PAPEL DE LA SEDIMENTACION ESTUARINA EN EL INTERCAMBIO SEDIMENTARIO ENTRE EL CONTINENTE Y EL LITORAL: EL ESTUARIO DEL RÍO GUADIANA (SO DE ESPAÑA-PORTUGAL)

J.A. Morales, F. Ruiz e I. Jiménez

Dpto. de Geología, Universidad de Huelva, Facultad de Ciencias Experimentales, 21819 Palos de la Frontera, Huelva.

Resumen: El análisis de los sedimentos del estuario del Río Guadiana (granulometría, mineralogía, geoquímica y contenido orgánico) permite diferenciar entre una sedimentación de procedencia fluvio-marina, favorecida por la acción de las mareas, y una sedimentación autóctona del propio estuario inducida por los procesos de mezcla de aguas. En conjunto, el transporte neto de sedimentos tiene lugar hacia el mar debido a la asimetría en ese sentido de las corrientes mareales. La sedimentación autóctona y los aportes fluviales extremos que la marea no puede retrabajar se preservan en los márgenes convexos de los meandros, con una energía mareal baja. Adquieren morfología de barras mareales laterales, ya que la estrechez del canal no permite la aparición de barras longitudinales, como sería esperable en sistemas dominados por la marea. Al mismo tiempo, las zonas de mayor energía mareal (zonas más profundas del canal) se convierten en canales de *bypassing*, donde los materiales floculados no logran permanecer en el fondo. Este tránsito sedimentario de los materiales fluviales hacia la costa se produce en dos fases: en primer lugar, durante el flujo mareal, el río deposita su carga sedimentaria en la zona superior del estuario medio, al reducirse bruscamente la velocidad en la confluencia entre la corriente de flujo mareal y la corriente fluvial. Posteriormente, durante el reflujo mareal, se produce el retrabajado de la fracción arenosa de estos sedimentos hacia la costa, donde llegan después de varios ciclos mareales y se mezclan con sedimentos marinos que el flujo mareal introduce en el estuario. Estos fenómenos son contrastados por la distribución de la microfauna (foraminíferos y ostrácodos) en el estuario.

Palabras clave: Holoceno, relleno de estuario, barras mareales laterales, progradación deltaica.

Abstract: The analysis of the sediments in the Guadiana River estuary (grain size, mineralogy, geochemistry and organic carbon content) allows to distinguish two types of sedimentation: a fluvial-marine sedimentation, favoured by tidal action, and a autochtonous sedimentation related to the water mixing. The net transport of sediments is towards the sea because of the tidal current asymmetry. The autochtonous sedimentation and the extreme fluvial supply that tide are unable to rework are preserved on the meandering convexe margins with low tidal velocities. These areas acquire a lateral tidal bar morphology because the narrow geometry of the estuary inhibits the presence of longitudinal tidal bars, as may be expected in tide-dominated systems. The higher energy zones (deeper zones of the channel) become bypassing channels where the flocculated material cannot be settled on the bottom. Two stages have been differenctiated in the bypassing of fluvial materials to the coast : first, during the tidal flood, the river deposes its sedimentary load in the upper zone of the central domain, whre the river velocity decreases in the confluence between the fluvial and flood currents. In a second stage, during the ebb, the sand fractions are reworked towards the sea, where they arrive after various tidal cycles and are mixed with the marine sediments introduced by the tidal flood into the estuary. This process is constrasted by the microfaunal distribution (foraminifera and ostracods).

Key words: Holocene, estuarine infilling, lateral tidal bars, deltaic progradation.

Morales, J. A., Ruiz, F. y Jiménez, I. (1997): Papel de la sedimentacion estuarina en el intercambio sedimentario entre el continente y el litoral: El Estuario del Río Guadiana (SO de España-Portugal). *Rev. Soc. Geol. España*, 10 (3-4): 309-325.

El estudio de la sedimentación en estuarios actuales es una tarea relativamente compleja debido a la interacción entre procesos costeros (olas y mareas), procesos continentales (aporte fluvial), cantidad de sedimento disponible y estabilidad del nivel del mar. El resultado de la interacción de estos fenómenos puede dar lugar a diferentes modelos de sedimentación (Nichol y Boyd, 1993).

El estuario del río Guadiana (Fig.1) es un ejemplo de estuario en fase de progradación deltaica (avanzado estado de colmatación). Esta progradación es favorecida por una buena disponibilidad de sedimentos y un

nivel del mar estable en la actualidad (Zazo *et al.*, 1994), además de por su fisiografía: un estrecho canal encauzado sobre materiales pizarroso-cuarcíticos del Carbonífero como producto de una incisión fluvial bajo un fuerte control estructural.

Desde el punto de vista fisiográfico, la desembocadura del río Guadiana queda dividida en dos áreas bien diferenciadas (Fig. 1): a) El estuario en sentido estricto, en el que se producen los fenómenos de interacción fluvio-marina y b) el complejo progradante de la desembocadura, que presenta una morfología de delta dominado por la acción del oleaje.

Los principales agentes actuantes en el estuario son las mareas, las olas y los aportes fluviales. El sistema estuarino del Guadiana es mesomareal, con un rango medio de 2,0 m (1,22 m para Mareas Muertas Medias y 2,82 en Mareas Vivas Medias). En el interior del estuario, la onda de marea se propaga según un modelo sincrónico, generando corrientes más fuertes que las existentes en la zona externa del sistema (el flujo alcanza 0,60 m/s y el reflujo 0,75 m/s durante una Marea Viva Media). En esta zona canalizada, el reflujo (6 h 50 min) se mantiene durante bastante más tiempo que el flujo (5 h 35 min) (Morales, 1993).

Sobre este sector costero actúan generalmente olas de energía media-baja. Este oleaje incluye tanto olas atlánticas (*Swell* 48,21 % del tiempo) como olas generadas localmente (*Sea* 51,75% del tiempo). Respecto al tiempo de actuación, domina el oleaje procedente del SO (20% del tiempo), aunque sus olas ($H_{1/3}$=0,40 m, T=4,06 s) son menos energéticas que las procedentes del SE, que actúan sólo el 8% del tiempo ($H_{1/3}$=0,70 m, T=5,08 s). Esta menor energía de las olas del SO está relacionada con la inducción mayoritaria de estas olas desde el Atlántico (*Swell* del SO, 75% del tiempo). Durante los temporales de invierno (principalmente olas del SE) se producen excepcionalmente olas muy energéticas (Hmax=6m), siendo las olas significativas más altas de bastante menor tamaño (máxima $H_{1/3}$=3,80 m) (Morales, 1993). Esta dinámica del oleaje provoca una fuerte deriva litoral en el sentido O-E, cuyos valores de transporte potencial varían según los autores entre los 180x10^3 m^3/año (Cuena, 1991) y los 300x10^3 m^3/año (CEEPYC, 1979).

El régimen hídrico del río Guadiana presenta un acusado carácter estacional además de una marcada irregularidad interanual. En condiciones de descarga fluvial media, se comporta como un estuario bien estratificado, diferenciándose tres sectores (Fig. 1): Estuario Fluvial, Estuario Medio y Estuario Marino, en función de su salinidad (Ruiz *et al.*, 1996). Teniendo en cuenta además que se trata de un medio fuertemente influenciado por la marea, pueden distinguirse diferentes submedios en función de los niveles de exposición y sumersión mareales: a) el canal estuarino submareal, b) los bordes intermareales del canal, que aparecen sólo en el sector marino, y c) las marismas saladas vegetadas, que se transforman en cañaverales hacia el estuario fluvial.

La mayor parte del aporte arenoso tiene lugar de forma puntual. Esto implica que, en periodos de descarga media, la marea puede retrabajar y transportar hacia el mar la totalidad de los sedimentos aportados por el río. Sin embargo, en los momentos de descarga máxima instantánea, gran parte del sedimento arenoso puede quedar en el interior del estuario. No existen datos sobre la aportación sólida del Guadiana, aunque existe una estimación de la aportación para los últimos 44 años (57,90 x 104 m^3/año de aporte en suspensión y 43,96 x 104 m^3/año de aporte en carga de fondo) (Morales, 1993). Estos datos son exclusivamente orientativos, ya que la cuenca de drenaje del Río Guadiana ha sufrido un gran represamiento desde la década de los 60, con más de 40 embalses que regulan alrededor del 75% de la superficie de drenaje. Este hecho ha debido suponer una importante disminución en el volumen de sedimento aportado por el río al estuario.

El objetivo de este trabajo es la determinación del papel que juega en la actualidad el estuario del río Guadiana como paso intermedio en el tránsito sedimentario entre el continente y la plataforma, en base al estudio de: a) la composición granulométrica, b) la composición mineralógica, c) la composición geoquímica, d) el contenido en materia orgánica y e) el contenido faunístico.

