

Contenido y dinámica del fósforo en el sedimento de praderas de fanerógamas marinas.

MONTSE VIDAL

Departament d'Ecologia. Facultat de Biologia. Universitat de Barcelona. Diagonal 645. 08028 Barcelona.

Recibido: noviembre 1987.

SUMMARY

Dynamics and content of phosphorus in the sediment of seagrass meadows. The sediment phosphorus concentrations of different seagrass meadows was determined, with special emphasis on the spatial variation of PRS in pore water. Additionally, a preliminary attempt to evaluate phosphorus exchange at the sediment-water interface and the role of the plants in these processes was made. Pore water dissolved phosphorus ranged between 1 and 5 $\mu\text{g-at P l}^{-1}$, and total sediment phosphorus concentrations ranged between 150 and 250 $\mu\text{g P g dry weight l}^{-1}$. In sediment below *Posidonia oceanica* (L.) Delile meadow a clear increase of PRS in pore water is shown in a depth gradient, related to a decrease of *Posidonia* cover. In addition, comparing these data with a nearfound bare sediment, two differences arose: total phosphorus content in the bare sediment is higher, but below *Posidonia* the labile fraction is much more important; both facts appear to reflect the influence of the rizhosphere upon sediment dynamics. The mineralogical composition of the sediment and preliminary results of laboratory experiments suggest that carbonate fluorapatite can play a major role in the equilibrium between particulate and dissolved phosphorus forms in the *Posidonia* system. That seagrasses exert an important influence upon sediment phosphorus dynamics was also evident in other seagrass meadows (dominated by *Cymodocea nodosa* (Ucria) Ascherson, *Ruppia cirrhosa* Petagna Grande, *Zostera noltii* Homemann), where plant activity had a clear influence upon the vertical distribution of pore water PRS. The labile phosphorus fraction of this sediments was, however, small compared to that in the *Posidonia* system. This difference may be related to differences in the mineralogical composition of the sediments, with the presence of montmorillonite. Whatever the relative importance of total phosphorus compared to labile phosphorus, this last fraction appear sufficient to meet the phosphorus requirements of the plants, and phosphorus limitation of plant growth appears unlikely.

KEYWORDS: phosphorus, sediments, seagrass meadows.

PALABRAS CLAVE: fósforo, sedimentos, praderas de fanerógamas marinas.

INTRODUCCIÓN

La dinámica de nutrientes en aguas costeras difiere considerablemente de la del medio oceánico. Las zonas someras se caracterizan por una elevada tasa de sedimentación (PARSONS *et al.*, 1977; HARGRAVE, 1980) y por la importancia que adquiere la regeneración bentónica del nitrógeno y del fósforo. La coincidencia de la zona fótica con la de dominancia de los procesos heterotróficos, determina que los elementos nutritivos reciclados estén inmediatamente disponibles para los

productores primarios. Por otra parte, los procesos ligados al sedimento adquieren una gran relevancia, particularmente con respecto a la dinámica del nitrógeno y del fósforo.

Sobre sustratos blandos costeros son frecuentes las praderas de fanerógamas marinas. El papel de estas comunidades en el ciclo de los nutrientes no está aún definitivamente establecido (BARKO & SMART, 1979, 1980, 1981; CARIGNAN & KALFF, 1979, 1980; BRIX & LYNGBYE, 1985). En distintas especies marinas, pero sobretodo en dulceacuicolas, se ha

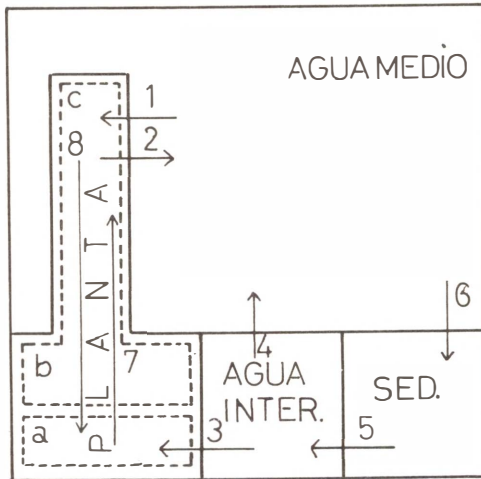


FIG. 1: Modelo conceptual de flujos entre compartimientos de una pradera de fanerógamas marinas. *Conceptual model of phosphorus fluxes between compartments in a seagrass meadow.*

demonstrado experimentalmente la capacidad de la absorción radicular de los elementos nutritivos (Mc ROY & BARSDATE, 1970; PATRIQUIN, 1972; PENHALE & THAYER, 1980; FRESI & SAGGIOMO, 1980). No obstante, la importancia relativa de hojas y raíces (y, por lo tanto, agua y sedimento) en la nutrición mineral de la planta, en condiciones naturales, no ha sido claramente dilucidada. En cualquier caso, las fanerógamas deben desempeñar algún papel clave en el ciclo de los nutrientes en aguas costeras, bien sea "bombeando" nutrientes del sedimento, y/o modificando las características fisicoquímicas del mismo que gobiernan la movilidad de aquéllos, bien sea "empaquetando" nutrientes procedentes de la masa de agua en un compartimiento (los tejidos vegetales), de tasa de renovación relativamente baja.

En el marco de dos programas en los que se estudiaba la producción primaria de las especies de fanerógamas más significativas

de la costa catalana y como una primera aproximación a las cuestiones anteriormente mencionadas, intentamos investigar el papel de estas comunidades en el ciclo de los nutrientes. El estudio se centró en un nutriente, el fósforo, tanto por carecer su ciclo de fase atmosférica, como por transcurrir una parte importante del mismo en el sedimento. Partiendo de un modelo de compartimientos, simplificado y adaptado a nuestro sistema (fig. 1), el trabajo se enfocó desde un punto de vista descriptivo; fundamentalmente, se trató de medir el contenido de fósforo en los distintos compartimientos. Posteriormente, y en una primera aproximación, se intentó la cuantificación de alguna de las transferencias entre compartimientos que se indican en la figura 1. A partir de los datos presentados, se intenta también formular algunas sugerencias, a nivel de hipótesis, sobre la dinámica del fósforo y su papel limitante en las praderas de fanerógamas.

En este trabajo se presentan los resultados concernientes al medio (sedimento y columna de agua) donde se desarrollan estas comunidades. Los que hacen referencia a los tejidos vegetales pueden encontrarse en DELGADO (1986).

Así pues, los objetivos de este estudio pueden concretarse en:

i) Determinar el contenido de fósforo disponible para satisfacer los requerimientos de estas plantas. Para ello se tiene en cuenta, tanto el fosfato disuelto (en el agua a nivel de las hojas de las distintas especies, y en el agua intersticial del sedimento), como la reserva total de fósforo de este último compartimiento.

ii) Estudiar la heterogeneidad espaciotemporal de las concentraciones de fosfato del agua intersticial del sedimento.

iii) Estimar el flujo de fosfato a través de la interfase sedimento-agua.

FIG. 2: La pradera de *Posidonia oceanica* de las islas Medes, con la señalización del transecto de muestreo, y pradera de fanerógamas marinas de la bahía del Fangar, del delta del Ebro, con la señalización de la estación de muestreo. *Map of the Posidonia oceanica meadow of the Medes island showing the transect studied, and sampling site in the sea grass meadow of the Fangar bay (Ebro River delta).*

