

**PETACHEO Y VARIACION TEMPORAL DE AMONIO Y FOSFATO EN
AGUAS INTERSTICIALES DE SEDIMENTOS DE ENTREMAREAS
DE UNA LAGUNA COSTERA**

**PATCHINESS AND TEMPORAL VARIATION OF AMMONIUM AND
PHOSPHATE IN PORE WATERS OF INTERTIDAL SEDIMENTS
IN A COASTAL LAGOON**

Sergio Aguñiga García*
Saúl Alvarez Borrego

División de Oceanología
Centro de Investigación Científica y de
Educación Superior de Ensenada
Apartado Postal 2732
Ensenada, Baja California, México

* Domicilio Actual: CICIMAR-IPN, Apdo. Postal 492, La Paz, Baja California Sur, México

Aguñiga García, S. y Alvarez Borrego, S. Petacheo y variación temporal de amonio y fosfato en aguas intersticiales de sedimentos de entremareas de una laguna costera. Patchiness and temporal variation of ammonium and phosphate in pore waters of intertidal sediments in a coastal lagoon. *Ciencias Marinas*, 15(3): 97-120, 1989.

RESUMEN

Generamos series de tiempo de 4-6 horas, por medio de muestreos *in situ*, para estudiar la variación de las propiedades de las aguas intersticiales de planos fangosos sin macrovegetación. El lugar de muestreo se localizó en la barra de arena de una laguna costera, entre la boca y el extremo interno, en la costa noroeste de Baja California, México. La salinidad, el fosfato reactivo y el amonio mostraron una gran variación temporal y espacial, con variaciones irregulares con la profundidad. El petacheo, creado principalmente por la biota, y la percolación con las mareas, son los principales responsables de estos cambios. La mayoría de los valores de $S^0/00$ estuvieron entre 35 y 36 $^0/00$. Hubo eventos de baja $S^0/00$, tan bajas como 30 $^0/00$, muy localizados en tiempo y profundidad. Estas bajas salinidades se atribuyeron a aportes de agua dulce subterránea. Nuestros limitados datos indican que la mayoría del petacheo horizontal tiene una escala de unos pocos centímetros. Con solamente 7cm de distancia horizontal y para el mismo tiempo de muestreo, las razones de concentración máxima:mínima fueron tan grandes como 3.5 para PO_4 y 2 para NH_4 ; y la diferencia máxima de $S^0/00$ fue 3 $^0/00$. Los perfiles verticales de PO_4 y NH_4 consistentemente mostraron máximos a 5-20cm, con mínimos en la superficie del sedimento y a 40cm (nuestra máxima profundidad de muestreo). El PO_4 máximo registrado fue 23 μM , y el NH_4 fue 315 μM . En un estudio previo similar realizado con sedimentos de una marisma con abundante *Spartina foliosa*, en el extremo interno de la misma laguna, los máximos valores reportados de PO_4 y NH_4 fueron hasta cinco y seis veces más altos, respectivamente, que nuestros máximos valores. Nuestro lugar de muestreo es más energético, con corrientes de marea mucho más fuertes, que el extremo interno.

ABSTRACT

We generated 4-6 hour time series data by means of *in situ* samplings to study the variations in the properties of pore water in a mud flat without macrovegetation. The location was the sand bar of a coastal lagoon, halfway between the mouth and the internal extreme, on the northwestern coast of Baja California, Mexico. Salinity, reactive phosphate and ammonium displayed great temporal and spatial variation and irregular variations with depth. Patchiness, mostly created by biota, and percolation with tides are mainly responsible for these changes. Most $S^0/_{00}$ values were between 35 and 36 $^0/_{00}$. There were events of low $S^0/_{00}$ values, as low as 30 $^0/_{00}$, very localized in time and depth. These low $S^0/_{00}$ values were attributed to underground freshwater input. Our limited data indicate that most of the horizontal patchiness is in the scale of a few centimeters. With only 7cm of horizontal distance, the maximum:minimum concentration ratios, for the same collection time, were as large as 3.5 for PO_4 and 2 for NH_4 ; and the maximum $S^0/_{00}$ difference was 3 $^0/_{00}$. PO_4 and NH_4 vertical profiles consistently showed maximum values at 5-20cm, with minimum values at the sediment surface and at 40cm (our maximum sampling depth). PO_4 was as high as 23 μ M, and NH_4 was as high as 315 μ M. In a previous and similar study conducted for sediments in a salt marsh with abundant *Spartina foliosa*, at the internal extreme of the same lagoon, the maximum PO_4 and NH_4 values reported were up to five and six times higher, respectively, than our maximum values. Our sampling site is more energetic, with much stronger tidal currents than the internal extreme.

INTRODUCCION

Los primeros estudios de aguas intersticiales de sedimentos costeros y estuarinos usaron metodologías de muestreo desarrolladas para estudios de mares profundos, como el muestrear y congelar núcleos de sedimentos, rebanarlos y descongelarlos en el laboratorio y el exprimirles el agua intersticial (McRoy *et al.*, 1972). Una limitación importante de esta metodología es que se puede obtener sólo una muestra de cada núcleo para cada profundidad, y no es posible muestrear una segunda vez en la misma localización exacta (Montgomery *et al.*, 1981). Esto implica que no es posible generar series de tiempo para estudiar cambios en función de fenómenos físicos como las mareas. Durante el final de los 1970's y el inicio de los 1980's, se desarrollaron muestreadores de agua intersticial *in situ* (Hesslein, 1976; Mayer, 1976; Sayles *et al.*, 1976; Zimmermann *et al.*, 1978; Montgomery *et al.*, 1979, 1981). El muestreador de Montgomery *et al.* (1981) permite muestrear continuamente de cuatro profundidades en el sedimento. Nosotros diseñamos, construimos y probamos satisfactoriamente un muestreador *in situ* de agua intersticial de sedimentos de entremareas, que nos permite muestrear de varias profundidades y generar series de tiempo con intervalos de muestreo de unos pocos minutos (Alvarez-Borrego *et al.*, 1988).

INTRODUCTION

Early studies of pore waters in coastal and estuarine sediments used sampling methodologies developed for deep-sea studies, such as sampling and freezing sediment cores, slicing and thawing them in the laboratory, and squeezing out the pore water (McRoy *et al.*, 1972). One important limitation of this methodology is that only one sample may be obtained from each core and it is not possible to sample the same exact location a second time (Montgomery *et al.*, 1981). This implies that it is not possible to generate time series in order to study changes as a function of physical phenomena such as tides. During the late 1970's and the beginning of the 1980's *in situ* pore water samplers were developed (Hesslein, 1976; Mayer, 1976; Sayles *et al.*, 1976; Zimmermann *et al.*, 1978; Montgomery *et al.*, 1979, 1981). Montgomery *et al.*'s (1981) sampler allows for continuous sampling at four discrete depths in the sediment. We designed, built, and satisfactorily tested a simple intertidal sediment *in situ* pore water sampler that allows us to sample from several discrete depths and to generate time series data with sampling intervals of a few minutes (Alvarez-Borrego *et al.*, 1988).

Patchiness of pore water properties has been recognized as an important aspect for study (Montgomery *et al.*, 1979). In coastal

La distribución en forma de manchas, o petacheo, de las propiedades del agua intersticial ha sido reconocido como un aspecto importante de estudio (Montgomery *et al.*, 1979). En lagunas costeras con mareas amplias (amplitudes $\geq 2\text{m}$), el petacheo y la advección y percolación del agua intersticial puede causar variaciones temporales grandes de las propiedades del agua intersticial, especialmente en sedimentos de entremareas. Camacho-Ibar y Alvarez-Borrego (1988) generaron series de tiempo, de $\sim 6\text{h}$, de salinidad ($S^0/00$), fosfato reactivo (PO_4) y amonio (NH_4) en aguas intersticiales de una marisma con *Spartina foliosa*, en el extremo interno del Estero de Punta Banda, una laguna costera sin aporte superficial de agua dulce, en la costa noroeste de Baja California, México; y encontraron que estas propiedades mostraron una gran variación espacial horizontal y temporal, y una variación irregular con la profundidad. Los intervalos de variación de PO_4 y NH_4 para todo su conjunto de datos fueron $10\text{-}103\ \mu\text{M}$ y $12\text{-}1970\ \mu\text{M}$, respectivamente. Camacho-Ibar y Alvarez-Borrego (1988) atribuyeron estos cambios en las propiedades del agua intersticial al petacheo, principalmente creado por la biota, y a la percolación con las mareas, incrementada por el movimiento de agua a través de las raíces de las plantas y las madrigueras de los animales.

El propósito del presente trabajo fue el complementar los resultados de Camacho-Ibar y Alvarez-Borrego (1988) mediante la generación de series de tiempo de $S^0/00$ y nutrientes en las aguas intersticiales de un plano fangoso sin macrovegetación, localizado en la barra arenosa que separa el Estero de Punta Banda de la Bahía de Todos Santos. Nuestra localización de muestreo es adyacente al canal principal de la laguna, entre la boca y el extremo interno (Fig. 1). La composición y la textura de los sedimentos están asociados estrechamente con los procesos del medio ambiente, principalmente las condiciones hidráulicas (Stewart, 1958). Las marismas del extremo interno, donde Camacho-Ibar y Alvarez-Borrego (1988) muestrearon, es un medio ambiente de baja energía, con flujo y refluo suaves. Nuestro sitio de muestreo en el plano fangoso está expuesto a corrientes de marea más fuertes y la superficie del sedimento tiene una pendiente más inclinada que la

lagunas with large tides (amplitudes of 2m or more), patchiness and pore water advection and percolation may cause large temporal variations of pore water properties, especially in intertidal sediments. Camacho-Ibar and Alvarez-Borrego (1988) generated $\sim 6\text{h}$ time series of salinity ($S^0/00$), reactive phosphate (PO_4) and ammonium (NH_4) in pore waters of a salt marsh with *Spartina foliosa*, at the internal extreme of Estero de Punta Banda, a coastal lagoon without aboveground fresh water input, on the northwestern coast of Baja California, Mexico; and they found that these properties displayed great temporal and spatial variations and irregular variations with depth. PO_4 and NH_4 ranges for their whole data set were $10\text{-}103\ \mu\text{M}$ and $12\text{-}1970\ \mu\text{M}$, respectively. Camacho-Ibar and Alvarez-Borrego (1988) attributed these changes in the properties of pore waters to patchiness, mostly created by biota, and percolation with tides, enhanced by movements through plants' roots and animals' burrows.

The purpose of the present work was to complement the results of Camacho-Ibar and Alvarez-Borrego (1988) by generating time series of $S^0/00$ and nutrients in pore waters of a mudflat without macrovegetation, located at the sand bar separating Estero de Punta Banda from the Bahía de Todos Santos. Our sampling location was adjacent to the main channel of the lagoon, roughly between the internal extreme and the mouth of the lagoon (Fig. 1). Textual and compositional properties of sediments are closely linked to environmental processes, mainly the hydraulic conditions (Stewart, 1958). The salt marsh at the internal extreme, where Camacho-Ibar and Alvarez-Borrego (1988) sampled, is an environment of low energy, with gentle flood and ebb tidal currents. Our sampling site in the mudflat is exposed to stronger tidal currents and the surface of the sediments has a steeper slope than at Camacho-Ibar and Alvarez-Borrego's (1988) sampling site.