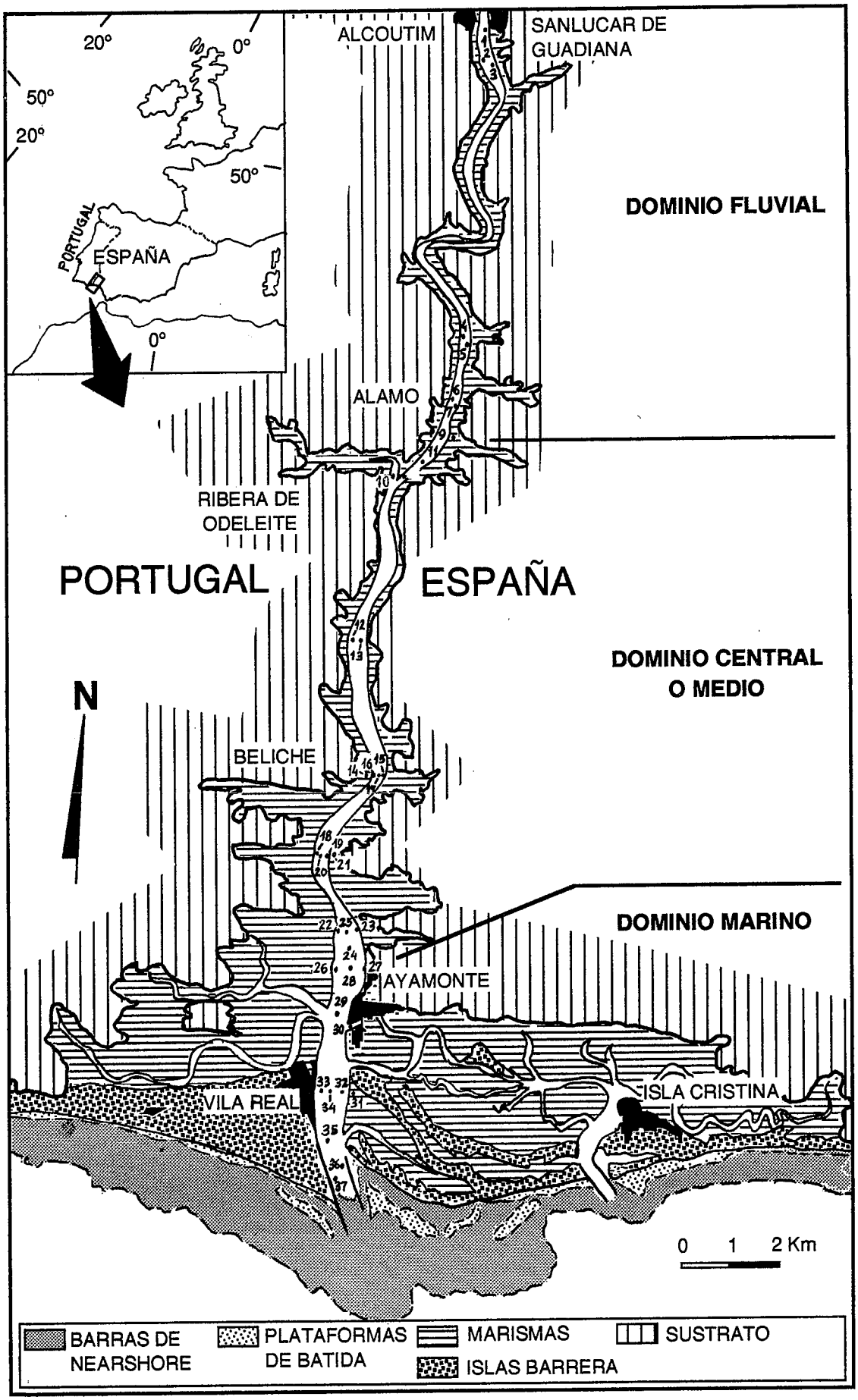
Metodología

Muestreo

En Marzo de 1991, se recogieron un total de 37 muestras distribuidas longitudinalmente en el estuario, con representación de los tres sectores distinguidos y sus diferentes submedios sedimentarios (canal estuarino submareal, borde de canal y marisma salada). Las muestras de marisma alta y bordes de canal activo se tomaron de los 3 cm más superficiales del sedimento con una pequeña pala, en tanto que las muestras del fondo de los canales submareales fueron obtenidas con una draga de fondo tipo Van Veen, marca EIJKELKAMP, modelo 04.30. En todos los casos las muestras se conservaron en bolsas de plástico con autocierre en el interior de un congelador a -20°C hasta el momento de su análisis.

Granulometría

- Levigado con un tamiz de 63 micras de luz (4 unidades ø), que permite separar las fracciones arena y lutita.
- La fracción superior a 63 micras ha sido analizada por tamizaje convencional, mientras que la fracción inferior ha sido analizada en un contador de partículas Coulter, modelo ZM con un tubo de apertura de 100 micras y un rango de análisis entre 70 y 2 micras. El análisis granulométrico completo permite agrupar las muestras en diferentes «tipos» de distribución textural.
- Representación en histogramas de frecuencia y curvas acumuladas de las distribuciones de tamaño de grano. Se han obtenido sobre éstas últimas algunos



ura 1.- Localización del área estudiada, con indicación de los sectores estuarinos distinguidos y la situación de las muestras analizadas.

parámetros estadísticos significativos (Folk y Ward, 1957: Centil, mediana, media gráfica, desviación standard -σ-, selección -So-, asimetría gráfica -Ski- y angulosidad de la distribución o Kurtosis -Kg-).

Los parámetros estudiados han sido enfrentados en diagramas bivariados, al objeto de realizar consideraciones sobre posibles tendencias poblacionales. Son los siguientes:

-Diagrama C-M de Passega (1964), que compara energía máxima instantánea y energía media del sistema, deduciendo el tipo de transporte dominante que ha sufrido el material.

-Diagramas de comparación del valor central de la muestra con valores de dispersión y selección (σ-Mz y So-Mz) o con valores de simetría (Ski-Mz).

- Se efectuan algunas observaciones sobre la clasificación del sedimento, a partir de la representación de los caracteres granulométricos en el diagrama propuesto por Pejrüp (1988) para la clasificación de sedimentos estuarinos.

Mineralogía

Se han seleccionado 7 muestras, distribuidas longitudinalmente en el estuario y con representación de todos los sectores y submedios sedimentarios distinguidos. En primer lugar, se han identificado los minerales mayoritarios y principales accesorios, analizando su estado de alteración química y desgaste físico, mediante el estudio en lámina delgada de la fracción granulométrica comprendida entre 2 μm y 63 μm, utilizándose para ello un microscopio de luz transmitida y reflejada. Posteriormente, se ha procedido a la separación densimétrica de los minerales pesados, efectuándose su identificación en lupa binocular.

Geoquímica

Para caracterizar geoquímicamente los sedimentos superficiales han sido analizadas un total de 8 muestras, seleccionadas según los criterios ya expuestos en apartados anteriores. Se han analizado los elementos mayoritarios (en forma de óxidos expresados en tanto por ciento) y 15 elementos minoritarios (expresados en ppm) en los laboratorios X- Ray Assay (XRAL) de Toronto (Canadá), mediante Espectrometría por Fluorescencia de Rayos X.

A partir de los datos obtenidos, se ha construido la matriz de correlación entre las series de contenidos totales. Su estudio permite establecer grupos de elementos con altos coeficientes de correlación entre sí.

Contenido orgánico

El análisis del contenido en materia orgánica se ha realizado en todas las muestras siguiendo la marcha analítica propuesta por Courau (1983).

Para minimizar el efecto del tamaño de grano en las proporciones obtenidas, se propone la utilización de un diagrama triangular, cuyos vértices son el porcentaje de la fracción arena, el porcentaje de materia orgánica y el porcentaje de lutita inorgánica. Cada muestra queda representada por un punto cuya proximidad al primero de los vértices es indicativa de la cercanía a una fuente de aporte arenoso (fluvial o marina), de modo semejante al diagrama propuesto por Pejrüp (1988). La relación entre lutita orgánica e inorgánica, representada por la pendiente de la recta que une el punto en cuestión con el vértice de arena es, de esta forma, un índice del contenido orgánico de la muestra.

Microfauna

Se seleccionaron 32 muestras para el análisis micropaleontológico (foraminíferos y ostrácodos) de la fracción superior a 63 μm. La determinación de la biocenosis se realizó por tinción (método de Walton, 1952) y de acuerdo con los criterios empleados por Kilenyi (1969).

Resultados

Estudio de poblaciones granulométricas

Los resultados de las distribuciones granulométricas quedan recogidos en la Tabla I. Se consideran limos arrastrados mecanicamente los tamaños entre 63 y 16 μm y flóculas los inferiores a 16 μm, según los criterios de Pejrüp (1988). En función de la distribución poblacional de los tamaños de grano se han distinguido los siguientes tipos de distribuciones granulométricas (Fig. 2):

Canal Submareal

CS-1: Dominan las fracciones inferiores a 6 unidades ø (limos muy finos y arcillas), procedentes de los procesos de floculación. Son también abundantes las arenas muy finas y las fracciones limosas superiores, indicativas de un importante transporte en suspensión. No aparecen las fracciones más groseras (superiores a 2 unidades ø). Las muestras que presentan este tipo de distribución se localizan en las zonas más someras del Estuario Medio (Ribera de Odeleite) (Fig. 3).

CS-2: También dominan las fracciones inferiores a 6 unidades (dominio de la floculación). Desaparecen los limos gruesos y se observan bajos porcentajes de todas las fracciones arenosas. Esta distribución es característica de las muestras tomadas en las zonas más someras del canal en los sectores Medio y Marino del estuario

CS-3: Aparecen tanto fracciones procedentes del transporte en saltación y en suspensión, como fracciones inferiores a 6 unidades ø. A diferencia del tipo CS-2, predominan las fracciones arenosas, representadas casi exclusivamente por un único tamaño de grano (entre 3 y 4ø). La situación geográfica de las muestras con este tipo de distribución es similar a la de las muestras que presentan distribuciones de tipo CS-2, ocupando zonas algo más profundas en el canal submareal.

CS-4: Son arenas muy bien clasificadas, compuestas casi exclusivamente por arenas de un tamaño de grano de entre 1 y 2 ø. Las muestras con este tipo de distribución se sitúan en la más zona profunda del canal del

MUESTRA	SUBMEDIO	ARENA	LIMO	ARCILLA	LIMO MEC.	FLOCULAS
1	bf	88,91	9,40	1,69	3,68	7,41
2	c	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	c	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	c	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	c	99,60	0,40	0,00	0,40	0,00
6	c	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	c	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	c	0,89	97,67	1,45	46,12	53,00
9	bc	1,09	94,29	4,62	48,56	50,35
10	c	8,50	83,95	7,55	30,22	61,28
11	c	88,05	9,24	2,70	1,99	9,95
12	c	87,64	10,90	1,46	5,17	7,19
13	c	99,68	0,32	0,00	0,32	0,00
14	bc	17,91	80,38	1,71	70,46	11,62
15	c	22,59	74,43	2,97	33,63	43,78
16	ms	24,93	70,14	4,93	33,28	41,79
17	c	42,99	41,86	15,16	2,91	54,10
18	c	84,06	13,31	2,63	6,54	9,41
19	bc	20,09	76,94	2,97	48,98	30,93
20	c	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	ms	2,53	94,30	3,17	43,73	53,75
22	bc	52,42	37,21	10,37	6,41	41,17
23	bc	69,67	27,38	2,95	12,98	17,35
24	c	57,99	31,21	10,80	2,27	39,74
25	c	18,93	64,90	16,17	5,67	75,40
26	c	86,95	10,15	2,90	1,43	11,62
27	bc	11,81	84,18	4,01	50,62	37,57
28	c	99,51	0,49	0,00	0,49	0,00
29	c	99,64	0,36	0,00	0,36	0,00
31	ms	99,96	0,04	0,00	0,04	0,00
32	bc	59,29	31,10	9,61	4,46	36,25
33	c	98,99	1,01	0,00	1,01	0,00
34	c	79,08	17,52	3,39	7,12	13,80
35	c	99,91	0,09	0,00	0,09	0,00
36	c	23,29	62,88	13,83	9,67	67,04
37	c	99,979	0,021	0,000	0,021	0,000

c= CANAL SUBMAREAL, bc= BORDE DE CANAL, bf= BARRA FLUVIAL, ms=MARISMA.

