



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

INSTITUTO DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
CENTRO DE INVESTIGACIONES COSTERAS

MONOGRAFÍA

VARIACIÓN ESPACIO TEMPORAL DE LA PRODUCTIVIDAD PRIMARIA EN EL PACÍFICO MEXICANO

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADO EN BIOLOGÍA MARINA Y MANEJO INTEGRAL DE CUENCAS

PRESENTA

ZITLALLI GUADALUPE FELIPE CAMPOSECO



Tonalá, Chiapas

Noviembre del 2014

UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

INSTITUTO DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
CENTRO DE INVESTIGACIONES COSTERAS

MONOGRAFÍA

VARIACIÓN ESPACIO TEMPORAL DE LA PRODUCTIVIDAD PRIMARIA EN EL PACÍFICO MEXICANO

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADO EN BIOLOGÍA MARINA Y MANEJO INTEGRAL DE CUENCAS

PRESENTA

ZITLALLI GUADALUPE FELIPE CAMPOSECO

Director

M. en C. MIGUEL ÁNGEL HERNÁNDEZ ESPINOSA

Asesora

M. en C. SELENE LUCERO AGUILAR GORDILLO



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por protegerme durante todo mi camino y por haberme dado fuerza y valor para culminar esta etapa de mi vida.

Agradezco también la confianza y el apoyo brindado por parte de mis padres, que sin duda alguna en el trayecto de mi vida me han demostrado su amor, corrigiendo mis faltas y celebrando mis triunfos.

A mi hermano, que con sus consejos me ha ayudado a afrontar los retos que se me han presentado a lo largo de mi vida.

Al maestro Miguel Ángel Hernández Espinosa, director de tesis monográfica y maestra Selene Lucero Aguilar Gordillo por su valiosa guía y asesoramiento a la realización de la misma.

Gracias a todas las personas que ayudaron directa o indirectamente en la realización de este proyecto.



DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a Dios por haberme permitido llegar hasta este momento tan importante en mi formación profesional, por la fortaleza y serenidad que me dio para afrontar los momentos difíciles durante este trayecto que me ha enseñado a valorar las cosas que la vida me brinda.

A mis padres que han sido y son el pilar de mi vida, los cuales aun teniéndolos lejos durante mi periodo universitario ellos siempre estuvieron apoyándome de manera incondicional. Que quienes con sus consejos cariño y sobre todo amor siempre han estado a mi lado.

A mi hermano que siempre ha estado junto a mí y brindándome su apoyo, muchas veces poniéndose en el papel de padre.

Y a cuatro amigos, Mildred Cigarroa Alonzo, Ariana Ruiz Villanueva, Consuelo Sancho Martínez y Rene Cruz Chirino, gracias por su apoyo incondicional. Más que una persona en mi vida, son amigos importantes, amigos que han llegado a poner un orden y una disciplina con su forma de ser, con su forma de actuar, con su forma de dirigirse a mí, de aconsejarme y de llevarme por el camino del bien, agradezco por haber sido tan incondicional en todo momento, Dios nos permita compartir muchísimos años más de amistad.



ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	I
ÍNDICE DE CUADROS.....	II
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	III
I.INTRODUCCIÓN	1
II.OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo general.....	3
2.1.2 Objetivos específicos	3
III. PRESENTACIÓN SISTEMATIZADA DE LA INFORMACIÓN	4
3.1 Productividad primaria en el océano	4
3.2 El Ciclo del carbono en los sistemas acuáticos.....	5
3.2.1 La bomba biológica de carbono	7
3.3 Factores ambientales que influyen en la variabilidad de la productividad primaria	9
3.3.1 Viento.....	9
3.3.2 Radiación solar	10
3.3.3 Temperatura	10
3.3.4 Nutrientes	11
3.3.5 El Niño y La Niña	12
3.4 Métodos de estimación de productividad primaria	14
3.4.1 Determinación de la concentración de Clorofila-a (Chl-a).....	16
3.4.2 Recolecta de fitoplancton.....	16
3.4.3 Botellas muestreadoras Van Dorn.....	17
3.4.4 Estimación de la Productividad Primaria con el método del C ¹⁴	18

3.4.5 Método de la Fluorescencia Natural	19
3.4.6 Sensores remotos.....	20
3.5 Productividad primaria en el Pacífico mexicano.....	22
IV. CONCLUSIONES	33
V. RECOMENDACIONES	35
VI. REFERENCIAS DOCUMENTALES.....	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Bomba biológica de carbono (Tomado de Rosell <i>et al.</i> , (2009).....	8
Figura 2. Fenómeno El Niño en el Pacífico (Tomado y modificado de Grid Arendal, 2014).....	13
Figura 3. Red del fitoplancton (Tomado de Sze, 1993).....	16
Figura 4. Botellas muestreadoras Van Dorn.....	18
Figura 5. Identificación de las regiones en las que se estimaron tasas de producción integrada (PPI): (I) Baja California, (II) Golfo de California, (III) Pacífico Tropical Mexicano, (IV) Golfo de Tehuantepec (Tomado de Martínez-Gaxiola <i>et al.</i> , 2007).....	24
Figura 6. Localización del área de estudio en la región IMECOCAL. Los puntos representan estaciones de muestreo (Tomado de Martínez-Gaxiola <i>et al.</i> , 2007).....	25
Figura 7. Producción primaria integrada media mensual para el periodo de enero de enero de 1998 a diciembre 2005 (Martínez-Gaxiola <i>et al.</i> , 2007).....	28
Figura 8. Localización de la zona de estudio sobre la costa oeste de México, desde la boca del Golfo de California hasta el Golfo de Tehuantepec (región III y IV, respectivamente) (Tomado de Lara-Lara y Bazán-Guzmán, 2005).....	30

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Valor medio anual de la mediana de PPI ($\text{mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$) por región: Frente a Baja California (BC), Golfo de California (GC), Pacífico Tropical Mexicano (PTM), Golfo de Tehuantepec (GT) (Tomado de Martínez-Gaxiola <i>et al.</i> , 2007).....	26
Cuadro 2. Producción primaria nueva estimada a partir de la PPI y razones- <i>f</i> por región (Tomado de Martínez <i>et al.</i> , 2007).....	26
Cuadro 3. Variaciones de las profundidades de la zona eufótica, las termoclinas y las nutriclinas, y velocidad del viento. Valores máximos de clorofila <i>a</i> y producción primaria. Los niveles de irradiancia <i>in situ</i> para las máximas concentraciones se muestran entre paréntesis (Tomado de Lara-Lara y Bazán-Guzmán, 2005).....	31

ABREVIATURAS

BC.....	Baja California
CC.....	Corriente de California
Chl.....	Clorofila
CO ₂	Dióxido de Carbono
C _{org}	Carbono Organico
ENOS.....	El Niño- Oscilación Sur
GC.....	Golfo de California
GT.....	Golfo de Tehuantepec
Gt.....	Gigatonelada (1x10 ⁹ toneladas)
IMECOCAL.....	Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California
MPC.....	Maximo Profundo de Clorofila
PN.....	Productividad Nueva
PP.....	Productividad primaria
PPI.....	Productividad primaria Integrada
PTM.....	Pacífico Tropical Mexicano
ScC.....	Subcorriente de California
SCC.....	Sistema de la Corriente de California
TCO ₂	Dióxido de Carbono Total
TSM.....	Temperatura Superficial del Mar
ZE.....	Zona Eufotica
ZITC.....	Zona Inter Tropical de Convergencia

I. INTRODUCCIÓN

La productividad primaria en los océanos es generada en gran medida por organismos autótrofos como el fitoplancton, mismos que son fundamentales para los ecosistemas marinos debido a su capacidad fotosintética, ya que realizan del 30 al 60% de la fotosíntesis global (Valdez, 2010). El fitoplancton está conformado por algas unicelulares que permanecen suspendidas o flotando y son distribuidos por las corrientes oceánicas (Millero, 1996; Valdez, 2010), presentan su mayor importancia en aguas costeras en donde son los principales productores primarios y tiene influencia positiva sobre la biota, clima y la geología. Además, es mediante la fotosíntesis, que el fitoplancton utiliza al dióxido de carbono atmosférico, influyendo en la circulación del carbono en el ambiente a través de las redes tróficas (Chamberlain *et al.*, 1990).

Los productores primarios tienen la capacidad de fijar carbono mediada por los cloroplastos de las microalgas, mediante un proceso fotosintético que les permite producir moléculas orgánicas, que a su vez serán empleadas para su crecimiento, multiplicación y la generación de biomasa. La actividad de productividad primaria se puede definir como la cantidad de carbono que es fijado por el fitoplancton a través de la fotosíntesis (Sarmiento y Bender, 1994).

Por lo tanto, la estimación de la productividad primaria (PP) del fitoplancton en los ecosistemas acuáticos es de gran importancia debido a que nos permite determinar cuánto carbono es fijado a las redes tróficas. La variabilidad espacio-temporal de la PP en los océanos depende de las condiciones ambientales a las cuales están sujetas las poblaciones fitoplanctónicas (Chen *et al.*, 2003). Algunos procesos físicos como las surgencias, advección, mezcla turbulenta, ondas internas y remolinos, contribuyen en la variabilidad de la biomasa y PP del fitoplancton, abasteciendo de nutrientes inorgánicos la zona eufótica y permitiendo el acondicionamiento del fitoplancton a diversos regímenes de irradiancia. Donde los procesos biológicos determinan la magnitud de la PP (Reyes-Salinas *et al.*, 2003).

La concentración de clorofila-a (Chl-a) es utilizada universalmente como una medida de la biomasa de fitoplancton (Montesino *et al.*, 2001). La distribución de la clorofila-a y de la producción fitoplanctónica, tanto en aguas oceánicas como costeras, se vincula directamente con características tales como la estratificación y la mezcla de la columna de agua, el espesor de la capa eufótica y la disponibilidad de los nutrimentos (Hernández-Becerril, 1993).

El uso de sensores remotos para la detección de pigmentos fitoplanctónicos ha resultado ser la mejor forma de obtener una visión sinóptica a grandes escalas espaciales y conocer la variabilidad causada por forzamientos climáticos como El Niño-La Niña (Longhurst *et al.*, 1995; Hernández, 2002). Los resultados derivados de la información del color del océano han revolucionado el campo de la oceanografía biológica, con importantes contribuciones a la biogeoquímica, oceanografía física, modelos del sistema oceánico, pesquerías y al manejo costero (Platt *et al.*, 2008).

