Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada

VARIABILIDAD DE LA PRODUCTIVIDAD PRIMARIA EN LA REGIÓN DE CABO CORRIENTES, MÉXICO.

TESIS

MAESTRÍA EN CIENCIAS

DAFFNE CELESTE LÓPEZ SANDOVAL

Ensenada, Baja California, México, Junio 2007

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS

EN ECOLOGÍA MARINA

VARIABILIDAD DE LA PRODUCTIVIDAD PRIMARIA EN LA REGIÓN DE CABO CORRIENTES, MEXICO.

TESIS DE MAESTRIA

Que presenta:

DAFFNE CELESTE LOPEZ SANDOVAL

Ensenada, Baja California, México, Junio 2007

TESIS DEFENDIDA POR

Daffne Celeste López Sandoval

Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

Dr. José Rúben Lara Lara
Director del Comité

Dr. Saúl Alvarez Borrego
Miembro del Comité

Dr. Miguel Fernando Lavín Peregrina
Miembro del Comité

Dr. Luis Eduardo Calderón Aguilera
Coordinador del programa de posgrado en Ecología Marina

Dr. Edgar Gerardo Pavía López
Director de Estudios de Posgrado

15 de Junio de 2007

RESUMEN de la tesis de Daffne Celeste López Sandoval presentada como requisito parcial para la obtención del grado de Maestría en Ciencias en Ecología Marina, Ensenada Baja California, México. Junio 2007.

VARIABILIDAD DE LA PRODUCTIVIDAD PRIMARIA EN LA REGION DE CABO CORRIENTES, MÉXICO

Resumen aprobado por

Dr. José Rubén Lara Lara

En general, el Océano Pacifico Tropical ha sido considerado como una extensión oceánica de bajas tasas de producción primaria, caracterizada por sus aguas claras debido principalmente a las bajas concentraciones de clorofila. La región frente a Cabo Corrientes es una región tropical del Pacífico Mexicano. Sin embargo, imágenes de color del océano muestran que en ésta zona hay concentraciones altas de clorofila en ciertas épocas del año, que pueden reflejarse en altas tasas de fijación de carbono. La región se destaca por la presencia de procesos de mesoescala, cómo giros y surgencias costeras de primavera. Esto enriquece la columna eufótica con nutrientes y afecta directamente la biomasa fitoplanctónica y las tasas de productividad primaria.

Se analizaron datos de tres campañas oceanográficas del Programa PROCOMEX: PCM0205, PCM0211 y PCM0306. Estas campañas se realizaron en mayo y noviembre 2002, y junio 2003. En cada campaña se realizaron lances de CTD y se colectaron muestras de agua para medir la concentración de clorofila (chl *a*) y las tasas de productividad primaria con el método del ^{14}C (PP). Asimismo, con el propósito de tener una estimación sinóptica de la productividad primaria y poder hacer comparaciones con mediciones *in situ*, se utilizó un modelo no espectral para aguas caso II, y un modelo espectral para aguas caso I (los dos consideran una distribución vertical no homogénea de chl *a*).

La región se dividió en zona costera (ZC) y oceánica (ZO), con base en temperatura. Los valores altos de chl *a* y PP estuvieron muy relacionadas con las surgencias (mayo 2002 y junio 2003). La chl *a* más alta se encontró en mayo 2002 (>2 mg m^{-3}), hasta 12 mg m^{-3} en la zona costera a 20 m. Las chl *a* más bajas se encontraron en junio 2003 (<1 mg m^{-3}). Las PP promedio para toda la región fueron 361 mgC m^{-2} d^{-1} para mayo 2002, 200 mgC m^{-2} d^{-1} para noviembre y 447 mgC m^{-2} d^{-1} para junio 2003.

La PP promedio de ZC para mayo fue 465 mgC m^{-2} d^{-1}, mientras que para ZO fue 295 mgC m^{-2} d^{-1}. En noviembre la PP promedio para ZC fue 308 mgC m^{-2} d^{-1} y 118 mgC m^{-2} d^{-1} para ZO. Para junio 2003 la PP promedio para ZC fue 512 mgC m^{-2} d^{-1} y para ZO fue 253 mgC m^{-2} d^{-1}. La PP modelada está dentro del rango de las mediciones *in situ* para mayo y noviembre 2002, pero subestimó la de junio

2003. La variabilidad de la PP medida *in situ* y modelada sugiere que la región es de alta PP en primavera, cuando se presentan las surgencias, con PP altas similares a otras regiones del Océano Pacífico Mexicano. Los resultados sugieren que la región frente a Cabo Corrientes tiene un comportamiento diferente en cada una de tres temporadas: (1) temporada de surgencias con valores altos de chl *a* y PP; (2) al final de las surgencias con las PP más altas; y (3) invierno cuando chl *a* y PP tienen valores bajos.

Palabras Clave: Productividad primaria, concentración de clorofila, fijación de carbono, surgencias, Cabo Corrientes.

Abstract of the thesis presented by **Daffne Celeste López Sandoval** as a partial requirement to obtain the Master in Science degree in Marine Ecology. Ensenada, Baja California, México. June 2007.

Primary Productivity Variability off Cabo Corrientes, México.

In general, the Tropical Pacific Ocean has been defined as an area of low primary production rates (PP) as characterized by its clear waters which are mainly attributed to low chlorophyll concentrations. Cabo Corrientes region is a tropical area in the Mexican Pacific zone; but in spite of its tropical status, ocean color images show that at certain times of the year, this zone develops high chlorophyll concentrations. The Cabo Corrientes area is characterized by the presence of mesoscale processes such as gyres and coastal upwelling in the spring season. The presence of these mesoscale processes influence the phytoplanktonic biomass and production rates, largely as a result of vertical transport and nutrient supply.

For this study, data from three oceanographic cruises (PROCOMEX 0205, PROCOMEX 0211, PROCOMEX 0306) was analyzed. These cruises were carried out on May 2002, November 2002 and June 2003. n each cruise the physical structure of the water column was recorded with a CTD. Seawater samples were collected to measure chlorophyll-*a* (chl-*a*) concentration and to calculate PP using the radioisotope ^{14}C method. To have a wider spatial resolution and to achieve synoptic PP estimates in case I waters, a non spectral model which considers an inhomogeneous biomass profile, was used. In instances of case II waters, a spectral model was used.

Based on temperature data, the zone was divided in two: a coastal zone (CZ) and an oceanic zone (OZ). Both, PP rates and chl-*a* spatial distribution were closely related to the upwelling season (May 2002 and June 2003 cruises). The highest chl-*a* concentrations were registered during May 2002 (>2 mg m^{-3}), reaching values up to 12mg m^{-3} in the CZ at 20 m. Conversely, the lowest chl-*a* concentration in the euphotic zone was found in June 2003 (< 1mg m^{-3}). The mean PP rates for the entire region were 361 mg C m^{-2} d^{-1} for May and 200 mg C m^{-2} d^{-1} for November, 2002, and 447 mg C m^{-2} d^{-1} for June 2003.

In May, the mean PP rate was 465 mg C m^{-2} d^{-1} for the CZ and 295 mg C m^{-2} d^{-1} for the OZ. In November, PP rates for the CZ and OR were 308 mg C m^{-2} d^{-1} and 118 mg C m^{-2} d^{-1}, respectively. In June 2003 the mean PP rate for the CZ was 512 mg C m^{-2} d^{-1}, whilst it was 235 mg C m^{-2} d^{-1} for the OZ. The highest PP rates in June were associated to the lowest chl-*a*. *In situ* PP measurements for May and November 2002 were comparable to those estimated by the models; however PP estimates were underestimated in June 2003. PP estimates and measurements suggests that Cabo Corrientes is an area of high PP during the upwelling season in spring, similar to other regions in the Pacific Ocean off México. Our results suggest

that Cabo Corrientes could be characterized into three seasons: (1) the upwelling season, which presents high chl-*a* and PP, (2) the end of the upwelling season, when high PP rates are prevalent, and (3) the winter season, when chl-*a* and PP are low.

Keywords: In situ and modeled primary productivity, chlorophyll *a*, upwelling, Cabo Corrientes.

A mi madre: mi amor por ti es infinito.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Rubén Lara por sus comentarios y por su apoyo y el apoyo recibido del proyecto: "Flujos de Carbono: fuentes y sumideros en los márgenes continentales del Pacífico Mexicano" (Proyecto CONACYT SEP2004-C01-45813/a-1) por la beca de 6 meses para poder realizar este trabajo.

Al Dr. Saúl Álvarez por todo su apoyo, tiempo y ayuda en la realización de este trabajo.

Al. Dr. Miguel Lavín por su confianza, ayuda y tiempo, además de permitirme trabajar con los datos hidrográficos del proyecto PROCOMEX.

Al proyecto PROCOMEX, proyecto de Grupo CONACyT: "Transformación y perspectivas de las actividades portuarias, pesqueras y turísticas en el litoral occidental mexicano (Contrato No. G34601-S, D41881-F y SEP-2003-C02-42941/A-1), en el cual participan investigadores del CICESE, Colegio de México, Colegio de Michoacán, y Universidad de Colima.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca de Maestría.

Al departamento de posgrado de la división Ecología Marina por los dos meses de beca que me otorgaron.

A Víctor Godinez, al Dr. Lavín y a Jushiro Cepeda, por las figuras de temperatura y salinidad (2, 4, 5, 6, 7).

A Jushiro Cepeda por su tiempo para enseñarme a trabajar con MATLAB.

A los compañeros del CONGAL que me permitieron mostrarles mi trabajo y cuyos comentarios fueron bastante certeros.

Deseo agradecer a mis *amigos, camaradas partners colegas!*: Jushiro, Peña, y Marcos. Conocerlos ha sido un verdadero gusto, no sólo por su apoyo sino por todo lo que he aprendido con ustedes, de todo corazón gracias.

A mis compañeros de generación con los que pase momentos muy agradables.

A mis amigos Audrey, Nadine, Jushiro y Jimena por las largas platicas, y el tiempo juntos.

A Teresa Ruiz, no sólo por apretar la tecla o.k en el trabajo de Procesos Ecológicos, sino por todo lo que vivimos juntas, conocerte ha sido bien lococho n! Y de verdad que esto de ninguna manera hubiera sido igual si tu no hubieras estado donde estuviste, y hubieras sido quien eres. Gracias !.

A mi mamá y a mi abuelita Lulú por acompañarme, escucharme, consolarme, y apoyarme como siempre lo han hecho.

Pero sobre todo quiero agradecerle a la vida, por la oportunidad maravillosa de ponerme en tu camino y darle a mi vida esta tregua. Héctor, gracias por absolutamente todo, te amo.

CONTENIDO

Página

I. INTRODUCCIÓN **1**

I.2 Antecedentes 7
I.2.1 Productividad primaria 7
I.2.2 Circulación 8
I.3 Objetivos 10
I.4 Área de estudio 11

II. MÉTODOS **14**

II.1 Clorofila 15
II.2 Productividad primaria medida (*in situ)* 16
II.3 Procesamiento de datos 19
II.4 Productividad primaria modelada 19
II.4.1 Parámetros fotosintéticos 21
II.4.2 Perfil de clorofila 22

III. RESULTADOS **24**

III.1 Hidrografía 24
III.2 Clorofila 30
III.3 Productividad primaria medida *in situ* 35
III.4 Productividad primaria modelada 39

IV. DISCUSIONES **46**

IV.1 Variabilidad de la productividad primaria 47
IV.2 Productividad primaria medida y modelada 54

CONCLUSIONES **58**

LITERATURA CITADA **61**

LISTA DE FIGURAS

Figura **Página**

Figura 1. Área de Estudio 11

Figura 2. Estaciones donde se realizaron experimentos de productividad primaria en los cruceros de mayo 2002 (PCM0205), noviembre 2002 (PCM0211) y junio 2003 (PCM0306). 15

Figura 3. Forma del ajuste Gaussiano del perfil de biomasa dónde se muestran los cuatro 23

Figura 4. Perfiles verticales de temperatura (ºC) y salinidad de cada transecto para el crucero 26

Figura 5. Perfiles verticales de temperatura (ºC) y salinidad de cada transecto para el crucero 27

Figura 6. Perfiles verticales de temperatura (ºC) y salinidad de cada transecto para el crucero 28

Figura 7. Contornos superficiales de temperatura (°C) de los cruceros de mayo 2002, noviembre 29

Figura 8. Perfiles verticales costeros y oceánicos de los cruceros PCM0205, PCM0211 y PCM0306. 31

Figura 9. Perfiles verticales de clorofila (*in vivo*) de cada estación del crucero PCM0306. 32

Figura 10. Mapas de contornos superficiales de clorofila medida para: a) PCM0205, b) PCM0211, c) PCM0306. 34

Figura 11. Perfiles de productividad primaria *in situ* de los cruceros PCM0205 (a), PCM0211 (b) y 37

Figura 12. Razones de asimilación para los cruceros PCM0205, PCM0211, PCM0306. 38

Figura 13 Imágenes mensuales de clorofila MODIS- aqua para: a) mayo 2002, b) noviembre 2002, c) junio 2003 42

LISTA DE TABLAS

Tabla **Página**

Tabla I. Parámetros de la curva Gausiana que describen el perfil de clorofila para cada crucero en la región costera y la región oceánica. Chl $_{sat}$ promedio de clorofila obtenida del sensor MODIS aqua. $B_{0\ sat}$ clorofila base obtenida de la Chl $_{sat}$. H es la clorofila integrada sobre $B_{0\ sat.}$ σ es el ancho del máximo de clorofila. Zm es la profundidad del máximo de clorofila. 44

Tabla II. Valores promedio de productividad primaria integrada en la zona eufótica (mg C m^{-2} d^{-1}) estimada *in situ* y modelada. El modelo no espectral propuesto por Platt et al., (1991) ** se utilizó en el crucero PCM0205, en el estimado de toda la región y de las estaciones costeras. La modificación al modelo propuesto por Giles-Guzmán y Álvarez-Borrego (2004) se utilizó en el resto de las estimaciones. El valor entre paréntesis corresponde al error estándar de la media..... 46

I. INTRODUCCIÓN

La fotosíntesis es la responsable de la producción bioquímica de prácticamente todo el material orgánico (Field et al., 1998), y en el océano global contemporáneo es la responsable de fijar de 45 a 50 Gt (1 Gt = 10^9 ton) de carbono cada año (Platt y Sathyendranath, 1993; Falkowski et al., 1998). Se estima que ~16 Gt son exportadas a profundidades por debajo de la zona eufótica (Falkowski et al., 1998). Debido a la preocupación creciente por el aumento de la concentración de CO_2 atmosférico, diversos autores han sugerido que la llamada bomba biológica (proceso mediante el cual la producción biogénica de material orgánico y materiales carbonatados en la superficie son transportados hacia el océano profundo (Zondervan et al., 2001)) es una manera de frenar la velocidad de aumento de la concentración de CO_2 en la atmósfera (Sarmiento et al., 1990). Esta forma natural de menguar el aumento de la concentración de CO_2 se estima que podría reducir el impacto del cambio climático global. Sin embargo, la bomba biológica es efectiva sólo en escalas geológicas.

La fijación de bióxido de carbono a carbono orgánico mediante procesos fotosintéticos en un tiempo determinado, por unidad de área/volumen, es conocida como productividad primaria; es decir, es una tasa o velocidad (primera derivada) (Platt y Sathyendranath, 1993). La productividad primaria en el océano abierto es dominada por especies fitoplanctónicas pequeñas conocidas como picoplancton (0.2- 2.0 µm) (Ducklow, 2003), el cual puede representar el ~73% de la biomasa fitoplanctónica y ser responsable de hasta el ~61% del carbono inorgánico fijado

en ciertas regiones oceánicas (Marañón et al., 2003; Cermeño et al., 2006a). Este patrón llega a ser más evidente en zonas oligotróficas, como la región de los grandes giros, donde el picoplancton es responsable de ~57% de la productividad primaria y representa ~80% de la biomasa. Por otro lado, en regiones dinámicas, como zonas de surgencias que presentan procesos importantes de advección vertical ascendente y de mezcla, las especies fitoplanctónicas que adquieren importancia son especies >20 µm (microfitoplancton). Estas especies llegan a representar una parte significativa tanto de biomasa como de productividad primaria, alcanzando en ciertos momentos hasta ~80% en ambos casos (Cermeño et al., 2006a; Cermeño et al., 2006b). Lo anterior sugiere que las características físicas (advección y procesos de mezcla o turbulencia) de una región influyen en la abundancia y composición de la comunidad fitoplanctónica, por lo que se espera que también influyan en el flujo de energía a través de las cadenas tróficas (control de abajo hacia arriba).

En los sistemas marinos este control de abajo hacia arriba está regulado por el aporte de nutrientes inorgánicos a la zona eufótica. En el océano abierto, esto es regido por los factores que regulan la absorción de la radiación solar y la estratificación vertical de las capas de agua, tales como los vientos regionales, la cobertura de nubes, la evaporación y otros procesos de intercambio agua-aire de calor, y el flujo (si hay) de agua de baja salinidad, (Cullen et al., 2002; Ducklow, 2003; Cermeño et al., 2006b). Por lo tanto, podemos decir que los procesos físicos influyen en la estructura, composición y función de los sistemas pelágicos,

directamente por su influencia en el crecimiento del fitoplancton y de manera indirecta afectando las interacciones en la cadena trófica (Cullen et al., 2002).

Una de las grandes metas de la investigación oceanográfica es entender los procesos que suceden a escala global. Sin embargo, para poder caracterizar el océano, se ha propuesto dividirlo en regiones que reflejen los atributos de cada zona. Han habido varias propuestas para dividir el océano (ver Dietrich, 1963; Spoel and Herman, 1983; Banse, 1987; Barber, 1988; Platt y Sathyendranath, 1988) (Ducklow, 2003). Longhurst (1998) dividió al océano en 4 regiones principales (Costera, polar, la zona dominada por los vientos alisios (30-60°) y la franja ecuatorial entre 30° N y 30° S) que son a su vez subdivididas en 54 subregiones (**www.mar.dfompo.gc.ca/science/ocean/BedfordBasin/Papers)**.