Tabla I.- Síntesis de los resultados numéricos obtenidos de las granulometrías. Se consideran limos mecánicos los tamaños entre 63 y 16 µm y flóculas los inferiores a 16 µm (según los criterios de Pejrüp, 1988). c: canal submareal, bc: borde de canal, ms: marisma.

Estuario Marino y en sectores someros de los Estuarios Medio y Fluvial.

CS-5: Presenta una pobre clasificación, con presencia de todos los tamaños de grano y dominio de las fracciones transportadas por rodamiento, tracción y saltación (entre 3 y -5 ø).

CS-6: Son gravas con algunas arenas. Las muestras con este tipo de distribución aparecen en las zonas profundas del canal del estuario fluvial

La distribución espacial dentro del canal submareal del estuario de los tipos de distribución granulométrica (Fig. 3) permite observar la coincidencia existente entre los límites de los sectores del estuario y los cambios en la composición granulométrica de las muestras de canal.

Borde de Canal

BC-1: Su granulometría es semejante al tipo CS-1, con dominio de la fracción floculada o de los limos transportados en suspensión. Suele estar presente una fracción arenosa muy fina, también transportada en suspensión. Este tipo de distribución es típico de muestras recogidas en la zona limítrofe entre el Estuario Medio y el Estuario Marino.

BC-2: Son sedimentos muy bien clasificados, con limos muy gruesos (entre 4 y 5 unidades ø) como fracción casi exclusiva. Esta distribución ha aparecido en una sola muestra, localizada en el límite entre el Estuario Medio y el Estuario Marino.

BC-3: Las muestras con este tipo de distribución se

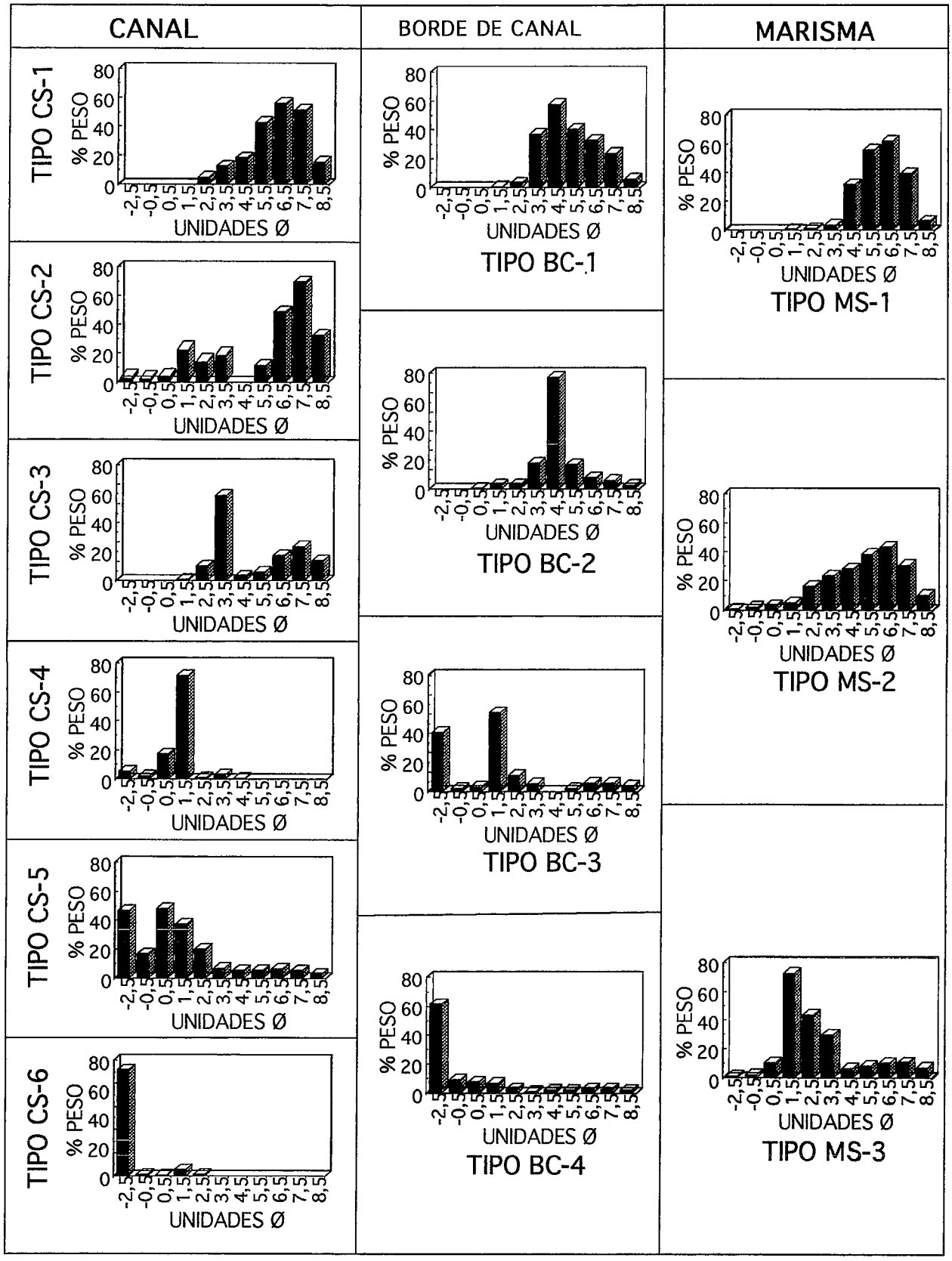


Figura 2.- Tipos de distribución granulométrica en los submedios del estuario.

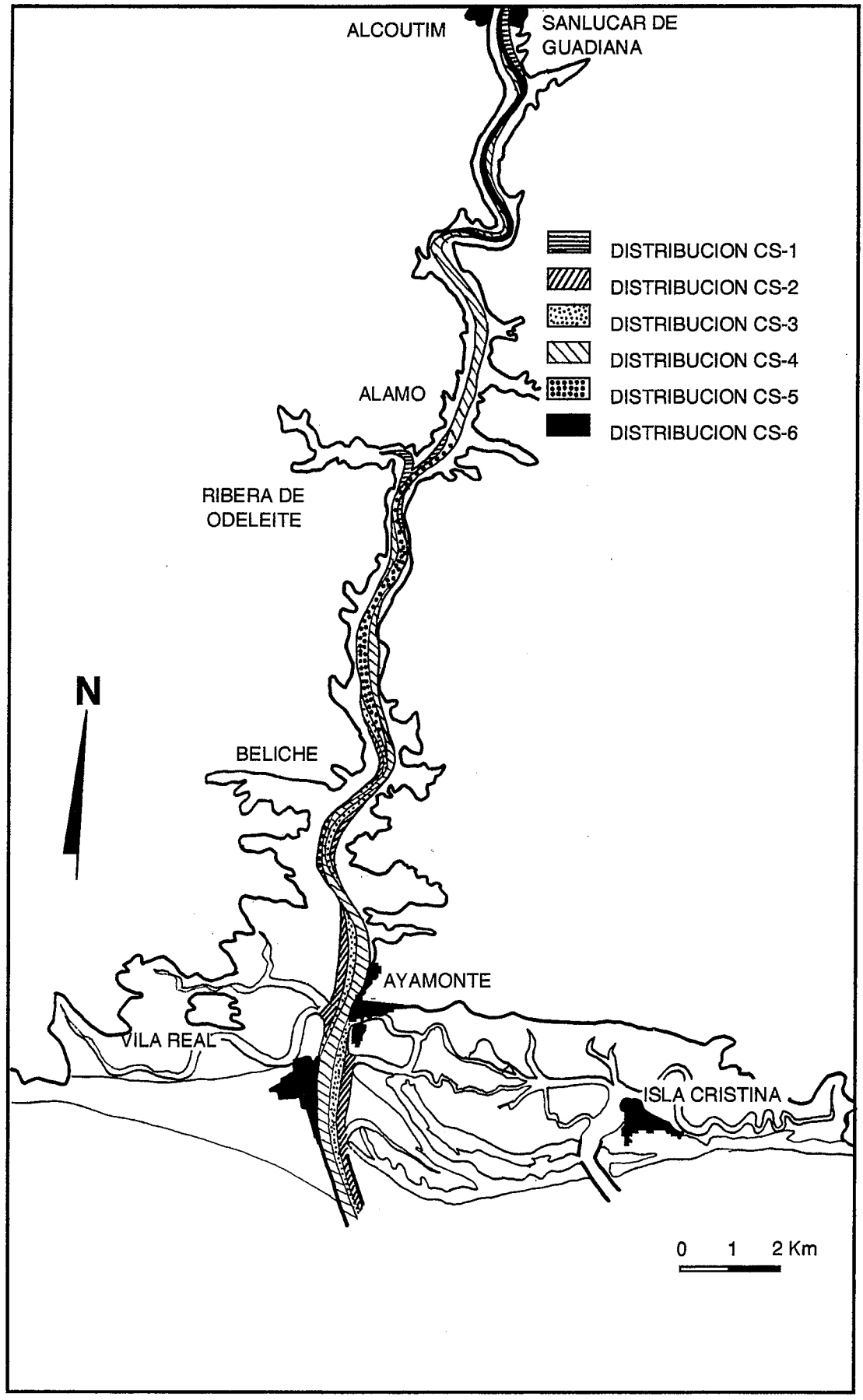


Figura 3.- Distribución espacial de las distintas distribuciones texturales en el canal submareal.

