

Distribución horizontal de nutrientes y clorofila-*a* sobre la plataforma continental del estado de Colima durante 2002

Aramis Olivos Ortiz*

José de Jesús Salas Pérez**

Geraldine García Uribe**

Marco Antonio Galicia Pérez*

Ernesto Torres Orozco***

Sonia I. Quijano Scheggia*

Resumen

En la plataforma continental del estado de Colima se realizaron campañas oceanográficas durante febrero, mayo, agosto y noviembre de 2002, sobre cuatro transectos paralelos, situados a dos, seis, 11 y 18 km de la línea de costa, con el objetivo de conocer la distribución horizontal de los nutrientes inorgánicos, la clorofila-*a* y su relación con las corrientes. En la primavera se detectaron las máximas concentraciones de nutrientes; los nitratos ($3.82 \mu\text{M}$), silicatos ($6.46 \mu\text{M}$) y ortofosfatos ($1.72 \mu\text{M}$) fueron más abundantes en los transectos más alejados de la costa, mientras que el amonio ($1.27 \mu\text{M}$) en el más cercano. La clorofila-*a* fue más abundante en el verano ($3.83 \text{ mg chl-}a \cdot \text{m}^{-3}$), a 25 m de profundidad y estuvo relacionada con la disponibilidad de nutrientes y la hidrodinámica. El patrón de circulación sobre la plataforma, descrito con el método geoestrófico, presentó remolinos ciclónicos y anticiclónicos en forma alternada, lo que dio lugar a zonas de frentes (convergentes/divergentes). Estas características aparentemente influyeron en la distribución de los nutrientes y la clorofila. Los aportes continentales sobre la zona de estudio fueron de menor importancia comparados con la fertilización generada por la circulación.

Palabras clave: Nutrientes, clorofila-*a*, circulación geoestrófica, Colima.

Introducción

El fitoplancton marino requiere ciertos elementos disueltos para su óptimo desarrollo, entre los que destacan el nitrógeno, el fósforo y el sílice, los cuales se presentan en varias especies que a su vez están influenciadas por fenómenos climáticos e hidrodinámicos (Riley y Chester, 1989).

En el océano Pacífico mexicano se han realizado algunas investigaciones interdisciplinarias con el propósito de describir la distribución de pigmentos fotosintéticos y su relación con las principales componentes de la circulación marina. Lluch-Cota *et al.* (1997) promediaron las concentraciones mensuales de los pigmentos, obtenidas a partir de imágenes de color del sensor Coastal Zone Color Scanner (czcs), y encontraron que la región del Pacífico mexicano, comprendida entre las coordenadas $100-105^\circ$ O y $8-18^\circ$ N, es permanentemente oligotrófica ya que esos valores fueron menores a $0.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, en comparación con las regiones central (Golfo de Tehuantepec) y oriental (Golfo de Papagayo), definidas como eutróficas, donde superaron los $0.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Müller-Karger y Fuentes-Yaco (2000) cuantificaron los pigmentos fotosintéticos en los remolinos que se forman entre la costa y el océano abierto en la región del Pacífico Oriental, y sugirieron que los distintos mecanismos de fertilización que ocurren en los primeros 70 km a partir de la costa, hacen que los pigmentos varíen de ~2 a más de $10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, lo que contrasta con la concentración detectada a 600 km de la costa de $1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. En el Golfo de Tehuantepec se han observado cantidades elevadas de clorofila entre octubre y marzo, que han sido relacionadas con los procesos de mezcla y el bombeo de Ekman generados por los vientos Tehuanos (Trasviña *et al.*, 1995; Fiedler, 2002), que inducen el enriquecimiento de nutrientes (nitratos y fosfatos) de las capas superficiales (Vázquez-Gutiérrez *et al.*, 1998).

* Centro Universitario de Investigaciones Oceanológicas–Universidad de Colima. Carretera Manzanillo-Barra de Navidad km. 20. Col. El Naranjo, cp 28860. Manzanillo, Col. México.

** Centro Universitario de la Costa–Universidad de Guadalajara. Avenida Universidad 203. Delegación Ixtapa. cp P 48280. Puerto Vallarta, Jal. México.

*** Facultad de Ciencias Marinas – Universidad de Colima. Carretera Manzanillo-Barra de Navidad km. 20. Col. El Naranjo, cp 28860. Manzanillo, Col. México.

En el Pacífico central mexicano se han caracterizado los sistemas de circulación en gran escala, los procesos de inestabilidad de meso-escala y la presencia de remolinos (Fiedler, 1994; Peña *et al.*, 1990; Rodríguez *et al.*, 2001); pero no se ha prestado atención a los procesos dinámicos costeros, tales como las corrientes residuales, que pueden llegar a ser de gran importancia en los procesos locales de fertilización.

En la zona costera del estado del estado de Colima se han realizado algunos trabajos puntuales sobre la disponibilidad de nutrientes en las bahías de Manzanillo y Barra de Navidad, que analizan las relaciones estequiométricas de estos compuestos y su efecto en la productividad primaria (expresada como concentración de clorofila-*a*), así como la influencia de los aportes continentales sobre la abundancia y la diversidad de grupos fitoplanctónicos (López-Sandoval y Olivos-Ortiz, 2002; Quijano-Scheggia *et al.*, 2003; Olivos-Ortiz *et al.*, 2003). Se desconocen los mecanismos de fertilización de la plataforma continental de esta región, aunque es probable que estén relacionados con escurreimientos continentales (aportes de ríos o de asentamientos urbanos) y con la circulación costera (distribución de nutrientes a lo largo de la columna de agua debido a eventos dinámicos tales como los remolinos). Por tanto, el objetivo de este trabajo fue conocer la distribución horizontal de nutrientes inorgánicos sobre la plataforma continental de Colima y de la abundancia de clorofila-*a* durante el año 2002, ya que a partir de las áreas en las que se acumulan estos compuestos y su relación con las corrientes, es posible inferir la forma en que ahí llegan.

Métodos y materiales

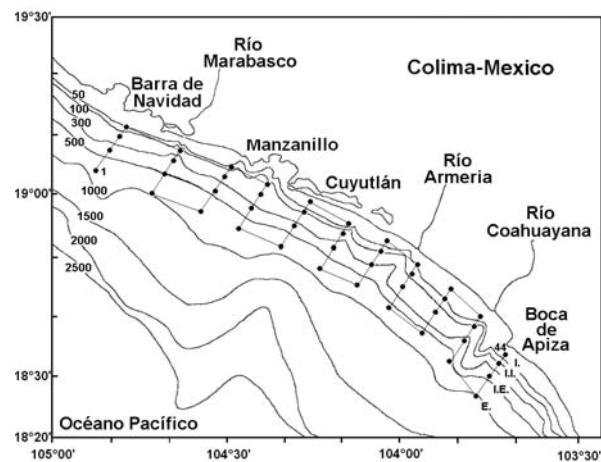
El estado de Colima está situado en la costa meridional del océano Pacífico, entre los 103°19'20" y los 104°41'12" Oeste y entre los 18°41'17" y los 19°31'20" Norte. La línea de costa mide 142 km y comprende los municipios de Manzanillo, Armería y Tecomán. El litoral está formado por playas rocosas y abruptas, a excepción de las áreas con influencia de ríos. El perfil costero se caracteriza por un declive pronunciado y un fondo casi uniforme (Zepeda-Gutiérrez, 1987). La plataforma continental es estrecha y abarca un total de 1 320 km². El clima es cálido subhúmedo, con un promedio anual de precipitación pluvial de 1 205.9 mm. La temporada de lluvias inicia en junio, alcanza su máximo entre agosto y septiembre, y disminuye en diciembre (Quijano y Vidaurre, 1987). Los principales

ríos son el Marabasco, el Armería y el Coahuayana (INEGI¹, 2002).

La toma de muestras se realizó en colaboración con la Armada de México, a bordo de los Buques Oceanográficos *Altair* y *A.V. Humboldt*, dentro del programa Oceanografía Descriptiva del Estado de Colima (ODECOL) en los meses de febrero, mayo, agosto y noviembre de 2002, los cuales se tomaron como representativos de invierno, primavera, verano y otoño.