Siguiendo con la idea de dividir el océano en regiones, se comenzó a utilizar la información del sensor Coastal Zone Color Scanner (CZCS), que generó información en el período 1978-1986, para crear mapas que caracterizan la biomasa y la productividad primaria a escalas locales o regionales (Platt y Sathyendranath, 1988). Estas nuevas regiones, o provincias biogeoquímicas, como fueron denominadas más adelante (Platt et al., 1991), no tienen limites estáticos y fluctúan tanto en tiempo como en espacio, reflejando el hecho que el océano es un ambiente dinámico que cambia constantemente. Por lo tanto, al caracterizar regiones (provincias) con base en las estimaciones de la biomasa fitoplanctónica, se observan las variaciones de las características oceanográficas de la región, por lo que es de esperarse que las estimaciones de productividad primaria también cambien espacial y temporalmente.

Hay varias maneras de estimar la productividad primaria, una de ellas es emplear el método de ^{14}C (radioactivo) propuesto por Steeman-Nielsen (1952) ya sea de manera *in situ* o simulada *in situ*. Este método permite obtener un perfil que describe el comportamiento de la productividad primaria en la columna de agua, la cual se puede integrar para la zona eufótica y finalmente integrar a una unidad de tiempo representativa (ej. por día, mgC m^{-2} d^{-1}) (Platt y Sathyendranath, 1993). Una de las principales limitantes de este tipo de estimaciones, es el contar con un número pequeño de muestras. Esto es debido a problemas de tiempo disponible de barco, tiempo de muestreo, el tamaño de la región a caracterizar y la falta de simultaneidad en la toma de datos. La falta de mediciones con mayor resolución espacial y temporal puede sugerir, en ocasiones, que se está sobresimplificando la estimación de la productividad primaria y que está relativamente alejado de describir apropiadamente la realidad. Sin embargo, es información valiosa, pues indica lo que está sucediendo en el medio en el momento y lugar del muestreo.

A partir del lanzamiento del primer satélite con un sensor de medición del color del océano (octubre de 1978) surgió una alternativa que ayuda a hacer estimaciones de productividad primaria con mayor resolución espacial y temporal. El uso de sensores remotos se ha convertido en otra manera de estimar la productividad primaria de una región, mediante la ayuda de modelos que se alimentan de información obtenida de los sensores y con parámetros fotosintéticos que pueden ser obtenidos de forma empírica o teórica. Los primeros algoritmos desarrollados para la estimación de la productividad primaria mediante sensores

remotos se basaron en relaciones entre la clorofila, la luz y la productividad primaria, pero con experimentos de incubación con cultivos de laboratorio (Ryther, 1956; Ryther y Yentsch, 1957). Actualmente los algoritmos que se emplean en la estimación de la productividad primaria se basan en relaciones entre la luz y la fotosíntesis derivada de experimentos con comunidades fitoplanctónicas del mar (Platt y Sathyendranath, 1988), o bien en relaciones teóricas entre variables como temperatura y clorofila (Behrenfeld y Falkowski, 1997).

La estimación de la productividad primaria mediante imágenes de color del océano (imágenes obtenidas a partir de sensores remotos) ofrece la ventaja de una amplia cobertura sinóptica. Esto la ha convertido en una herramienta útil y de fácil acceso, que permite el cálculo de la productividad primaria de grandes extensiones oceánicas, además de ofrecer la ventaja de tener información de una región en particular para poder compararla espacial y temporalmente.

I.1 Justificación

La caracterización del océano Pacífico tropical, lo ha llevado a ser definido de manera general como un océano oligotrófico. Se distingue por sus aguas claras (sin considerar las regiones costeras) debido a la poca cantidad de material suspendido (específicamente plancton) (Longhurst y Pauly, 1987), lo que ha llevado a considerarlo como una extensión oceánica que de manera general es de baja producción en comparación con otras regiones.

En México las estimaciones de la productividad primaria en la zona del Pacífico tropical, en especial dentro de la región adyacente a Cabo Corrientes, son muy escasas y ofrecen datos aislados para algunas localidades (Gaxiola-Castro y Álvarez-Borrego, 1986; Lara-Lara y Bazán-Guzmán, 2005). Al parecer la idea que las regiones tropicales son zonas de poca variabilidad se refleja en la escasa información sobre productividad primaria que se tiene de esta zona. Sin embargo, imágenes de color para esta región muestran que en ciertas épocas del año (primavera) hay una concentración alta de pigmentos. Por lo tanto, el análisis de la productividad primaria permitirá caracterizar la región de Cabo Corrientes, mostrando la importancia de los productores primarios en esta región tropical mexicana.

I.2 Antecedentes

I.2.1 Productividad primaria

La información sobre productividad primaria frente a las costas del Pacífico tropical oriental es poca, sobre todo para las costas mexicanas. Owen y Zeitzchel (1970) reportaron valores de productividad primaria *in situ* a partir de una serie de cruceros (EASTROPAC/ Abril 1967 hasta abril-1968) para la zona este del Pacífico (13-16°N y 93-114°W). Los valores reportados variaron de 0.13 a 0.32 gC m^{-2} d^{-1}, con un promedio anual integrado de 75 gC m^{-2} $año^{-1}$ y mostrando valores de 0.7 gC m^{-2} d^{-1} para el Golfo de Tehuantepec. Sosa-Avalos et al. (2006), a partir de promedios anuales derivados de imágenes obtenidas por sensores remotos (noviembre de 1997 a diciembre del 2002), se reportó para 1998 y para la zona costera de Jalisco (105° y 106°W) valores de productividad primaria entre 0.5 y 0.8 gC m^{-2} d^{-1}. De 1999 a 2000 los valores máximos de productividad primaria variaron entre 0.7gC m^{-2} d^{-1} a 1.5 gC m^{-2} d^{-1} frente a las costas de Jalisco y Nayarit (12° a 21°N; 100° a 109°W), mientras que para la región oceánica se reportaron valores de 0.3 a 0.5 gC m^{-2} d^{-1}; por lo que consideraron a esta región como una zona de alta productividad primaria

López- Sandoval (2004) determinó la productividad primaria *in situ* integrada para mayo de 2001 para la zona frente a las costas de Colima, Michoacán y Guerrero (17°-18°N y 101° - 103°W). El promedio de los valores integrados de toda la zona fue 0.76 gC m^{-2} d^{-1}; con valores máximos de 1.17 gC m^{-2} d^{-1} para la zona frente a la costa de Lázaro Cárdenas (Michoacán) y 1.58 gC m^{-2} d^{-1} para la zona frente a la costa de Zihuatanejo (Guerrero). Lara-Lara y

Bazán-Guzmán (2005) reportaron para 1999 valores promedio de productividad primaria integrada de 0.17 gC m^{-2} d^{-1} frente a Puerto Vallarta, Jalisco, y de 0.42 gC m^{-2} d^{-1} frente a Manzanillo, Colima. Estos valores promedios de productividad primaria son de magnitud similar a los reportados para regiones de surgencias costeras en zonas templadas y subtropicales de México.

I.2.2 Circulación

La región del Océano Pacífico tropical oriental, entre Cabo Corrientes (20 N y 105° 41' W) y Costa Rica (10°N y 84°15'W) fue caracterizada por mucho tiempo por dos sistemas de corrientes que se decía convergían frente a las costas de México (Badán-Dangón, 1997; Badán-Dangón, 1998): la Corriente Costera de Costa Rica (CCCR) y la Corriente de California (CC), que al converger forman parte de la Corriente Norecuatorial (CNE) (Badán-Dangón, 1997). La intensidad y latitud donde se había reportado que ambas confluían variaba estacionalmente. En septiembre-octubre frente a las costas de Baja California Sur, cuando se pensaba se presentaba la máxima intensidad de la CCCR, y en los meses de marzo a mayo se desplaza al sur de Cabo Corrientes (Wyrtki, 1965; Badán-Dangón, 1997; Badán-Dangón, 1998).

Recientemente, con datos de deriva y de velocidad geostrófica se señaló que un giro anticiclónico alrededor del Cuenco de Tehuantepec, produce una corriente que al fluir con dirección sureste a través de las costas de Oaxaca hasta el Golfo de Tehuantepec, corta el flujo de la CCCR y la obliga a salir de la costa, alimentando eventualmente a la CNE (Kessler, 2006). El flujo costero entre el Golfo de Tehuantepec y Cabo Corrientes ha sido mencionado con anterioridad,

Roden (1972) para diciembre de 1969, reportó la presencia de una corriente inmediata a la costa de Cabo Corrientes que se intensifica en superficie, con una velocidad de hasta 46 cm s^{-1}, alcanzando ~700 m de profundidad. Kessler (2006) menciona que al norte de los 17°N, se presenta un flujo costero con dirección al norte que se intensifica y llega hasta la superficie a los 20°N (Cabo Corrientes), este flujo tiene una velocidad de 0.03m s^{-1} y transporta 1-2Sv (1 Sv= 10^6 m^3 s^{-1}). Debido a que esta corriente costera no parece ser una continuación de la CCCR, propone nombrarla como la Corriente del Oeste de México (WMC, por sus siglas en inglés).

Recientemente, Lavín et al. (2006) caracterizaron un flujo costero durante verano con dirección hacia el norte entre Cabo Corrientes y el Golfo de Tehuantepec, y mencionaron que este flujo tiene un ancho entre 90-180 km y se encuentra entre 250 y 400 m de profundidad, con una velocidad entre los 0.15 y 0.3 m s^{-1}, y un transporte entre ~2.5-4 Sv. La intensidad y el transporte de este flujo costero se ve intensificado en la parte norte (entre Cabo Corrientes y San Blas) por un flujo que se encuentra alejado de la costa y con dirección hacia el ecuador, este flujo se desvía hacia la costa alimentando a la corriente costera.

I.3 Objetivos

Describir la variabilidad temporal de la productividad primaria en la región frente a Cabo Corrientes.

Comparar la productividad primaria medida (PP_{medida}) con la productividad modelada ($PP_{modelada}$) para mayo 2002, noviembre 2002 y junio 2003.

I.4 Área de estudio

Se localiza frente a Nayarit, Jalisco y Colima, con una característica fisiográfica sobresaliente que es Cabo Corrientes. El área está comprendida entre 18° y 21° N de latitud y 108° y 105° 41′ W de longitud (Figura 1).

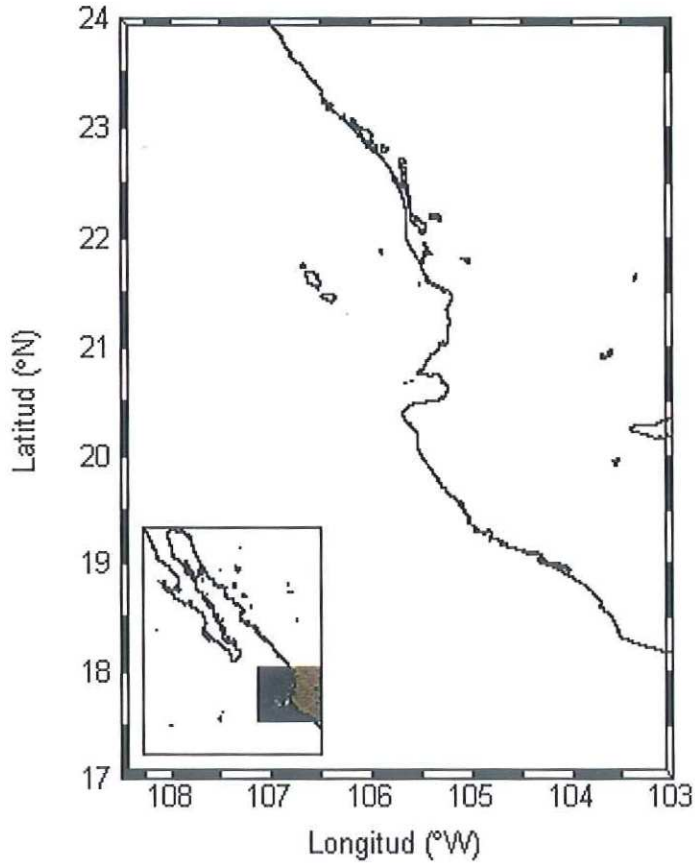


Figura 1. Área de Estudio

La zona costera adyacente a Cabo Corrientes tiene un clima semiseco, con inviernos y primaveras secos y cálidos. La temperatura media anual es de 25.6° C

septiembre (www.e-local.gob.mx/jalisco). La batimetría de la región se caracteriza por la presencia de dos zonas de bajos: El banco y la Roca Corbetera, además de dos cañones submarinos que se encuentran dentro de Bahía Banderas (20.4°N) y al Sur de Cabo Corrientes (20.1°N). El primero tiene una profundidad de más de 1000 m y se extiende hacia el interior de Bahía Banderas, el segundo es más somero y alcanza una profundidad aproximada de 400 m (Torres-Orozco et al., 2005).

A finales de verano y en otoño los vientos dominantes son del sureste, y durante invierno y primavera son del noroeste (www.e-local.gob.mx/jalisco). Como resultado de los vientos que soplan en esta zona, puede ser influenciada por procesos de surgencias en ciertas épocas del año (Torres-Orozco et al, 2005). Estos autores reportaron para marzo 2003 el inicio de una surgencia que se extendió hacia fuera de la costa hasta entre 20 y 46 km, alcanzando a cubrir una extensión aproximada de 2655 km^2.

Los datos de la literatura acerca de la dinámica de la región, señalan la presencia de un frente térmico cerca de Cabo Corrientes de mayo a junio, que se extiende hasta la entrada del Golfo de California (Torres-Orozco et al., 2005). La presencia de frentes térmicos es favorecida por la presencia de varias masas de agua: Agua superficial Tropical (AST), Agua del Golfo de California (AGC) y Agua de la Corriente de California (ACC) que crean zonas de contrastes hidrográficos marcados. Para febrero y abril se presenta un flujo de agua caliente (>28°C) cuyo ancho es ~20.6 km y cubre toda la plataforma continental frente a Cabo Corrientes. Este flujo tiene una velocidad media de 0.31 m s^{-1} y se extiende al

norte del bajo Roca Corbetera (Torres-Orozco et al., 2005). La hidrografía de la región también es caracterizada por la presencia de giros y meandros que transportan agua de la Corriente de California hasta la costa (Lavín et al., 2006).

II. MÉTODOS

Se realizaron tres cruceros oceanográficos en la zona adyacente a Cabo Corrientes entre los 15° y 19° de latitud Norte y 101° a 108° de longitud Oeste en mayo de 2002 ¨PROCOMEX 0205 (PCM0205)¨, noviembre de 2002 ¨PROCOMEX 0211 (PCM0211)¨ y junio de 2003¨PROCOMEX 0306 (PCM0306)¨ a bordo del B/O *Francisco de Ulloa* del CICESE. La red de muestreo incluyó 141 estaciones para PCM0205 (con 10 estaciones dónde se hicieron experimentos de productividad primaria), 85 estaciones para el crucero PCM0211 (con 8 estaciones de productividad primaria), 120 para el crucero PCM0306 (con 10 estaciones para productividad primaria) (Figura 2) (Godínez-Sandoval et al., 2002a; Godínez-Sandoval et al., 2002b; Godínez-Sandoval et al., 2003).

En cada una de las estaciones se realizaron lances de CTD con sensores de presión, temperatura, salinidad y fluorómetro acoplados a una roseta con botellas Niskin de 5 l de capacidad. Para las estaciones donde se realizaron los experimentos *in situ* de productividad primaria con ^{14}C, se colectaron muestras de agua para determinar la concentración de clorofila. Las muestras se colectaron cerca del medio día local (una estación diaria) a seis profundidades ópticas (100, 50, 30, 20, 10 y 1% de la irradiancia superficial). Para las estaciones donde no se hicieron experimentos de productividad primaria, se colectaron muestras a 6 profundidades (0, 10, 50, 100, 150 y 200 m) para determinar la concentración de clorofila.

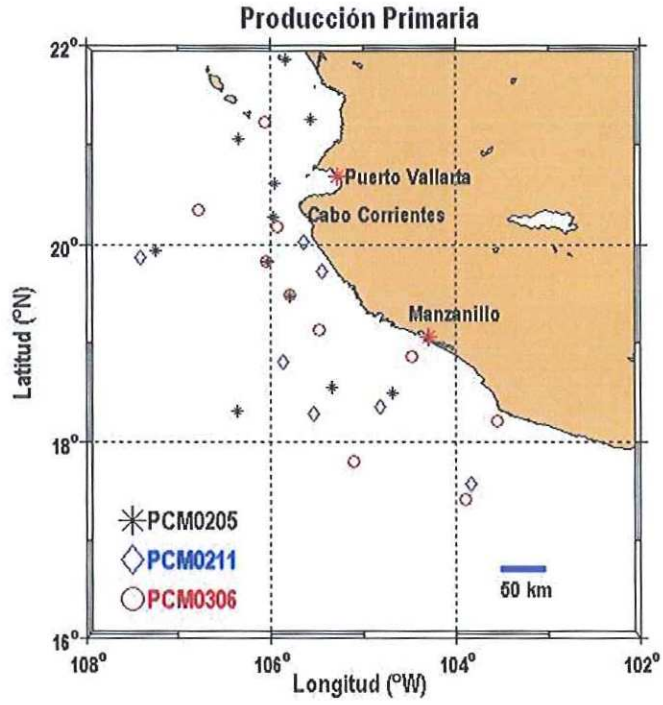


Figura 2. Estaciones donde se realizaron experimentos de productividad primaria en los cruceros de mayo 2002 (PCM0205), noviembre 2002 (PCM0211) y junio 2003 (PCM0306).

