

## Variación espaciotemporal del fósforo y el efecto de las corrientes locales en su distribución en la Bahía de Petacalco, Guerrero, México

### Spatiotemporal variation of phosphorus and the effect of local currents on its distribution in Petacalco Bay, Guerrero, Mexico

Guadalupe de la Lanza-Espino<sup>1\*</sup>  
Iván Penié-Rodríguez<sup>2</sup>  
Salvador Hernández-Pulido<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Biología, UNAM  
Apartado 70-153  
México, CP 04510, México, DF  
\* E-mail [gdlle@servidor.unam.mx](mailto:gdlle@servidor.unam.mx)

<sup>2</sup> Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, UNAM  
Circuito Exterior s/n  
México, CP 04510, DF

*Recibido en marzo de 2003; aceptado en enero de 2004*

#### Resumen

Los aportes de aguas continentales hacia la zona costera son uno de los impactos más significativos que reciben los ecosistemas a nivel mundial. Las aguas continentales aportan nutrientes en diferente magnitud y su distribución está condicionada por la dinámica de circulación marina local y la estacionalidad de los aportes fluviales. El Río Balsas, uno de los más importantes de México, descarga sus aguas hacia la Bahía de Petacalco, con un considerable contenido de nutrientes. En el presente trabajo se estudia la variabilidad espaciotemporal del contenido de ortofosfatos y fósforo total y se analiza su relación con otros parámetros como salinidad, turbiedad y circulación costera. En la bahía se registraron contenidos máximos de ortofosfatos de 19.56  $\mu\text{M}$  en abril-mayo, 10.50  $\mu\text{M}$  en febrero y 9.31  $\mu\text{M}$  en agosto. Para el fósforo total sobresalieron 40.98  $\mu\text{M}$  en abril-mayo y 20.54  $\mu\text{M}$  en agosto que indicaron un ambiente costero eutroficado, resultado de las descargas de actividades industriales asentadas en el estuario del río y dispersadas a toda la bahía a través de las corrientes locales. En la mayoría de los meses estudiados (febrero, junio, agosto, octubre y diciembre), hacia la porción centro-oriental de la bahía se registró una acumulación del agua proveniente del Río Balsas, con pequeños giros ciclónicos-anticiclónicos superficiales frente al Estero de Petacalco que en ocasiones conservaron su sentido a 10 m de profundidad o se invirtieron en abril y diciembre, con un desplazamiento hacia el E–NE que permitió justificar la difusión del fósforo.

*Palabras clave:* eutroficación costera, efecto de corrientes.

#### Abstract

The contribution of continental water to the coastal zone has a significant impact on ecosystems worldwide. Continental waters provide nutrients in different concentrations and their distribution is conditioned by local marine circulation dynamics and seasonality of river inputs. The Balsas River, one of the most important in Mexico, discharges its water into Petacalco Bay, with a considerable nutrient content. This work studied the spatiotemporal variability of the orthophosphate and total phosphorus contents and their relation with salinity, turbidity and coastal circulation. Maximum orthophosphate concentrations in the bay were 19.56  $\mu\text{M}$  in April/May, 10.50  $\mu\text{M}$  in February and 9.31  $\mu\text{M}$  in August. The high total phosphorus contents were 40.98  $\mu\text{M}$  in April/May and 20.54  $\mu\text{M}$  in August, indicating an eutrophied coastal environment, result of the wastewaters discharged by the industries established along the river's estuary and dispersed throughout the bay by the local currents. An accumulation of water originating from the Balsas River was recorded in the central-eastern portion of the bay. There were small cyclonic and anticyclonic superficial gyres off the Petacalco Estuary during most of the months studied (February, June, August, October and December) that had the same direction at 10 m depth or were inverted in April and December, with a displacement toward the E–NE, allowing us to verify the diffusion of the phosphorus.

*Key words:* coastal eutrophication, current effects.

## Introducción

El aumento en la demanda de agua de la cuenca del Río Balsas por los asentamientos urbanos, la industria y el turismo, cuyas descargas son acarreadas por el río hacia la Bahía de Petacalco, ha condicionado el incremento del impacto antrópico en la zona costera (Montano-Ley *et al.*, 1989). Una de las consecuencias de dichas descargas ha sido la aparición de mareas rojas como las referidas por Ronson-Paulin (1999) en el Pacífico tropical mexicano. La naturaleza del citado impacto en la zona costera es básicamente el reflejo de la interacción entre los aportes terrestres y la capacidad de los procesos dinámicos marinos de circulación para su redistribución (Morales de la Garza *et al.*, 1989).

De la Lanza-Espino (2001) estableció que a nivel superficial en el litoral del Pacífico mexicano, los ortofosfatos pueden alcanzar como máximo una concentración de 1.5  $\mu\text{M}$ . Lechuga-Deveze *et al.* (1999) encontraron en la Bahía de Petacalco niveles de hasta 3  $\mu\text{M}$ , atribuyendo dicho enriquecimiento a eventos de afloramiento de aguas subsuperficiales, sin considerar la dinámica de circulación superficial costera.

En la zona oceánica adyacente existe una circulación local superficial del agua. Las corrientes oceánicas son: una rama de la Corriente Norecuatorial, en abril y de julio a diciembre; sobre la bahía y más próxima a la costa fluye la Corriente Costanera de Costa Rica (ahora llamada Corriente Mexicana), con dirección NO que generalmente excede los 25 cm/s de velocidad (Pacheco-Sandoval, 1991; Badan-Dangon, 1998).

Estas corrientes, combinadas con la topografía y geomorfología costera (Salas-Colunga, 2001) y el forzamiento del viento (Pacheco-Sandoval, 1991), le confieren a la Bahía de Petacalco características dinámicas de circulación particulares que influyen sobre el tiempo de permanencia y la difusión de los materiales provenientes del Río Balsas. Dado lo anterior, en el presente trabajo se analiza la variabilidad espaciotemporal de ortofosfatos y fósforo total en la Bahía de Petacalco y su relación con la turbiedad, salinidad del agua y la circulación costera durante un año.

## Área de estudio

La Bahía de Petacalco se ubica entre 17°54' N–102°01' W y 17°59' N–102°11' W del Pacífico tropical mexicano, en la provincia fisiográfica Sierra Madre del Sur (fig. 1). Esta provincia se caracteriza por una llanura estrecha en la que predominan áreas montañosas y acantilados con pendientes prominentes. La plataforma continental es angosta, ensanchándose en el delta del Río Balsas debido a su transporte de sedimentos y la profundidad umbral es de 4000 a 4562 m (Carranza-Edwards *et al.*, 1975).

Hay cuatro subambientes geomórficos marinos en el área: (1) delta del Río Balsas, (2) plataforma continental, (3) cañón de Petacalco y (4) talud continental. Con base en la distribución de las clases texturales existen cinco subambientes sedimentarios, cuatro relacionados con los subambientes

## Introduction

The increased demand for water from the Balsas River basin by urban settlements, industry and tourism have led to greater anthropogenic impact on the coastal zone, the wastewaters being carried by the river into Petacalco Bay (Montano-Ley *et al.*, 1989). One of the consequences of this input is the appearance of red tides like those mentioned by Ronson-Paulin (1999) in the tropical Mexican Pacific. The nature of this impact on the coastal zone basically reflects the interaction between terrestrial inputs and the ability of dynamic processes of marine circulation to redistribute them (Morales de la Garza *et al.*, 1988).

De la Lanza-Espino (2001) reported surface concentrations of orthophosphates for the Mexican Pacific coast of up to 1.5  $\mu\text{M}$ . Lechuga-Deveze *et al.* (1999) found levels of up to 3  $\mu\text{M}$  in Petacalco Bay, attributing this enrichment to upwelling of subsurface waters without considering the dynamics of coastal surface circulation.