En los mares mexicanos los trabajos sobre PP han sido escasos y como resultado de estas investigaciones sólo se han caracterizado algunas regiones, como las zonas de surgencias en la costa occidental de Baja California, el Golfo de California, parte del Golfo de Tehuantepec, la zona de Campeche y la zona del Caribe mexicano (Hernández-Becerril, 1993).

En el presente trabajo se realiza una descripción sobre la variación espacio temporal de la productividad primaria con diferentes ciclos anuales en 4 regiones del Pacífico mexicano.

II.- OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Describir las variaciones espacio-temporales de productividad primaria para las aguas costeras del Pacífico Mexicano.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comprender la importancia de la productividad primaria en el océano.
- Reconocer el papel del ciclo de carbono oceánico en los cambios atmosféricos de CO₂.
- Explicar el efecto de los factores ambientales en las variaciones de productividad primaria en el océano.
- Identificar los principales métodos para estimar productividad primaria.
- Registrar la variabilidad espacial de la biomasa del fitoplancton en el Pacífico mexicano.

III. PRESENTACIÓN SISTEMATIZADA DE LA INFORMACIÓN

3.1 Productividad primaria (PP) en el océano

Se llama productividad primaria (PP) a la generación de materia orgánica realizada por organismos autótrofos a través de los procesos de fotosíntesis o quimiosíntesis. La PP es generada a partir de los productores primarios, principalmente las algas unicelulares que forman el fitoplancton. Posteriormente esta PP será transportada en forma de energía y nutrientes hacia las cadenas tróficas (Fielder *et al.*, 1992; Kahru y Mitchell, 2000).

La estructura de la comunidad del fitoplancton y su PP es parte fundamental en el ecosistema pelágico, dado que son los productores primarios del medio marino, por lo que es importante entender las causas de variación espacial y temporal que nos lleva al conocimiento de la fertilidad de los océanos (Kahru y Mitchell, 2000). Estudios del fitoplancton han determinado que éste representa ~2% de la biomasa del planeta, equivalente en un 30 a 60% de asimilación en el océano y con una tasa de fijación de carbono del orden de 35 a 46 Gigatoneladas (Gt) por año (Sakshaug *et al.*, 1997; Falkowski *et al.*, 1998).

La biomasa del fitoplancton y su PP son fundamentales en el océano, puesto que son los alimentos primarios del ecosistema, estos se encargan de fijar el CO₂ atmosférico de manera que el carbono pasa a ser parte de la cadena alimentaria, y por tanto, fuente de energía. Progresivamente la cadena trófica va enriqueciéndose, pues el fitoplancton es consumido por el zooplancton que a su vez puede ser consumido por determinados peces, etc (Kirk, 1994; Chen *et al.*, 2003).

No todo el carbono fijado por el fitoplancton es exportado hacia las regiones profundas del océano, dado que una parte es remineralizada por las bacterias y reciclado en la zona eufótica. El exceso de producción de carbono orgánico debido a los nutrientes externos que entran a la zona eufótica (profundidad en la que la

intensidad de la luz queda reducida a un 1% de la que ha penetrado la superficie) es estimada en sólo un 3% de la producción primaria total y hasta el momento se desconoce cuánto de este excedente de materia orgánica es reoxidado y cuanto permanece secuestrado en forma de partículas para ser exportado al océano profundo o a los sedimentos (Lambert *et al.*, 1999; Chen *et al.*, 2003).

Con el avance de imágenes por satélite se puede obtener el color del océano y es posible estimar la biomasa del fitoplancton a nivel de mesoescala, lo que como consecuencia permite estudiar la variabilidad temporal derivada por los cambios climáticos interanuales como “El Niño” (calentamiento de las aguas superficiales del mar) y “La Niña” (caracterizada por temperaturas de la superficie del océano inusualmente frías) (Espinosa-Carreón, 1996; Kahru y Mitchell, 2000).

La combinación de las aguas frías ascendentes y las aguas cálidas superficiales, resulta en un enfriamiento de la capa superficial marina que se registra en los datos hidrológicos, así como en las imágenes satelitales en el infrarrojo, gracias a lo cual es posible visualizar las surgencias. Las imágenes de color del mar captan los altos valores de clorofila-a presentes en zonas de surgencia, por lo que son una valiosa herramienta para el seguimiento de estos fenómenos. La productividad de las aguas del Pacífico mexicano ha sido estudiada con el uso de dichos datos satelitales de color del mar en combinación con variables meteorológicas y oceanográficas (Lluch-Cota y Álvarez-Borrego, 1998; Chen *et al.*, 2003).

3.2 El Ciclo del carbono en los sistemas acuáticos

El carbono es esencial para construir las moléculas orgánicas que caracterizan a los organismos vivos. La principal fuente de carbono para los productores primarios es el CO₂ del aire atmosférico, que también se halla disuelto en lagos y océanos (Kirk, 1994; Álvarez-Borrego, 2007).

En el océano actual, el fitoplancton marino fija 45 Gt de carbono orgánico por año, del cual 16 Gt se exportan al interior del océano (Falkowski *et al.*, 1998). La PP del fitoplancton marino es un factor importante en el sistema climático ya que está involucrado en la partición del CO₂ entre el océano y la atmosfera (Brocker, 1982; Fielder *et al.*, 1992). Hay numerosos mecanismos oceánicos que pueden dar cuenta de un cambio en el CO₂, incluyendo la circulación oceánica, salinidad y temperatura del océano (Rich *et al.*, 1999).

Una de las definiciones más sencilla de la PP oceánica se refiere a la tasa fotosintética de fijación de carbono en la zona fótica de los océanos. En la presencia de luz y nutrientes (nitrógeno y fósforo, principalmente) los organismos fotosintéticos transforman el carbón inorgánico disuelto en moléculas orgánicas, produciendo carbono. Sin embargo, para comprender cómo ocurre el ciclo de carbono en los océanos, es necesario entender las definiciones de producción bruta, producción neta, producción nueva, producción regenerada y producción exportada (Falkowski *et al.*, 2000; Marra, 2002).

La producción bruta se refiere al carbono total fijado, mientras que la producción neta tiene en cuenta la producción menos la respiración de los organismos autótrofos mismos (Robles-Jarero y Lara-Lara, 1993). Fue en la década de los setenta cuando se desarrollaron nuevos conceptos de productividad en los océanos, como los conceptos de producción nueva y producción regenerada, que son esenciales para entender los procesos que dejan fuera la materia orgánica de la cadena alimentaria trófica. La producción nueva se ha definido como la producción primaria en la zona eufótica resultante de las entradas de nutrientes de fuera de la zona fótica, como de las aguas profundas, la atmosfera o de tierra (Morel *et al.*, 1996; Reyes-Salinas *et al.*, 2003).

La producción regenerada es la productividad que resulta del reciclaje de nutrientes dentro de las aguas superficiales. La producción exportada se refiere a la transferencia de material biogénico (partículas en deposición, advección de carbono orgánico disuelto y migración del zooplancton desde la zona eufótica) (Dudgale *et al.*, 1967; Robles-Jarero y Lara-Lara, 1993).

Dado que se ha de mantener un régimen permanente de flujo de nutrientes, la producción exportada en escalas de tiempo más largas de un año sería iguales a la producción nueva, aunque ambos conceptos se han de separar en el espacio y el tiempo (Williams *et al.*, 1989; Bograd *et al.*, 2006).

3.3.1 La bomba biológica de carbono

El concepto de bomba biológica de carbono es esencial para entender que sucede con el ciclo de carbono de los océanos (Figura 1). Es una combinación de dos procesos fundamentales: la bomba de solubilidad y la bomba biológica, que contribuyen a la concentración del carbono en el interior del océano (Falkowski *et al.*, 2000).

La bomba biológica se compone principalmente de la fotosíntesis, alimentación, respiración y descomposición. La importancia de la actividad del fitoplancton reside principalmente en la actividad fotosintética, la cual baja la presión parcial del CO₂ en la superficie del océano y por ello promueve la absorción del CO₂ de la atmosfera (Millero, 1996; Rich *et al.*, 1999; Marra, 2002).

Uno de los procesos más importantes en el ciclo de carbono es la transformación del carbono inorgánico disuelto de la superficie del océano en material orgánico, creando un flujo de carbono orgánico hacia el mar profundo. Se estima que un 25% del carbono fijado en la superficie del océano se hunde hacia su interior donde sería parcialmente oxidado por la respiración heterotrófica (Falkowski *et al.*, 2000).

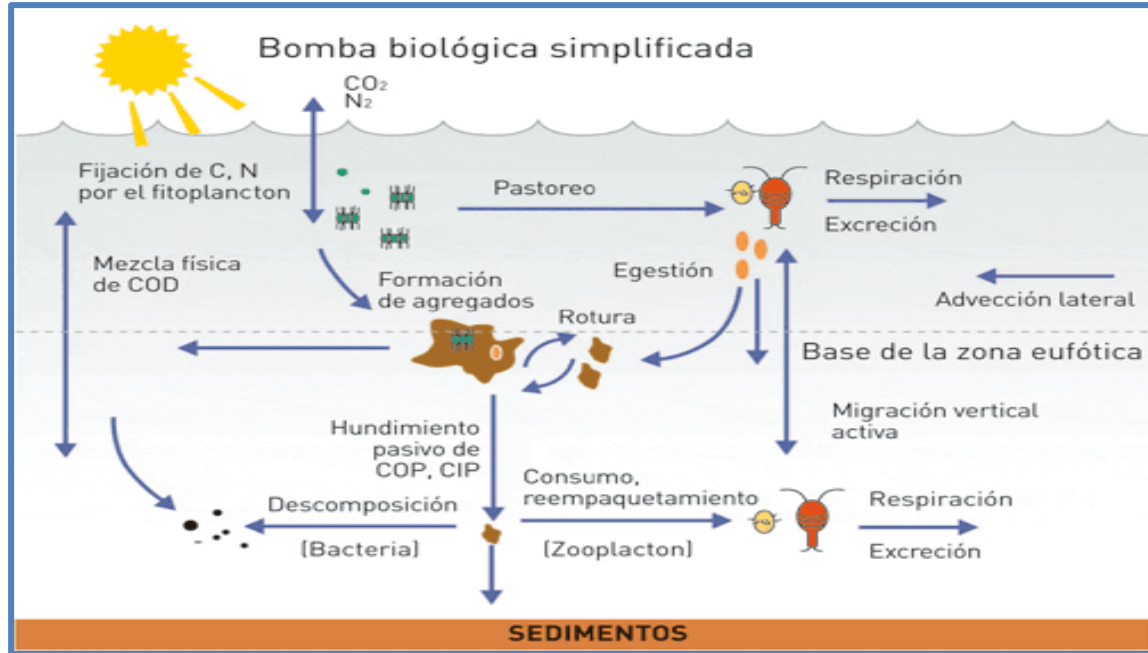


Figura 1. Bomba biológica de carbono (Tomado de Rosell *et al.*, 2009).