El área de estudio comprendió la plataforma continental del estado de Colima, sobre la que se trazaron 11 transectos perpendiculares a la costa, en los que se ubicaron cuatro estaciones oceanográficas (a dos, seis, 11 y 18 km de la línea de costa), que a su vez formaron cuatro transectos paralelos a la costa, que de forma arbitraria se nombraron: Interno (I), Intermedio Interno (II), Intermedio Externo (IE) y Externo (E), para facilitar la interpretación de los resultados (Fig. 1).

Figura 1
Área de estudio y estaciones de muestreo



Las muestras para la medición de los nutrientes, nitritos+nitratos ($\text{N-NO}_2^- + \text{NO}_3^-$), amonio (N-NH_4^+), fosfatos (P-PO_4^{3-}) y silicatos (Si-SiO_2), se colectaron con botellas Niskin de cinco litros a 0, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 150 y 200 m de profundidad, e inmediatamente se almacenaron a -4 °C hasta su análisis en el laboratorio. Las concentraciones se determinaron colorimétricamente con un autoanalizador de flujo segmentado SKALAR SanPlus II con las técnicas descritas

1. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) 2001. <http://www.inegi.gob.mx>

por Solórzano (1969), Strickland y Parsons (1972) y Grasshoff *et al.* (1983).

Las muestras de agua para clorofila-a (*chl-a*) se tomaron sobre las estaciones costeras y oceánicas a 5, 25 y 50 m de profundidad y se analizaron con la técnica colorimétrica descrita por Strickland y Parsons (1972). Los volúmenes de muestra utilizados variaron entre 350 y 750 ml, en función de la cantidad de material suspendido; se emplearon filtros de membrana de 0.45 μm de apertura de poro (Millipore) que permanecieron congelados (-4 °C) y en total oscuridad hasta su análisis. La extracción del pigmento se realizó en 10 ml de acetona a 90% en total oscuridad y a 6 °C por 24 hrs. La lectura de la absorción se realizó con un espectofotómetro Spectronic 20 Genesys con celdas de cuarzo de 10 cm. La cantidad de *chl-a* se calculó con la siguiente expresión:

$$\text{Ec. 1} \quad \text{mg chl-}a \cdot \text{m}^{-3} = CV^1$$

Donde V es el volumen de agua filtrado y C es el valor obtenido, a partir de las diferentes longitudes de onda, de la ecuación específica para *chl-a* propuesta por Richards y Thompson (citados por Strickland y Parsons, 1972) previa corrección de las lecturas a 750 nm.

$$\text{Ec. 2} \quad C = 15.6 E_{665} - 2.0 E_{645} - 0.8 E_{630}$$

La temperatura y la salinidad se midieron a lo largo de la columna de agua en intervalos de 1 m ($\Delta Z = 1$ m), con un CTD Sea Bird 19-Plus (precisión ± 0.01 °C y ± 0.0001 S m $^{-1}$), en cada una de las estaciones de muestreo (Fig. 1). Con estos datos se calcularon los campos de velocidad geostrófica mediante el Modelo de Alturas Dinámicas (Pond y Pickard, 1983):

$$\text{Ec. 3} \quad v = (g/f) \frac{\partial h}{\partial x}$$

Donde g es la gravedad, f es el parámetro de Coriolis, ∂h es la altura dinámica y ∂x la variación en la horizontal.

Se calcularon las velocidades geostróficas ortogonales asumiendo que la velocidad era cero a la profundidad de 100 m (nivel de referencia o no movimiento) y se consideraron únicamente las velocidades resultantes conforme la variación de la altura dinámica. El modelo realizó interpolaciones en cada celda (a partir de los perfiles de densidad) para generar los vectores de velocidad geostrófica y se graficó el promedio en el centro de cada una de ellas, por lo que los rasgos de la circulación obtenidos pueden considerarse una aproximación razonable (véase Galicia *et al.* en este mismo libro). Por las variaciones de la

profundidad en el área de estudio y las características del modelo, se consideró que los vectores estimados a 25 m de profundidad eran representativos de las condiciones del medio y, por esta razón, los mapas de distribución de nutrientes se elaboraron con esa misma profundidad.

El análisis estadístico practicado a las cantidades de nutrientes se realizó con el programa Statistica 5.0 (StatSoft Inc., 2000): primero se comprobó que los datos satisficieran las condiciones de homogeneidad de varianza y de distribución normal con las pruebas de Levene y Kolmogorov-Smirnov (k-s), respectivamente; después, a los datos de cada temporada se les aplicó un Análisis de Varianza de una Vía (ANDEVA con una significancia α de 0.05) para determinar la existencia de diferencias en su distribución con el propósito de ubicar la nutriclina y determinar la influencia de las descargas de origen continental en la zona de estudio. En el primer caso los datos se clasificaron como superficiales y de fondo, de acuerdo con los perfiles de cada nutriente; mientras que en el segundo, las estaciones se agruparon longitudinalmente (en paralelo a la costa) en los cuatro transectos paralelos a la costa (I, II, IE, E).

Resultados

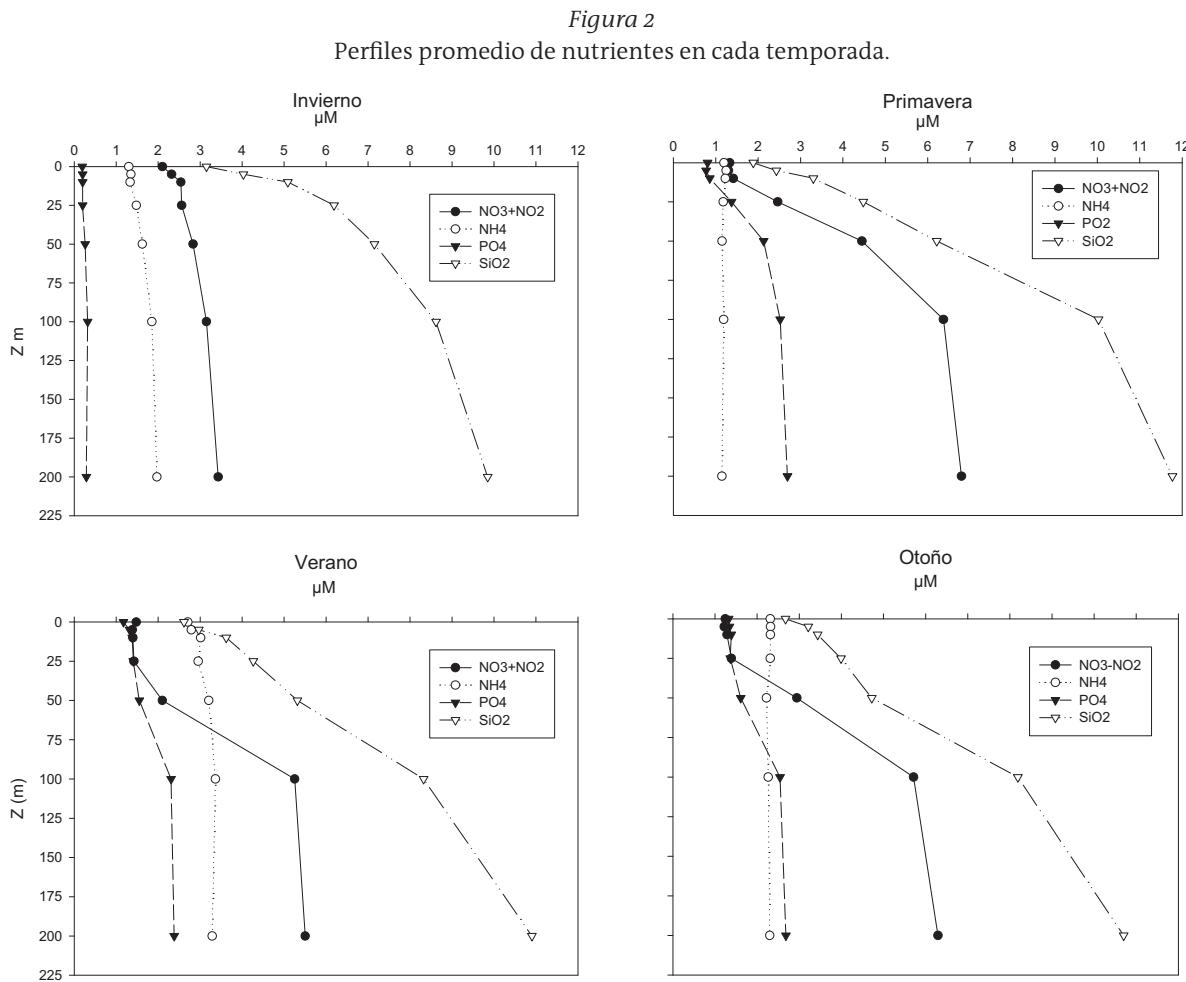
Los resultados se exponen con la siguiente secuencia. En primer lugar se describe la distribución vertical de los nutrientes, las variaciones estacionales de las *chl-a* y las comparaciones del contenido de nutrientes en los transectos paralelos a la costa; posteriormente se presentan la circulación y la distribución horizontal de estos compuestos y de la *chl-a* y se contrastan entre ellos, de manera cualitativa.