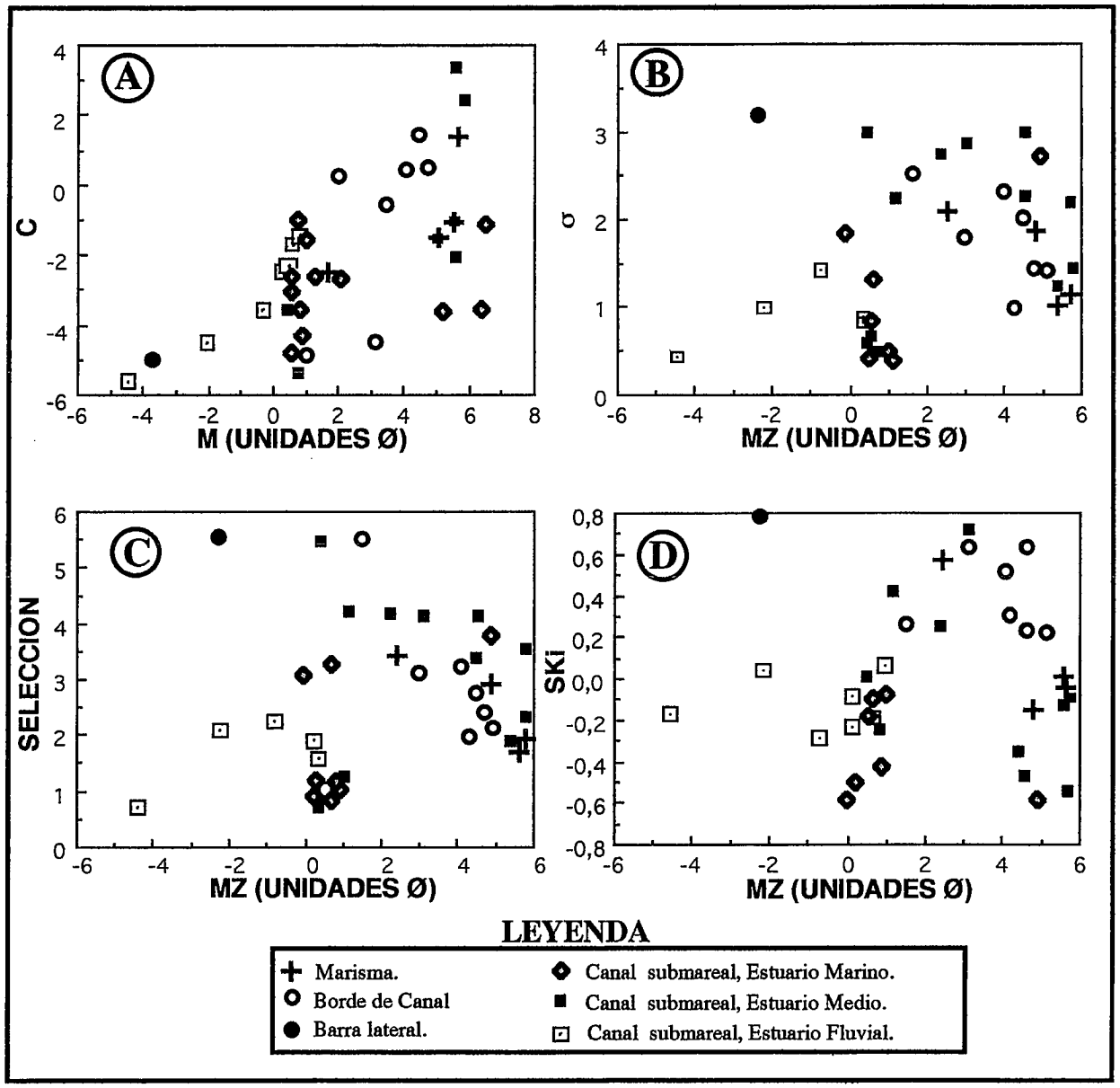


Figura 4.- Diagramas de relación de los parámetros estadísticos: A) Diagrama C-M de Passega (1964), B) diagrama de dispersión textural s-Mz, C) diagrama de clasificación textural So-Mz y D) diagrama de dispersión de simetrías Ski-Mz.

sitúan en los bordes de canal del estuario marino. Dominan las arenas medias bien clasificadas, con una fracción residual de conchas dispersas. Puede presentar ocasionalmente un pequeño porcentaje de fracción floculada.

BC-4: Aunque se ha incluido como borde de canal por su situación relativa en relación a los Niveles Críticos de Marea, corresponde a sedimentos de barras laterales de grava en el Estuario Fluvial.

Marisma Salada

Se han distinguido tres tipos diferentes de distribución, en función de la cantidad de arena que las mareas vivas son capaces de llevar hasta este submedio. En el tipo MS-1, la arena es casi ausente; es residual en el tipo MS-2 y constituye la fracción dominante (1-4 unidades ø) en el tipo MS-3. Su contenido arenoso está relacionado con la situación de la marisma dentro del estuario y no con la topografía, ya que todas las muestras están recogidas a la misma altura (por encima del nivel de Marea Alta Muerta Media).

Análisis de diagramas

El estudio de los diagramas bivariados permite diferenciar tres agrupaciones de puntos elongadas en distinto sentido (Fig. 4):

- La primera de ellas incluye las muestras del canal submareal del sector fluvial del estuario. En todos los diagramas la elongación que presenta se produce en la dirección de abcisas. Esta disposición refleja un au-

mento de la selección y de la asimetría en el sentido negativo en relación con el aumento del tamaño de grano medio.

- Una segunda nube de puntos engloba las muestras del canal submareal del sector marino del estuario, con una elongación paralela al eje de ordenadas. Se observa que todas ellas tienen un tamaño de grano medio similar (arenas gruesas) , con una pérdida de selección y aumento de la simetría en las muestras situadas hacia las zonas internas del estuario.

Estas dos nubes de puntos intersectan, de forma que las muestras más internas del estuario marino y las más externas del estuario fluvial presentan valores similares en los parámetros estudiados.

- La tercera nube de puntos abarca los sedimentos de granulometría media más fina. Incluye tanto muestras recogidas en el canal submareal del estuario medio como muestras de marisma y borde de canal de todos los sectores del estuario. En contraposición con las muestras del canal submareal del sector marino del estuario, presenta un aumento de la dispersión y la simetría, así como una disminución de la selección, al aumentar el tamaño de grano medio del sedimento.

Según el diagrama de Pejrüp (1988), un buen número de las muestras ocupan la zona II , correspondiente a una situación de «relativa calma hidrodinámica» (Fig. 5), únicamente las muestras de canal y borde de canal del estuario medio ocupan la zona I, interpretada como de «calma total» y correspondiente al dominio de los procesos de floculación en la zona de mezla de aguas dulce y salada. Este resultado es coherente con las observaciones realizadas en los diagramas bivariados.

Composición mineralógica del sedimento

Los componentes mineralógicos reconocidos pueden observarse en la Tabla II, en la que se muestran sus contenidos semicuantitativos. Domina la asociación Fragmentos de Rocas - cuarzo - feldespato potásico - plagioclasa. Debe destacarse la presencia de hematites, que aparece aglomerando granos muy pequeños (fracción inferior a 63μm) de otros minerales. También se presentan como minoritarios anfíbol cálcico (hornblenda verde) y moscovita, y como trazas turmalina, distena, ilmenita, magnetita, rutilo y apatito. Algunos de estos minerales se alteran muy facilmente física y/o químicamente en condiciones ambientales y su presencia es diagnóstica de la proximidad del área fuente.

En el Estuario Marino aparecen además biotita, piroxenos, fragmentos de carbonatos bioclásticos y circón, siempre de forma muy escasa. En el Estuario Fluvial la moscovita es minoritaria.

El cuarzo se presenta siempre muy fracturado y con deformaciones tectóncias internas. Atendiendo a su madurez, pueden diferenciarse dos tipos de granos:

a) Granos subredondeados muy desgastados, con alta esfericidad (0.7) y redondez (0.6 y 0.7), según la escala de Krumbein y Sloss (1955).

b) Granos subangulosos, con menor desgaste y presencia de algunas aristas. La esfericidad es alta (0.7), con una redondez variable entre 0.3 y 0.5.

Muestras	37	36	22	11	4	3
Cuarzo	M	M	A	A	E	E
Fragmentos de Rocas	E	E	A	M	M	M
Feldespato potásico	E	E	A	A	A	A
Plagioclasa	A	A	E	E	E	E
Anfíbol	m	m	m	m	m	m
Piroxeno	t	t	t			
Hematites	E	E	E	E	E	E
Limonita	m	m	t	m	m	t
Carbonatos	m	m	t			
Biotita	t	t				
Moscovita					m	m
Turmalina	t	t	t	t	t	t
Distena	t	t	t	t	t	t
Ilmenita	t	t	t	t	t	t
Magnetita	t	t	t	t	t	t
Rutilo	t	t	t	t	t	t
Circón	t	t	t			
Apatito	t	t	t	t	t	t

M= muy abundante (<50%), A= abundante (50-25%), E= escaso (25-15%), m= minoritario (15-5%), t= traza (>5%).

Tabla II.- Composición mineralógica semicuantitativa de las muestras seleccionadas. M= muy abundante (>50%), A= abundante (50-25%), E= escaso (25%-%15%), m = minoritario (15%-5%) y t= traza (<5%).

Los fragmentos de rocas dominan en las fracciones de grava y arena del Estuario Fluvial y son más escasos hacia el Estuario Marino. Pueden diferenciarse fragmentos de 4 tipos de rocas distintas: cuarcitas compuestas por cuarzo y biotita, cuarcitas compuestas exclusivamente por cuarzo microblástico, rocas cuarzo-feldespáticas de grano fino (arcosas) y pizarras. En el Estuario Marino aparecen los carbonatos como producto de la disgregación de esqueletos de organismos marinos (conchas de moluscos, fragmentos de briozoos, etc).