El consumo de partículas por el zooplancton es otro factor importante conectando la productividad primaria y los flujos de partículas al océano profundo, el zooplancton juega un papel fundamental en la transferencia de carbono dentro de las redes tróficas marinas y en el flujo vertical de la columna de agua. Forma parte de la “bomba biológica” de carbono hacia el interior del océano (Longhurst y Harrison, 1989) ya que transfiere parte del carbono secuestrado de la atmósfera por el fitoplancton y lo transporta dentro de la zona eufótica y hacia estratos más profundos a través de una compleja red trófica (Bograd *et al.*, 2006).

La alimentación del zooplancton empaqueta una fracción del carbono orgánico producido por el fitoplancton en la forma de material fecal, la cual se hunde al océano profundo a cientos de metros por día, permitiendo una mayor preservación de las partículas orgánicas en el registro sedimentario. Además, el transporte vertical de la materia orgánica no se puede atribuir solamente a las partículas en

deposición, sino también al transporte hacia abajo de la fase disuelta orgánica a través de la columna de agua (Bishop, 1989; Durazo *et al.*, 2005).

3.3 Factores ambientales que influyen en la variabilidad de la productividad primaria

El Pacífico mexicano presenta una variedad de estructuras de mesoescala como surgencias, frentes, meandros y remolinos que cambian a lo largo del año e influyen en la distribución de la biomasa fitoplanctónica así como en la producción primaria (Reyes Salinas *et al.*, 2003; Durazo *et al.*, 2005).

Existen diversos procesos físicos determinantes en la dinámica de las aguas, es decir, al atraer a la superficie las aguas subsuperficiales. Los factores ambientales que influyen principalmente en la variabilidad de la productividad primaria son: Viento, radiación solar, temperatura, disponibilidad de nutrientes y fenómeno de “El niño” y “La niña” (Arntz y Tarazona, 1990; Fielder *et al.*, 1992; Hernández, 2002).

3.3.1 Viento

El viento es el responsable en dos de estos procesos: 1) La violenta agitación del agua por olas superficiales y 2) La generación de turbulencia en el interior del océano, que dan como resultado el mezclado vertical turbulento, ya que actúan unificadamente. El viento es una de las fuerzas generadoras de la surgencia costera, para la zona costera oriental (Charney, 1955; Morel *et al.*, 1996).

Las corrientes que se producen y el crecimiento del fitoplancton por el ascenso de los nutrientes son de vital importancia, ya que durante estos eventos, se produce el mayor reclutamiento de larvas de peces. Las variaciones de estos procesos producen un enriquecimiento de la comunidad fitoplanctónica, que a corta escala

de tiempo (días) incrementa la comunidad zooplanctónica (Cury y Roy, 1989; Rich *et al.*, 1999).

3.3.2 Radiación solar

La radiación solar proviene de la energía que emite el sol, conocida también como radiación electromagnética o luz solar, esta tiene un espectro de luz que incide en diferentes intensidades en la superficie de la tierra generando calor y favoreciendo a los organismos fotosintéticos (Raymont, 1980; Fielder *et al.*, 1992; Bograd *et al.*, 2006).

El agua del océano en el cual vive el fitoplancton, absorbe y dispersa la luz, de tal manera que la intensidad y calidad espectral de la irradiancia varía fuertemente con la profundidad, estudios recientes han demostrado que altas cantidades de rayos UV inhibe el crecimiento de fitoplancton (Reyes Salinas *et al.*, 2003).

En este sentido la PP es afectada por los cambios en la radiación solar que dependen de la latitud, la estación del año y del patrón de las condiciones atmosféricas (Behrenfeld y Falkowski, 1997; Reyes-Salinas *et al.*, 2003).

3.3.3 Temperatura

La temperatura indudablemente es una de las variables ecológicas más importantes y presenta una gran variabilidad espacial y temporal. La temperatura afecta directa e indirectamente la productividad del fitoplancton: directamente regulando los procesos enzimáticos de respiración y fotosíntesis; indirectamente porque la temperatura del mar en verano (principalmente) crea un gradiente vertical de temperatura (termoclina), aislando la capa superficial (eufótica) de la capa profunda (afótica) rica en nutrientes, limitando así el crecimiento del fitoplancton (Raymont, 1980; Lara-Lara y Bazán-Guzmán, 2005).

La interacción entre temperatura, luz y nutrientes son los factores más importantes en el crecimiento del fitoplancton, teniendo un papel importante en la sucesión de especies. Sin embargo, se puede esperar que el efecto de la temperatura en la producción no sea en forma directa, ya que un incremento en la temperatura trae consigo un aumento en la producción y también incrementa los requerimientos respiratorios (Raymont, 1980; Lambert *et al.*, 1999). Los efectos indirectos de la temperatura están relacionados a la estabilidad de la columna de agua, toda vez que la estructura térmica de la columna de agua tiene un efecto en la distribución del fitoplancton y nutrientes (Lara-Lara y Bazán-Guzmán, 2005; Bograd *et al.*, 2006).

3.3.4 Nutrientes

El fitoplancton puede obtener de su medio ambiente una gran variedad de sustancias, con el fin de mantener su crecimiento y división celular. Algunas de esas sustancias están disponibles en abundancia (CO_2 , Na^+ , K^+ , Mg^{+2} , Ca^{+2} y SO_4^{+2}), pero otros están disponibles en muy bajas concentraciones. Los más importantes de estos micronutrientes son el nitrógeno (NH_3 , NO_2 y NO_3), fósforo (PO_4) y silicio (SiO_2), que generalmente son los nutrientes limitantes en el crecimiento del fitoplancton (Lambert *et al.*, 1999; Rich *et al.*, 1999). La distribución característica de estos micronutrientes en el océano, muestra una zona superficial (zona eufótica) pobre debido al consumo por parte del fitoplancton, una zona de incremento vertical (nutriclina) asociada al gradiente de temperatura y una zona rica (afótica). Mediante procesos físicos de mezcla de la columna de agua estos nutrientes pueden ser llevados a la zona eufótica, donde el fitoplancton puede utilizarlos e incorporarlos en las moléculas orgánicas esenciales (Espinosa-Carreón, 1996; Reyes-Salinas *et al.*, 2003).

Existe una correlación positiva entre la distribución de nutrientes y los índices de PP a gran escala. Las áreas oligotróficas de los giros oceánicos son regiones de baja productividad, mientras que las regiones de surgencias están caracterizadas

por una alta productividad, ya que el agua superficial ha sido remplazada por agua de fondo rica en nutrientes (Raymont, 1980; Cowles *et al.*, 1993; Millero, 1996).

3.3.5 El Niño y la Niña

Uno de los eventos de interacción océano-atmósfera más importantes, que se desarrolla a escala interanual, se conoce en la comunidad científica con el nombre de “El Niño-Oscilación del Sur” (ENOS, en español / ENSO, en inglés), o comúnmente, con el nombre de “El Niño” (Kahru y Mitchell, 2000; Hernández, 2002).

El ciclo ENOS consiste en una oscilación entre una fase cálida (El Niño) y una fase fría (La Niña), que se manifiesta principalmente a través de un calentamiento o enfriamiento anormal de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) en el océano Pacífico ecuatorial central y oriental (Figura 2). Estas variaciones de la TSM alcanzan las costas Norte y Sur de América que traen consigo alteraciones significativas en los patrones climáticos, que se desarrollan en algunas regiones apartadas (Quinn *et al.*, 1987; Arntz y Tarazona, 1990; Fielder *et al.*, 1992).

El Fenómeno de “El Niño-Oscilación del Sur” es un evento de variabilidad climática de gran importancia en el Océano Pacífico ecuatorial oriental y central, que tiene efectos en las condiciones meteorológicas y en variables oceánicas como temperatura superficial del mar, clorofila y productividad primaria. Esta última, hace referencia a la conversión biológica de dióxido de carbono en compuestos de carbono orgánico ricos en energía, que hace parte del balance carbono en los ecosistemas, entre otros aspectos, está relacionada con la producción pesquera (Hernández, 2002; Durazo *et al.*, 2005; Manzano-Sarabia *et al.*, 2008).

