

EL METABOLISMO COMO DETERMINANTE DE INTERCAMBIO DE NUTRIENTES EN SEDIMENTOS RICOS EN MATERIA ORGANICA EN UNA LAGUNA COSTERA

METABOLISM AS DETERMINANT OF NUTRIENT EXCHANGE IN ORGANIC-RICH SEDIMENTS OF A COASTAL LAGOON

Virgilio Arenas Fuentes¹
Guadalupe de la Lanza Espino²

¹ Instituto de Ciencias del Mar y Limnología
² Instituto de Biología
Universidad Nacional Autónoma de México
Apartado Postal 70-153
04510 México, D.F., México

Arenas Fuentes, V. y de la Lanza Espino, G. (1990). El metabolismo como determinante de intercambio de nutrientes en sedimentos ricos en materia orgánica en una laguna costera. *Metabolism as determinant of nutrient exchange in organic-rich sediments of a coastal lagoon*. *Ciencias Marinas*, 16(3): 45-62.

RESUMEN

Se realizaron experimentos *in situ* en una laguna costera típica para evaluar los efectos de los procesos físico-químicos y actividades bióticas en el intercambio de nutrientes en la interfase agua-sedimento. La evolución del oxígeno disuelto, y concentración de fosfatos y amonio fue determinada bajo las siguientes condiciones: aeróbicas, anaeróbicas, incremento de los contenidos de amonio y fosfatos e inhibición microbiológica y macrobentónica. Se presentó una adsorción inmediata bajo condiciones óxicas para ambos iones; la adsorción de fósforo continuó a niveles bajos de oxígeno. El estancamiento condujo a la liberación de PO_4^- y NH_4^+ . Las condiciones físico-químicas fueron un componente importante en la movilización de nutrientes; más del 50% del consumo de oxígeno fue demanda química y 2/3 partes del consumo biótico fue relacionado con el macrobentos. El movimiento del fósforo fue más efectivo (15%) por actividades macrobentónicas. La movilidad de amonio fue de 1/3 debida a acciones microbiales y 1/4 utilizado por la producción fitoplanctónica. Los sedimentos liberaron o fijaron nutrientes en cantidades altas dependiendo de las condiciones; el contenido de materia orgánica oxidable fue la de menor importancia en la movilidad.

ABSTRACT

Some experiments *in situ* were performed in a typical coastal lagoon in order to evaluate the effects of physico-chemical processes and biotic activities on the nutrient exchange at the sediment-water interface. Evolution of dissolved oxygen, phosphate and ammonium concentrations were monitored under the following different conditions: aerobic, anaerobic, increasing phosphate and ammonium concentrations, and microbial and macrobenthic inhibition. Immediate adsorption under oxic conditions was registered for both ions. Phosphate adsorption continues at low oxygen levels. Stagnation provides conditions for release of PO_4^- and NH_4^+ . Physico-chemical conditions were the main component for nutrient mobility, more than 50% of oxygen

consumption was the chemical demand, and 2/3 of biotic consumption was macrobenthic related. Phosphorus movement was more active (15%) by macrobenthic activities. Flow of ammonium was 1/3 by microbial pathways, and 1/4 used up by phytoplankton production. Sediments may release or fix nutrients in high quantities depending on conditions; oxidable organic matter content was less important in the mobility.

INTRODUCCION

El papel de los sedimentos en el ciclo de nutrientes en la zona costera, ha sido estudiado desde el punto de vista de la productividad: Engvall (1978), Holm (1978), y Arenas y de la Lanza (1983) consideran al sedimento como una trampa de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo en diferentes formas.

Nixon *et al.* (1980) sugieren que la mineralización de la materia orgánica en sedimentos puede ser factor de control en la disponibilidad de nutrientes; Boynton *et al.* (1980) muestran que la liberación de amonio y fósforo inorgánico puede proveer de 0-190% y 52-330% respectivamente de la demanda fotosintética diaria. La velocidad y producto de la mineralización de la materia orgánica, varían de acuerdo a la composición de la materia orgánica original, la naturaleza de los sedimentos inorgánicos (de la Lanza, 1987) y las condiciones físico-químicas de la columna (Serruya *et al.*, 1974).

Noventa y dos por ciento del egreso anual de fósforo en las Lagunas de Huizache y Caimanero es a través de los sedimentos y el 1% es regresado por difusión y resuspensión al agua como ortofosfatos. El secado y resquebrajamiento de los sedimentos durante la época de sequía incrementa la disponibilidad de fósforo (Arenas y de la Lanza, 1983). El 2% de nitrógeno en estas lagunas proviene de los sedimentos como producto del efecto de desecación y resquebrajamiento (Arenas, 1979).

La disponibilidad de nutrientes es regulada por el estado de redox de los sedimentos adyacentes y principalmente en la interfase con el agua; la oxidación determina que el fósforo puede ser atrapado en los sedimentos y liberado por la reducción (Holm, 1978). Sin embargo, Propp *et al.* (1980) y Klump y Martens (1981) encontraron que en condiciones aeróbicas el fósforo es liberado del sedimento por la descomposición microbiológica.

INTRODUCTION

The role of sediments in the cycling of nutrients in the coastal zone has been studied from the point of view of productivity. Engvall (1978), Holm (1978) and Arenas and de la Lanza (1983) consider the sediment as a trap of nutrients, mainly nitrogen and phosphorus in different forms, that regulate the production of the water column.

Nixon *et al.* (1980) suggested that mineralization of organic matter in the sediments can be a controlling factor of nutrient availability. Boynton *et al.* (1980) showed that the release of ammonium and inorganic phosphorus could provide from 0-190% and 52-330% respectively of the daily photosynthetic demands. The speed and products of mineralization of organic matter vary according to the composition of the original material, the nature of the organic sediments (de la Lanza, 1987) and the physico-chemical conditions of the column (Serruya *et al.*, 1974).

Ninety-two percent of the annual losses of phosphorus in Huizache and Caimanero Lagoons found its way to the sediments and 1% is returned back to the water as orthophosphate by diffusion and resuspension. The drying and cracking of sediments during the dry season increases the availability of phosphorus (Arenas and de la Lanza, 1983). Nitrogen in Huizache and Caimanero Lagoons is 2% coming from the sediments and this is due to dry and cracking effects (Arenas, 1979).

Availability of nutrients is regulated by redox state of underlying sediments and mainly at the water-sediment interface. Oxidation determines that phosphorus could be trapped in sediments and reduction releases it (Holm, 1978). However, Propp *et al.* (1980) and Klump and Martens (1981) found that under aerobic conditions phosphorus is released from sediments because of microbial decomposition. Ammonium is also released

gica, y el amonio puede ser redistribuido bajo condiciones aeróbicas y anaeróbicas (Engvall, 1978; Enoksson y Rűden-Berg, 1983).

El proceso bioquímico de liberación no es controlado por la carga o cantidad de materia orgánica como Edwards (1978) sugiere, sino por su naturaleza, estado y microambiente biótico (de la Lanza, 1987).

El papel de los organismos macrobentónicos está bien ilustrado en el trabajo de Kristensen (1985) con *Nereis*. Petr (1977), Bågander (1977), y Engvall (1978) han determinado el papel principal de los elementos bióticos en el intercambio de nutrientes en el sistema sedimento-agua. Hallberg *et al.* (1976) han demostrado la importancia de los estudios de los sedimentos *in situ* para comprender la movilidad de nutrientes en las costas templadas con variación estacional.

El período de lluvias y sequías puede determinar la naturaleza y condiciones de la materia orgánica disponible, también regular el proceso de descomposición y de detritificación. El papel *in situ* del metabolismo biótico en el intercambio de nutrientes entre la capa superficial de agua somera y los sedimentos orgánicos fangosos de las lagunas costeras, es el objetivo de este trabajo.

AREA DE ESTUDIO

La Laguna de Huizache-Caimanero está localizada en la costa del Pacífico Mexicano (Fig. 1). Dos cuerpos muy someros de agua están separados del mar por una barra de arena bien desarrollada. Cada cuerpo de agua se comunica con el mar por unos canales muy sinuosos. Estos canales abren a deltas de los ríos que bordean al sistema lagunar. El intercambio de agua con el océano adyacente se realiza principalmente a través de los canales. Durante la época de lluvias, de julio a octubre, conducen el agua salobre a la laguna y de octubre en adelante, el intercambio es principalmente de agua marina.