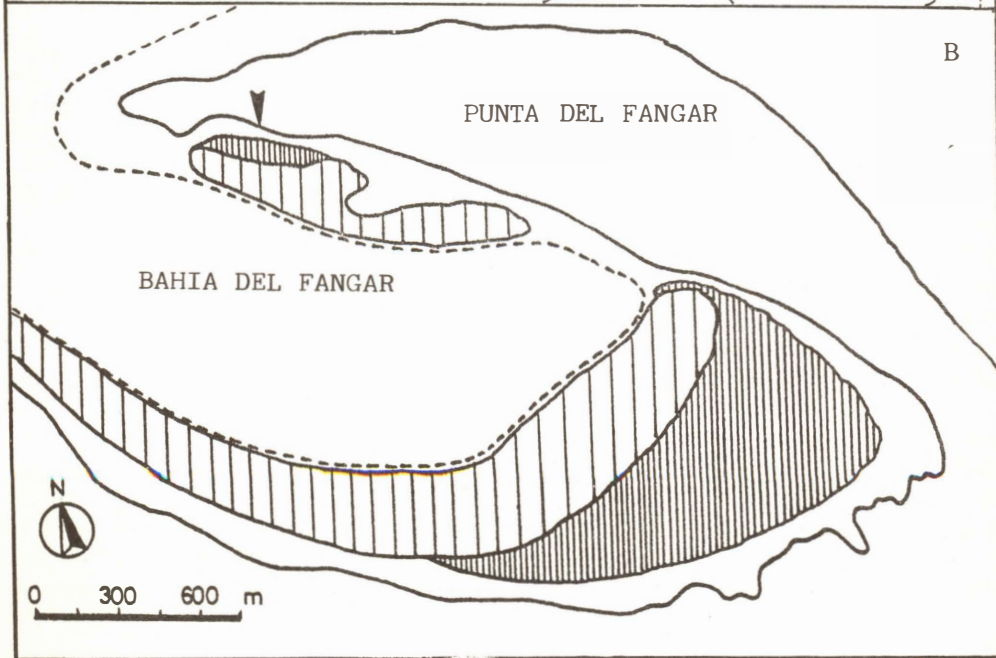
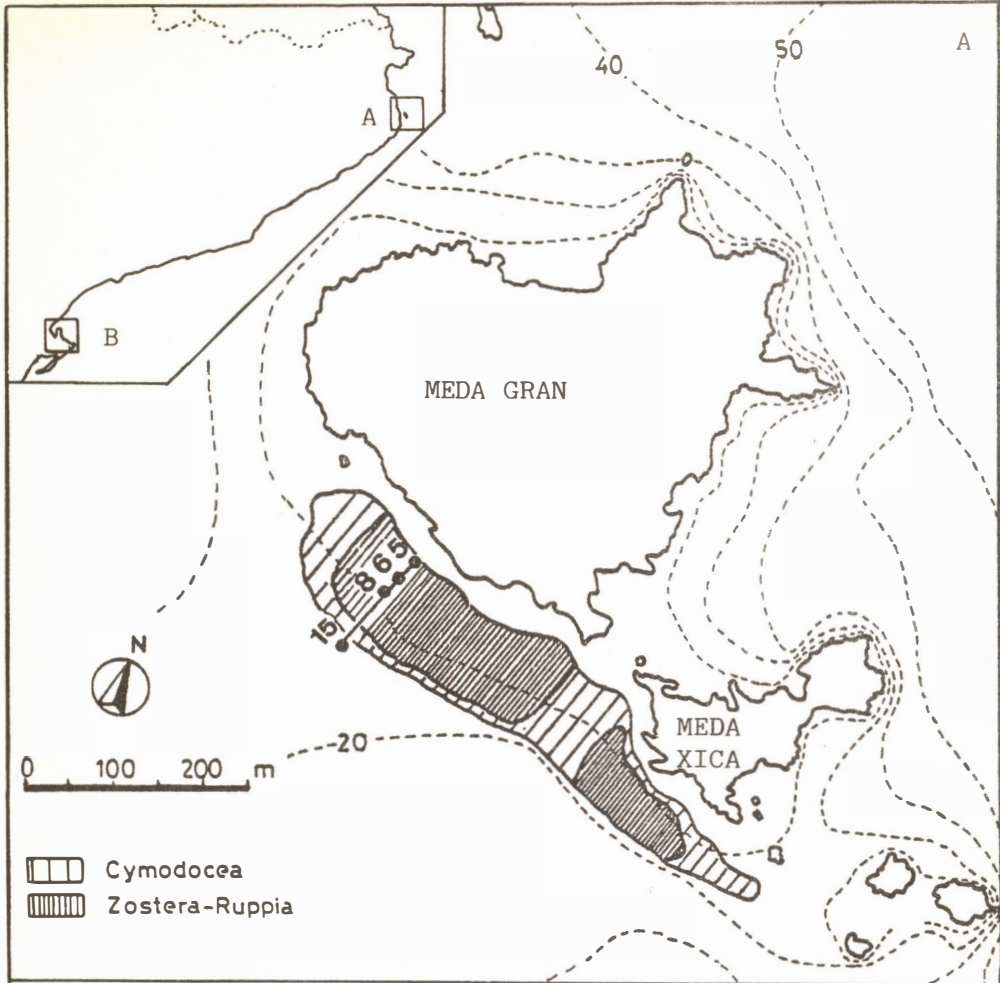


TABLA I: Diseño de muestreo del agua intersticial. *Sampling design of interstitial water.*

Localidad	Fecha	Estaciones	Perfiles/ estación	Niveles/perfil profund (cm)	Succiones por nivel
Islas Medes	1-11-1983	5.0 m	1	1-5	3
		6.5 m	1	1-5	3
		8.7 m	1	1-5	3
		15.0 m	1	1-5	3
	27-6-1984	6.5 m	3	4-(0,5,10,15)	1
		8.7 m	3	4-(0,5,10,15)	1
		15.0 m	3	4-(0,5,10,15)	1
Bahía del Fangar	3-7-1984	Zostera	3	4-(0,5,10,15)	1
		Ruppia	3	4-(0,5,10,15)	1
		Cymodocea	3	4-(0,5,10,15)	1
		sedimento	3	4-(0,5,10,15)	1

iv) Investigar determinados aspectos de la dinámica de los equilibrios entre la fracción disuelta y particulada de fósforo en el sedimento y proporcionar una estima preliminar de la fracción lábil intermedia.

v) Dilucidar el posible papel del fósforo como limitante de la producción primaria de las comunidades estudiadas.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se escogieron las tres comunidades más frecuentes de la costa catalana: *Zostera noltii* Horneman, *Cymodocea nodosa* (Ucria) Ascherson, *Posidonia oceanica* (L.) Delile. A ella se añadió una cuarta, *Ruppia cirrhosa* (Petagna) Grande, que aunque no estrictamente marina es muy abundante en zonas estuáricas y, en particular, en una de las áreas de estudio. Las estaciones de muestreo se situaron en las islas Medes (Gerona) para *Posidonia oceanica* y en la bahía del Fangar, en el delta del Ebro (Tarragona) para las otras tres. En cada una de las localidades se dispuso además de una estación control, carente de macrófitos. La situación de las estaciones de muestreo aparece representada en la fig. 2.

La pradera de *Posidonia oceanica* se extiende entre 2-3 m y unos 13 metros de profundidad, cubriendo 4.3 ha de fondo (ROMERO, 1983) y ha sido centro de numerosos trabajos (ROS *et al.*, 1984). Concretamente, desde la perspectiva de este estudio, cabe mencionar los de ROMERO

(1985) referentes a la dinámica y a la producción primaria de esta especie. De las estaciones representadas en la figura 2, se muestrearon más intensamente las situadas a 6.5 y 15 metros de profundidad y, ocasionalmente, se completó el transecto que se ha representado en dicha figura. La estación de 15 metros está situada algo más allá del límite de la pradera, sobre un fondo carente de cubierta vegetal.

Las praderas de fanerógamas de la bahía del Fangar cubren un 64% de la superficie total de dicha bahía. *Cymodocea* forma las praderas más extensa (216 ha), situándose preferentemente en los márgenes, mientras que *Ruppia* y *Zostera* constituyen comunidades mixtas que ocupan unas 114 ha del fondo de la bahía, de influencia más continental (PÉREZ & CAMP, 1987). En la estación que aparece representada en la fig. 2 se encuentran comunidades bien desarrolladas de las tres especies, así como una parcela de sedimento desprovista de vegetación.

Las muestras se recogieron directamente en inmersión. Las de agua ambiente se tomaron entre las hojas de las fanerógamas. El agua intersticial se extrajo *in situ* mediante jeringas; posteriormente las muestras se sometían a decantación, con la finalidad de eliminar una parte del material en suspensión. La recogida del agua intersticial se efectuó de acuerdo con los diseños de muestreo que están resumidos en la tabla I. El agua intersticial de una determinada porción de la columna de

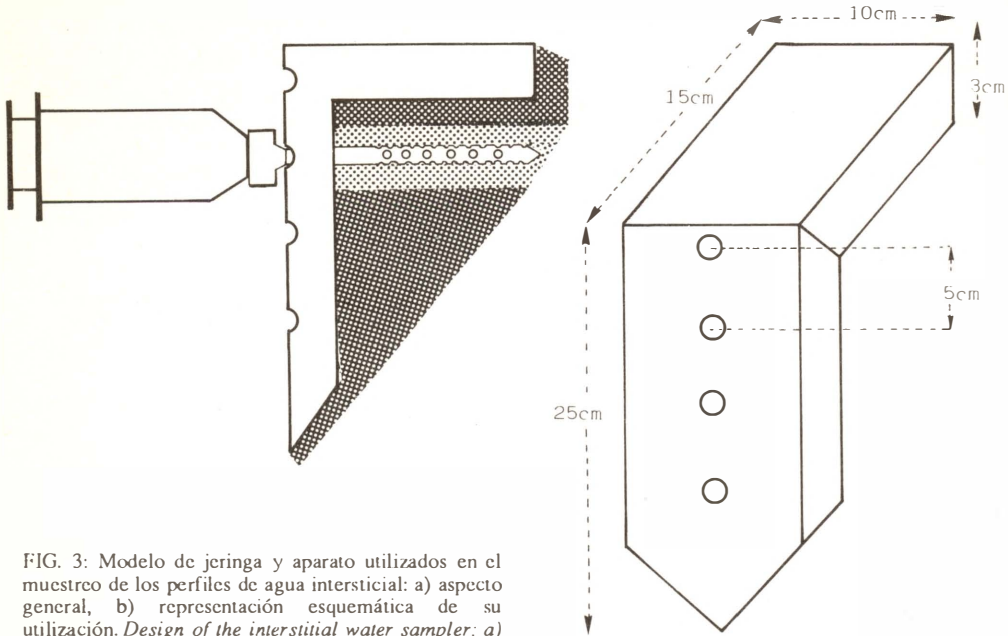


FIG. 3: Modelo de jeringa y aparato utilizados en el muestreo de los perfiles de agua intersticial: a) aspecto general, b) representación esquemática de su utilización. *Design of the interstitial water sampler: a) general aspect, b) diagrammatic representation of the sampler in operation.*

sedimento, por ejemplo entre 5 y 10 cm, o, entre 5 y 15 cm de profundidad, se extrajo con la ayuda de una cánula rígida unida a la jeringa. Esta cánula, de unos 5 mm de sección y puntiaguda, presentaba pequeñas perforaciones laterales, distribuidas en función de los niveles de profundidad deseados (fig. 3). La inserción vertical de dicha cánula en el fondo permitía la recogida de una muestra que integrara un segmento determinado de la columna de sedimento. La elaboración de perfiles verticales se consiguió muestreando a distintos niveles (0, 5, 10 y 15 cm) de profundidad en el sedimento, con la ayuda del aparato esquematizado en la misma figura. Por término medio, teniendo en cuenta la porosidad del sedimento y el volumen de agua succionado, en cada uno de los niveles se recoge el agua de una sección de unos 4 cm de espesor.

Las muestras de sedimento se recogieron manualmente mediante cilindros de metacrilato de 4.5 cm de diámetro y 40 cm de longitud.

Todas las muestras de agua se fijaron inmediatamente con cloroformo (al 4%), en la proporción de uno por mil. Tanto éstas como las de sedimento se conservaron en congelación (-20°C) hasta la fecha de su procesamiento.

En la tabla II aparecen detallados los distintos parámetros que se determinaron en las muestras, especificándose la metodología utilizada.