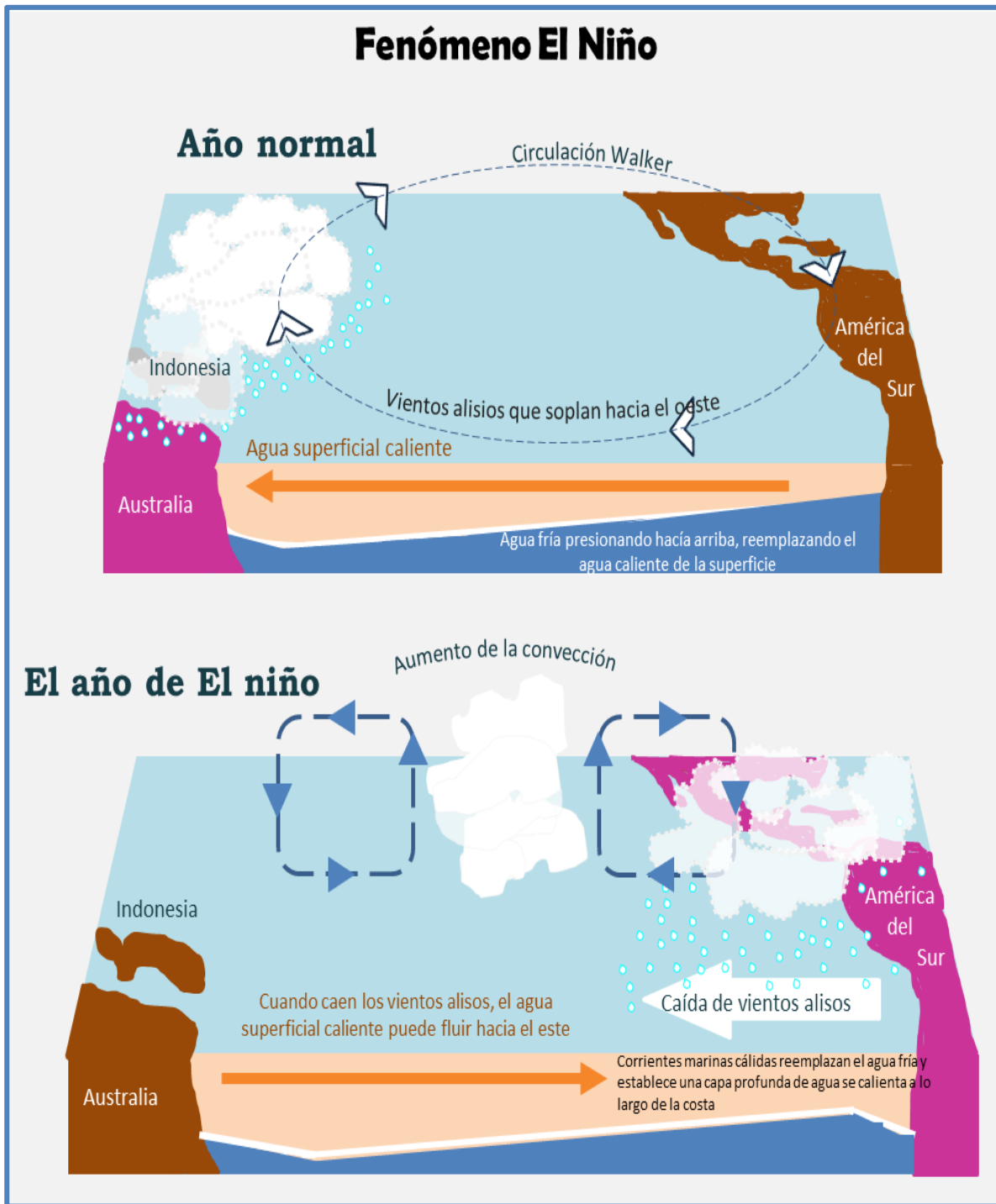


Figura 2. Fenómeno El Niño en el Pacífico (Tomado y modificado de Grid Arendal, 2014).

El fenómeno “El Niño” produce un incremento en la temperatura de las aguas costeras en el Océano Pacífico, que puede alcanzar hasta 7°C por encima de la temperatura normal, que usualmente esta entre 25 y 26°C; esto cambia el ambiente marino, repercutiendo no solo en la distribución de las especies planctónicas y bentónicas como el camarón, sino también en las especies de peces y otras con rutas largas de migración como las tortugas marinas y las ballenas (Lluch-Cota y Álvarez- Borrego, 1998; Hernández, 2002).

En condiciones normales, el Océano Pacífico en las costas sudamericanas, presenta temperaturas bajas, una termoclina y capa de mezcla muy superficiales, factores que incrementan la producción primaria del fitoplancton, debido al acarreo de los elementos nutritivos a la superficie y a las óptimas condiciones de la luz. Esta productividad incide positivamente en los niveles tróficos más altos, al punto que las regiones de afloramiento costero (que ocupan el 1% del área del océano) producen cerca del 50% de la proteína de origen marino. Mientras que durante “El Niño”, la salinidad disminuye y se eleva el nivel del mar, profundizándose la termoclina, lo que implica la caída de la PP, afectando toda la cadena alimenticia (Arntz y Tarazona, 1990; Hernández, 2002; Manzano-Sarabia *et al.*, 2008).

3.4 Métodos de estimación de productividad primaria

Los intentos para la estimación de productividad primaria en aguas mexicanas se han realizado de manera aislada, puesto que la caracterización de los flujos de carbono en el mar requieren de estimaciones precisas de las tasas de PP fitoplanctónica, ya que van a ser estas las que determinen el flujo de la materia orgánica a los niveles superiores. En la actualidad, la PP puede ser estimada mediante varios métodos, entre ellos se han utilizado comúnmente la producción de oxígeno, incorporación de carbono catorce (^{14}C), mediciones de fluorescencia de la clorofila y sensores remotos entre otros (Bidigare *et al.*, 1992; Cowles *et al.*, 1993).

En el Pacífico mexicano se han realizado trabajos sobre los efectos de algunos procesos físicos sobre la fisiología y productividad del fitoplancton marino, enfatizando que es importante considerar la influencia que algunos factores físicos de escala diversa tienen sobre la variabilidad de la producción primaria en el océano (Gaxiola-Castro, 1994). Los problemas involucrados en el estudio del fitoplancton son numerosos, principalmente porque las comunidades fitoplanctónicas son altamente dinámicas, bajo condiciones apropiadas las células crecen rápidamente y por otro lado, las comunidades pelágicas están constituidas por numerosos grupos de organismos, de diferentes tallas dentro de cada grupo. La primer característica implica grandes fluctuaciones en periodos cortos de tiempo y la segunda lleva consigo problemas de la separación de los diferentes grupos y la determinación de sus propiedades químicas y biológicas (Sakshaug, 1997). Estas fluctuaciones en la biomasa fitoplanctónica y su distribución en parches, no permiten una determinación sistemática de la variabilidad de la productividad del fitoplancton (Robles-Jarero y Lara-Lara, 1993; Sakshaug, 1997; Reyes-Salinas *et al.*, 2003).

Aunado a los problemas de muestreo en el campo, las mediciones de la PP se pueden realizar por diferentes métodos. Los valores son frecuentemente diferentes y en ocasiones son contradictorios, por lo tanto no es posible hacer comparaciones de flujo de carbono fotosintético mientras los métodos no sean estandarizados (Longturst *et al.*, 1995).

Los principales métodos empleados en la estimación de la productividad primaria son: Determinación de la concentración de clorofila-a, recolecta de fitoplancton empleando redes, botellas muestreadoras Van Dorn, C¹⁴ y por fluorescencia natural.

3.4.1 Determinación de la concentración de Clorofila-a (Chl-a)

La concentración de clorofila [Chl] ha sido utilizada como indicador de la biomasa fitoplanctónica y por tanto, la cuantificación de su distribución resulta esencial para la determinación de la PP (Behrenfeld y Falkowski, 1997).

Para extraer la clorofila se necesita coleccionar agua del punto de muestreo, luego se filtra y concentra el fitoplancton que es procesado hasta la obtención de clorofila posteriormente se determina la concentración que permite conocer indirectamente la concentración de biomasa y fijación de carbono (Longturst *et al.*, 1995).

3.4.2. Recolecta de fitoplancton

La red es ampliamente utilizada para el estudio de microalgas planctónicas (Figura 3), las cuales se colocan suspendidas en la columna de agua con el fin de que puedan tener cierta locomoción independiente, especialmente en relación con la migración vertical, no pueden desplazarse horizontalmente contra las mareas o las corrientes (Dawes, 1986; Cowles *et al.*, 1993).



Figura 3. Red del fitoplancton (Tomado de Sze, 1993)

Para recolectar fitoplancton, la red se introduce al agua y es recomendable que este por debajo del espejo de agua para no coleccionar material ajeno al mismo,

también es importante no permitir que la red llegue al fondo, pues se corre el riesgo de remover el sedimento y coleccionar material no deseado. La cuerda se sujeta a la red y se arrastra durante 3 a 5 minutos dependiendo de la concentración del fitoplancton del sitio de muestreo, después del arrastre se recupera la red procurando que este en posición vertical, para recuperar el material adherido a las paredes de la red se lavan con agua. Después de la colecta se vierte el contenido en un frasco (Sze, 1993; Morel *et al.*, 1996; Marra, 2002).

Si se requiere de un análisis cuantitativo del fitoplancton, se recomienda utilizar redes con contador de flujo o que se filtre a través de la red un volumen conocido de muestra (esta puede ser tomado con botellas muestreadoras tipo Van Dorn). Las muestras de agua se toman generalmente con botellas limpias fabricadas de algún material no tóxico, como policloruro de vinilo (PVC) (Dawes, 1986; Manzano-Sarabia *et al.*, 2008).

3.4.3 Botellas muestreadoras Van Dorn

Aunque existen diferentes tipos de botellas muestreadoras, el protocolo para su uso es similar, el cual consiste de un cilindro que presente en ambos extremos tapas removibles cuyos mecanismos de acción de cierre se controlan desde la superficie. Estas botellas pueden ser alpha o beta y estas pueden ser horizontales o verticales (Figura 4), las cuales son útiles para hacer trabajos cuantitativos del fitoplancton ya que nos permite la recolecta a diferentes profundidades de la columna de agua (se debe muestrear en la zona de penetración de la luz) (Robles-Jarero y Lara-Lara, 1993).

Entre las desventajas de usar botellas Van Dorn es que limita el área de trabajo hacia un punto (muestreos puntuales) y el volumen de agua filtrada también es limitado. La botella es una herramienta imprescindible, sobre todo cuando se requiere hacer estudios del fitoplancton en ecosistemas en los que se es posible hacer arrastres horizontales, ya sea porque estos son muy profundos, o porque

presenten paredes verticales muy elevadas con respecto al espejo de agua (Strikland y Parsons, 1968; Robles-Jarero y Lara-Lara, 1993).