II.1 Clorofila

De cada profundidad muestreada se colectó 1 litro de agua para determinar la concentración de clorofila-a (Chl-*a*). Las muestras fueron filtradas a través de filtros Whatman GF/F de 25 mm de diámetro, los cuales fueron inmediatamente congelados en nitrógeno líquido. La Chl-*a* del fitoplancton retenido en los filtros GF/F se extrajo con acetona al 90% por un periodo de 24 horas en frío y en la oscuridad (Venrik y Hayaward, 1984). Las concentraciones de clorofila antes y después de acidificar (HCl 10%) fueron determinadas por el método flouorimétrico

con un Fluorímetro Turner Designs (Yentsch y Menzel, 1963; Holm-Hansen et al., 1965). Las lecturas se corrigieron por testigo y dilución.

La concentración de Chl-*a* se calculó por medio de la ecuación de Holm Hansen et al. (1965).

$$\text{Clorofila-a (mg m}^{-3}) = (\text{LFC} - \text{LFAC})\ F\ (v)\ (V^{-1}) \quad (1)$$

$$\text{Feopigmentos (mg m}^{-3}) = (\ r\ \text{LFAC} - \text{LFC})\ F\ (v)\ (V^{-1}) \quad (2)$$

Donde LFC es la lectura de la fluorescencia de la Chl-*a* sin acidificar, corregida por testigo y dilución, LFAC es la lectura de la Chl-*a* después de acidificar, corregida por testigo y dilución, F es el factor obtenido en la calibración con Chl-*a* pura libre de feopigmentos dependiendo de la ventana usada (µg l^{-1}), v es el volumen de extracción con acetona, V es el volumen de la muestra filtrada y r es la razón de las lecturas sin acidificar.

II.2 Productividad primaria medida (*in situ*)

Para calcular las profundidades a las cuales se tomaron las muestras para los experimentos de productividad primaria, para cada estación se calculó el coeficiente de atenuación vertical de luz difusa (K_d) por medio de la lectura de un disco de Secchi (LDS) de 30 cm de diámetro, utilizando la ecuación: $K_d = 1.7/\text{LDS}$ (Holmes, 1970) y utilizando este K_d en la ley de Lambert-Beer, con la finalidad de

determinar las profundidades de muestreo que correspondieran a 100, 50, 30, 20, 10 y 1% de irradiancia superficial ($E_{0(PAR)}$) de la siguiente manera:

$$E_z = E_{0(PAR)} e^{-K_{d(PAR)} Z} \quad (3)$$

$$Z = \ln\left(E_{0(PAR)} / E_{z(PAR)}\right) K_{d(PAR)} \quad (4)$$

Donde E_z es la irradiancia a la profundidad *z*, E_0 es la irradiancia inmediatamente por debajo de la superficie del agua, $K_{d\ (PAR)}$ es el coeficiente de atenuación vertical de luz difusa y Z es la profundidad a la que corresponden los porcentajes de PAR atenuados.

Las muestras de agua se colectaron con botellas Niskin de 5 l de capacidad con ligas de silicón en el cierre. El agua colectada se depositó en contenedores de plástico totalmente oscurecidos para evitar el efecto de la luz solar. El agua de cada nivel fue utilizada para llenar 3 botellas transparentes de policarbonato de 250 ml de capacidad, removiendo antes el zooplancton al filtrar el agua por una malla (>150 µm) para evitar el pastoreo de estos organismos sobre el fitoplancton durante el experimento. Dos de las 3 botellas se consideraron como claras y la tercera como oscura (envuelta en papel aluminio).

Las muestras en las tres botellas fueron inoculadas con 100 µl de solución con ^{14}C (~ 5 µCi) y se incubaron *in situ* (1.5 a 2 horas) en tubos de acrílico transparente a la profundidad de donde se extrajeron. Al mismo tiempo se llenaron

otras tres botellas transparentes de policarbonato que fueron inoculadas con 100 µl de ^{14}C. Estas últimas botellas se filtraron inmediatamente después de haber iniciado los experimentos y se consideraron como de tiempo cero (T_o). Después del tiempo de incubación, las muestras fueron filtradas a través de filtros de membrana de 0.45 µm de tamaño de poro y 25 mm de diámetro. Los filtros fueron depositados en frascos de vidrio para centelleo (viales), adicionando 0.5 ml de HCl al 10% para eliminar ^{14}C en forma de CO_2 que no fue asimilado por el fitoplancton durante la incubación. Después de dos horas, se les agregó a cada uno de los viales 10 ml de Ecolite (líquido de centelleo). Las muestras fueron contadas en un contador de centelleo líquido Beckman LS-5000.

La asimilación de carbono se calculó de la siguiente manera (Parsons et al., 1984):

$$\text{Fotosíntesis (mg C m}^{-3}\text{ h}^{-1}) = ((\text{DPM} - \text{DPM } T_o) \times 24{,}000 \times 1.05)/ (A \times t) \qquad (5)$$

Donde DPM son las desintegraciones por minuto de la muestra y de los tiempos cero (T_0), Los DPM son una medida de la actividad radioactiva de la muestra, resultado de la emisión de partículas beta que está produciendo el ^{14}C adicionado, 24,000 es el total de mg carbono inorgánico total m^{-3} en el agua de mar, 1.05 es el factor de preferencia de asimilación del ^{12}C sobre el ^{14}C, A es la actividad del estándar y t es el tiempo de incubación.

II.3 Procesamiento de datos

Una vez analizados los datos de salinidad, temperatura, sigma-t, Chl-*a* y productividad primaria estimada con el método del ^{14}C, se exploró su comportamiento para ver si era posible dividir el área estudiada antes de modelar la productividad primaria. Para esto se construyeron secciones verticales de temperatura, salinidad y sigma-t de cada línea para cada crucero. De acuerdo a las características observadas en las secciones, se realizó un análisis de conglomerados con los datos de temperatura y salinidad de los primeros 100 m, siendo las estaciones las variables a agrupar. Los datos de cada estación fueron estandarizados de acuerdo a su media y desviación estándar (datos Z) para facilitar la comparación entre las estaciones. Se calculó el índice de similitud entre estaciones por el método de distancias euclidianas, los conglomerados se unieron a partir del método del vecino más lejano utilizando software comercial. Este método funciona bastante bien en casos en los cuales los conjuntos de manera natural forman conglomerados distintos, por ejemplo, estaciones costeras y oceánicas. Una vez establecidas las estaciones que corresponden a cada conglomerado, se realizó un análisis de varianza no paramétrico (Kruskal-Wallis) para establecer si existían diferencias significativas en los promedios de los conglomerados formados (ej. promedio de temperatura en conglomerados costero y oceánico) para cada crucero.

II.4 Productividad primaria modelada

En los casos en que el perfil vertical de Chl- *a* mostró que parte de la columna eufótica era aguas caso II (>1.5 mg Chl m^{-3}), la productividad primaria

modelada se estimó a partir del modelo no espectral para un perfil de biomasa no homogéneo propuesto por Platt et al. (1991), en el cuál la productividad primaria se calculó a cada profundidad:

$$P_{\text{mod elada}} = \left[P^{*}_{m(z)} Chl_z \alpha^{*}_{PAR(z)} PAR_z\right] \times \left[\left(P^{*}_{m(z)}\right)^2 + \left(PAR_z \alpha^{*}_{PAR(z)}\right)^2\right]^{-0.5} \qquad (6)$$

$P^{*}_{m(z)}$ (mgC (mg Chl)$^{-1}$ h^{-1}) es la tasa fotosintética máxima en el óptimo de luz, $\alpha^{*}_{PAR(z)}$ (mgC (mg Chl)$^{-1}$ h^{-1} (µmol cuanta m^{-2})) es la pendiente inicial de la curva P-E, y PAR es la radiación fotosintéticamente activa (luz ó irradiancia de 400 a 700 nm). La PAR de cada profundidad se obtuvo a partir del valor superficial promedio de la imagen mensual del sensor MODIS aqua y aplicando la ley de Lambert-Beer. El valor de PAR del satélite corresponde al mediodía, y para calcular los valores superficiales de cada hora del día, al valor del satélite se le ajustó la forma de la variación diurna promedio tomada de Kirk (1994) considerando la longitud del día en horas de acuerdo a la fecha y localidad del muestreo. En estos casos, el perfil vertical de PAR se generó aplicando el método propuesto por Giles-Guzmán y Álvarez-Borrego (2000) para la capa superficial y subsuperficial de la columna eufótica (con Chl-*a* <1.5 mg m^{-3}), y para la parte con Chl-*a* > 1.5 mg m^{-3} se aplicó un coeficiente de atenuación vertical de luz difusa constante.

Para los casos en que todo el perfil vertical de Chl-*a* mostraba que la columna eufótica completa era aguas caso I (chl < 1.5 mg m^{-3}) se utilizó una

modificación al modelo anterior propuesta por Hidalgo-González y Álvarez-Borrego (2004):

$$P_{(z)} = \left[P^{*}_{m(z)}\phi_{\max} Chl_{z}\, \bar{a}^{*}_{ph(z,chl)} PAR_{z}\right] \times \left[\left(0.02315\, P^{*}_{m(z)}\right)^{2} + \left(PAR_{z}\phi_{\max}\, \bar{a}^{*}_{ph(z,chl)}\right)^{2}\right]^{-0.5} \qquad (7)$$

Esta modificación es un modelo espectral con un perfil de biomasa no homogéneo, el cual corrige la pendiente inicial $\alpha^{*}_{PAR(z)}$ por la distribución espectral de la PAR escalar *in situ*. En lugar de $\alpha^{*}_{PAR(z)}$ del modelo anterior, se empleó la cosecha cuántica máxima ($\phi_{\max}$) (mol C (mol cuanta)$^{-1}$ y $\bar{a}^{*}_{ph(z,chl)}$ (el coeficiente específico promedio de absorción del fitoplancton (m^2 mg Chl^{-1})). El perfil de PAR se calculó como lo propusieron Giles-Guzmán y Álvarez-Borrego (2000) con una K_{PAR} variable en función de $Chl_{(z)}$ y la distribución espectral de PAR *in situ*.

II.4.1 Parámetros fotosintéticos

Debido a lo escaso de los datos, se emplearon los parámetros fotosintéticos propuestos por Ryther y Yentsch (1957) y modificados por Cullen (1990): P^{*}_{m} = 4.8 mgC (mg Chl)$^{-1}$ h^{-1} y $\alpha^{*}_{PAR(z)}$ = 0.017 (mgC (mg Chl)$^{-1}$ h^{-1} (µmol cuanta m^{-2} s^{-1})$^{-1}$. La cosecha cuántica máxima ($\phi_{\max}$) (cosecha cuántica a bajos niveles de PAR) se obtuvo a partir de la expresión $43.2\phi_{\max}\bar{a}_{ph(z,chl)}$. El valor 43.2 es un factor de conversión de mg de carbono a moles de carbono, horas a segundos y de mol cuanta a µmol cuanta. El coeficiente específico promedio de absorción del fitoplancton ($\bar{a}^{*}_{ph(z,chl)}$) se obtuvo siguiendo el método propuesto por Giles-Guzmán y Álvarez–Borrego (2000). Este varía con Chl-*a* y z, y la expresión para su cálculo

toma en cuenta la variación de la distribución espectral de PAR con la profundidad.

II.4.2 Perfil de clorofila

Para la aplicación de ambos modelos se calculó un perfil promedio de clorofila para toda la región y para cada crucero, así como para las estaciones costeras y oceánicas agrupadas separadamente. Este es un promedio para los perfiles de todas las estaciones hidrográficas para los que contamos con datos de Chl *a*. Cada perfil se generó a partir de un ajuste de distribución Gaussiana con cuatro parámetros. Esta distribución es lo suficientemente versátil para representar la distribución de biomasa tanto para aguas costeras, oceánicas, e inclusive para zonas de surgencias, siempre y cuando se tenga solamente hasta un máximo de clorofila (Platt et al., 1988). La forma general del ajuste corresponde a la ecuación:

$$Chl_z = B_0 + \frac{h}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(Z - Z_m)^2}{2\sigma^2} \right] \qquad (8)$$

Donde B_0 es la clorofila base (mg m^{-3}) sobre la cual se construye la curva Gaussiana, Z_m es la profundidad donde se encuentra el máximo de clorofila (m), σ controla el ancho del máximo de clorofila y *h* es la biomasa (integrada) bajo toda la curva y sobre la clorofila base (figura 3). Una vez obtenida la forma del perfil para cada caso, este se ajustó variando B_0 para que en la superficie tuviera el valor del promedio mensual de la clorofila satelital (mayo 2002, noviembre 2002, junio 2003). Las imágenes se obtuvieron el sensor MODIS aqua, (www.oceancolor.gsfc.nasa.gov).

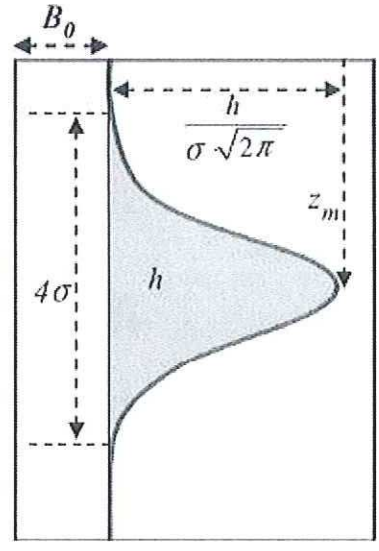


Figura 3. Forma del ajuste Gaussiano del perfil de biomasa dónde se muestran los cuatro parámetros que describen el perfil de clorofila.

III. RESULTADOS

III.1 Hidrografía

De acuerdo con las características hidrográficas, se encontró diferencia significativa ($p<0.05$) entre los grupos de estaciones costeras y oceánicas para los tres cruceros (PCM0205, PCM0211 y PCM0306) por lo tanto, la zona se dividió en región costera y oceánica para presentar los resultados. El promedio de temperatura superficial de las estaciones costeras fue de 26.5°C para el crucero de mayo 2002 (PCM0205), de 28.5°C para el crucero de noviembre 2002 (PCM0211) y de 27.6°C para el crucero de junio 2003 (PCM0306). Para las estaciones oceánicas el promedio de temperatura superficial en los tres cruceros fue de 27.7°C, 28.2 °C y 27.1°C, respectivamente. La profundidad de la termoclina varió en los tres cruceros, se encontró entre 25 -30m a lo largo de todas las líneas en el crucero PCM0205 (Figura 4), entre los 50 -60 m para el crucero PCM0211 (Figura 5) y entre los 35 - 40 m para el crucero PCM0306 (Figura 6).

De los perfiles verticales de temperatura y salinidad de cada línea, es posible observar para el crucero PCM0205 un afloramiento de agua subsuperficial cerca de la costa, esto se aprecia al observar la inclinación de las isotermas y las isohalinas en esta región (Figura 4), así como en el mapa de contornos superficiales de temperatura para el mismo crucero, donde se muestra en la región costera de Jalisco (19° 20'' N y 103°55" W) y Colima (19°18" N y 103° 31"W) una diferencia de casi 6 °C (Figura 7). En el mes de junio 2003, la intensidad de las surgencias costeras es menor que para mayo 2002. Se alcanza a apreciar en las últimas líneas de los perfiles verticales de salinidad (Figura 6), y

en el mapa de contornos de temperatura para el crucero PCM0306 (Figura 7), donde se observa que el afloramiento de agua se presenta alrededor de la región de Cabo Corrientes.

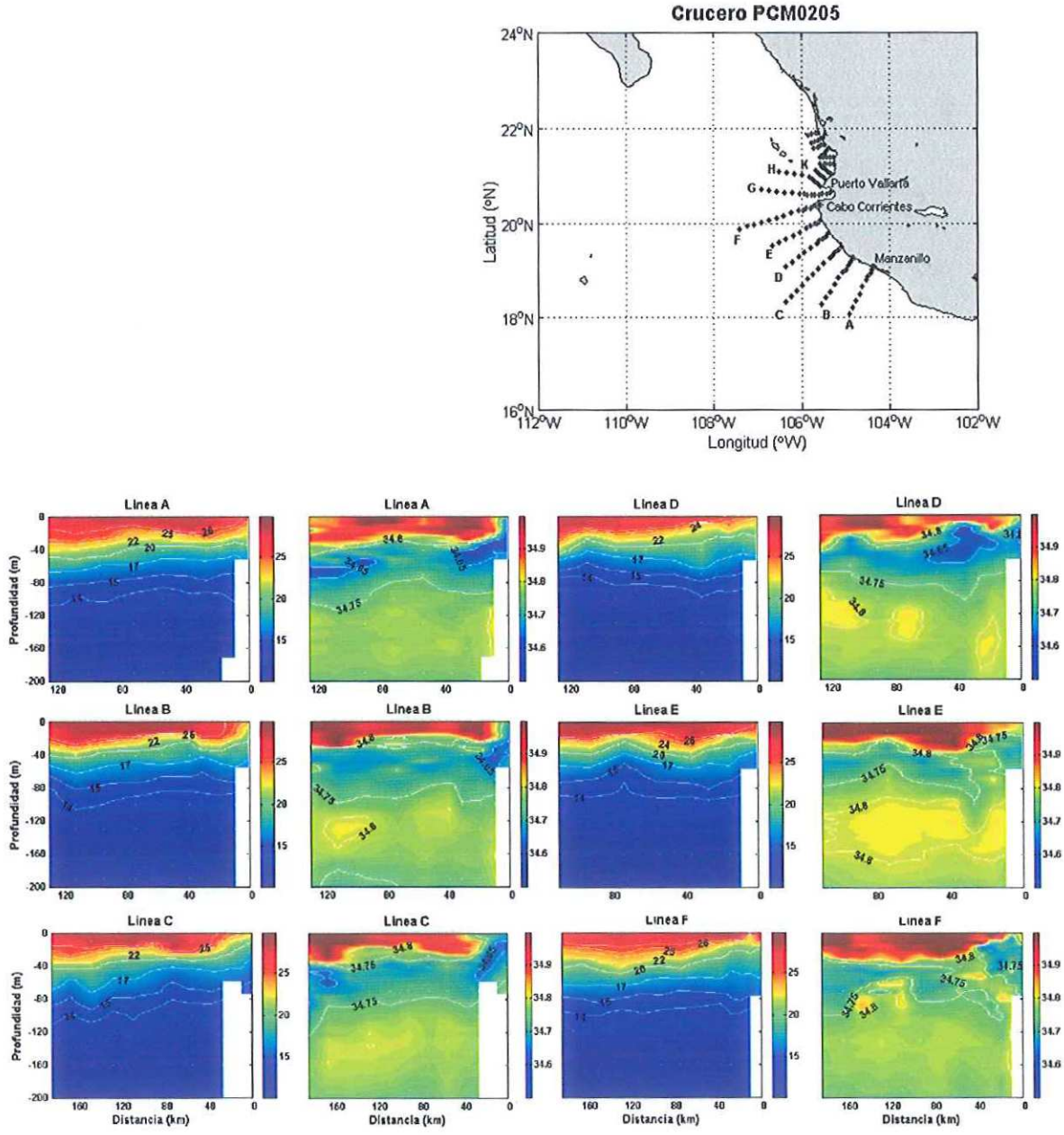


Figura 4. Perfiles verticales de temperatura (ºC) y salinidad de cada transecto para el crucero PCM0205.

