedimentológico del prodelta holoceno del Llobregat*. Tesis de licenciatura. Facultad de Geología de la Universidad de Barcelona.
- MARQUÉS, M.A., 1984: Les formacions quaternàries del delta del Llobregat. *Publ. de l'Inst. d'Estudis Catalans*, Barcelona 1984.
- M.O.P. 1966: Estudio de los recursos Hidráulicos totales de las cuencas de los ríos Besós y bajo Llobregat. *Comisaría de Aguas del Pirineo Oriental y Servicio Geológico de Obras Públicas*, 4 vol. Barcelona.
- PELAEZ, M.D., 1983: *Hidrodinámica en formaciones semipermeables a partir de la composición química y radioisotópica del agua intersticial: aplicación a los limos intermedios del delta del Llobregat*. Tesis doctoral. Facultad de Física. Universidad de Barcelona. Mayo de 1983.
- SERRA, J. y VERDAGUER, A., 1983: La sedimentación holocena en el prodelta del Llobregat. *X Congreso Nacional de Sedimentología*. Mahón, septiembre de 1983.
- SOLÉ SABARÍS, L., 1961: Algunes precisions sobre les oscil·lacions climàtiques quaternàries a les costes catalanes i balears. *Miscel·lania Fontseré*, pp. 399-427. Ed. Gustavo Gili, Barcelona.
- SOLÉ SABARÍS, L., 1963: Ensayo de interpretación del Cuaternario barcelonés. *Miscel·lania Barcinonensis*, tomo II, pp. 8-54, Barcelona.
- SOLÉ SABARÍS, L.; VIRGILI, C. y ZAMARREÑO, I., (1957): Las terrazas del río Llobregat. *V Congreso Internacional INQUA*, Resúmenes des Communications, pp. 177-178, Barcelona.