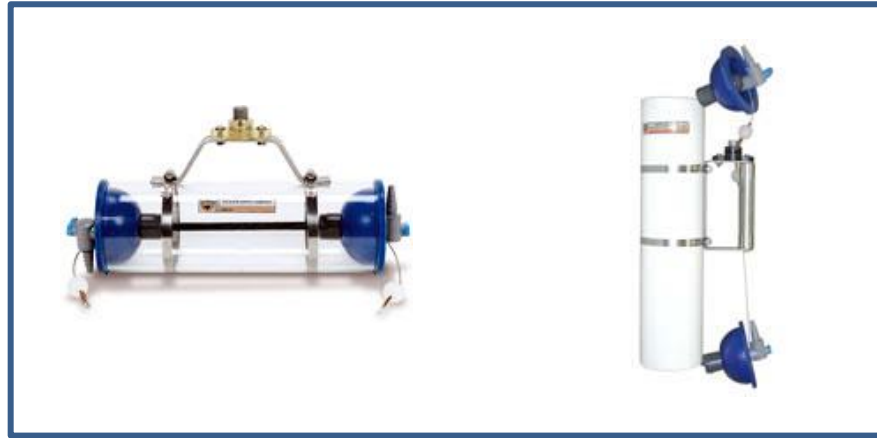


Figura 4. Botellas muestreadoras Van Dorn.

3.4.4 Estimación de la productividad primaria con Carbono 14 (^{14}C)

La estimación de la productividad primaria del fitoplancton se ha realizado en gran medida en base al método del ^{14}C y el consumo de oxígeno a través del método de las botellas clara y oscura. El método del oxígeno, a diferencia del método del radiocarbono, permite la discriminación entre producción neta, producción bruta y respiración. Sin embargo, su baja precisión, limita su empleo a ambientes de alto nivel productivo (Skamoto *et al.*, 1984; Morel *et al.*, 1996).

Actualmente, el método más utilizado por su alta sensibilidad es el del ^{14}C , en forma de bicarbonato de sodio. El fitoplancton presente en una muestra de agua, le es agregado una cantidad conocida de ^{14}C , incubándose bajo la luz (natural o artificial) por un periodo de tiempo que puede variar de 3-5 horas. Al final de la incubación la muestra es filtrada y el material colectado es analizado para conocer la cantidad de ^{14}C asimilado. Esta técnica nos da una estimación de la productividad neta (Millero, 1996).

En este método se supone que el ^{14}C y el ^{12}C son asimilados a la misma velocidad, independientemente de que el ^{14}C tenga mayor peso. Una vez conocida la cantidad de carbono ^{14}C asimilado, se corrige por la cantidad de carbono total presente, para ello se requiere conocer la alcalinidad (carbonatos de agua) total de la muestra. Las desventajas de este método son que se requiere de mayores cuidados, el ^{14}C no es fácil de conseguir, se emplean equipos y materiales costosos (Morel, 1991; Rich *et al.*, 1999).

3.4.5 Método de la Fluorescencia Natural

La clorofila-a es considerada como un indicador de la biomasa fitoplanctónica (Cowles *et al.*, 1993; Lambert *et al.*, 1999) y puede ser estimada en forma rutinaria, a partir de la fluorescencia *in vivo*, sin perturbar el medio.

La fluorescencia natural, conocida también como fluorescencia pasiva o inducida por el sol, se usa para estimar la concentración de la clorofila *a*, la actividad fotosintética y por ende, la productividad primaria en la columna de agua. Se trata de la emisión de fluorescencia de la clorofila *a*, estimulada por la luz solar, a una longitud de onda cercana a 683 nm (Kiefer *et al.* 1989; Behrenfeld y Falkowski, 1997).

Chamberlain *et al.*, 1990, describen que la relación entre fluorescencia natural y fotosíntesis (productividad primaria) depende de la probabilidad de que la luz absorbida por las células del fitoplancton la transformen en el trabajo fotoquímico. Una parte de la luz que es absorbida por el fitoplancton es utilizada por procesos fotosintéticos, otra parte se disipa en forma de calor y otra es emitida en forma de fluorescencia.

El uso de sensores *in situ* y en tiempo real resulta atractivo debido a la rapidez de los registros, al carácter no intrusivo y a la elevada resolución en los registros (Cowles *et al.*, 1993; Behrenfeld y Falkowski, 1997; Lambert *et al.*, 1999).

A pesar de que este método ha sido utilizado ampliamente (García-Mendoza y Maske, 1996; Aguirre-Gómez, 2002; Reyes-Salinas *et al.*, 2003, entre otros), presenta limitaciones como su deficiencia en los primeros metros de profundidad, dado que la radiación solar (infrarroja) puede contaminar las señales registradas. Por esta razón, es recomendable esta metodología a partir de aproximadamente 5m de profundidad, donde la radiación ascendente correspondiente a las longitudes de onda roja provienen principalmente de la biomasa del fitoplancton (Chamberlain *et al.*, 1990; Aguirre-Gómez, 2002).

3.4.6 Sensores remotos

El uso de sensores remotos para la detección de pigmentos fitoplanctónicos ha resultado ser la mejor forma de obtener una visión sinóptica de regiones extensas (Longhurst *et al.*, 1995).

Las imágenes de los sensores remotos proporcionan datos de la concentración media de pigmentos fotosintéticos en la primera profundidad óptica (Kirk, 1994), lo que permite estudiar grandes áreas del océano de forma simultánea. Mediante estas imágenes se han indicado mayores concentraciones cerca de la costa que mar adentro, con concentraciones máximas en las zonas de surgencias (Platt y Sathyendranath, 1991; Longhurst *et al.*, 1995).

La percepción remota del color del mar ha permitido establecer patrones de distribución horizontal de la clorofila “a” a macroescala, pero tiene una limitación en su alcance vertical. Diversos autores señalan que los sensores del color del mar sólo captan la información de los pigmentos fotosintetizadores en la quinta parte de la capa eufótica, es decir sólo el 20% del estrato superior de la columna de agua (Sathyendranath & Platt, 1993; Falkowski & Raven, 1997). De lo anterior se deriva que los estudios de los patrones de distribución vertical de la clorofila-a en la columna de agua sean indispensables para evaluar el potencial productivo

de los océanos y sus implicaciones en las redes tróficas (Longhurst *et al.*, 1995; Falkowski & Raven, 1997).

El uso de sensores remotos para estimar la PP requiere establecer una conexión entre un indicador de biomasa (concentración de pigmentos) y una tasa de fijación de carbono. Tal conexión se realiza mediante modelos matemáticos con base en la relación entre la producción primaria y la luz (Platt *et al.*, 1988; Morel, 1991; Behrenfeld y Falkowski, 1997).

La capacidad del fitoplancton para utilizar la luz para transformar carbono inorgánico en materia orgánica se mide mediante la construcción de curvas de fotosíntesis-irradiancia (P-E). Se ha observado que los parámetros fotosintéticos que describen tales curvas varían en espacio y tiempo, y no pueden ser inferidas directamente de los datos tomados por sensores remotos. Como una forma de resolver este problema se sugirió la división del océano en provincias biogeoquímicas (Longhurst *et al.*, 1995). Se podrían estimar los promedios de los parámetros fotosintéticos obtenidos de datos de campo para describir cada provincia biogeoquímica y utilizarse para estimar el PP a partir de las imágenes de satélite (Platt *et al.*, 1991; Longhurst *et al.*, 1995), o se podrían modelar como función de los sensores remotos (Morel *et al.*, 1996).

A pesar de que las imágenes de satélite proporcionan una muy buena caracterización espacial de la capa superficial del océano, la distribución vertical de Chl en la zona eufótica no es homogénea y en general presenta un Máximo Profundo de Clorofila (MPC) (Cullen y Eppley, 1981), que a veces se localiza por debajo de la primera profundidad óptica y por tanto, es invisible para el sensor (Platt *et al.*, 1991).

El radiómetro conocido como Coastal Zone Color Scanner (CZCS) fue el primer sensor del color del océano instalado a bordo de un satélite en órbita (Nimbus 7) y funcionó de noviembre de 1978 a junio de 1986. Las imágenes que generó fueron usadas para estimar la concentración de clorofila "a" más feofitina "a" en la capa superior del océano dentro de cuadrículas muy finas sobrepuestas sobre áreas

muy grandes (Longhurst *et al.*, 1995). Un sensor satelital más reciente que ha proporcionado imágenes del océano es el “Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiifs)” que inició operaciones en 1997 y dejó de coleccionar imágenes en el 2010 (Platt *et al.*, 2008).

3.5 Productividad primaria en el Pacífico mexicano

Los estudios realizados en los últimos años en el Pacífico mexicano han mostrado una variación espacio temporal de la productividad primaria, esto se debe a los diversos factores que modifican las condiciones del océano y por lo tanto varía el crecimiento del fitoplancton que a la vez genera un cambio en el intercambio de materia y energía en las redes tróficas de organismos acuáticos (Lara-Lara y Bazán-Guzmán, 2005).

La PP varía de acuerdo a la escala temporal en que ocurren los procesos fotosintéticos y el crecimiento del fitoplancton (Marra, 2002). Conocer las tasas de producción de carbono orgánico generado por el fitoplancton marino (PP) es fundamental, debido a que éstas pueden ser utilizadas en modelos para estimar los flujos de carbono en la columna de agua, en la interfase atmósfera-océano y en las redes tróficas (Falkowski *et al.*, 1998; Schlitzer, 2000). Esta PP puede clasificarse como producción primaria nueva (PN) o producción primaria regenerada (PR) en función del origen del nitrógeno utilizado en el crecimiento del fitoplancton. La PN se produce cuando los nutrientes (en forma de nitratos, NO_3) provienen de fuentes externas a la zona eufótica (ZE), se considera como PR la que utiliza nitrógeno reciclado biológicamente (en forma de amonio, NH_4) (Dugdale y Goering, 1967). Dentro de la ZE, Eppley y Peterson (1979), denominaron razón-*f* a la proporción PN: PP, la cual varía desde 0.05 para regiones oligotróficas, hasta valores mayores a 0.50 en regiones de surgencias costeras.

En el Pacífico mexicano se han realizado trabajos de los efectos de algunos procesos físicos sobre la productividad del fitoplancton marino, por lo que es

importante considerar la influencia que algunos factores físicos de escala diversa tienen sobre la variabilidad de la producción primaria en el océano y aunque algunos resultados se obtuvieron para procesos muy locales, es posible extender su aplicabilidad en cualquier área bajo condiciones similares (Gaxiola-Castro, 1994). La productividad se incrementa hacia la región costera y alcanza los valores mayores en la zona de surgencias. Las aguas costeras del Pacífico mexicano se consideran dentro de las zonas de alta productividad e incluyen algunas zonas de intensas surgencias (Schlitzer, 2000).