La salinidad varía ampliamente durante el año, alcanzando más de 60‰ durante la época de sequía, cuando la laguna reduce su extensión en más de un 70% del nivel más alto, dependiendo del flujo de descarga de los ríos y los cambios anuales en el nivel del mar.

from sediments under both aerobic and anaerobic conditions (Engvall, 1978; Enoksson and Rűden-Berg, 1983).

The biogeochemical process is regulated not so much by the load of the amount of organic matter as Edwards (1978) suggested, but by their nature, state and biotic micro-environment (de la Lanza, 1987).

The role of macrobenthic components is well-illustrated in the work of Kristensen (1985) with *Nereis*. Petr (1977), Bågander (1977) and Engvall (1978) refer the meaning role of the biotic elements in the exchange of nutrients in sediment-water systems. Hallberg *et al.* (1976) have shown the importance of *in situ* studies to understand the mobility of nutrients in coastal temperate zones under seasonal variation.

Flood and dry seasons can determine the nature and conditions of the organic matter available and also regulate its decomposition and detritification processes. The role *in situ* of biotic metabolism in the exchange of nutrients between overlying shallow water and the muddy organic sediments of coastal lagoons was the objective of this paper.

STUDY AREA

The Huizache-Caimanero Lagoon is a typical coastal lagoon located on the Pacific coast of Mexico (Fig. 1). Two very shallow bodies of water are separated from the sea by a well-developed sand bar. Each body of water communicates with the sea by very winding channels. These channels open to the deltas of the two rivers that border the lagoonal system. The exchange of water takes place mainly through the channels. During the rainy season, from July to October, they convey brackish water to the lagoons and from October onward the exchange is mainly of sea water.

Salinity varies widely during the year reaching more than 60‰ during the dry season when the lagoons reduce their extent in more than 70% of the highest level, depending on the flux of the river discharge and the annual sea level changes.

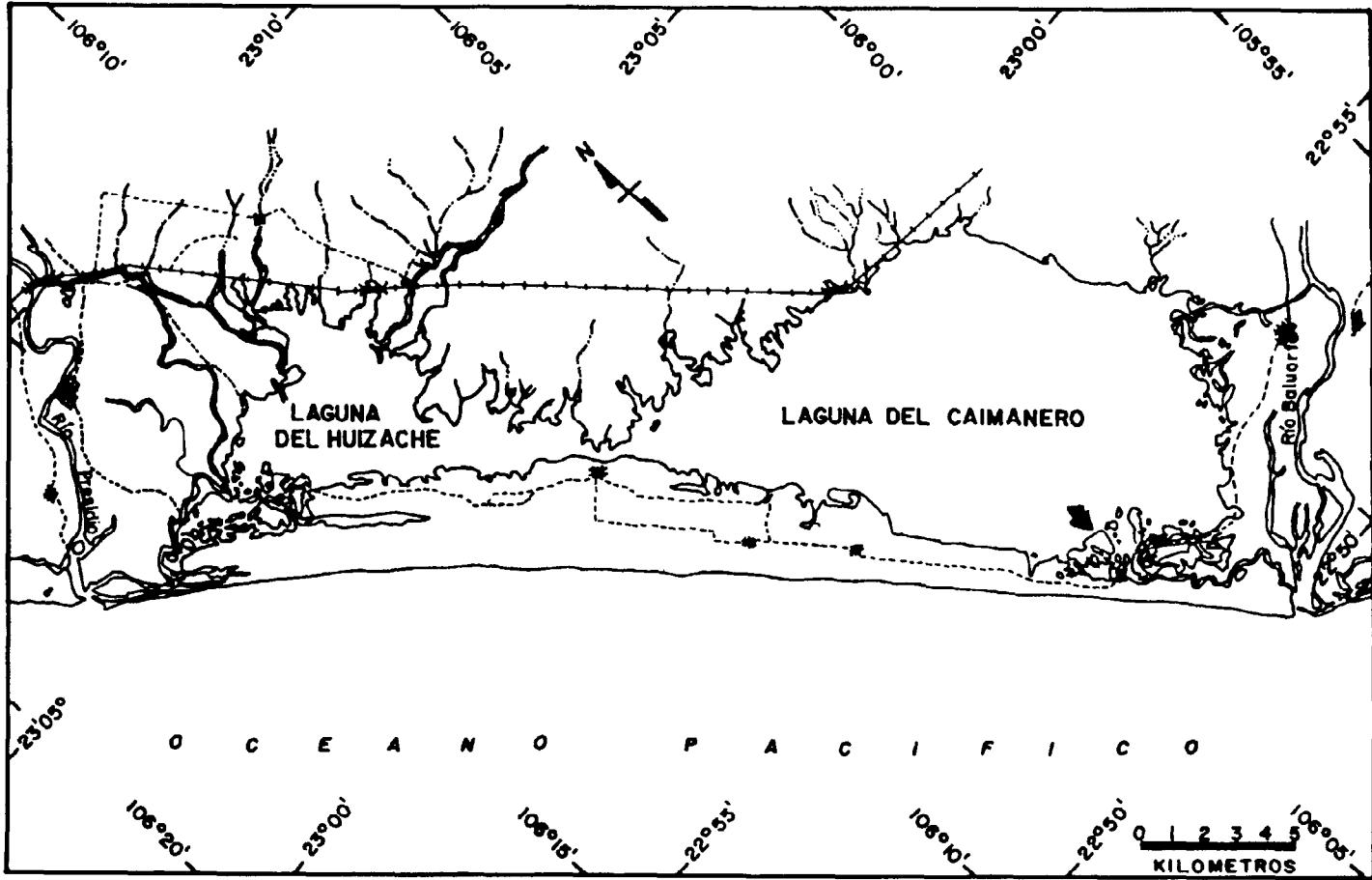


Figura 1. Sitio experimental en el sistema lagunar Huizache y Caimanero, Sinaloa, México.
Figure 1. Experimental site in the Huizache and Caimanero lagoon system, Sinaloa, Mexico.

Las áreas desecadas son colonizadas por halofitas que crecen en los sedimentos resquebrajados hasta que se vuelven a inundar estas áreas. La descomposición y detritificación de la materia producida por las halofitas, son la fuente principal de productos orgánicos (Arenas y de la Lanza, 1983). Las postlarvas y juveniles del camarón colonizan al sistema lagunar y después de crecer regresan al medio marino. En este período la mayoría de los camarones son capturados en el interior del sistema lagunar o durante su salida. Se han realizado diversos intentos empíricos para incrementar la producción del camarón, causando cambios profundos al sistema (Soto, 1969).

METODOLOGIA

Los experimentos *in situ* fueron desarrollados en una localidad cerca de la entrada del canal de la Laguna Caimanero (principal cuerpo de agua) (Fig. 1) durante enero, cuando la época de sequía está por terminar, y en mayo cuando la descomposición de halofitas está iniciándose.

De nueve a doce tubos de PVC con un diámetro interno de 15 cm, fueron introducidos en los sedimentos aproximadamente 10 cm de profundidad a una distancia al azar, incluyendo un tirante de agua de 50 cm y alrededor de 9 litros. La superficie de agua fue cubierta con una mica de poliestireno provista con un orificio para tomar muestras.

La adsorción inmediata (IA) de adiciones de 1, 3, 6, 9, 12 y 24 $\mu\text{g-at N-NH}_4/\text{l}$ y 5, 10, 20, 30, 50, 70, 150, 200 y 300 $\mu\text{g-at P-P}_04/\text{l}$ fue estimada después de dos horas. El intercambio con los sedimentos fue evaluado después a 24, 48 y en algunos experimentos hasta 72 y 144 h. Cada prueba se realizó por duplicado y triplicado.

Para la inhibición de la actividad microbológica se empleó penicilina (150 mg/l) y cloromicetín (50 mg/l) y para la total incluyendo el macrobentos, formol al 5%.

Para la determinación de la actividad productiva y respiratoria de la columna de agua, se emplearon bolsas de plástico translúcido y oscuras llenas con 50 litros de agua

The dried flats are colonized by halophytes that grow in the cracked sediments until the waters inundate the flats again. The decay and detritification of matter produced by halophytes are the main supply of organic products (Arenas and de la Lanza, 1983). Shrimp postlarvae and juveniles colonize the lagoonal system and after growing, leave the main body of water and look for their way out through the channels. At the present time most of the shrimps are caught inside the lagoonal system or during their way out. Several empirical attempts have been made to increase shrimp production causing profound changes to the system (Soto, 1969).

METHODOLOGY

The experiments were developed *in situ* in a locality near the entrance of the channel of the Caimanero Lagoon (main body of water) (Fig. 1), during January when the dry season is in its late stages, and in May when the decomposition of the halophytes is in its early stages.