The adjacent oceanic area presents a local circulation of surface water. The oceanic currents are: a branch of the North Equatorial Current, in April and from July to December, and off the bay and closer to the coast runs the Costa Rican Coastal Current (now called Mexican Current), with a NW direction and generally exceeding a velocity of 25 cm/s (Pacheco-Sandoval, 1991; Badan-Dangon, 1998).

These currents, together with the topography and coastal geomorphology (Salas-Colunga, 2001) and wind forcing (Pacheco-Sandoval, 1991), give Petacalco Bay particular dynamic characteristics of circulation, which will affect the time of permanence and diffusion of the materials inputted by the Balsas River. This study analyzes the spatiotemporal variability of orthophosphates and total phosphorus in Petacalco Bay and their relation to turbidity, salinity and coastal circulation of the water during one year.

## Study area

Petacalco Bay is located between 17°54' N–102°01' W and 17°59' N–102°11' W of the tropical Mexican Pacific, in the physiographic province of Sierra Madre del Sur (fig. 1). This province is characterized by a narrow plain, dominated by mountainous areas with steep slopes. The continental shelf is narrow, widening in the Balsas River delta due to sedimentary transport by this river; the threshold depth is 4000–4562 m (Carranza-Edwards *et al.*, 1975).

Four geomorphic marine subenvironments occur in the area: (1) Balsas River delta, (2) continental shelf, (3) Petacalco Canyon, and (4) continental slope. Based on the distribution of textural classes, there are five sedimentary subenvironments, four associated with the geomorphic subenvironments, and the other resulting from erosion at Petacalco's beach, whose area is small and near the coast. At the same time, marine dynamics are reflected in the other zone with erosive processes in the area, which is located off Petacalco's beach, to the west of the estuary (Salas-Colunga, 2001).

geomórficos, y el otro lo constituye el producto de erosión en la playa de Petacalco cuya área es pequeña y cercana a la costa. Al mismo tiempo, la dinámica marina actual se refleja en la otra zona con procesos erosivos en la región, la cual se localiza frente a la playa de Petacalco al oeste del estero (Salas-Colunga, 2001).

La región litoral es de tipo mixta, incluyendo lagunas costeras, pantanos, estuarios, humedales, dunas costeras, manglares, pastos marinos y arrecifes coralinos, entre otros hábitats. En la región oceánica adyacente, la corriente marina dominante es la Norecuatorial (Botello *et al.*, 2000), la cual fluye en dirección SE paralela a la línea de costa. No obstante, en las aguas litorales existe una compleja circulación local debida a la interacción de dicha corriente con la geomorfología costera particular, las aguas continentales provenientes del Río Balsas y los vientos.

El incremento en la actividad antropogénica hacia esta región costera ha causado un impacto negativo en las condiciones fisicoquímicas naturales (Botello *et al.*, 2000). Por esta causa las aguas que fluyen desde ambos brazos del Río Balsas introducen hacia la bahía abundante contenido de materia en suspensión y nutrientes.

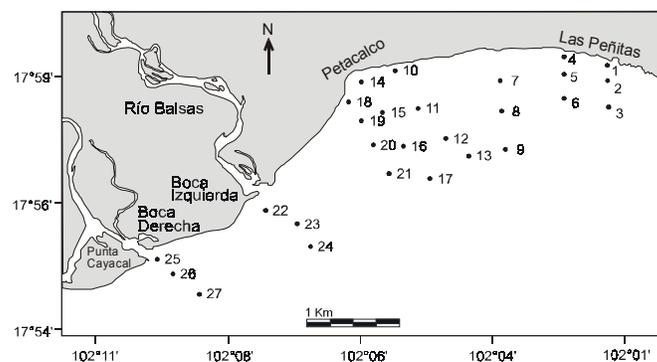
## Metodología

Para discriminar los cambios producidos por las descargas industriales de las condiciones fisicoquímicas registradas por otros autores antes de los asentamientos humanos en la Bahía de Petacalco, se realizaron seis campañas (entre noviembre de 1999 y diciembre de 2000) en las que se determinó la temperatura del agua (termómetro convencional  $+0.5^{\circ}\text{C}$ ), salinidad (salinómetro de inducción), turbiedad (atenuación de la luz a través del disco de Secchi), ortofosfatos ( $\text{PO}_4$ ) y fósforo total (PT) según técnicas de Strickland y Parsons (1972), en superficie y a 10 m de profundidad en 27 estaciones (fig. 1). Las mediciones a esa profundidad se realizaron ya que, en un estudio prospectivo, a esa profundidad la fisicoquímica fue semejante a la de mar abierto. La densidad se calculó con base en los datos de temperatura y salinidad. El porcentaje de turbiedad fue referido con relación a la profundidad. Los resultados obtenidos se integraron por campaña y se elaboraron isolíneas para el análisis.

La información sobre corrientes fue tomada de CFE (1990), obtenida por tres sensores electromagnéticos de registro continuo entre 1984 y 1985, con mediciones de la velocidad y dirección. Con el objeto de contar con mejores bases en cuanto a la dirección de las corrientes, dada la diferencia en tiempo con el presente trabajo, se calculó el gradiente de distribución de la densidad a través de vectores horizontales, para de esa manera estimar la variación de masa y, en consecuencia, la dirección y magnitud del transporte.

## Resultados y discusión

La salinidad, además de estar asociada con las descargas fluviales de ambos brazos del Río Balsas y con las de la planta



**Figura 1.** Bahía de Petacalco, Michoacán-Guerrero, y ubicación de las estaciones de estudio.

**Figure 1.** Petacalco Bay, Michoacán-Guerrero (Mexico), and location of the sampling stations.

The coastal region consists of many habitats, including coastal lagoons, swamps, estuaries, wetlands, coastal dunes, mangroves, sea grasses and coral reefs. Offshore, the North Equatorial Current dominates (Botello *et al.*, 2000), flowing SE parallel to the coastline. The coastal waters, however, have a complex local circulation, owing to the interaction of this current with the particular coastal geomorphology, the continental waters from the Balsas River and the winds.

The increase of anthropogenic activity in the area has had a negative impact on the natural physicochemical conditions (Botello *et al.*, 2000), and the waters carried by both tributaries of the Balsas River introduce large amounts of suspended material and nutrients into the bay.

## Methodology

To distinguish between the changes produced by industrial discharges and the physicochemical conditions recorded by other authors prior to human settlements in Petacalco Bay, six campaigns were conducted between November 1999 and December 2000. Measurements were taken of water temperature (conventional thermometer  $+0.5^{\circ}\text{C}$ ), salinity (induction salinometer), turbidity (light attenuation using a Secchi disk), orthophosphates ( $\text{PO}_4$ ) and total phosphorus (PT) according to Strickland and Parsons (1972), at 27 sampling stations (fig. 1). The measurements were taken at the surface and 10 m depth (depth at which the physicochemistry was found to be similar to the open sea in a prospective survey). Density was calculated based on temperature and salinity data. Percent turbidity was determined relative to depth. The results obtained were grouped per campaign and isolines constructed for their analysis.

Information on the currents was taken from CFE (1990), obtained using three continuously-recording electromagnetic sensors between 1984 and 1985, with measurements of wind velocity and direction. For further information on the direction of the currents, given the difference in time with the present

termoeléctrica de la Comisión Federal de Electricidad, dependió de la época del año. A pesar de una marcada oscilación, los niveles superficiales más bajos (10–20 ups) se registraron en época de lluvias y, como era de esperarse, los más altos (35 ups) se registraron en la época de sequía. En las estaciones más alejadas de las descargas y a 10 m de profundidad se registraron máximos medios de 34.8 ups, semejantes a los determinados por otros autores e identificados como Aguas Superficiales Tropicales (Gardfield *et al.*, 1983).