Ubicación de la nutriclina

La distribución vertical de las concentraciones promedio de los nutrientes a lo largo de la columna de agua (Fig. 2) y su análisis estadístico ($p < 0.05$) mostraron que la ubicación de la nutriclina varió estacionalmente; en invierno y primavera se situó aproximadamente a partir de los 50 m, mientras que en verano y otoño a los 75 metros.

Distribución de la biomasa fitoplanctónica

Las cantidades promedio de *chl-a* mostraron cambios estacionales: en invierno se presentaron los valores más bajos, excepto en el transecto I (Fig. 3a). En primavera (Fig. 3b y 3c) las concentraciones se



incrementaron y alcanzaron el máximo en verano, en especial a los 50 m de profundidad (3.7 mg $\text{chl-a} \cdot \text{m}^{-3}$) sobre el transecto E; mientras que en otoño (Fig. 3d) el contenido de chl-a disminuyó, aunque sin llegar a ser indetectable, como ocurrió a los cinco metros de profundidad en el transecto E durante el invierno.

Comparación entre los transectos paralelos a la costa

En la *tabla 1* se aprecia que los valores promedio más altos de nitratos, fosfatos y silicatos ocurrieron sobre el transecto IE en invierno y sobre el borde de la plataforma (transecto E) el resto del año; en contraste, los más bajos se detectaron cerca de la costa (transecto I) o en sus inmediaciones (transecto II). La distribución del amonio fue más variable, en primavera y otoño las mayores cantidades se registraron en el transecto I, mientras que en invierno y verano, en los transectos IE y E, respectivamente. Las concentraciones más bajas de los cuatro nutrientes no mostraron algún patrón definido ni la existencia de gradientes a partir de la línea de costa.

Sin embargo, a pesar de las diferencias descritas, al aplicar el ANDEVA, el cociente de varianzas (F') resultó menor a 2.35 (cuando el valor límite de $F'_{0.05,3}$ es 2.60), lo que indica que no había diferencia significativa entre las medias de los cuatro transectos. Esto sugiere que los aportes continentales no modificaron de manera significativa la cantidad de estos compuestos a lo largo del transecto I.

Descripción de las corrientes y de la distribución de los nutrientes

Durante el invierno la circulación geostrófica mostró una componente general hacia el sureste (Fig. 4). Desde Barra de Navidad se generó un flujo de la costa al océano que alimenta un chorro que llega hasta Cuyutlán y generó un remolino anticiclónico entre los transectos I e IE de aproximadamente 15 km de diámetro que en su parte externa (transectos IE y E) generó un contraflujo que se desvió hacia la parte oceánica frente a las bahías de Manzanillo. Esta estructura se conecta con un ciclón de 12 km de diámetro (entre

Figura 3

Variación estacional de clorofila-a durante el periodo de estudio.

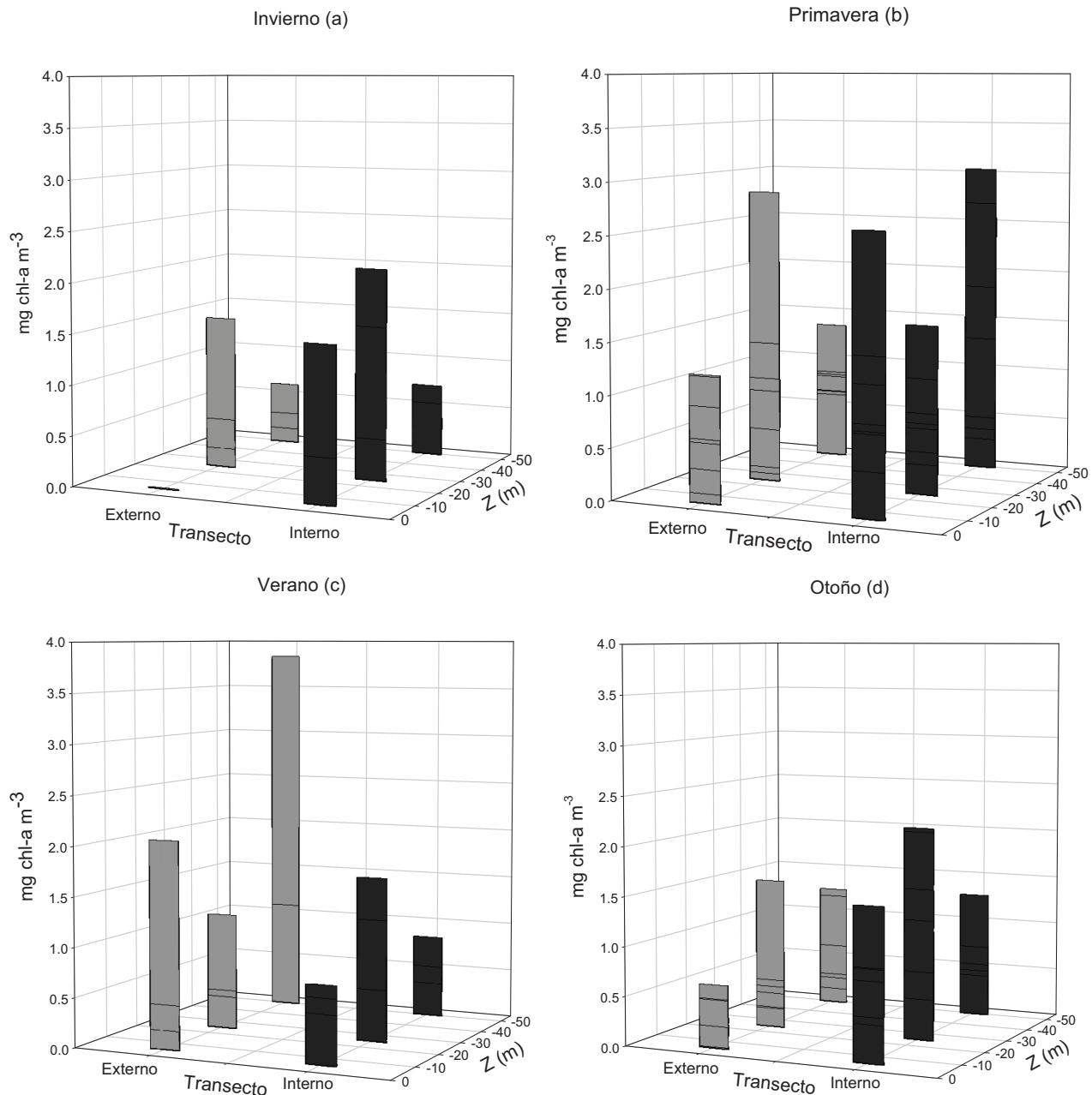
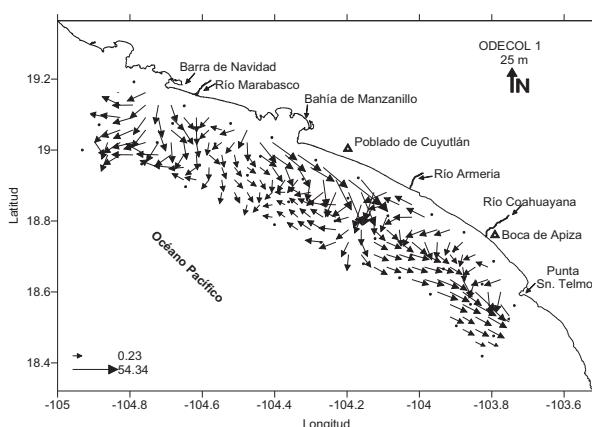


