

Distribución de pigmentos fotosintéticos del fitoplancton del Golfo de Tehuantepec en verano (junio, 2003): importancia del picofitoplancton*

Distribution of photosynthetic pigments of phytoplankton from the Gulf of Tehuantepec in summer (June, 2003): importance of the picophytoplankton*

David Uriel Hernández-Becerril, Luis Felipe López-Tachiquín, María Luisa Machain-Castillo y María Adela Monreal-Gómez

Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Apdo. postal 70-305, Ciudad Universitaria, Coyoacán, México, D.F. 04510. México

* Trabajo dedicado a la memoria de L.F. López-Tachiquín
e-mail: dhernand@cmarl.unam.mx

Hernández-Becerril D. U., L. F. López-Tachiquín, M. L. Machain-Castillo & M. A. Monreal-Gómez. 2015. Distribución de pigmentos fotosintéticos del fitoplancton del Golfo de Tehuantepec en verano (junio, 2003): importancia del picofitoplancton. *Hidrobiológica* 25 (3): 365-374.

RESUMEN

Existen estudios previos sobre fitoplancton y sus grupos taxonómicos y especies, así como de su biomasa y productividad primaria, principalmente en invierno y primavera, pero se conoce poco la estructura del fitoplancton del Golfo de Tehuantepec en verano. Aquí se dan a conocer la composición y distribución de pigmentos fotosintéticos fitoplanctónicos en condiciones de verano. Se obtuvieron datos hidrográficos en nueve estaciones durante un crucero oceanográfico en junio, 2003, y se analizaron cinco pigmentos, Fucoxantina, Prasincoxantina, Violaxantina, Zeaxantina (indicador de *Synechococcus*, procarionte del picoplancton) y Divinil-clorofila *a* (diagnóstico de *Prochlorococcus*, otro procarionte del picoplancton). La columna de agua se encontró estratificada: la capa superficial, definida por la profundidad del tope de la termoclina, varió entre 20 y 35 m de espesor. Los valores de todos los pigmentos fueron bajos, pero mostraron patrones similares de distribución vertical, con un pico de concentración subsuperficial (entre 30 y 40 m), destacando Divinil-clorofila *a* en la mayoría de las estaciones, excepto en la 3 y 4, donde la Fucoxantina fue el principal pigmento. Estos picos no siempre coincidieron con la profundidad de la termoclina en cada estación, generalmente éstos se encontraron por debajo de ella. Este escenario muestra al picoplancton como una fracción importante en verano (al menos en junio), contrastando notablemente con la condición de invierno-primavera, de intensa mezcla turbulenta y surgencias, donde el microplancton y las diatomeas predominan.

Palabras clave: Fases estacionales, fitoplancton, Golfo de Tehuantepec, picoplancton, pigmentos fotosintéticos.

ABSTRACT

There exist previous studies on phytoplankton, its taxonomic groups and species, its biomass and primary productivity, mainly in winter and spring, but the structure of the phytoplankton from the Gulf of Tehuantepec in summer is poorly known. The composition and distribution of the phytoplankton photosynthetic pigments in summer conditions are provided in this paper. Hydrographic data from nine stations, during an oceanographic cruise in June, 2003, and analysis of five major phytoplanktonic pigments, Fucoxanthin, Prasincoxanthin, Violaxanthin, Zeaxanthin (marker of *Synechococcus*, picoplanktonic prokaryote) and Divinyl-chlorophyll *a* (diagnostic of *Prochlorococcus*, another picoplanktonic prokaryote) are given. Column water was well-stratified: surface layers had a thickness between 20 and 35 m, with well-defined thermoclines at those depths. Values of all pigments were low, but they showed similar vertical distribution patterns, with subsurface maxima peaks (between 30 and 40 m), especially Divinyl-chlorophyll *a* in most stations, except 3 and 4, where Fucoxanthin was the most important pigment. These peaks did not always coincide with the depths of the main thermocline at each station, but usually they were found below the thermocline. This scenery shows the picoplankton as a very important size-fraction group in summer (at least in June), strongly contrasting with the winter-spring conditions, of intense turbulent mix and upwellings, where microplankton and diatoms appear to predominate.

Key words: Gulf of Tehuantepec, phytoplankton, picoplankton, photosynthetic pigments, seasonal phases.

INTRODUCCIÓN

El fitoplancton marino lleva a cabo diversas funciones ecológicas que le confieren una importancia básica en el ecosistema pelágico de todo el mundo. Con el advenimiento de varias nuevas tecnologías, los protocolos de investigación de esta importante comunidad se han sistematizado y la información que se aporta cotidianamente incluye la distribución espacial tridimensional, las distintas contribuciones de las fracciones de talla (pico, nano y microplanton) y de las diferentes entidades taxonómicas (e.g. diatomeas, dinoflagelados, cocolitofóridos y otros) y datos de metagenómica, para conocer más sobre su biodiversidad y ecología.

El análisis de los pigmentos fotosintéticos del fitoplancton constituye actualmente una herramienta muy útil para reconocer grupos taxonómicos, así como sus distribuciones espaciales (geográficas y verticales) y las contribuciones a la biomasa total. El principio de este método es la existencia de pigmentos diagnósticos de ciertos grupos taxonómicos, aunque también hay pigmentos que son compartidos por dos o más grupos taxonómicos (Jeffrey & Vesk, 1997). Los análisis se efectúan rutinaria, rápida y eficientemente por medio de HPLC (Cromatografía Líquida de Alta Precisión, por sus siglas en inglés) (Vidussi *et al.*, 1996; Zapata *et al.*, 2000).

En ciertas épocas y varias porciones del Golfo de Tehuantepec se han estudiado la composición, abundancia y distribución de ciertos grupos taxonómicos del fitoplancton (Hernández-Becerril, 1987, 1988, 1990; Hernández-Becerril *et al.*, 1993, 2013; Meave & Hernández-Becerril, 1998; Aké-Castillo *et al.*, 1999; Hernández-Becerril & Bravo-Sierra, 2001; Maciel-Baltazar & Hernández-Becerril, 2013), incluyendo el hallazgo de nuevos registros y especies (Bravo-Sierra & Hernández-Becerril, 2003; Hernández-Becerril & Bravo-Sierra, 2004a, 2004b; Hernández-Becerril & Díaz-Almeyda, 2006; Gárate-Lizárraga, 2008; Hernández-Becerril & Barón-Campis, 2008), así como la revisión del fitoplancton tóxico y nocivo de la zona (Hernández-Becerril *et al.*, 2007), y también se han medido la biomasa (básicamente como clorofila *a*) y producción primaria fitoplanctónica (Robles-Jarero & Lara-Lara, 1993; Lara-Lara & Bazán-Guzmán, 2005).

Se conoce que durante la época de vientos "Tehuano" (invierno y principio de primavera) y la consecuente mezcla turbulenta producida por éstos (Färber-Lorda *et al.*, 2004; Liang *et al.*, 2009), el fitoplancton del Golfo de Tehuantepec actúa como una "bomba de Carbono" (Robles-Jarero & Lara-Lara, 1993; Färber-Lorda *et al.*, 2004), y que las comunidades fitoplanctónicas que aparecen durante tales escenarios son dominadas en diversidad y biomasa principalmente por especies de diatomeas, quienes responden eficientemente a una alta turbulencia, mientras que en condiciones de relativa estabilidad, los dinoflagelados aparecen como el grupo más diverso y quizás más abundante (Meave & Hernández-Becerril, 1998). Aparentemente también varían las contribuciones de las diferentes fracciones de talla del fitoplancton a la biomasa total y productividad primaria, en distintas épocas climáticas (Lara-Lara & Bazán-Guzmán, 2005).