Las concentraciones de PO<sub>4</sub> y PT registradas fueron altas, comparables con las determinadas en sistemas lagunares como Pabellón-Altata que se encuentra bajo la influencia de actividades agroindustriales (de la Lanza-Espino, 1994) y además posee una dinámica de aguas reducida y menos comunicación con el océano abierto.

Los contenidos de PO<sub>4</sub> superan incluso en más de tres tantos (12.49 µM registrado en agosto) lo determinado entre 1993 y 1994 (hasta 3 µM) por Lechuga-Deveze *et al.* (1999) en esta bahía, y en general contrastan con los máximos superficiales de 1.5 µM (de la Lanza-Espino, 2001) señalados para el litoral del Pacífico mexicano, con base en una consulta bibliográfica de contenidos de PO<sub>4</sub> para esa vertiente (de la Lanza-Espino y Hernández-Pulido, 1992).

La amplia variación de PO<sub>4</sub> y PT (figs. 2, 3) puede estar asociada a la intensidad y frecuencia de las actividades industriales que no siempre son las mismas (Programa Maestro de Desarrollo de Puerto Lázaro Cárdenas, 1996), y el aumento registrado de agosto puede deberse no sólo a éstas sino también a la época de lluvias.

Frente al poblado de Petacalco en ciertos meses se observó, tanto para PO<sub>4</sub> como PT, un gradiente de concentración que se incrementaba de la línea de costa hacia mar adentro y que se invirtió a los 10 m de profundidad, es decir, que disminuía hacia la costa. Sin embargo, la distribución más obvia fue el gradiente decreciente de las dos bocas del río hacia el NE o la localidad de Peñitas. En un estudio hecho por el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR, 1995) en 1992–1993 frente al poblado de Petacalco se registraron contenidos de PO<sub>4</sub> desde un nivel mínimo indetectable hasta un máximo de 5.0 µM, intervalo que cae dentro del registrado en este trabajo, específicamente frente al mismo poblado siete años después.

El comportamiento anual de los contenidos medios de PO<sub>4</sub> y PT confirman el incremento de estos compuestos, originado probablemente de una fuente externa (tabla 1). Particularmente en dos meses se determinaron los niveles más altos de ambas formas; el contenido máximo de fósforo total superó dos veces al de ortofosfatos en mayo-abril a los 10 m de profundidad y el mínimo 6.5 veces en agosto a nivel superficial.

La distribución de PO<sub>4</sub> y PT indica que la mayor concentración se encontró en las inmediaciones de la desembocadura del Río Balsas, especialmente por los afluentes Boca Melchor Ocampo (Boca Derecha) y Boca San Francisco (Boca Izquierda), durante todo el período de estudio. La distribución horizontal de PO<sub>4</sub> y PT ejemplifica este comportamiento hacia

work, the distribution gradient of density was calculated using three horizontal vectors, in this way estimating the variation of mass and, consequently, the direction and magnitude of the transport.

## Results and discussion

Salinity, in addition to being associated with the discharges from the thermoelectric plant of the Comisión Federal de Electricidad (CFE) and both tributaries of the Balsas River, depended on the season. Despite a marked oscillation, the lowest surface levels were recorded during the rainy season (10–20 psu) and, as expected, the highest during the dry season (35 psu). Mean maxima of 34.8 psu were recorded at the stations farthest from the discharges and at 10 m depth, similar to those determined by other authors and identified as Tropical Surface Waters (Gardfield *et al.*, 1983).

The concentrations of PO<sub>4</sub> and PT were high, and comparable with those reported for the Pabellón-Altata lagoon system, which is influenced by agroindustrial activities (de la Lanza-Espino, 1994) and has a scant water dynamics and less communication with the open sea.

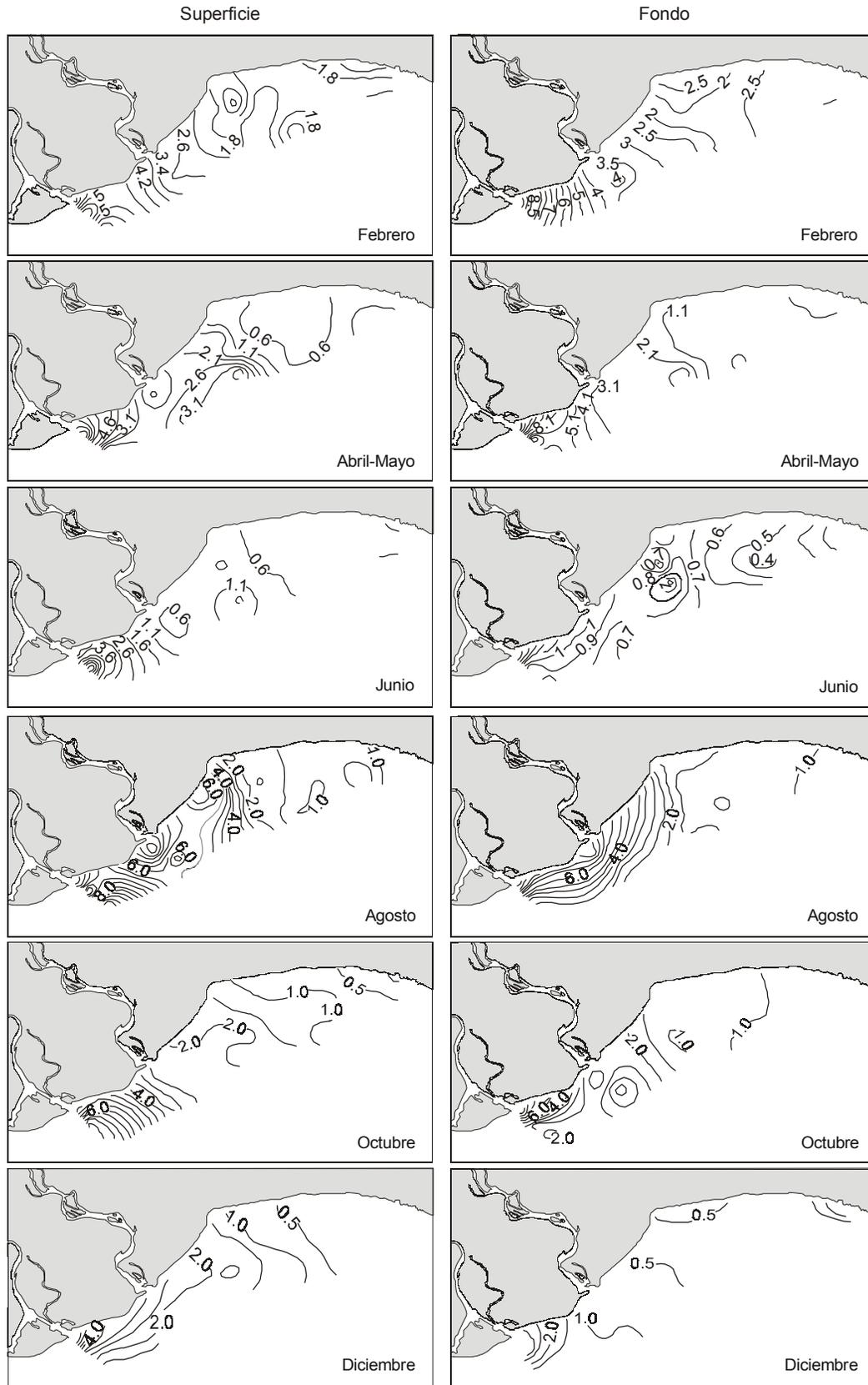
The PO<sub>4</sub> contents were three times higher (12.49 µM in August) than those recorded by Lechuga-Deveze *et al.* (1999) in this bay between 1993 and 1994 (up to 3 µM). In general, they differ from the surface maxima of 1.5 µM (de la Lanza-Espino, 2001) indicated for the Mexican Pacific coast based on a bibliographic survey of PO<sub>4</sub> contents for that region (de la Lanza-Espino and Hernández-Pulido, 1992).