Tabla 1
Promedios estacionales de la concentración de nutrientes (μM) por transecto

Transecto	Invierno		Primavera		Verano		Otoño	
	Media	Desv. Std.	Media	Desv. Std.	Media	Desv. Std.	Media	Desv. Std.
<i>Int. Interno</i>								
$\text{NO}_2 + \text{NO}_3$	2.55	0.69	3.38	0.28	2.18	0.38	2.61	0.49
NH_4	1.58	0.74	1.27	0.25	3.00	0.33	2.29	0.37
PO_4	0.19	0.08	1.58	0.84	1.54	0.49	1.18	0.28
SiO_2	5.26	1.70	4.67	1.69	4.39	1.27	4.20	1.51
<i>Int. Externo</i>								
$\text{NO}_2 + \text{NO}_3$	2.64	0.75	3.39	0.40	2.41	0.66	3.01	0.16
NH_4	1.62	0.78	1.11	0.30	2.74	0.47	2.28	0.26
PO_4	0.22	0.16	1.42	0.87	1.60	0.50	1.23	0.39
SiO_2	5.42	2.33	5.38	1.33	4.87	1.47	4.84	1.58
<i>Externo</i>								
$\text{NO}_2 + \text{NO}_3$	2.75	0.83	3.29	0.73	2.90	0.48	3.30	0.39
NH_4	1.59	0.68	1.21	0.22	3.07	0.37	2.02	0.48
PO_4	0.26	0.12	1.72	0.16	1.78	0.41	1.31	0.27
SiO_2	6.49	2.91	5.59	1.37	5.93	2.10	5.36	1.57

los transectos I y II) el cual se une con un flujo hacia el sureste sobre los transectos externos que frente a Boca de Apiza generó un segundo flujo ciclónico de menores dimensiones entre los transectos I y II.

Figura 4
Circulación geoestrófica durante invierno



Los mapas de distribución de cada nutriente fueron diferentes entre sí (Fig. 5a, 5b, 5c, 5d). Las concentraciones de nitratos más bajas se detectaron hacia el talud, mientras que las más altas entre Barra de Navidad y Manzanillo (II e IE). En el caso del

amonio, los valores más bajos se registraron al sur de Cuyutlán, mientras que los más elevados en una franja perpendicular a la costa ubicada entre el meridiano 104.6° o y Manzanillo. El fósforo fue escaso ($<0.04 \mu\text{M}$), excepto en un punto ubicado entre Manzanillo y Cuyutlán, mientras que los silicatos fueron ligeramente más abundantes sobre el talud y en una especie de “lengüeta” detectada entre el borde de la plataforma y las estaciones intermedias entre Barra de Navidad y Manzanillo.

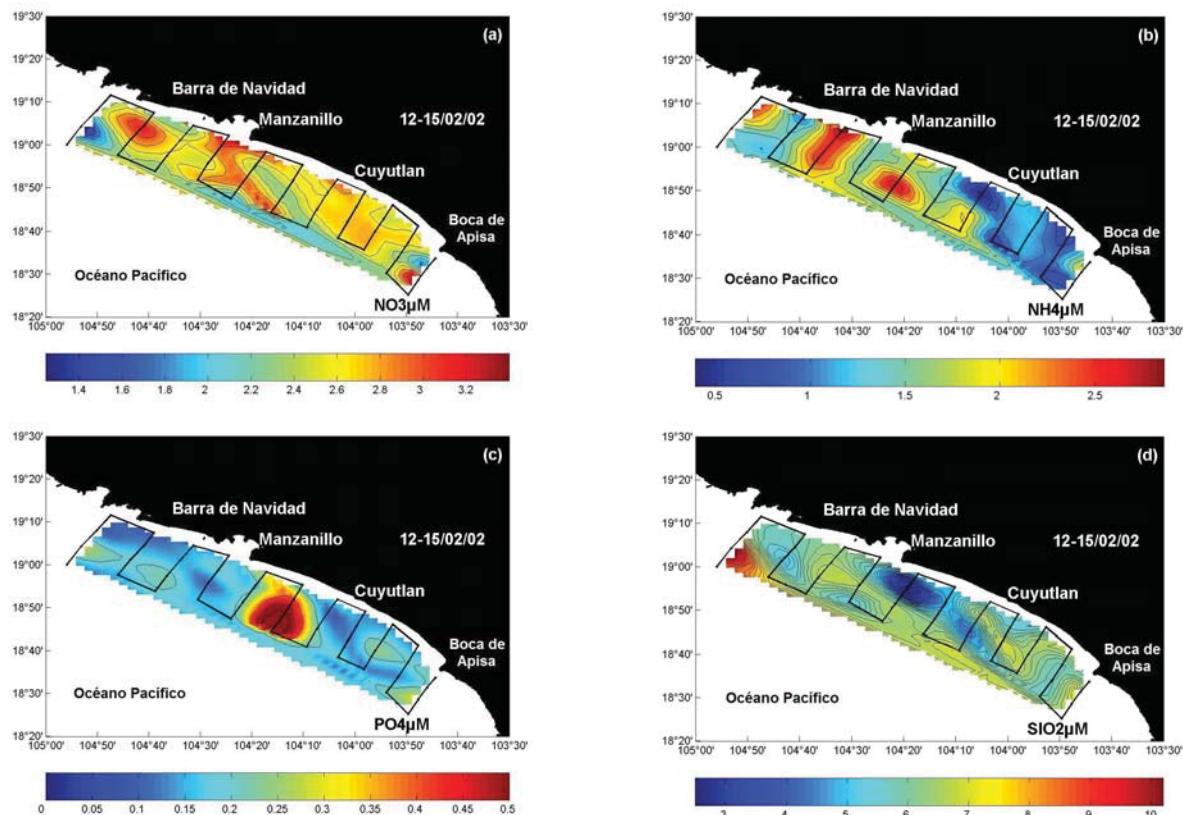
La distribución de los nutrientes aparentemente mantiene alguna relación con la hidrodinámica. En el interior del remolino anticiclónico el contenido de los cuatro compuestos fue menor que el detectado en la periferia de esas estructuras. Por el contrario, al centro de los vórtices de los remolinos ciclónicos y en su zona de influencia las concentraciones de los cuatro nutrientes fueron elevadas.

Las variaciones de la clorofila también estuvieron relacionadas con la ubicación de los remolinos y las corrientes. Los mapas de distribución de estos pigmentos a 25 m de profundidad mostraron que las cantidades más grandes ($>1 \text{ mg chl-a} \cdot \text{m}^{-3}$) coincidieron con los remolinos ciclónicos, mientras que las más bajas ($<1 \text{ mg chl-a} \cdot \text{m}^{-3}$) con los anticiclones.

Durante la primavera la dirección dominante de la corriente fue al sureste; empero, mientras que en el

Figura 5

Gráficos representativos de la distribución de nutrientes durante invierno



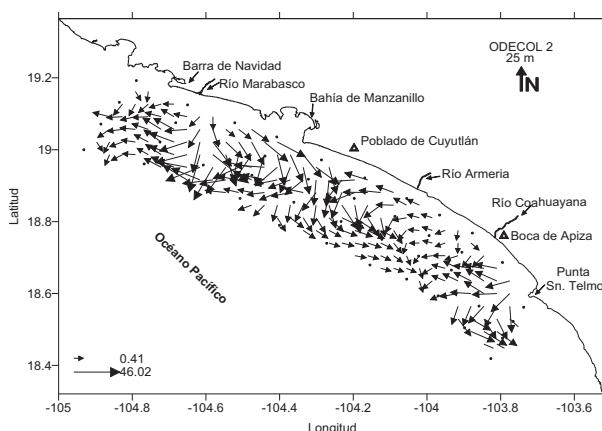
a) Nitrato, b) amonio, c) fosfato y d) silicato.

borde del talud continental (transecto E) el flujo fue estable, sobre la plataforma se formaron meandros, que al converger dieron origen a una secuencia alternada de remolinos ciclónicos y antíclínicos (Fig. 6). Frente a las bahías de Manzanillo, entre los transectos IE y E se formó un anticiclón de 18 km de diámetro aproximadamente, que se contrapone con un remolino ciclónico de dimensiones similares. Entre estos dos remolinos se genera un flujo “zigzagueante” que sobre el transecto E es más definido desde Cuyutlán hasta Boca de Apiza.