Sin embargo se sabe menos de las comunidades fitoplanctónicas de verano, cuando la concentración superficial de clorofila *a* es más baja, por ejemplo en junio (Lluch-Cota *et al.*, 1997), y se suponen condiciones más tropicales, con mayor estratificación y decremento de concentraciones de nutrientes. En este trabajo se dan a conocer la composición y distribución de cinco pigmentos fotosintéticos del fitoplancton del Golfo de Tehuantepec en condiciones de verano, y una interpreta-

ción y discusión de las diferentes fases estacionales o temporales de esta interesante área de estudio desde la perspectiva del fitoplancton.

MATERIAL Y MÉTODOS

Área de estudio. El Golfo de Tehuantepec se caracteriza principalmente por la presencia de dos épocas bien definidas: (1) durante invierno y principios de primavera se presentan vientos intensos del Norte, con velocidades de hasta 25 m s^{-1} , siendo éste el mecanismo de generación de surgencia, y (2) durante el verano, con vientos del Este, generalmente de menor intensidad y donde se presenta estratificación térmica y lluviosa (Roden, 1961; Liang *et al.*, 2009). Esta área muestra fluctuaciones estacionales e interanuales (Wyrki, 1974) que determinan la incidencia de la Corriente Costera del Norte (invierno y primavera), la corriente de Costa Rica (verano y otoño) (Monreal & Salas, 1998), la corriente Norecuatorial y la corriente Surecuatorial (Molina-Cruz & Martínez-López, 1994). Sin embargo, se ha observado una clara influencia de procesos costeros en la época de fuertes vientos durante la cual se presentan fenómenos de surgencias edáficas y mezcla turbulenta, debido al transporte de Ekman se genera una pendiente en la termoclina con mayor profundidad en la parte Oeste, mientras que en el lado Este, ésta se encuentra más somera (Lavín *et al.* 1992). En la época de surgencias, la termoclina se eleva hasta 10 m generando una franja de baja temperatura que llega a presentar 200 km de anchura y 500 km de longitud con temperaturas superficiales de $6-10^\circ \text{ C}$ por debajo de la temperatura promedio que es de $24-26^\circ \text{ C}$ (Roden 1961; McCreary *et al.* 1989; Monreal-Gómez & Salas-de-León 1998). La concentración de nutrientes (nitratos) aumenta en la zona fertilizada por la mezcla turbulenta y se extiende por el borde de la plataforma continental hasta su cruce con el Cañón del Río Suchiate (Machain-Castillo *et al.*, 2008).

Por otro lado, durante el verano se forma una alberca de agua caliente con una temperatura media superficial superior a los 28° C , que se considera una consecuencia de los patrones de circulación, ya que las corrientes en el Pacífico mexicano son muy lentas, por lo que las masas de agua son expuestas durante largo tiempo a la insolación, resultando en elevadas temperaturas superficiales (Trasviña *et al.*, 1999). Bajo estas condiciones, la concentración de nutrientes es consistente con el patrón de circulación mostrando un flujo hacia el Oeste y la ausencia de fertilización por efecto del viento, aunque en verano, la presencia de un giro ciclónico en el Este del golfo contribuye a la fertilización (Machain-Castillo *et al.*, 2008).

Obtención de datos y muestras. Se obtuvieron datos ambientales, básicamente datos provenientes de CTD: temperatura, salinidad y oxígeno disuelto, y muestras de botella Niskin (10 L) para pigmentos fotosintéticos en 9 estaciones, distribuidas tres en cada zona: Oeste (profunda), Centro y Este (más somera) (Tabla 1, Fig. 1), durante el crucero oceanográfico "Tehua 2003", efectuado a bordo del B/O "El Puma", en junio, 2003. Las estaciones de la zona Este tuvieron profundidades menores a 100 m (Tabla 1).

Se tomaron muestras para el análisis de pigmentos a 5 niveles en profundidad (superficie, 20, 30, 40 y 70 ó 100 m, según la profundidad de cada estación) para cada estación, y se filtraron 2 L de agua por cada muestra, a través de filtros GF/F Whatman de microfibras de vidrio de 25 mm de diámetro, con ayuda de una bomba de vacío. Las mues-

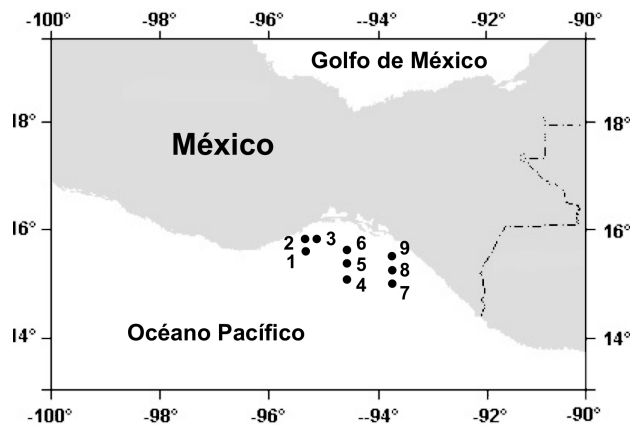


Figura 1. Mapa del Golfo de Tehuantepec, mostrando la localización de las estaciones de muestreo (1-9), en las zonas Oeste (1-3), Centro (4-6) y Este (7-9).

tras se congelaron (de -10 a -15° C) en un tanque de Nitrógeno líquido y se transportaron al laboratorio para su análisis.

Análisis de muestras (HPLC). Para la extracción de pigmentos se siguió el método de Vidussi *et al.* (1996), que es sensible a la detección de Divinil-clorofila *a*. A cada filtro se agregaron 3 mL de metanol y se sonicaron (utilizando un Sonicador Sonifier 250) 6 ciclos de 30:30 s, por muestra; 24 h después se obtuvo el extracto, centrifugando durante 5 min a 1500 rpm. De cada extracto se inyectaron 400 µL al sistema HPLC (Autosampler: Waters 717 plus, Controller: Waters 600, Degassit: 6324 y Photodiode Array Detector: Waters 996), en el cual se utilizó una precolumna y columna C8 (Shandon), de 3 µm de tama-

Tabla 1. Profundidad de las estaciones en el Golfo de Tehuantepec, de la capa de mezcla (posición de las termoclinas principales) en cada estación y de los picos de máxima concentración de pigmentos fotosintéticos, todas en metros (m). Dv Cl *a*, Fuc y Zea, corresponden a Divinil-clorofila *a*, Fucoxantina y Zeaxantina, respectivamente.

Estación	Profundidad total (m)	Profundidad de la capa de mezcla (m)	Profundidad de los picos de pigmentos (m)
1	709	22	30 (Dv Cl <i>a</i>)
2	212	33	20 (Zea), 35 (Dv Cl <i>a</i>)
3	272	23	40 (Fuc)
4	282	21	30 (Fuc)
5	219	24	30 (Dv Cl <i>a</i>)
6	212	32	40 (Dv Cl <i>a</i>)
7	71	31	40 (Dv Cl <i>a</i>)
8	42	28	30 (Dv Cl <i>a</i>)
9	6	28	40 (Dv Cl <i>a</i>)

ño de partícula Hypersil® MOS de 10 cm, 4.6 mm (diámetro interno) (Vidussi *et al.*, 1996). La elusión se hizo fluir a razón de 1 mL min⁻¹ usando un gradiente binario lineal entre el solvente A (Metanol al 0.5N y Acetato de Amonio en solución acuosa, en una proporción de 70:30%) y el solvente B (Metanol 100%), los cuales se programaron mediante un procedimiento de adhesión (minutos; % solvente A, % solvente B): (0; 75, 25), (1; 50, 50), (15; 0, 100), (18.5; 0, 100), (19; 75, 25). La identificación de pigmentos se realizó por la comparación de los tiempos de retención, en los cuales se presentaba un pico determinado de pigmentos estándares, que sirven como calibradores, con los tiempos y picos obtenidos en las muestras. Los estándares provinieron de DHI Lab Products (Hoersholm, Dinamarca). Se hicieron los cálculos de las concentraciones, considerando las áreas de los picos y los volúmenes filtrado e inyectado. Los pigmentos considerados en este trabajo fueron Fucoxantina (que se considera representativo de las diatomeas), Prasincoxantina (pigmento mayoritario de las Prasinophyceae o algas verdes primitivas), Violaxantina (pigmento presente en algas verdes y Eustigmatophyceae), Zeaxantina (considerado un pigmento indicador de las Cianobacterias, particularmente de *Synechococcus*, organismo picoplanctonte) y Divinil-clorofila *a* (pigmento diagnóstico de *Prochlorococcus*, un género de muy amplia distribución y altas densidades celulares, perteneciente al picoplancton) (Jeffrey & Veski, 1997).