Nine or twelve tubes of PVC randomized in their distribution with an inner diameter of 15 cm were introduced into the sediments at least 10 cm depth. The water inside was about 50 cm high and around 9 liters. The water surface was covered with a piece of polystyrene provided with a hole to take samples.

The immediate adsorption (IA) of NH_4^+ and PO_4^- was estimated after two hours of 1, 3, 6, 9, 12 and 24 $\mu\text{g-at N/l}$ additions and 5, 10, 20, 30, 50, 70, 150, 200 and 300 $\mu\text{g-at P/l}$. The exchange with the sediments was evaluated afterwards at 24, 48 and in some experiments up to 72 and 144 h. Each case was tested with two-three replicates.

The inhibition of microbial activity was tested with penicillin (150 mg/l) and chloromycetin (50 mg/l). Whole biotic activity inhibition (including macrobenthos) was tested with formol at 5%.

Water column activity (photosynthesis and respiration) was isolated from the sediments with translucent and dark plastic bags

de la laguna, sin aire y con adiciones de 3.0 y 0.3 $\mu\text{g-at P-PO}_4/1\text{-N-NH}_4/1$. El muestreo se realizó con jeringas.

La estimación de oxígeno fue a través del procedimiento de Winkler, y el análisis de nutrientes fue desarrollado según Carlberg (1972) y Strickland y Parsons (1968). La demanda química y bioquímica de oxígeno de acuerdo a Carlberg (1972).

RESULTADOS

El contenido de oxígeno fue reducido severamente en todos los experimentos; durante enero el consumo fue sólo un tercio de lo obtenido en mayo. No se detectaron condiciones anaeróbicas (menos de 1 ml/l) en enero, y 24 h después del inicio se alcanzaron niveles normales de 1 a 2 ml/l. En mayo, el consumo de oxígeno más alto (0.3 ml/l/h) fue obtenido durante las dos primeras horas, registrándose condiciones anóxicas posterior a 24 h. Después de 48, 96 y 144 h, se incrementó el oxígeno disuelto a 2 ml/l, aproximadamente (Fig. 2). Los experimentos en las bolsas de plástico mostraron un incremento en el oxígeno (0.06 ml/l/h) durante las horas de luz, y el consumo nocturno no afectó la concentración. La DBO del agua fue alrededor de 0.3 ml/l/día. Estos resultados, expresados en carbono por metro cuadrado en la Tabla I, muestran la relevancia de los sedimentos en el metabolismo del sistema. El aporte de oxígeno biológico fue insuficiente para satisfacer los requerimientos de los sedimentos.

La concentración de fosfatos en el agua fue tres veces más alta en enero que en mayo. El contenido inicial de fosfatos entre los cilindros fue muy variable debido a la alta heterogeneidad espacial de las características de los sedimentos; esta variación fue menor en enero. La adsorción y/o precipitación de ortofosfatos se muestra en la Figura 3. La adsorción inmediata (AIP) fue muy alta y variable además de proporcional a la adición, retirándose hasta 80 $\mu\text{g-at/l}$, incluso se efectuó cuando las condiciones fueron aeróbicas. La mayor AIP fue atribuida a la sedimentación de partículas después de iniciado el experimento. El confinamiento experimental propició condiciones para la adsorción posterior; durante mayo, 24 h después de la adición, se registró

that were filled with 50 liters of lagoon water. Additions of 3.0 and 0.3 $\mu\text{g P-PO}_4/1$ and $\text{N-NH}_4/1$ were used. No air was allowed inside the bags. Sampling was made using syringes.

Oxygen was estimated following the Winkler titrimetric procedure and the analysis of nutrients was performed following Carlberg (1972) and Strickland and Parsons (1968). Some analyses of chemical and biochemical oxygen demand were also made according to Carlberg (1972).

RESULTS

Oxygen content was reduced severely in all experiments. During January the rate of oxygen consumption was only a third of that obtained in May. Anaerobic conditions (less than 1 ml/l) were not reached in January, but values between 1 and 2 ml/l were normal 24 h after the starting time. The highest oxygen consumption rate (0.3 ml/l/h) was obtained during the first two hours of the beginning of the experiments of May. During this month all experiments reached anoxic conditions 24 h after the beginning. After 48, 96 and 144 h some increases of dissolved oxygen were registered, but always remained among 2 ml/l (Fig. 2). Plastic bag experiments showed increases of oxygen (0.06 ml/l/h) during the hours of light and at night the consumption did not affect the concentration. The BOD of the water was around 0.3 ml/l/day. The results expressed in square meters in Table I show relevance of carbon by sediments in the metabolism of the system. Biological oxygen supplies are unable to provide the requirements of the sediments.

Phosphate concentration in the water was three times higher in January than in May. The initial content of phosphate was very variable among the cylinders due to the high spatial heterogeneity of sediment characteristics. This variation was lower in January. The results of orthophosphate adsorption and/or precipitation are shown in Figure 3. Immediate adsorption (IAP) was very high and proportional to the addition reaching 80 $\mu\text{g-at/l}$. IAP was also very variable and took place when conditions were aerobic. Most of the IAP is attributed to sedimentation of particles after initial isolation. Experimental

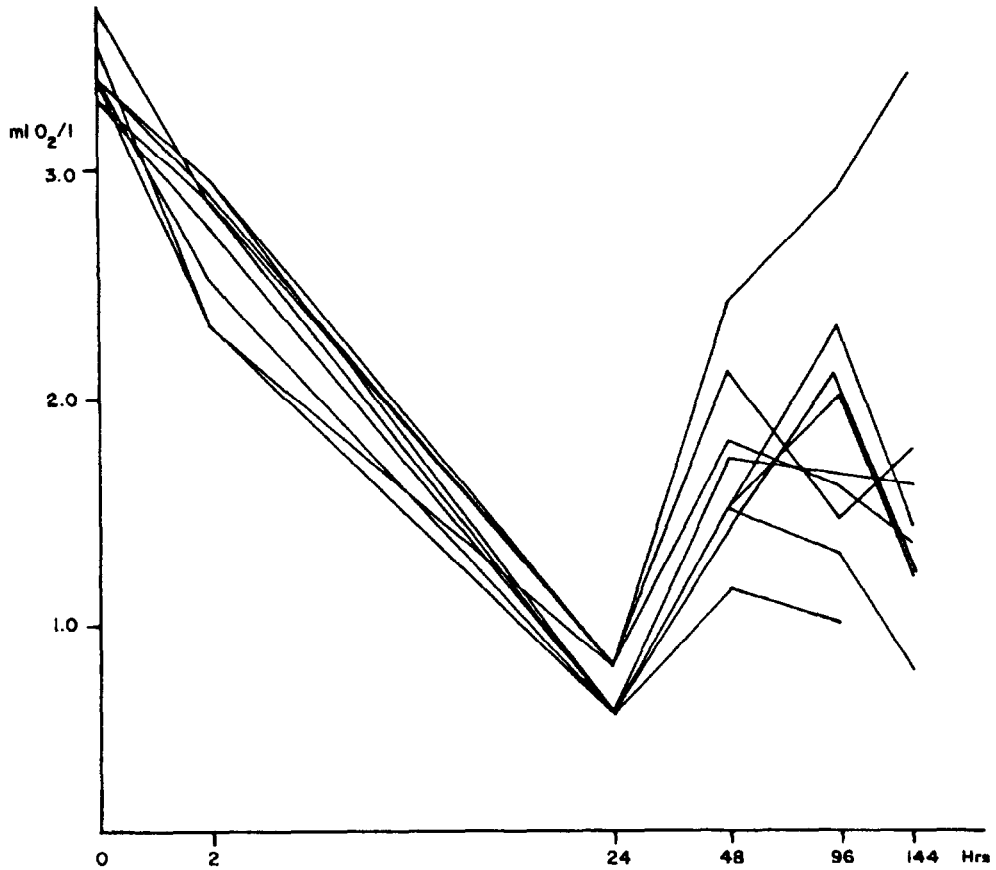


Figura 2. Evolución de oxígeno *in situ* en el experimento de mayo.
 Figure 2. *In situ* oxygen evolution in the May experiment.

Tabla I. Abastecimiento y demanda de oxígeno (mg C/m²/día).
 Table I. Oxygen supply and demand (mg C/m²/day).