La cuantificación de la materia orgánica por el método de la calcinación puede conducir a muchos errores aleatorios, particularmente en sedimentos carbonatados y arcillosos (MOOK & HOSKIN, 1982; FLOREK & ROWE, 1983). Determinadas temperaturas provocan la pérdida tanto de materiales orgánicos como de inorgánicos (carbonatos, agua estructural de arcillas). Estos últimos se liberan a temperaturas elevadas, entre 700 y 1000°C (DEAN, 1974). A 1000°C las pérdidas de carbonatos suponen un 11% del peso seco y las debidas al agua estructural de arcillas un 3%. La muestra utilizada en estos ensayos tenía un

TABLA II. Parámetros analizados y metodología utilizada en su determinación. *Analytical methods and variables measured.*

Parámetro	Tratamiento	Método
Fosfato (ambiente e intersticial)	Filtración (Millipore, 0.45 μ)	KOROLEFF (1983)
Fósforo lábil	Lavado de sedimento fresco (20 gr ps en 50 ml de agua destilada) + centrifugación + filtración;	KOROLEFF (1983)
Fósforo total	Digestión ácida (SOMERS & NELSON, 1972)	KOROLEFF (1983)
Materia orgánica	Secado y calcinación ($t = 400^{\circ}\text{C}$)	
Granulometría	Disgregación y tamizado	RIVIÈRE (1977)
Minerales	Pulverizado	Difracción de rayos X
(arcillas)	(extracción y preparación)	CHUNG (1974-75)
	(ROBERT & TESSIER, 1974)	THOREZ (1975-76)

contenido de materia orgánica de un 1%. No obstante, tomando las debidas precauciones al respecto, el método de la calcinación da resultados satisfactorios comparado con otros métodos (DEAN, 1974), con la ventaja de que permite el procesamiento rápido de un mayor número de muestras. La realización de una serie de ensayos preliminares, en los que se variaba la temperatura y la duración de la calcinación, nos indujo a utilizar una temperatura de 400°C durante 6 horas.

Con respecto a otro de los parámetros determinados, el fósforo soluble o "lábil", es necesario matizar que, a lo largo de este trabajo, el término de Plábil no se utiliza en su acepción estricta y no se identifica con la definición clásica del mismo (GOLTERMAN, 1977; WILLIAMSS *et al.*, 1971; LEE *et al.*, 1980). Concretamente, con dicho término se hace referencia al fósforo extraído del sedimento en condiciones particulares. Aún así, dicha estima resultó orientadora en nuestros objetivos iniciales. Su magnitud, con respecto al fósforo total, en sedimentos con y sin fanerógamas, permitió una primera aproximación acerca del efecto de dichos macrófitos en la solubilización del fósforo.

La determinación del fósforo soluble se efectuó mediante lavados de sedimento fresco (20 g de peso seco) en 50 ml de agua destilada. Las muestras se mantuvieron en continua agitación durante 30 minutos, mediante un sistema rotatorio. No se observó una liberación ulterior de fósforo

transcurrido este tiempo. Posteriormente, las muestras se centrifugaban, filtraban (0.45 μ) y se determinaba la concentración de fosfato por el método colorimétrico habitual (KOROLEFF, 1983). Adicionalmente, en algunas muestras selectas se realizaron lavados sucesivos (10 veces) de la misma muestra de sedimento, en las condiciones que se han descrito anteriormente.

INTERACCIÓN SEDIMENTO-COLUMNA DE AGUA

Las estimas del intercambio de fosfato a través de la interfase sedimento-agua, de carácter absolutamente preliminar, se han obtenido indirectamente, calculando el flujo de fosfato debido al gradiente de concentración observado en dicha interfase, y, en alguno de los casos, directamente, cuantificando los flujos a partir de medidas *in situ*

Las estimas indirectas están basadas en la primera ley de Fick, enunciada por BERNER (1971), tal como se indica a continuación:

$$J_s = -O D_s (dc/dz)$$

Donde:

J_s es el flujo de fosfato hacia la columna de agua, expresado en $\mu\text{mol cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

O es la porosidad del sedimento, en cm^3 de agua intersticial por cm^3 de sedimento.

D_s es el coeficiente de difusión efectiva en cm^2 sedimento s^{-1} .

dc/dz es el gradiente vertical de concentración de fosfato en la interfase, expresado en $\mu\text{mol de PO}_4^{-3} \text{ cm}^{-3}$ de AI cm^{-1} de sedimento.

Hemos considerado O como la porosidad promedio de la capa superficial (entre 0 y 5 cm) de cada tipo de sedimento y suponemos que los gradientes de concentración observados son lineales en los 5 primeros centímetros. Por consiguiente, aquéllos se calculan como las diferencias entre las concentraciones de fosfato del agua intersticial superficial (nivel 0) y las del nivel de 5 cm de profundidad, siguiendo la aproximación utilizada por otros autores (LERMAN & BRUNSKILL, 1971; KELDERMAN, 1984a; CALLENDER, 1982).

Uno de los inconvenientes de las estimas indirectas de flujos reside en la obtención de un coeficiente de difusión apropiado. Su extrapolación a partir de los determinados por otros autores es compleja, ya que su valor cambia con la temperatura, con la porosidad y con las características del sedimento que influyen sobre la adsorción.

Para nuestros cálculos utilizamos el valor de $10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, que corresponde al orden de magnitud más frecuentemente citado en la literatura.

La utilización de parámetros poco adecuados (como el D_s), o perfiles de concentración poco precisos, no son las únicas limitaciones del método indirecto. Así, en determinados medios, la difusión pasiva del fósforo a favor de un gradiente de concentración es sólo una parte del flujo real. En particular, en los medios sometidos a tasas de sedimentación elevadas el reciclado rápido del material recién depositado en la interfase puede ser dominante y no quedar reflejado en las estimas indirectas. Otros procesos que se superponen a la difusión pasiva y que pueden adquirir particular relevancia en medios costeros (incrementando el flujo total entre 5 y 50 veces), son: bioturbación, hidrodinamismo (oleaje, corrientes de fondo), burbujeo de gases, etc.

El procedimiento clásicamente utilizado en las medidas directas de flujos de

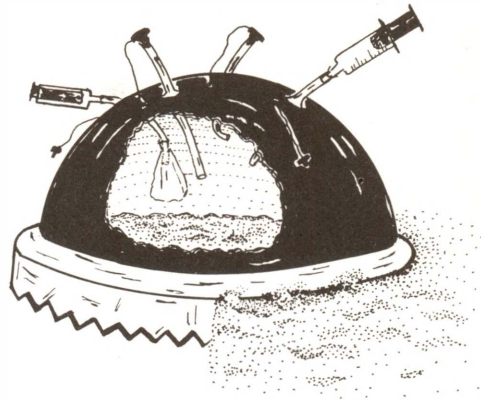


FIG. 4. Representación esquemática de la campana de incubación utilizada en las medidas de flujos. *Diagramatic representation of the incubation chamber*

nutrientes (NIXON *et al.*, 1980) se basa en encerrar en algún tipo de recipiente una porción del sistema, sedimento-agua, que se somete a distintos períodos de incubación. Los cambios de concentración observados se atribuyen a una liberación o absorción por parte del sedimento.

Siguiendo tal planteamiento, se llevaron a cabo una serie de incubaciones en la pradera de *Posidonia oceanica* de las islas Medes. Para ello se utilizaron domos opacos que contenían 27 l de agua y cubrían 0.20 m^2 de la superficie del sedimento. Como puede observarse en la fig. 4, los domos poseían una bolsa interior que compensaba los cambios de volumen ocasionados por la extracción de la muestra. Ésta se recogía mediante jeringas, a través de una serie de tubos y a intervalos de 1 o 2 horas, siendo la duración máxima de una incubación de cuatro horas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CARACTERÍSTICAS DEL SEDIMENTO

Los sedimentos estudiados están constituídos fundamentalmente por arenas medias (en las islas Medes), y de medias a finas (en la bahía del Fangar). En la figura 5 se han representado los histogramas de

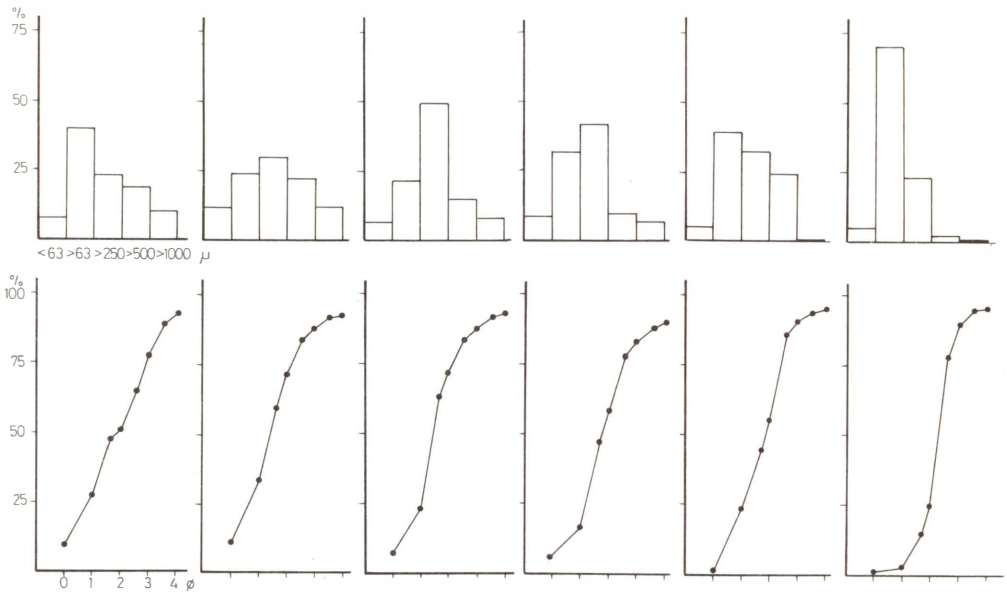


FIG. 5: Histogramas de distribución y curvas acumulativas del tamaño de grano correspondientes a las muestras de la zona del transecto de las islas Medes. *Distribution of grain size in the Medes islands sampling sites.*

distribución y las curvas acumulativas del tamaño de grano de los sedimentos recogidos en el transecto de las islas Medes. Para una información más detallada al respecto puede consultarse ROMERO (1985). Como se muestra en la figura, no existen grandes diferencias en cuanto a la composición del sedimento en el citado transecto; únicamente puede destacarse un aumento en la importancia de la fracción de arena fina (entre 63 y 250 μ m) en las dos estaciones externas (1 y 6) del mismo. En la

estación 1, la más cercana a la costa, dicha fracción constituye un 75% del total.