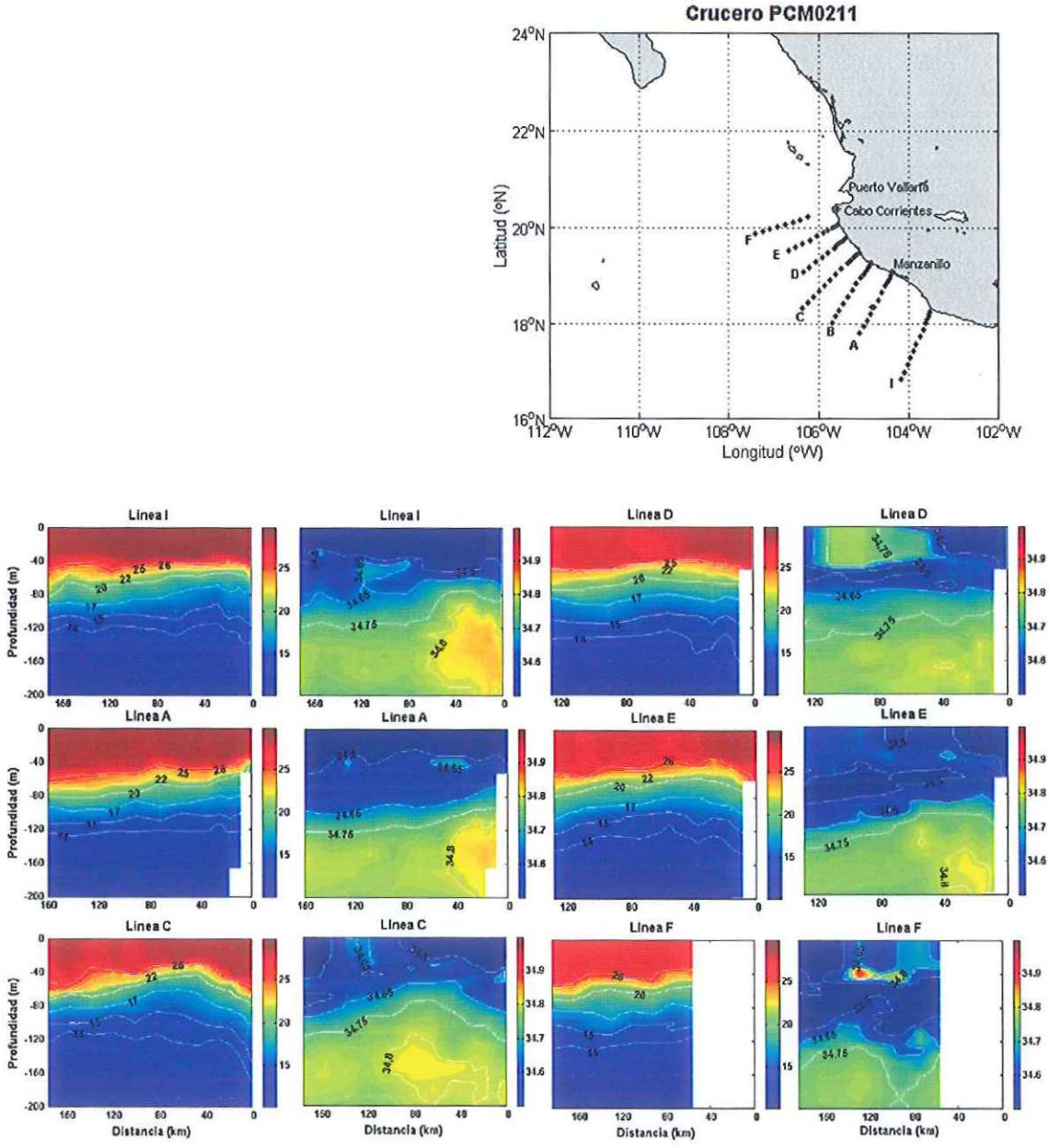


Figura 5. Perfiles verticales de temperatura (ºC) y salinidad de cada transecto para el crucero PCM0211.

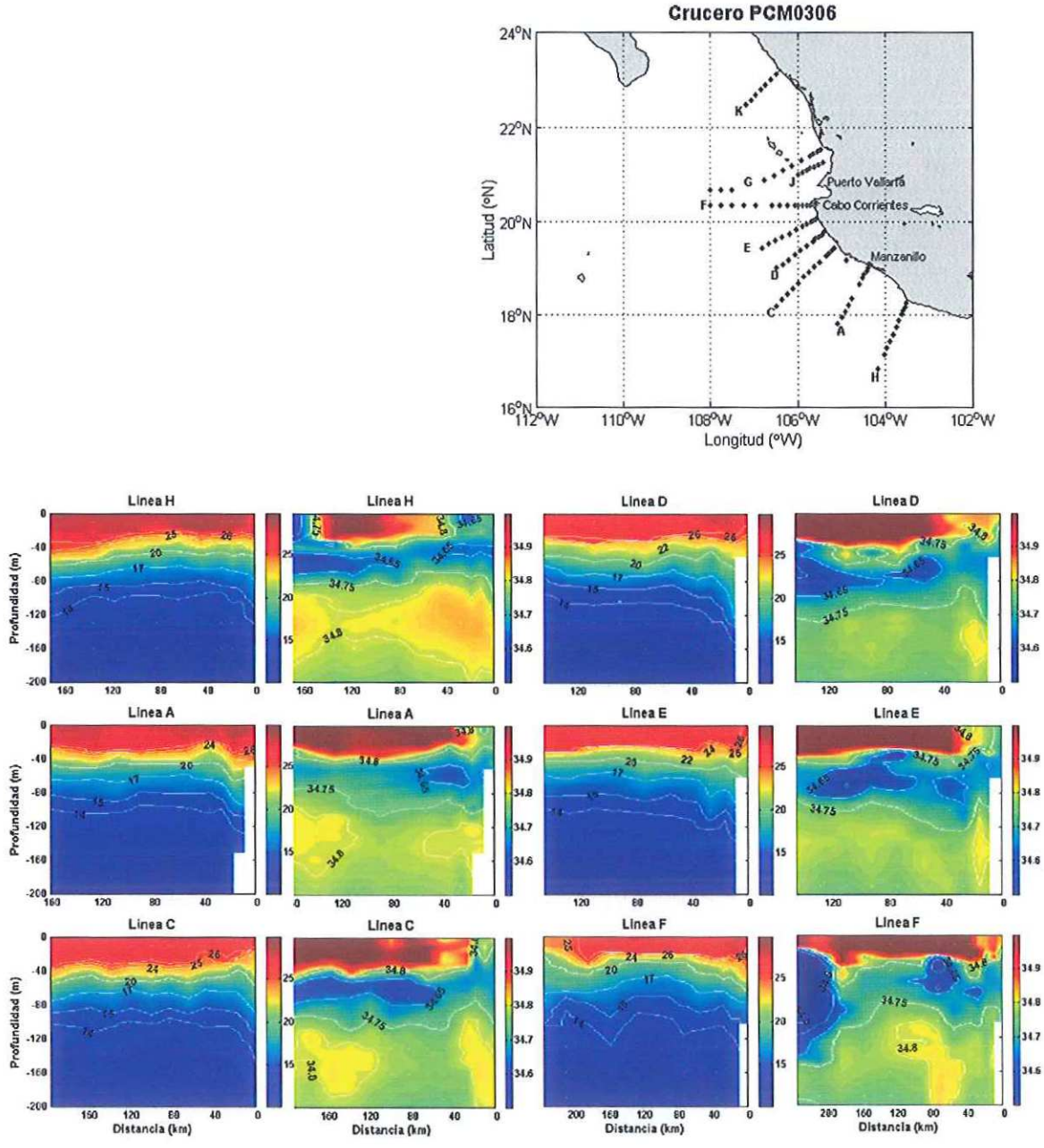


Figura 6. Perfiles verticales de temperatura (°C) y salinidad de cada transecto para el crucero PCM0306.

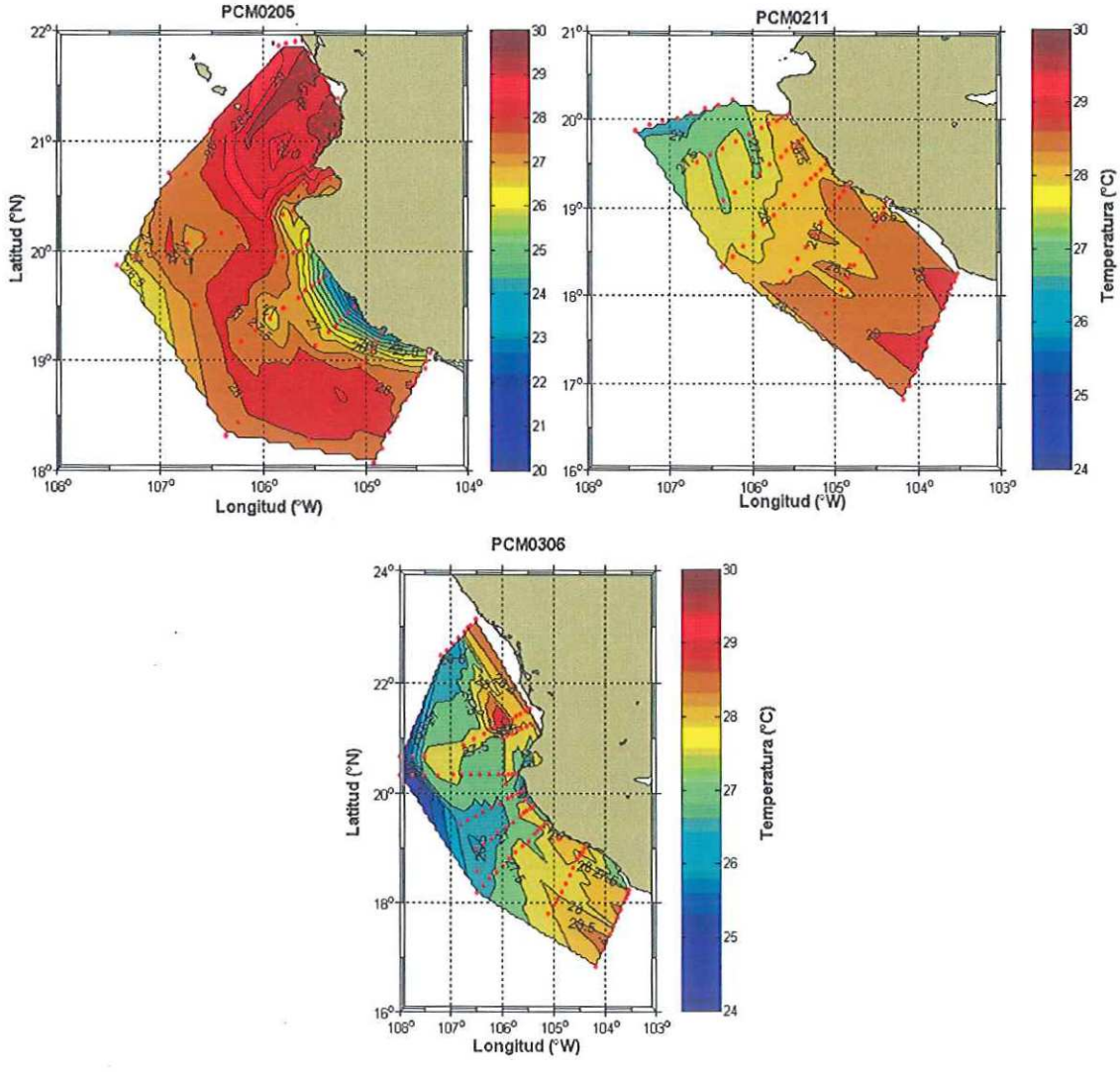


Figura 7. Contornos superficiales de temperatura (°C) de los cruceros de mayo 2002, noviembre 2002 y junio 2003 (PCM0205, PCM0211 y PCM0306).

III.2 Clorofila

En los perfiles verticales se presentaron dos grupos de datos que corresponden al grupo de estaciones costeras y oceánicas. La diferencia entre ambos fue la profundidad del máximo de Chl-*a* (Figura 8). El máximo de Chl-*a* para las estaciones costeras se encontró a ~20 m en los tres cruceros, con valores de hasta 12 mg chl m^{-3} para el crucero de mayo 2002 (PCM0205) y de ~ 2 mg chl m^{-3} para los cruceros de noviembre 2002 (PCM0211) y de junio de 2003 (PCM0306). El máximo de las estaciones oceánicas se encontró a los ~50 m con valores máximos de hasta 9 mg chl m^{-3} para PCM02005 (Figura 8). Un segundo máximo de Chl-*a* se presentó en algunas estaciones en los tres cruceros después de los 100 m con valores entre ~1 mg chl m^{-3}. El segundo máximo se aprecia claramente en los perfiles verticales de Chl-*a* obtenidos a partir de los datos del fluorímetro en el crucero PCM0306, donde se observa que se encuentra presente a lo largo de toda la región, entre Colima y Cabo Corrientes, después de los 70 m (Figura 9).

Los valores de Chl-*a* más altos se encontraron en el crucero de mayo de 2002, el mapa de contornos superficiales para este crucero resalta que los altos valores se extienden desde la región costera de Colima hasta Jalisco, alcanzado valores >2 mg chl m^{-3} casi hasta la mitad de las líneas en la región de Jalisco, frente a Cabo Corrientes y Puerto Vallarta (Figura 10-a). Las altas concentraciones de Chl-*a* que se aprecian en el mapa de contornos superficiales, se observan a través de la columna eufótica, en los perfiles verticales de la región costera para este crucero (Figura 8). En noviembre 2002, los altos valores se encuentran muy

cercanos a la costa, en las primeras 4 estaciones; se alcanza a observar un pulso de alta concentración de Chl-*a* lejos de las estaciones costeras, en la región de Jalisco (Figura 10-b). En el mapa de contornos superficiales de junio 2003, se observa que los altos valores de Chl-*a* se localizan en la región de Cabo Corrientes, muy cercanos a la costa y hacia el interior de Bahia Banderas (Figura 10-c).

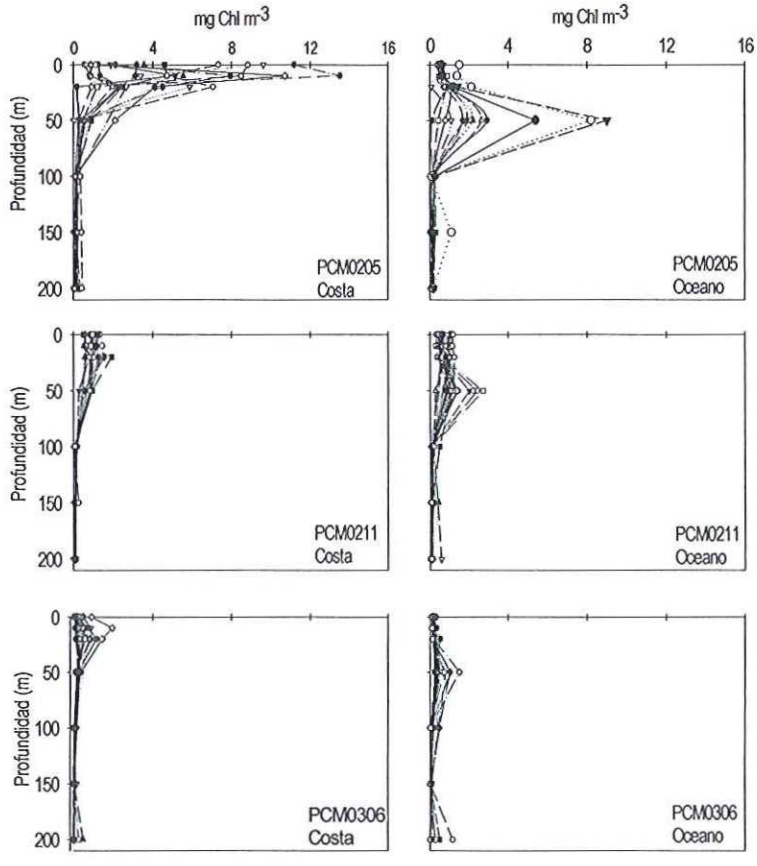


Figura 8. Perfiles verticales costeros y oceánicos de los cruceros PCM0205, PCM0211 y PCM0306.