The wide variation of PO<sub>4</sub> and PT (figs. 2, 3) can be associated with the intensity and frequency of the industrial activities, which are not always the same (*Programa Maestro de Desarrollo de Puerto Lázaro Cárdenas*, 1996), and the increase in August is related not only to the activities but also to the rainy season.

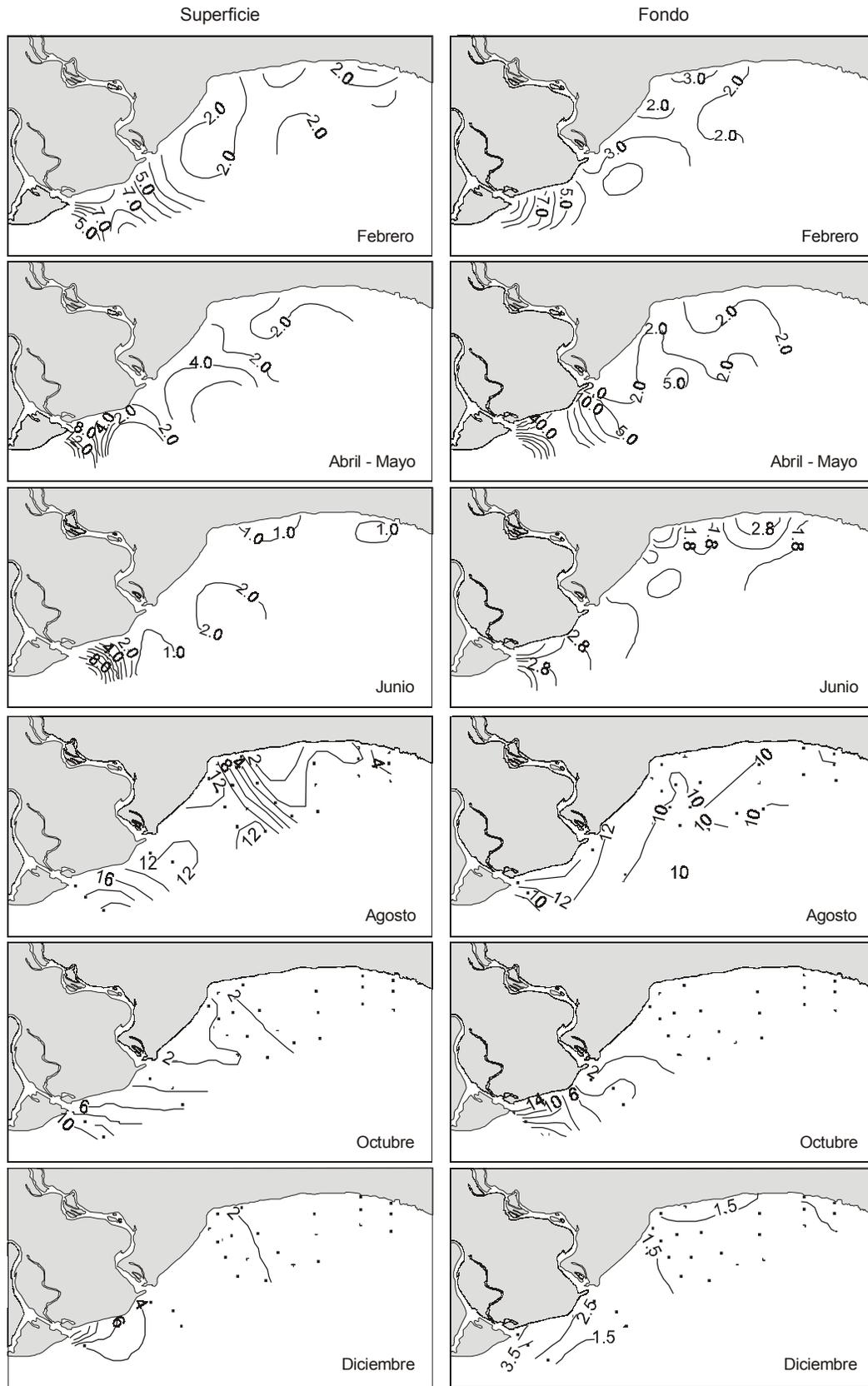
Off the town of Petacalco, in certain months of the year both PO<sub>4</sub> and PT presented a lower to higher concentration gradient from the coastline to the open sea, which inverted at 10 m depth, that is, from higher to lower; however, the most obvious distribution was the higher to lower gradient of the two river mouths towards the NE or Las Peñitas. The Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR, 1995) conducted a study in 1992/93 off the town of Petacalco and recorded PO<sub>4</sub> contents from an undetectable minimum to a maximum of 5.0 µM; this range falls within that reported herein, specifically off that locality seven years later.

The annual behaviour of the mean PO<sub>4</sub> and PT contents confirms their increment, probably originating from an external source (table 1). The highest levels were detected particularly in two months. Maximum content of PT was two times higher than that of PO<sub>4</sub> in May at 10 m depth, and minimum content was 6.5 times higher in August at the surface.

The distribution of PO<sub>4</sub> and PT indicates that the highest concentrations throughout the study period were in the vicinity of the two mouths, Melchor Ocampo and San Francisco, of the



**Figura 2.** Distribución espaciotemporal del contenido de ortofosfatos ( $\mu\text{M}$ ) en la Bahía de Petacalco, en superficie y a 10 metros de profundidad (fondo).  
**Figure 2.** Spatiotemporal distribution of the orthophosphate content ( $\mu\text{M}$ ) in Petacalco Bay, at the surface (*superficie*) and 10 m depth (*fondo*).



**Figura 3.** Distribución espaciotemporal del contenido de fósforo total ( $\mu\text{M}$ ) en la Bahía de Petacalco, en superficie y a 10 metros de profundidad (fondo).  
**Figure 3.** Spatiotemporal distribution of the total phosphorus content ( $\mu\text{M}$ ) in Petacalco Bay, at the surface (*superficie*) and 10 m depth (*fondo*).

**Tabla 1.** Variación temporal del contenido de ortofosfatos y fósforo total ( $\mu\text{M}$ ) en la Bahía de Petacalco, en superficie y a 10 m de profundidad.**Table 1.** Temporal variation of orthophosphate ( $\text{PO}_4$ ) and total phosphorus (PT) ( $\mu\text{M}$ ) in Petacalco Bay, at the surface (*superficie*) and 10 m depth (*fondo*).

Nivel		Febrero		Abril/Mayo		Junio		Agosto		Octubre		Diciembre	
		$\text{PO}_4$	PT										
Promedio	Superficie	2.44	2.60	1.79	3.19	1.04	2.14	3.25	2.50	2.00	2.69	1.35	2.39
	Fondo	2.70	2.82	2.25	4.30	0.67	2.12	2.19	4.70	1.70	2.23	0.64	1.55
Mínimo	Superficie	0.80	1.00	0.36	1.01	0.00	0.77	0.49	3.20	0.06	0.60	0.18	1.37
	Fondo	1.00	1.00	0.36	1.11	0.24	1.46	0.55	16.70	0.49	0.98	0.00	0.77
Máximo	Superficie	6.60	6.70	9.13	13.99	7.89	10.70	12.49	1.60	8.57	10.29	6.00	10.03
	Fondo	10.50	10.80	19.56	40.98	1.71	3.77	9.31	1.40	13.12	16.72	3.55	4.97

la mitad noroccidental de la zona de estudio (figs. 2, 3), donde se alcanzaron niveles altos de PT de  $10.80 \mu\text{M}$  en febrero,  $40.98 \mu\text{M}$  en abril-mayo,  $10.70 \mu\text{M}$  en junio,  $20.54 \mu\text{M}$  en agosto,  $16.72 \mu\text{M}$  en octubre y  $10.03 \mu\text{M}$  en diciembre, ubicados en alguno de los dos extremos del delta del Río Balsas definiendo un ambiente hipereutrófico. A partir de ambas bocas se estableció un gradiente de concentración en dirección NE, más definido en los meses de agosto y octubre (figs. 2, 3).