La composición en minerales se ha detallado en la tabla III, mientras que los minerales de la arcilla figuran en la tabla IV. Las abundancias relativas de los mismos varían según la localidad. En las islas Medes dominan los carbonatos (fundamentalmente la calcita), que representan más de un 80% del total. En cuanto a las arcillas, destaca la abundancia de la illita y la ausencia de montmorillonita.

TABLA III: Minerales identificados en el sedimento de las dos localidades. Se expresan en forma de tanto por ciento sobre el total de la muestra. *Contribution of different minerals to the sediment composition of the two sampling sites. Values as percentage of the identified fraction.*

Comunidades	Minerales						
	cuarzo	calcita	dolomita	feldespatos K	Ca-Na	micas	francolita
Medes							
<i>Posidonia</i> (6.5 cm)	8.16	72.20	10.41	4.23	2.27	2.74	0.11
sedimento	7.08	73.68	9.98	6.16	1.81	1.48	0.06
Fangar							
<i>Ruppia</i>	45.85	17.69	1.76	9.83	2.85	22.02	0.06
<i>Zostera</i>	35.71	34.24	2.33	9.32	3.68	14.73	0.13
<i>Cymodocea</i>	42.19	31.53	2.71	10.52	3.52	9.53	0.09
Sedimento	42.01	34.30	2.00	7.35	4.69	9.65	0.13

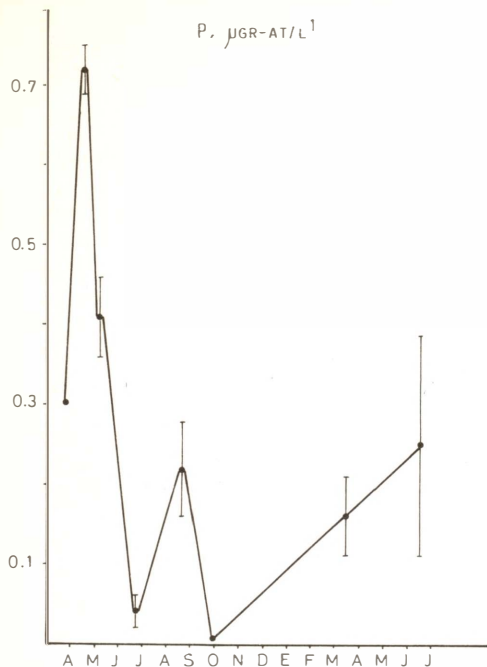


FIG. 6: Variación estacional de las concentraciones de fosfato ambiente en la estación 6.5 de la pradera de *Posidonia oceanica* de las islas Medes (durante el período marzo 1983- junio 1984. *Seasonal variation (March 1983 - June 1984) of phosphate concentrations at 6.5 m depth in the Posidonia meadow (Medes islands)*

En los sedimentos de la bahía del Fangar, la dominancia se reparte entre el cuarzo (41%) y los carbonatos (calcita+dolomita=32%). Además, aumenta la importancia de otros minerales, como los feldespatos de la serie potásica y las micas, encontrándose montmorillonita. No se observan diferencias en la composición de los sedimentos que puedan relacionarse con la presencia de fanerógamas.

CONTENIDO DE FÓSFORO EN LOS COMPARTIMIENTOS DEL SISTEMA

EL AGUA AMBIENTE

Las concentraciones de fosfato que se determinaron en ambas localidades aparecen en la fig. 6 y en la tabla V. El promedio anual de la pradera de *Posidonia oceanica* es de 0.3 ug-at P/l, destacándose un máximo primaveral de 0.7 ug-at P/l. Estos valores

TABLA IV: Minerales de arcilla encontrados en los sedimentos que se indican. Se expresan en forma de tanto por ciento sobre el total de la muestra de acuerdo con los siguientes índices: F (muy fuerte): 60-75%; f (fuerte): 45-60%; m (media): 30-45%; D (débil): 15-3%; d (muy débil): 2-1.5%; i (indicios), menos de un 2%. P=Posidonia, S=Sedimento, C=Cymodocea. Relative abundance of different clay minerals in the sediments of the two sampling sites. Values expressed as percentage of the total, according to the following index : F (very strong): 60-75%; f (strong): 45-60%; m (middle): 30-45%; D (weak): 15-30%; d (very weak): 2-1.5%; i (trace), less than 2%. P=Posidonia, S=Sediment, C=Cymodocea.

Minerales	Islas Medes		Bahía del Fangar	
	P	S	C	S
Ilita	F	F	f	f
Clorita	d	d	d	d
Vermiculita	d	d	d	d
Montmorillonita	-	-	d	d
Caolinita	D	D	D	D

conducen con los observados por PALAU y PERERA (en ROMERO, 1985) en la misma zona, aunque son algo superiores, como resultado, tal vez, de que se recogía el agua circundante a las hojas y próxima al fondo.

Los datos que presentamos para la bahía del Fangar son sólo orientativos. Una información más detallada puede encontrarse en DELGADO & CAMP (1987). Las concentraciones promedio oscilaron entre 0.3 y 0.4 ug-at P/l, y la máxima, de 1.6 ug-at P/l, se observó en el mes de julio.

En conjunto, nuestros valores son moderadamente elevados en relación con los hallados en otras zonas del Mediterráneo (MARGALEF, 1974; BALLESTEROS, 1984). Aunque ambas localidades soportan la influencia de aportes continentales (ROMERO, 1985; CAMP & DELGADO, 1987), éstos, por sí solos, no justifican la magnitud de las concentraciones observadas. Todo ello apunta hacia un enriquecimiento en fosfato, debido a su liberación desde el sedimento, como consecuencia de la remineralización bentónica, hecho que ya ha sido sugerido para muchas zonas someras (NIXON *et al.*, 1980; KELDERMAN, 1984b) y que

TABLA V: Concentraciones de fosfato, expresadas en ug-at P/l, en la bahía del Fangar. Media+ error estándar; n= número de réplicas. *Phosphate concentrations (ug-at P/l) of the water column in Fangar Bay. Mean + standar error; n = number of replicates.*

Fechas	22-10-83	28-3-84	3-7-84	27-11-84
PRS	0.40 + 0.08	0.31 + 0.05	1.64 + 0.32	0.29 + 0.04
n	9	9	5	3

frecuentemente ocasiona un desplazamiento del máximo de concentración hacia el verano, tal y como se ha observado en la bahía del Fangar (Tabla V).

EL SEDIMENTO

Fosfato disuelto en el agua intersticial

En la figura 7 se han representado los perfiles de concentración de las distintas estaciones. En la tabla VI figuran los valores encontrados en el nivel de 5 cm, en las cuatro estaciones del transecto batimétrico de la pradera de *Posidonia oceanica* de las islas Medes. Finalmente, en la tabla VII pueden observarse los resultados del muestreo estacional seguido en las comunidades de la bahía del Fangar. Estos resultados se discuten separadamente, siguiendo el esquema de objetivos enunciado en la introducción.

Como cabría esperar, las concentraciones de fosfato del agua intersticial son, al menos, 10 veces superiores a las del agua libre (véase también SUESS, 1976). En la sección comprendida entre los 0 y 5 cm, observamos valores medios de 3.82 ug-at P/l en las islas Medes y de 2.33 ug-at P/l en la bahía del Fangar.

El rango de variación de los valores es considerable en cada uno de los niveles (fig. 7); como resultado de ello, la variación debida a otras causas (entre estaciones, o entre niveles de profundidad) puede quedar enmascarada. La variación entre réplicas es máxima en los 10 cm superficiales. En estos niveles son más frecuentes los microambientes ocasionados por la actividad metabólica de microorganismos,

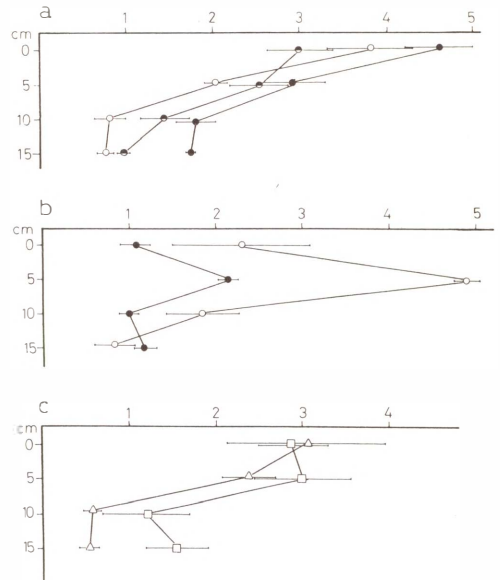


FIG. 7: Perfiles medios de concentración de fosfato en el agua intersticial. (a) en las islas Medes: (círculo vacío), 6.5 m.; (id. semilleno), 8.7 m. y (id. lleno) estación de 15 metros. (b) en la bahía del Fangar: (id. lleno), sedimento sin fanerógamas; (id. vacío), *Cymodocea*; (cuadrado), *Ruppia* y (triángulo), *Zostera*. A verage depth-profiles of interstitial phosphate concentrations. a) in Medes islands: (open circle), 6.5 m.; (half full circle), 8.7 m. and (full circle) 15 m. depth. b) in Fangar bay: (full circle), bare sediment; (open circle), *Cymodocea*; (square), *Ruppia*; (triangle), *Zostera*.

meiofauna o la macrofauna, o por la compartimentación del espacio originada por las estructuras hipogeeas de las propias fanerógamas. Los resultados de la bahía del Fangar, donde se observa una mayor variabilidad en los sedimentos con fanerógamas que en la parcela control (figs.