En esta temporada los mapas mostraron que hubo un incremento de fosfatos y amonio desde Barra de Navidad hasta Boca de Apiza, aunque su distribución no fue homogénea (Fig. 7). Los fosfatos y silicatos fueron más abundantes sobre el núcleo del remolino ciclónico y en las zonas de divergencia que se produjeron entre las bahías de Manzanillo y Cuyutlán, donde también se incrementó la concentración de nitratos (Fig. 7a). Por su parte, en el anticiclón y las zonas de convergencia los cuatro nutrientes fueron escasos (Figs. 7a, 7b, 7c y 7d).

Figura 6

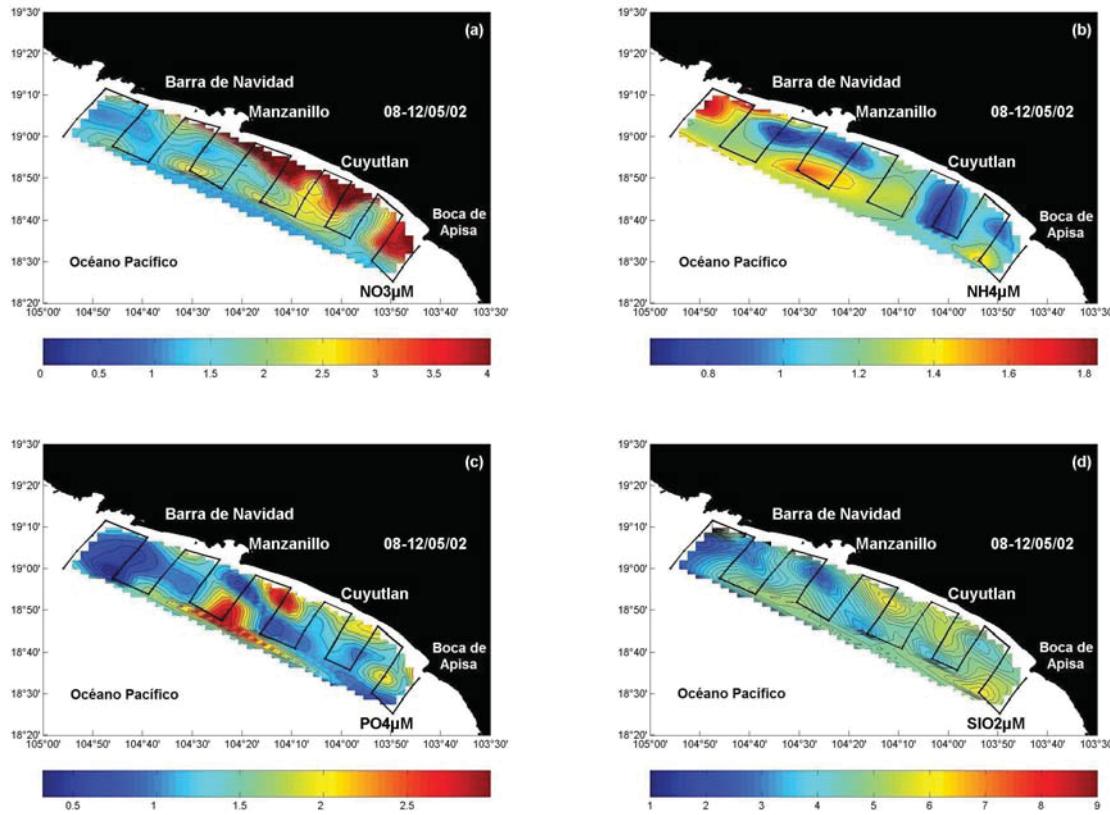
Circulación geostrófica durante primavera.



La distribución de *chl-a* en la profundidad de 25 m, aparentemente estuvo relacionada con la presencia del remolino antíclínico y la convergencia frente al río Coahuayana, entre los transectos IE y E, donde

Figura 7

Gráficos representativos de la distribución de nutrientes durante primavera



a) Nitrato, b) amonio, c) fosfato y d) silicato.

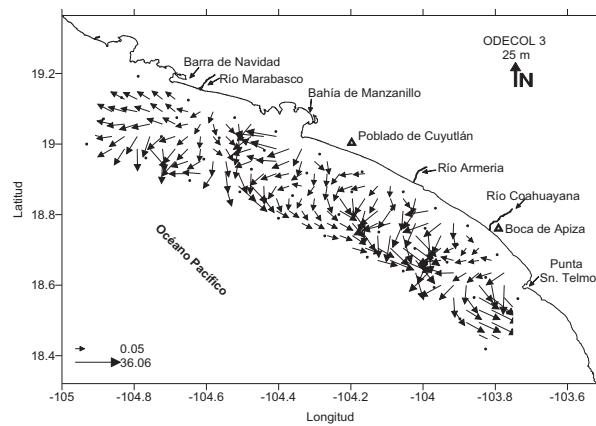
la concentración fue inferior a $0.7 \text{ mg chl-a} \cdot \text{m}^{-3}$, mientras que sobre el vórtice ciclónico se triplicó ($2.4 \text{ mg chl-a} \cdot \text{m}^{-3}$ desde los 25 hasta los 50 m). Frente a Punta San Telmo, en la parte interna, el valor fue de 2.1 y en la externa de $1.1 \text{ mg chl-a} \cdot \text{m}^{-3}$.

En verano, sobre el transecto E, la dirección de la corriente fue hacia el sureste; mientras que sobre la plataforma hacia el noroeste, como en primavera, se formaron meandros que, si bien no dan paso a la formación de remolinos bien definidos, forman un flujo alternado que genera frentes (divergentes/convergentes) bien marcados. Entre el río Marabasco y las bahías de Manzanillo se forma un flujo que va de la costa al océano y pasa entre Cuyutlán y el río Armería y frente a Boca de Apiza donde se registran velocidades considerables durante esta época.

Los mapas de distribución de los cuatro nutrientes correspondientes a esa temporada no mostraron alguna tendencia. Los valores más altos se presentaron en puntos específicos (Fig. 9 a, b, c y d), algunos de los cuales coincidieron con las divergencias que se formaron frente a Barra de Navidad, entre los transectos IE y E, como fue el caso del amonio y los sili-