Producción Pelágica	Consumo	
	Sedimentos	Agua
190	700	79

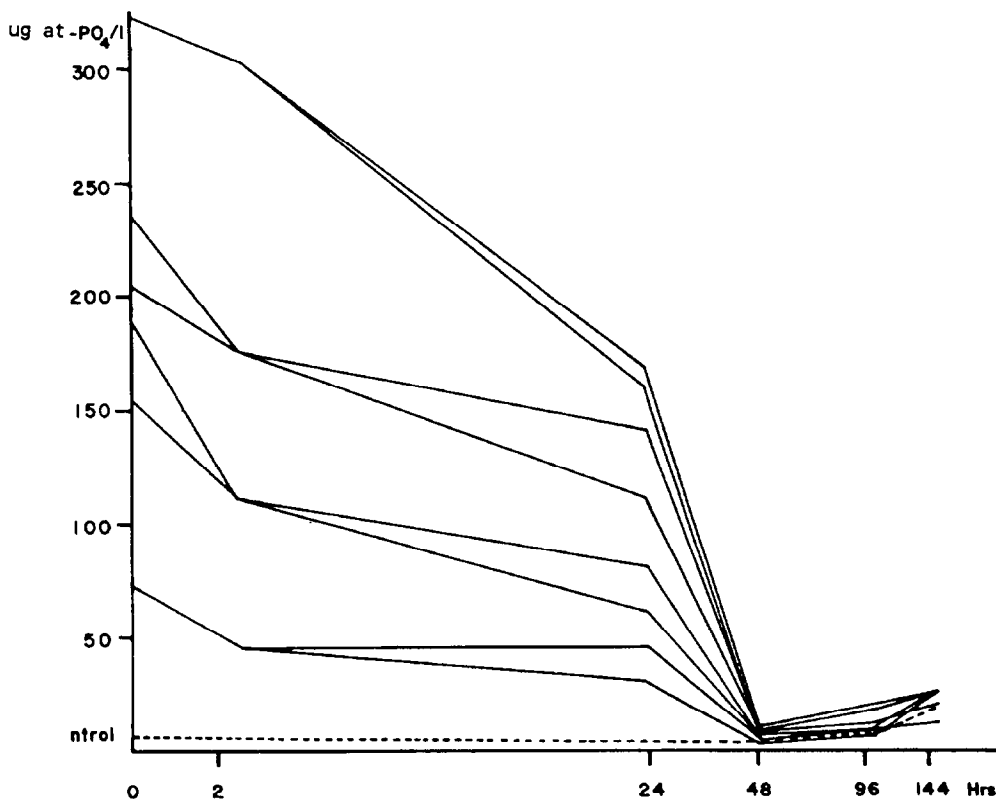


Figura 3. Adsorción de fosfatos (PO_4^-) con respecto al control, en el experimento de mayo.
 Figure 3. Phosphate adsorption (PO_4^-) with respect to control in the May experiment.

una disminución del contenido de los fosfatos de $48.5 \pm 6.7\%$ similar a la obtenida en todos los intervalos de adición (14-300 $\mu\text{g-at}$).

Los experimentos llevados a cabo durante enero, señalaron intervalos altos de adsorción (60-90%); 48 h después todos los fosfatos adicionados fueron completamente adsorbidos, incluyendo la más alta adición de 300 $\mu\text{g-at/l}$. La eficiencia de la adsorción fue mayor durante el segundo día de experimentación alcanzando un intervalo entre 91 a 95%. La desadsorción se inició entre los 96 y 144 h, y no fue alta, sin redisponerse las cantidades adicionadas. Los controles mostraron la misma respuesta, la adsorción durante las primeras 48 h y la desadsorción a las 96 y 144 h. La liberación de los fosfatos de los sedimentos incrementó la concentración hasta 20 $\mu\text{g-at/l}$, demostrando que los sedi-

isolation provides the conditions for further adsorption. During May, 24 h after the additions, a diminution of $48.5 \pm 6.7\%$ of the phosphate was registered; similar adsorption was obtained in all the range of additions (14-300 $\mu\text{g-at/l}$).

Experiments carried out during January showed a higher rate of adsorption (60-90%); 48 h later, all the phosphate added was completely adsorbed, including the highest addition of 300 $\mu\text{g-at/l}$. The efficiency of adsorption was higher during the second day of experiments reaching a rate of 91-95%. Desorption took place at 96 and 144 h. Desorption was not high and not related to the amounts added. The controls show the same response, adsorption during the first 48 h and desorption at 96 and 144 h. The release of phosphate from the sediments increases the

Tabla II. Porcentaje de adsorción de fosfatos con la inhibición de actividad micro y macrobiológica.

Table II. Phosphate adsorption percentage with inhibition of micro and microbial activity.

Control	Cloromicetín	Penicilina	Formol
80.9 ± 8.2	51.8 ± 3.7	65 ± 5.0	43.4 ± 12.9

mentos los mantienen atrapados eficientemente. Los intervalos de adsorción de fosfatos a las 24 h, fueron severamente afectados por el tratamiento de la actividad biótica. Los resultados son resumidos en la Tabla II.

Al igual que los fosfatos, la concentración de amonio fue más alta en enero ($54.7 \pm 3.0 \mu\text{g-at/l}$) que en mayo ($5.8 \pm 2.3 \mu\text{g-at/l}$). La adsorción inmediata de amonio (AIA) dos horas después de la adición, estimada durante los experimentos de mayo, fue mayor a bajas concentraciones (hasta $6 \mu\text{g-at N/l}$) de alrededor del 40-60% y decreció a un 11-25% cuando los contenidos fueron más altos (hasta $23 \mu\text{g-at N/l}$) (Fig. 4). Posterior a la AIA, el amonio fue liberado de los sedimentos, particularmente durante los experimentos de mayo cuando las concentraciones eran bajas. La cantidad redispuesta no se relacionó con las adiciones previas y se alcanzó de 50 a más del 100% de las concentraciones iniciales, después de 24 a 72 h. Los efectos inhibidores de los antibióticos causaron una reducción en los intervalos de adsorción de NH_4^+ . Los controles mostraron un decremento del $52\% \pm 16$ y los tratamientos del $34\% \pm 20$ ($N=5$). La inhibición con formol produjo una reacción química activa con el NH_4^+ y los resultados fueron desechados.

DISCUSION

Los resultados obtenidos en la evolución del oxígeno son discutidos como carbono, considerando una molécula de oxígeno por una molécula de carbono. La respiración en enero ($227 \text{ mg C/m}^2/\text{día}$) fue un tercio de lo estimado en mayo ($779 \text{ mg C/m}^2/\text{día}$) y la mitad de lo reportado por Edwards (1978); estos resultados muestran la amplia variación temporal ya mencionada (Arenas, 1979; de la Lanza, 1981). El metabolismo de la comunidad fue claramente heterótrofo. La produc-

concentration until $20 \mu\text{g-at/l}$ showing that sediments keep the phosphorus trapped very efficiently. The rates of phosphate adsorption at 24 h were severely affected by treatment of biotic activity. Results are summarized in Table II.

Like phosphorus, ammonium concentration was higher in January ($54 \pm 3.0 \mu\text{g-at N/l}$) than in May ($5.8 \pm 2.3 \mu\text{g-at/l}$). The immediate adsorption of ammonium (IAA) estimated during the experiments of May, two hours after the addition, was stronger at lower concentrations (up to $6 \mu\text{g-at N/l}$), around 40-60% and decreased to 11-25% when the concentration was higher (up to $23 \mu\text{g-at N/l}$) (Fig. 4). Ammonium was released from the sediments after the IAA, particularly during the experiments of May when the concentration was low. The amount released was not related to previous additions and reached from 50 to more than 100% of the initial concentrations after 24 to 72 h. The inhibitory effects of antibiotics caused a reduction in the rate of NH_4^+ adsorption. Controls showed a decrease of $52\% \pm 16$ and the treatment was 34 ± 20 ($N=5$). The treatment with formol caused an active chemical reaction with NH_4^+ and the results were discarded.