Diversos autores han realizado mediciones de productividad primaria en el Pacífico mexicano, por lo que se ha dividido en regiones oceanográficas para tener un mejor análisis de la variación espacio temporal de la PP (Figura 5), las cuales se describen a continuación (Martínez-Gaxiola *et al.*, 2007):

- Región I. Frente a Baja California (BC), desde la costa occidental de la Península de Baja California hasta 120°W, entre 22°31'N y 32°30'N.
- Región II. Golfo de California (GC), incluyendo todo el Golfo de California hasta los 21°31'N.
- Región III. Pacífico Tropical Mexicano (PTM), desde la zona costera del Sur de Sinaloa (22°31'N) al Norte de Guerrero (17°55'N, 102°08'W), hasta los 110°W, y por el Sur hasta los 14°N.
- Región IV. Golfo de Tehuantepec (GT), desde la costa Sur del Pacífico mexicano hasta los 102°08'W, 10°N y 92°W.

En la región I frente a baja california se encuentra el proyecto de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California (IMECOCAL) la cual consta de once líneas hidrográficas perpendiculares a la línea de costa de Baja California, con un

total de 83 estaciones (Figura 6). En esta región se han realizado varias mediciones anuales in situ y a través de imágenes satélites. La región de estudio IMECOCAL incluye el Sistema de la Corriente de California (SCC) que está constituido por tres grandes corrientes; corriente de California (CC), la Subcorriente de California (ScC) y por la Contracorriente de California (CCC) (Durazno *et al.*, 2005; Martínez-Gaxiola *et al.*, 2007).

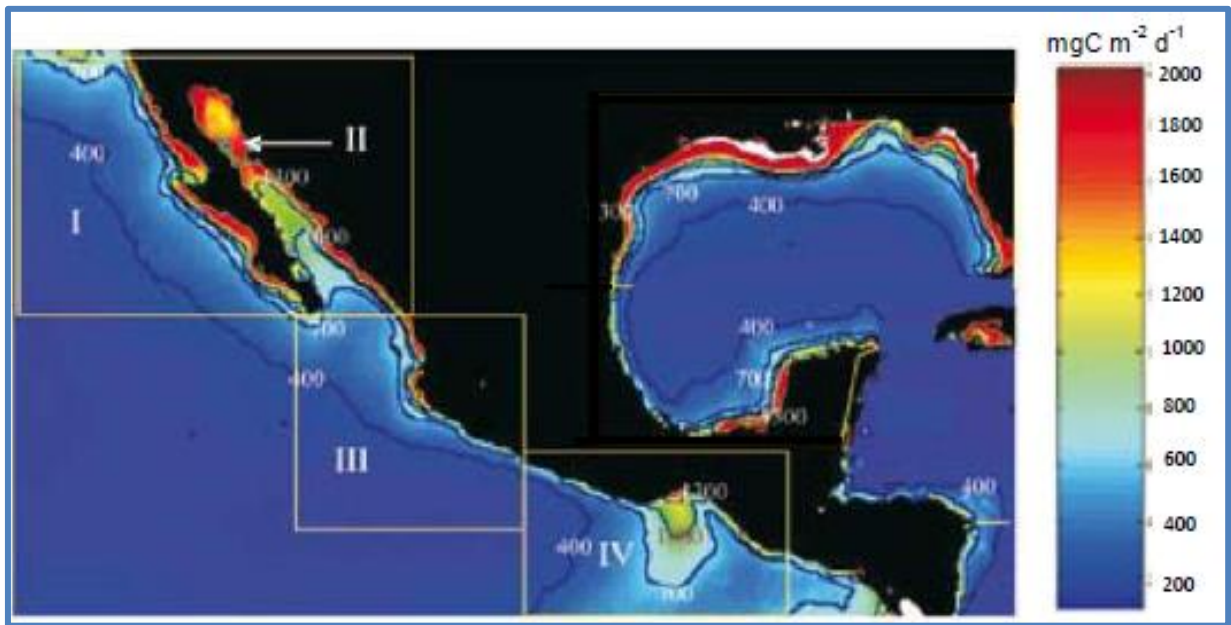


Figura 5. Identificación de las regiones en las que se estimaron tasas de producción integrada (PPI): (I) Baja California, (II) Golfo de California, (III) Pacífico Tropical Mexicano, (IV) Golfo de Tehuantepec (Tomado de Martínez-Gaxiola *et al.*, 2007).

Martínez-Gaxiola *et al.* (2007), realizaron estimaciones de PP de 1998 a 2005, en la cuatro regiones del Pacífico mexicano. La región BC presenta promedios anuales de PPI de 399 a 465 $\text{mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$, niveles más bajos que los de la región GC, pero con una media y máximos periódicos mayores a los de su región

adyacente, el Pacífico Tropical Mexicano (PTM) (Cuadro 1). Los máximos y mínimos estacionales de PPI se presentan durante primavera y otoño respectivamente.

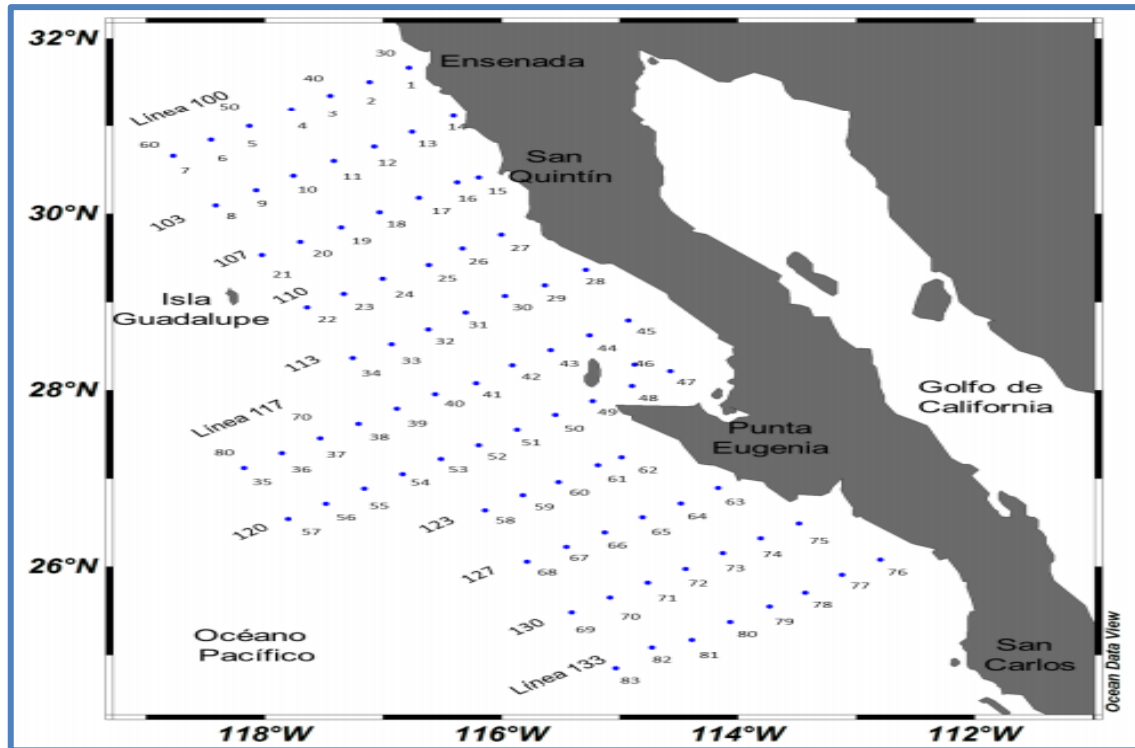


Figura 6. Localización del área de estudio en la región IMECOCAL. Los puntos representan estaciones de muestreo (Tomado de Martínez-Gaxiola *et al.*, 2007).

La región con las mayores tasas de PPI es el GC, con medias anuales de 771 a 1074 mgC m⁻²d⁻¹ (Cuadro 1). Estos valores se deben a procesos hidrográficos que constantemente transportan nutrientes a la ZE (Álvarez- Borrego *et al.*, 1978; Martínez-Gaxiola *et al.*, 2007).

Cuadro 1. Valor medio anual de la mediana de PPI ($\text{mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$) por región: Frente a Baja California (BC), Golfo de California (GC), Pacífico Tropical Mexicano (PTM), Golfo de Tehuantepec (GT) (Tomado de Martínez-Gaxiola *et al.*, 2007).

Año	Regiones			
	BC	GC	PTM	GT
1998	465	771	293	321
1999	461	945	312	595
2000	414	1074	346	603
2001	399	1012	339	585
2002	430	948	317	538
2003	418	844	307	524
2004	407	866	308	513
2005	407	856	322	511

Cuadro 2. Producción primaria nueva estimada a partir de la PPI y razones- *f* por región (Tomado de Martínez-Gaxiola *et al.*, 2007).

Región	Producción primaria integrada ($\text{mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$)	Razones- <i>f</i>	Producción primaria nueva ($\text{mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$)
I. Frente a Baja California	425	0.40	170
II. Golfo de California	914	0.50	457
III. Pacífico Tropical Mexicano	318	0.10	32
IV. Golfo de Tehuantepec	524	0.60	314

La región PTM es la que presenta las menores tasas de PPI en el Pacífico mexicano, con valores de 293 a 346 mgC m⁻²d⁻¹, superando apenas las bajas tasas de PPI estimadas para el Caribe (Cuadro 1 y 2). Es en estas latitudes donde, a diferencia de las dos regiones anteriores, se hace evidente la influencia de El Niño 1997-1999 (Morel, 1991; Marra, 2002; Manzano-Sarabia *et al.*, 2008).

Barber y Chávez (1986) y Fielder *et al.* (1992), mencionan que durante los eventos de El Niño la termoclina es más profunda cerca de la costa y la entrada de nutrientes hacia aguas superficiales disminuye, lo que limita la producción primaria.