TABLA VI: Concentraciones de fosfato, expresadas en ug-at P/l, en el agua intersticial (nivel de 5 cm.) de las cuatro estaciones del transecto de las islas Medes. Media de tres réplicas + error estándar. *Depth variation in pore water (5 cm sediment level) phosphate concentrations of Medes islands. Mean of three replicates + standard error.*

Estaciones (m)	5	6.5	8.7	15
PRSI	2.38 + 0.08	3.05 + 0.10	3.18 + 0.03	5.77 + 0.27

TABLA VII: Variación estacional de las concentraciones de PRSI (ug-at P/I) en los sedimentos de la bahía del Fangar. Media de tres réplicas + error estándar. F: valor promedio de las tres praderas. (*): concentración no incluida en las media. *Seasonal variation of PRS concentrations (ug-at P/I) in the sediments of Fangar bay. Mean of three replicates + standard error. F: mean of values of the three meadows. (*): value not included in the mean.*

Comunidades	Fechas de muestreo				
	22-10-83	28-03-83	03-07-83	27-11-84	media anual
<i>Cymodocea</i>	7.15 + 0.51 *	1.02 + 0.12	1.45 + 0.25	0.71 + 0.08	1.01 + 0.17
<i>Ruppia</i>	1.41 + 0.02	0.70 + 0.11	1.35 + 0.06	0.78 + 0.11	1.06 + 0.19
<i>Zostera</i>	1.28 + 0.26	0.63 + 0.07	1.70 + 0.62	0.88 + 0.16	1.12 + 0.23
F	1.35 + 0.07	0.78 + 0.12	1.50 + 0.10	0.79 + 0.05	1.11 + 0.19
Sedimento	1.48 + 0.16	1.23 + 0.32	1.26 + 0.06	1.39 + 0.26	1.37 + 0.07

7 b y c) confirman la importancia de las fanerógamas como causantes de variación. No sucede lo mismo en las islas Medes, donde la heterogeneidad es muy acusada, independientemente de la presencia de *Posidonia* (fig. 7a), lo que indica que pueden existir otros factores igualmente importantes.

Variabilidad espacial y cambios estacionales en el PRS del agua intersticial.

Los resultados representados en la figura 7 evidencian un hecho muy general: que a la componente vertical se asocian las máximas variaciones de los parámetros físicos, químicos y biológicos. A pesar de la elevada heterogeneidad horizontal, a pequeña escala (entre réplicas) y a gran escala (entre estaciones), las diferencias entre los distintos niveles del sedimento representan un porcentaje elevado, entre el 50 y el 68%, de la varianza total. En todos los casos, las concentraciones son mayores en la superficie (hasta unos 10 cm de nivel), donde encontramos valores máximos de 5.38 ug-at P/I, y disminuyen en profundidad, con valores mínimos de 0.38 ug-at P/I. Las concentraciones varían poco a partir de los 10 cm, tanto entre réplicas como entre niveles, delimitándose, de este modo, la porción más "reactiva" del sedimento. En dicha sección superficial el contenido de materia orgánica suele ser superior al de los niveles más profundos (de 0.8% con respecto a 0.5%, en promedio; figura 8 b). Ello podría ser la causa de los valores de fosfato observados. No obstante, en otras ocasiones el contenido de materia orgánica

es homogéneo a lo largo del perfil (figura 8a). La relación entre ambos parámetros, materia orgánica y concentraciones de fosfato, es compleja. Si bien este último está influido por la deposición orgánica reciente, existen otros mecanismos superpuestos que, combinados, determinan la cantidad de fosfato en solución. A todo esto hay que añadir que nuestros valores de materia orgánica no reflejan únicamente el contenido de material fresco, sino también el de las sustancias más refractarias que permanecen en el sedimento, después de que una fracción desconocida del aporte primario haya sido consumida (KELLY & NIXON, 1984).

En los perfiles de concentración que hemos presentado (figura 7) destaca la frecuencia de gradientes negativos o prácticamente nulos entre los niveles de 0 y 5 cm. En las islas Medes las concentraciones disminuyen linealmente ($p < 0.01$) hasta los 10 cm. Sólo en dos de las estaciones de la bahía del Fangar (figura 7b), observamos un gradiente positivo de concentración que conduciría a la difusión pasiva del fosfato, con flujos estimados entre 4 y 27 mg de P $m^{-2} día^{-1}$ (tabla VIII). En las islas Medes medimos directamente, mediante incubaciones *in situ*, flujos que oscilaron entre -4 y 15 mg de P $m^{-2} día^{-1}$, a pesar de que el gradiente de concentración de fosfato en el sedimento no predisponía a una liberación de fósforo. Esta discordancia puede deberse, o bien a un muestreo insuficiente en la vertical del sedimento, de tal modo que no se recogían las variaciones de pequeña escala, o bien, como ya se mencionó anteriormente, a que los flujos

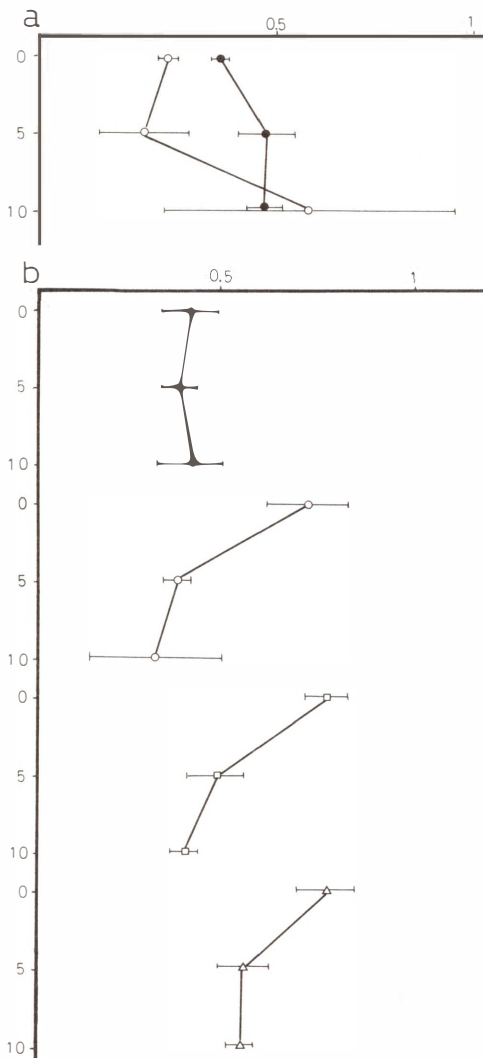


FIG. 8: Distribución vertical del contenido de materia orgánica. (a) en las islas Medes; (b) en la bahía del Fangar; (símbolos como en la fig. 7). Vertical distribution of organic matter content. a) in Medes islands; b) Fangar bay; (Symbols as in fig. 7).

están más relacionados con procesos que ocurren a nivel de la interfase sedimento-agua. Aún así, los valores que presentamos se asemejan a los que se han citado en otras zonas someras (véase la recopilación de la tabla IX).

TABLA VIII: Flujos de fosfato, en $\text{mg P m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, a través de la interfase sedimento-agua. La fecha en la que se llevaron a cabo las incubaciones se indica entre paréntesis. En la última columna figuran los valores de porosidad que se utilizaron en las estimas indirectas. Measured and calculated phosphorus fluxes ($\text{mg P m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) at the sediment-water interface. Incubation dates are shown in brackets. Porosity values used to calculate phosphorus fluxes in estimations are shown in the last column.

Comunidades	Medida in situ	FLUJOS	
		Estima indirecta	Porosidad
<i>Posidonia</i>			
(10/5/87)	-4.02	-	
(30/6/83)	15.07	-	
(27/8/83)	5.02	-	
<i>Zostera</i>	-	0	0.49
<i>Ruppia</i>	-	4.03	0.41
<i>Cymodocea</i>	-	27.27	0.47

Sin embargo, en todos los casos, la forma del perfil se aparta del modelo clásico, descrito por MORTIMER (1941, 1942), en el que las concentraciones de fosfato aumentan conforme se profundiza en el sedimento y se alcanzan niveles más reducidos, y según el cual, el equilibrio entre las dos formas de hierro (FeII/FeIII) es el mecanismo principal que gobierna la dinámica del fosfato.

Considerando la pauta de variación de las concentraciones y la composición mineralógica de nuestros sedimentos (tablas III y IV), el control debido al hierro debe de ser de escasa importancia, sobre todo si abunda el calcio (GOLTERMAN, 1984). Además, las reacciones de oxidorreducción que afectan a la solubilidad del fosfato no son tan inmediatas como parece deducirse de algunos textos clásicos.

Por una parte, la reducción del hierro ligado al fosfato parece ser un proceso poco posible en condiciones naturales, debido a la estabilidad relativamente alta del fosfato férrico (GOLTERMAN, 1984). Aún así, pueden liberarse grandes cantidades de fosfato, de los complejos de hidroxifosfato de hierro, en condiciones óxicas, permaneciendo el hierro insoluble, como resultado de la competencia entre los iones hidroxilo y fosfato (LIJKLEMA, 1976).