Figura 8

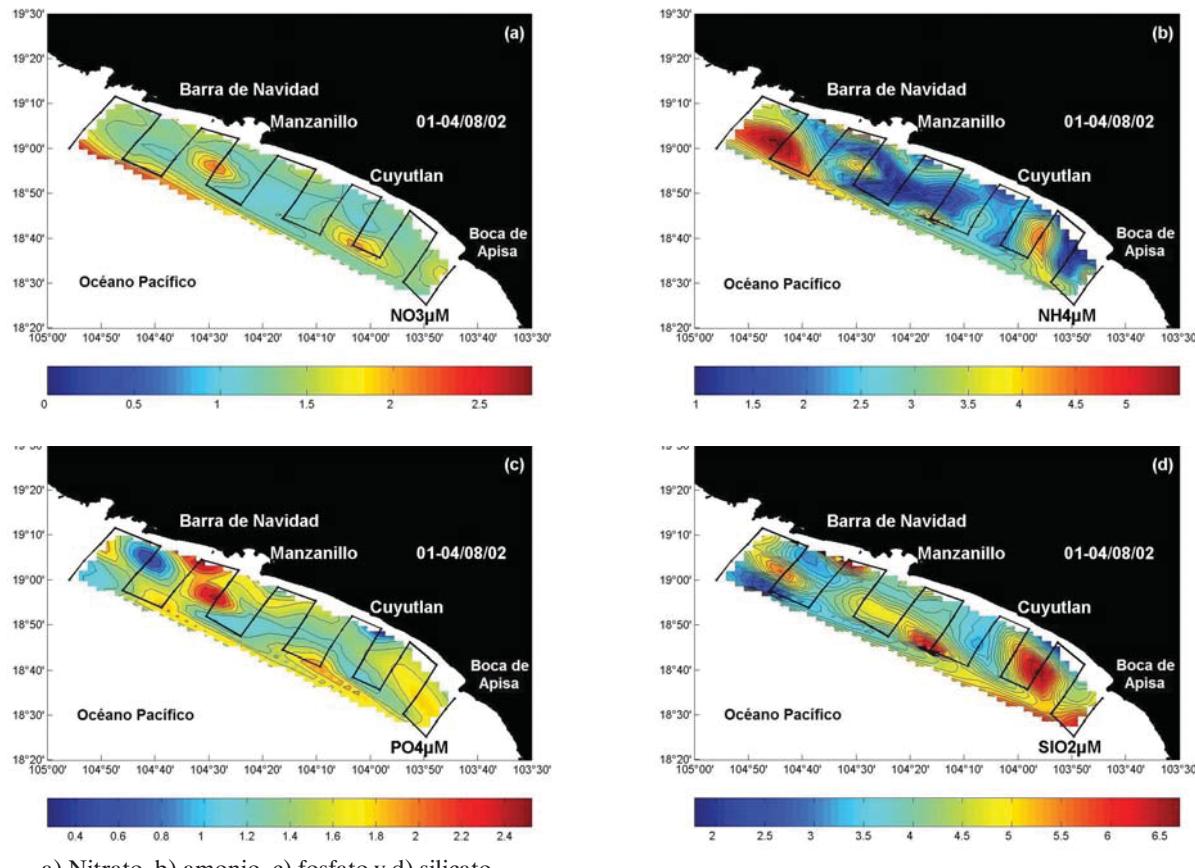
Circulación geostrófica durante verano



catos; en esa zona se registró el mayor contenido de amonio (Fig. 9b) ($5.02 \mu\text{M}$) del año a 25 m de profundidad, después de eso disminuyó hasta los 100 m y fue indetectable. Los nitratos, el amonio y los fosfatos formaron un núcleo con altas concentraciones frente a la bahía de Manzanillo, entre los transectos

Figura 9

Gráficos representativos de la distribución de nutrientes durante verano



a) Nitrato, b) amonio, c) fosfato y d) silicato.

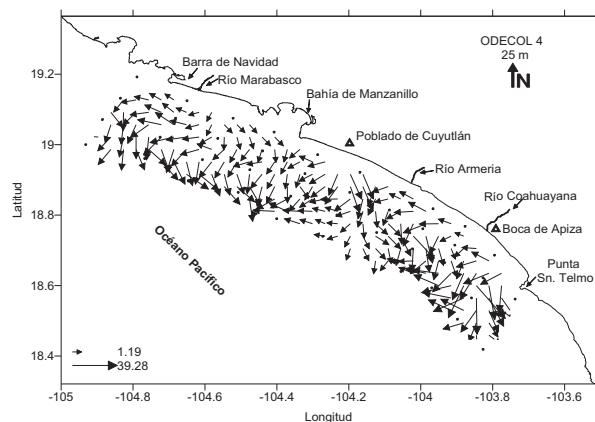
II e IE, en donde la circulación fue de tipo ciclónico y las velocidades fueron más elevadas. La *chl-a* fue muy abundante en las zonas con alto contenido de nutrientes, donde se registraron 3.83 mg *chl-a*·m⁻³ y 2.21 mg *chl-a*·m⁻³, respectivamente.

Durante el otoño no se aprecia una dirección bien definida en la corriente general sobre toda la plataforma continental; al igual que en el verano, sobresale la generación de meandros de la costa al océano que alimentan trayectorias “zigzagueantes” que dan paso a zonas con frentes bien marcados (Fig. 10). En la parte sur de las bahías de Manzanillo y entre Cuyutlán y el río Armería se observan dos frentes convergentes sobre el transecto I con su contraparte sobre el transecto E. Entre el río Coahuayana y Punta San Telmo se aprecia una zona con las velocidades más altas pero sin una dirección bien definida, que deja ver un transporte neto hacia el océano (Fig. 10).

En esta época, frente a Manzanillo y Cuyutlán, las máximas concentraciones de nitratos, amonio y silicatos se alternaron entre los transectos I y E (Fig. 11a, 11b y 11c), mientras hacia la parte externa del frente, situado a la altura de las bahías de Manzanillo, las cantidades de amonio fueron bajas y coincidieron con perturbaciones en las estaciones intermedias ubicadas entre Cuyutlán y Boca de Apiza (Fig. 11b), en el sureste de la zona de estudio. El contenido de fosfatos fue pequeño, en especial frente a Manzanillo sobre el transecto interno y frente a Barra de Navidad

Figura 10

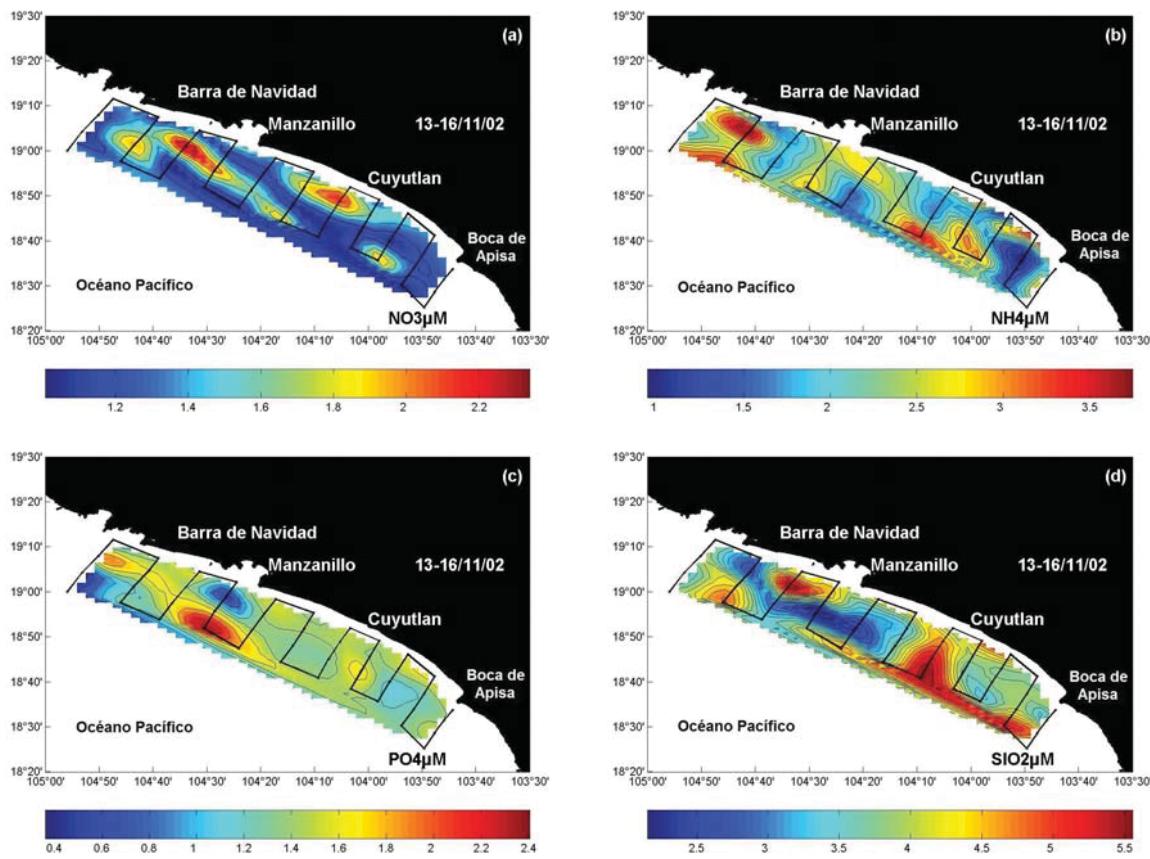
Circulación geostrófica durante otoño



llo, las cantidades de amonio fueron bajas y coincidieron con perturbaciones en las estaciones intermedias ubicadas entre Cuyutlán y Boca de Apiza (Fig. 11b), en el sureste de la zona de estudio. El contenido de fosfatos fue pequeño, en especial frente a Manzanillo sobre el transecto interno y frente a Barra de Navidad

Figura 11

Gráficos representativos de la distribución de nutrientes durante otoño



a) Nitrato, b) amonio, c) fosfato y d) silicato.

sobre las estaciones externas; el valor más alto se registró en la parte externa frente a Manzanillo, donde se detectó una contracorriente con dirección sureste. Los silicatos fueron escasos en los transectos II e IE, entre Barra de Navidad y Cuyutlán, así como entre el río Coahuayana y Punta San Telmo (Fig. 11d).