RESULTADOS

Condiciones hidrográficas. La temperatura superficial presentó valores cercanos a 30° C en todas las estaciones. Los perfiles verticales indicaron condiciones de alta estratificación de la columna de agua en todas las estaciones, con capas de mezcla bien definidas y termoclinas entre 20 y 35 m de profundidad (Tabla 1, Figs. 2-4). En tanto la salinidad varió entre 33.7 y 34.86, generalmente incrementándose con la profundidad (Figs. 2-4), aunque en las estaciones 2, 3 y 5 hubo un súbito incremento (la mayor diferencia fue de 34.2 hasta 34.7 en la estación 2) en la capa subsuperficial (entre 10 y 30 m).

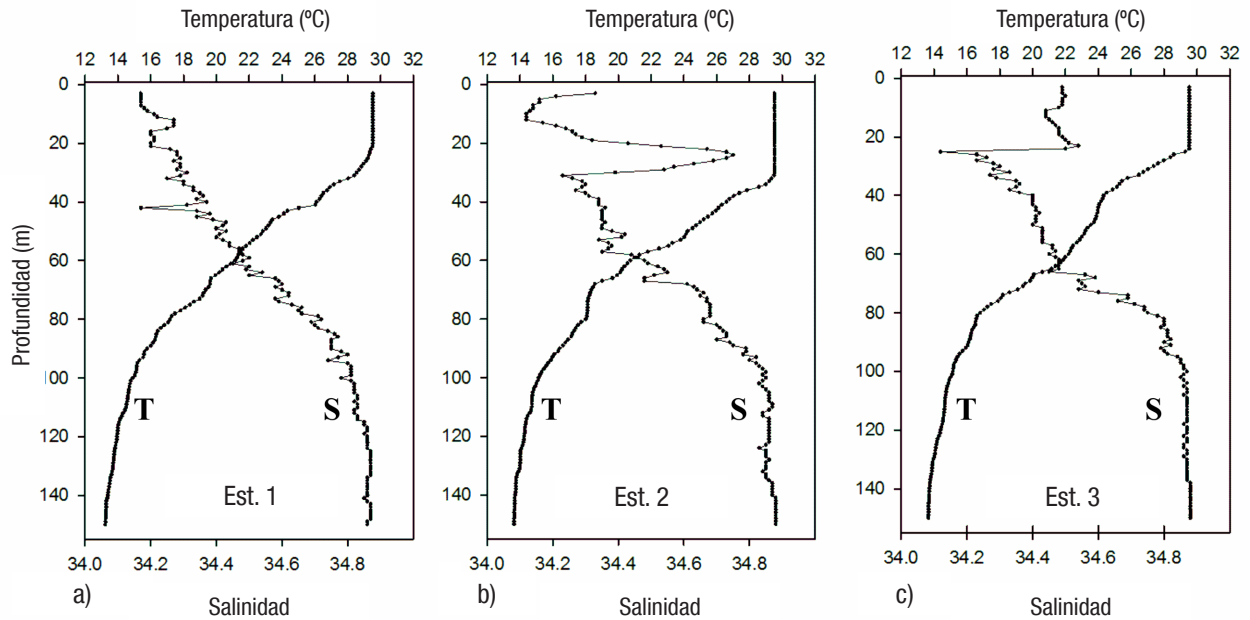
Pigmentos fotosintéticos. Los valores de los pigmentos fotosintéticos en las estaciones del Golfo de Tehuantepec variaron considerablemente (hasta en cuatro órdenes de magnitud): Fucoxantina de 0.001 a 3.9 µg L⁻¹ (1-3 900 ng L⁻¹), Prasincoxantina de 0.002 a 0.9 µg L⁻¹ (2-900 ng L⁻¹), Violaxantina de 0.003 a 0.2 µg L⁻¹ (3-200 ng L⁻¹), Zeaxantina de 0.009 a 0.374 µg L⁻¹ (9-374 ng L⁻¹) y Divinil-clorofila *a* de 0.01 a 1.6 µg L⁻¹ (1-1 600 ng L⁻¹) (Tabla 2, Figs. 5-7). Todos los pigmentos estuvieron presentes en todas las muestras analizadas, aunque en algunos casos las concentraciones fueron muy bajas (Tabla 2, Figs. 5-7).

La mayoría de las estaciones mostraron predominancia de Divinil-clorofila *a*, incluyendo estaciones poco profundas (7-9, Fig. 7) y más alejadas de la costa (1 y 7, Figs. 5, 7), donde sobresalen los picos subsuperficiales (entre 30 y 40 m) de dicho pigmento (Figs. 5-7); en la estación 8, a 30 m, se localizó la concentración más elevada de este pigmento (2.004 µg L⁻¹) (Tabla 2). Las más altas concentraciones (con valores máximos mayores de 1.0 µg L⁻¹) se detectaron en la zona Este (estaciones 7-9, mayores de 100 m de profundidad) y la estación 6, del Centro (Tabla 2, Figs. 6-7).

En solo dos estaciones, 3 y 4 (Tabla 2, Figs. 5-6), la Fucoxantina fue el pigmento más representativo, notable principalmente en las picos máximos subsuperficiales (30 y 40 m), con una concentración máxima de 3.916 µg L⁻¹ (estación 4, a 30 m) (Tabla 2, Fig. 6), indicando altas

Tabla 2. Concentraciones de los pigmentos fotosintéticos a diferentes profundidades en las estaciones del Golfo de Tehuantepec. Todas las concentraciones están en $\mu\text{g L}^{-1}$.