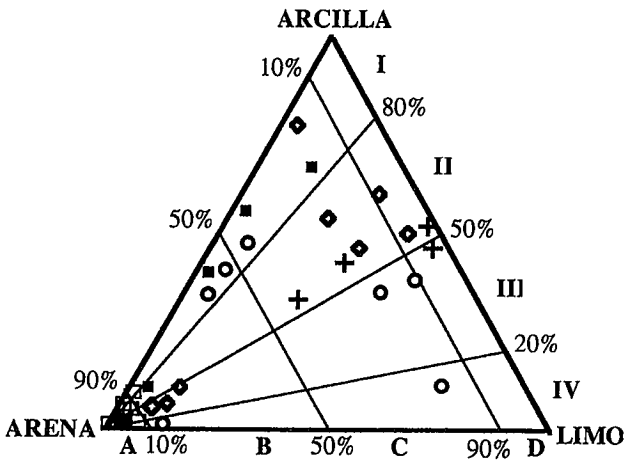


Figura 5.- Representación de los caracteres texturales de los distintos medios presentes en el estuario en el diagrama propuesto por Pejrüp (1988). I: calma total, II: relativa calma hidrodinámica, III: energía baja, IV: energía moderada. Leyenda de signos en figura 4.

Contenido geoquímico de los sedimentos

El estudio realizado sobre la composición química de varias muestras representativas de los diversos submedios distinguidos (Tablas III y IV) permite distinguir 4 conjuntos de elementos que han sido agrupados en función de su afinidad, que queda puesta de manifiesto por presentar entre sí coeficientes de correlación superiores a 0,7. Del mismo modo se han relacionado los elementos de estos grupos con las fracciones del sedimento que los contiene:

GRUPO 1: Constituido únicamente por el SiO_2, que conforma mayoritariamente la fracción detrítica que sufre transporte mecánico (gravas, arenas, limos gruesos y medios). Este comportamiento es confirmado por su relación inversa con el porcentaje de material floculado (r = -0.66).

GRUPO 2: Incluye al resto de los óxidos metálicos mayoritarios (Al_2O_3, Fe_2O_3, Na_2O, TiO_2, MgO, MnO y K_2O) junto a la mayoría de los elementos metálicos

MUESTRA	37	34	32	16	15	14	8	3
SiO_2	78.50	79.70	67.20	54.40	55.40	58.50	52.10	76.90
Al_2O_3	6.59	7.73	12.90	18.20	16.50	16.20	18.80	9.63
CaO	3.71	1.22	1.64	1.22	1.55	1.21	0.97	0.99
MgO	0.65	0.75	1.46	1.92	1.92	1.89	2.08	0.96
Na_2O	1.43	1.62	2.70	2.29	2.35	2.50	2.03	1.43
K_2O	1.20	1.53	1.95	2.76	2.47	2.34	2.80	1.72
Fe_2O_3	2.44	2.52	4.82	6.72	6.90	6.32	7.05	4.72
MnO	0.07	0.04	0.07	0.12	0.09	0.10	0.18	0.09
TiO_2	0.31	0.60	1.04	1.09	0.90	1.15	1.07	0.45
P_2O_5	0.07	0.09	0.13	0.18	0.20	0.18	0.22	0.09
LOI	4.95	3.40	6.50	11.30	11.90	9.50	12.30	2.50
Cr	30.00	42.00	74.00	101.00	104.00	105.00	105.00	70.00
Rb	39.00	81.00	87.00	152.00	138.00	105.00	135.00	72.00
Sr	220.00	126.00	175.00	151.00	136.00	143.00	135.00	139.00
Y	20.00	12.00	37.00	36.00	34.00	41.00	16.00	34.00
Zr	61.00	209.00	355.00	233.00	179.00	341.00	207.00	90.00
Nb	14.00	23.00	34.00	28.00	35.00	38.00	31.00	19.00
Ba	302.00	309.00	390.00	507.00	490.00	454.00	511.00	401.00
Co	9.00	9.00	14.00	21.00	19.00	18.00	21.00	15.00
Ni	12.00	15.00	28.00	42.00	40.00	37.00	41.00	21.00
Cu	9.00	9.00	22.00	49.00	39.00	40.00	53.00	9.00
Zn	82.00	74.00	144.00	167.00	153.00	156.00	180.00	125.00
Pb	9.00	17.00	30.00	39.00	30.00	31.00	35.00	18.00
Th	9.00	9.00	9.00	15.00	11.00	12.00	15.00	9.00
M.Org.	10.37	9.93	11.48	20.46	24.72	15.04	21.44	8.23
Finos	0.02	20.91	40.71	90.80	78.00	82.09	58.00	0.00
Floc.	0.00	13.20	17.00	42.00	44.00	35.00	35.00	0.00

Tabla III.- Composición química (contenidos en óxidos en porcentajes y elemental en ppm) de las muestras seleccionadas.

	RANGO	MEDIA	σ	C.V.
SiO_2	27.60	65.34	11.69	0.18
Al_2O_3	12.21	13.32	4.82	0.36
CaO	2.74	1.56	0.90	0.57
MgO	1.43	1.45	0.59	0.40
Na_2O	1.27	2.04	0.62	0.24
K_2O	1.60	2.10	0.59	0.28
Fe_2O_3	4.61	5.19	1.89	0.36
MnO	0.14	0.10	0.04	0.44
TiO_2	0.84	0.83	0.32	0.39
P_2O_5	0.15	0.14	0.06	0.40
LOI	9.80	7.79	3.95	0.51
Cr	75.00	78.88	30.09	0.38
Rb	113.00	101.13	38.59	0.38
Sr	94.00	153.13	30.74	0.20
Y	29.00	28.75	10.99	0.38
Zr	294.00	209.38	104.39	0.50
Nb	24.00	27.75	8.41	0.30
Ba	209.00	420.50	84.02	0.20
Co	12.00	15.75	4.86	0.31
Ni	30.00	29.50	12.22	0.41
Cu	44.00	28.75	18.69	0.65
Zn	106.00	135.13	38.78	0.29
Pb	30.00	26.13	10.29	0.39
Th	6.00	11.13	2.64	0.24

σ= desviación típica, C.V.= coeficiente de variación, LOI= pérdida tras calcinación.

Tabla IV.- Contenidos geoquímicos medios de los elementos analizados en las muestras seleccionadas. s: desviación típica, C.V.: coeficiente de variación.

	Cu	Pb	Zn
Oca (1)	66,6	51	174
Nivet (1)	44,6	91	104
Piedras (2)	72,2	60	105
Guadiana (3)	28,8	26,1	135,1
Odiel (4)	1015	938	871

*Datos obtenidos de varios autores: (1) Irabien y Velasco (1989), (2) Borrego et al. (1990), (3) este trabajo, (4) Borrego (1992), este último corresponde a un sistema altamente contaminado.

Tabla V.- Contenidos medios (en ppm) de varios metales pesados en algunos sistemas costeros no contaminados: (1) Irabien y Velasco (1989); (2) Borrego *et al.* (1990); (3) el presente trabajo; y comparación con un sistema altamente contaminado en metales pesados: (4) Borrego (1992).

minoritarios (Cr, Ba, Rb, Co, Cu, Ni, Zn, Pb, Th, Zr, Nb e Y). Estos metales aparecen asociados a la fracción lutítica del sedimento. Todos sus componentes presentan correlaciones negativas con el SiO_2 y el CaO.

GRUPO 3: Está formado por el P_2O_5 asociado a la materia orgánica activa y, en consecuencia, con la actividad bioquímica del medio. Físicamente se incluye en la fracción floculada (r = 0.93), con lo cual también están asociados a los elementos del grupo 2 y se correlacionan negativamente con el SiO_2.

GRUPO 4: Está constituido por el CaO y el Sr. Proceden probablemente de los restos de caparazones de moluscos resedimentados por las corrientes mareales.

Pueden apreciarse las siguientes variaciones longitudinales:

a) Los elementos de los grupos 2 y 3 aumentan hacia el Estuario Medio y vuelven a disminuir hacia el Estuario Fluvial. Su concentración está íntimamente ligada a la proporción de sedimentos finos, depositados principalmente en el Estuario Medio debido a los procesos de mezcla de aguas.

b) El SiO_2 se comporta a la inversa, disminuyendo hacia el Estuario Medio y volviendo a aumentar hacia el Estuario Fluvial.

c) Los elementos del grupo 4 se presentan muy abundantemente en las zonas más abiertas del sistema, mientras que su abundancia disminuye bruscamente en el límite entre los sectores Marino y Medio y más progresivamente hacia el sector Fluvial.

Haciendo referencia a los contenidos medios y rangos de medida (Tabla IV), se hace patente que el contenido medio de los metales pesados (Cu, Pb y Zn) es muy bajo. Estos tres elementos se consideran tóxicos, al entrar a formar parte de compuestos organometálicos ligados a los nutrientes (Förstner, 1980; Borrego, 1992). Este hecho explica a la vez su asociación con el P_2O_5 y la materia orgánica y su mayor abundancia en el sector central del estuario, aspecto que creemos se debe al incremento en este sector de la fracción fina a la que van asociados.

Las concentraciones en elementos contaminantes del estuario del Río Guadiana lo definen como el sistema menos contaminado de la costa de Huelva (Tabla V), sin presencia de anomalías relevantes de algún metal en las muestras analizadas. Sus contenidos en metales pesados son inferiores incluso a otros estuarios escasamente contaminados, como el Río Piedras, y se encuentran a notable distancia del estuario del Río Odiel, situado en la misma costa y sometido a condiciones hidrodinámicas similares.