DISCUSION

The results obtained in oxygen evolution are discussed as carbon, following the rate of one mole of oxygen per mole of carbon. Respiration in January ($227 \text{ mg C/m}^2/\text{day}$) was a third of the estimation obtained in May ($779 \text{ mg C/m}^2/\text{day}$) and half of that reported by Edwards (1978). These results show the wide temporal variation already mentioned (Arenas, 1979; de la Lanza, 1981). The community metabolism was clearly heterotrophic. Phytoplankton production pro-

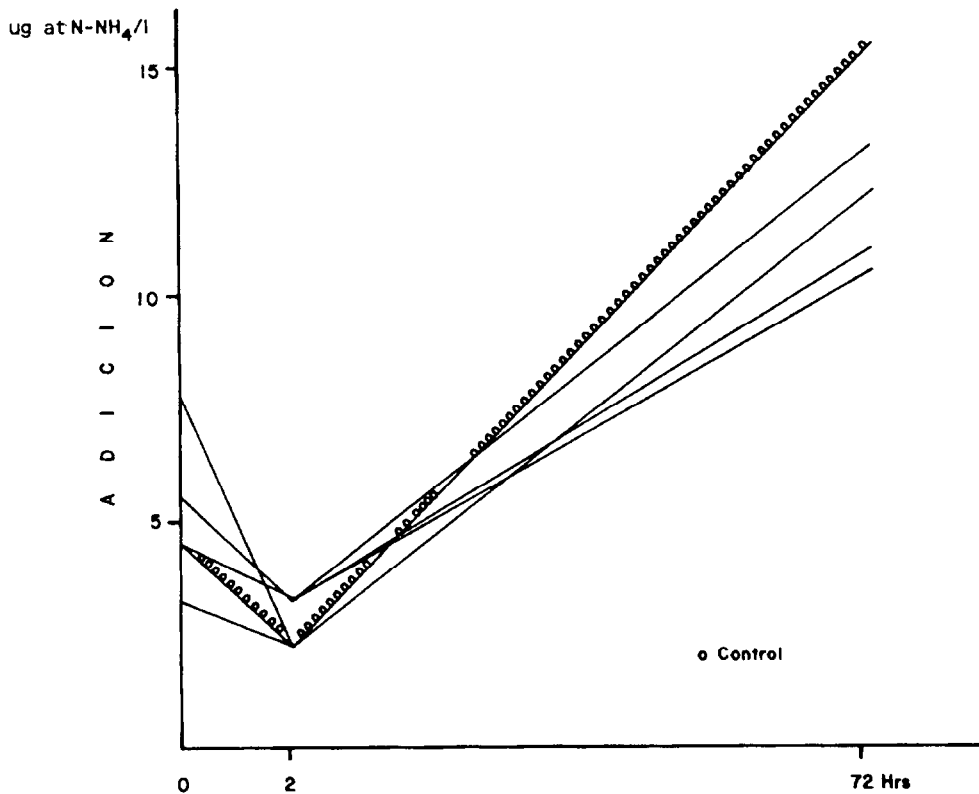


Figura 4. Adsorción de amonio (NH_4^+) con respecto al control, en el experimento de mayo.
 Figure 4. Ammonium adsorption (NH_4^+) with respect to control in the May experiment.

ción fitoplanctónica produjo $190 \text{ mg C/m}^2/\text{día}$ y la respiración planctónica consumió $79 \text{ mg C/m}^2/\text{día}$ con un excedente o producción neta diaria de $111 \text{ mg C/m}^2/\text{día}$. Por su parte, la actividad metabólica del sedimento mostró una alta demanda en el consumo de $700 \text{ mg C/m}^2/\text{día}$ que equivale a siete veces el excedente y determina que la respiración del sedimento represente el 90% del total.

Las reacciones de oxidación química de los sedimentos no fueron medidas diariamente, pero se encontró que fueron alrededor de un tercio de las demandas de oxígeno del sedimento, mucho más del 10% del estimado por Kristensen (1985) en un tipo de sedimento similar al analizado; sin embargo, Boynton *et al.* (1980) reportaron un amplio intervalo (5-78%).

vides $190 \text{ mg C/m}^2/\text{day}$ and plankton respiration demand was augmented from 15 to 187 mg C/m^2 without any effect of photosynthesis during a 24 h period. Dissolved organic matter in estuaries is usually high but their metabolic role is not clear. If some sort of aerobic-anaerobic cycles are established the materials may change their nature. In our case, availability of organic matter was apparently increased in the same amount obtained by phytoplanktonic production ($190 \text{ mg C/m}^2/\text{día}$).

The dynamics of oxygen consumption in experimental cylinders started with a strong rate of 0.3 ml/l/h , near to the rate found by Kristensen (1985), followed by a sharp decline until the consumption was negligible (Fig. 5).

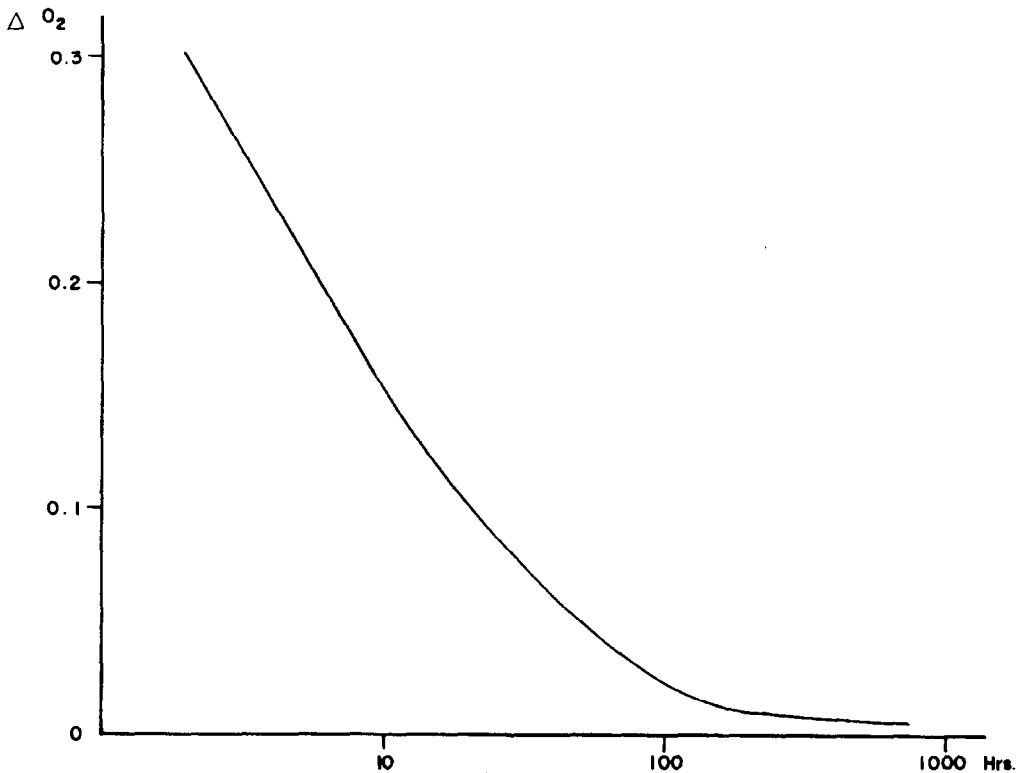


Figura 5. Consumo de oxígeno experimental.
Figure 5. Experimental oxygen consumption.

Se estima en general que la respiración microbiológica es responsable de más de la mitad de la demanda sedimentaria y que la macrofauna debe ser el contribuyente minoritario de la respiración total sedimentaria (2-27%; Smith, 1973). Nuestros resultados señalan un papel más importante a la macrofauna que a la actividad microbiológica; alrededor del 66% de la demanda biótica de oxígeno fue asociada a organismos macrobentónicos. Se debe hacer notar que el método empleado no fue una medida directa de la respiración del macrobentos, sino una consecuencia de la evolución del oxígeno en la supresión de las actividades del macrobentos. La demanda directa de oxígeno por *Nereis virens* fue sólo el 11% del 43% del total de la respiración bentónica en los experimentos de

The comparisons between January (dry season) and May (wet season) illustrate how respiration was three times lower in January, most likely due to the exhaustion of organic matter susceptible to decomposition and to the supply of new material coming from surrounding halophytes in May. Early experiments (Arenas and de la Lanza, 1981) have shown the effects of the dry season on the diminishing refractability of organic matter, and their variation between seasons and years.

This oxygen evolution pattern suggests that at the beginning and under oxic conditions, the most labile compounds are consumed. Afterwards, more refractory material may be included in the general metabolism by anoxic conditions.

Kristensen (1985), y el resto fue aparentemente por la microbiota de las paredes de los tubos de los escabadores.

Bajo las condiciones experimentales anaeróbicas, una fracción de la materia orgánica disuelta cambió su refractabilidad, ya que la demanda química de oxígeno fue incrementada de 15 a 187 mg C/m² sin ninguna influencia de fotosíntesis en un período de 24 h; semejante a la producción planctónica obtenida (190 mg C/m²/día). La materia orgánica disuelta en los estuarios es usualmente alta, pero su papel metabólico aún no es claro; si se establece algún tipo de ciclo aeróbico-anaeróbico, los materiales pueden cambiar su naturaleza.