En agosto la concentración de  $\text{PO}_4$  y PT fue superior a la de los otros meses (figs. 2, 3) posiblemente por las actividades industriales de fertilizantes. A partir de febrero la concentración de  $\text{PO}_4$  disminuyó alcanzando niveles mínimos en junio (de indetectable en superficie a  $3.7 \mu\text{M}$  a 10 m de profundidad), lo que denota la intermitencia de las descargas del área industrial percibida en los muestreos.

La transparencia al disco de Secchi definió una zona con mayor turbidez en la desembocadura del río. Casi en todos los meses se obtuvo una fuerte correlación lineal negativa entre la concentración del fósforo y el porcentaje de transparencia (tabla 2).

Con base en las distribuciones de los isogramas de  $\text{PO}_4$  y PT (figs. 2, 3) se hizo evidente que la principal fuente de fósforo en la bahía fue el Río Balsas, en particular el Brazo Melchor Ocampo donde se encuentran diversas industrias como la de fertilizantes. Salas-Rodarte (2003) registró anteriormente un comportamiento semejante.

Lo anterior indica una fuerte influencia de las descargas de aguas fluviales y antropogénicas (urbanas e industriales particularmente del Brazo Melchor Ocampo) en la zona de estudio. Según el Programa de Desarrollo de Puerto Lázaro Cárdenas, Michoacán (1996), se registraron en las márgenes del Brazo Melchor Ocampo, además de los asentamientos urbanos, las industrias del acero (SICARTSA), de fertilizantes (FERTIMEX), petrolera (PEMEX) y de autopartes (NKS), un parque industrial de mediana industria, además del puerto de altura y un almacén de granos. Otra zona que puede estar viéndose afectada es la localizada en el centro de la bahía, cerca del Estero de Petacalco, ya que pueden estar arribando a ella volúmenes importantes de escurrimientos costeros por las descar-

Balsas River tributaries. The horizontal distribution of  $\text{PO}_4$  and PT illustrates this behaviour in the northwestern part of the study area (figs. 2, 3), where PT levels were  $10.80 \mu\text{M}$  in February,  $40.98 \mu\text{M}$  in April/May,  $10.70 \mu\text{M}$  in June,  $20.54 \mu\text{M}$  in August,  $16.72 \mu\text{M}$  in October, and  $10.03 \mu\text{M}$  in December in one of the two extremes of the Balsas River delta, defining a hipereutrophic environment. A concentration gradient in NE direction from both mouths was established, which was more defined in August and October (figs. 2, 3).

The  $\text{PO}_4$  and PT levels were higher in August than during the other months (figs. 2, 3), possibly because of industrial activities using fertilizers. The concentration of  $\text{PO}_4$  decreased from February to minimum levels in June (from undetectable at the surface to  $3.7 \mu\text{M}$  at 10 m depth); this indicates the intermittency of the discharges in the industrial area, as was personally noted at the time of the samplings.

The Secchi disk transparency defined a zone of greater turbidity at the river delta. In practically all the months, a high negative linear correlation was obtained between the concentration of phosphorus and percent transparency (table 2).

The distribution of the  $\text{PO}_4$  and PT isograms (figs. 2, 3) showed that the main source of phosphorus in the bay was the Balsas River, in particular the Melchor Ocampo tributary where several industries are located, including the fertilizer industry. A similar behaviour was found by Salas-Rodarte (2003).

The above indicates the influence of urban and industrial wastewater discharges into the study area (particularly through the Melchor Ocampo mouth). According to the *Programa Maestro de Desarrollo del Puerto de Lázaro Cárdenas* (1996), in addition to urban settlements, the following industries are located along the Melchor Ocampo tributary: SICARTSA (steel industry), FERTIMEX (fertilizers), PEMEX (oil), NKS (autoparts), an industrial complex of medium-sized companies, the docks and a silo. Another zone in the central part of the bay that may be receiving important volumes of coastal runoff is around the Petacalco Estuary, where the CFE is located, as shown by the horizontal salinity distributions (fig. 4).

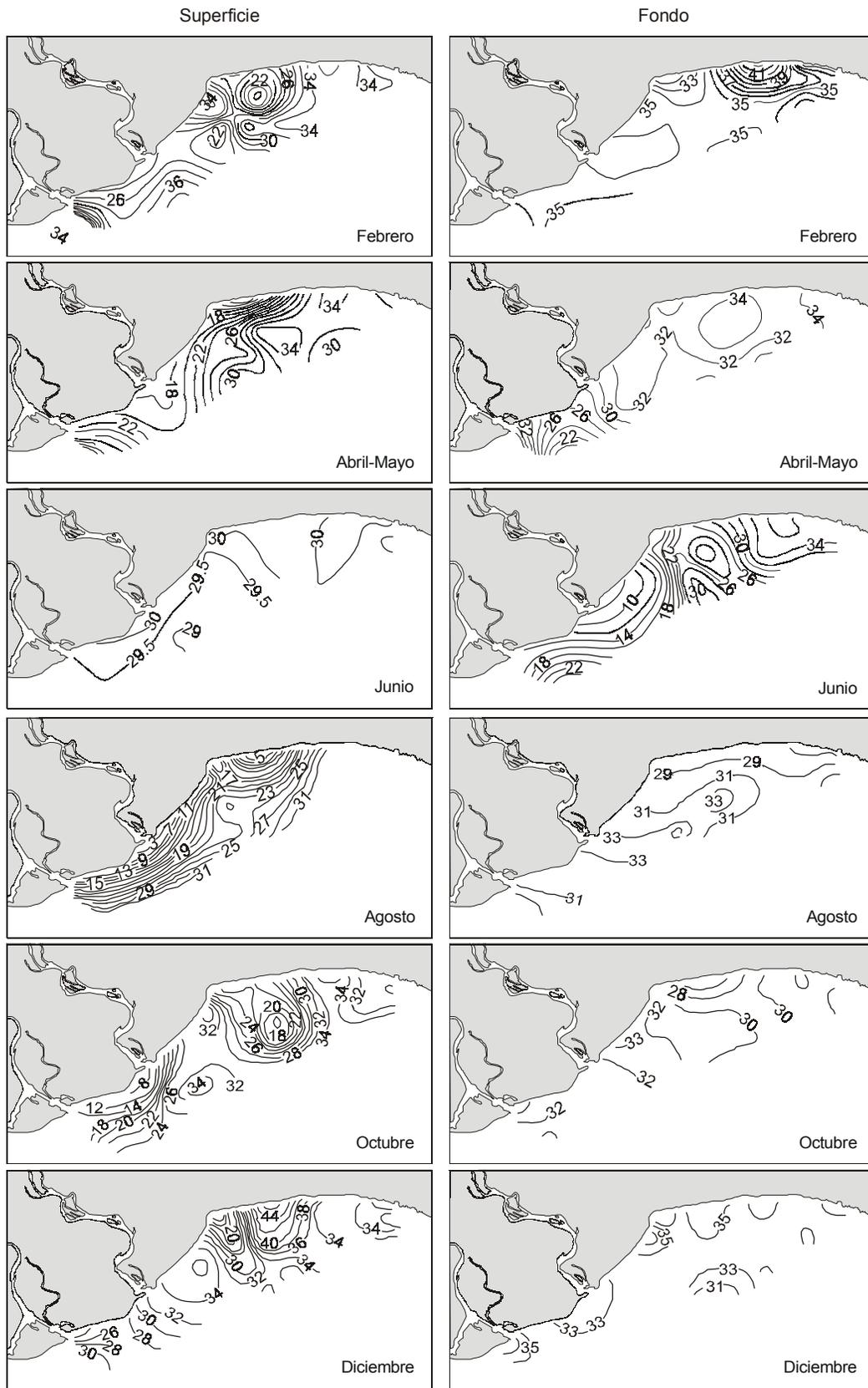


Figura 4. Distribución espaciotemporal de la salinidad en la Bahía de Petacalco, en superficie y a 10 metros de profundidad (fondo).  
 Figure 4. Spatiotemporal distribution of salinity in Petacalco Bay, at the surface (*superficie*) and 10 m depth (*fondo*).