STUDY AREA

Estero de Punta Banda is a coastal lagoon, 100km south of the US-Mexico border (Fig. 1). The lagoon is at the southeastern extreme of Todos Santos Bay with its mouth $\sim 13\text{km}$ from the open ocean. It is L-shaped, with a short arm of $\sim 3\text{km}$ and a long arm of

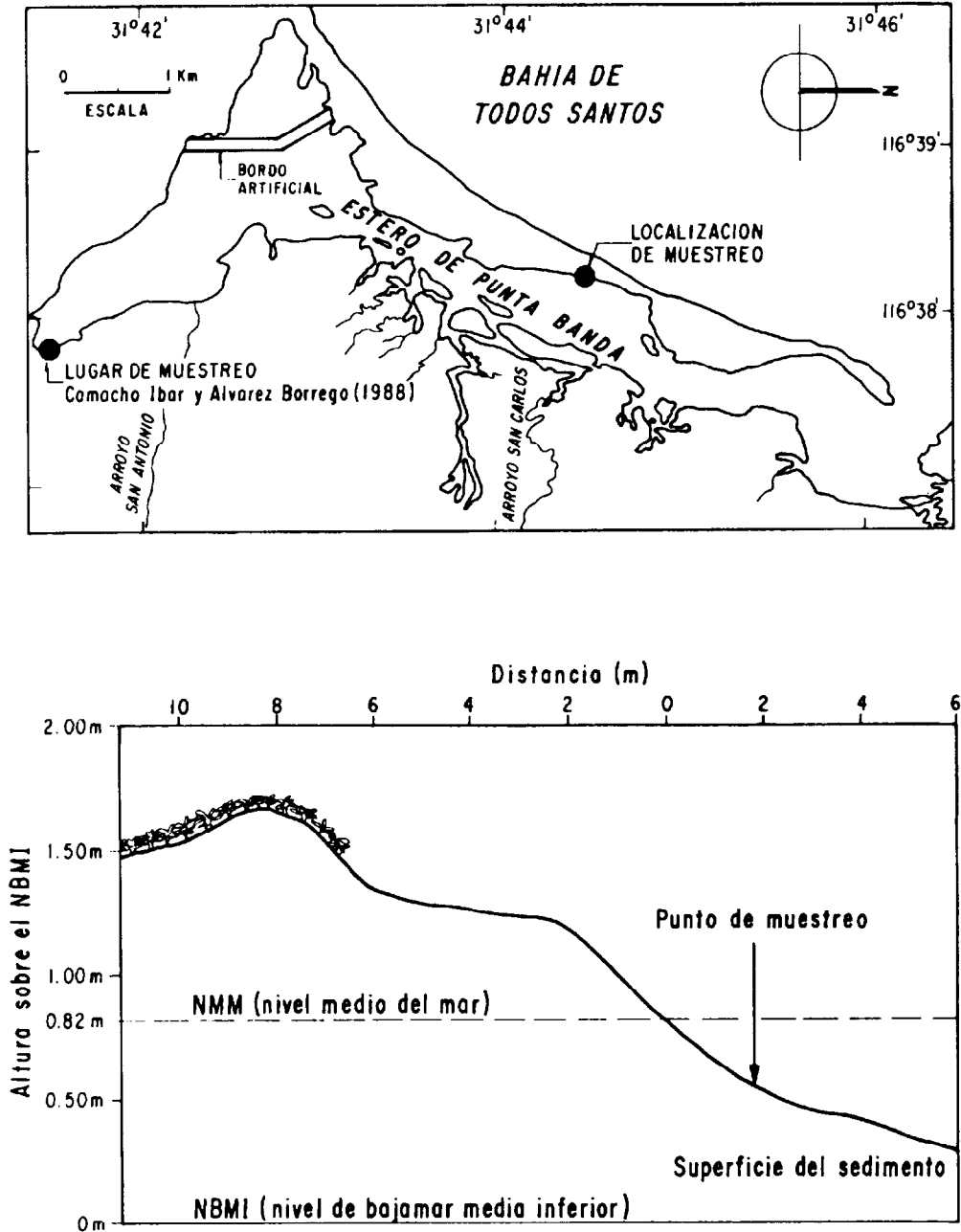


Figura 1. Localización y descripción topográfica del área de estudio.
Figure 1. Sampling location and topographic description.

del sitio de Camacho-Ibar y Alvarez-Borrego (1988).

AREA DE ESTUDIO

El Estero de Punta Banda es una laguna costera en la costa noroeste de Baja California, ~100km al sur de la frontera entre México y Estados Unidos (Fig. 1). La laguna está en el extremo sureste de la Bahía de Todos Santos, con su boca a ~13km del océano abierto. Tiene forma de L, con un brazo corto de ~3km y un brazo largo de ~7.5km. Tiene una entrada permanente en el extremo norte del brazo largo. El canal principal tiene una profundidad de 7.5m cerca de la boca y decrece, de una manera irregular, a ~1m en el vértice de la L. Tiene un área de ~3.6km² en marea baja y ~11.6km² en marea alta. La anchura promedio de la laguna es ~345m en marea baja y ~1100m en marea alta. Grandes áreas de planos fangosos y marismas se cubren y descubren periódicamente con las mareas. El Estero de Punta Banda se clasifica como una laguna neutra; la densidad del agua es igual o casi igual a la de la Bahía, y el movimiento del agua es causado únicamente por las mareas y el viento (Pritchard *et al.*, 1978). Hay dos arroyos que aportan agua dulce superficialmente a la laguna únicamente durante los días lluviosos (en invierno). Sin embargo, en general hay gradientes de S⁰/00 con valores incrementándose de la boca al extremo interno, debido al exceso de evaporación en la laguna. Las mareas vivas son hasta de 2.5m de amplitud; la mezcla por corrientes de marea es fuerte. Lo somero de la laguna permite el desarrollo de dos clases de vegetación dominante. Una es la flora marina dominada por pastos, *Zostera marina*; la otra es la flora de marisma que está desarrollada extensamente a lo largo de las márgenes bajas de la laguna, que se sujetan a inundaciones de mareas.

De acuerdo con Sánchez-Hernández (1978), los valores de PO₄ y silicatos (SiO₂) en la columna de agua son más altos en verano que en invierno; NO₃ no mostró un ciclo estacional claro. En el verano, PO₄ y SiO₂ no variaron mucho de la boca al vértice de la L, pero aumentaron abruptamente de ahí al extremo interno. Los máximos valores de PO₄ fueron > 5μM, y los de SiO₂ fueron > 30μM, en verano y cerca del extremo interno. En el

~7.5km. It has a single permanent entrance at the northern extreme of the long arm. The main channel has a depth of 7.5m near the entrance and the depth decreases, in an irregular manner, to 1m at the L vertex. It has an area of ~3.6km² at low tide and ~11.6km² at high tide. The average width of the lagoon is ~345m at low tide and ~1100m at high tide. Thus, large areas of mud flats and salt marshes are flooded and uncovered periodically with the tides. Estero de Punta Banda is classified as a neutral lagoon; water densities are equal or almost equal to that of the open sea, and water movement is caused only by tides and wind (Pritchard *et al.*, 1978). There are two streams that input aboveground fresh water to the lagoon only during rainy days (in winter). In general, however, there are salinity gradients with values increasing from the mouth to the internal extreme, due to excess evaporation in the lagoon. Spring tides are up to 2.5m in amplitude; tidal mixing is strong. The mainly shallow mud-flat character of the lagoon provides for two kinds of dominant vegetation. One is a marine flora dominated by eelgrass, *Zostera marina*; the other is a salt marsh flora extensively developed along the low-lying margins of the lagoon subjected to tidal flooding.

According to Sánchez-Hernández (1978), PO₄ and SiO₂ in the water column are higher during summer than during winter; NO₃ did not exhibit a clear seasonal cycle. During summer, PO₄ and SiO₂ did not vary much from the mouth to the L vertex, but increased abruptly from there to the internal extreme. Maximum PO₄ values were > 5μM, and those of SiO₂ were > 30μM, during summer and near the internal extreme. In the long arm of the lagoon, PO₄ and SiO₄ values were 0.3-1.1 μM, and 1-10 μM, respectively. In the whole lagoon, NO₃ had a range from undetectable to 3.5μM, with highest values near the mouth. Sánchez-Hernández (1978) reported highest S⁰/00 for the internal extreme of 36.4⁰/00, for summer. For the region adjacent to our sampling site, he reported a maximum S⁰/00 of 34.6⁰/00.

At our sampling site, the sediment surface is 0.54m above mean low water (Fig. 1). There is no macrovegetation. Although we did not study the fauna, we noticed a high abundance of fiddler crab (*Uca* sp.), the blue

brazo largo de la laguna, los valores de PO_4 y SiO_2 fueron $0.3\text{-}1.1\ \mu\text{M}$ y $1\text{-}10\ \mu\text{M}$, respectivamente. En toda la laguna, los valores de NO_3 tuvieron un intervalo de variación de no detectable a $3.5\ \mu\text{M}$, con los valores más altos cerca de la boca. Sánchez-Hernández (1978) reportó máximos valores de S^0/O_2 de $36.4^0/\text{O}_2$ para el extremo interno, en verano. Para la región adyacente a nuestro sitio de muestreo, reportó una S^0/O_2 máxima de $34.6^0/\text{O}_2$.

En nuestro sitio de muestreo, la superficie del sedimento estuvo a 0.54m sobre el nivel de bajamar media inferior (Fig. 1). No hay macrovegetación. No hicimos un estudio de la fauna presente, pero notamos altas abundancias del cangrejo violinista (*Uca* sp.), el cangrejo azul (*Callinectes* sp.) y diferentes aves marinas de pico largo. En un muestreo de prueba encontramos concentraciones no detectables de NO_2 y NO_3 de 5 a 40cm de profundidad, y las atribuimos a las condiciones anóxicas del sedimento (Alvarez-Borrego *et al.*, 1988).

MATERIALES Y METODOS

Llevamos a cabo un total de siete muestreos: en junio 15, 20 y 21, y julio 3, 11, 12 y 23, de 1986. En las primeras cuatro y en la séptima fechas muestreamos de 0 , 5 , 10 , 15 , 20 , 30 y $40\ \text{cm}$ de profundidad. Nuestro muestreador consiste de una serie de colectores cilíndricos de diferentes longitudes, que están montados en una caja para asegurar su penetración vertical en el sedimento (Alvarez-Borrego *et al.*, 1988). Debido a que nuestro propósito principal es el llegar a describir los flujos de nutrientes entre el sedimento y la columna de agua, nuestro muestreo fue aeróbico. Cuando el agua intersticial se percola hacia afuera del sedimento, hace contacto con el aire o se mezcla en la columna de agua donde existe oxígeno disuelto. Cualquier efecto de oxidación, directo o indirecto, que afecte las formas disueltas de nutrientes, ocurrirá de una manera similar en una muestra en contacto con el aire. Por lo tanto, para nuestro propósito, no es necesario mantener un ambiente anaeróbico durante el muestreo. En cada caso hubo un intervalo de ~ 30 minutos entre muestreos de cada profundidad. Debido al tamaño fino de las partículas del sedimento, la colección de

crab (*Callinectes* sp.) and different marine birds with long bill. In a test sampling we found undetectable concentrations of NO_2 and NO_3 from 5 to 40cm depth, due to the anoxic conditions in the sediment (Alvarez-Borrego *et al.*, 1988).

MATERIALS AND METHODS

We carried out a total of seven samplings: on June 15th, 20th and 21st and July 3rd, 11th, 12th and 23rd, 1986. On the first four and the seventh dates we sampled at 0 , 5 , 10 , 15 , 20 , 30 and $40\ \text{cm}$ depth. Our sampler consists of a series of cylindrical collectors of different lengths, which are mounted in a box to ensure vertical penetration into the sediment (Alvarez-Borrego *et al.*, 1988). Since our ultimate objective is to describe the fluxes of nutrients between the sediment and the water column, our sampling was aerobic. When pore water percolates out of the sediment, it makes contact with air or it mixes with the water column where there is dissolved oxygen. Any oxidation effect, direct or indirect, affecting dissolved forms of nutrients, will occur in a similar manner in any sample in contact with air. Therefore, for our purposes, it is not necessary to maintain an anaerobic environment during sampling. In each case, there was an interval of ~ 30 minutes between samplings at each depth. Due to the fine size of sediment particles, pore water collection was slow, and in some cases the collectors became clogged. We collected all of the water that accumulated during the period between samplings ($20\text{-}40\text{ml}$) as a single sample. Thus, values of properties represent an average for the sampling interval. For the first four and the seventh samplings we had two complete sets of collectors, side by side; thus, we collected two "replicate" samples per depth, for each sampling time. The fifth and sixth samplings were designed to describe the horizontal variation. For the fifth sampling we positioned seven collectors in a line 2m long, perpendicular to the waterfront, four at the corners of a $7 \times 7\ \text{cm}^2$ square, and the other three separated 50cm from each other; all sampling from 30cm depth. The sixth sampling was similar to the fifth, but the collectors were aligned parallel to the waterfront. In all cases, sampling time was recorded to the nearest minute, and sampling was carried out for $4\text{-}6$ hours. In each sampling date,

agua intersticial fue lenta, y en algunos casos los colectores se colmataron. Colectamos como una sola muestra toda el agua que se acumuló en el período entre muestreos (20-40ml). Por lo anterior, los valores de las propiedades representan un promedio para el intervalo de muestreo. Para los primeros cuatro y el séptimo muestreos tuvimos dos conjuntos completos de colectores, lado a lado; por lo que colectamos dos "réplicas" por cada profundidad, para cada tiempo de muestreo. El quinto y sexto muestreos fueron diseñados para describir la variación horizontal. Para el quinto muestreo pusimos siete colectores en una línea de 2m de longitud, perpendicular a la playa; cuatro en las esquinas de un cuadrado de $7 \times 7 \text{ cm}^2$, y los otros tres separados 50cm uno del otro y de los primeros cuatro; todos los colectores muestrearon de 30cm de profundidad. El sexto muestreo fue similar al quinto, pero los colectores se alinearon paralelos a la playa. En todos los casos el tiempo de muestreo se registró al minuto, y los muestreos se realizaron durante 4 a 6 horas. En cada fecha de muestreo avanzamos ~2m con respecto a la localización del muestreo anterior, paralelamente a la playa. Antes de posicionar el muestreador poníamos dos hojas de madera de $1.2 \times 2.4 \text{ m}^2$ (triplay de 4×8 pies) y una escalera de madera de 2m de longitud, para que el sedimento fuertemente perturbado por las pisadas quedara unos 5m alejado del sitio de muestreo.