La demanda del consumo de oxígeno en los cilindros experimentales, se inició con una alta tasa de 0.3 ml/l/h, cerca del intervalo encontrado por Kristensen (1985), seguido por un marcado decremento hasta que el consumo fue despreciable (Fig. 5).

Al comparar lo obtenido entre enero (sequías) y mayo (inicio de lluvias), se observa cómo la respiración fue tres veces más baja en enero, debido al agotamiento de materia orgánica susceptible a la descomposición, y el aporte de nueva materia proveniente de las halofitas en mayo. En experimentos anteriores, Arenas y de la Lanza (1981) observaron los efectos de la época de sequía en la disminución de la refractabilidad de la materia orgánica, y su variabilidad entre las estaciones y años. Este patrón de evolución de oxígeno sugiere que al inicio y bajo condiciones óxicas, los componentes más lábiles son consumidos; posteriormente puede ser incluido más material refractario en el metabolismo general, por condiciones anóxicas.

La bien conocida habilidad de los elementos arcillosos para retener fosfatos, fue claramente mostrada por la retención inmediata (AIP) en la que puede presentarse una adsorción y/o precipitación. De acuerdo a la información disponible de la biogeoquímica del fósforo en las lagunas costeras, el aislamiento determinado por las condiciones anóxicas es responsable de la liberación de fósforo atrapado (Mortimer, 1971). Nuestros resultados muestran que los sedimentos fueron capaces de retener fosfatos a pesar de los bajos

The well-known ability of clay sediments to retain phosphate was clearly shown by the immediate retention (IRP). According to the information available on biogeochemistry of phosphorus in coastal lagoons, the isolation determined by anoxic conditions is responsible for the release of trapped phosphorus (Mortimer, 1971). Our results show that sediments were able to retain phosphate despite the low level of oxygen. Retention was proportional to the concentration and as much as 300 µg-at consumes 79 mg C/m²/day leaving a daily net production of 111 mg C/m²/day.

Sediment metabolic activity is highly demanding. It consumes 700 mg C/m²/day making up 90% of total consumption.

Sediment chemical oxidation reactions have not been measured directly here, but were found to be around a third of the sediment oxygen demands; much higher than the 10% estimated by Kristensen (1985) in a sediment type similar to the present, though a wide range of values have been reported 5-78% (Boynton *et al.*, 1980).

Microbial respiration is generally believed to be responsible for more than half of the sedimentary demands and it has been considered that the macrofauna should be minor contributors of the total sediment respiration (2-27%; Smith, 1973). Our results have given a more relevant role to the macrofauna than to microbial activity; around 66% of biotic oxygen demand was associated to macrobenthic organisms. It should be noted that the method employed is not a direct measurement of the respiration of macrobenthos but a consequence of oxygen evolution in suppressing their activities. The direct oxygen demand of *Nereis virens* was only 11% of total benthic respiration in Kristensen's (1985) experiments, the rest was apparently microbial and chemical uptake by the burrow walls.

Under the anaerobic experimental conditions, some dissolved organic matter may have changed their refractability. The chemical oxygen P/l was removed after 48 h of isolation. Phosphate fixation has also been found under anoxic conditions when a certain type of organic matter under detritification flocculates (Boström *et al.*, 1982).

niveles de oxígeno. La retención fue proporcional a la concentración; se removieron hasta 300 $\mu\text{g-at P/l}$ después de 48 h de aislamiento. La fijación ha sido observada también bajo condiciones anóxicas, con cierto tipo de materia orgánica detritificada y floculada (Boström *et al.*, 1982).

Los fosfatos solamente fueron redistribuidos después de un período largo de incubación, y su tasa de liberación fue baja y no relacionada con las cantidades previamente adicionadas; su redistribución fue a pesar de las condiciones aereadas del experimento. La naturaleza y el estado de detritificación de la materia orgánica, influenciaron los flujos de los fosfatos, al igual que las actividades de la micro y macrofauna.

Nuestros resultados muestran que la inhibición con antibióticos causó un decremento del 30% en la retención de los fosfatos, mientras que el 16% estuvo asociado a las actividades macrobentónicas, dejando un 50% a reacciones físico-químicas. Se debe hacer notar el papel de la macrofauna como una interrelación con las bacterias; existe cierta evidencia sobre el estímulo de la actividad bacteriana por pastoreadores (Gerlach, 1978; Meyer-Reil, 1986). Davis *et al.* (1975) señalan que la bioturbación puede causar tanto la liberación como la fijación del fósforo, dependiendo de la cantidad del fósforo sensible al redox.

La capacidad de retención de fósforo por el sedimento en suspensión fue de 12 mg P/m^2 en las dos primeras horas, alcanzando más de 120 mg P/m^2 48 h después de iniciada la incubación, cuando la actividad de retención solamente fue de los sedimentos. La adsorción de fósforo fue lo suficientemente alta para mantener las concentraciones de fosfatos relativamente bajas en el sobrenadante durante mayo y altas en enero, cuando la actividad biótica fue baja y la materia orgánica sedimentaria disponible fue agotada.

La biogeoquímica de nitrógeno en la zona costera está basada principalmente en un proceso biótico-dependiente, contrastando con la movilidad del fósforo que es más orientada a la geoquímica (Presley y Trefy, 1980; Hatton *et al.*, 1982). En este trabajo se

Phosphate was released only after a long time of incubation but released rates were lower and not related to the amounts previously retained. Phosphorus was released despite the aerated conditions of the experiments.

Nature and detritification states of organic matter influence the fluxes of phosphates as well as micro and macrofaunal activities. Our results show that microbial inhibition with antibiotics caused a decrease of 30% of the retention of phosphate, while 16% was associated with macrobenthic activities, leaving 50% of phosphorus retention due to physico-chemical reactions. Again the role of macrofauna should be noted as an interrelationship with bacteria; there is some evidence of the stimulation of bacterial activity by grazing (Gerlach, 1978; Meyer-Reil, 1986). Davis *et al.* (1975) state that bioturbation can cause both liberation and fixation of phosphorus depending on the amount of redox sensitive phosphorus.

Phosphate retention capacity of suspended sediment was 12 mg P/m^2 in the first two hours and reached more than 120 mg P/m^2 after 48 h of incubation when retention activity was coming solely from the sediments. Phosphorus adsorption was sufficiently high to keep phosphorus concentrations relatively low in the supernatant during May and higher in January, when the sedimentary organic matter available was exhausted.

Biogeochemistry of nitrogen in the coastal zone is based mainly on biotic-dependent processes, contrasting with phosphorus mobility which is more geochemically oriented (Presley and Trefy, 1980; Hatton *et al.*, 1982). High concentrations of NH_4^+ during January contrast with May, in this work and those registered in April and September (Arenas, 1979).

Ammonium was accumulated in the water more likely because of the low retention capacity of sediments. Immediate adsorption of ammonium was high and proportional to the concentration at low levels. This property allowed the NH_4^+ to be between low limits. Further additions caused a diminution of the

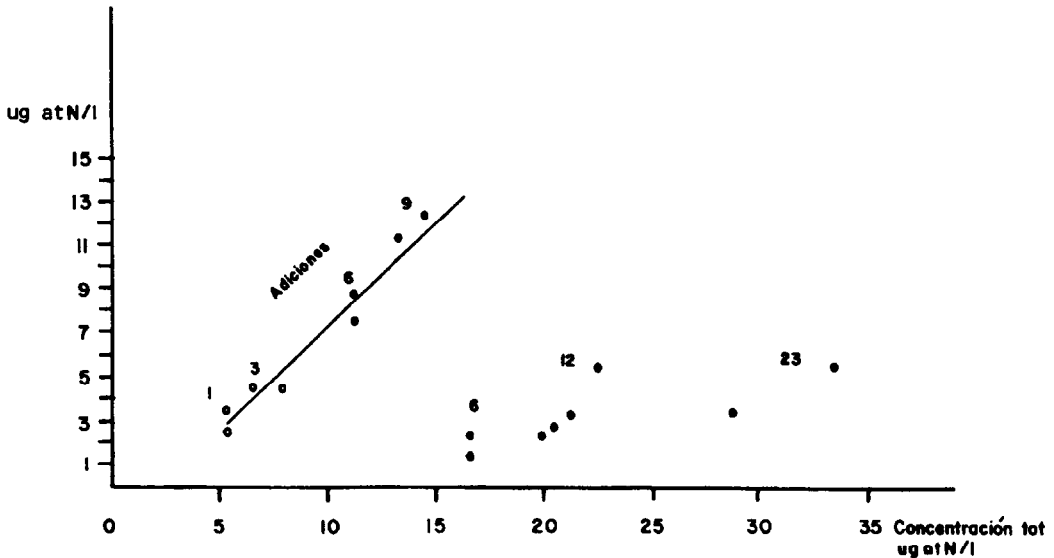


Figura 6. Adsorción instantánea de amonio, AIA (2 h), a diferentes concentraciones experimentales. Los números asociados a la gráfica indican las cargas adicionadas en $\mu\text{g-at/l}$.
Figure 6. Instantaneous adsorption of ammonium, IAA (2 h), at different experimental concentrations.

registraron altas concentraciones de NH_4^+ durante enero, que contrastan con las de mayo, y aquellas registradas en abril y septiembre por Arenas (1979). Debido a la baja capacidad de retención del sedimento, el amonio fue acumulado en el agua. La adsorción inmediata de este ión por la fase sedimentaria (AIA) fue alta y proporcional a bajos niveles; esta propiedad permite al NH_4^+ permanecer en concentraciones bajas. Adiciones mayores causaron una disminución en la tasa de adsorción de NH_4^+ y acumulación en la fase acuática (Fig. 6); contenidos más altos que $20 \mu\text{g-at N/l}$ escasamente fueron disminuidos por la adsorción inmediata.