**Tabla 2.** Coeficientes de correlación lineal entre las concentraciones de ortofosfatos (PO<sub>4</sub>) y fósforo total (PT), el porcentaje de transparencia al disco de Secchi, la salinidad y la densidad del agua, en superficie y a 10 m de profundidad. \* No significativo.**Table 2.** Linear correlation coefficients between the concentrations of orthophosphates (PO<sub>4</sub>) and total phosphorus (PT), and Secchi disk transparency (% *transparencia*), salinity and water density, at the surface (*superficie*) and 10 m depth (*fondo*). \* Not significant.

Nivel		Febrero		Abril/Mayo		Junio		Agosto		Octubre		Diciembre	
		PO <sub>4</sub>	PT	PO <sub>4</sub>	PT	PO <sub>4</sub>	PT	PO <sub>4</sub>	PT	PO <sub>4</sub>	PT	PO <sub>4</sub>	PT
% Transparencia	Superficie	-0.58	-0.57	0.04*	0.09*	-0.30	-0.32	-0.54	-0.56	-0.32	-0.28	-0.71	-0.54
	Fondo	-0.60	-0.62	-0.08*	0.06*	-0.53	-0.53	-0.44	-0.54	-0.25	-0.16*	-0.59	-0.51
Salinidad	Superficie	0.13*	0.12*	-0.15*	-0.10*	-0.33	-0.38	-0.34	-0.38	-0.49	-0.20*	-0.44	0.31
	Fondo	-0.22*	-0.22*	-0.04*	0.01*	-0.57	-0.40	0.26	0.16*	0.38	-0.08	0.22*	-0.50
Densidad	Superficie	0.16*	0.14*	-0.15*	-0.09*	-0.33	-0.38	-0.50	-0.59	-0.48	-0.20*	-0.43	-0.38
	Fondo	-0.14*	-0.14*	-0.02*	0.03*	-0.56	-0.39	0.32	0.19*	0.34	-0.10*	0.23*	0.26

gas de la planta termoeléctrica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Esto puede constatarse en las distribuciones horizontales de salinidad (fig. 4). No obstante, las correlaciones menos significativas a nivel superficial entre dicho parámetro y el fósforo hacen pensar que el enriquecimiento es menos importante en esta zona.

La correlación entre nutrientes y salinidad tradicionalmente ha sido empleada para evaluar las intrusiones de agua dulce al medio marino (Kempt *et al.*, 1982), y en la Bahía de Petacalco ésta fue comprobada sólo en ciertos meses como junio, agosto y diciembre en que las correlaciones fueron más significativas (tabla 2) ( $\alpha < 0.05$ ). El gradiente de nutrientes decreciente del W al NE se puede asociar al patrón de circulación costera (fig. 5), tomando como punto de partida las direcciones y velocidades calculadas por CFE (1990). Al oeste del Estero Petacalco la dirección de la corriente predominante fue hacia el centro de la bahía y al NE-NNE (fig. 5).

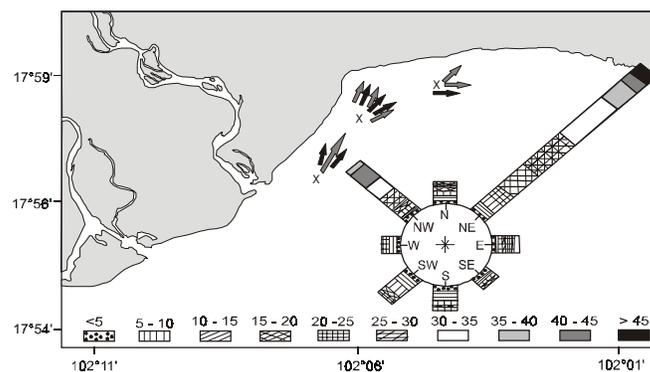
Según CFE (1990), las velocidades más frecuentes van disminuyendo de oeste a este. Esta información, aunque limitada por el número de equipos de medición empleados, aporta elementos importantes acerca del patrón de circulación hacia la zona central de la bahía (fig. 5). Sin embargo, Badan-Dangon (1998) señala que no existen mediciones directas de la Corriente Costanera de Costa Rica.

En el presente trabajo la densidad se utilizó para corroborar la dirección y magnitud de las corrientes, vectores que aparecen superpuestos (fig. 6) denotando en general el desplazamiento hacia el NE. En la figura 6 se puede apreciar un flujo superficial mar adentro en la región occidental, mismo que es compensado por otro flujo hacia la costa a 10 m de profundidad. Ambos flujos son más fuertes en los meses cálidos junio, agosto y octubre (época de lluvias con mayor descarga fluvial). También destaca en dichas figuras que en tales meses se verifican los principales flujos en dirección NE y E. El hecho de que el eje principal de circulación marina sea W-NE (fig. 5) presupone que los aportes antrópicos que salen hacia la plataforma marina por el Río Balsas son transportados en ese sentido hacia la zona central de la bahía. La existencia de

Nevertheless, the less significant surface correlations between this parameter and phosphorus indicates that enrichment in this area is not as important.

The correlation between nutrients and salinity has traditionally been used to evaluate the incursion of fresh water into the marine environment (Kempt *et al.*, 1982). In Petacalco Bay significant correlations were only determined in June, August and December (table 2) ( $\alpha < 0.05$ ). The higher to lower W-NE nutrient gradient can be associated with the coastal circulation pattern (fig. 5), based on the directions and velocities calculated by CFE (1990). To the west of Petacalco Estuary, the direction of the predominant current was towards the center of the bay and NE-NNE (fig. 5).

According to CFE (1990), the most frequent velocities decrease from west to east. This information, though limited by the number of measuring instruments used, provides important criteria regarding the circulation pattern towards the central part of the bay (fig. 5). Badan-Dangon (1998), however,

**Figura 5.** Patrón e intensidad de las corrientes, elaborado a partir de CFE (1990). La escala gráfica está referida en porcentaje de velocidad y es la resultante de mediciones de septiembre de 1984 a octubre de 1985 en los tres sitios marcados con una cruz.**Figure 5.** Current pattern and intensity, based on CFE (1990). The scale refers to percent velocity, measured from September 1984 to October 1985 at the three sites marked with a cross.

gradientes de concentración horizontales del fósforo son en este mismo sentido (figs. 2, 3).

Estacionalmente se registró una asociación entre la variación de  $PO_4$  y PT, y la densidad del agua para junio, agosto y octubre (tabla 2). En la época de lluvias la variación de estos nutrientes se relacionó con el aporte de aguas continentales, y su dispersión por prácticamente toda la bahía fue a través de la circulación costera.

Con base en la distribución de la densidad y sus vectores, se registraron pequeños giros anticiclónicos superficiales frente al Estero de Petacalco en la mayoría de los meses estudiados (febrero, junio, agosto, octubre y diciembre) y, ocasionalmente, éstos conservaron el sentido a 10 m de profundidad o se invirtieron como en abril o diciembre, con un desplazamiento hacia el E-NE. Este fenómeno ayudó a explicar la distribución concéntrica de  $PO_4$  y Pt, y su difusión en esa dirección.