El agua intersticial se extrajo de los colectores con una jeringa de 50ml y una manguera de plástico. La muestra de superficie (0cm) se tomó directamente con una jeringa. Las muestras se filtraron con papel Whatman GF/C. Se separaron en tres muestras para NH_4 , PO_4 y $\text{S}^{0/00}$. Las muestras de PO_4 se pusieron en botellas de plástico, en una hielera a 4°C , y se analizaron más tarde en el laboratorio de acuerdo con el método de Strickland y Parsons (1972). Las muestras de PO_4 se diluyeron y se analizaron en duplicado. El NH_4 se determinó en el campo con un electrodo Orión 95-10 y un potenciómetro Orión 611. A la jeringa con la que se colectó la muestra se le adaptó un portafiltros con una aguja metálica para inyectar la muestra dentro de una burbuja de vidrio para la determinación de NH_4 con el electrodo. Esta burbuja de vidrio es muy similar a la diseñada por Zirino (1975) para la medición de pH,

we advanced ~2m from the last sampling location, parallel to the waterfront. Before positioning the sampler, we placed two $1.2 \times 2.4 \text{ m}^2$ (4×8 feet) tri-ply sheets, and a 2m long wooden ladder, used as a work bench, in such a way that heavily disturbed sediment was ~5m away from the sampling site.

Pore water was extracted from the collectors with a 50ml syringe and plastic tubing. The surface sample (0cm) was taken directly with a syringe. Samples were filtered through Whatman GF/C filters. They were separated into three subsamples, for NH_4 , PO_4 and $\text{S}^{0/00}$. Those for PO_4 analysis were placed into plastic bottles, stored in an ice box at 4°C , and analyzed later in the laboratory following the method of Strickland and Parsons (1972). PO_4 samples were diluted and analyzed in duplicates. NH_4 was determined in the field with an Orion 95-10 electrode and an Orion 611 potentiometer; a filter holder with a metallic needle was adapted to the syringe to inject the sample into a glass bubble with the electrode. This glass bubble is very similar to that designed by Zirino (1975) for pH measurements, but it does not have the constant-temperature water bath. We obtained stable and reproducible NH_4 readings in ~1 minute using this device (precision, $\pm 4\%$ of concentration). Two drops of water sample were used to obtain $\text{S}^{0/00}$ readings with an American Optical 10419 refractometer (precision, $\pm 0.5^{0/00}$).

After the first four and the last samplings, sediment cores were obtained using PVC tubes. Cores were frozen inside the tubes, extracted in the laboratory, and separated into 5cm slices around each sampling depth. Determination of porosity and organic matter content were performed. Porosity was determined following Behrens (1980). Organic matter content was estimated by weight loss after ignition at 550°C for 24 hours. Grain size fractions were also determined for the first core. After pretreatment of the samples with H_2O_2 to eliminate organic matter, grains were separated into sand ($> 64\mu\text{m}$) and the $< 64\mu\text{m}$ fraction.

RESULTS

On June 15th, and on July 3rd, 11th and 12th, sampling was carried out during

pero no tiene el baño de agua a temperatura constante. Obtuvimos lecturas estables y reproducibles de NH_4 en ~ 1 minuto usando este sistema, con una precisión de $\pm 4\%$ de la concentración. Se tomaron dos gotas de agua intersticial para obtener lecturas de $\text{S}^{0/00}$ con un refractómetro American Optical 10419, con precisión de $\pm 0.50/00$.

Después de los primeros cuatro y el séptimo muestreos, muestreamos núcleos de sedimento con tubos de PVC. Los núcleos se congelaron dentro de los tubos, se extrajeron en el laboratorio, y se separaron en rebanadas de 5cm alrededor de cada profundidad de muestreo. Se determinó la porosidad y el contenido de materia orgánica. La porosidad se determinó de acuerdo con Behrens (1980). El contenido de materia orgánica se estimó por pérdida de peso mediante ignición a 550°C por 24 horas. Las fracciones de tamaño de grano también se determinaron para el primer núcleo. Después de un tratamiento de las muestras de sedimento con H_2O_2 para eliminar la materia orgánica, las partículas se separaron en arena ($> 64 \mu\text{m}$) y la fracción $< 64 \mu\text{m}$.

RESULTADOS

En junio 15, y en julio 3, 11 y 12, los muestreos se llevaron a cabo con mareas muertas con amplitudes diurnas de 1.05, 1.63, 1.44 y 1.16 m, respectivamente; en junio 20 y 21, y en julio 23 hubo mareas vivas con amplitudes de 2.37, 2.58 y 2.18 m, respectivamente. Los primeros cuatro y el séptimo muestreos se realizaron con bajamar en la mitad del período de muestreo; en algunos casos la superficie del sedimento estuvo expuesta al aire, y al final del muestreo hubo una columna de agua de hasta 66cm. El quinto y sexto muestreos se realizaron con pleamar en la mitad del período de muestreo, con una columna de agua de hasta 76cm sobre el sitio de muestreo (Fig. 2).

Series de tiempo de perfiles verticales

La salinidad cambió irregularmente con la profundidad y con el tiempo. Varió entre 30 y $36^{0/00}$. Los valores máximos generalmente se encontraron en la superficie. Los valores mínimos se presentaron como eventos, hacia el final de bajamar, y a menudo a

neap tides with diurnal ranges of 1.05, 1.63, 1.44 and 1.16 m, respectively; on June 20th and 21st, and on July 23rd there were spring tides with ranges of 2.37, 2.58 and 2.18 m, respectively. The first four and the seventh samplings were carried out with low tide in the middle of the sampling period; in some cases the sediment surface was exposed to the air, and at the end of sampling there was a water column as high as 66cm. The fifth and sixth samplings were carried out with high tide in the middle of the sampling period and with a water column of up to 76cm height on the sampling site (Fig. 2).

Time series of vertical profiles

Salinity changed irregularly with depth and time. It varied between 30 and $36^{0/00}$. Maximum values were generally found at the surface. Minimum values were found as events, towards the end of low tide, and often at intermediate depth (10-20cm). In the first sampling, the $\text{S}^{0/00}$ minimum extended from 15 to 40cm, and it resembled an upwelling event of less saline water (Fig. 3a,b). In the second sampling the $\text{S}^{0/00}$ was very localized at 15cm for replicate A and at 20cm for replicate B and they were separated in time (~ 1 hour) (Fig. 3c,d). During the third sampling there was a very strong $\text{S}^{0/00}$ gradient between the surface and the minimum (at 5 to 10cm), with surface values of $34^{0/00}$ and minimum values of $30.5^{0/00}$ (not illustrated). The very low values did not persist more than one collection, they only lasted for less than one hour; and with the exception of the first sampling, they were found only at one depth. During the seventh sampling we found no minimum, $\text{S}^{0/00}$ was very homogeneous with values between 35 and $36^{0/00}$ (not illustrated). When the $\text{S}^{0/00}$ minimum was not present, $\text{S}^{0/00}$ remained between 35 and $36^{0/00}$, again with the exception of the first sampling.

Porosity and organic matter content varied greatly, both vertically and horizontally (Fig. 4a-j). In general, porosity and organic matter decreased with depth. But, in the third and fourth samplings porosity had maxima at 15 and 20cm, respectively; and organic matter content had maxima and minima in the third, fourth and seventh samplings. Porosity was very high in the third

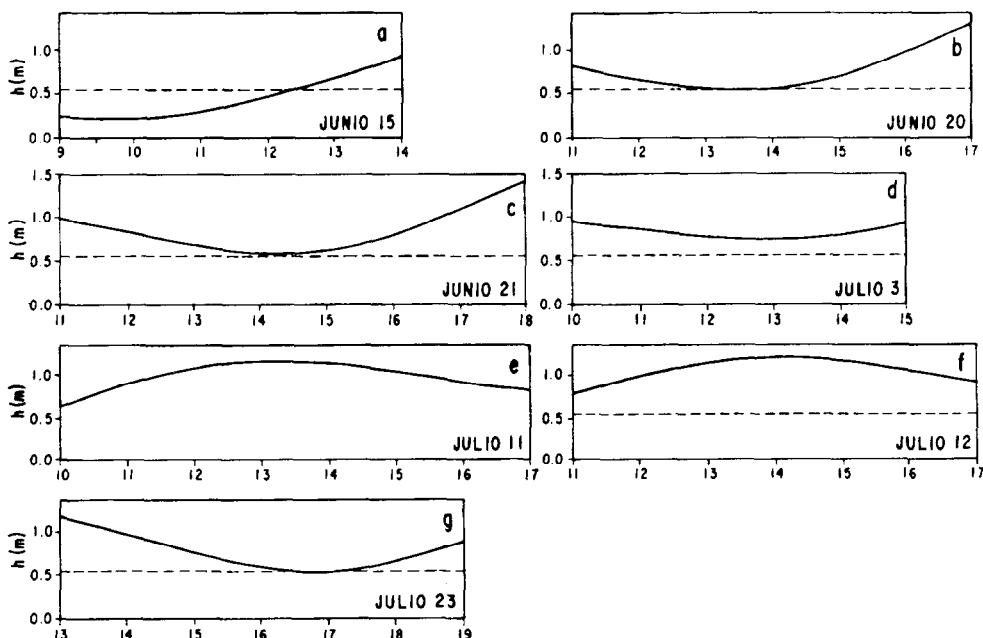


Figura 2. Nivel del mar con respecto al nivel de bajamar media inferior (h) (las líneas punteadas representan el nivel de la superficie del sedimento en el lugar de muestreo).

Figure 2. Sea level with respect to mean low water (h) (broken lines represent the level of sediment surface at the sampling site).

profundidad intermedia (10-20cm). En el primer muestreo, el mínimo de $S^{0}/_{00}$ se extendió de 15 a 40cm y semejó un evento de surgencia de agua menos salina (Fig. 3a,b). En el segundo muestreo el mínimo de $S^{0}/_{00}$ fue muy localizado a 15cm en la "réplica" A y a 20cm en la "réplica" B, y ambos estuvieron separados en el tiempo (~1 hora) (Fig. 3c,d). Durante el tercer muestreo hubo un gradiente intenso de $S^{0}/_{00}$ entre la superficie y el mínimo (a 5-10cm), con valores superficiales de $34^{0}/_{00}$ y valores mínimos de $30.5^{0}/_{00}$ (no se ilustra). Los valores muy bajos no persistieron más que una colección, no duraron más de una hora; y con la excepción del primer muestreo, se encontraron a una sola profundidad de muestreo. Durante el séptimo muestreo no detectamos ningún mínimo, la $S^{0}/_{00}$ fue muy homogénea con valores entre 35 y $36^{0}/_{00}$ (no se ilustra). Cuando el mínimo de $S^{0}/_{00}$ no se presentó, la $S^{0}/_{00}$ permaneció entre 35 y $36^{0}/_{00}$, de nuevo con la excepción del primer muestreo.

and fourth samplings (up to 90%); and organic matter was very high in the fourth sampling, at 0 and 40cm (up to 11.5%). Sand content increased with depth, in the first sampling location, from ~70% at 5cm to ~87% at 40cm, and the other size fractions decreased accordingly (Fig. 4k).