Estación	Profundidad (m)	Pigmentos				
		Fucoxantina ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Prasincoxantina ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Violaxantina ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Zeaxantina ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Divinil-clorofila <i>a</i> ($\mu\text{g L}^{-1}$)
1	1	0.00013	0.00006	0.00040	0.00153	0.00025
	20	0.00027	0.00022	0.00084	0.00141	0.00029
	30	0.00124	0.00163	0.00287	0.00302	0.00358
	40	0.00084	0.00181	0.00181	0.00031	0.00033
	50	0.00031	0.00077	0.00052	0.00010	0.00012
	100	0.00009	0.00002	0.00005	0.00009	0.00014
2	1	0.00021	0.00034	0.00039	0.00094	0.00033
	20	0.00012	0.00026	0.00016	0.00263	0.00157
	35	0.00026	0.00024	0.00101	0.00076	0.00288
	50	0.00043	0.00122	0.00100	0.00017	0.00281
	60	0.00027	0.00024	0.00027	0.00015	0.00082
	100	0.00019	0.00033	0.00029	0.00015	0.00043
3	1	0.00023	0.00022	0.00012	0.00291	0.00015
	20	0.00009	0.00017	0.00010	0.00139	0.00010
	30	0.01078	0.00253	0.00098	0.00131	0.00063
	40	0.01903	0.00201	0.00008	0.00010	0.00012
	100	0.00009	0.00002	0.00004	0.00016	0.00012
4	1	0.00007	0.00018	0.00013	0.00247	0.00070
	20	0.00266	0.00064	0.00027	0.00153	0.00418
	30	0.03916	0.00982	0.00071	0.00080	0.01287
	40	0.00824	0.00148	0.00029	0.00017	0.00225
	100	0.00017	0.00001	0.00004	0.00004	0.00021
5	1	0.00018	0.00009	0.00008	0.00224	0.00053
	20	0.00016	0.00016	0.00023	0.00114	0.00017
	30	0.00631	0.00099	0.00048	0.00237	0.00882
	40	0.00226	0.00155	0.00219	0.00045	0.00716
	100	0.00001	0.00003	0.00019	0.00032	0.00184
6	1	0.00001	0.00007	0.00007	0.00167	0.00013
	20	0.00001	0.00017	0.00003	0.00166	0.00107
	30	0.00016	0.00097	0.00013	0.00148	0.00511
	40	0.00075	0.00390	0.00037	0.00210	0.01345
	100	0.00003	0.00004	0.00009	0.00014	0.00027
7	1	0.00002	0.00014	0.00010	0.00120	0.00075
	20	0.00001	0.00014	0.00019	0.00078	0.00125
	30	0.00036	0.00120	0.00059	0.00252	0.00467
	40	0.00249	0.00318	0.00030	0.00050	0.01285
	70	0.00011	0.00017	0.00008	0.00019	0.00045
8	1	0.00011	0.00022	0.00011	0.00318	0.00252
	10	0.00013	0.00032	0.00016	0.00222	0.00165
	20	0.00032	0.00048	0.00016	0.00176	0.00557
	30	0.00661	0.00319	0.00020	0.00121	0.02004
	40	0.01364	0.00041	0.00033	0.00035	0.00580
9	1	0.00007	0.00024	0.00026	0.00339	0.00056
	20	0.00007	0.00041	0.00021	0.00285	0.00256
	30	0.00094	0.00316	0.00038	0.00374	0.01025
	40	0.00537	0.00288	0.00064	0.00099	0.01688
	70	0.00025	0.00017	0.00012	0.00020	0.00040

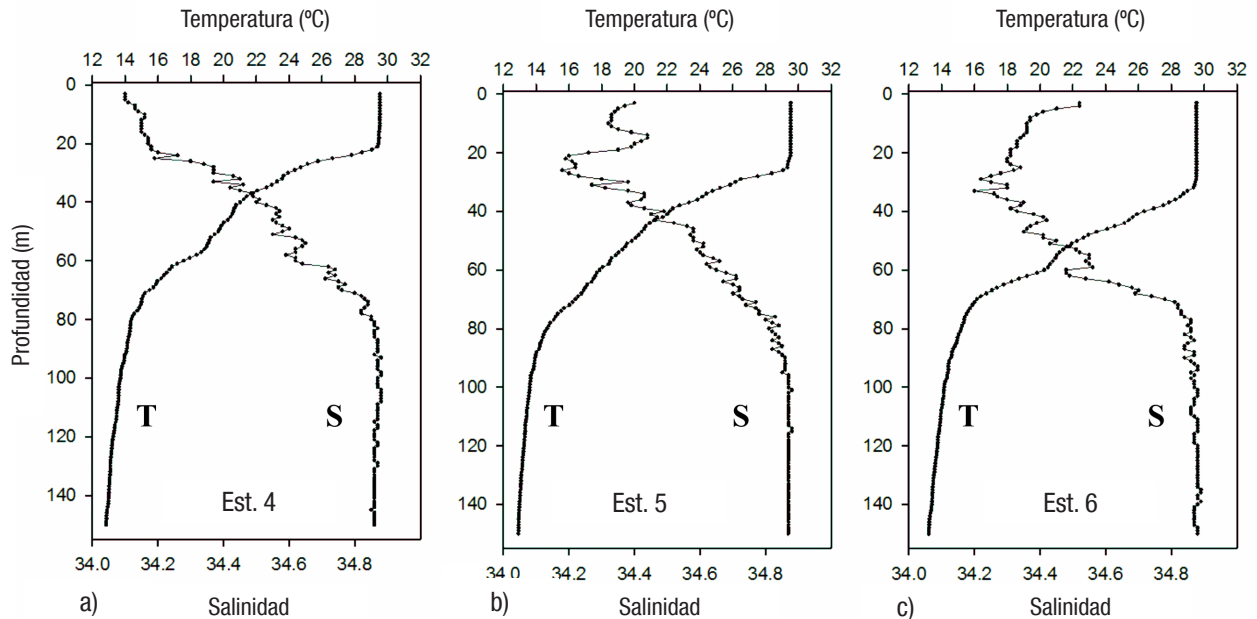


Figuras 2a-c. Perfiles verticales de temperatura y salinidad en las estaciones de la zona Oeste (1-3) del Golfo de Tehuantepec.

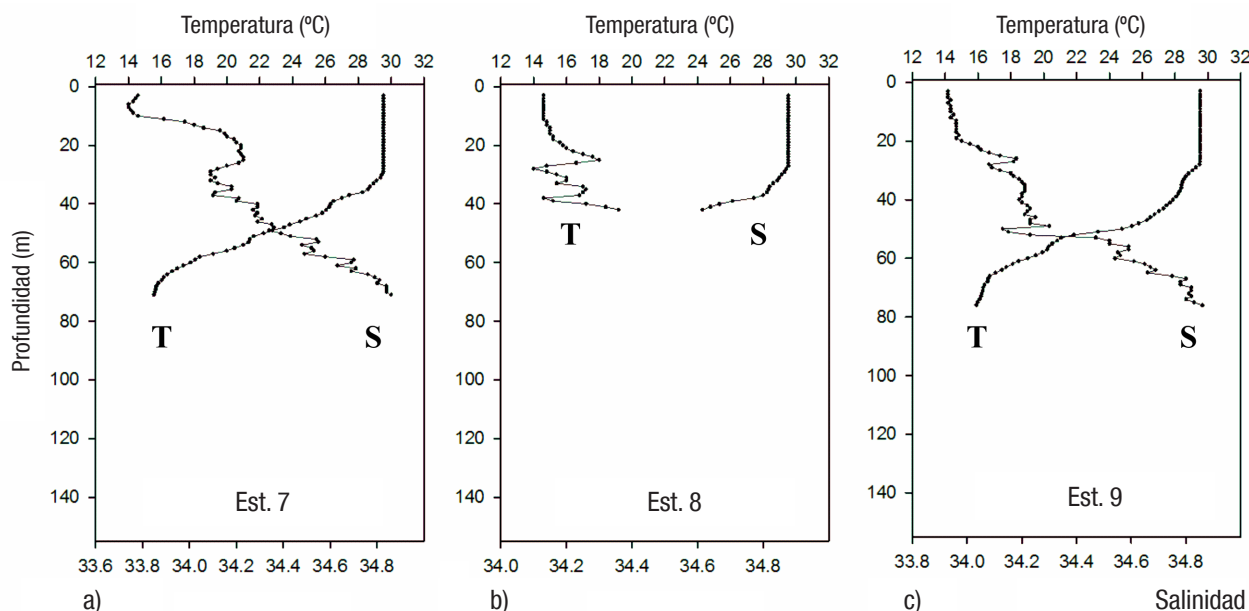
densidades de diatomeas. Las concentraciones de Zeaxantina fueron bajas en general, con un máximo de $0.374 \mu\text{g L}^{-1}$ en la estación 9, a 30 m (Tabla 2, Fig. 7).