Cabe destacar que la formación de giros ciclónicos y anticiclónicos alternos, resultante del aporte del río, las descargas de la termoeléctrica y el esfuerzo del viento, condiciona ascensos y descensos de masas de agua a pequeña escala de profundidad, como en este caso sucedió hasta los 10 m (David Salas, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, com. pers.), de diferente posición y con desplazamiento hacia el E-NE. Por su parte, Lechuga-Deveze *et al.* (1999) atribuyen el incremento superficial de  $PO_4$  a las surgencias de agua subsuperficial. Sin embargo, es más probable la ascensión de agua a través de los giros ciclónicos, ya que en la Bahía de Petacalco, históricamente no se han registrado surgencias en imágenes de satélite (Artemio Gallegos, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, com. pers.).

La reducción de la velocidad de las corrientes marinas de oeste a este puede condicionar el aumento relativo del tiempo de residencia sobre la porción central de la bahía de las aguas que provienen de la zona industrial ubicada al occidente. En este sentido, el predominio de las direcciones NE, ENE y NNE en la parte central de la bahía puede conducir al acarreo tangencial a la línea de costa de un volumen de agua mayor justo entre el Estero de Petacalco y el poblado Las Peñitas. Este mayor volumen puede provocar la descomposición de los vectores de corrientes y formar giros estacionales de diferente magnitud que permiten igualmente la permanencia de aguas con mayor contenido de fósforo sobre esta porción de la plataforma (fig. 6), lo que también puede explicar la presencia de contenidos más altos de fósforo o bajos de salinidad hacia la zona central del litoral en la mayoría de los muestreos.

Destaca de lo anterior, que los principales aportes de ortofosfatos y fósforo total en la Bahía de Petacalco se dieron sobretodo a través de los estuarios Boca Melchor Ocampo y Boca San Francisco del Río Balsas, pero principalmente a través del primero. Especialmente en agosto (época de lluvias), las altas concentraciones de estos compuestos definieron un medio eutroficado, alcanzando en estaciones puntuales contenidos 10 veces más altos (asociados a la zona industrial) que los registrados en mar abierto. Su difusión a toda la bahía fue a

mentions that direct measurements of the Costa Rican Costanera Current do not exist.

In the present study, density is used to support the direction and magnitude of the currents, vectors that are superposed (fig. 6), in general denoting a NE flow. Figure 6 shows an off-shore surface flow in the western part, which is compensated by another shoreward flow at 10 m depth. Both currents are strong in the warm months of June, August and October (rainy season with greater river runoff); the principal NE and E flows also occur in these months. The fact that the main axis of the marine circulation is W-NE (fig. 5) presupposes that the anthropogenic discharges to the sea shelf, via the Balsas River, are transported in that direction towards the central zone. Horizontal phosphorus concentration gradients have this same direction (figs. 2, 3).

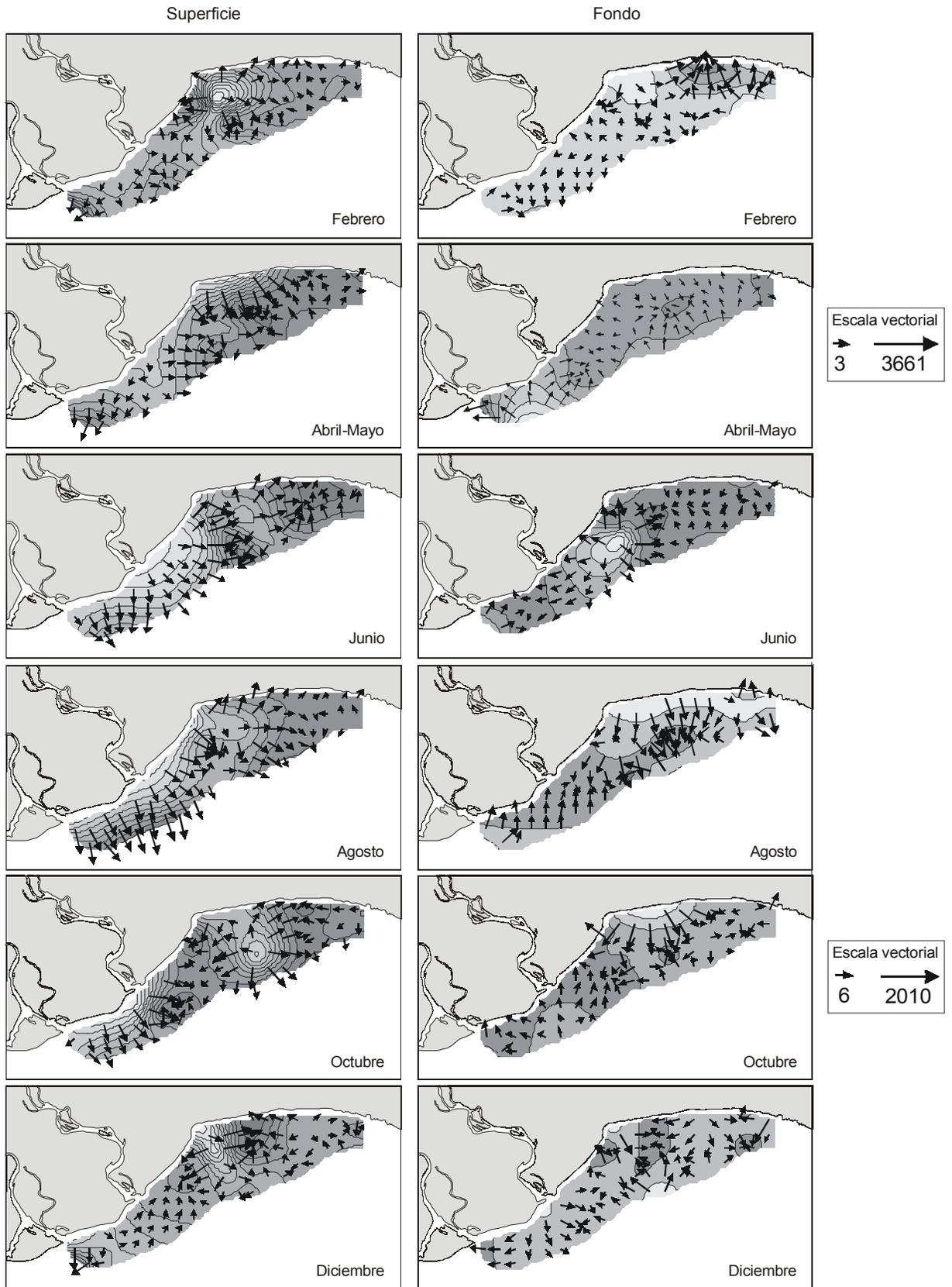
Seasonally, a relation was found between the variation of  $PO_4$  and PT and water density in June, August and October (table 2). During the rainy season, the variation of these nutrients was associated with the input of continental waters, which were distributed throughout most of the bay by the coastal current.

Regarding the distribution of density and its vectors, small anticyclonic surface gyres were recorded off Petacalco Estuary in most of the months studied (February, June, August, October and December); they either conserved the direction at 10 m depth or, like in April and December, they inverted towards the E-NE. This helped to explain the concentric distribution of  $PO_4$  and PT and their propagation in that direction.

These alternating cyclonic and anticyclonic gyres, resulting from river runoff, discharges from the thermoelectric plant and wind effort, govern the ascent and descent of water at a small depth scale, such as 10 m (David Salas, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, pers. comm.), of different position and E-NE propagation. Lechuga-Deveze *et al.* (1999) attribute the increase in surface  $PO_4$  to upwelling of subsurface water; however, the ascent of water is more probably due to cyclonic gyres, because historical satellite images of Petacalco Bay do not indicate the occurrence of upwelling (Artemio Gallegos, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, pers. comm.).