Contenido en materia orgánica

El estudio de las variaciones de este factor (Fig. 7 y Tabla VI) y del diagrama propuesto (Fig. 6) permite realizar las siguientes precisiones:

a) Estuario Fluvial. Los contenidos medios en materia orgánica son muy bajos (5,7%), aumentando hacia el sur. Disminuyen con la profundidad y el tamaño de grano.

b) Estuario Medio. Presenta los mayores contenidos en materia orgánica de todo el sistema (media del 16,3 %). No existe una relación aparente con la profun-

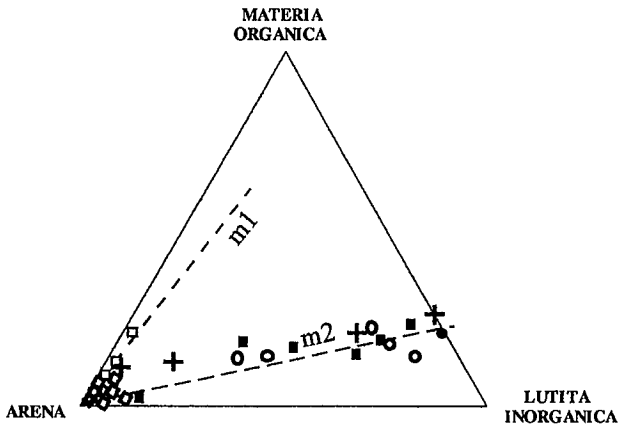


Figura 6.- Gráfico triangular que expresa el contenido relativo en materia orgánica de los sedimentos del estuario. m1: pendiente de las muestras del canal del estuario fluvial, m2: pendiente de las muestras del resto del estuario. Leyenda de signos en figura 4.

	CANAL	BORDE DE CANAL	MARISMA	TOTAL
ESTUARIO COMPLETO				
MEDIA	10,75	13,69	16,58	12,24
MINIMO	0,83	9,77	10,98	0,83
MAXIMO	24,92	19,32	22,58	24,92
RANGO	24,09	9,55	11,60	24,09
Nº MUESTRAS	26,00	8,00	3,00	37,00
SECTOR FLUVIAL				
MEDIA	4,67	11,99		5,71
MINIMO	0,83			0,83
MAXIMO	8,23			11,99
RANGO	7,40			11,16
Nº MUESTRAS	6,00	1,00		7,00
SECTOR CENTRAL				
MEDIA	15,57	15,56	18,72	16,27
MINIMO	6,66	12,31	10,98	6,66
MAXIMO	24,92	19,32	22,58	24,92
RANGO	18,26	7,01	11,60	18,26
Nº MUESTRAS	13,00	6,00	2,00	21,00
SECTOR MARINO				
MEDIA	8,61	9,77	11,55	9,81
MINIMO	5,64			5,64
MAXIMO	17,42			17,42
RANGO	11,78			11,78
Nº MUESTRAS	7,00	1,00	1,00	9,00

Tabla VI.- Contenidos en materia orgánica (en %) medios, máximos y mínimos y rango de medida en los medios sedimentarios del estuario y en los distintos dominios del mismo.

didad, ya que los máximos se sitúan en la zona más profunda del canal y la marisma. Estos altos contenidos en materia orgánica no están relacionados con una mayor proporción de ésta en la fracción lutítica (pendiente m2, Fig. 6), sino con su mayor abundancia en el total de la muestra.

c) Estuario Marino. Se caracteriza por unos contenidos medios relativamente elevados (9.8%), con una relación inversa con la profundidad y el tamaño medio de grano del sedimento. De forma semejante al sector fluvial, la pendiente (ml) de estas muestras es más elevada que la pendiente media (m2).

Contenido micropaleontológico

Ruiz *et al.* (1996) determinan 16 especies de foraminíferos y 14 especies de ostrácodos (Tabla VII). Entre los foraminíferos, dominan *Cribroelphidium vadescens* (en todo el estuario), la asociación *Trochammina inflata - Jadammina macrescens* (marisma salada) y la asociación *Astronion stelligerum - Ammonia inflata - Ammonia beccarii* (borde de canal del Estuario Marino). No suelen superarse los 100 ejemplares en 200 gr de sedimento.

Los ostrácodos indígenas dominantes son *Loxoconcha elliptica*, *Cytherois fischeri*, *Leptocythere castanea* y *Leptocythere lacertosa*.. La biocenosis se encuentra en medios canalizados muy poco energéticos del Estuario Medio y en el borde de canal del Estuario Marino.

El resto de las formas halladas son organismos muertos y arrastrados desde la zona costera abierta, encontrándose sólo en el estuario marino.

Interpretación

Gradiente longitudinal: Sectores estuarinos

Los resultados ofrecidos por las granulometrías evidencian que se presenta en el estuario un gradiente energético longitudinal, que queda reflejado por la elongación que presentan las agrupaciones de puntos en los diagramas bivariados, incluso una nube de puntos engloba a las muestras del canal submareal de un solo sector (sector marino). Este gradiente ha sido puesto de manifiesto en todos los estuarios del mundo de forma independiente a su morfología y al balance de los procesos actuantes en los mismos (Fairbridge, 1980; Dalrymple *et al.*, 1992). La existencia de éste evidencia la bipolaridad textural del estuario y queda reflejado en la existencia de sectores con procesos y productos diferentes.

Esta bipolaridad textural representa además una bipolaridad en los aportes, como demuestran los datos mineralógicos, geoquímicos, microfaunísticos y de materia orgánica.

Estuario fluvial

Este sector permite estudiar los sedimentos aportados por el Río Guadiana desde su cuenca. Están formados principalmente por fragmentos de rocas, cuarzo, anfíboles, hematites, limonita, moscovita, turmalina, distena, magnetita y apatito. Los tamaños de grano más groseros (arenas finas a gravas) son transportados en saltación y como carga de fondo y depositados en el canal submareal, tal como ponen de manifiesto los tipos de distribuciones granulométricas de las muestras recogidas en este submedio (CS-3 y CS-6). Su buena clasificación es consecuencia de la alta energía e influencia de la corriente fluvial. La abundancia de cuarzo subredondeado es indicativa de un transporte superior a los 10 Km (Griffiths, 1967).

TABLA VII. ESPECIES Y NUMERO DE INDIVIDUOS DE FORAMINIFEROS Y OSTRACODOS SEGUN SUBMEDIOS. c= canal submareal, bc= borde de canal, ms= marisma.

ESPECIES/MUESTRAS	2c	3c	4c	5c	6c	7c	8c	11c	12c	13c	14bc	15c	16ms	17c	19bc	20c	21ms	22bc	23bc	24c	25c	26c	27bc	28c	29c	31ms	32bc	33c	34c	35c	36c	37c
FORAMINIFEROS																																
Ammonia beccarii																		1									5					
Ammonia inflata							2	1			1							3		1			2	1			28		9			
Astrononion stelligerum																7						1	8				30		6			
Bulimina sp.*																											1					
Cornuspira involvens*								1																								
Cribroelphidium vadescens			1			1	30	31	16	1	15					24		9		1							17		12			
Elphidium williamsoni								12	6																		10		5			
Jadammina macrescens											1						35										3		7			
Heterolepa sp.*																											1					
Nonion granosum																1																
Quinqueloculina jugosa*																											1					
Quinqueloculina oblonga*										1			1																		2	
Quinqueloculina seminulum*																		1									5		5	1		
Rosalina globularis*																											1					
Triloculina oblonga*																											1					
Trochammina inflata										12	1		43				67										2		12			
ESPECIES	0	0	1	0	0	1	2	4	2	3	4	0	2	0	0	3	2	4	0	2	0	1	2	1	0	0	13	0	7	1	1	0
NUMERO INDIVIDUOS	0	0	1	0	0	1	32	45	22	14	18	0	44	0	0	32	102	14	0	2	0	1	10	1	0	0	105	0	56	1	2	0
OSTRACODOS																																
Carinocythereis whitei*																											1					
Callistocythere murrayi																											1					
Cytherois fischeri															2							1					7(6)					
Hemicytherura videns*															1																	
Leptocythere castanea															8(2)		2	1(1)				1(1)					2					
Leptocythere lacertosa																											1(1)		2(1)			
Leptocythere porcellanea																		1														
Loxoconcha elliptica				3			12	39(1)	13		30(2)	2			141(7)			2(1)	1	9		4		1(1)			23(3)		2(2)			
Loxoconcha rhomboidea*															1												6					
Neocytherideis subulata*																											2					
Palmoconcha guttata*																											1					
Pontocythere elongata*																											4					
Semicytherura incongruens*																											2					
Urocythereis oblonga*															2								1				1	2				
ESPECIES	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	6	0	2	3	1	1	0	3	1	1	0	0	12	1	2	1	0	0
NUMERO INDIVIDUOS	0	0	0	3	0	0	12	39(1)	13	0	30(2)	2	0	0	155(9)	0	2	4(2)	1	9	0	6(1)	1	1(1)	0	0	51(10)	2	4(3)	1	0	0

Tabla VII.- Especies y número de individuos de foraminíferos y ostrácodos encontrados en las muestras seleccionadas. c: canal submareal, bc: borde de canal, ms: marisma.