Phosphate changed greatly with depth, horizontal distance and time (Figs. 5a-f and 6a-d). Usually, lowest values were found at the surface, and highest values were found at intermediate depths (15-20cm). However, this situation changed drastically with time in some cases, i.e.: towards the end of the third sampling the maximum PO_4 values were at 10cm, and at the end of the seventh sampling PO_4 values at 30cm were as high as those of 15-20cm (Figs. 5e and 6c,d). PO_4 surface values had the lowest variability with time, followed by those of 40cm. Highest PO_4 variability with time was found for 5-20cm depth, although, during the seventh sampling, PO_4 values for 30cm also exhibited very high

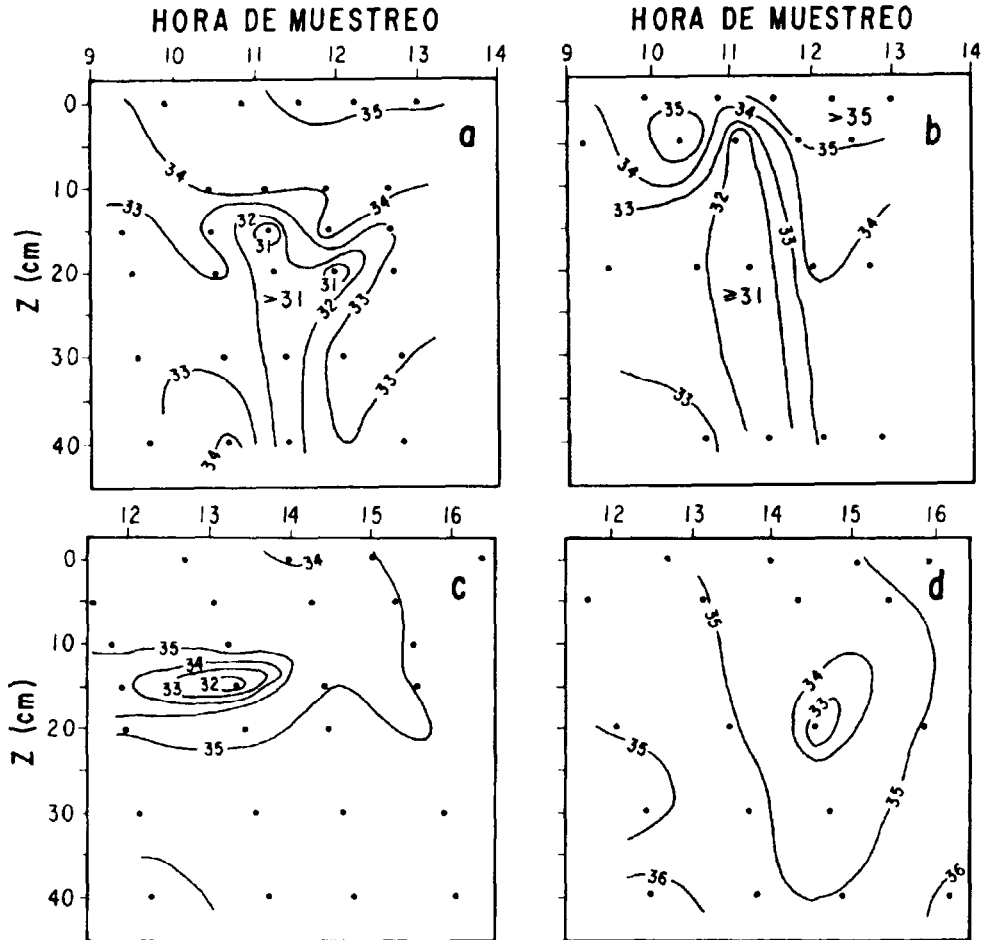


Figura 3. Series de tiempo de salinidad para el primero (a, b) y el segundo (c, d) muestreos.
Figure 3. Salinity time series for the first (a, b) and second (c, d) samplings.

La porosidad y el contenido de materia orgánica variaron grandemente, tanto vertical como horizontalmente (Fig. 4a-j). En general, la porosidad y la materia orgánica disminuyeron con la profundidad. Pero en el tercero y cuarto muestreos la porosidad tuvo máximos a 15 y 20cm, respectivamente; y el contenido de materia orgánica tuvo máximos y mínimos en el tercero, cuarto y séptimo muestreos. La porosidad fue muy alta en el tercero y cuarto muestreos (hasta de 90%); y la materia orgánica fue muy alta en el cuarto muestreo, a 0 y 40cm (hasta de 11.5%). El contenido de arena aumentó con la profundidad, en la primera localización de muestreo, de ~ 70% a ~ 87% a 40cm (Fig. 4k).

variation with time. During the seventh sampling, at 15cm, PO_4 varied with time as much as ~ 10 times the minimum value. More usually, PO_4 varied with time up to 2-3 times the minimum values, at a certain sampling depth. During the fourth sampling we found the smallest changes with time and depth (Fig. 6a,b). PO_4 values for "replicate" samples also exhibited large differences in many cases. With few centimeters of horizontal distance there were differences of as much as ~ 80%.

Ammonium had vertical distributions similar to those of PO_4 , with minimum values at the surface, maximum values at intermediate depths (15-20cm) and relatively low

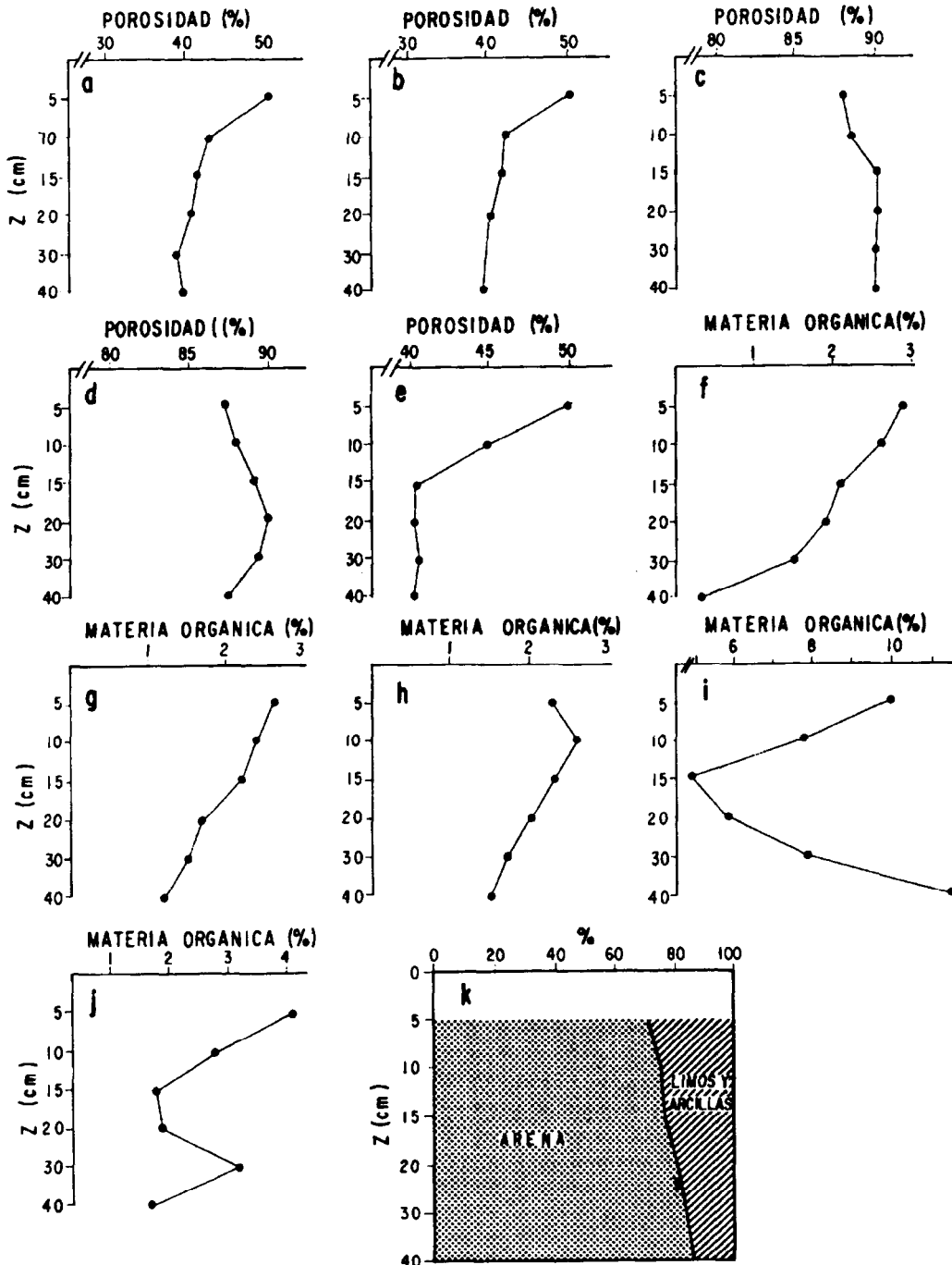


Figura 4. Distribución vertical de porosidad (a-e) y contenido de materia orgánica (f-j), para el sedimento colectado en los primeros cuatro y en el séptimo muestreos; y distribución vertical de fracciones de tamaño de grano (k) para el sedimento del primer muestreo.
 Figure 4. Vertical distribution of porosity (a-e) and organic matter content (f-j) for sediment collected in the first four and the seventh samplings; and vertical distribution of grain size fractions (k) for sediment collected in the first sampling.

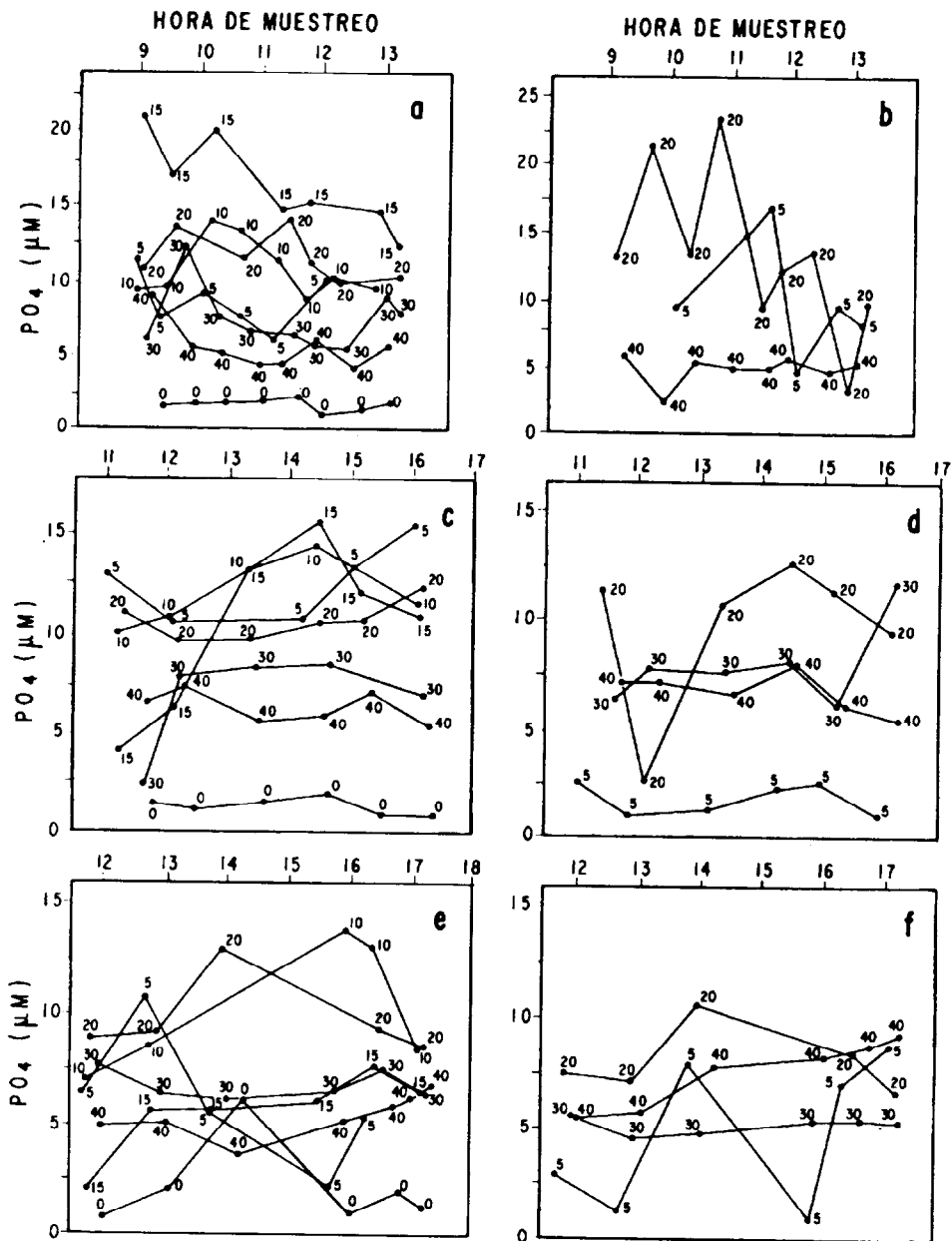


Figura 5. Series de tiempo de fosfato reactivo para el primer (a, b), segundo (c, d) y tercer (e, f) muestreos. Los números al lado de las gráficas representan la profundidad en cm.