TABLA IX: Flujos de fosfato (F_i) a través de la interfase sedimento-agua, recopilados de la bibliografía. Se indican también los obtenidos en este estudio. *Literature values of phosphorus fluxes at the sediment-water interface*

Localidad	Tipo de sedimento	T °C	F _i (mg P/m ² día)	Referencia
Bahía de Narragansett	limo-arcila	5	3-4	NIXON et al. (1980)
		20	21	
Bahía de Narragansett	limo-arcilla	5	3	ELDERFIELD et al. (1980)
		20	15-20	
Lago Mendóta	calcáreo	4	0.6	HOLDREIN & ARMSTRONG (1980)
		23	20	
Lago Vingra	calcáreo	4	-0.6	HOLDREIN & ARMSTRONG (1980)
		23	2.5	
Lago Esrom	limos	5	0	KAMP-NIELSEN (1984)
		20	35	
Lago Esrom	arena	5	-2	KAMP-NIELSEN (1984)
		20	10	
Lago Grevelingen	arena media	5	2	KELDERMAN (1984)
		20	11	
Lago Grevelingen	arena muy fina	5	1	KELDERMAN (1984)
		20	10	
Long Island Sound	----	22	4.03	ALLER (1980)
		15	1.64	
		2	+	
Patuxent (Bahía Chesapeake)	limos y arcillas	-	12.4-5.28	BOYTON et al. (1980)
Cabo Blanco	----	-	21.58	ROWE et al. (1977)
New York Bight	----	-	-11.06-16.05	ROWE et al. (1975)
Islas Medes	arena media (calcáreo)	15	-4.02	este estudio
		19	15.07	
		23	5.02	
		22	4.03-27.3	
Bahía del Fangar (Delta Ebro)	arena fina	22	4.03-27.3	este estudio

Por otra parte, existen distintas razones para suponer que el complejo Fe(III)-PO₄ difícilmente precipita en condiciones óxicas y en agua de mar: i) el producto de solubilidad de este complejo es entre 100 y 1000 veces superior en agua de mar que en agua dulce. ii) el 90% del ortofosfato del agua de mar se encuentra en su forma iónica más soluble (HPO₄²⁻) (KELDERMAN, 1984a).

La presencia de vegetales enraizados añade una fuente más de variación de las concentraciones en la vertical del sedimento, ya que la distribución de las raíces sobre dicho eje no es homogénea. A modo de ejemplo, pueden observarse los perfiles representados en la figura 7b y c, en los que destacan valores superficiales más elevados y una disminución muy acusada al profundizar en los sedimentos recubiertos por fanerógamas.

En la tabla VII figuran los resultados del seguimiento estacional efectuado en las

comunidades de la bahía del Fangar. El análisis detallado (mediante análisis de la varianza) de las distintas fuentes de variación (presencia o no de cubierta vegetal, tipos de comunidades de fanerógamas y estacionalidad) evidencia una serie de hechos:

i) En el sedimento control las concentraciones de fosfato se mantienen constantes a lo largo del año, con un promedio anual de 1.37 ug-at P/l.

ii) Las concentraciones de fosfato de las praderas de fanerógamas no difieren significativamente entre sí (p<0.001), con un valor medio de 1.11 ug-at P/l, y son distintas (p<0.005) de las del sedimento control.

iii) En el sedimento con cubierta vegetal las variaciones estacionales son altamente significativas (p<0.005) y explican un 60 % de la varianza total.

iv) Las diferencias entre sedimento con fanerógamas y control no se mantienen

TABLA X: Fósforo total y fósforo lábil, expresados en ug P/ g peso seco, en los distintos sedimentos estudiados. *Total and labile phosphorus concentrations (ug P / g dry weigh) of the different sediments studied*

Localidad	Estación	P lábil	P total
Islas Medes	5 m	0.23-0.36	157
	6.5 m	0.21-0.34	146-165
	15 m	0.09-0.12	241-245
B. del Fangar	<i>Zostera</i>	0.08	179
	<i>Ruppia</i>	0.12	180
	<i>Cymodocea</i>	0.18	176
	Sedimento	0.08	166

constantes a lo largo del año. En las praderas las concentraciones de fosfato son inferiores ($p < 0.005$) en dos épocas del año (marzo y noviembre), y similares al control en el resto de los períodos muestreados. Teniendo en cuenta que se muestreaba la zona de mayor densidad de raíces (entre 5 y 15 cm de profundidad), ello puede atribuirse a la actividad de las fanerógamas (absorción radicular de nutrientes).

La reserva de fósforo del sedimento.

En la tabla X figuran los contenidos totales de fósforo determinados en los distintos sedimentos estudiados. Los valores oscilan poco y son de unos 160 ug P/g ps en el sedimento de *Posidonia* y de unos 180 ug P/ g ps, en promedio, en el de las fanerógamas de la bahía del Fangar. En el sedimento control de las islas Medes (estación 15) destacan valores superiores, de 240 ug P/g ps. Estas cifras son muy inferiores a las que se obtienen en sedimentos lacustres (BOSTROM *et al.*, 1982), si bien carecemos de referencias en medios más comparables al estudiado por nosotros.

LA DINÁMICA DEL FÓSFORO EN EL SEDIMENTO

La contribución del sedimento a la nutrición de las fanerógamas acuáticas es una posibilidad que no se excluye en la mayoría de los trabajos recientes

mencionados en la introducción. Sin embargo, sólo una determinada cantidad del fósforo del sedimento se encuentra en formas asimilables. La magnitud de esta fracción depende tanto de la forma en que este nutriente se encuentra retenido en el sedimento, como de los organismos implicados en la asimilación. Aunque, y como ya expusimos, en este trabajo no cuantificamos la fracción asimilable de fósforo, los resultados que presentamos en la tabla X proporcionan algunas estimas orientativas de la capacidad de los sedimentos estudiados para liberar fósforo (en las condiciones experimentales indicadas en el apartado de material y métodos).

Como puede observarse en la tabla X, los valores de fósforo soluble oscilan entre 0.03 y 0.4 ug P/g ps y son comparables a los citados por otros autores. Así, por ejemplo, MUÑOZ (1976) encuentra concentraciones entre 0.45 y 8.98 ug P/g ps en la plataforma costera frente a Castellón. En praderas de *Thalassia testudinum* PATRIQUIN (1972) determina valores de 0.75-2 ug P/g ps y, en sedimentos de arrecifes de coral ENTSCHE *et al.* (1983) dan cifras de 0.4 ug P/g ps. Las diferencias entre nuestros valores y los de la literatura pueden ser, en parte, atribuibles a causas metodológicas, ya que los autores mencionados efectúan sus lavados en agua de mar. En un ensayo posterior pudimos confirmar que la presencia de sales causaba un ligero aumento en nuestras estimas. Las causas que promueven la liberación de fósforo permanecen aún oscuras. Sin embargo a la luz de los resultados que presentamos pueden discutirse algunas de sus características, relacionadas por una parte con determinados aspectos de la dinámica de los equilibrios entre la fracción disuelta y particulada de fósforo, y por otra con la interferencia de las fanerógamas en estos equilibrios.

Con respecto al primero de los puntos mencionados, cabe decir que las dos localidades estudiadas muestran situaciones claramente diferenciadas. En el sedimento

de la bahía del Fangar, el fósforo parece estar más fuertemente retenido (tabla X), observándose valores de fósforo soluble inferiores a los de la otra localidad en los dos rangos de pH ensayados (tabla XI). Podría ser que en este comportamiento intervinieran fenómenos de adsorción. Al menos, la presencia de montmorillonita (véase la tabla IV) así lo sugiere. En las islas Medes la solubilización de fósforo está más influida por el pH, liberándose mayores cantidades a niveles bajos del mismo. Ello estaría de acuerdo con la composición, predominantemente carbonatada, de sus sedimentos, en los que, además, se ha podido identificar el carbonatofluorapatito ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4, \text{CO}_3)_3(\text{OH}, \text{F})$, también llamado francolita o fosforita. Este mineral es la forma más frecuente en agua de mar (Mc CONNELL, 1973) y podría tener un papel importante en los equilibrios entre la fracción particulada y disuelta de fósforo en sedimentos carbonatados, como sugiere PATRIQUIN (1972).

La participación del apatito en la reserva lábil de fósforo se ha ido confirmando gracias a una serie de trabajos acerca de su solubilidad. Ésta varía notablemente en función del tamaño del cristal (POSNER *et al.*, 1984), característica que incluso es más importante que la propia naturaleza química (GOLTERMAN, 1984). Las formas originadas por precipitación de cristales menores son más solubles (SMALES, 1971). El fósforo ligado al apatito puede ser una fuente utilizable en la nutrición de los organismos, como lo demuestran los trabajos experimentales de SMITH *et al.* (1977, 1978), en los que se consigue el crecimiento de bacterias y algas cultivadas en un medio de cristales de apatito como fuente exclusiva de fósforo. Determinados organismos, como los macrófitos, podrían ser más eficientes en la utilización de esta forma de fósforo (GOLTERMAN, 1984; CARIGNAN & KALFF, 1979).