La distribución vertical de todos los pigmentos tuvo un patrón general de picos de máximas concentraciones en subsuperficie (entre 30 y 40 m) (Tabla 2, Figs. 5-7); en la estación 2, la Zeaxantina tuvo un pico máximo más superficial (20 m) y la Prasincoxantina a 50 m (Tabla 2, Fig.

5), mientras que los otros pigmentos lo tuvieron entre 30 y 40 m (Figs. 5-7). A excepción de la estación 8, los patrones de distribución vertical de Fucoxantina y Divinil-clorofila a, fueron muy similares (Figs. 5-7). El pigmento Zeaxantina tuvo mayores concentraciones en superficie y subsuperficie en casi todas las estaciones (1-3, 5, 6-9) (Figs. 5-7), y disminuyó con la profundidad en las estaciones 3, 4 y 8 (Figs. 5, 7). No se notaron picos más profundos de Divinil-clorofila a, como en otras zonas oceánicas del Pacífico mexicano.



Figuras 3a-c. Perfiles verticales de temperatura y salinidad en las estaciones de la zona Centro (4-6) del Golfo de Tehuantepec.



Figuras 4a-c. Perfiles verticales de temperatura y salinidad en las estaciones de la zona Este (7-9) del Golfo de Tehuantepec.

DISCUSIÓN

Hidrografía y pigmentos fotosintéticos del fitoplancton. En las nueve estaciones de las tres zonas consideradas en este estudio (Oeste, Centro y Este) se observó una estratificación típica de verano, con relativa alta estabilidad de la columna de agua, y una capa superficial de espesor entre 20 y 40 m, que contiene agua cálida con temperatura cercana a 30° C y termoclinas principales bien identificados con su parte superior a esas profundidades (Tabla 1, Figs. 2-4). Los picos de pigmentos se localizaron debajo de la profundidad de cada termoclina, aunque hubo un pico de Zeaxantina a 20 m en la estación, 2, donde la termoclina está alrededor de los 33 m (Tabla 2, Figs. 2, 5), y el pico de Divinil-clorofila *a* coincidió con la profundidad de la termoclina en la estación 2 (Tabla 1); algunos picos de pigmentos (Divinil-clorofila *a* y Prasincoxantina) casi coincidieron con la profundidad de la termoclina en las estación 8 (Tablas 1 y 2, Figs. 4, 7).

Además del aumento de salinidad con la profundidad, el otro rasgo sobresaliente es el incremento súbito en la capa subsuperficial en las estaciones 2, 3 y 5, que puede explicarse como una intrusión de agua subsuperficial más salina, y no pareció afectar la estratificación térmica, pero se puede asociar con un pico de Zeaxantina ($0.263 \mu\text{g L}^{-1}$) en la estación 2, a 20 m (Tabla 2, Figs. 2, 5).

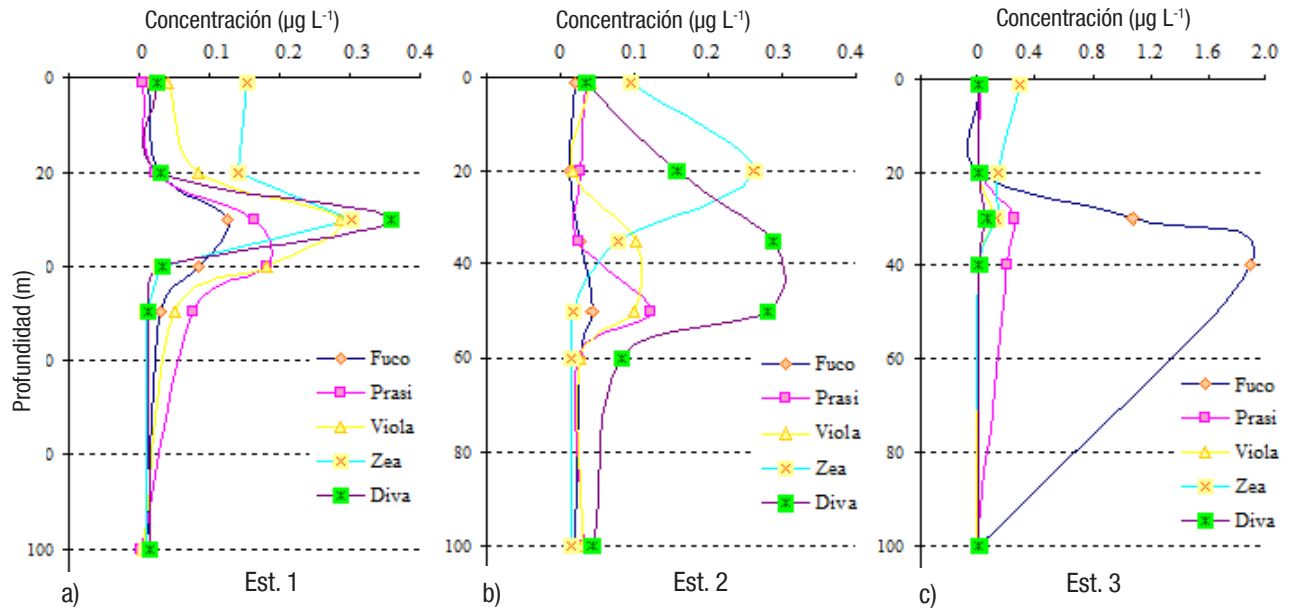
Los valores encontrados de pigmentos fotosintéticos son comparables con los encontrados por Almazán-Becerril *et al.* (2010), para las costas occidentales de Baja California, donde aparecieron valores máximos de Fucoxantina de $0.95 \mu\text{g L}^{-1}$ y de Zeaxantina de $0.29 \mu\text{g L}^{-1}$, aunque en este trabajo la Fucoxantina llegó a ser cuatro veces más alta en su concentración máxima ($3.9 \mu\text{g L}^{-1}$), una orden de magnitud más mayor que los detectados en Baja California; las concentraciones de Zeaxantina fueron muy similares a las de ese trabajo (un valor máximo de $0.374 \mu\text{g L}^{-1}$ en este estudio). Estos niveles también han sido encontrados en otras regiones del mundo, como ciertas áreas del Océano Atlántico (Barlow *et al.*, 2002).

Dadas las elevadas concentraciones del pigmento Divinil-clorofila *a* (mayores a $1.0 \mu\text{g L}^{-1}$ en la zona Este del Golfo de Tehuantepec y otras estaciones, y un máximo de $1.6 \mu\text{g L}^{-1}$), fue evidente la predominancia de *Prochlorococcus*, el organismo fotosintético más pequeño (picoplantonte) y abundante del planeta, y de amplia distribución mundial (Partensky *et al.*, 1999; Casey *et al.*, 2007), pero mejor representado en ambientes oceánicos, oligotróficos y tropicales o subtropicales (Campbell *et al.*, 1997; Goericke *et al.*, 2000; Veldhuis *et al.*, 2005; Choi *et al.*, 2011). La Fucoxantina, pigmento representativo de las diatomeas, fue considerable en dos estaciones (3 y 4), donde se mostraron picos máximos entre 30 y 40 m (Tabla 2, Figs. 5-6).