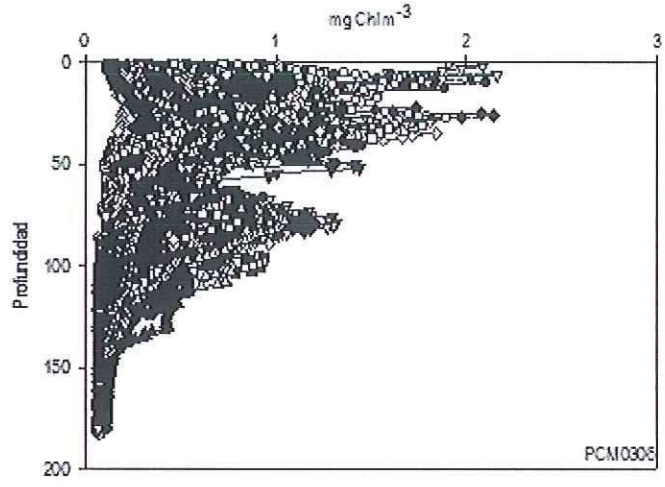
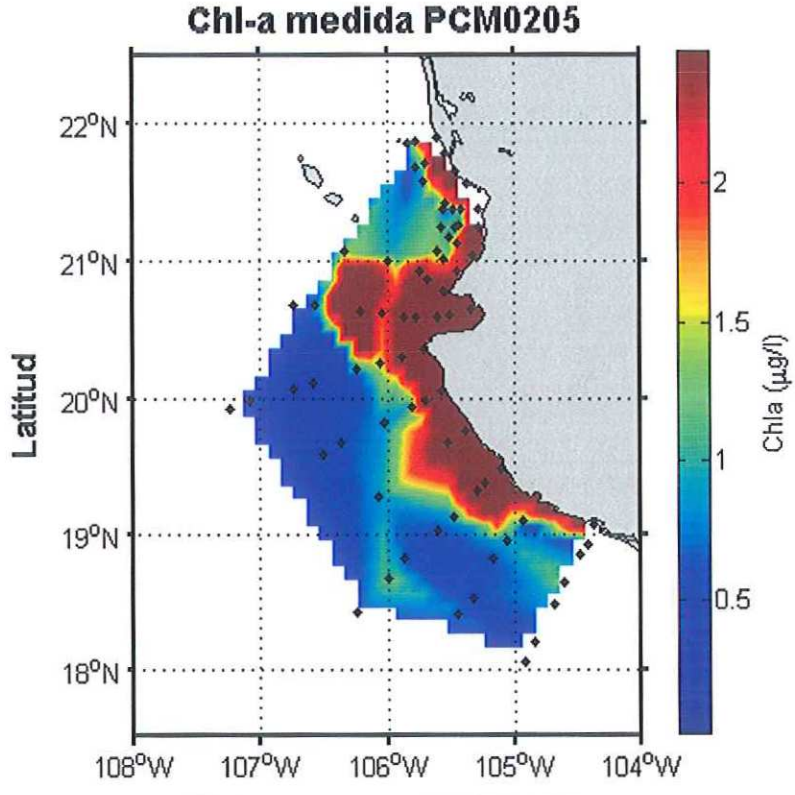
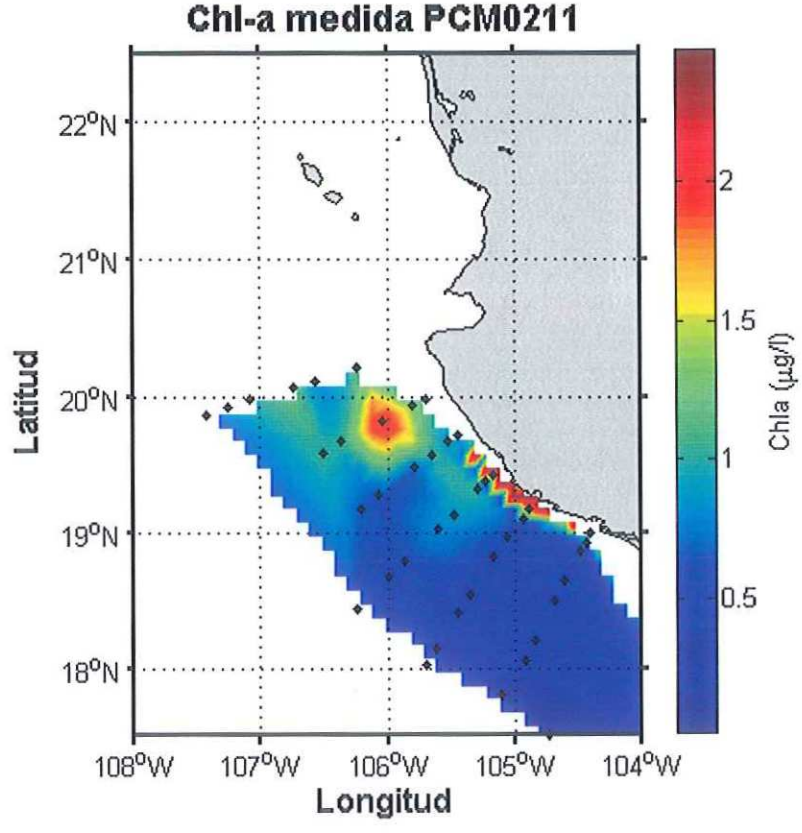


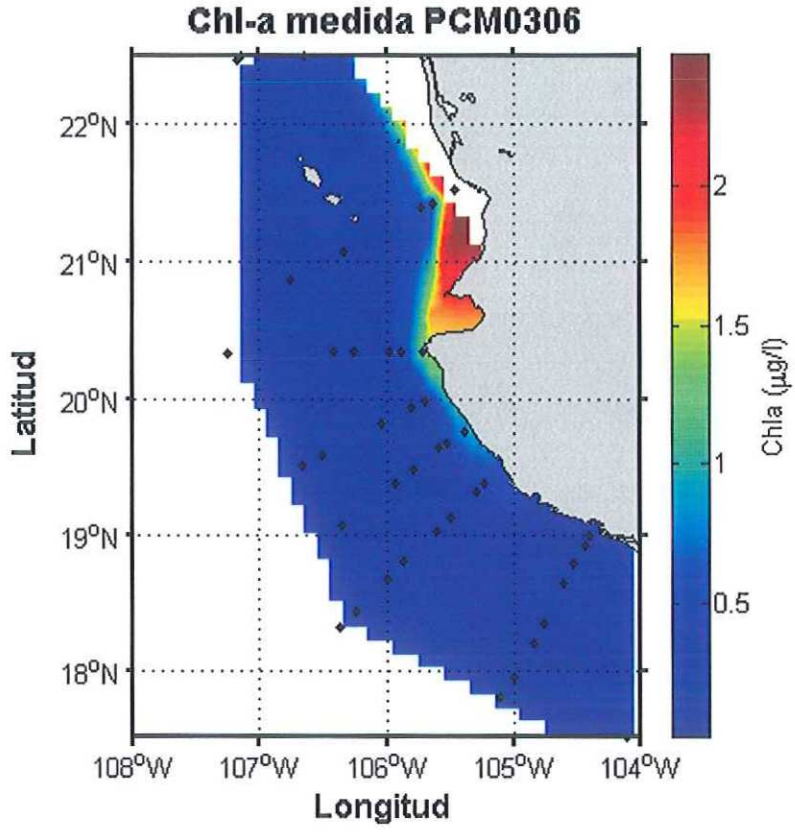
Figura 9. Perfiles verticales de clorofila (*in vivo*) de cada estación del crucero PCM0306.

a)


Chl-a medida PCM0205
22°N
21°N
20°N
19°N
18°N
Latitud
108°W
107°W
106°W
105°W
104°W
2
1.5
1
0.5
Chla (µg/l)

b)


Chl-a medida PCM0211
22°N
21°N
20°N
19°N
18°N
Latitud
108°W
107°W
106°W
105°W
104°W
Longitud
2
1.5
1
0.5
Chla (µg/l)



c)

Figura 10. Mapas de contornos superficiales de Chl-*a* medida para: a) PCM0205, b) PCM0211, c) PCM0306.

III.3 Productividad primaria medida *in situ*

Los perfiles verticales de productividad primaria muestran que los máximos para el crucero PCM0205 se encontraron entre los 25 y 30m (~20 % de $E_{0\ PAR}$). Para el mismo crucero se encontró que un grupo de estaciones presentó una distribución vertical semejante, con el máximo a la misma profundidad (30m), con valores entre los 3 y los 4 mgC m^{-3} h^{-1}. A este grupo corresponden las estaciones que se situaron al norte, en la región de Jalisco (19° 20'' N y 103°55" W) (Figura 11-a_1).

Para las estaciones que se situaron al sur, en la región de Colima (19°18" N y 103° 31"W), los valores máximos se presentaron aproximadamente a la misma profundidad que en la zona norte, sin embargo, la tasa de fijación de carbono fue diferente, entre 0.5 y 1.5 mgC m^{-3} h^{-1} (Figura 10-a_2). Esta diferencia entre las regiones norte y sur no se encontró en los perfiles verticales de productividad primaria de los otros dos cruceros. Los máximos para el crucero de noviembre 2002 (PCM0211) se encontraron entre los 40 y 50 m, con valores entre los 0.5 y 1 mgC m^{-3} h^{-1}, mientras que para el crucero de junio 2003 (PCM0306), se encontró que algunas estaciones presentaban dos máximos entre los 0 y 15 m, con valores que oscilaron entre 0.5 – 3.5 mgC m^{-3} h^{-1} (Figura 11-c).

La productividad primaria integrada promedio en la columna de agua para las estaciones del crucero PCM0205 fue de 361 mgC m^{-3} d^{-1} (el valor mínimo fue de 106 y el máximo de 637 mgC m^{-2} d^{-1}). Los valores más altos de productividad primaria se encontraron en la zona norte, en la estación K5 (637 mgC m^{-2} d^{-1}) y G8 (611 mgC m^{-2} d^{-1}) frente a Puerto Vallarta y Cabo Corrientes respectivamente. La

tasa de fijación de carbono para las estaciones que corresponden al grupo de las estaciones costeras fue de 465 mgC m^{-2} d^{-1} y para las estaciones oceánicas fue de 295 mgC m^{-2} d^{-1}.

Para el crucero de noviembre 2002 (PCM0211), la productividad primaria promedio fue de 200 mgC m^{-2} d^{-1}. El promedio de los datos de producción para las estaciones que corresponden al grupo de estaciones costeras fue de 308 mgC m^{-2} d^{-1} y de 118 mgC m^{-2} d^{-1} para el grupo de las estaciones oceánicas. La productividad primaria promedio para el crucero de junio 2003 (PCM0306) fue de 447 mgC m^{-2} d^{-1}; con valores promedio para las estaciones costeras de 512 mgC m^{-2} d^{-1} y de 253 mgC m^{-2} d^{-1} para las estaciones oceánicas. Las tasas de fijación de carbono más altas medidas se encontraron en la estación H9 (800 mgC m^{-2} d^{-1}) en la franja costera (< 50Km) de la región de Colima, y en las estaciones E6 y F9 que se situaron frente a la región de Cabo Corriente, con tasas de fijación de carbono de 551 y 554 mgC m^{-2} d^{-1} respectivamente.

Los perfiles de las razones de asimilación (cantidad de carbono fijado por unidad de clorofila y por unidad de tiempo) de cada crucero mostraron los valores más altos para el crucero de junio 2003, con valores máximos (~8mgC (mg chl)$^{-1}$ h^{-1}) entre los 15-20 m. Los valores máximos del perfil de mayo 2002 se encontraron entre los 10-15m con razones de asimilación de ~1.5- 2 mgC (mg chl)$^{-1}$ h^{-1}. Para el crucero de noviembre, el perfil se ve relativamente homogéneo con valores de < 2 mgC (mg chl)$^{-1}h^{-1}$ a través de toda la columna de agua (Figura 11).

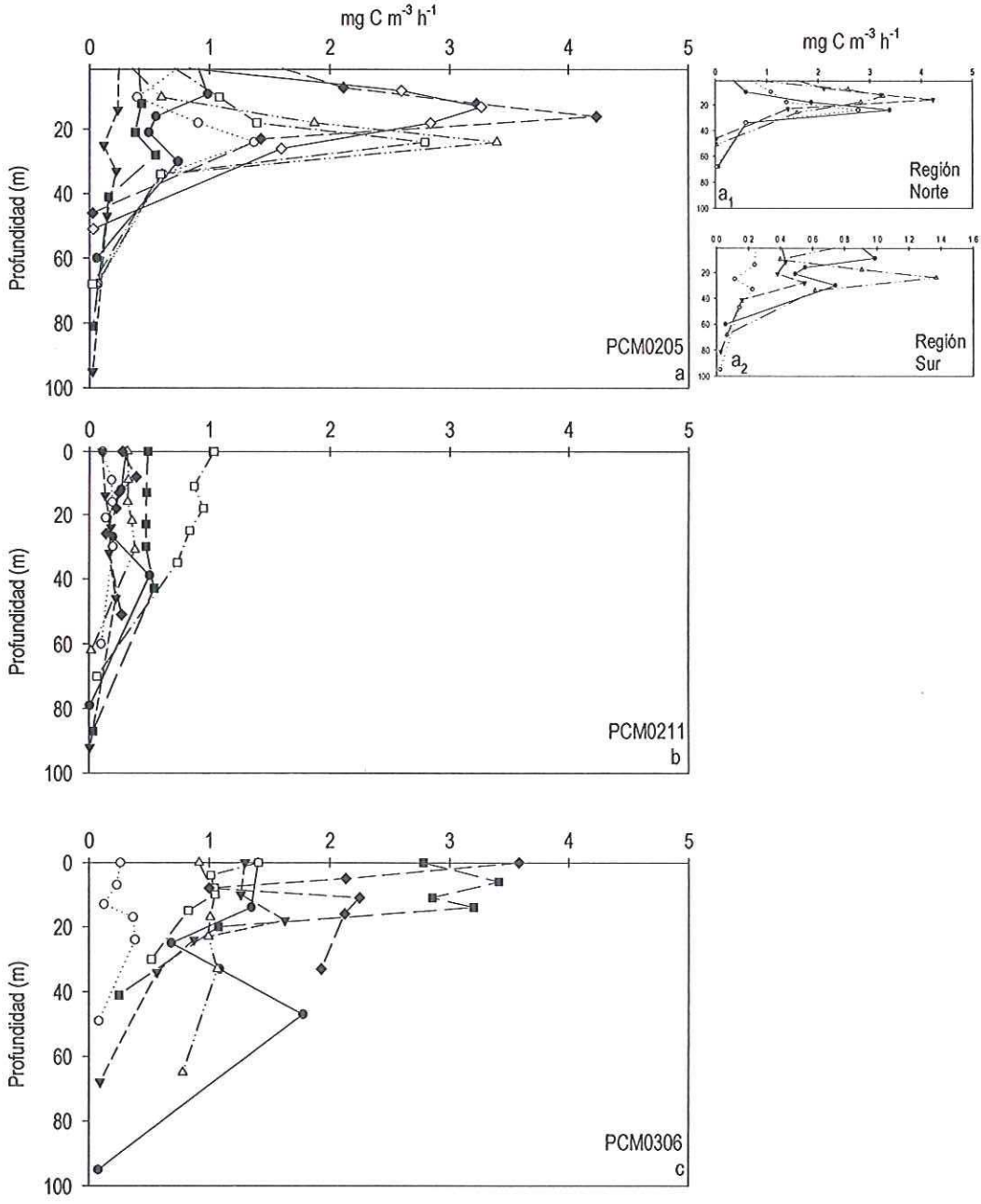


Figura 11. Perfiles de productividad primaria *in situ* de los cruceros PCM0205 (a), PCM0211 (b) y PCM0306 (c). La a_1 corresponde al grupo de estaciones al norte en la región de Jalisco, a_2 son el grupo de estaciones al sur en la región de Colima.