En lo que se refiere a la segunda cuestión, relacionada con el papel de las fanerógamas en la dinámica del fósforo, los datos que

TABLA XI: Fósforo lábil, expresado en $\mu\text{g P/g}$ peso seco, extraído a dos valores de pH de los sedimentos que se indican. *Labile phosphorus ($\mu\text{g P/g dry weight}$) extracted at two different pH values from different sediments.*

pH	Islas Medes	Bahía del Fangar	
	Estacion 6.5	<i>Ruppia</i>	<i>Zostera</i>
5.5	0.26 + 0.01	0.03 + 0.01	0.03 + 0.01
11	0.02 + 0.00	0.04 + 0.01	0.03 + 0.00

presentamos permiten la discusión del efecto de estos vegetales en la solubilización de dicho nutriente, ya que la complejidad de los equilibrios entre las tres formas de fósforo que hemos considerado, y la falta de una base experimental de laboratorio más pormenorizada no permiten una conclusión definitiva. En la figura 9 hemos representado los valores que toman las tres formas de fósforo (disuelto, soluble y particulado) en las distintas estaciones del transecto de la pradera de *Posidonia oceanica* de las islas Medes. Cabe recordar que a este transecto se asocia una disminución de la densidad de dicha especie (según datos de ROMERO, 1985). Como puede observarse en la mencionada figura, las concentraciones de fosfato aumentan a lo largo del transecto hasta la estación 15, exterior a la pradera, donde se encuentra un máximo de concentración. En esta estación el fósforo total retenido en el sedimento es muy superior y el fósforo soluble, inferior, al que se determinó en las demás estaciones de la pradera. En resumen, puede decirse que el sedimento recubierto por *Posidonia oceanica* mantiene una cantidad superior de fósforo en formas más solubles, en equilibrio con concentraciones menores en el agua intersticial. La mayor solubilidad del fósforo en el interior de la pradera podría ser el resultado de la absorción de fosfato por estos vegetales, ya que dicha absorción parece mediada, al menos en parte, por una bomba de protones. Este mecanismo potenciaría la existencia de microambientes con valores de pH algo inferiores a los habituales, como observa PATRIQUIN

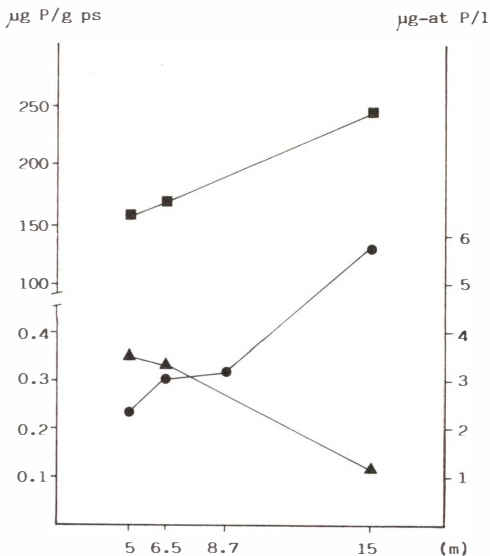


FIG. 9: Variación de las concentraciones de las tres formas de fósforo consideradas (círculo), fosfato disuelto en el agua intersticial; (triángulo), fósforo lábil; (cuadrado), fósforo total del sedimento a lo largo del gradiente batimétrico de las islas Medes. *Concentrations of pore water dissolved phosphorus (circle), labile phosphorus (triangle) and total phosphorus (square), along a depth gradient in the Medes islands.*

(1972) en praderas de *Thalassia*, y conduciría a la solubilización del fósforo retenido en formas carbonatadas, como el carbonatofluorapatito.

La hipótesis presentada es sugerente por dos razones. Por una parte supone un papel activo de *Posidonia* en el ciclo del fósforo, agilizando el intercambio de las formas particuladas a las disueltas. Por otra, la posibilidad de utilizar la reserva de fósforo del sedimento representa una independización del ciclo de producción de esta especie respecto a las fluctuaciones del medio, como ya sugirió ROMERO (1985).

Finalmente, queda por dilucidar si el crecimiento de las especies de fanerógamas consideradas puede estar limitado por la disponibilidad de fósforo. La importancia relativa del sedimento frente a la columna

de agua en la nutrición de estas plantas es variable, en función de cada especie y de las condiciones ambientales. Sin embargo, parece existir un cierto acuerdo sobre la importancia del sedimento como fuente de fósforo en períodos de penuria en la columna de agua (BRIX & LYNGBYE, 1985). Para averiguar si en el sedimento existen suficientes recursos para satisfacer los requerimientos de las plantas, consideramos una parcela de sedimento de 1 m² con 0.15 m de profundidad (espesor susceptible de ser explotado por las raíces). En tal parcela y tomando como ejemplo a *Posidonia oceanica*, la cantidad de fósforo soluble en el agua intersticial es de unos 4 mg. Para satisfacer la demanda anual de esta especie, estimada en 885 mg P m⁻² por DELGADO (1985), la tasa de renovación de este fósforo tiene que ser de algo más de 0.5 veces al día. El fósforo necesario para compensar este consumo se supliría a partir de la fracción lábil intermedia. Para la cuantificación de esta fracción hemos utilizado los datos representados en la fig. 10, por proporcionar una estima mínima y más a largo plazo de la misma. En dicha figura se observa que el fósforo soluble, extraído del sedimento de *Posidonia* decrece exponencialmente (en los sucesivos lavados) hasta un valor de 0.07 µg P g ps⁻¹, similar al obtenido en el control y que también se asemeja al que encuentran otros autores (PATRIQUIN, 1972; ENSCH *et al.*, 1983), después de experimentos más prolongados (de unos 20 lavados). Estos datos indican que parece existir una capacidad ilimitada de suministrar fósforo en forma disuelta. El valor que encontramos en el equilibrio (0.07 µg P g ps⁻¹) representa unos 15 mg de fósforo por lavado en nuestra hipotética parcela. Dicha cantidad supera ampliamente las necesidades de la planta, por lo que puede concluirse que con el fósforo disponible en el sedimento la planta tiene cubiertas sus necesidades nutricionales. Cálculos similares nos llevan a la misma conclusión con respecto a las otras especies.

CONCLUSIONES

De los resultados discutidos en este trabajo pueden destacarse algunos aspectos:

1. La fanerógamas marinas son muy importantes en la dinámica fósforo. Por una parte son la causa de heterogeneidad y modifican la distribución vertical del PRS intersticial. Por otra parte, ejercen una clara influencia en los equilibrios entre las formas particuladas y disueltas del fósforo en relación con las características del sedimento. Esto se manifiesta tanto en la concentración de PRS intersticial como en la relación P lábil/P total que, concretamente en el sedimento de *Posidonia oceanica*, es superior a la que se observa en un sedimento control sin recubrimiento de fanerógamas

2. Considerando la reserva nutricional que proporciona el sedimento y que la asimilación foliar de fosfatos puede estar favorecida, como consecuencia de las concentraciones relativamente altas en el agua y del moderado hidrodinamismo característico de estos sistemas, podemos concluir que la producción primaria de las fanerógamas estudiadas no está limitada por la disponibilidad de fósforo.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Ramon Margalef, Olga Delgado, Javier Romero, Jordi Camp, Agustín Lobo y Jordi Rull por sus críticas y colaboración.

BIBLIOGRAFÍA

ALLER, R. C. 1980.. Relationships of Tube-Dwelling Benthos with sediment and overlying water chemistry. En: Marine Benthic dynamics. TENORE, K.R. & COULL, B.C. (eds.): 285-310. Univ. South Carolina Press.
 BALLESTEROS, E. 1984. *Els vegetals i la zonació litoral: espècies, comunitats i factors que influeixen en la seva distribució*. Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona.
 BARKO, J.W. & SMART, R.M. 1979. The role of *Myriophyllum spicatum* in the mobilization of sediment phosphorus. In: *Pro. on Aquatic plants, lake management, and ecosystem consequences of lake harvesting*. Madison. Wisconsin.

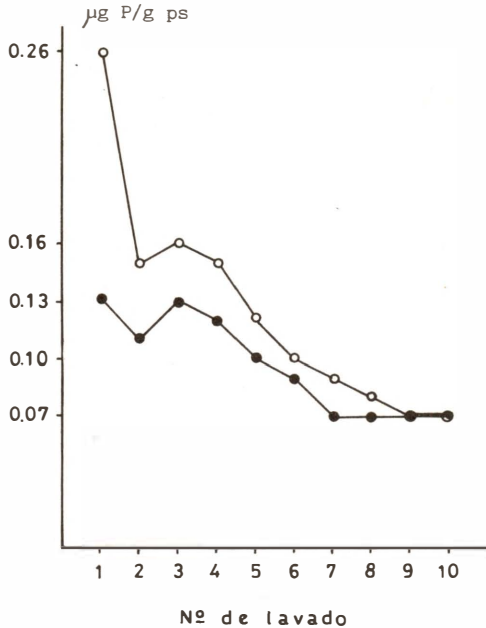


FIG. 10: Fósforo lábil liberado al medio en 10 lavados sucesivos del sedimento de *Posidonia*, estación de 6.5 m (círculo vacío), y del sedimento de la estación de 15 metros (círculo lleno). *Labile phosphorus recovered from 10 successive washings of Posidonia sediment (open circle), and bare sediment (full circle) in the Medes island.*

Este trabajo ha sido realizado con una subvención de la Comisión asesora de Investigación Científica Y Técnica (CAICYT).

BARKO, J.W. & SMART, R.M. 1980. Mobilization of sediment phosphorus by submersed freshwater macrophytes. *Freshwater Biology*, 10: 229-238.
 BARKO, J.W. & SMART, R.M. 1981. Sediment-based nutrition of submersed macrophytes. *Aquatic Botany*, 10: 339-352.
 BERNER, R.A. 1971. *Principles of Chemical Sedimentology*. Mc Graw-Hill.
 BOSTRÖM, B., JANSSON, M. & FORSBERG, C. 1982. Phosphorus release from lake sediments. A literature review. *Arch. Hydrobiol. Beih.*, 18: 5-59.
 BOYNTON, W.R., KEML, M.K. & OSBORNE, C.G. 1980. Nutrient fluxes across the sediment-water interface in the turbid zone of a coastal plain