La cantidad de *chl-a* fue de 1.2 mg *chl-a*·m⁻³ a 25 m de profundidad frente a Barra de Navidad, mientras que enfrente a Manzanillo fue de 0.7 mg *chl-a*·m⁻³ en el transecto interno; en contraparte, sobre las estaciones externas, donde aparentemente iniciaba un flujo en contracorriente, se presentaron las mayores concentraciones (2.82 mg *chl-a*·m⁻³), en tanto que entre Cuyutlán y Boca de Apiza, donde se presentó una marcada inestabilidad, se registró alrededor de los 0.82 mg *chl-a*·m⁻³.

Discusión

La distribución de nutrientes presenta una variación estacional, con los promedios más altos de fosfatos y

amonio (1.6 y 3.0 μM respectivamente) en primavera y verano así como de *chl-a*, a 50 m de profundidad, esto como posible resultado de la recirculación de dichos compuestos por procesos de mezcla vertical y del incremento de la biomasa fitoplanctónica, favorecido por mayores temperatura y penetración de la luz (Riley y Chester, 1989; Badan, 1997); lo que pudo causar que durante el verano se registraran los valores más altos de *chl-a* (3.83 mg *chl-a*·m⁻³) y de NH_4^+ , lo que a su vez sugiere que la actividad fitoplanctónica contribuyó a la remineralización de nutrientes (Vidal y Duarte, 2000; Shen, 2001). Durante el otoño la *chl-a* fue más abundante que en invierno y coincidió con valores altos de los cuatro nutrientes, posiblemente porque en esa época el patrón de circulación fue estable (*e.g.* no se observaron vórtices) y las condiciones ambientales aún fueron favorables para las microalgas; no obstante, es probable que debido a la disminución de la penetración de luz, la cantidad de biomasa haya sido menor (1.2 mg *chl-a* m⁻³) que en primavera y verano.

Durante el invierno hubo alta disponibilidad de $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ y SiO_2 pero baja concentración de *chl-a*

por encima de la nutriclina (50 m). En trabajos previos se reportó que la biomasa planctónica era escasa durante el invierno en la zona de estudio (Navarro-Rodríguez *et al.*, 2001), resultado de condiciones ambientales poco favorables (Fiedler *et al.*, 1991; Meave del Castillo *et al.*, 2003). Otros autores señalan que durante el invierno el contenido de *chl-a* en el fitopláncton es menor que en otras épocas del año, porque las condiciones lumínicas y las bajas temperaturas a lo largo de la columna de agua no son las óptimas para su metabolismo y desarrollo celular, lo que favorece la presencia de nutrientes en forma disuelta (Ferrier-Pagès y Rassoulzadegan, 1994; Estrada, 1996; Maso *et al.*, 1998).

La distribución horizontal de nutrientes se comparó con la circulación descrita con el método geostrófico, capaz de generar una aproximación del patrón de corrientes en el área de estudio (Tolmazin, 1985). Aunque se aplica en aguas abiertas, también se ha utilizado para describir la presencia estacional de remolinos en la parte norte del Golfo de California, donde las profundidades oscilan entre los 40 y 500 m (Carrillo *et al.*, 2002); y la presencia de surgencias durante el invierno en la plataforma continental chilena, donde la profundidad máxima es de 350 m (Moraga *et al.*, 2001).

Los resultados obtenidos muestran que la circulación sobre la plataforma continental del estado de Colima está relacionada con la orientación del talud continental y con la variación estacional, que se caracteriza por la formación de flujos contrapuestos que generan meandros y la presencia alternada de vórtices (cyclónicos/anticiclónicos) con diámetros variables entre ocho y 20 km. Durante el verano, aunque no se detectó la formación clara de vórtices, se presentaron las trayectorias semicíclicas más amplias de los meandros (hasta de 25 km); en este sentido, sobre la zona existen trabajos que señalan que en la capa de 0-100 m de profundidad, la temperatura y salinidad presentan fluctuaciones estacionales debidas a la evaporación, la precipitación y el calentamiento solar que propician la generación de radios de deformación baroclínica de 36 km en verano y 18 km en invierno; mientras que a lo largo del talud continental se reportan remolinos con diámetros de hasta 60 km durante el verano, que se desplazan desde el Golfo de Tehuantepec hasta Cabo Corrientes, hecho que se ve acentuado como resultado de la propagación de eventos de El Niño (Filonov *et al.*, 2000; Zamudio *et al.*, 2001).

El patrón local de circulación puede ser el principal mecanismo de fertilización de la región debido a que los vórtices y los frentes generan movimientos de surgencia o hundimiento a lo largo de la columna de agua, que influyen en la disponibilidad (recirculación) de nutrientes y, por ende, en la biomasa fitoplanctónica expresada en forma de clorofila-a. De manera similar a lo reportado por otros autores (Pond y Pickard, 1983; Brown *et al.*, 1995), se encontró que en el centro de las perturbaciones anticiclónicas se presentaron bajas concentraciones de nutrientes y de clorofila-a relacionadas con movimientos convergentes, mientras que los remolinos ciclónicos se asociaron a movimientos divergentes que en su centro presentaron altas cantidades de nutrientes y clorofila-a.

Sin embargo, también se podría pensar que la fertilización en esta zona se relaciona con los aportes continentales, como se ha descrito en algunas zonas costeras cercanas a la desembocadura de grandes ríos o escorrentías urbanas de poblaciones con más de tres millones de habitantes, donde la abundancia de nutrientes llega a ser de un orden de magnitud más alta que en las aguas circundantes (Marchetti *et al.*, 1989; Justic *et al.*, 1995; Rabalais *et al.*, 1996; Olivos-Ortiz *et al.*, 2002). En el área de estudio los asentamientos urbanos más grandes se ubican en las bahías de Manzanillo y Barra de Navidad, que en conjunto agrupan a menos de 300 000 habitantes (INEGI, 2002), mientras que el aporte de agua dulce que se realiza a través de la Laguna de Cuyutlán es mínimo y la descarga de los ríos Marabasco, Armería y Coahuayana es de temporal y su caudal máximo no ha sobrepasado los 350 m³ seg⁻¹ en la última década (Ortiz, 2000). La influencia de estos aportes en la concentración de los nutrientes a lo largo del transecto interno probablemente es pequeña, ya que las comparaciones estadísticas realizadas no mostraron diferencias significativas entre transectos, lo que sería indicativo del efecto de los aportes continentales.

Conclusiones

Durante el periodo de estudio, los nutrientes fueron abundantes a lo largo de la columna de agua durante la primavera y el verano, lo que favoreció el aumento de la *chl-a* en este último periodo. Por otro lado, los aportes continentales representaron una influencia secundaria frente a los mecanismos de circulación en la distribución de nutrientes en la zona costera del estado de Colima.