Es posible considerar que, aunque no se muestran datos de clorofila *a*, la distribución vertical de los pigmentos siga un patrón similar al de la clorofila *a*, que en otros trabajos ha mostrado picos máximos de concentración entre 10 y 18 m, para época de invierno (Robles-Jarero & Lara-Lara, 1993; Lara-Lara & Bazán-Guzmán, 2005). Estos valores máximos de clorofila *a* coincidieron con los picos de producción primaria medida (Robles-Jarero & Lara-Lara, 1993; Lara-Lara y Bazán-Guzmán, 2005).

La distribución vertical de los pigmentos mostró una estructura de capas ("layered structure", Barlow *et al.*, 2002) en las estaciones 7 a 9, de la zona Este (Fig. 7), donde se localizarían distintas poblaciones de fitoplancton, sobre todo de formas picoplantónicas, *Prochlorococcus* y *Synechococcus*, pero fue más notable esta condición en la estación 2 (Tablas 1 y 2, Fig. 5), con alternancia de picos de Zeaxantina (20 m) y Divinil-clorofila *a* (35 m). La distribución vertical de los pigmentos marcadores de *Prochlorococcus* y *Synechococcus* encontrada en este trabajo es similar a la mostrada en aguas oligotróficas tropicales por Veldhuis *et al.* (2005, Figs. 1, 5).

Condiciones ambientales y comunidades fitoplanctónicas. Se puede esperar que varíen las contribuciones de las diferentes fracciones de talla del fitoplancton a la biomasa total y productividad primaria, en

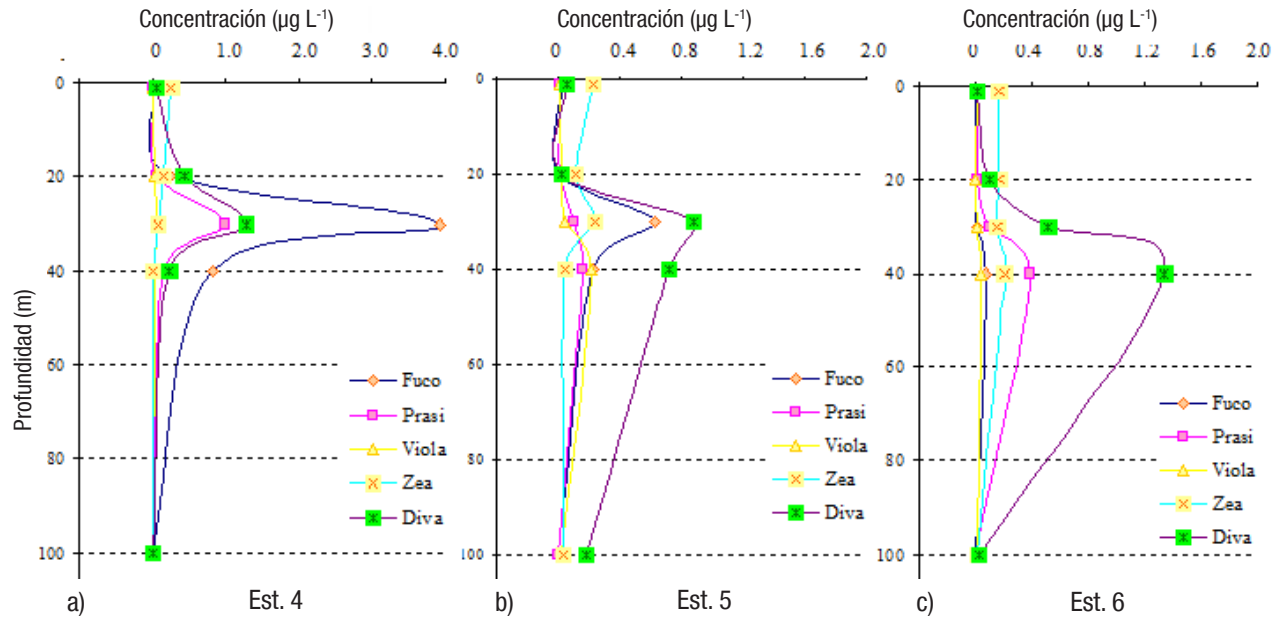


Figuras 5a-c. Perfiles verticales de los pigmentos fotosintéticos del fitoplancton en las estaciones de la zona Oeste (1-3) del Golfo de Tehuantepec.

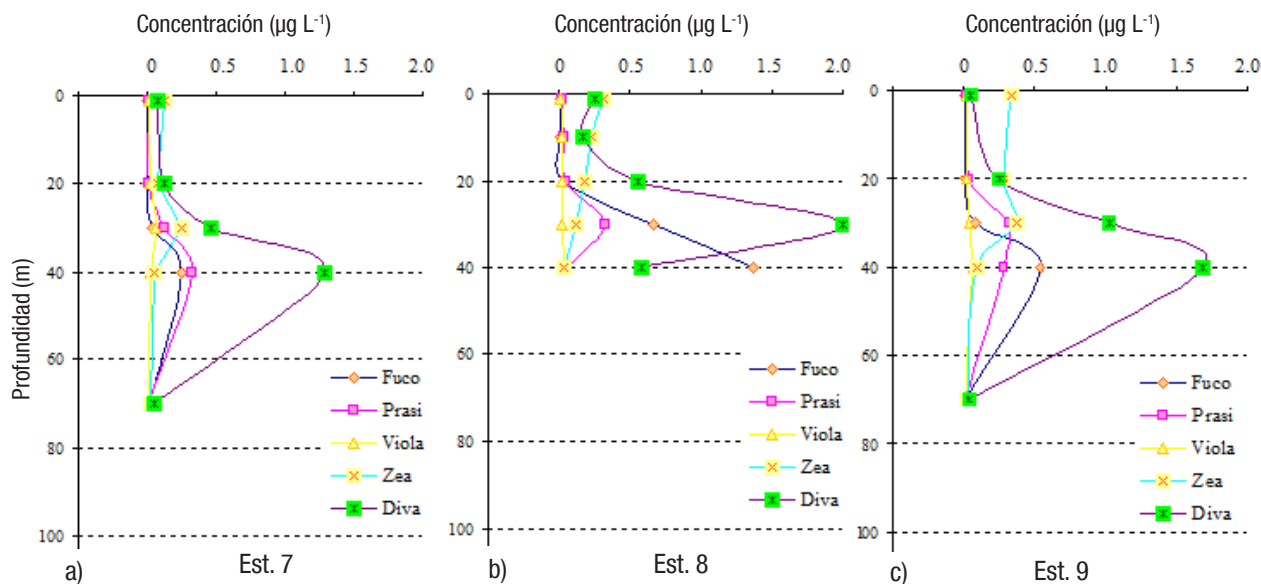
distintas épocas climáticas (Lara-Lara y Bazán-Guzmán, 2005), por lo que se puede plantear la posibilidad de encontrar distintas estaciones climáticas o fases temporales del Golfo de Tehuantepec, sobre la base de condiciones oceanográficas e hidrográficas (e.g. Machain-Castillo *et al.*, 2008) y los pigmentos fotosintéticos (que indican la predominancia de diferentes grupos fitoplanctónicos). Algunas de estas fases podrían corresponder solo a pulsos temporales de poca duración (días o sema-

nas), moduladas sobre todo por la intensidad de vientos y profundidad de la termoclina (o capa de mezcla), o de más largo plazo por la influencia de tormentas tropicales (Luch-Cota *et al.*, 1997).

Una fase climática es en invierno y principio de primavera, con valores de nutrientes (nitratos) relativamente altos (mayores de 5 µM) (Machain-Castillo *et al.*, 2008), y donde ya son conocidas las elevadas densidades de diatomeas, usualmente productoras de cadenas o co-



Figuras 6a-c. Perfiles verticales de los pigmentos fotosintéticos del fitoplancton en las estaciones de la zona Centro (4-6) del Golfo de Tehuantepec.