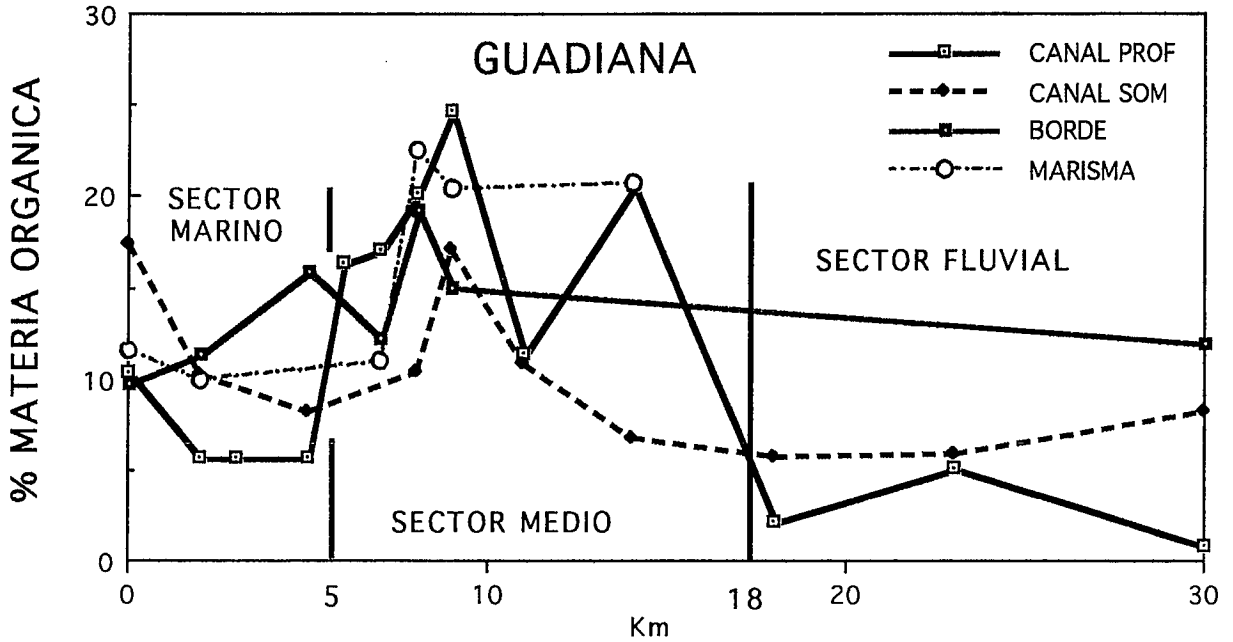


Figura 7.- Gráfica del contenido en materia orgánica de los sedimentos del estuario, con referncia al submedio sedimentario y al sector del estuario en el que fueron tomados.

En medios escasamente energéticos (riberas, cañaverales), el dominio de los procesos de floculación se traduce en un tamaño de grano muy fino (distribuciones granulométricas del tipo MS-1). La presencia significativa de fracciones limosas indica un transporte en suspensión importante en estos sectores protegidos.

Los episodios de arroyada lateral presentan un claro registro sedimentario en las barras laterales de gravas con distribución del tipo BC-4. La angulosidad y escasa selección de sus cantos implican una gran proximidad a la zona de aportes (márgenes del estuario), que se ve confirmada por la alterabilidad de algunos de sus componentes mineralógicos.

Los bajos contenidos en materia orgánica podrían proceder de unas condiciones químicas desfavorables del agua para la precipitación de carbón orgánico (Hennessee *et al.*, 1986). La mezcla de aguas, condición importante para la precipitación de la materia orgánica, sólo tiene lugar en el tramo más meridional durante la estación seca. Este dato se refleja en la aparición de caparazones resedimentados de microorganismos, procedentes del estuario medio.

Los escasos niveles de materia orgánica detectados en esta zona se deben a un proceso de lavado y redisolución de las fracciones más finas durante la estación húmeda, con la cuña de agua dulce situada en el sector marino del estuario. Esto implica un retrabajado estacional de la materia orgánica, con un transporte neto hacia el sector medio como consecuencia de la asimetría en intensidad y tiempo de actuación de las corrientes mareales.

Estuario medio

La mezcla de aguas dulces (conductividad = 275 - 1075 µS/cm; O_2 disuelto = 6,3 - 10,5 mg/l) y saladas (conductividad = 50.000 - 55.000 µS/cm; O_2 disuelto = 7,8-8,3 mg/l) condicionan en gran medida el tipo de sedimentación presente en este área. La consiguiente pérdida de energía de las corrientes origina procesos de floculación, con aparición de sedimentos pobremente clasificados (con distribuciones del tipo CS-5). La clasificación aumenta notablemente en algunas zonas canalizadas de escasa profundidad (distribuciones granulométricas tipo CS-4), debido al dominio de las corrientes mareales sobre la floculación. En estas zonas, el reflujo mareal produce el depósito de una pequeña cantidad de caparazones de ostrácodos, procedentes de las riberas próximas.

La floculación es el proceso dominante en las zonas más protegidas, con ausencia de las fracciones groseras en los sedimentos (distribución tipo CS-1). La microfauna viva se concentra en estos medios poco energéticos, con asociaciones casi monoespecíficas de foraminíferos (*Cribroelphidium vadescens*) y ostrácodos (*Loxoconcha elliptica*).

Las zonas limítrofes del estuario pueden ser una fuente adicional de sedimentos. Los principales minerales aportados son fragmentos de rocas, cuarzo inmaduro, feldespato potásico, plagioclasa, piroxenos, hematites y biotita. La fragilidad y alterabilidad de algunos minerales (p.e., plagioclasas), así como la angulosidad de los cantos y su escasa selección, denotan una gran proximidad a la zona de aporte. Este hecho queda corroborado por la presencia de cuarzo subanguloso, indicador de un transporte inferior a 3 km (Griffiths, 1967).

Las importantes proporciones en materia orgánica son indicadores de los procesos de precipitación y floculación que se detectan en este área. Además, no es descartable la reprecipitación del carbón orgánico pro-

cedente del lavado en el sector fluvial. Este fenómeno explicaría los mayores contenidos detectados en las zonas más profundas del canal, en cuyos sedimentos abundan las fracciones grava y arena.

Estuario marino

La saltación es el proceso dominante, sobre todo en la parte más profunda del canal submareal obteniendo como resultado distribuciones del tipo CS-4. En medios más someros (orilla convexa de los meandros), la pérdida de energía origina el depósito de las fracciones finas por floculación dando lugar a sedimentos con distribuciones del tipo CS-2. Es en estos sectores (borde de canal o canal muy somero) donde se acumula la microfauna.

El cuarzo es mayoritario. Su procedencia es mixta, con unos aportes marinos procedentes del litoral (junto a fragmentos bioclásticos) y los acantilados costeros de Olhos de Agua (Portugal) (IGME, 1974; Bettencourt, 1989).

Las mayores concentraciones de materia orgánica se debe a la abundante actividad de organismos excavadores y de plantas halófitas (*Zostera noltii*), cuya putrefacción incrementa el contenido orgánico. Estos organismos están ausentes en los medios canalizados más profundos, donde la materia orgánica es escasa. En esta zona no han aparecido elementos en la biocenosis, debido a la la movilidad del sedimento, la mayor energía de las corrientes y el menor contenido en nutrientes en este medio (Ruiz *et al*, 1996).

Gradiente vertical: Submedios sedimentarios

Los diagramas bivariados y el triángulo de Pejrüp (1988) agrupan a las muestras en función del submedio sedimentario al que pertenecen. En general, se observa que la relación entre exposición y sumersión mareales controla la intensidad de los procesos que tienen lugar en cada uno de los submedios presentes en el estuario. En los medios submareales profundos dominan las fracciones transportadas en carga de fondo. Son zonas de *bypassing*, por donde se produce el tránsito sedimentario hacia la zona marina. En las zonas someras del canal aumentan las fracciones transportadas en saltación y suspensión, con una sedimentación activa que contribuye a la colmatación y estrechamiento del estuario.

Estos cambios son un reflejo de un gradiente energético vertical. Una menor energía conlleva una pérdida de selección granulométrica y la disminución del tamaño de grano medio. Como consecuencia, los sedimentos someros son más cohesivos y, en consecuencia, más difíciles de removilizar durante los pulsos más energéticos (semiciclos de flujo y reflujo).

Esta gradación está también presente en el contenido mineralógico, composición geoquímica y materia orgánica. Desde el punto de vista mineralógico-geoquímico este gradiente vertical se manifiesta en un enriquecimiento en sílice del canal, ya que la sílice está asociada a las fracciones más gruesas del sedimento. Este contenido en sílice corresponde mayoritariamente a los minerales de la asociación «Fragmentos de Rocas - cuarzo - feldespato potásico - plagioclasa». En el estuario marino, este enriquecimiento en sílice viene acompañado por un aumento de los elementos del grupo 4 (CaO y Sr), que también se presentan en la fracción arena, lo que pone de manifiesto la introducción en el estuario de calcarenitas marinas a través de las corrientes de flujo mareal.

La pérdida de profundidad es paralela a un aumento de los elementos del grupo 2 (óxidos metálicos Al_2O_3, Fe_2O_3, Na_2O, TiO_2, MgO, MnO y K_2O) que se asocian a las fracciones floculadas. Esto viene acompañado a su vez por un aumento en el contenido orgánico: La abundancia de materia orgánica en la marisma salobre puede explicarse por la ausencia de material grosero en el sedimento y por el gran número de raíces en el mismo, todo ello en relación con la presencia de especies vegetales (*Spartina alterniflora*, *Sarcocornia perennis*, *Suaeda vera*, *Arthrocnemum fruticosum*, *Halimione potulacoides* y *Atriplex halimus*) que, tanto por su actividad química en el entorno acuoso para mantener el balance osmótico al sumergirse, como por el efecto mecánico de pantalla que suponen para las corrientes, favorecen los procesos de floculación y precipitación (Nichols y Biggs, 1985).

En el canal submareal más somero y en los bordes del canal existe además el aporte orgánico de macroorganismos como poliquetos, moluscos y crustáceos, sobre todo en las zonas más meridionales del sector. Esto se debe a la menor energía de las corrientes en ambos submedios y a la presencia de fondos de material más cohesivo y, por tanto, menos móviles.

La existencia de este gradiente vertical permite que en el sector medio del estuario exista una zona del canal submareal donde las muestras más ricas en sedimentos finos típicas de este sector y con distribuciones tipo CS-1, CS-2 y CS-3 no están presentes, al contrario de lo que podría esperarse. Las muestras con estas distribuciones aparecen sólo en las zonas más someras del canal y en los bordes de canal, donde adquieren morfología de barras laterales de origen mareal. En las zonas más profundas del canal circulan arenas muy bién clasificadas con distribución granulométrica del tipo CS-4, debido a la fuerte remoción ejercida a esta profundidad por las corrientes mareales que alcanzan allí velocidades más elevadas. Se pone así de manifiesto la existencia de un canal de *bypassing* en la zona profunda, por el que tiene lugar el tránsito sedimentario hacia la zona marina, mientras que en las zonas someras del canal se produce una sedimentación activa que contribuye a su colmatación y estrechamiento.