Figure 5. Reactive phosphate time series for the first (a, b), second (c, d) and third (e, f) samplings. Numbers by the data points are depth in cm.

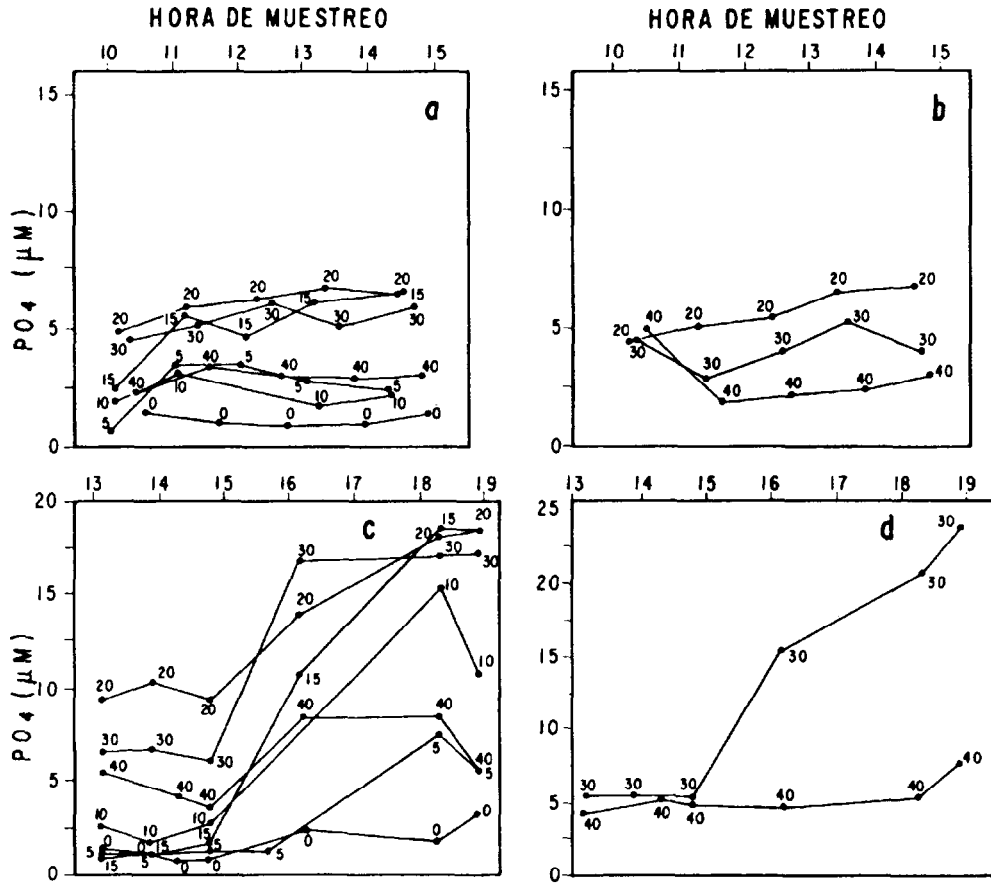


Figura 6. Series de tiempo de fosfato reactivo para el cuarto (a, b) y séptimo (c, d) muestreos. Los números al lado de las gráficas representan la profundidad en cm.

Figure 6. Reactive phosphate time series for the fourth (a, b) and seventh (c, d) samplings. Numbers by the data points are depth in cm.

PO_4 cambió grandemente con la profundidad, en el sentido horizontal y con el tiempo (Figs. 5a-f y 6c-d). Generalmente los valores más bajos se encontraron en la superficie y los más altos se encontraron a profundidades intermedias (15-20cm), para luego decrecer hacia mayor profundidad. Sin embargo, esta situación cambió algunas veces drásticamente con el tiempo, v.g.: hacia el final del tercer muestreo los máximos valores de PO_4 se presentaron a 10cm, y al final del séptimo muestreo los valores a 30cm fueron tan altos como los de 15-20cm (Figs. 5e y 6c,d). Los valores superficiales de PO_4 presentaron la más baja variabilidad con el

values of 40cm (Figs. 7a-d and 8a-d). However, variations of PO_4 and NH_4 were not strongly correlated. NH_4 surface values had the lowest variability with time and those for 5-20cm had the highest variability with time. With exception of one value during the second sampling and another during the seventh sampling ($\sim 40\mu M$), all NH_4 surface values were $< 14\mu M$, and often $< 10\mu M$. The highest NH_4 value was $315\mu M$, at the end of the seventh sampling, at 15cm (Fig. 8c). During the seventh sampling there was a very drastic change of the NH_4 vertical profile with time: at the beginning of the sampling NH_4 did not change much with depth, all values

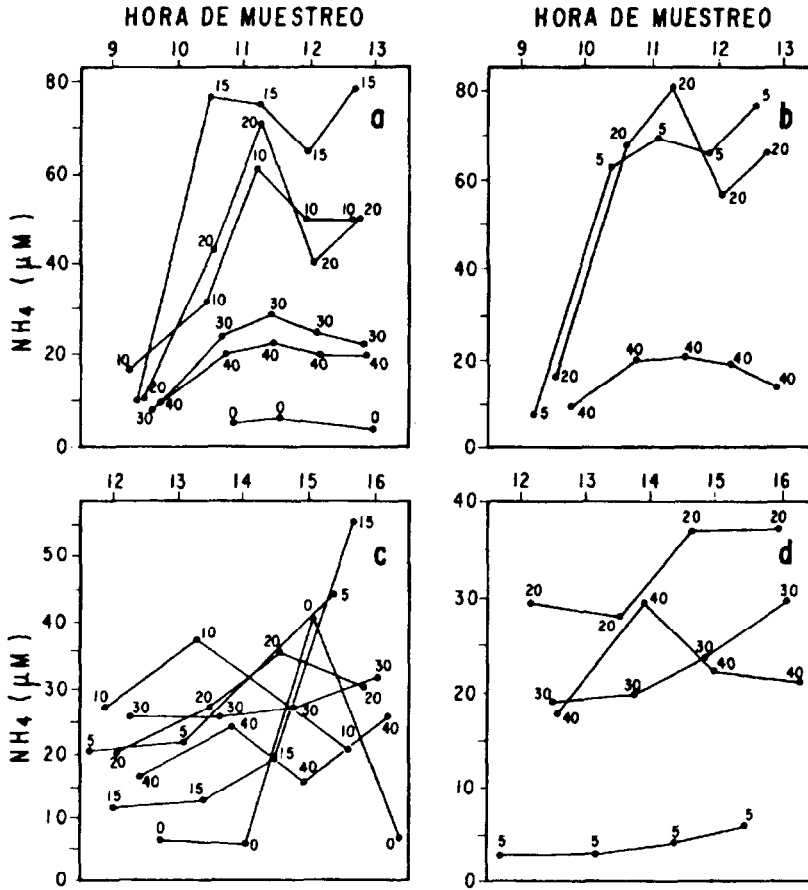


Figura 7. Series de tiempo de amonio para el primer (a, b) y segundo (c, d) muestreos. Los números al lado de las gráficas representan la profundidad en cm.

Figure 7. Ammonium time series for the first (a, b) and second (c, d) samplings. Numbers by the data points are depth in cm.

tiempo, seguidos por los valores de 40cm. La más alta variabilidad con el tiempo se presentó en los valores de 5-20cm de profundidad; aunque durante el séptimo muestreo, los valores de PO₄ de 30cm también mostraron muy alta variación con el tiempo. En el séptimo muestreo los valores de PO₄ de 15cm variaron tanto con el tiempo que el máximo valor fue ~10 veces el mínimo. Más a menudo los valores de PO₄ variaron con el tiempo hasta alcanzar dos a tres veces el valor del mínimo, en una cierta profundidad de muestreo. En el cuarto muestreo encontramos los cambios más pequeños con el tiempo y la profundidad (Fig. 6a,b). Los valores de PO₄ para las "réplicas" también mostraron grandes

were < 20µM with exception of the one for 20cm; values did not change much with time during the subsequent two collections; but from the fourth collection they changed rapidly to become the highest values of our whole data set. At the beginning of the first sampling, the NH₄ vertical distribution was very homogeneous, all NH₄ values were < 20µM, but between the first and second collections there was a large increase of NH₄ values for 5-20cm, and afterwards variability with time was relatively small (Fig. 7a). NH₄ values for "replicate" samples were more similar than those for PO₄; although there are some clear differences like those for the second sampling, and the values for 5cm in the third sampling.

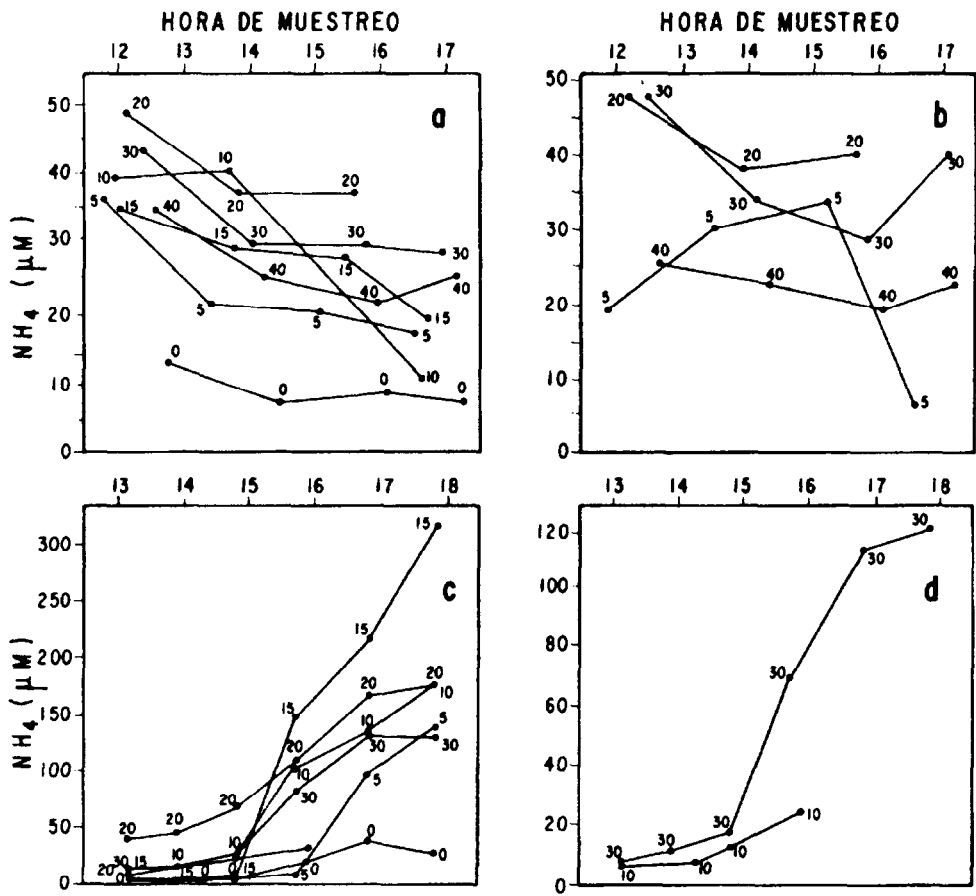


Figura 8. Series de tiempo de amonio para el tercer (a, b) y séptimo (c, d) muestreos. Los números al lado de las gráficas representan la profundidad en cm.

Figure 8. Ammonium time series for the third (a, b) and seventh (c, d) samplings. Numbers by the data points are depth in cm.

diferencias en muchos casos. Con pocos centímetros de distancia horizontal hubo diferencias tan grandes como 80%.