Figuras 7a-c. Perfiles verticales de los pigmentos fotosintéticos del fitoplancton en las estaciones de la zona Este (7-9) del Golfo de Tehuantepec.

lonias, o con formas solitarias de tallas mayores a 20 µm, que forman parte del microplancton y que predominan en condiciones de mezcla turbulenta y surgencias, que son aparentes en invierno y principio de primavera (Meave & Hernández-Becerril 1998), precisamente cuando soplan los vientos del norte sobre la parte central del Golfo de Tehuantepec.

Sin embargo también existe información que difiere un poco, ya que en invierno (febrero) Lara-Lara y Bazán-Guzmán (2005) destacaron la contribución del nanoplancton a la biomasa (como clorofila *a*) y a la productividad primaria, con entre 60 y 100%, y 70 y 100%, respectivamente, y la del picoplancton con un 50% del total de la clorofila *a*, con una participación importante del microplancton en la porción oriental del Golfo de Tehuantepec, y en primavera (abril, 2000) Bravo-Sierra y Hernández-Becerril (2003) encontraron poblaciones densas de especies nanoplanctónicas (diatomeas pequeñas, cocolitofóridos y Parmales) en varios puntos del Golfo de Tehuantepec.

Otra fase climática es el verano (junio), cuando la concentración de clorofila *a* superficial es más baja (Lluch-Belda *et al.*, 1997), los valores de nitratos son relativamente bajos (menores a 1 µM) (Machain-Castillo *et al.*, 2008) y hay ausencia de surgencias. Además en este trabajo mostramos valores altos de temperatura superficial y la columna de agua bien estratificada (Figs. 2-4). En este escenario, la fracción del picoplancton, representada por los pigmentos diagnósticos Divinil-clorofila *a* para *Prochlorococcus* y Zeaxantina para *Synechococcus*, parece predominante (a excepción de un par de estaciones, 3 que es costera y 4, un poco más oceánica), tanto en superficie (Zeaxantina), como en los picos máximos de subsuperficie (Divinil-clorofila *a*) (Figs. 5-7). El picoplancton aparece también como un grupo funcional distinto, sobre todo por su talla y capacidad de adaptación a condiciones bajas de luz (Anabalón *et al.*, 2014).

Han sido encontradas diferentes estructuras de fitoplancton en varias regiones del mundo, donde los eventos de surgencia fuertes

son sucedidos por surgencias más débiles o franca relajación, lo que se refleja en la composición, abundancia, fracciones de talla y grupos funcionales (autótrofos y heterótrofos) del fitoplancton (Anabalón *et al.*, 2014).

Se espera que para estudios futuros, se pueda agregar a la información de pigmentos fotosintéticos, aquella derivada de la estructura de la comunidad (composición y abundancia), sobre todo con el empleo de citometría de flujo para análisis de picoplancton y fluorescencia natural *in situ*, además de complementar con estudios de biología molecular. La descripción de las comunidades debería conducir a estudios detallados de los mecanismos de producción y su exportación a los niveles tróficos secundarios.

AGRADECIMIENTOS

Parte de este estudio se llevó a cabo en un equipo HPLC del Instituto de Fisiología, UNAM. L.F. L.-T. tuvo una beca de CONACYT para llevar a cabo sus estudios de maestría. El tiempo de barco del crucero oceanográfico (Tehua 2003), a bordo del B/O "El Puma" fue financiado por la Universidad Nacional Autónoma de México. Los autores agradecen a X.A. Nava-Fernández la elaboración de las figuras 2-4.

REFERENCIAS

- Aké-Castillo, J. A., D. U. Hernández-Becerril & M.E. Meave del Castillo. 1999. Species of the genus *Thalassiosira* (Bacillariophyceae) from the Gulf of Tehuantepec. *Botanica Marina* 42: 487-503.
- Almazán-Becerril, A., E. García-Mendoza & D. Rivas. 2010. Distribución de pigmentos fotosintéticos y grupos de fitoplancton durante octubre de 2003. In: G. Gaxiola-Castro y R. Durazo (Comp.). *Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California 1997-2007*. SEMARNAT, INE, CICESE y UABC. pp. 263-276.