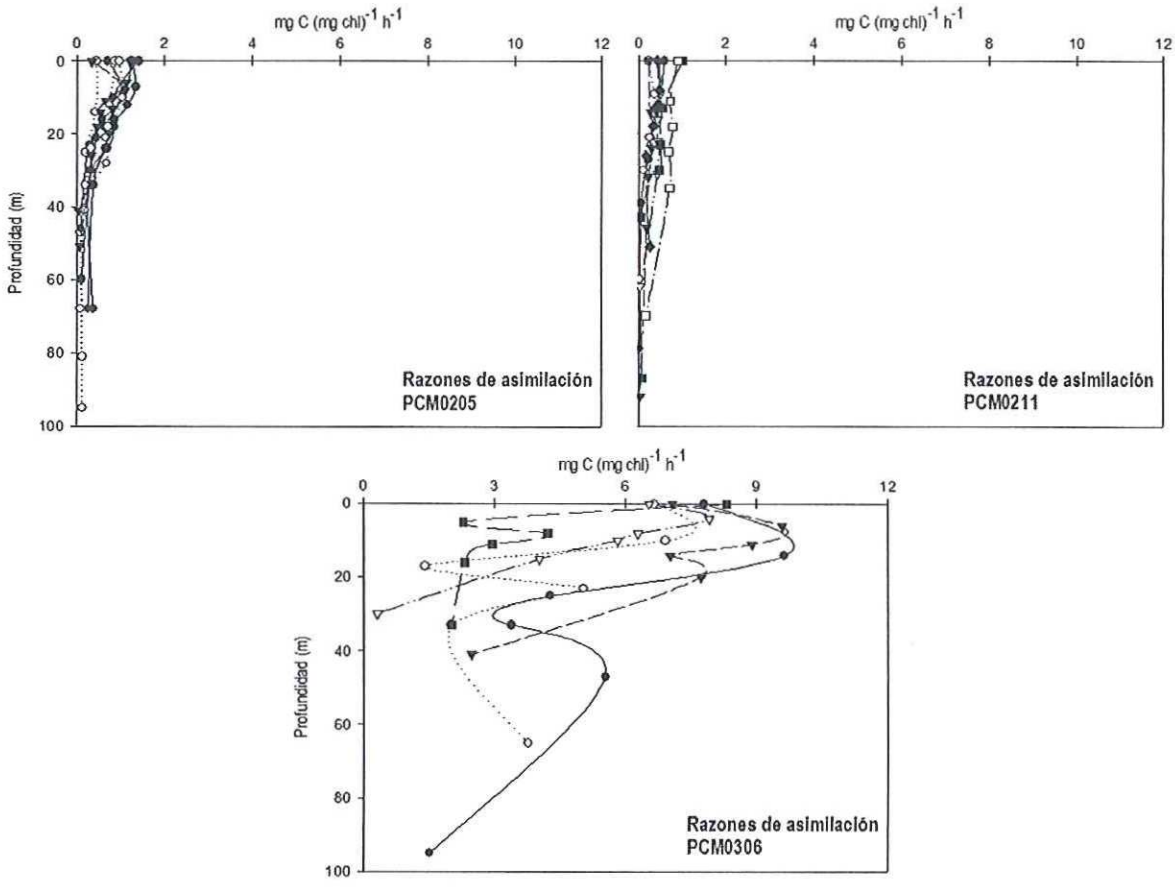


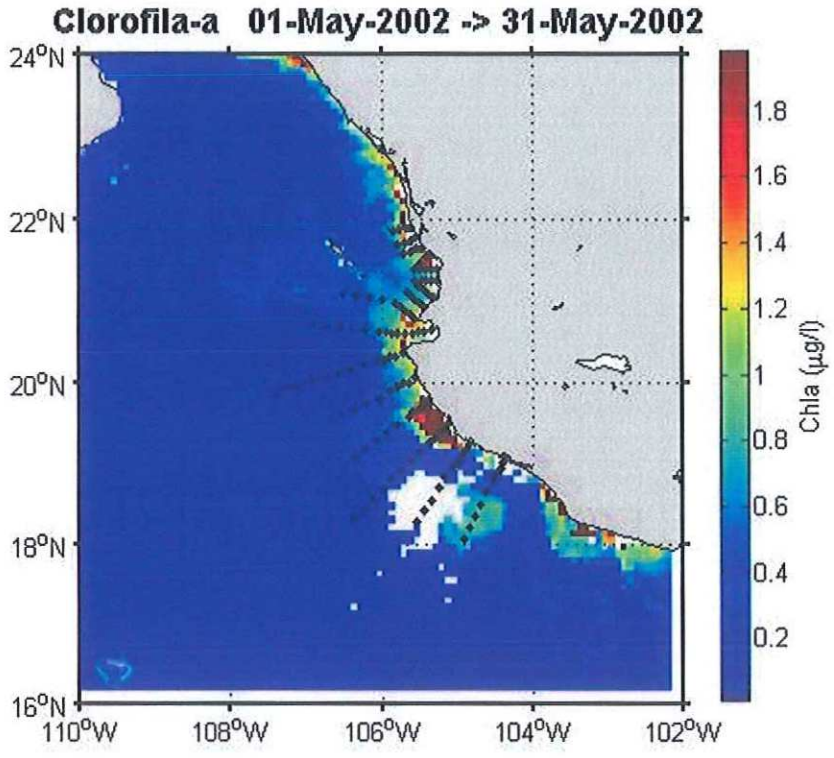
Figura 12. Razones de asimilación para los cruceros PCM0205, PCM0211, PCM0306.

III.4 Productividad primaria modelada

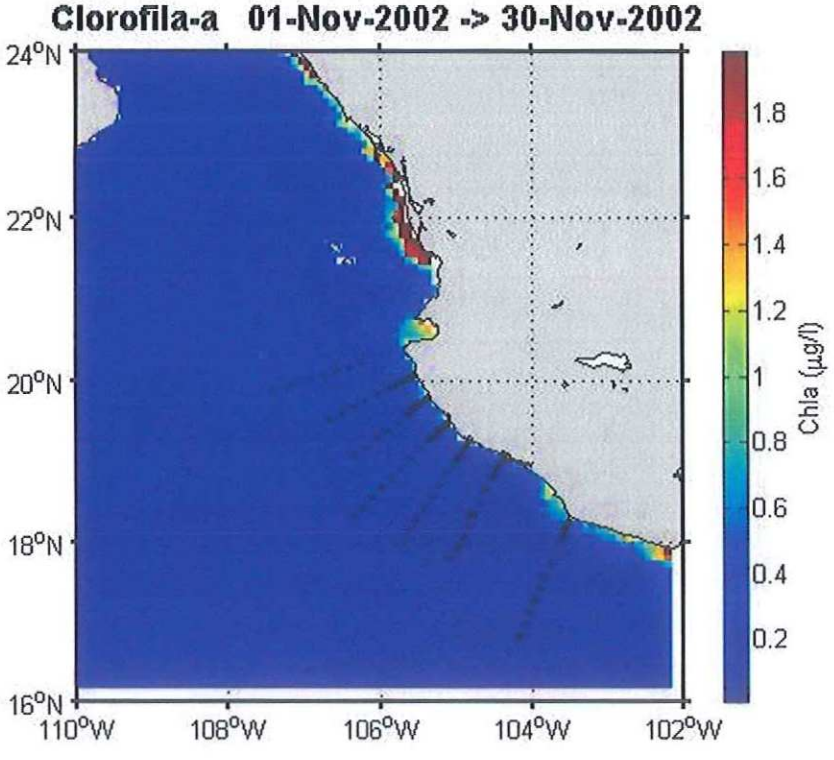
Debido a que en la zona se presentaron dos máximos de Chl-*a* durante los tres cruceros, el primero entre los 20 y 50m, y el segundo máximo generalmente después de los 90m, para cada crucero se calculó si el aporte del segundo máximo a la productividad primaria era significativo. Para esto se calculó la profundidad de la zona eufótica (Zeu) promedio de la región, con la finalidad de saber si de manera general el segundo máximo de Chl-*a* se encontraba dentro o debajo de la Zeu. Se utilizaron las imágenes mensuales promedio de K490 obtenidas del sensor MODIS Aqua y la ecuación de regresión lineal con los parámetros propuestos por Cervantes-Duarte et al. (2000) para la región sur del Golfo de California, ya que son los datos más cercanos a la zona de estudio.

La Zeu promedio fue de 53m para mayo 2002, de 54m para noviembre 2002 y 50m para junio 2003. El promedio de la Zeu obtenido *in situ*, a partir de la lectura del disco de Secchi, en las estaciones dónde se hicieron incubaciones con ^{14}C para el mes de mayo 2002 fue de 63m, para noviembre del 2002 fue de 72m y para junio 2003 fue de 48m. De acuerdo a estos resultados el segundo máximo de manera general se encontró por debajo de la Zeu promedio en los tres cruceros. Con los datos de productividad primaria *in situ* al 1% de PAR, se obtuvo que a esta profundidad la contribución a la productividad primaria integrada es menor al 1%. Con base en estos resultados, se decidió utilizar los datos del perfil de clorofila promedio hasta la profundidad del 1% de PAR. De esta manera es posible modelar el perfil de clorofila considerando que el máximo se encuentra dentro de la zona eufótica.

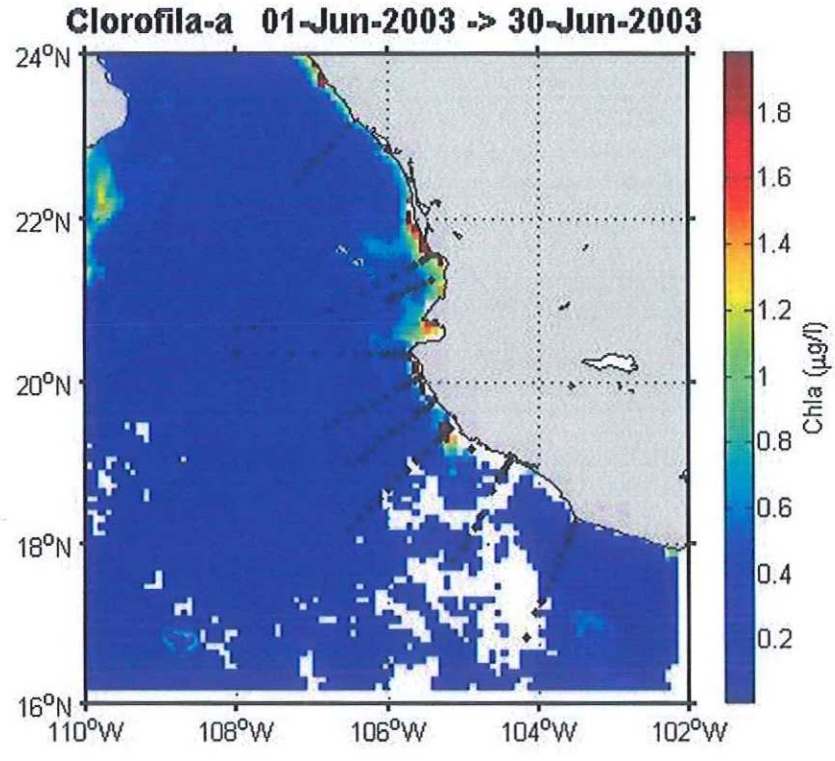
El promedio mensual de clorofila satelital para mayo 2002 fue de 0.52 mg m^{-3}, con un rango de 0.11-7.8 mg m^{-3}, en noviembre 2002 fue de 0.28 mg m^{-3} el mínimo fue de 0.1 y el máximo de 0.32 mg m^{-3}, para junio 2003 fue de 0.3 mg m^{-3} con un rango de 0.12-2.99 mg m^{-3} (Figura 13, Tabla I). El perfil promedio de clorofila modelado para el crucero de mayo 2002 (PCM0205) presentó los valores de clorofila más altos. Se encontró la concentración más alta en la zona costera (8mg chl m^{-3}) aproximadamente a los 20 m, patrón similar al encontrado en la clorofila medida *in situ*. El máximo para la región oceánica se presentó ~35 m. Para los meses de noviembre 2002 y junio 2003 los máximos en ambas regiones se encontraron ~ 30 m en las estaciones costeras y ~ 50 m para las estaciones oceánicas. Para junio 2003 los perfiles promedio tanto de la zona costera como de la región oceánica tuvieron los valores de clorofila más bajos (Figura 14). El parámetro H, que determina la clorofila integrada, fue mayor para el mes de mayo 2002 tanto para las estaciones costeras (241mg m^{-3}) como para las estaciones oceánicas (77 mg m^{-3}). Los valores de Zm (máximo de clorofila) para el mes de mayo fueron los más someros (22 -30 m), mientras que para noviembre 2002 la profundidad a la que se calculó Zm fue de manera general el más profunda (39-43 m) (Tabla 1, Figura 14).


Clorofila-a 01-May-2002 -> 31-May-2002
24°N
22°N
20°N
18°N
16°N
110°W
108°W
106°W
104°W
102°W
1.8
1.6
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
Chla (µg/l)

a)


Clorofila-a 01-Nov-2002 -> 30-Nov-2002
24°N
22°N
20°N
18°N
16°N
110°W
108°W
106°W
104°W
102°W
1.8
1.6
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
Chla (µg/l)

b)



c)

Figura 13 Imágenes mensuales de clorofila MODIS- aqua para: a) mayo 2002, b) noviembre 2002, c) junio 2003.

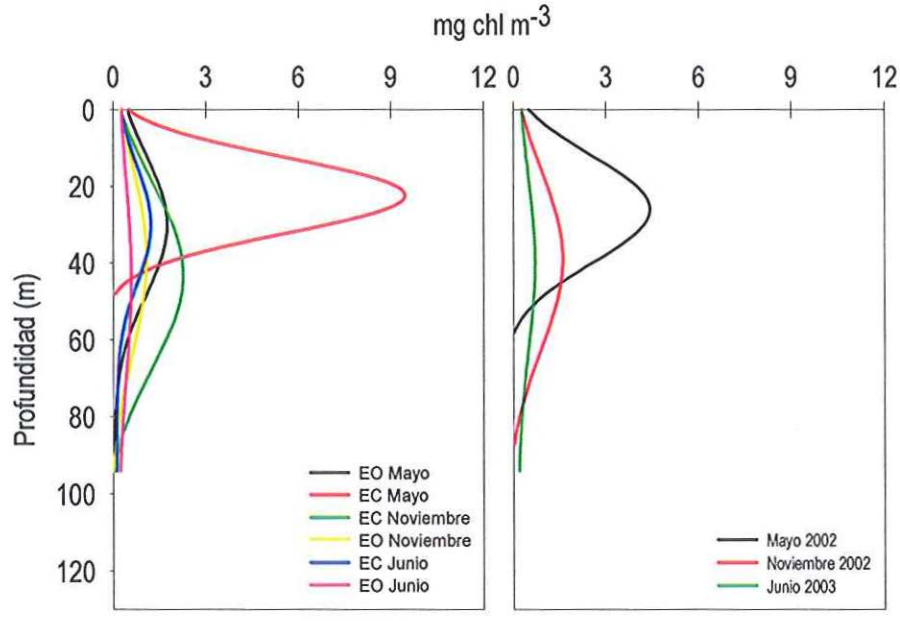


Figura 14. Perfiles verticales promedio de clorofila calculados a partir de la clorofila superficial derivada de la imagen mensual compuesta del sensor MODIS aqua. a) perfiles promedio estaciones costeras y oceánicas. b) perfiles promedio para toda la región para los cruceros PCM0205, PCM0211, PCM0306.

Tabla I. Parámetros de la curva Gausiana que describen el perfil de clorofila para cada crucero en la región costera y la región oceánica. Chl_{sat} promedio de clorofila obtenida del sensor MODIS aqua. $B_{0\,sat}$ clorofila base obtenida de la Chl_{sat}. H es la clorofila integrada sobre $B_{0\,sat}$. σ es el ancho del máximo de clorofila. Zm es la profundidad del máximo de clorofila.

		Chl_{sat} (mg m^{-3})	H (mg m^{-2})		σ (m)		Zm (m)		$B_{0\,sat}$ (mg m^{-3})	
			EC	EO	EC	EO	EC	EO	EC	EO
05/02	$\bar{x}$	0.52 (+/- 0.64)	241 (+/- 171)	77 (+/- 27)	10 (+/- 5)	18 (+/- 7)	22 (+/- 13)	30 (+/- 1)	-0.25	0.04
11/02	$\bar{x}$	0.28 (+/-0.32)	151 (+/- 89)	72 (+/- 17)	24 (+/- 18)	25 (+/- 9)	39 (+/- 11)	43 (+/- 32)	-0.25	-0.09
06/03	$\bar{x}$	0.3 (+/- 0.22)	41 (+/- 13)	27 (+/-0. 16)	15 (+/- 5)	26 (+/- 13)	30 (+/- 14)	44 (+/- 14)	0.12	0.17

Para estimar la producción modelada ($PP_{modelada}$) en la región costera y oceánica del crucero de mayo 2002 (PCM0205), se utilizó el modelo no espectral propuesto por Platt et al., 1991, esto debido a que en el perfil de clorofila se encontraron concentraciones mayores a 1.5 mg chl m^{-3} (Figura 13). La tasa de fijación de carbono modelada en toda la región para el crucero PCM0205 fue de 427mg C m^{-2} d^{-1}, siendo 1.2 veces mayor que la $PP_{in\ situ}$ (361 mg C m^{-2} d^{-1}). El valor estimado para las estaciones costeras en este crucero, fue de 455 mgC m^{-2} d^{-1} mientras que para las estaciones oceánicas, la tasa de fijación de carbono fue de 259 mgC m^{-2} d^{-1}.

Para el crucero de noviembre 2002 (PCM0211) la $PP_{modelada}$ para toda la región fue de 197 mgC m^{-2} d^{-1}, para las estaciones costeras fue de 198 mgC m^{-2} d^{-1}, mientras que para las estaciones oceánicas fue de 192 mg C m^{-2} d^{-1}. Para el crucero de junio 2003 (PCM0306) los valores de $PP_{modelada}$ subestimaron la productividad primaria *in situ* aproximadamente a la mitad en todas las estimaciones. La tasa de fijación modelada para toda la región durante el crucero PCM0306 fue de 235 mgC m^{-2} d^{-1}, mientras que para las estaciones costeras fue de 257 mgC m^{-2} d^{-1} y para las estaciones oceánicas fue de 226 mg C m^{-2} d^{-1} (Tabla II).

Tabla II. Valores promedio de productividad primaria integrada en la zona eufótica (mg C m^{-2} d^{-1}) estimada *in situ* y modelada. El modelo no espectral propuesto por Platt et al., (1991) ** se utilizó en el crucero PCM0205, en el estimado de toda la región y de las estaciones costeras. La modificación al modelo propuesto por Giles-Guzmán y Álvarez- Borrego (2004) se utilizó en el resto de las estimaciones. El valor entre paréntesis corresponde al error estándar de la media.

	Toda la región		**Región costera**		**Región oceánica**	
	In situ	**Modelada**	***In situ***	**Modelada**	***In situ***	**Modelada**
PCM0205	361(179)**	427	465(157)**	455	295(145)	259
PCM0211	200(123)	192	308(115)	198	118(29)	197
PCM0306	447(232)	235	512(264)	257	253(222)	226

DISCUSIONES

IV.1 Variabilidad de la productividad primaria

Los resultados de los datos de temperatura y salinidad mostraron que las características físicas de la región variaron tanto espacial como temporalmente en los tres cruceros. Los cambios más notorios se apreciaron en la profundidad a la que se encontró la termoclina en la región costera, estos cambios estuvieron asociados a los períodos de surgencias y estratificación de la columna de agua. La época de surgencias de esta zona ha sido reportada para la temporada de primavera, desde marzo hasta finales de junio, cuando los vientos son predominantes del noroeste (Roden, 1972; García-Reyes, 2005; Torres-Orozco et al., 2005) (http://www.pfeg.noaa.gov/products/) (Figuras 4, 5, 6, 7 y 15).