Referencias bibliográficas

- BADAN, A. 1997. La Corriente Costera de Costa Rica en el Pacífico Mexicano. En: M Lavín (ed.). *Contribución a la oceanografía física en México*. Monografía 3. Unión Geofísica Mexicana. pp. 99-113.
- BROWN, J., A. Colling, D. Prak, J. Phillips, D. Rothery y J. Wright. 1995. Ocean circulation. En: G. Bearman (ed.). *The oceanography course team*. Open University, Pergamon, England. 238p.
- CARRILLO L., M.F. Lavin y E. Palacios-Hernández. 2002. Seasonal evolution of the geostrophic circulation in the Northern Gulf of California. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 54:157-173.
- ESTRADA, M. 1996. Primary production in the northwestern Mediterranean. *Scientia Marina*, 60(2):55-64.
- FERRIER-PAGÈS, C. y F. Rassoulzadegan. 1994. Seasonal impact of the microzooplankton on pico-and nanoplankton growth rates in the northwest Mediterranean Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 108:283-294.
- FIEDLER, P.C. 1994. Seasonal and inter annual variability of coastal zone color scanner phytoplankton pigments and winds in the eastern tropical Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 99(9)18 371-18 384.
- FIEDLER, P.C. 2002. The annual cycle and biological effects of the Costa Rica Dome. *Deep Sea Research*, 49:321-338.
- FIEDLER, P.C., V. Philbrick y F.P. Chávez. 1991. Oceanic upwelling and productivity in the eastern tropical Pacific. *Limnology and Oceanography*, 36(8):1834-1850.
- FILONOV, A.E., I.E. Tereshchenko, C.O. Monzon, M.E. González-Ruelas y E. Godínez-Domínguez. 2000. Season variability of the temperature and salinity fields in the coastal zone of the states of Jalisco and Colima Mexico. *Ciencias Marinas*, 26(2):303-321.
- GRASSHOFF, K., M. Ehrhardt y K. Kremling. 1983. *Methods of seawater analysis*. 2, Verlag Chemie. Germany. 419p.
- INEGI. 2002. *Anuario estadístico del Estado de Colima*. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México. 520p.
- JUSTIC, D., N.N. Rabalais, R.E. Turner y Q. Dortch. 1995. Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: Stoichiometric nutrient balance and its consequences. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 40:339-356.
- LLUCH-COTA, S., S. Álvarez-Borrego, E.M. Santamaría-del Ángel, F.E. Müller-Karger y S. Hernández-Vázquez. 1997. The Gulf of Tehuantepec and adjacent areas: spatial and temporal variation of satellite-derived photosynthetic pigments. *Ciencias Marinas*, 23(3):329-340.
- LÓPEZ-SANDOVAL, D.C. y A. Olivos-Ortiz. 2002. Comportamiento de nutrientes inorgánicos disueltos y su relación con la productividad primaria en las bahías de Santiago y Manzanillo, Col. (sep-2000-agosto 2001). *Memorias. XIII Congreso Nacional de Oceanografía*. 7-11 de octubre, Puerto Vallarta, México. pp. 78-80
- MARCHETTI, R., A. Provini y G. Cosa. 1989. Nutrient load carried by the Po river into the Adriatic Sea, 1968-1987. *Marine Pollution Bulletin*, 20:168-172.
- MASO, M., A. Sabates y M.P. Olivari. 1998. Short-term physical and biological variability in the shelf-slope region of the NW Mediterranean during the spring transition period. *Continental Shelf Research*, 18:661-675.
- MEAVE DEL CASTILLO, M.E., M.E. Zamudio-Reséndiz, J. Aké-Castillo, S.L. Guerra-Martínez e I.F. Barboza-Ledesma. 2003. Biodiversity of diatom (Bacillariophyta) along the water column in the Mexican Pacific. En: M.T. Barreiro-Güemes, M.E. Meave del Castillo, M. Signoret-Poillon y M.G. Figueira-Torres (eds.). *Planctología Mexicana*. UdeG, Guadalajara. pp. 43-83.
- MORAGA J., E. Valdebenito y J. Rutllant. 2001. Condiciones oceanográficas durante la fase de relajación de un evento de surgenzia invernal frente a Punta Lengua de Vaca, Coquimbo. *Investigación Marina*, 29(1):59-71.
- MÜLLER-KARGER, F.E. y C. Fuentes-Yaco. 2000. Characteristics of wind generated rings in the eastern tropical Pacific Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 105(1):1271-1284.
- NAVARRO-RODRÍGUEZ, M.C., S. Hernández-Vázquez, R. Funes-Rodríguez y R. Flores-Vargas. 2001. Distribución y abundancia de larvas de peces de las familias Haemulidae, Sciaenidae y Carangidae de la plataforma continental de Jalisco y Colima, México. *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas*, 35(1):1-24.
- OLIVOS-ORTIZ, A., M. Maso-Agustina y J. Camp-Sancho. 2002. Continental runoff of nutrients and their possible influence over stoichiometric ratios (DIN:P:Si) in the northeastern Mediterranean waters of Spain (Catalan Sea). *Ciencias Marinas*, 28(4):393-406.
- OLIVOS-ORTIZ, A., S.I. Quijano-Scheggia, M.A. Galicia-Pérez, J.H. Gaviño-Rodríguez y J. Mora-Galindo. 2003. Influencia de los parámetros fisicoquímicos en la distribución de los principales grupos fitoplanctónicos en las costas del Estado de Colima durante el 2002. *Memoria. IX Congreso de la Asociación de Investigadores del Mar de Cortés*. 5-9 de mayo. La Paz, BCS. México. pp.62-63
- ORTIZ, G. 2000. *Administración del agua*. IMTA-Comisión Nacional del Agua, México. 159p.
- PEÑA, A., M.R. Lewis y G. Harrison. 1990. Primary productivity and size structure of phytoplankton biomass on a transect in the equator at 135 °W in the Pacific Ocean. *Deep Sea Research*, 37:295-315.
- POND, S. y G.L Pickard. 1983. *Introductory dynamical oceanography*. Pergamon, EU. 329p.
- QUIJANO-SCHEGGIA, S.I., M.A. Galicia-Perez, A. Olivos-Ortiz, J.H. Gaviño-Rodríguez y J. Mora-Galindo. 2003. Distribución de los principales grupos fitoplanctónicos marinos en las costas del Estado de Colima y su relación con características fisicoquímicas durante el año 2002. *Memorias. IV Congreso Mexicano de Fisiología*. 7-11 de abril de 2003. Mérida, Yucatán. México. pp. 102-104.
- QUIJANO, S.I. y A. Vidaurri, 1987. Evaluación de parámetros fisicoquímicos y productividad primaria en las bahías y lagunas de Manzanillo. *Reporte interno*. IOM-SEMAR, Manzanillo, Col. 115p.
- RABALAIIS, N.N., R.E. Turner, Q. Dortch, W.R. Wiseman y B.K.S. Gupta. 1996. Nutrient changes in the Mississippi river system responses on the adjacent shelf. *Estuaries*, 19(2):386-407.
- RILEY, J.P. y R. Chester. 1989. *Introducción a la química marina*. AGT, México. 459p.
- RODRÍGUEZ, J., J. Tintore, J.T. Allen, J.M. Blanco, D. Gomis, A. Reul, J. Ruiz, V. Rodríguez, F. Echeverría y F. Jiménez-Gómez. 2001. Mesoscale vertical motion and the size structure of phytoplankton in the ocean. *Nature*, 410:360-3630.
- SHEN, L.S. 2001. Historical changes in nutrient structure and its influences on phytoplankton composition in Jiaozhou Bay. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 52:211-224.
- SOLÓRZANO, L. 1969. Determination of ammonia in natural waters by the phenol hipoclorite method. *Limnology and Oceanography*, 14(5):799-801.
- STATSOFT Inc. 2000. *Statistical for Windows* (Computer program manual). Tulsa, OK. Email info@statsoft.com. Web: <http://www.statsoft.com>.

- STRICKLAND, J.D. y T.R. Parsons. 1972. *A practical handbook of sea water analysis*. Bull.167. Fish. Res. Bd. Canada, Canadá. 310p.
- TRASVIÑA, A., E.D. Barton, J. Brown, H.S. Velez, P.M. Kosro y R.L. Smith. 1995. Offshore wind forcing in the Gulf of Tehuantepec, Mexico: The asymmetric circulation. *Journal of Geophysical Research*, 100(10):649-663.
- TOLMAZIN, D. 1985. *Elements of dynamical oceanography*. Allen & Unwin, EU. 287p.
- VÁZQUEZ-GUTIÉRREZ, F. Salvador-López, G. Ramírez-Álvarez, A. Turner-Garcés, M. Frausto-Castillo y H. Alexander-Valdez. 1998. La química del agua. En: M. Tapia-García (ed.). *El Golfo de Tehuantepec: el ecosistema y sus recursos*. UAM-I, México. pp. 35-50.
- VIDAL, M. y C.A. Duarte. 2000. Nutrient accumulation at different supply rates in experimental Mediterranean planktonic communities. *Marine Ecology Progress Series*, 207:1-11.
- ZAMUDIO, L., A.P. Leonardi, S.D. Meyers y J.J. O'Brien. 2001. ENSO and eddies on the southwest coast of Mexico. *Geophysical Research Letters*, 28(1):13-16.
- ZEPEDA-GUTIÉRREZ, J.A. 1987. Estudio de las distribuciones de sedimentos bentónicos en las bahías de Manzanillo y Santiago, Colima. *Reporte interno*. IOM-SEMAR, Manzanillo. 89p.