- Anabalón, V., J. Aristegui, C. E. Morales, I. Andrade, M. Benavides, M. A. Correa-Ramírez, M. Espino, O. Ettahiri, S. Hormazabal, A. Makaoui, M. F. Montero & A. Orbi. 2014. The structure of planktonic communities under variable coastal upwelling conditions off Cape Ghir (31° N) in the Canary Current System (NW Africa). *Progress in Oceanography* 120: 320-339.
- Barlow, R.G., J. Aiken, P.M. Holligan, D.G. Cummings, S. Maritorena y S. Hooker. 2002. Phytoplankton pigment and absorption characteristics along meridional transects in the Atlantic Ocean. *Deep-Sea Research I* 47: 637-660.
- Bravo-Sierra, E. & D. U. Hernández-Becerril. 2003. Parmales (Chrysophyceae) from the Gulf of Tehuantepec, Mexico, including the description of a new species, *Tetraparma insecta* sp. nov., and a proposal to the taxonomy of the group. *Journal of Phycology* 39: 577-583.
- Campbell, L., H. Liu, H. A. Nolla & D. Vaulot. 1997. Annual variability of phytoplankton and bacteria in the subtropical North Pacific Ocean at Station ALOHA during the 1991-1994 ENSO event. *Deep-Sea Research I* 44: 167-192.
- Casey, J., M. Lomas, J. Mandecki & D. Walker. 2007. *Prochlorococcus* contributes to new production in the Sargasso Sea deep chlorophyll maximum. *Geophysical Research Letters* 34: L10604.
- Choi, D. H., J. H. Noh, M.S. Hahm & C. M. Lee. 2011. Picocyanobacterial abundances and diversity in surface water of the Northwestern Pacific Ocean. *Ocean Science Journal* 46: 265-271.
- DuRand, M. D., R. J. Olson & S. W. Chisholm. 2001. Phytoplankton population dynamics at the Bermuda Atlantic time-series station in the Sargasso Sea. *Deep-Sea Research II* 48:1983-2003.
- Färber-Lorda, J., M. F. Lavín & M. A. Guerrero-Ruiz. 2004. Effects of wind forcing on the trophic conditions, zooplankton biomass and krill biochemical composition in the Gulf of Tehuantepec. *Deep-Sea Research II* 51: 601-614.
- Gárate-Lizárraga, I. 2008. Nuevos registros de dinoflagelados planctónicos para el Golfo de Tehuantepec, México. *CICIMAR Océánides* 23: 55-65.
- Goericke, R., R. J. Olson & A. Shalapyonok. 2000. A novel niche for *Prochlorococcus* sp. in low-light suboxic environments in the Arabian Sea and the Eastern Tropical North Pacific. *Deep-Sea Research I* 47: 1183-1205.
- Hernández-Becerril, D. U. 1987. Especies de fitoplancton tropical del Pacífico Mexicano. I. Diatomeas y silicoflagelados. *Revista Latinoamericana de Microbiología* 29: 415-426.
- Hernández-Becerril, D. U. 1988. Especies de fitoplancton tropical del Pacífico Mexicano. II. Dinoflagelados y cianobacterias. *Revista Latinoamericana de Microbiología* 30: 187-196.
- Hernández-Becerril, D. U. 1990. Observations on the morphology and distribution of the planktonic diatom *Neodelphineis pelagica*. *British Phycological Journal* 25: 315-319.
- Hernández-Becerril, D. U. & S. A. Barón-Campis. 2008. A new species of the diatom genus *Fryxelliella* (Bacillariophyta), *Fryxelliella pacifica* sp. nov., from the tropical Mexican Pacific. *Phycological Research* 56: 149-155.
- Hernández-Becerril, D. U. & E. Bravo-Sierra. 2001. Planktonic silicoflagellates (Dictyochophyceae) from the Mexican Pacific. *Botanica Marina* 44: 417-423.
- Hernández-Becerril, D. U. & E. Bravo-Sierra. 2004a. Observations on a rare planktonic dinoflagellate, *Dinofurcula* cf. *ultima* (Dinophyceae), from the Mexican Pacific. *Phycologia* 43: 341-345.
- Hernández-Becerril, D. U. & E. Bravo-Sierra. 2004b. New records on planktonic dinoflagellates (Dinophyceae) from the Mexican Pacific Ocean. *Botanica Marina* 47: 417-423.
- Hernández-Becerril, D. U. & E. M. Díaz-Almeyda. 2006. The *Nitzschia bicapitata* group, new records of the genus *Nitzschia*, and further studies on species of *Pseudo-nitzschia* (Bacillariophyta) from Mexican Pacific coasts. *Beihft zur Nova Hedwigia* 130: 293-306.
- Hernández-Becerril, D. U., R. Alonso-Rodríguez, C. Álvarez-Góngora, S. A. Barón-Campis, G. Ceballos-Corona, J. Herrera-Silveira, M. E. Meave del Castillo, N. Juárez-Ruiz, F. Merino-Virgilio, A. Morales-Blake, J. L. Ochoa, E. Orellana-Cepeda, C. Ramírez-Camarena & R. Rodríguez-Salvador. 2007. Toxic and Harmful Marine Phytoplankton and Microalgae (HABs) in Mexican Coasts. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 42: 1349-1363.
- Hernández-Becerril, D.U., S.A. Barón-Campis, J. Salazar-Paredes & R. Alonso-Rodríguez. 2013. Species of the planktonic diatom genus *Skeletonema* (Bacillariophyta) from the Mexican Pacific Ocean. *Cryptogamie, Algologie* 34: 77-87.
- Hernández-Becerril, D. U., M. E. Meave del Castillo & M. A. Lara Villa. 1993. Observations on *Chaetoceros buceros* (Bacillariophyceae), a rare tropical planktonic species collected from the Mexican Pacific. *Journal of Phycology* 29: 811-818.
- Jeffrey, S.W. & M. Vesik. 1997. Introduction to marine phytoplankton and their pigment signatures. In: Jeffrey, S.W., R.F.C. Mantoura y S.W. Wright (Comp.). *Phytoplankton Pigments in Oceanography*. Monogr. Oceanogr. Method. 10; UNESCO. pp. 37-84.
- Lara-Lara, J. R. & C. Bazán-Guzmán. 2005. Distribución de clorofila y producción primaria por clases de tamaño en la costa del Pacífico mexicano. *Ciencias Marinas* 31: 11-21.
- Lavín, M. F., J. M. Robles, M. L. Argote, E. D. Barton, R. Smith, J. Brown, M. Kosro, A. Trasviña, H.S. Vélez & J. García. 1992. Física del Golfo de Tehuantepec. *Ciencia y Desarrollo* 97-107.
- Liang, J. H., J. C. McWilliamd & N. Gruber. 2009. High-frequency response of the ocean to mountain gap winds in the northeastern tropical Pacific. *Journal of Geophysical Research* 114, C12005, doi:10.1029/2009JC005370.
- Lluch-Cota, S. E., S. Álvarez-Borrego, E. M. Santamaría-del-Ángel, F. E. Müller-Karger & S. Hernández-Vázquez. 1997. El Golfo de Tehuantepec y áreas adyacentes: variación espaciotemporal de pigmentos fotosintéticos derivados de satélite. *Ciencias Marinas* 23: 329-340.
- Machain-Castillo, M. L., M. A. Monreal-Gómez, E. Arellano-Torres, M. Merino-Ibarra & G. González-Chávez. 2008. Recent planktonic foraminiferal distribution patterns and their relation to hydrographic conditions of the Gulf of Tehuantepec, Mexican Pacific. *Marine Micropaleontology* 66: 103-119.

- Maciel-Baltazar, E. & D. U. Hernández-Becerril. 2013. Especies de dinoflagelados atecados (Dinophyta) de la costa de Chiapas, sur del Pacífico mexicano. *Revista de Biología Marina y Oceanografía* 48: 245-259.
- McClellan, C., J. R. Christian, R. S. Signorini, M. R. Lewis, I. Asanuma, D. Turk & C. Dupouy-Douchement. 2002. Satellite ocean-color observations of the tropical Pacific Ocean. *Deep Sea Research II* 49: 2533-2560.
- McCreary, J. P., H. S. Lee & D. B. Enfield. 1989. The response of the coastal ocean to strong offshore winds: with application to circulation in the Gulfs of Tehuantepec and Papagayo. *Journal of Marine Research* 47: 81-109.
- Meave del C., M. E. & D. U. Hernández-Becerril. 1998. Fitoplancton. In: Tapia G., M. (Comp.). *El Golfo de Tehuantepec: El Ecosistema y sus Recursos*. UAM Iztapalapa, México, D.F. pp. 59-74.
- Molina-Cruz, A & M. Martínez-López. 1994. Oceanography of the Gulf of Tehuantepec, Mexico, indicated by Radiolaria remains. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 110: 179-195.
- Monreal Gómez, M. A. & D. A. Salas de León. 1998. Dinámica y estructura termohalina. In: Tapia-garcía, M. (Comp.). *El Golfo de Tehuantepec: El Ecosistema y sus recursos*. UAM-I. México. pp. 13-26.
- Partensky, F., W. R. Hess & D. Vaultot. 1999. *Prochlorococcus*, a marine photosynthetic prokaryote of global significance. *Microbiology Molecular Biology Review* 63: 106-127.
- Robles-Jarero, E. G. & J. R. Lara-Lara. 1993. Phytoplankton biomass and primary productivity by size classes in the Gulf of Tehuantepec, México. *Journal of Plankton Research* 15: 1341-1358.
- Roden, C. I. 1961. Sobre la Circulación producida por el Viento en el Golfo de Tehuantepec y sus efectos sobre las temperaturas superficiales. *Geofísica Internacional* 1: 55-76.
- Trasviña, A., C. D. Lluch, A. E. Filonov & A. Gallegos. 1999. Oceanografía y El Niño. In: Magaña R.V. (Comp.). *Los Impactos de El Niño en México*. UNAM, México. pp. 69-101.
- Veldhuis, M. J. W., K. R. Timmermans, P. Croot & B. van der Wagt. 2005. Picophytoplankton; a comparative study of their biochemical composition and photosynthetic properties. *Journal of Sea Research* 53: 7-24.
- Vidussi, F., H. Claustre, J. Bustillos-Guzmán, C. Cailliau & J.-C. Marty. 1996. Determination of chlorophylls and carotenoids of marine phytoplankton: separation of chlorophyll *a* from divinyl-chlorophyll *a* and zeaxanthin from lutein. *Journal of Plankton Research* 18: 2377-2382.
- Wyrtki, K. 1974. Equatorial Currents in the Pacific 1950 to 1970 and their relations to the trade winds. *Journal of Physical Oceanography* 4: 372-380.
- Zapata, M., F. Rodríguez & J. L. Garrido. 2000. Separation of chlorophylls and carotenoids from marine phytoplankton: a new HPLC method using a reversed-phase C8 column and pyridine-containing mobile phases. *Marine Ecology Progress Series* 195: 29-45.

Recibido: 27 de noviembre de 2014.

Aceptado: 03 de junio de 2015.