Descarga sedimentaria: fases

La situación dentro del estuario de los diferentes tipos de distribución (Fig.3), sugiere la existencia de dos fases en la descarga sedimentaria del agente fluvial:

- En una primera fase, que tiene lugar durante el flu-

jo mareal, el río deposita su carga sedimentaria en el Estuario Medio, al tener lugar una brusca pérdida de energía en la confluencia entre la corriente de flujo mareal y la corriente fluvial sumada al reflujo de inercia.

- Durante una segunda fase se produce el retrabajado mareal de la fracción arenosa de estos sedimentos hacia los sectores fluvial (durante el flujo) y marino (durante el reflujo), siendo mayor el transporte en este último sentido debido a la asimetría de las corrientes mareales, tanto en intensidad como en tiempo de actuación. Las gravas con distribución tipo CS-6 son el resultado del lavado de las arenas por parte de las corrientes de marea, mientras las arenas con distribucón tipo CS-4 son el resultado de la clasificación ejercida por las mareas sobre los sedimentos del fondo.

Conclusiones

Los datos presentados en este trabajo permiten afirmar que, en el caso del estuario del Río Guadiana, al comenzar la progradación deltaica, el canal estuarino no funciona como un mero transmisor de sedimentos entre el continente y la zona costera abierta, aunque sí una parte de él. Por el contrario, existe en el interior del estuario una mezcla de sedimentos fluviales y marinos favorecida por la acción de las mareas, junto con una sedimentación autóctona del propio estuario que está inducida por los procesos de mezcla.

Estos procesos que tienen lugar en el interior del estuario favorecen la continuidad de la sedimentación, a pesar de que haya comenzado el proceso de progradación en la zona más abierta del sistema. Los procesos de colmatación interior plantean un problema hidrodinámico: mientras que químicamente se favorece la colmatación, los volúmenes de agua que circulan en el mismo tienden a mantener un tránsito sedimentario entre el río y la costa. El estuario del Río Guadiana «soluciona» este problema permitiendo que los sedimentos procedentes de la floculación, parcialmente mezclados con los detríticos más finos transportados en suspensión (y a veces incluso con materiales transportados en carga de fondo), se preserven en aquellos lugares donde la corriente mareal es menor, es decir en los márgenes convexos de los meandros impuestos por la morfología del sustrato. Al mismo tiempo, en los lugares donde tienen lugar corrientes de mayor envergadura, es decir, en las zonas más profundas del canal, los materiales floculados no logran permanecer en el fondo; estas zonas se convierten entonces en canales de *bypassing*.

Al existir sedimentación mareal en las zonas más someras y *bypassing* en las zonas más profundas, en el canal se desarrolla una morfología en barras mareales de sedimentación activa con zonas de canal profundo, que es un mero transmisor sedimentario. En este caso, la estrecha morfología impuesta por la configuración del sustrato impide el desarrollo de barras mareales longitudinales, como sería esperable, y se desarrollan en su lugar barras laterales, que se acomodan hidrodinámicamente mejor a esta morfología heredada.

Este modelo permite que continúe la acumulación sedimentaria en el interior del estuario, aunque muy limitada porque el proceso dominante es el tránsito sedimentario hacia la costa favoreciendo la acumulación en ella de la mayor parte de los sedimentos y teniendo como resultado un proceso de progradación. Este tránsito sedimentario de los sedimentos fluviales hacia la costa se produce en dos fases: en primer lugar, durante el flujo mareal, el río deposita su carga sedimentaria en la zona superior del estuario medio, al tener lugar una reducción brusca de la velocidad de la corriente fluvial en su confluencia con la corriente de flujo mareal. Posteriormente, durante el reflujo se produce, el retrabajo mareal de la fracción arenosa de la fracción arenosa de estos sedimentos hacia la costa, donde llegan después de varios ciclos de mareas, mezclándose con sedimentos marinos durante los semiciclos de flujo.

En la zona progradante existen claramente dos fuentes de sedimento, como indican los datos de mineralogía. La primera procede de la cuenca fluvial, mientras que la segunda es eminentemente costera y bien podría coincidir con las arenas transportadas por la deriva litoral desde los acantilados de Olhos de Agua en Portugal, como indica Bettencourt (1989), aunque mezcladas con gran cantidad de fragmentos de conchas marinas procedentes de los muchos bancos de bivalvos que se asientan en las arenas costeras o bien en las zonas de afloramientos rocosos que existen por debajo de la cota de -20 metros (IGME, 1974). Asimismo, son de procedencia marina las conchas de muchos individuos de foraminíferos y ostrácodos, que son retrabajados hacia el interior del estuario por las corrientes de flujo mareal.

Este trabajo ha sido elaborado en el marco de los proyectos de investigación PS89-0113 y PB93-1205, financiados por la DGCYT, P.A.I. grupo nº 4070 y Universidad de Huelva. Agradecemos a J.G. Pendón y J. Borrego su incondicional apoyo en las labores de muestreo así como sus inestimables contribuciones en la interpretación de los datos. Agradecemos también la participación de Manuel.J. Morales en las campañas de muestreo y a M. López su ayuda en la identificación mineralógica. Ha sido también inestimable la aportación a este trabajo de dos revisores anónimos así como del editor de esta revista J.P. Calvo, que han contribuido a la notable mejora del manuscrito inicial.

Bibliografía

Bettencourt, P. (1989): Contribution of the sedimentological study for the understanding of the recent evolution of a barrier island system (Algarve, South of Portugal). *Bull. Inst. Geol. Bassin d'Aquitaine*, 44: 81-96.

Borrego, J. (1992): Sedimentología del Estuario del Río Odiel, Huelva, SW España. *Tesis doctoral*, Univ. Sevilla, 308 p. (inédita).

Borrego, J., Morales, J.A., Pendón, J.G. y Romero-Segura, M.J. (1990): Evolución del contenido de algunos metales pesados en la Ría del Piedras (Huelva-España). Consecuencias ambientales. *Geolis*, vol. IV, 21-29

CEEPYC, Centro de Estudios y Experimentación de Puertos y Costas «Ramón Iribarren» (1979): Plan de estudio de la dinámica litoral de la Provincia de Huelva. *Informe. Dirección General de Puertos y Costas*, Madrid, 37 p.

Courau, P. (1983): Traces metalliques: principe des méthodes, réduction des contaminations. En: *Manuel des analyses chimiques en milieu marin.* (C.N.P.E.O.): 395 p.

Cuena, G.J. (1991): Proyecto de regeneración de las playas de Isla Cristina. *Informe del Servicio de Costas*, MOPT: 100p.

Dalrymple, Zaitlin y Boyd (1992): Estuarine facies models: conceptual basis and estratigraphic implications. *Jour. Sed. Petrol.*, 62: 1030-1055.

Folk, R.L. y Ward, W.C. (1957): Brazos river bar. A study in the significance of grain size parameters. *Jour. Sed. Petrol.*, 27: 3-26.

Griffiths, J.C. (1967): *Scientific method in analysis of sediments*, McGraw Hill, New York: 508 p.

Hennessee, E.L., Blakeslee, P.J. y Hill, J.M. (1986): The distributions of Organic Carbon and Sulphur in surficial sediments of the Maryland portion of Chesapeake Bay. *Jour. Sed. Petrol.*, 56: 674-683.

IGME (1974): Investigación minera submarina en el subsector «Huelva I», Golfo de Cádiz. *Colección Informes*: IGME, Madrid, 134 p.

Irabien, M.J. y Velasco, F. (1989): Estudio de la influencia antrópica en varios estuarios del País Vasco en base al contenido en metales pesados de los sedimentos: comparación con otros sistemas fluviales. *IV Reunión Nac. de Geol. Amb. y Ord. del Territ., Gijón, Comunicaciones*: 299-305.

Kilenyi, T.I. (1969): The problem of the ostracod ecology in the Thames estuary. En: *The taxonomy, morphology and ecology of recent Ostracoda* (J. Neale, Ed.), Olivier & Boyd Ltd., Edimburgo: 251-267.

Krumbein, W.C. y Sloss, L. (1955): *Stratigraphy and sedimentation.* Freeman & Co., San Francisco: 497 p.

Kuenen, Ph.H. (1959): Experimental abrasion, pt.3: Fluviatile action of sand. *Am. Jour. Sci.*, 257: 172-190.

Kuenen, Ph.H. (1960): Experimental abrasion, pt.4: Eolian action: *Jour. Geology*, 68: 427-449.

Morales, J.A. (1993): Sedimentología del Estuario del Río Guadiana. (SW España- Portugal). *Tesis doctoral* Univ., Sevilla, Serv. Publ. Univ. Huelva (1995): 274 p.

Nichol, S.L. y Boyd, R. (1993): Morphostratigraphy and facies architecture of sandy barriers along Eastern Shore of Nova Scotia. *Marine Geol.*, 114: 59-80.

Nichols, M.M. y Biggs, R.B. (1985): Estuaries. En: *Coastal Sedimentary Environments* (R.A. Davis Jr., Ed.), Springer Verlag., New York, 77-186.

Passega, R. (1964): Grain size representation by CM patterns as a geological tool. *Jour. Sed. Petrol.*, 34: 830-847.

Pejrüp, M. (1988): The Triangular Diagram used for classification of Estuarine Sediments: A new approach. En: *Tide-Influenced Sedimentary Environments and Facies* (P.L. de Boer *et al.*, Eds.): 289-300.

Ruiz, F., González-Regalado, M.L. y Morales, J.A. (1996): Distribution et écologie des foraminifères et ostracodes actuels de l'estuaire du Fleuve Guadiana (SO Espagne). *Geobios*, 29: 513-528.

Zazo, C., Goy, J.L., Somoza, L., Dabrio, C.J., Belluomini, G., Improta, S., Lario, J., Bardají, T. y Silva, P.G. (1994): Holocene sequence of sea level fluctuations in relation to climatic trends in the Atlantic-Mediterranean Linkage Coast. *Jour. Coastal Res.*, 10: 933-945.

Manuscrito recibido el 1 de Octubre de 1996
Aceptado el manuscrito revisado el 19 de Noviembre de 1997