Zuria-Jordan *et al.* (1995) y Sosa-Avalos *et al.* (2006), describen que los altos valores calculados en el año 2000 son el resultado de la presencia de surgencias costeras frente a Cabo Corrientes (Puerto Vallarta). A pesar de la influencia tropical que tiene la región GT, evidente en los bajos niveles de PPI en verano-otoño, sus promedios son comparables con los de GC. El intervalo del promedio anual de PPI varía de 321 a 603 mgC m⁻²d⁻¹, presentando los mínimos y máximos en 1998 y 2000, respectivamente (Cuadro 1). Los máximos estacionales de PPI se presentan predominantemente durante los inviernos (Figura 7).

Martínez-Gaxiola *et al.* (2007), mencionan que los promedios anuales de PPI aquí presentados concuerdan con los niveles reportados para experimentos *in situ* con ¹⁴C en esta región para años anteriores por Robles-Jarero y Lara-Lara (1993) y Lara-Lara y Bazán-Guzmán (2005). El que esta región posea la segunda mayor PPI media en el Pacífico mexicano (Cuadro 2) se debe a que durante las estaciones de invierno y primavera el GT tiene intensos eventos de surgencias provocados por el esfuerzo de fuertes vientos del norte, provocando el transporte de nutrientes a la ZE y estimulando así la producción de C_{org} (Laving *et al.*, 1992; Gaxiola-Castro y Muller-Karger, 1998). Además, la PPI de esta área recibe la influencia de otra región de intensos afloramientos de nutrientes, el Domo de Costa Rica, que fertiliza la región GT a través de la Corriente Norecuatorial y la Corriente Costera de Costa Rica (Lara-Lara y Bazán-Guzmán, 2005).

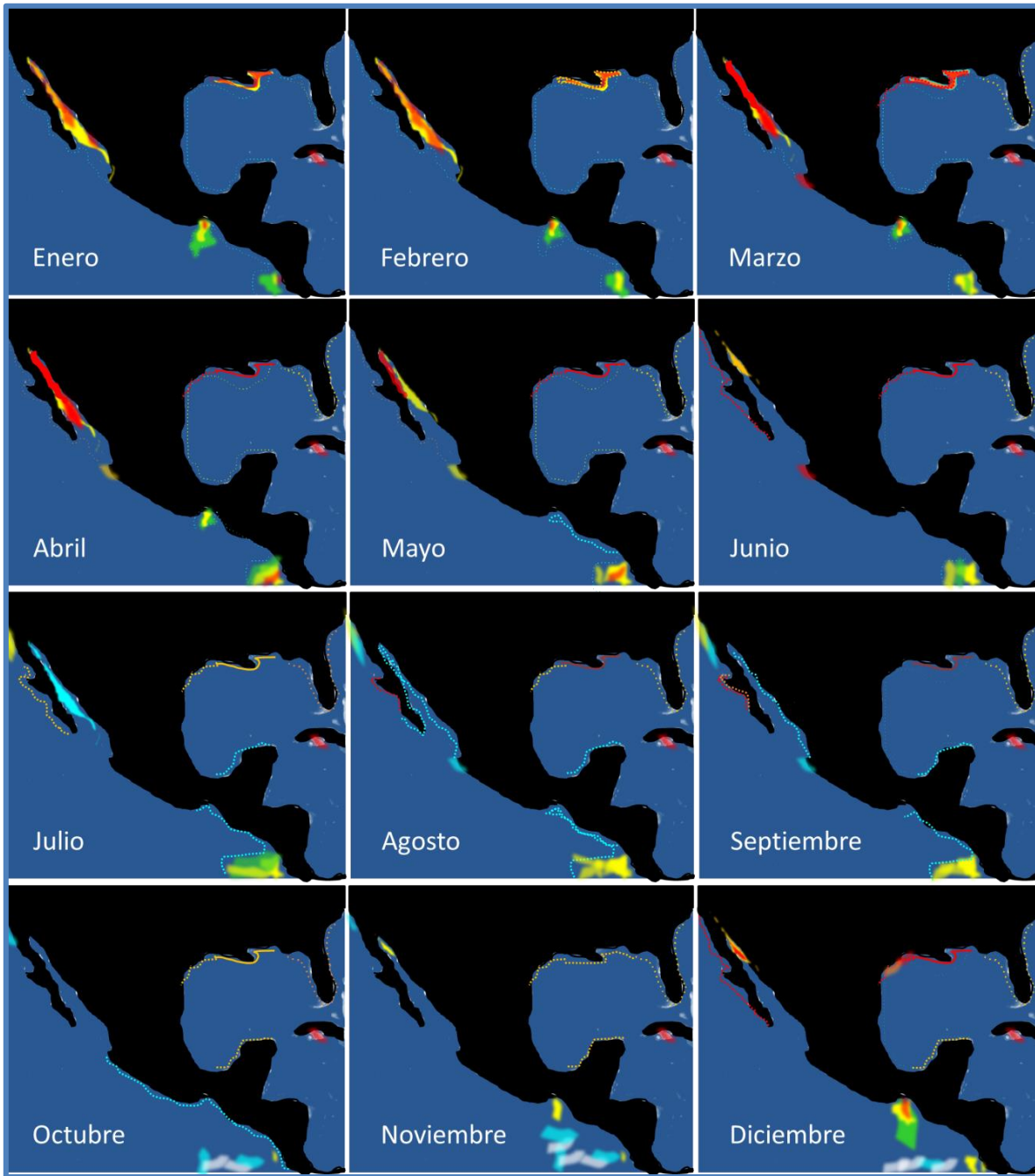


Figura 7. Producción primaria integrada media mensual para el periodo de enero de 1998 a diciembre 2005 (Martínez-Gaxiola *et al.*, 2007).

El resultado de esta aproximación es que la región posee el potencial de exportar C_{org} con una tasa media de $314 \text{ mgC m}^{-2}\text{d}^{-1}$, también se ha reportado que las PPI medias de la región del Pacífico mexicano resultan estadísticamente distintas entre sí. De igual forma, las PPI estacionales son estadísticamente distintas entre sí en cada una de las regiones del Pacífico mexicano. Las PPI medias anuales no muestran diferencias significativas en las regiones del norte del Pacífico mexicano (GC y BC), mientras que en las regiones PTM y GT solo la PPI media para 1998 es estadísticamente diferente a las PPI medias de los demás años estudiados, situación que refleja el fuerte impacto del evento de El Niño 1997-1998 en el sur del Pacífico mexicano (Lara-Lara y Bazán-Guzmán, 2005).

Reyes-Salinas *et al.* (2003), estimaron la PP empleando el método de fluorescencia natural en la bahía de La Paz durante 1996 a 1998. Simultáneamente a los registros de PP se realizaron perfiles verticales de temperatura (CTD) para determinar la estructura de la columna de agua y de los cuales se estimó el índice de estratificación (Φ) de 0 a 100 m de profundidad. Sus resultados indicaron que existe una dependencia lineal de la PP y la mezcla en la columna de agua durante los meses de verano. Donde periodos con una alta estratificación tienden a inhibir la fertilización de la capa superficial, mientras que una columna de agua bien mezclada facilita el proceso de fertilización. Por lo que, determinaron que en la Bahía de La Paz la estratificación asume un papel importante como mecanismo que controla la PP y explica parcialmente la variabilidad estacional observada en la bahía.

Lara-Lara y Bazán-Guzmán (2005), realizaron en 1999 un crucero oceanográfico a lo largo de la costa oeste de México, desde la boca del Golfo de California hasta el Golfo de Tehuantepec (Figura 8), donde llevaron a cabo por primera vez en esta región experimentos de asimilación de ^{14}C y determinaron el contenido de Chl-a. También determinaron las concentraciones de nutrientes (PO_4 y SiO_2). Las

nutriclinas fueron muy superficiales, generalmente dentro de la zona eufótica (Cuadro 3). La temperatura superficial varió entre 19.5°C y 28.3°C, desde la boca del Golfo de California hasta el Golfo de Tehuantepec. La producción primaria y el contenido de Chl-a mostraron un claro patrón de distribución espacial incrementándose de las estaciones del norte hacia el sur.

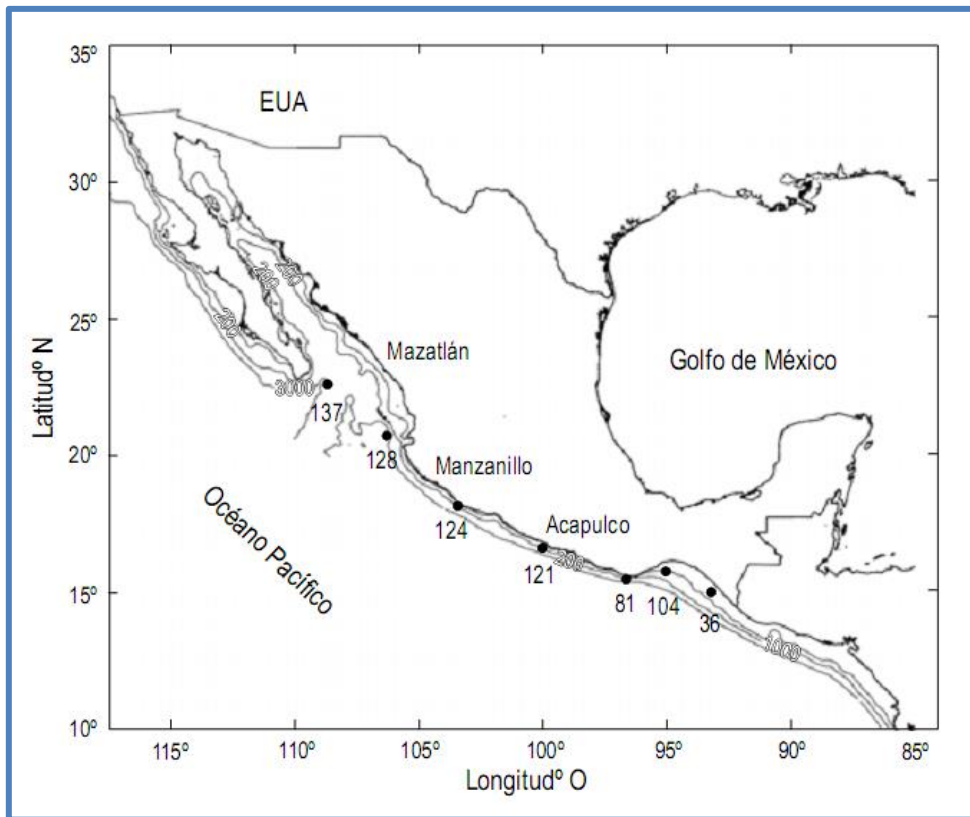


Figura 8. Localización de la zona de estudio sobre la costa oeste de México, desde la boca del Golfo de California hasta el Golfo de Tehuantepec (región III y IV, respectivamente) (Tomado de Lara-Lara y Bazán-Guzmán, 2005).