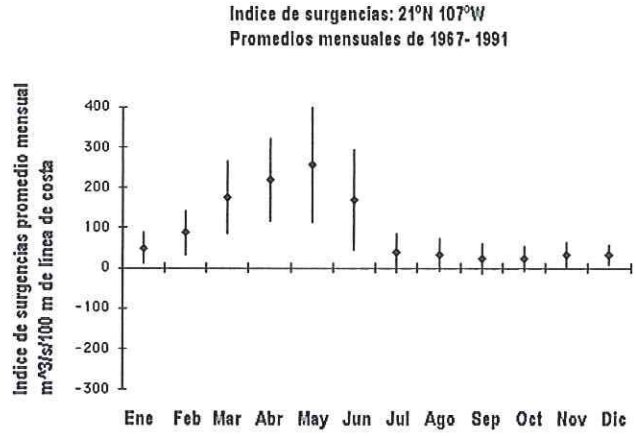


Figura 15. Promedio del índice de surgencias en el Pacífico tropical mexicano (frente a la región de Cabo Corrientes desde 1967-1991) (http://www.pfeg.noaa.gov/products/).

El contraste en la profundidad de la termoclina fue más evidente entre los cruceros de mayo 2002 cuando se observó el efecto de las surgencias, y el crucero de noviembre 2002, cuando la termoclina se encontró más profunda debido al calentamiento de la capa superficial del océano (agua más estratificada), que hunde la termoclina hasta los 50 y 60 m. Las variaciones en la profundidad a la cual se encuentra la termoclina vienen acompañadas con variaciones en la nutriclina. En zonas de surgencias, debido al afloramiento de agua, la profundidad a la cual ambas se van a encontrar será más somera. El surgimiento de agua profunda viene acompañado de un aporte importante de nutrientes hacia la superficie, y dado que se tiene una capa de mezcla más somera y con suficiente luz, este tipo de eventos pueden verse reflejados en episodios o pulsos de alta biomasa y/o productividad primaria (Garret, 1997; Cullen et al., 2002; Garret y Marra, 2002).

Se ha reportando que en los márgenes continentales del Pacífico tropical oriental, la profundidad de la termoclina es generalmente controlada de manera local por las surgencias inducidas por el viento (Pennington et al., 2006). La importancia de los eventos de surgencia es tal, que se estima que los márgenes continentales del Pacífico tropical oriental aportan hasta un 10% de la productividad primaria de todo el Océano Pacífico (Pennington et al., 2006).

El aumento en la productividad primaria y la biomasa fitoplanctónica resultado de forzamientos físicos como el estrés del viento (que puede producir surgencias) ha sido reportado para la región del Golfo de Tehuantepec y el Sistema de la Corriente de California. Los valores reportados para el Golfo de

Tehuantepec van de 1.5 -3 mg chl m^{-3} y 0.5 -1.15 gC m^{-2} d^{-1}, respectivamente (Robles-Jarero y Lara-Lara, 1993; Fiedler, 1994; Gaxiola-Castro y Nájera-Martínez, 1996; Nájera-Martínez et al., 1997; Lara-Lara y Bazán-Guzmán, 2005; Fiedler y Talley, 2006; López-Calderón et al., 2006; Pennington et al., 2006). Para la Corriente de California, los valores de biomasa fitoplanctónica (Chl-*a*) son 0.5-5 mg chl m^{-3}(Gaxiola-Castro et al., 1999; Aguirre-Hernández et al., 2004), alcanzando concentraciones de clorofila *in situ* de hasta 15 mg chl m^{-3} en regiones del Sistema de la Corriente de California (González-Morales y Gaxiola-Castro, 1991). Las tasas de fijación de carbono reportadas son de ~35- 824 mgC m^{-2} d^{-1} (González-Morales y Gaxiola-Castro, 1991; Aguirre-Hernández et al., 2004; Sosa-Ávalos et al., 2006). Debido a estos valores de biomasa y productividad primaria, estas regiones son consideradas como zonas altamente productivas del Pacífico mexicano (Gaxiola-Castro y Muller-Krager, 1998; Carr y Kearns, 2003). Si consideramos las altas tasas de fijación de carbono encontradas en este trabajo, sobre todo para la región costera, durante el crucero de mayo 2002 (465 mg C m^{-2} d^{-1}) y de Junio 2003 (512 mg C m^{-2} d^{-1}), podemos concluir que la región de Cabo Corrientes en la temporada de surgencias, es una región de alta productividad primaria similar a otras regiones del Pacífico Mexicano.

La concentración de clorofila satelital promedio para los años 2002 y 2003 mostró que el florecimiento de clorofila comenzó a disminuir en el mes de mayo y terminó a mediados de junio en los dos años, coincidiendo con el relajamiento de la temporada de las surgencias en esta región (Figura 16-a,b). Para mayo 2002 se encontraron altos valores de Chl-*a* (>0.5 mg chl m^{-3}), tanto en los datos *in situ*,

como en el promedio mensual de satélite; Sin embargo, las tasas de fijación de carbono llegaron a ser más altas (casi medio gramo por día) en otras temporadas cuando la concentración de Chl-*a* fue menor <0.5 mg chl m^{-3} (junio 2003). Esta diferencia se refleja en las razones de asimilación bajas para mayo (alta biomasa, menor productividad primaria) y altas en junio (baja biomasa y alta productividad primaria), situación que ya ha sido reportada para otras regiones de surgencias (Huntsman y Barber, 1977; Toon et al., 2000; Montecino et al., 2004).

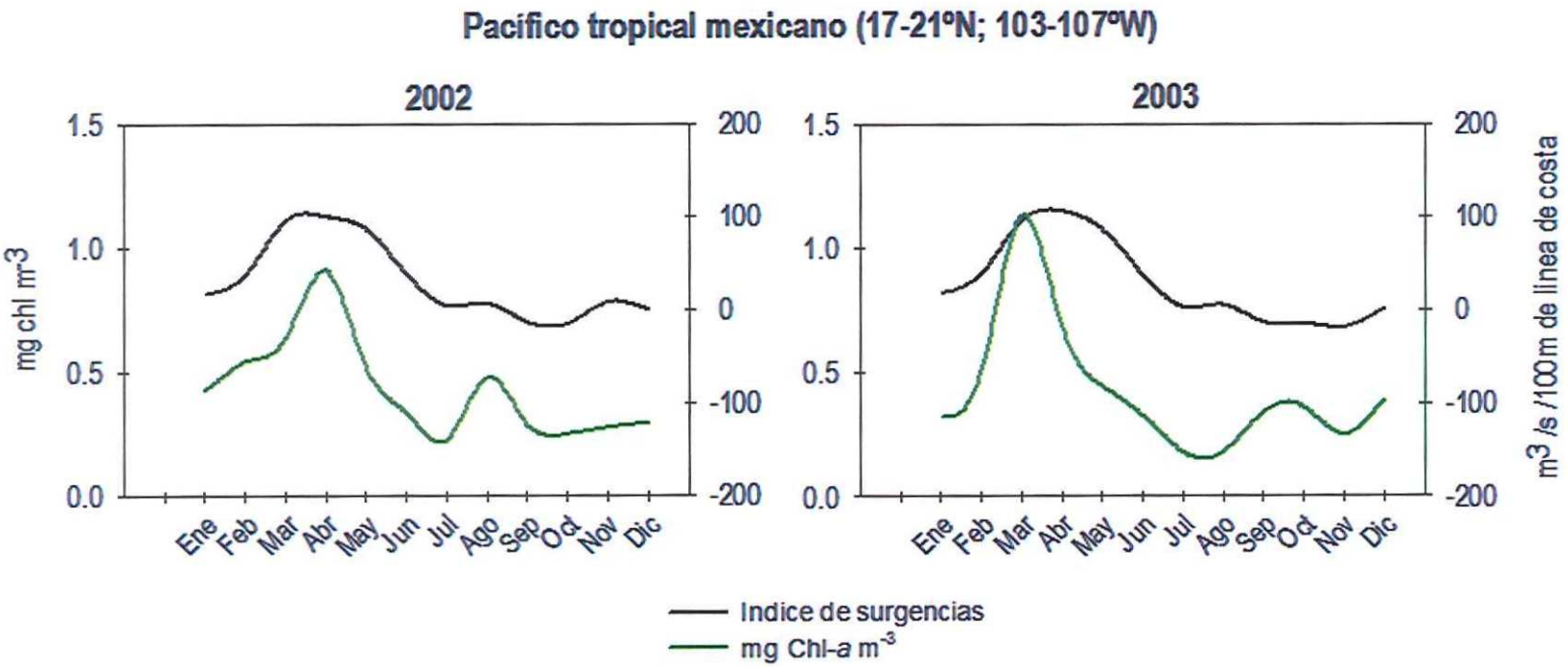


Figura 16. Promedio del índice de surgencias (m^{-3} s^{-1}/100 m de línea de costa) frente a la región de Cabo Corrientes (http://pfeg.noaa.gov/products) y promedio mensual de clorofila satelital obtenida del sensor SeaWIFS para los años 2002 y 2003 para la región del Pacífico tropical oriental (17-21°N; 103-108°W) (http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/products/).

El cambio en la respuesta del fitoplancton durante mayo y al final de la temporada de surgencias (junio), se puede explicar al considerar que a pesar de la alta disponibilidad de nutrientes en la columna de agua durante el afloramiento de aguas profundas, la estabilidad de la parte superior del océano es baja, por lo tanto las células fitoplanctónicas se encuentran moviéndose a través de la zona eufótica, siendo sometidas a diferentes niveles de irradiancia, y como consecuencia las células se aclimatan a un promedio de luz bajo (Garret, 1997). Se ha visto que durante episodios de alta turbulencia, el tipo de células que dominan son generalmente células grandes, por ejemplo diatomeas, que presentan una cinética de asimilación de nutrientés diferente a células pequeñas, y que por el hecho de estar sujetas a un promedio de luz bajo, incrementan la concentración de clorofila por unidad de célula (Probyn, 1985; Yentsch y Phinney, 1989; González-Morales y Gaxiola-Castro, 1991; Basterretxea y Arístegui, 2000; Toon et al., 2000; Cullen et al., 2002).

Cuando la columna de agua alcanza a estabilizarse, por ejemplo durante el relajamiento de una surgencia, existe un período de estratificación en el que la columna de agua se encuentra rica en nutrientes y con suficiente luz. Bajo estas condiciones el fitoplancton es estimulado a crecer y dividirse rápidamente, resultando en números de asimilación altos, como los encontrados para el junio de 2003 (Mann y Lazier, 1991; Garret, 1997; Garret y Marra, 2002). La situación opuesta, se presentó en noviembre 2002, cuando se encontró que las condiciones oceanográficas en la región fueron diferentes a los cruceros de primavera. La

columna de agua se encontró más estratificada, y la profundidad de la termoclina y haloclina fueron más profundas (> 50m), así que a pesar de que en la región las condiciones de estratificación favorecen a que los organismos fitoplantónicos ya no se encuentren sujetos a grandes migraciones verticales a través de la zona eufótica, la disponibilidad de nutrientes en estas condiciones es baja, situación que se vio reflejada en la baja concentración de Chl-*a* y productividad primaria (<0.2 mg chl m^{-3} y <200 mg C m^{-2} d^{-1}) para esta temporada.

Otra posibilidad que no hay que descartar, y que puede explicar el desacople entre la productividad primaria y las bajas concentraciones de Chl-*a* encontradas en junio de 2003, puede ser explicado si consideramos el efecto del pastoreo por el zooplancton. Se ha sugerido que para regiones subtropicales, como la zona de transición entre las Islas Canarias y el Noroeste de la costa de África (26-29 ºN), el microzooplancton puede ser un factor que controla rápidamente la biomasa recién producida. En estas regiones los procesos de mesoescala (surgencias, giros) pueden regular los florecimientos de fitoplancton y la productividad primaria (Basterretxea y Arístegui, 2000). Como resultado, se puede presentar un fuerte acople en el sistema productores consumidores, en un lapso de tiempo de un par de semanas después del pulso máximo del florecimiento, y que por lo tanto es posible que el pastoreo puede limitar la cantidad de células que se están multiplicando (Smith et al., 1996; Basterretxea y Arístegui, 2000).

La importancia ecológica de la región tropical de Cabo Corrientes, debido a la presencia de los eventos de surgencias, no solamente se aprecia en las tasas

de productividad primaria, sino que llega a ser importante incluso a otros niveles tróficos. En la región, se encuentra la presencia de una de las pesquerías más importantes en México, la pesca del Atún aleta amarilla. Este llega a reproducirse precisamente durante la primavera, favorecido por los eventos de surgencias que provocan frentes térmicos en la zona, y los cuales modulan su distribución (Torres-Orozco et al., 2005). Sabemos que forzamientos físicos, como las surgencias, aumentan la disponibilidad de nutrientes en la columna de agua, produciendo el desarrollo de cadenas tróficas, con células grandes que pueden transferir una mayor proporción de energía (productividad primaria) a niveles tróficos superiores, incluyendo peces (Legendre, 1981, en Cullen et al., 2002). Esta alta productividad en la parte superior del océano puede también influir en las tasas de exportación de carbono al reservorio profundo, ya que puede traducirse en una mayor producción exportada (Eppley y Peterson, 1979).

IV.2 Productividad primaria medida y modelada

Para este trabajo fue posible obtener los parámetros característicos del perfil de clorofila en cada crucero. Esta información es muy útil dado que una de las principales fuentes de variabilidad e incertidumbre al estimar la productividad primaria mediante sensores remotos proviene del comportamiento de la biomasa (Chl-*a*) en la columna de agua (Platt et al., 1991; Gaxiola-Castro et al., 1999). Esta incertidumbre se debe a que el sensor sólo provee información del 22% de la zona eufótica (Hidalgo-González y Álvarez-Borrego, 2004). Los parámetros con los que se modeló el perfil de clorofila podrían considerarse de manera general, como

representativos de tres temporadas que caracterizan a la zona: (1) la temporada cuando se presenta el florecimiento de fitoplancton debido a la presencia de surgencias, (2) otra cuando el florecimiento de fitoplancton disminuye y (3) la temporada de otoño cuando la biomasa y la productividad primaria son bajas.

La resolución vertical del perfil de clorofila ofrece una ventaja sobre los modelos que consideran un perfil de biomasa homogéneo, ya que aunque estos últimos son útiles para hacer estimaciones gruesas de la productividad primaria, es necesario seleccionar parámetros que describan tanto el comportamiento de la biomasa como los cambios de la luz en la columna de agua (Platt et al., 1991). Por lo tanto, las modificaciones hechas por Giles-Guzmán y Álvarez-Borrego (2000) al modelo propuesto por Platt et al. (1991), le brindan al modelo una mayor resolución vertical.

Las diferencias entre la productividad primaria modelada y la estimada *in situ,* fueron más evidentes en junio de 2003, con la productividad primaria *in situ* subestimada casi a la mitad por la modelada, tal vez por el uso de valores teóricos bajos de los parámetros fotosintéticos. Se ha reportado que hay diferencias entre los parámetros fotosintéticos $P^{*}_{m(z)}$ y $\alpha^{*}_{PAR(z)}$ cuando las células se encuentran durante y después de un evento de surgencia, siendo más bajos durante el efecto de las surgencias que cuando estas han terminado (Montecino et al., 2004). Toon et al. (2000) encontraron que para la zona de surgencias en el mar Arábigo los valores de $P^{*}_{m(z)}$ y $\alpha^{*}_{PAR(z)}$ fueron menores con respecto al resto del área analizada. Los valores bajos de $P^{*}_{m(z)}$ (1.77 -2.31 mgC (mg chl)$^{-1}$ h^{-1}) se asociaron a

comunidades fitoplanctónicas de células grandes > 2 um, mientras que los valores mayores a 5 mgC (mg chl)$^{-1}$ h^{-1} estuvieron asociados a comunidades fitoplanctónicas dominadas por células chicas, encontradas en regiones donde la influencia de las surgencias había disminuido.

Existe controversia entre si la alta concentración de nutrientes o su limitación pueden ser los que ocasionen los cambios en los parámetros fotosintéticos; sin embargo, se ha reportado en trabajos para el Golfo de California que no hay relación directa entre la concentración de nutrientes y los parámetros fotosintéticos (Gaxiola-Castro et al., 1999). Cullen et al. (1992) concluyeron que sólo bajo cultivos controlados en el laboratorio, es posible establecer si los cambios en $P^*_{m(z)}$ se deben realmente a estrés nutricional, y establecieron que los nutrientes influyen de manera directa en la biomasa fitoplanctónica, pero sólo lo hacen débilmente sobre la tasa fotosintética máxima. Por lo tanto, un aumento en los parámetros fotosintéticos, no necesariamente está relacionado a un aporte de nutrientes importante para la comunidad fitoplanctónica presente, sino más bien al acondicionamiento al régimen de luz.

Parámetros fotosintéticos más altos en aguas ricas en nutrientes, también pueden ser interpretados como la generación de un nicho que es ocupado por una nueva comunidad fitoplanctónica con características fisiológicas diferentes, situación que podría haberse presentado en junio 2003 para esta zona (Basterretxea y Arístegui, 2000). Es posible que dadas las características de la temporada, los parámetros teóricos propuestos por Cullen (1990) ($P^*_{m(z)}$ de 4.8

(mgC (mg chl)$^{-1}$ h^{-1}), $\alpha^{*}_{PAR(z)}$ de 0.017 (mgC (mg chl)$^{-1}$ h^{-1} (µmol cuanta m^{-2})), sean una subestimación, sobre todo para la zona costera.

Las estimaciones de la $PP_{modelada}$ para mayo 2002 y noviembre 2002, se encuentran dentro del rango de las estimaciones *in situ*. Esto sugiere que los parámetros fotosintéticos reales para la temporada de surgencias (mayo) y para otoño (noviembre) deben similares a los valores teóricos propuestos por Cullen (1990). Sin embargo, es necesario tener un conocimiento empírico de la variabilidad de los parámetros fotosintéticos para poder estimar los cambios temporales en la productividad primaria con sensores remotos de manera regional (Sathyendranath y Platt, 1993) .