NH_4 tuvo distribuciones verticales similares a las de PO_4 , con valores mínimos a la superficie, máximos a profundidades intermedias (15-20cm) y valores relativamente bajos a 40cm (Figs. 7a-d y 8a-d). Sin embargo, las variaciones de PO_4 y NH_4 no estuvieron correlacionadas fuertemente. Los valores superficiales de NH_4 tuvieron la más baja variabilidad con el tiempo, y los de 5-20cm la más alta. Con excepción de un va-

Time series at 30cm with collectors placed perpendicular and parallel to the waterfront

During the fifth sampling, with the collectors on a line perpendicular to the waterfront, we had the four collectors at the corners of a $7 \times 7 \text{ cm}^2$ square (samplers A 1-4) situated 1.5m of horizontal distance from the basic sampling level, with the sediment surface 0.85m above mean low water; and the other three collectors were aligned towards the waterfront (samplers B, C and D). The sediment surface at the square (samplers A 1-4) was 0.31m above that at location D (the basic sampling level). In general, $\text{S}^\circ/\text{O}_0$, PO_4

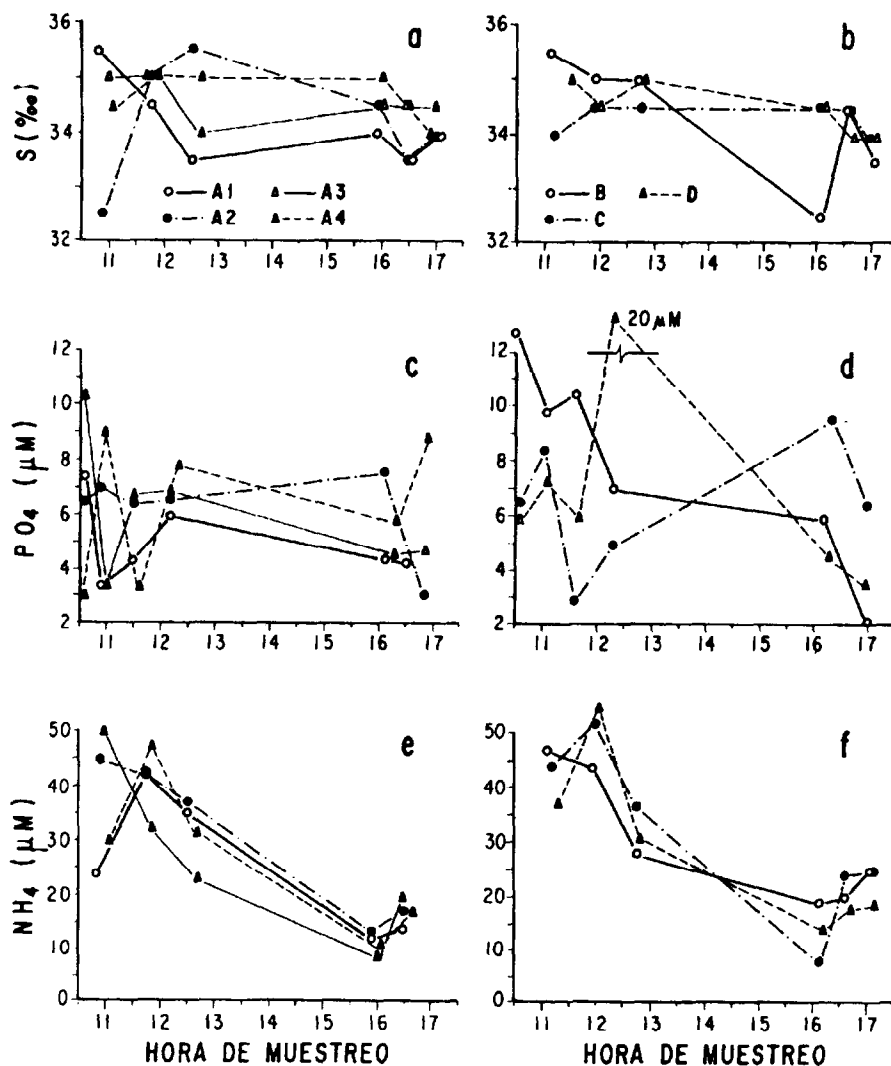


Figura 9. Series de tiempo de salinidad (a, b), fosfato reactivo (c, d) y amonio (e, f) para el quinto muestreo.

Figure 9. Salinity (a, b), reactive phosphate (c, d) and ammonium (e, f) time series for the fifth sampling.

lor en el segundo muestreo y otro en el séptimo ($\sim 40\mu\text{M}$), todos los valores superficiales de NH_4 fueron $< 14\mu\text{M}$ y a menudo $< 10\mu\text{M}$. El más alto valor de NH_4 fue $315\mu\text{M}$, al final del séptimo muestreo, a 15cm (Fig. 8c). En el séptimo muestreo hubo un cambio muy drástico del perfil vertical de NH_4 con el tiempo: al comienzo del muestreo, NH_4 no cambió mucho con la profundidad, todos los

and NH_4 values for collectors A 1-4 were as different and changed as much with time as those for collectors B, C and D. Our few data indicate that with few centimeters of distance (i.e.: 7cm) there is a variability similar to that observed with decimeters of distance (5-15dm) (Fig. 9a-f). Variations of seawater properties were somewhat irregular, mainly those of $\text{S}^0/\text{‰}$. However, the trends were similar for

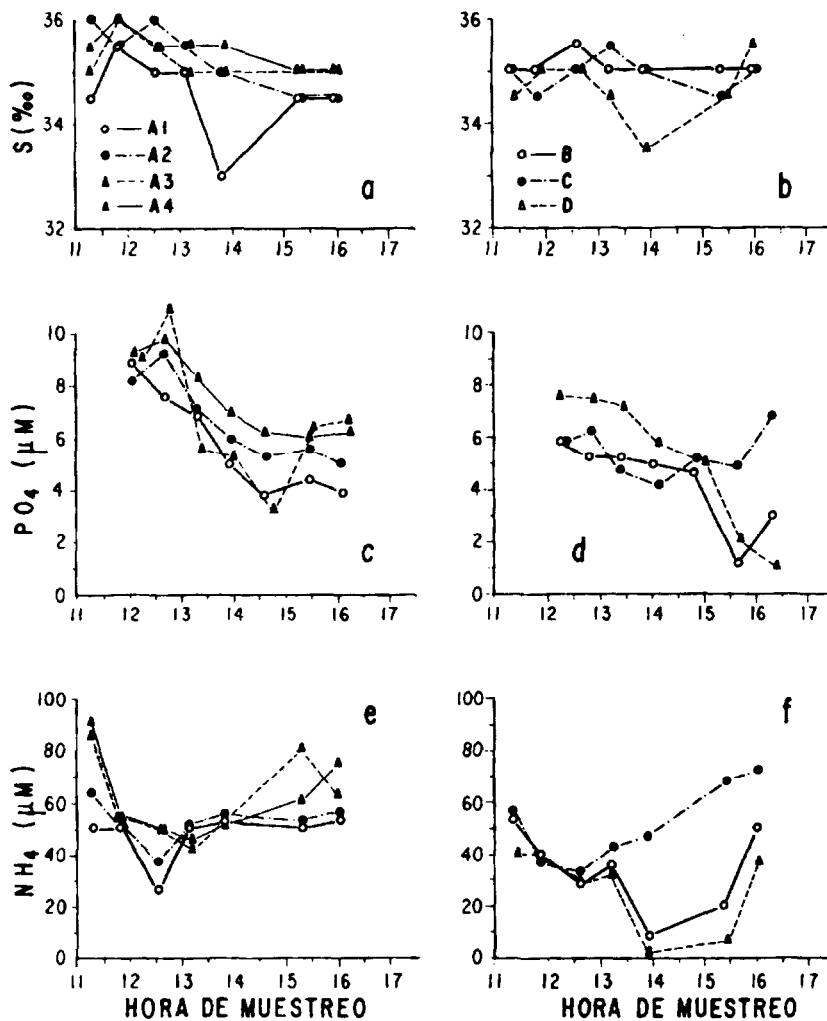


Figura 10. Series de tiempo de salinidad (a, b), fosfato reactivo (c, d) y amonio (e, f) para el sexto muestreo.

Figure 10. Salinity (a, b), reactive phosphate (c, d) and ammonium (e, f) time series for the sixth sampling.

valores fueron $< 20\mu\text{M}$ con excepción de uno de 20cm ; los valores no cambiaron mucho con el tiempo durante las subsiguientes dos colectas; pero de la cuarta colecta en adelante cambiaron rápidamente para llegar a ser los valores más altos de todo nuestro conjunto de datos. Al comienzo del primer muestreo, la distribución vertical de NH_4 fue muy homogénea, pero entre la primera y segunda

all collectors regardless of location with respect to mean low water level; there was no clear difference in the water properties due to location. NH_4 displayed the most consistent behaviour with time, and it had lower variability in space that that of PO_4 . For collectors A 1-4, the maximum:minimum ratios, for the same collection time, were as large as 3.5 for PO_4 and 2 for NH_4 ; and the maximum

colecta hubo un gran aumento de NH_4 a los 5-20cm, y después la variabilidad con el tiempo fue relativamente pequeña (Fig. 7a). Los valores de NH_4 de las "réplicas" fueron más similares entre sí que los de PO_4 ; aunque hay claras diferencias entre dichas "réplicas" de NH_4 , como las del segundo muestreo, y los valores de 5cm en el tercer muestreo.

Series de tiempo con los colectores a 30cm, alineados perpendicular y paralelamente a la línea de playa

Durante el quinto muestreo, con los colectores alineados perpendicular a la línea de playa, pusimos los cuatro colectores en las esquinas del cuadrado de $7 \times 7 \text{ cm}^2$ (colectores A 1-4) situados a 1.5m de distancia horizontal del nivel básico de muestreo, con la superficie del sedimento a 0.85m sobre el nivel de bajamar media inferior, y los otros tres colectores fueron alineados hacia el agua (colectores B, C y D). La superficie del sedimento de los colectores A 1-4, en el cuadrado, estuvo 0.31m por encima de la superficie de la localización D (el nivel básico de muestreo). En general los valores de $\text{S}^{0/00}$, PO_4 y NH_4 de los colectores A 1-4 fueron tan diferentes entre sí, y cambiaron tanto con el tiempo, como los valores de los colectores B, C y D. Nuestros escasos datos indican que con pocos centímetros de distancia horizontal (v.g.: 7cm) hay una variabilidad similar a la que se observa con decímetros de distancia (5-15 dm) (Fig. 9a-f). Las variaciones de las propiedades del agua intersticial fueron un tanto irregulares, principalmente las de $\text{S}^{0/00}$. Sin embargo, las tendencias fueron similares para todos los colectores independientemente de la localización con respecto al nivel de bajamar media inferior; no hubo diferencias claras en las propiedades del agua debido a diferencias en localización. Los valores de NH_4 mostraron el comportamiento más consistente con el tiempo, y tuvieron más baja variabilidad en el espacio que los de PO_4 . Las razones máximo:mínimo, para los colectores A 1-4 para el mismo tiempo de colección, fueron tan grandes como 3.5 para PO_4 y 2 para NH_4 ; y la máxima diferencia de $\text{S}^{0/00}$ fue 30/00. Estas razones indican que las diferencias entre colectores son reales y que no son el resultado de errores de muestreo o análisis.

$\text{S}^{0/00}$ difference was 30/00. These ratios indicate that differences between collectors are real and not the result of sampling and analytical errors.

When the seven collectors were placed parallel to the waterfront, the sediment surface was 0.54cm above mean low water. $\text{S}^{0/00}$ had a similar range and trend of variation as in the previous case with the collectors aligned perpendicular to the waterfront (Figs. 9a,b and 10a,b). PO_4 changed less between collectors A 1-4 than in the previous case (Figs. 9c and 10c). For collectors A 1-4, the maximum:minimum ratios, for the same collection time, were only as large as 1.4 for PO_4 and 1.8 for NH_4 ; and the maximum $\text{S}^{0/00}$ difference was 2.50/00. NH_4 values were larger (up to two times) than in the previous case (Figs. 9e,f and 10e,f). For collectors B, C and D, NH_4 values for the same collection time had relatively small differences in the first three collections; but, in the last three collections differences were large, with collector C having the largest values (Fig. 10f). NH_4 had a larger variability in space than that of PO_4 during this sampling. The behaviour of PO_4 in Figure 10 resembles that of NH_4 in Figure 9. From Figures 9 and 10 there is no clear evidence of difference in behaviour of pore water properties due to the alignment of the collectors (perpendicular or parallel to the waterfront).