El aislamiento creó condiciones favorables para la liberación de NH_4^+ de los sedimentos; conforme la incubación continuó, la tasa de redistribución fue más alta (Fig. 7). El NH_4^+ liberado fue acumulado en la fase acuosa alcanzando más de $80 \mu\text{g-at N/l}$ a las 72 h, con $1.85 \mu\text{g-at N/cm}^2/\text{día}$. El flujo de amonio fue comparablemente más alto con respecto a estudios previos (Nixon, 1981) y aproximadamente igual al estimado en el

NH_4^+ adsorption rate and accumulation in the water phase (Fig. 6). Concentrations higher than $20 \mu\text{g-at N/l}$ were almost not affected by immediate adsorption.

Isolation created very favorable conditions for NH_4^+ released from sediments. As incubation proceeded the rate of release was higher (Fig. 7). NH_4^+ released was accumulated at the supernatant reaching more than $80 \mu\text{g-at N/l}$ until 72 h with $1.85 \mu\text{g-at N/cm}^2/\text{day}$ rate. The flux of ammonium was comparably high in relation to previous studies (Nixon, 1981) and about the same as that estimated at the Patuxent River estuary (Kemp and Boynton, 1979). These results show the high potential of the sediments as a source of NH_4^+ when stagnation takes place.

Ammonium can be fixed either by biological processes or by physico-chemical reactions. Phytoplankton and microbial assimilation can reduce significant amounts of ammonium from the water. Our results suggest that microbial activity inhibition in five

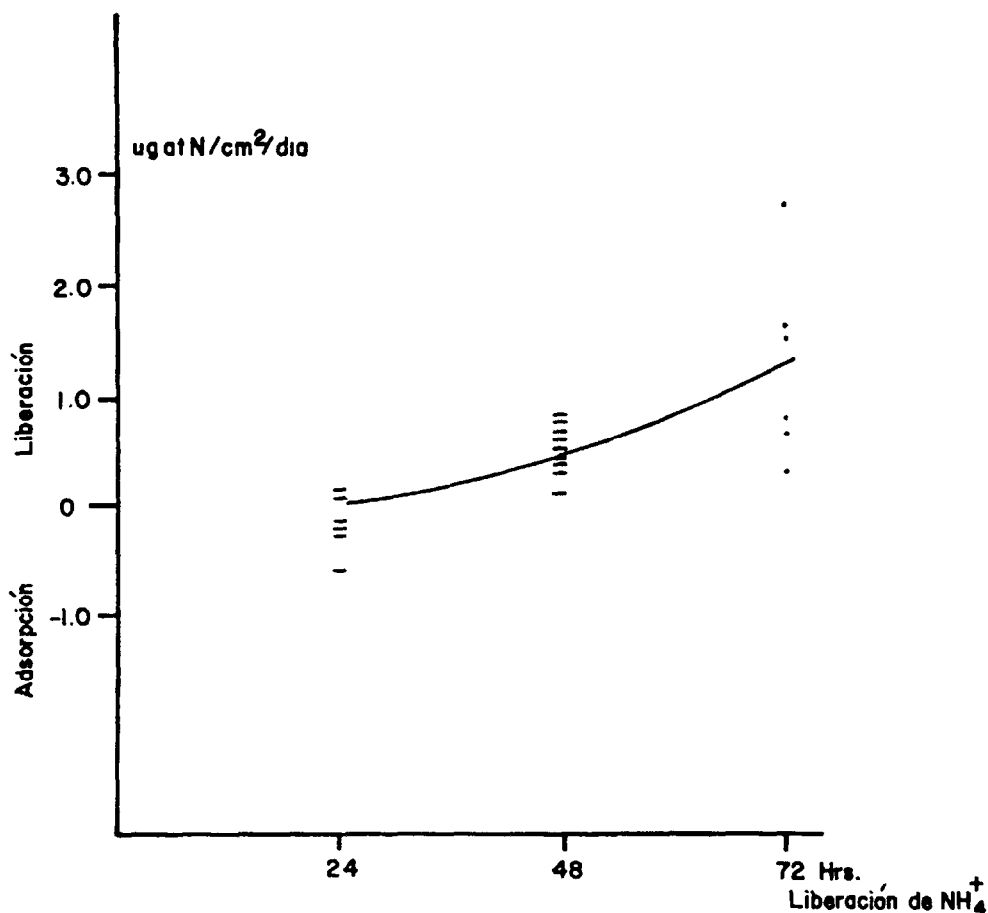


Figura 7. Liberación de amonio (redispersión) en condiciones de aislamiento de los sedimentos.
Figure 7. Ammonium release in isolation conditions of sediments.

estuario del Río Patuxent (Kemp y Boynton, 1979). Estos resultados muestran el alto potencial de los sedimentos como fuente de NH_4^+ en condiciones de estancamiento.

El amonio puede ser fijado ya sea por los procesos biológicos o por reacciones físico-químicas. La asimilación del plancton y microbiota, puede reducir cantidades significativas de amonio del agua. Nuestros resultados señalan que la inhibición de la actividad de la microbiota en cinco experimentos causó una baja tasa de fijación de NH_4^+ de $34\% \pm 20$, comparado con $52\% \pm 16$ en los 16 controles.

experiments caused a low rate of NH_4^+ fixation of $34\% \pm 20$ compared with $52\% \pm 16$ in the 16 controls.

Ammonium concentration was reduced in the water milieu (consumed by the planktonic community) at a rate of $1 \mu\text{g-at/l}$ during light period. If the fixation is considered as an expression of photosynthetic consumption of $\text{C}_{106}\text{N}_{16}\text{P}_1$, the production should be four times higher than that estimated. In other words, primary production only explains one fourth of NH_4^+ consumption.

La concentración de amonio fue reducida en el medio acuático (asimilación por la comunidad planctónica) a una tasa de $1 \mu\text{g-at/l}$ durante el período de iluminación. Si la fijación es considerada como una expresión del consumo fotosintético bajo una composición atómica de $\text{C}_{106} \text{N}_{16} \text{P}_1$, la producción puede ser cuatro veces más alta que la estimada; en otras palabras, la producción primaria sólo puede explicar un cuarto del consumo de NH_4^+ .

En resumen, el NH_4^+ fue disminuido en 25% por la producción primaria, cerca del 30% por la microbiota y menos del 50% fue fijado por cambios o reacciones físico-químicas.

CONCLUSIONES

Los efectos de las actividades biológicas y físico-químicas en el intercambio de nutrientes en sedimentos ricos en materia orgánica en lagunas costeras son fuertemente entrelazados.

Las actividades macrobentónicas fueron muy importantes en el ciclo de materiales, directa o indirectamente asociados con 2/3 de la demanda de oxígeno por procesos metabólicos. El ambiente físico-químico puede incrementar o disminuir la demanda química de oxígeno; condiciones anóxicas favorecieron cambios en la refractabilidad de la materia orgánica, incrementando la disponibilidad de la misma.

El fósforo fue retenido y adsorbido por los sedimentos en altas tasas, y bajo estancamiento la redistribución de PO_4^- fue baja. Las reacciones físico-químicas fueron responsables del 50% de la fijación en el sedimento y las actividades macrobentónicas (bioturbación) del 15%.

El amonio fue fijado, pero a más bajas tasas que el fosfato y sólo bajo condiciones óxicas. El estancamiento produjo una alta redistribución de amonio de los sedimentos; la microbiota fue responsable de 1/3 de la fijación sedimentaria y el plancton de 1/4 del consumo.