- estuary. En: *Estuarine Perspectives*: 93-109 (V.S. KENNEDY, ed.)
- BRIX, H. & LYNGBY, J.E.L. 1985. Uptake and translocation of phosphorus in eelgrass (*Zostera marina* G.). *Mar. Biol.*, 90: 111-116.
- CALLENDER, E. 1982. Benthic phosphorus regeneration in the Potomac river estuary. *Hydrobiologia*, 92: 431-446.
- CAMP, J. & DELGADO, M. 1987. Hidrografía de las bahías del delta del Ebro. *Inv. Pesq.*, 51(3): 351-369.
- CARIGNAN, R. & KALFF, J. 1979. Quantification of the sediment phosphorus available to aquatic macrophytes. *J. Fish. Res. Board. Can.*, 36: 1002-1005.
- CARIGNAN, R. & KALFF, J. 1980. Phosphorus sources for aquatic weeds: water or sediments. *Science*, 207 (4434): 987-988
- CHUNG, F.H. 1974a. Quantitative interpretation of X-ray diffraction patterns of mixtures. I. matrix-flushing method for quantitative multicomponent analysis. *Journal of Applied Crystallography*, 7: 519-525.
- CHUNG, F.H. 1974b. Quantitative interpretation of X-ray diffraction patterns of mixtures. II. Adiabatic principle of X-ray diffraction analysis of mixtures. *Journal of Applied Crystallography*, 7: 526-531.
- CHUNG, F.H. 1975. Quantitative interpretation of X-ray diffraction patterns of mixtures. III. Simultaneous determination of a set of reference intensities. *Journal of Applied Crystallography*, 8: 17-19.
- DEAN, W.E., jr. 1974. Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: comparison with other methods. *J. Sedim. Petrol.*, 44 (1): 242-248.
- DELGADO, M. & CAMP, J. 1987. Abundancia y distribución de nutrientes inorgánicos en las bahías del delta del Ebro. *Inv. Pesq.*, 51(3): 427-441.
- DELGADO, O. 1986. Contenido de fósforo en los tejidos de fanerógamas marinas del Mediterráneo occidental y su relación con la dinámica de cada especie. *Oecologia aquatica*, 8: 139-151.
- ELDERFIELD, H., LUEDTKE, N., McCAFFREY, R.J. & BENDER, M. 1981. Benthic flux studies in Narragansett Bay. *Am. J. Science*, 281:768-787.
- ENTSCH, B.; BOTO, K.G.; SIM, R.G. & WELLINGTON, J.T. 1983. Phosphorus and nitrogen in coral reef sediments. *Limnol. & Oceanogr.*, 28 (3): 465-476.
- FLOREK, R.J. & ROWE, G.T. 1983. Oxygen consumption and dissolved inorganic nutrient production in marine coastal and shelf sediments of the Middle Atlantic Bight. *Int. Revue. ges. Hydrobiol.*, 68 (1): 73-112.
- FRESI, E. & SAGGIOMO, V. 1980. Phosphorus uptake and transfer in *Posidonia oceanica* (L.) Delile. *XXVIIIth Congress and Plenary Assembly of ICSEM*, Cagliari. Italy.
- GOLTERMAN, H.L. 1977. Sediments as a source of phosphate for algal growth. In: GOLTERMAN, H.L. (Ed.), *Interaction between sediments and freshwater*, 286-293. Dr. W. Junk B.V., The Hague.
- GOLTERMAN, H.L. 1984. Sediments, modifying and equilibrating factors in the chemistry of freshwater. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 22.
- GRASSHOFF, K.; EHRHARDT, M. & KREMLING, K. (Eds.). 1983. *Methods of seawater analysis*. Verlag Chemie. Weinheim.
- HARGRAVE, B.T. 1980. Factors affecting the flux of organic matter to sediments in a marine bay. In: TENORE, R.K. & COULL, B.C. (Eds.), *Marine Benthic Dynamics*, 243-264. University of South Carolina Press.
- HOLDREN, G.C.J. & ARMSTRONG, D.E. 19980. Factors affecting phosphorous release from intact lake sediment cores. *Environ. Science & Technol.*, 14(1): 79-87.
- KELDERMAN, P. 1984a. Sediment-water exchange in lake Grevelingen under different environmental conditions. *Neth. J. Sea Res.*, 18 (3/4): 286-311.
- KELDERMAN, P. 1984b. Nutrient concentrations in the interstitial water of lake Grevelingen sediment: effects of sediment redistribution and benthic primary production processes. *Neth. J. Sea Res.*, 18 (3/4): 312-336.
- KAMP-NIELSEN, L. 1974. Mud-water exchange of phosphate and other ions in undisturbed sediment cores and factors affecting exchange rates. *Arch. Hydrob.*, 73: 218-237.
- KELLY, J.R. & NIXON, S.W. 1984. Experimental studies of the effect of organic deposition on the metabolism of a coastal marine bottom community. *Marine Ecology*, 17: 157-169.
- KOROLEFF, F. 1983. Determination of nutrients. In: *Methods of seawater analysis* (GRASSHOFF, K., EHRHARDT, M. & KREMLING, K., eds.): 125-187. 2nd. edition. Verlag Chemie. Weinheim.
- LEE, G.F.; JONES, R.A. & RAST, W. 1980. Availability of phosphorus to phytoplankton and its implication for phosphorus management strategies. In: ARBOR, A., *Phosphorus management for lakes*: 259-308. Interscience.
- LERMAN, A. & BRUNSKILL, G.J. 1971. Migration of major constituents from lake sediments into lake water and its bearing on lake water composition. *Limnol. & Oceanogr.*, 16: 880-890.
- LIJKLEMA, L. 1976. The role of iron in the exchange of phosphate between water and sediment. In: GOLTERMAN, H.L. (Ed.), *Interactions between sediments and fresh water*: 313-317. Dr.W. Junk B.V., The Hague.
- MARGALEF, R. 1974. *Ecologia*. Omega. Barcelona.
- MOOK, D.H. & HOSKIN, Ch.M. 1982. Organic determinations by ignition: caution advised. *Est. Coast. Shelf. Sci.*, 15: 697-699.
- MORTIMER, C.H. 1941. The exchange of dissolved substances between mud and water in lakes (parts I and II). *J. Ecol.*, 29: 280-329
- MORTIMER, C.H. 1942. The exchange of dissolved substances between mud and water in lakes (parts III, IV, summary and references). *J. Ecol.*, 30: 147-201.
- MUÑOZ, F. 1976. Estudio de los sedimentos marinos de la plataforma costera frente a las costas de Castellón. *Inv. Pesq.* 40 (2): 401-453.
- Mc CONNELL, D. 1973. *Apatite; its crystalchemistry, mineralogy, utilization and geologic and biologic occurrences*. Springer.

- Mc ROY, C.P. & BARSDATE, R.J. 1970. Phosphate absorption in eelgrass. *Limnol. & Oceanogr.*, 15: 6-13.
- NIXON, S.W.; KELLY, J.R.; FURNAS, B.N.; OVIATT, C.A. & HALE, S.S. 1980. Phosphorus regeneration and the metabolism of coastal marine bottom communities. In: TENORE, K. & COULL, B. (Eds.), *Marine benthic dynamics*: 219-242. University of South Carolina Press. Columbia.
- PARSONS, T.R., TAKAHASHI, M. & HARGRAVE, B. 1977. *Biological Oceanographic Processes*. Pergamon Press. London.
- PATRIQUIN, D. 1972. The origin of nitrogen and phosphorus for growth of the marine angiosperm *Thalassia testudinum*. *Mar. Biology*, 15: 35-46.
- PENHALE, P.A. & THAYER, G.W. 1980. Uptake and transfer of carbon and phosphorus by eelgrass (*Zostera marina* L.) and its epiphytes. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 42: 113-123.
- PÉREZ, M. & CAMP, J. 1986. Distribución espacial y biomasa de las fanerógamas marinas de las bahías del delta del Ebro. *Inv. Pesq.*, 50 (4): 519-530.
- POSNER, A.S., BLUMENTHAL, N.C. & BETTS, F. 1984. Chemistry and structure of precipitated hydroxyapatites. In: NRIAGU, J.O. & MOORE, P.B. (Eds.), *Phosphate minerals*, 330-350. Springer-Verlag.
- RIVIERÉ, A. 1977. *Methodes granulométriques: techniques et interpretations*. Masson. Paris.
- ROMÉRO, J. 1983. Premières données sur la production primaire d'un herbier de *Posidonia oceanica* in Méditerranée Occidentale (Côtes Catalanes). *Rapp. Comm. int. Mer. Médit.* Mónaco.
- ROMERO, J. 1985. *Estudio ecológico de las fanerógamas marinas de la costa catalana: producción primaria de Posidonia oceanica (L.) Delile en las islas Medas*. Tesis Doctoral. Facultad de Biología. Universidad de Barcelona, 262 pp.
- ROS, J.D., OLIVELLA, I. & GILI, J.M. 1984. *Els sistemes naturals de les illes Medes*. Institut d'Estudis Catalans. Arxius Secció Ciències, 73. Barcelona.
- ROWE, G.T., CLIFFORD, C.H. & SMITH, K.L. 1977. Nutrient regeneration in sediments off Cap Blanc Spanish Sahara. *Deep Sea Res.*, 24: 57-63.
- ROWE, G.T., CLIFFORD, C.H., SMITH, K.L. & HAMILTON, P.L. 1975. Benthic nutrient regeneration and its coupling to primary productivity in coastal waters. *Nature*, 255.
- SMALES, F.C. 1971. The Kelvin effect and crystal growth of hydroxyapatite. In: FEARNHEAD, R.W. & STACK, M.V. (Eds.), *Tooth Enamel II*, 187-196. *Wright. Bristol*.
- SMITH, E.A.H.; MAYFIELD, C.I.; WONG, P.T.S. & SILVERBERG, B.A. 1977. Effect of naturally occurring apatites on growth and morphology of algae. *Can. J. Microbiol.*, 23: 1188-1196.
- SMITH, E.A.H.; MAYFIELD, C.I. & WONG, P.T.S. 1978. Naturally occurring apatite as a source of orthophosphate for growth of bacteria and algae. *Microbiol. Ecol.*, 4: 105-117.
- SUESS, E. 1976. Nutrients near the depositional interface. In: Mc CAVE, I.N. (Ed.), *The benthic boundary layer*: 57-59. Plenum Press. New York.
- THOREZ, J. 1975. *Phyllosilicates and clay minerals* (G. LELLOTE, ed.). Dison. Belgique.
- THOREZ, J. 1976. *Practical identification of clay minerals* (G. LELLOTE, ed.). Dison. Belgique.
- WILLIAMS, J.D.H.; SYERS, J.R.; HARRIS, R.F. & ARMSTRONG, D.E. 1971. Fractionation of inorganic phosphate in calcareous lake sediments. *Soil. Sci. Soc. Am. Proc.*, 35: 250-255.