DISCUSSION

As in the case reported by Camacho-Ibar and Alvarez-Borrego (1988), our data show an intense patchiness, with large differences within short distances. Our few data indicate that most of the patchiness is in the scale of few centimeters (< 10cm). To properly characterize this patchiness it is necessary to generate space series with a constant, short sampling interval, and with a relatively large number of data points (~40). Due to sampling being time consuming and the need of synopticity, we should generate these space series for a single variable, or two like $\text{S}^{0/00}$ and PO_4 which can be preserved for later analysis. In reality, our "replicate samples" were different samples, due to the strong patchiness, and graphs showing the vertical profiles of a variable (i.e.: Fig. 3a-d) should be considered as a gross first approxi-

Cuando los siete colectores se situaron en una línea paralela a la playa, la superficie del sedimento estaba a 0.54m sobre el nivel de bajar media inferior. La $S^{0}/_{00}$ tuvo un intervalo y una tendencia de variación similares al caso previo con los colectores alineados perpendicularmente a la playa (Figs. 9a,b y 10a,b). Los valores de PO_4 fueron menos diferentes entre los colectores A 1-4 que en el caso previo (Figs. 9c y 10c). Las razones máximo:mínimo, para los colectores A 1-4 para el mismo tiempo de colección, fueron sólo 1.4 para PO_4 y 1.8 para NH_4 ; y la máxima diferencia de $S^{0}/_{00}$ fue $2.5^{0}/_{00}$. Los valores de NH_4 fueron mayores que en el caso previo (hasta el doble) (Figs. 9e,f y 10e,f). En el caso de los colectores B, C y D, los valores de NH_4 de un mismo tiempo de colección tuvieron diferencias relativamente pequeñas en las primeras tres colectas; pero en las últimas tres colectas las diferencias fueron grandes, y los valores mayores de NH_4 fueron los del colector C (Fig. 10f). En este muestreo, los valores de NH_4 tuvieron una variabilidad espacial mayor que la de PO_4 . El comportamiento de PO_4 en la Figura 10 semeja la de amonio en la Figura 9. De las Figuras 9 y 10 se puede apreciar que no hubo diferencias claras de comportamiento de las propiedades del agua intersticial debidas a la alineación de los colectores (perpendicular o paralela a la línea de playa).

DISCUSION

Nuestros datos muestran un petacheo intenso, como en el caso reportado por Camacho-Ibar y Alvarez-Borrego (1988), con grandes diferencias en distancias muy cortas. Nuestros escasos datos indican que la mayoría del petacheo está en la escala de unos pocos cm (< 10 cm). Para caracterizar apropiadamente este petacheo es necesario generar series de espacio con un intervalo de muestreo corto y constante, y con un número de puntos relativamente grande (~ 40). Debido a que el muestreo consume mucho tiempo y como tenemos necesidad de sinopticidad, debemos generar estas series de espacio para una sola variable, o dos que como la $S^{0}/_{00}$ y el PO_4 se puedan preservar para analizarlas posteriormente en el laboratorio. En realidad nuestras "réplicas" fueron muestras diferentes debido al fuerte petacheo, y las gráficas mos-

tration because collectors for different depths are separated few centimeters from each other. Our data also show large temporal variations. These may be the effect of patchiness and percolation of pore waters with changes in sea level. We also need longer time series to characterize these changes properly, with sufficient data points to attempt cross-correlations with tides and other independent variables. Biota may cause most of the physical patchiness in this kind of environment, which in turn results in a spectrum of physical and chemical conditions that affect the properties of pore waters. The literature describes many factors that may cause patchiness. Benthic fauna, mainly burrowing organisms, contribute to sediment heterogeneity. According to Montague (1982), the burrowing activity of the fiddler crab (*Uca* sp.) increases the aerobic surface of sediments by 60% promoting the aerobic degradation of organic matter. Burrows also facilitate pore water circulation, affecting both the vertical and horizontal distribution of salinity, nutrients and other properties. In our study, in general, temporal variation seemed to be greater at 5-20cm (mostly at 15cm) than at other depths (Figs. 3, 5, 6, 7 and 8). This may be due to differences in seepage velocities and/or differences in horizontal concentration gradients. According to Gardner (1973), water movement in sediments is faster than could be predicted from sediment permeability and hydraulic gradients. Zimmermann *et al.* (1985) suggested that the benthic fauna act as a factor that increases percolation rate, creating routes for easier movement of pore waters.

According to Valiela (1984), vertical distributions of nutrient concentrations in sediments are quite variable; and in anaerobic sediments there is a peak at some relatively shallow depth. Reported highest values at this peak are similar to maximum values measured by Camacho-Ibar and Alvarez-Borrego (1988). The type and concentration of organic matter, the bacterial activity, and bioturbation are some of the factors responsible for the characteristics of each vertical profile (Montgomery *et al.*, 1979); physical factors such as grain size and tidal dynamics, which are correlated, are also responsible for those characteristics.

trando los perfiles verticales de una variable (v.g.: Fig. 3a-d) deben ser consideradas como una primera aproximación gruesa a la realidad, porque los colectores de las diferentes profundidades estuvieron separados uno del otro unos pocos centímetros. Nuestros datos también muestran grandes variaciones temporales. Estas pueden ser el efecto del petacheo y la percolación del agua intersticial con los cambios del nivel del mar. También necesitamos series de tiempo más largas para caracterizar estos cambios apropiadamente, con datos suficientes para intentar correlaciones cruzadas con mareas y otras variables independientes. La biota puede ser causante de la mayor parte del petacheo físico en este tipo de medio ambiente, que luego resulta en un espectro de condiciones físicas y químicas que afecta las propiedades del agua intersticial. La literatura describe a detalle muchos factores que pueden causar petacheo. La fauna bentónica, principalmente los organismos que construyen madrigueras, contribuyen a la heterogeneidad del sedimento. De acuerdo con Montague (1982), la actividad de cavación de madrigueras de *Uca* sp. aumenta la superficie aeróbica de los sedimentos en un 60% promoviendo la degradación aeróbica de materia orgánica. Las madrigueras también facilitan la circulación del agua intersticial, afectando la distribución vertical y horizontal de la salinidad, los nutrientes y otras propiedades. En general, en nuestro estudio, la variación temporal pareció ser mayor a 5-20cm (principalmente a 15cm) que a otras profundidades (Figs. 3, 5, 6, 7 y 8). Esto puede deberse a diferencias en las velocidades de percolación y/o a diferencias en los gradientes horizontales de concentración. De acuerdo con Gardner (1973), el movimiento de agua en los sedimentos es más rápido que lo que se predeciría de la permeabilidad del sedimento y los gradientes hidráulicos. Zimmermann *et al.* (1985) sugirió que la fauna bentónica actúa como un factor que aumenta la velocidad de percolación, creando rutas para un movimiento más fácil de agua intersticial.

De acuerdo con Valiela (1984), las distribuciones verticales de las concentraciones de nutrientes en los sedimentos son muy variables; en sedimentos anaeróbicos hay un pico de máxima concentración en profundidades relativamente variables. Los más altos valores reportados para este pico son simi-

As in the case reported by Camacho-Ibar and Alvarez-Borrego (1988), the vertical variation in salinity indicates the presence of underground freshwater input. Green-Ruiz *et al.* (1983) reported $S^{0/00}$ values of $< 31^{0/00}$ at 15-20cm at a location near the entrance of Estero de Punta Banda under a $\sim 7m$ water column. There is an agricultural valley near the Estero, and irrigation water is supplied by pumping water from wells. The flow volume of these wells is high, illustrating the high flow of interstitial water. Also, there is a well with very low salinity water (few $^{0/00}$) at few meters depth, where the sand bar narrows north of our sampling location (Fig. 1). This well provides water for a touristic development south of our sampling location. The presence of low salinity values was often very localized both in time and depth (Fig. 3). During the first sampling (Fig. 3a,b) we had the most extended minimum in time and depth, and we also had the lowest tide with the sediment surface exposed to the air for longer time (Fig. 2a). During all the other samplings the low $S^{0/00}$ values were present mostly at a single time and depth. This indicates that at our sampling location the intrusions of less saline water were mostly by horizontal percolation. The hypothesis that most of the percolation was in the horizontal direction is also supported by the PO_4 and NH_4 variations with time. In spite of having PO_4 and NH_4 values as high as $> 15\mu M$ and $> 75\mu M$, respectively, at shallow depths like 5cm, surface values were in most cases $< 2\mu M$ for PO_4 and $< 10\mu M$ for NH_4 ; only in one case the surface value of NH_4 was up to $37\mu M$ and on that occasion the 5cm value was $135\mu M$. This indicates that most of the pore water percolation is within the sediments, with only relatively little quantities going out to the sediment surface. The fact that in general the shape of the vertical profiles is maintained, with a maximum at intermediate depth, also indicates that there was not much mixing and advection in the vertical sense, at our sampling location. This was possibly due to both gravity and capillary forces. Since mass has to be conserved, if percolation (which would consist mostly of advection in the direction of the sediment surface slope) is occurring significantly with the tides, exchange with the water column has to take place mainly at the channel's bottom where the sediment surface is mostly horizontal. Data from these deeper

lares a los valores máximos medidos por Camacho-Ibar y Alvarez-Borrego (1988). El tipo y concentración de materia orgánica, la actividad bacteriana y la bioturbación son algunos de los factores responsables de las características particulares de cada perfil vertical (Montgomery *et al.*, 1979); factores físicos como el tamaño de grano y la dinámica de las mareas, que se correlacionan, son también responsables de estas características.

La variación vertical de salinidad indica la presencia de un flujo subterráneo de agua dulce, como en el caso reportado por Camacho-Ibar y Alvarez-Borrego (1988). Green-Ruiz *et al.* (1983) reportaron valores de $S^0/_{00}$ de $< 31^0/_{00}$ a 15-20cm, en una localidad cercana a la boca del Estero de Punta Banda, bajo una columna de agua de ~7m. Hay un valle agrícola cerca del Estero, y la irrigación se suple por bombeo de pozos. El flujo de estos pozos es alto e ilustra el alto flujo del agua intersticial. También hay un pozo con agua de muy baja salinidad (algunas $^0/_{00}$) y con pocos metros de profundidad, donde la barra arenosa se estrecha al norte de nuestra localización de muestreo (Fig. 1). Este pozo provee agua para un desarrollo turístico al sur de nuestra localización de muestreo. Nuestros valores de baja salinidad se presentaron a menudo muy localizados tanto en tiempo como en profundidad (Fig. 3). Durante el primer muestreo (Fig. 3a,b) tuvimos el mínimo de $S^0/_{00}$ más extendido en tiempo y profundidad, y también tuvimos la más baja marea, con la superficie del sedimento expuesta al aire por más largo tiempo (Fig. 2a). Durante todos los otros muestreos los valores bajos de $S^0/_{00}$ se presentaron en un sólo tiempo de colección y en una profundidad. Esto indica que en nuestra localización de muestreo las intrusiones de agua menos salina se realizaron principalmente por percolación horizontal. Esta hipótesis también está apoyada por las variaciones temporales de PO_4 y NH_4 . A pesar de tener valores tan altos como $> 15\mu M$ y $> 75\mu M$ para PO_4 y NH_4 , respectivamente, en profundidades tan someras como 5cm, en la mayoría de los casos los valores superficiales fueron $< 2\mu M$ para PO_4 y $< 10\mu M$ para NH_4 ; únicamente en un caso el valor superficial de NH_4 fue $37\mu M$ y en esa ocasión el valor para 5cm fue $135\mu M$. Esto indica que la mayor parte del agua intersticial permanece en los sedimentos, y

sediments are needed to test this hypothesis. Nevertheless, there was indeed some pore water percolating out from the sediments, at our sampling location, at least from depths of 1 or 2cm, and at least during short periods. This is indicated by surface values as high as $2.5\mu M$ and on one occasion up to $6\mu M$ for PO_4 , and as high as $15\mu M$ and on two occasions up to $> 35\mu M$ for NH_4 . These high nutrient concentration values could only originate from the sediments.

Our data show some indications of a negative correlation of nutrients with sea level, with relatively higher PO_4 and NH_4 concentrations associated with low tides and vice versa, especially with relation to nutrients for intermediate depths (5-20cm). However, again, we need longer time series to dilucidate this kind of correlations.

The $NH_4:PO_4$ ratio (N:P) exhibited a large variation during our study, from < 1 to > 15 . During the seventh sampling, N:P values ranged from ~1.2 at 13:18 hours to ~17.5 at 18:00 hours (Figs. 6c and 8c), the largest temporal change recorded. Camacho-Ibar and Alvarez-Borrego (1988) reported N:P ratios changing from < 1 to 50 for pore waters of sediments at the head of the Estero. These large N:P variations are due to NH_4 and PO_4 being dependent on different biological and physico-chemical processes and conditions. Precipitation and dissolution of authigenic minerals, and adsorption and desorption on organic and inorganic particles of the sediment are processes that affect PO_4 and NH_4 distributions strongly and differently (Camacho-Ibar and Alvarez-Borrego, 1988; and others cited therein).