In summary, NH_4^+ was diminished 25% by primary production, about 30% follows microbial pathways and less than 50% was either fixed or transformed by physico-chemical reactions.

CONCLUSIONS

The effects of physico-chemical and biological activities on the exchange of nutrients in organic-rich sediments in coastal lagoons are strongly interwoven.

Macrobenthic activities are very important in the cycling of materials. They were directly or indirectly associated with 2/3 of oxygen demand by metabolic processes. Physico-chemical conditions may increase or decrease the chemical oxygen demand. Anoxic conditions may favour changes in organic matter refractability, increasing the availability of organic matter.

Phosphorus is retained and adsorbed by sediments at high rates. Under stagnation they release PO_4^- but at lower rates. Fixation was 50% physico-chemical reactions, and 15% associated with macrobenthic activities (bioturbation).

Ammonium is also fixed, but at lower rates than phosphate and only under oxic conditions. Stagnation produced a strong release of ammonia from the sediments. Fixation was 1/3 microbial and 1/4 consumed by phytoplankton.

English translation by the author.

LITERATURA CITADA

Arenas, V. (1979). Balance anual del carbono orgánico, nitrógeno y fósforo en el sistema lagunar Huizache-Caimanero, Sin., México. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias, UNAM, México, 114 pp.

Arenas, F.V. and de la Lanza, E.G. (1981). The effect of dried and cracked sediment on the availability of phosphorus in a coastal lagoon. *Estuaries*, 4(3): 206-212.

- Arenas, F.V. and de la Lanza, E.G. (1983). Annual phosphorus budget of a coastal lagoon in the northwest of Mexico. In: R. Hallberg (ed.), *Environmental Biogeochemistry*. Ecol. Bull. (Stockholm), 35: 431-440.
- Bågander, L.E. (1977). Sulfur fluxes at the sediment-water interface. An *in situ* study of closed systems, Eh and pH. Ph.D. Thesis, Dept. of Geology, University of Stockholm, 90 pp.
- Boström, B., Jonsson, M., and Forsberg, C. (1982). Phosphorus release from the lake sediments. Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol., 18: 5-59.
- Boynton, W.R., Kemp, W.M. and Osborne, C.G. (1980). Nutrient fluxes across the sediment-water interface in the turbid zone of a coastal plain estuary. In: V.S. Kennedy (ed.), *Estuarine Perspective*. Academic Press, New York, pp. 93-109.
- Carlberg, S.R. (1972). *New Baltic Manual*. Methods for sampling and analysis of physical, chemical and biological parameters. International Council for Exploration of the Sea. Charlottenlund Slot. dk. 2920. Charlottenlund, Dinamarca, 145 pp.
- Davis, R.B., Thurlow, D. and Brewster, F. (1985). Effects of burrowing tubificid worms on exchange of phosphorus between lake sediments and overlying water. Verh. Int. Ver. Limnol., 19: 382-394.
- de la Lanza, E.G. (1981). Importancia de la materia orgánica en los sedimentos de la Laguna de Huizache y Caimanero, Sinaloa, México. Tesis Doctoral (Oceanogr. Biol. Pesquera), CCH, UNAM, México, 93 pp.
- de la Lanza, E.G. (1987). Química de la fase sedimentaria. Memorias de la Primera Reunión Alejandro Villalobos, octubre 1983. Publicaciones Especiales, Ser. Zoología, Inst. Biol., UNAM, pp. 135-153.
- Edwards, R.R.C. (1978). Ecology of a coastal lagoon complex in Mexico. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 6: 75-92.
- Engvall, A.G. (1978). The fate of nitrogen in early diagenesis of Baltic sediments. A study of the sediment-water interface. *Contributions in Microbial Geochemistry*, Dept. of Geology, Univ. of Stockholm, (2): 103 pp.
- Enoksson, V. and Rūden-Berg, L. (1983). A system for determining exchanges between sediments and water exemplified by nitrogen flux under controlled oxygen conditions. In: R. Hallberg (ed.), *Environmental Biogeochemistry*. Ecol. Bull. (Stockholm), 35: 243-250.
- Gerlach, S. (1978). Food chains relationships in subtidal silty sand marine and the role of meiofauna in stimulating bacterial productivity. *Oecologia (Berl.)*, 3: 55-69.
- Hallberg, R.O., Bågander, L.E. and Engvall, A.G. (1976). Dynamics of phosphorus and nitrogen at the sediments-water interface. In: J.O. Nriagu (ed.), *Environmental Biogeochemistry*. Ann Arbor Science, Michigan, USA, 1: 295-308.
- Hatton, R.S., Patrick, Jr. W.H. and DeLaune, R.D. (1982). Sedimentation nutrient accumulation and early diagenesis in Louisiana Barataria Basin coastal marshes. In: V.S. Kennedy (ed.), *Estuarine Comparisons*. Academic Press, New York, pp. 255-267.
- Holm, N.G. (1978). Phosphorus exchange through the sediment-water interface. Mechanism studies of dynamic processes in the Baltic Sea. *Contributions Microbial Geochemistry*, Dept. Geology, Univ. of Stockholm, 3: 149.
- Kemp, W.M. and Boynton, W.R. (1979). Nutrient budgets of the Patuxent estuary: sources, sink and internal cycles. In: N.M. Kemp, J.C. Stevenson and W.R. Boynton (eds.), *Submerged Aquatic Vegetation in Chesapeake Bay*. Univ. Maryland Center Environ. Est. Studies, Ref. No. 80-68 HPEL, Cambridge MS, pp. 1-42.
- Klump, J.V. and Martens, C.S. (1981). Biogeochemical cycling in organic rich coastal marine basin. II. Nutrient sediment-water exchange processes. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 45: 101-121.

- Kristensen, E. (1985). Oxygen and inorganic nitrogen exchange in a *Nereis virens* (Polychaeta). *J. Coast. Res.*, 1(2): 109-116.
- Meyer-Reil, L.A. (1986). Spatial and temporal distribution of bacterial populations in marine shallow water surface sediments. In: P. Lasserle and J.M. Martin (eds.), *Biogeochemical Processes at the Land Sea Boundary*. Elsevier, New York, pp. 141-160.
- Mortimer, C.H. (1971). Chemical exchanges between sediments and water in the great lakes. Speculations on probable regulatory mechanisms. *Limnol. Oceanogr.*, 16: 387-404.
- Nixon, S.W. (1981). Remineralization and nutrient cycling in a coastal marine ecosystem. In: B.J. Neilson and L.G. Cronin (eds.), *Estuaries and Nutrients*. Humana Press, Clifton, New Jersey, pp. 111-139.
- Nixon, S.W., Kelly, J.R., Purnas, B.N., Oviatt, C.A. and Hale, S.S. (1980). Phosphorus regeneration and the metabolism of coastal marine bottom communities. In: K.R. Tenore and B.C. Coull (eds.), *Marine Benthic Dynamics*. University of South Carolina Press, Columbia, pp. 219-242.
- Petr, T. (1977). Bioturbation and exchange of chemicals in the mud water interface. In: H.L. Golterman (ed.), *Interactions between Sediments*. Proc. of an Intern. Symp. Amsterdam. The Hague Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen. Junk Publ., pp. 216-226.
- Presley, B.J. and Trefy, J.H. (1980). Sediment-water interactions and geochemistry of interstitial waters. In: E. Olsson and I. Cato (eds.), *John Wiley and Sons, New York*, pp. 187-232.
- Propp, M.V., Tarasoff, V.G., Chebardgi, I.I. and Lootzik, N.V. (1980). Benthic pelagic oxygen and nutrient exchange in a coastal region of the sea of Japan. In: K.R. Tenore and B.C. Coull (eds.), *Marine Benthic Dynamics*. Univ. South Carolina Press, Columbia, pp. 265-284.
- Serruya, C., Edelstein, M., Pollinger, U. and Serruya, S. (1974). Lake Kinneret sediments: nutrient composition of the pore water exchanges. *Limnol. Oceanogr.*, 19: 489-508.
- Smith, Jr. K.L. (1973). Respiration of a sublittoral community. *Ecology*, 54: 1065-1075.
- Soto, R. (1969). Mecanismo hidrológico del sistema de lagunas litorales Huizache y Caimanero y su influencia sobre la producción camaronesa. Tesis de Licenciatura, UABC, México, 75 pp.
- Strickland, J.D.H. and Parsons, T.R. (1968). *A practical handbook of seawater analysis*. Fish. Res. Bd. Canada Bull., pp. 167-311.