Reduction in the velocity of the currents from west to east can determine the relative increase in the time of residence over the central part of the bay of the waters from the industrial zone, located in the western part. The predominant NE, ENE and NNE directions in the central part can result in the tangential displacement relative to the coastline of a greater volume of water between Petacalco Estuary and Las Peñitas. This greater volume can cause the decomposition of the current vectors and form seasonal gyres of different magnitude, allowing the permanence of waters with greater phosphorus content in this portion of the shelf (fig. 6). This can also explain the higher phosphorus concentrations or lower salinity levels in the central part found in most of our surveys.

Input of  $PO_4$  and PT into Petacalco Bay was primarily through the two Balsas River tributaries, Melchor Ocampo and



**Figura 6.** Vectores de dirección e intensidad de las corrientes locales en la Bahía de Petacalco a través de la distribución de densidad de febrero a diciembre, en superficie y a 10 metros de profundidad (fondo).

**Figure 6.** Direction and intensity vectors of the local currents at Petacalco Bay, based on the distribution of density for February to December, at the surface (*superficie*) and 10 m depth (*fondo*).

través de la dirección de la corriente (NE, ENE), con una distribución concéntrica compleja que resulta de un sistema de giros superficiales ciclónicos y anticiclónicos que se invierten en posición a 10 m de profundidad.

En la porción centro-oriental de la bahía se registró una acumulación de agua proveniente de las descargas del poblado de Petacalco y del Río Balsas asociadas significativamente, lo que es demostrado por la distribución de densidad del agua, así como por la concentración de fósforo y la turbiedad al disco de Secchi.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Comisión Federal de Electricidad por facilitar los datos del proyecto Monitoreo de Calidad del Agua en la Bahía de Petacalco, al Dr. Alfonso V. Botello y a Ma. Eugenia Zamudio por la elaboración del mapa base para los isogramas.

## Referencias

- Badan-Dangon, A. (1998). Coastal circulation from Galápagos to the Gulf of California. In: A.R. Robinson and K.H. Brink (eds.), *The Sea. Part II, Vol. 2*, pp. 315–343.
- Botello, A.V., Toledo, A.O., de la Lanza-Espino, G. and Villanueva, S.F. (2000). The Pacific Coast of Mexico. In: C. Sheppard (ed.), *Seas at the Millennium: An Environmental Evaluation*. New Cork, pp. 473–489.
- Carranza-Edwards, A., Gutiérrez-Estrada, M. y Rodríguez-Torres, R. (1975). Unidades morfotectónicas continentales de las costas mexicanas. *An. Inst. Cienc. Mar Limnol. UNAM*, 2(1): 81–88.
- CFE, Comisión Federal de Electricidad (1990). *Manifestación de Impacto Ambiental de la Central Termoeléctrica Petacalco (antes Lázaro Cárdenas)*. Informe Científico-Técnico. Departamento de Ingeniería Mecánica. Disciplina de Protección Ambiental.
- CIBNOR (1995). *Evaluación del Impacto al Ambiente Marino por la Dirección Térmica de la C.T. Petacalco*. Informe Final, Capítulo 2. La Paz, Baja California Sur.
- De la Lanza-Espino, G. (1994). Lagunas costeras y el litoral mexicano: Química. En: G. de la Lanza-Espino y C. Cáceres-Martínez (eds.), *Lagunas Costeras y el Litoral Mexicano*. Universidad Autónoma de Baja California Sur, pp. 127–198.
- De la Lanza-Espino, G. (2001). *Características Físico Químicas de los Mares de México*. Instituto de Geografía y Plaza y Valdés, S.A. de C.V. México DF, 149 pp.
- De la Lanza-Espino, G. y Hernández-Pulido S. (1992). *Oceanografía Química*. Atlas Nacional de México, Sección Oceanografía, Carta IV.9.6.
- Gallegos, A. (2001). *Oceanografía satelital*. En: A. Vázquez-Botello (comp.), *Informe Final del Subproyecto Monitoreo de la Calidad del Agua en la Zona Costera y Bahía de Petacalco*, Guerrero. PUMA-CFE.
- Gardfield, P.C., Packard, T., Friederich, O.E. and Codispoti, L.A. (1983). A subsurface particle maximum layer and enhanced microbial activity in the secondary maximum of north-eastern tropical Pacific Ocean. *J. Mar. Res.*, 41: 742–768.
- Kemp, M.W., Wetzel, R.L., Boyton, W.R., D'Elia, C.F. and Stevenson J.C. (1982). Nitrogen cyclin and estuarine interfaces: Some current concepts and research directions. *Estuarine Comparisons*. Ed. Kennedy, pp. 209–229.

San Francisco, especially the former. In particular, in August (rainy season) the high concentrations defined an eutrophied environment, with levels 10 times higher at some stations (associated with the industrial zone) than those recorded offshore. They were distributed throughout the bay in the direction of the current (NE, ENE), with a concentric distribution that led to a system of cyclonic and anticyclonic surface gyres that invert in direction at 10 m depth.

An accumulation of water originating from the town of Petacalco and Balsas River was recorded in the central-eastern portion of the bay, with a significant association as shown by the distribution of water density, phosphorus content and Secchi disk transparency.

## Acknowledgements

We thank the Comisión Federal de Electricidad for providing data from the project *Monitoreo de Calidad del Agua en la Bahía de Petacalco*, and Dr. Alfonso V. Botello and Ma. Eugenia Zamudio for elaborating the basic map for the isograms.

English translation by Christine Harris.

- Lechuga-Deveze, C.H., López-Cortes, D.J., Murguía, J., Murillo-Murillo, I., Hernández-Sandoval, F., Reyes-Hernández, J., Mendoza-Salgado, R.A. y Mendoza-Salgado, A. (1999). Variabilidad temporal de un área litoral sujeta a la influencia del Río Balsas. *Rev. Soc. Mex. Hist. Nat. Vol.*, 49: 173–181.
- Montano-Ley, Y., Gutiérrez-Estrada, M. y Aldeco-Ramírez, J. (1989). Dinámica de las playas de Delta del Río Balsas. *An. Inst. Cienc. Mar Limnol. UNAM*, 16(1): 17–32.
- Morales-de la Garza, E.A., Carranza-Edwards, A. y Márquez-García, A.Z. (1988). Distribución y evolución de sedimentos superficiales del delta del Río Balsas, Michoacán, México. *An. Inst. Cienc. Mar Limnol. UNAM*, 15(2): 95–104.
- Pacheco-Sandoval, P. (1991). *Pacífico Tropical Mexicano*. Cabo Corrientes a la frontera con Guatemala: Oceanografía Física. En: G. de la Lanza-Espino (comp.), *Oceanografía de Mares Mexicanos*. AGT Editor, pp. 151–162.
- Programa Maestro de Desarrollo del Puerto de Lázaro Cárdenas (1996). *Administración Portuaria Integral de Lázaro Cárdenas*, S.A. de C.V., 187 pp.
- Ronson-Paulin, J.A. (1999). Retrospective analysis and possible causes of the toxic red tides at the littoral of Mexican southeast (Guerrero, Oaxaca and Chiapas). *Cienc. Mar.*, 3(9): 49–55.
- Salas-Colunga, R. (2001). *Geología de la Bahía de Petacalco*. En: A. Vázquez-Botello (comp.), *Informe Final del Subproyecto Monitoreo de la Calidad del Agua en la Zona Costera y Bahía de Petacalco*, Guerrero. PUMA-CFE.
- Salas-Rodarte, J. (2003). *Impacto ambiental por la descarga de fertilizantes industriales en el estuario del Río Balsas y zona costera adyacente*. Tesis de maestría, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, 83 pp.
- Strickland, J.D. and Parsons, T.R. (1972). *A Practical Handbook of Seawater Analysis*. Fish. Res. Bd. Canada Bull., 310 pp.