The behaviour of physical properties and nutrients of pore waters at our sampling location was in general very similar to that reported by Camacho-Ibar and Alvarez-Borrego (1988) for the sediments of the head of the Estero. Their sampling site was a salt marsh with abundant *Spartina foliosa*. At both places, vertical profiles of nutrients had maxima at intermediate depths and minima at the sediment surface and at 40cm. However, there were clear significant differences. The sand fraction for near surface sediments reported by Camacho-Ibar and Alvarez-Borrego (1988) was between 25 and 52%, and ours was

sólo una pequeña parte sale a la superficie. El hecho de que, en general, la forma de los perfiles verticales se mantiene, con un máximo a profundidades intermedias, también indica que hubo muy poca advección y mezcla en el sentido vertical, en nuestra localización de muestreo. Esto posiblemente se debió a las fuerzas de gravedad y capilaridad. Debido al principio de conservación de masa, si la percolación (que consistiría principalmente de advección en el sentido de la superficie del sedimento) está realizándose significativamente con las mareas, el intercambio con la columna de agua tiene que llevarse a cabo principalmente en los fondos de los canales donde la superficie del sedimento es horizontal. Se requieren datos de estos sedimentos más profundos para probar esta hipótesis. Sin embargo, algo del agua intersticial se percoló hacia la superficie, en nuestra localización de muestreo, por lo menos de profundidades de 1 o 2 cm, y por lo menos en períodos cortos. Esto se muestra con valores superficiales tan altos como $2.5\mu\text{M}$ y en una ocasión hasta de $6\mu\text{M}$ para PO_4 , y tan altos como $15\mu\text{M}$ y en dos ocasiones hasta de $> 35\mu\text{M}$ para NH_4 . Estas altas concentraciones de nutrientes solamente se pudieron originar en los sedimentos.

Nuestros datos muestran algunas indicaciones de una correlación negativa con el nivel del mar, con valores relativamente más altos de PO_4 y NH_4 asociados con mareas bajas y viceversa, principalmente con relación a los nutrientes de profundidades intermedias (5-20cm). Sin embargo, de nuevo, necesitamos series de tiempo más largas para dilucidar este tipo de correlaciones.

Las razones $\text{NH}_4:\text{PO}_4$ (N:P) mostraron una gran variación durante nuestro estudio, desde < 1 a > 15 . Durante el séptimo muestreo, los valores de N:P variaron de ~ 1.2 a las 13:18 horas a ~ 17.5 a las 18:00 horas (Figs. 6c y 8c), siendo la más grande variación temporal registrada. Camacho-Ibar y Alvarez-Borrego (1988) reportaron un intervalo de variación de N:P de < 1 a 50 para aguas intersticiales de sedimentos en el extremo interno del Estero. Estas grandes variaciones de N:P se deben a que NH_4 y PO_4 dependen de diferentes procesos y condiciones biológicas y fisicoquímicas. La precipitación y la disolución de minerales autogénicos, y la adsorción y liberación en y de partículas

70%. Greater sand fractions are characteristic of more energetic environments. Our porosities were similar to theirs; although, their minimum for near surface sediments was $> 60\%$, and ours was 50%. In general, they reported higher organic matter content (up to $> 11\%$) than ours, but we had one case with values as high as their highest. Their S^0/O_2 values were much higher, up to $> 46^0/\text{O}_2$ at the surface, although it decreased with depth to $\sim 36^0/\text{O}_2$. This is in agreement with the general tendency of S^0/O_2 for the water column to increase towards the head of the Estero, and it is due to excess evaporation from the surface. Inland, the relatively high marsh and mudflats, flooded only during very high spring tides, usually have a surface layer of white salt. This does not occur on the much steeper slopes of the sand bar. Their maximum PO_4 values were two to three times higher than ours; and their maximum NH_4 values were about five times higher than ours. Their greater nutrient values might be due to greater organic matter content in the sediments and lower water exchange between the sediments and the water column at their sampling location. We need to design sampling experiments to characterize rates of remineralization, and that of water exchange at the sediment surface.

Our results, and those reported by Camacho-Ibar and Alvarez-Borrego (1988), invalidate any sampling scheme to describe relatively long-term cycles, or to compare different environments, based only on one or few samples (2-3) per location or per month, season, etc. In coastal lagoons like Estero de Punta Banda, it is necessary to properly characterize the variability within short distances (few centimeters to few meters) and short periods (minutes to few days) before attempting to describe long-term cycles, or to compare distant ($\sim \text{km}$) locations. The practice of sampling a single sediment core to characterize the pore water properties has to be abandoned.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank Víctor F. Camacho-Ibar and a group of enthusiastic students from the School of Marine Sciences, UABC, for their help with field and laboratory work. We also thank Albert Zirino, of NOSC-San Diego, for his valuable advice.

orgánicas e inorgánicas del sedimento, son procesos que afectan la distribución de PO_4 y NH_4 fuertemente y de manera diferente (Camacho-Ibar y Alvarez-Borrego, 1988; y otros citados por ellos).

El comportamiento de las propiedades físicas y los nutrientes de las aguas intersticiales de nuestra localización de muestreo fue en general muy similar al que reportaron Camacho-Ibar y Alvarez-Borrego (1988) para los sedimentos del extremo interno del Estero. Su lugar de muestreo fue una marisma con abundante *Spartina foliosa*. En ambos lugares los perfiles verticales de nutrientes tuvieron máximos a profundidades intermedias y mínimos en la superficie y a 40cm. Sin embargo, hubo claras diferencias significativas. La fracción de arena para los sedimentos cercanos a la superficie reportada por Camacho-Ibar y Alvarez-Borrego (1988) fue entre 25 y 52%, y la nuestra fue 70%. Las mayores fracciones de arena caracterizan a los medios ambientes más energéticos. Nuestras porosidades fueron similares a las de ellos; aunque su mínimo para el sedimento cercano a la superficie fue $> 60\%$ y el nuestro fue 50%. En general, ellos reportaron valores más altos de contenido de materia orgánica (hasta $> 11\%$) que los nuestros, pero tuvimos un caso con valores tan altos como el más alto de ellos. Sus valores de $S^{0/00}$ fueron mucho más altos, hasta $> 46^{0/00}$ en la superficie, pero decrecieron con la profundidad hasta $\sim 36^{0/00}$. Esto concuerda con la tendencia general de la $S^{0/00}$ de la columna de agua de aumentar hacia el extremo interno del Estero y se debe al exceso de evaporación en la superficie. En la ribera tierra adentro del Estero, las marismas relativamente altas que únicamente se inundan con mareas vivas muy altas, generalmente tienen una capa blanca de sal en la superficie. Esto no ocurre con las pendientes más pronunciadas de la barra de arena. Sus máximos valores de PO_4 fueron dos a tres veces mayores que los nuestros; y sus máximos NH_4 fueron como cinco veces los nuestros. Sus más altos valores de nutrientes pueden deberse al mayor contenido de materia orgánica en el sedimento y a un menor intercambio de agua entre el sedimento y la columna de agua en su localización de muestreo. Necesitamos diseñar experimentos para caracterizar velocidades de remineralización y velocidades de intercambio de agua en la superficie del sedimento.

English translation by the author.

Nuestros resultados, y los reportados por Camacho-Ibar y Alvarez-Borrego (1988), invalidan cualquier esquema de muestreo que pretenda describir ciclos relativamente grandes, o comparar diferentes medios ambientes, con base solamente en unas pocas muestras (2-3) por localización o por mes, estación del año, etc. En lagunas costeras como el Estero de Punta Banda es necesario caracterizar apropiadamente la variabilidad dentro de distancias cortas (de pocos centímetros a pocos metros) y de periodos cortos (minutos a días) antes de intentar el describir ciclos largos o comparar localizaciones con distancias grandes ($\sim km$) entre sí. La práctica de muestrear un solo núcleo de sedimento para caracterizar las propiedades del agua intersticial debe ser abandonada.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Víctor F. Camacho Ibar y un grupo de entusiastas estudiantes de la Facultad de Ciencias Marinas de la UABC por su ayuda en el trabajo de campo y laboratorio. También agradecemos a Alberto Zirino, de NOSC-San Diego, por sus valiosas orientaciones.

LITERATURA CITADA

- Alvarez Borrego, S., Aguiñiga García, S. y Camacho-Ibar, V.F. (1988). Un sencillo y barato muestreador *in situ* para aguas intersticiales de sedimentos de entremareas. *Ciencias Marinas*, 14(1): 41-50.
- Behrens, E.W. (1980). On sedimentation rates and porosity. *Marine Geology*, 35: 11-16.
- Camacho-Ibar, V.F. and Alvarez-Borrego, S. (1988). Nutrient concentration in pore waters of intertidal sediments in a coastal lagoon: patchiness and temporal variations. *The Science of the Total Environment*, 75: 325-339.
- Gardner, L.R. (1973). The effect of hydrological factors on the pore water chemistry of intertidal marsh sediments. *Southeast Geology*, 15: 17-28.

- Green Ruíz, M.J., Caschetto, S. y Alvarez Borrego, S. (1983). Sílice disuelto en la columna de agua y en las aguas intersticiales de una laguna costera. *Ciencias Marinas*, 9(2): 51-74.
- Hesslein, R.H. (1976). An *in situ* sampler for close interval pore water studies. *Limnology and Oceanography*, 21: 912-914.
- Mayer, L.M. (1976). Chemical water sampling in lakes and sediments with dialysis bags. *Limnology and Oceanography*, 21: 909-912.
- McRoy, C.P., Barsdate, R.J. and Nebert, M. (1972). Phosphorus cycling in an eelgrass (*Zostera marina*) ecosystem. *Limnology and Oceanography*, 17: 58-67.
- Montague, C.L. (1982). The influence of fiddler crab burrows and burrowing on metabolic processes in salt marsh sediments. In: U.S. Kennedy (ed.), *Estuarine Comparisons*, Academic Press, New York, pp. 283-301.
- Montgomery, J.R., Zimmermann, C.F. and Price, M.T. (1979). The collection, analysis and variation of nutrients in estuarine pore water. *Estuarine, Coastal Marine Science*, 9: 203-214.
- Montgomery, J.R., Price, M.T., Holt, J. and Zimmermann, C.F. (1981). A close interval sampler for collection of sediment pore waters for nutrient analysis. *Estuaries*, 4: 75-77.
- Pritchard, D.W., De La Paz Vela, R., Cabrera Muro, H.R., Farreras Sanz, S. y Morales, E. (1978). Hidrografía física del Estero de Punta Banda. Parte 1: Análisis de datos. *Ciencias Marinas*, 5: 1-23.
- Sánchez Hernández, J.L. (1978). Distribución superficial de micronutrientes en el Estero de Punta Banda, B.C., en un ciclo anual. Tesis de Licenciatura, UABC, Ensenada, B.C., México, 83 pp.
- Sayles, F.L., Mangelsdorf, P.C., Wilson, T.R.S. and Hume, D.N. (1976). A sampler for the *in situ* collection of marine sedimentary pore waters. *Deep-Sea Research*, 23: 259-265.
- Stewart, H.B. Jr. (1958). Sedimentary reflections of depositional environment in San Miguel Lagoon, Baja California, Mexico. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 12: 2567-2618.
- Strickland, J.D.H. and Parsons, T.R. (1972). A practical handbook of seawater analysis. Fisheries Research Board of Canada, Ottawa, 311 pp.
- Valiela, I. (1984). Nutrient cycles: phosphorus, nitrogen and sulfur. In: *Marine Ecological Processes (Chapter II)*, Springer-Verlag, New York, 312-341 pp.
- Zimmermann, C.F., Price, M.T. and Montgomery, J.R. (1978). A comparison of ceramic and teflon *in situ* sampler for nutrient pore water determination. *Estuarine, Coastal Marine Science*, 7: 93-97.
- Zimmermann, C.F., Montgomery, J.R. and Carlson, P.R. (1985). Variability of dissolved reactive phosphate flux rates in nearshore estuarine sediments: Effects of groundwater flow. *Estuaries*, 8: 228-236.
- Zirino, A. (1975). Measurements of the apparent pH of seawater with a combination micro-electrode. *Limnology and Oceanography*, 20: 654-657.