CONCLUSIONES

La importancia de las surgencias costeras en la región del Pacífico tropical mexicano, entre 17-21° N y 103-107°W, se ve reflejada en tasas de fijación de carbono de casi medio gramo por m^{-2} por día. Los valores más altos de clorofila derivados de datos de sensores remotos se presentaron durante los meses de marzo y abril, posiblemente cuando las surgencias son más intensas. Es posible que las mayores tasas de fijación de carbono se presenten al disminuir la intensidad de las surgencias costeras en la región. Se ha visto que las surgencias tienen un efecto en las comunidades fitoplanctónicas de una región, no sólo porque influyen en el tipo de comunidad fitoplanctónica que se va a presentar, sino también en el tipo de estructura trófica que se va a desarrollar en el área. Es posible que en esta región se presente un cambio en la comunidad fitoplanctónica después del período de surgencias; sin embargo, esto aún debe ser confirmado.

El impacto que tiene el afloramiento de aguas profundas ricas en nutrientes, pero también en CO_2, influye de manera directa en las cantidades de carbono que se emiten hacia la atmósfera o que se pueden fijar y exportar hacia el reservorio profundo. Para poder predecir y cuantificar la magnitud de estos flujos, así como saber el comportamiento de las comunidades fitoplanctónicas en la región y su posible efecto, es necesario continuar con la generación de datos *in situ* que permitan entender el tipo de comunidades fitoplanctónicas presentes y su cambio como respuesta a la dinámica de la región. Esto no solamente con el fin de conocer los cambios de la zona, sino con miras a obtener datos que permitan

caracterizar a la región en provincias, con límites que seguramente cambian a lo largo del año, tanto espacial como temporalmente.

La variabilidad de la productividad medida *in situ* y modelada sugiere que la zona es una de alta productividad primaria durante la primavera, cuando se presenta el período de surgencias en la región. La productividad primaria modelada se encuentra dentro del rango de las mediciones *in situ* para mayo y noviembre de 2002 pero subestima la productividad *in situ* para el mes de junio del 2003. Esto sugiere que si se desea conocer la variabilidad temporal de la productividad primaria en la región es necesario generar parámetros fotosintéticos que sean característicos de la zona y que reflejen el cambio de la estructura fitoplanctónica.

La región de Cabo Corrientes es una zona muy dinámica sujeta a cambios a lo largo del año que se ven reflejados en el comportamiento de variables como la productividad primaria y la biomasa fitoplanctónica. De acuerdo a los cambios que se alcanzaron a medir, se sugiere que es posible hablar de tres temporadas dentro de la región: (1) una temporada de surgencias cuando hay un efecto claro sobre la biomasa fitoplanctónica, (2) la temporada del término de las surgencias cuando se aprecian altas tasas de productividad primaria y (3) la temporada de otoño, cuando la productividad primaria y biomasa fitoplanctónica disminuyen. Estas tres temporadas son más evidentes en la franja costera (< 60 km de la costa) de Jalisco, lo que sugiere que la región podría ser dividida en provincias cuyos limites varían en función de los cambios hidrográficos tanto espacial como temporalmente. Es necesario mencionar que la ventana de mediciones que se

presenta en este trabajo es pequeña; sin embargo, brinda una idea de lo que está sucediendo en esta zona.

LITERATURA CITADA

Aguirre-Hernández, E., Gaxiola-Castro, G., Nájera-Martínez, S., Baumgartner, T., Kahru, M. y Mitchell, G.B., 2004. Phytoplankton absorption, photosynthetic parameters, and primary production off Baja California: summer and autumn 1998. Deep-Sea Res II, 51: 799-816 p.

Badán-Dangón, A., 1997. La Corriente Costera de Costa Rica en el Pacífico Mexicano. En: Lavín, M.F. (ed), Contribuciones a la Oceanografía Física en México. No.3 Unión Geofísica Mexicana, 99-112 p.

Badán-Dangón, A., 1998. Coastal circulation from the Galápagos to the Gulf of California. En: Brink, A.R.R.y.K.H. (ed), The Sea: The Global Coastal Ocean, Regional Studies and Synthesis. vol. 11. John Wiley, Hobonken, N. J. , 315-343 p.

Basterretxea, G. y Arístegui, J., 2000. Mesoscale variability in phytoplankton biomass distribution and photosynthetic parameters in the Canary-NW African coastal transition zone. Mar. Ecol. Prog. Ser., 197: 27-40 p.

Behrenfeld, M.J. y Falkowski, P.G., 1997. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. Limnol. Oceanogr., 42(1): 1-20 p.

Carr, M.-E. y Kearns, E.J., 2003. Production regimes in four Eastern Boundary Current systems. Deep-Sea Res. II, 50: 3199–3221 p.

Cermeño, P., Marañón, E., Harbour, D. y Harris, R.P., 2006a. Invariant scaling of phytoplankton abundance and cell size in contrasting marine environments. Ecol. Lett., 9: 12100-11215 p.

Cermeño, P., Marañon, E., Pérez, V., Serret, P., Fernández, E. y Castro, C.G., 2006b. Phytoplankton size structure and primary production in a highly

dynamic coastal ecosystem (Río de Vigo, NW-Spain): seasonal and short-time scale variability. Estuar. Coast . Shelf S., 67: 251-266 p.

Cervantes-Duarte, R., Muller, J.L., Trees, C.C., Maske, H., Álvarez-Borrego, S. y Lara-Lara, J.R., 2000. Euphotic depth, irradiance attenuation and remote sensing K490 in bio-optical provinces of the Gulf of California. Cienc. Mar., 26: 533-560 p.

Cullen, J.J., 1990. On the models of growth and photosynthesis in phytoplankton. Deep-Sea Res., 37(4): 667-683 p.

Cullen, J.J., Frank, P.J.S., Karl, D.M. y Longhurst, A.R., 2002. Physical Influences on marine ecosystem dynamic. En: Robinson, A.R., McCarthy, J.J. and Rothschild, B.J. (eds), The Sea. 12. John Willey & Sons. New York, 297-336 p.

Cullen, J.J., Yang, X. y MacIntyre, H.L., 1992. Nutrient limitation of marine photosynthesis. En: Falkowski, P.G. and Woodshead, A.D. (eds), Primary productivity and biogeochemical cycles in the sea. Plenum Press. New York, 69-88 p.

Ducklow, W.H., 2003. Biogeochemical Provinces: towards a JGOFS Synthesis. En: Michael, F.J.R. (ed), Ocean biogeochemistry: a synthesis of the Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS). IGBP Series. Springer. Germany, 3-17 p.

Eppley, W.R. y Peterson, J.B.N., 1979. Particulate organic matter flux and planktonic new production in the deep ocean. Nature, 282: 677-680 p.

Falkowski, P.G., Barber, R.T. y Smetacek, V., 1998. Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production. Science, 281: 200-206 p.

Fiedler, P.C., 1994. Seasonal and interannual variability of coastal zone color scanner phytoplankton pigments and winds in the eastern tropical Pacific. J. Geophys. Res., 99: 18,371-318,384 p.

Fiedler, P.C. y Talley, L.D., 2006. Hidrography of the eastern tropical Pacific: a review. Prog. Oceanogr., 69: 143-180 p.

Field, C.B., Beherenfeld, J.M., Randerson, J.T. y Falkowski, P., 1998. Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components. Science, 281(5374): 237-240 p.

García-Reyes, M., 2005. Procesos físicos que controlan la variabilidad estacional de la temperatura superficial del mar y de la concentración de clorofila en la entrada al Golfo de California. Tesis: Física, Universidad Nacional Autónoma de México. México, 78 p.

Garret, A.E., 1997. Physics to fish: Interactions between physics and biology on a variety of scales. Oceanography, 10(3): 128-131 p.

Garret, A.E. y Marra, J., 2002. Effects of upper ocean physical processes (turbulence advection and air-sea interaction) on oceanic primary production. En: Alan R. Robinson, J.J.M.a.B.J.R. (ed), The Sea. 12. John Wiley & Sons, Inc. New York, 19-49 p.

Gaxiola-Castro, G. y Álvarez-Borrego, S., 1986. Photosynthesis irradiance relationship for winter phytoplankton. Oceanol. Acta, 9(4): 497-501 p.

Gaxiola-Castro, G., Álvarez-Borrego, S., Lavín, M.F., Zirino, A. y Nájera-Martínez, S., 1999. Spatial variability of the photosynthetic parameters and biomass of the Gulf of California phytoplankton. J. Plankton Res., 21(2): 231-245 p.

Gaxiola-Castro, G. y Muller-Krager, F., 1998. Seasonal phytoplankton pigment variability in the Eastern Tropical Pacific Ocean as determined by CZCS

imagery. En: Brown, R.A. (ed), Remote sensing of the Pacific Ocean by Satellites. 271-277 p.

Gaxiola-Castro, G. y Nájera-Martínez, S., 1996. Productividad y biomasa de fitoplancton en el Océano Pacífico Oriental Tropical estimados a partir de sensores remotos, Informe técnico final, CONACYT, CICESE, 38 p.

Giles-Guzmán, A.D. y Álvarez-Borrego, S., 2000. Vertical attenuation coefficient of photosynthetically active radiation as a function of chlorophyll concentration and depth in case 1 waters. Appl. Optics, 39(9): 1351-1358 p.

Godínez-Sandoval, V.M., Córdova-García, J., Olivos-Ortiz, A., Lavín, M.F. y Gómez-Valdés, J., 2002a. Datos hidrográficos de la campaña PROCOMEX-0211: Del 19 al 30 de noviembre del 2002, Comunicaciones Académicas (27659), Física, O., CICESE, 112 p.

Godínez-Sandoval, V.M., García-Córdova, J., Gómez-Valdés, J., Lavín, M.F. y Ojeda-Cota, J.M., 2002b. Datos hidrográficos de la campaña PROCOMEX-0205 : Del 14 al 27 de mayo del 2002, Comunicaciones Académicas (5297), Física, O., CICESE, 162 p.

Godínez-Sandoval, V.M., Lavín, M.F., García-Córdova, J. y Gómez-Valdés, J., 2003. Datos hidrográficos durante junio del 2003: Campaña PROCOMEX-0306, Comunicaciones Académicas, Física, S.O., CICESE, 147 p.

González-Morales, A.T. y Gaxiola-Castro, G., 1991. Variación día a día de características físico-químicas, biomasa y productividad primaria del fitoplancton en una zona de surgencia costera de Baja California. Cienc. Mar., 3(17): 21-37 p.

Hidalgo-González, R.M. y Álvarez-Borrego, S., 2004. Total and new production in the Gulf of California estimated from ocean color data from the satellite sensor SeaWIFS. Deep-Sea Res. II, 51: 739-752 p.

Holm-Hansen, L., O., J., C., W., R. y Strickland, J.D.H., 1965. Fluorometric determination of chlorophyll. J. Cons. Int. Explor. Mer, 30: 3-15 p.

Holmes, W.R., 1970. The Secchi disk in turbid coastal waters. Limnol. Oceanogr., 15(5): 688-694 p.

Huntsman, S.A. y Barber, R.T., 1977. Primary production off northwest Africa: the relationship to wind and nutrient conditions. Deep-Sea Res I., 24: 25-33 p.

Kessler, W.S., 2006. The circulation of the eastern tropical Pacific: A review. Prog. Oceanogr., 69: 181-217 p.

Kirk, J.T.O., 1994. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Cambridge University Press, New York, 509 p.

Lara-Lara, J.R. y Bazán-Guzmán, C., 2005. Distribución de clorofila y producción primaria por clases de tamaño en la costa del Pacífico mexicano. Cienc. Mar., 31(1A): 11-21 p.

Lavín, M.F., Beier, E., Goméz-Valdés, J., Godínez, V.M. y García, J., 2006. On the summer poleward coastal current off SW México. Geophys. Res. Lett., 33: L02601,doi:02610.01029/02005GL024686 p.

Longhurst, A.R. y Pauly, D., 1987. Ecology of Tropical Oceans. Harcourt Brace Jovanovich, San Diego, 407 p.

López-Calderón, J., Manzo-Monroy, H., Santamaría-del-Ángel, E., Castro, R., González-Silvera, A. y Millán-Núñez, R., 2006. Variabilidad de mesoescala del Pacífico tropical mexicano mediante datos de los sensores TOPEX y SeaWIFS. Cienc. Mar., 32(3): 539-549 p.

López-Sandoval, D., 2004. Estimación de la productividad primaria en el Pacífico central mexicano. Tesis: Licenciatura, Universidad de Colima. Manzanillo, Col. , 38 p.

Mann, K.H. y Lazier, J.R.N., 1991. Dynamics of Marine Ecosystems: biological-physical interactions in the oceans. Blackwell Scientific Publications, Boston, 466 p.

Marañón, E., Behrenfeld, M.J., González, N., Mouriño, B. y Zubkov, M.V., 2003. High variability of primary production in oligotrophic waters of the Atlantic Ocean: uncoupling from phytoplankton biomass and size structure. Mar. Ecol. Prog. Ser., 257: 1-11 p.

Montecino, V., Astoreca, R., Gadiel, A., Leira, R. y G., P., 2004. Bio-optical characteristics and primary productivity during upwelling and non-upwelling conditions in a highly productive coastal ecosystem off central Chile (~36°S). Deep-Sea Res II, 51: 2413-2426 p.

Nájera-Martínez, S., Gaxiola-Castro, G. y Sierra, D.G.H., 1997. Fitoplancton del Golfo de Tehuantepec, Serie Ecología, Académicas, C., CICESE, 17 p.

Owen, R.W. y Zeitzchel, B., 1970. Phytoplankton production: seasonal change in the oceanic eastern Tropical Pacific Mar. Biol.: 32-36 p.

Pennington, T.J., Mahoney, K.L., Kuwahara, V.S., Kolber, D.D., Calienes, R. y Chavez, F.P., 2006. Primary Production in the eastern tropical Pacific: A review. Prog. Oceanogr., 69: 285-317 p.

Platt, T., Caverhill, C. y Sathyendranath, S., 1991. Basin-Scale estimates of oceanic primary production by remote sensing: The North Atlantic. J. Geophys. Res., 96(8): 15,147-115,159 p.

Platt, T. y Sathyendranath, S., 1988. Oceanic primary production: Estimation by remote sensing at local and regional scales. Science, 241: 1613-1620 p.

Platt, T. y Sathyendranath, S., 1993. Fundamental issues in measurement of primary production. En: Li, W.K.W. and Maestrini, S.Y. (Eds), Measurement

of primary production from the molecular to the global scale. Measurement of primary production from molecular to the global scale. ICES marine science symposia, Proceedings of a Symposium held in La Rochelle, 3-8 p.

Probyn, T.A., 1985. Nitrogen uptake by size fractioned phytoplankton populations in the southern Benguela upwelling system. Mar. Ecol. Prog. Ser., 22: 249-258 p.

Robles-Jarero, E.G. y Lara-Lara, J.R., 1993. Phytoplankton biomass and primary productivity by size classes in the Gulf of Tehuantepec, México. J. Plankton Res., 15: 1341-1359 p.

Roden, G., 1972. Termohaline structure and baroclinic flow across the Gulf of California entrance and in the Revilla Gigedo Islands region. J. Phys. Oceanogr., 2: 177-183 p.

Ryther, J.H., 1956. Light and marine photosynthesis. 1(1): 70-80 p.

Ryther, J.H. y Yentsch, C.S., 1957. The estimation of phytoplankton production in the Ocean from chlorophyll and light data. Limnol. Oceanogr., 2: 281-286 p.

Sarmiento, J.L., Thiele, G., Key, R.M. y Moore, W.S., 1990. Oxygen and nitrate new production and remineralization in the North Atlantic subtropical Gyre. J. Geophys. Res., 95(18): 303-315 p.

Sathyendranath, S. y Platt, T., 1993. Remote sensing of water-column primary production. En: Li, W.K.W. and Maestrini, S.Y. (Eds), Measurement of primary production from the molecular to the global scale. ICES marine science symposia, Proceedings of a Symposium held in La Rochelle, 236-243 p.

Smith, C.L., Richards, K.J. y Fasham, M.J.R., 1996. The impact of mesoscale eddies on plankton dynamics in the upper ocean. Deep-Sea Res. I, 43: 1807-1832 p.

Sosa-Ávalos, R., Martínez-Gaxiola, M.D. y Gaxiola-Castro, G., 2006. Producción primaria en el Pacífico tropical Mexicano estimada a partir de datos derivados de sensores remotos. En: Barr, M.C.J.Q.y.E.E. (ed), Recursos marinos y acuícolas de la región de Jalisco, Colima y Michoacán. Instituto Nacional de la Pesca, 22 p.

Steeman-Nielsen, E., 1952. The use of radioactive carbon (^{14}C) for measuring organic production in the sea. J. Conseil, Conseil Perm. Inern. Exploration Mer, 18: 117-140 p.

Toon, R.K., Lohrenz, S.E., Rathbun, C.E., Wood, A.M., Arnone, R.A., Jones, B.H., Kindle, J.C. y Weidemann, A.D., 2000. Photosynthesis-irradiance and community structure associated with coastal filaments and adjacents waters in the northern Arabian Sea. Deep Sea Res. II, 47: 1249-1277 p.

Torres-Orozco, E., Trasviña, A., Muhlia-Melo, A. y Ortega-García, S., 2005. Dinámica de mesoescala y capturas de atún aleta amarilla en el Pacífico Mexicano. Cienc. Mar., 31(4): 671-683 p.

Venrik, E.L. y Hayaward, T.L., 1984. Determining chlorophyll on the 1984 CALCOFI surveys. California cooperative oceanic fisheries report, 25: 74-79 p.

Wyrtki, K., 1965. Surface currents of the Eastern Equatorial Pacific Ocean. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm. Bull., IX: 270-304 p.

Yentsch, C.S. y Menzel, D.I., 1963. A method of the determination of phytoplankton, chlorophyll and phaeophytin by fluorescence. Deep-Sea Res I., 10: 221-231 p.

Yentsch, C.S. y Phinney, D.A., 1989. A bridge between ocean optics and microbial ecology. Limnol. Oceanogr., 34(8): 1694-1705 p.

Zondervan, I., Zeeb, E., Rost, B. y Riebsell, U., 2001. Decreasing marine biogenic calcification: a negative feedback on rising atmospheric pCO2. Global Biogeochem. Cycles, 15(2): 507-516 p.