Cuadro 3. Variaciones de las profundidades de la zona eufótica, las termoclinas y las nutriclinas, y velocidad del viento. Valores máximos de clorofila *a* y producción primaria. Los niveles de irradiancia *in situ* para las máximas concentraciones se muestran entre paréntesis (Tomado de Lara-Lara y Bazán-Guzmán, 2005).

Estación	Zona eufótica (m)	Termoclinas (m)	Nutriclinas (m)		Velocidad del viento (m s ⁻¹)	Máxima concentración de clorofila-a (mg m ⁻³)	Máximo de producción primaria (mg C m ⁻³ h ⁻¹)
			PO ₄ (μM)	SiO ₂ (μM)			
36	45	10	15	28	–	0.72 (22)	4.36 (22)
104	48	10	6	6	11.5	2.06 (22)	10.13 (22)
81	52	5	7	32	1.5	3.78 (22)	14.12 (22)
121	66	20	22	40	5.8	1.92 (22)	10.43 (60)
124	32	20	20	11	5.8	2.17 (6)	5.79 (22)
128	30	20	10	18	7.8	1.11 (22)	3.50 (6)
137	64	40	21	21	13.6	0.54 (22)	1.78 (22)

López-Sandoval *et al.* (2009), estudiaron la PP *in situ* y la biomasa del fitoplancton (concentración de clorofila-a) en la región de Cabo Corrientes (región III), en el Pacífico oriental tropical frente a México, durante tres cruceros oceanográficos (mayo y noviembre del 2002 y junio del 2003). Mediante los resultados obtenidos por imágenes satelitales del color del océano y apoyadas por datos de campo, demostraron que el área frente a Cabo Corrientes puede caracterizarse por tres periodos: (1) un periodo de surgencia relativamente intensa, el cual presentó valores altos de Chl-a y altas tasas de PP (primavera); (2) un periodo de relajamiento de la surgencia, con los mayores valores de PP durante el estudio (finales de primavera–inicios de verano); y (3) el periodo de verano–otoño, con fuerte estratificación de la columna de agua y los menores valores de Chl-a y PP. Demostrando que la región frente a Cabo Corrientes es un área de gran fertilidad, similar a otras regiones ricas del Océano Pacífico frente a México.

Escalante *et al.* (2013), revisaron datos satelitales de 1997 a 2010, lo que les permitió describir la variación de la temperatura superficial del mar (TSM), clorofila *a* (Chl) y productividad primaria (PP) a diferentes escalas temporales y espaciales en el golfo de California. Encontrando que la PP más alta se encontró en la región de islas grandes (RIG) y en el centro del golfo, en donde las inferencias de producción atribuible a la producción nueva se calcularon en más del 60% de PP. Además demostraron que los eventos del El Niño y La Niña afectan a la actividad fitoplanctónica, la cual se restablece a las condiciones “normales” de tres a seis meses ocurridos dichos eventos.

Murillo *et al.* (2013), analizaron los procesos y condiciones fisicoquímicas de la columna de agua frente a Bahía Magdalena, BCS durante un ciclo anual (2008-2009), con el objetivo de determinar su influencia sobre la variabilidad estacional en la productividad primaria empleando el método de ^{14}C y de algunos grupos del fitoplancton que se caracterizaron por perfil de pigmentos fotosintéticos. Analizaron información de viento local, Índice de Surgencia Costera, CTD (temperatura y salinidad) y nutrientes inorgánicos disueltos ($\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$, PO_4^{-3} y SiO_3^{-2}). Reportando que las surgencias costeras son un fenómeno que modula los niveles de PP frente a Bahía Magdalena, afectando la disponibilidad de nutrientes en la zona eufótica. Así como la presencia y concentración de los pigmentos fotosintéticos mostraron una variabilidad modulada por tres etapas hidrográficas (estratificación, transición y mezcla), con mínima concentración durante estratificación y transición, y máxima en la etapa de mezcla debido a la presencia de las surgencias costeras (mezcla vertical).

IV. CONCLUSIONES

1. La producción primaria es la producción de materia orgánica que realizan los organismos autótrofos a través de los procesos de fotosíntesis o quimiosíntesis por lo que son el punto de partida de la circulación de energía y nutrientes a través de las cadenas tróficas.
2. La variabilidad espacial de la productividad primaria en el Pacífico mexicano está determinada por los diferentes variables ambientales a los que se encuentran sometidas cada una de las regiones de acuerdo a la zona geográfica y estacionalidad. Se ha visto que el fenómeno de El NIÑO tiene un efecto importante disminuyendo la productividad primaria.
3. Es fundamental conocer las tasas de producción de carbono inorgánico generado por el fitoplancton marino debido a que estas pueden ser utilizadas en los modelos para estimar los flujos de carbono en la columna de agua y en las redes tróficas.
4. La medida de la producción primaria es un buen indicador de las potencialidades tróficas del ecosistema, la forma más sencilla de medir la producción primaria en un momento determinado es medir la fotosíntesis, ya sea medida como desprendimiento de oxígeno o como incorporación de carbono en condiciones determinadas.
5. Las regiones del pacífico aquí mencionadas presentan diferencias en la actividad de productividad primaria, el Golfo de California es el que presenta mayor PP debido a procesos hidrológicos que constantemente transportan nutrientes a la zona eufótica. El segundo lugar es la región del Golfo de Tehuantepec donde se presentan eventos de surgencia debido a los fuertes vientos, que favorecen el crecimiento de fitoplancton. El tercer lugar es la

región de Baja California y la región del Pacífico Tropical Mexicano es la que presentó los valores más bajos de productividad primaria que se atribuye a una combinación de factores.

V. RECOMENDACIONES

1. Se deben seguir realizando estudios de estimaciones de productividad primaria anualmente en los mares mexicanos para determinar la variación espacial de la productividad primaria y poder inferir que factores son los determinantes de estas variaciones.
2. Realizar estudios de variabilidad, distribución de biomasa y productividad de fitoplancton ya que muestran las importantes implicaciones en el ciclo bioquímico del carbono y en la estructura de la red trófica pelágica.
3. Crear nuevos estudios cuyo objetivo sea describir la variación temporal de la productividad primaria y analizar su relación con la estratificación de la columna de agua.
4. Realizar estudios que correlacionen los valores de productividad primaria con la captura de peces de importancia comercial en alta mar.
5. Los trabajos que tienden hacia el conocimiento de la ecología y la productividad primaria del fitoplancton son pocos, por lo que se recomienda la realización de más estudios sobre la composición y abundancia de la comunidad fitoplanctónica en las regiones oceánicas del Pacífico mexicano.

VI. REFERENCIAS DOCUMENTALES

- Arntz, W. & Tarazona J.** 1990. Effects of El Niño 1982-83 on benthos, fish and fisheries off the South American Pacific coast. In: P.W. Glynn (ed.). Global ecological consequences of the 1982-83 El Niño-Southern Oscillation. *Elsevier Oceanography Series*. 52: 323-360.
- Barber, R. & F. Chavez.** 1986. Ocean variability in relation to living resources during the 1982-1983 El Niño. *Nature*, 319: 279-285.
- Behrenfeld, M. J. & P. G. Falkowski.** 1997. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnol. Oceanogr.* 42: 1-20.
- Bidigare, R., B. Prézelin & R. Smith.** 1992. Bio-optical models and the problems of scaling. In: P.G. Falkowski and A.D Woodhead (eds.), Primary Productivity and Biochemical Cycles of the Sea. Plenum Press, New York, 550 p.
- Bishop, J.** 1989. Regional Extremes in Particulate Matter Composition and Flux: Effects on the Chemistry of the Ocean Interior. *Productivity of the ocean: Present and past*, Berger. 137 p.
- Bograd, S., K. Chereskin & D. Roemmich.** 2006. Transport of mass, heat, salt, and nutrients in the southern California Current System: Annual cycle and interannual variability. *J. Geophys. Res.* 106: 9255-9275.
- Chamberlin, W., C. Booth, D. Kiefer, J. Morrow & R. Murphy.** 1990. Evidence for a simple relationship between natural fluorescence, photosynthesis and chlorophyll in the sea. *Deep-Sea Research*. 37: 951-973.
- Charney, J.** 1955. The generation of oceanic currents by winds. *J. Marine Res.* 14:477-498.

- Chen, T., K. Liu & R. MacDonald.** 2003. Continental margin exchanges. En: Fasham MJ (ed.), *Ocean Biogeochemistry: The role of the ocean carbon cycle in global change*. Springer-Verlag. New Cork. 62 p.
- Cowles, T., R. Desiderio & S. Neuer.** 1993. In situ characterization of phytoplankton from vertical profiles of fluorescence emission spectra. *Marine Biology*. 115: 217-222.
- Cullen, J. & R. Eppley.** 1981. Chlorophyll maximum layers of the Southern California Bight and possible mechanisms of their formation and maintenance. *Oceanol. Acta*. 4: 23-32.
- Cury, P. & C. Roy.** 1989. Optimal environment window and pelagic fish recruitment success in upwelling areas. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 46: 670-680.
- Dawes, C. J.** 1986. *Botánica marina*. Limusa. México, D.F. 673 p.
- Dudgale, R. & J. Goering.** 1967. Uptake of new and regenerated forms of nitrogen in primary productivity. *Limnol. Ocean.* 12: 196-206.
- Durazo, R., G. Gaxiola-Castro, B. Lavaniegos, R. Castro-Valdez, J. Gómez-Valdez & A. Mascarenhas.** 2005. Oceanographic conditions west of the Baja California coast, 2002-2203: A weak El Niño and Subarctic water enhancement. *Ciencias Marinas*. 313: 537-552.
- Eppley, R. & B. Peterson.** 1979. Particulate organic matter flux and planktonic new production in the deep ocean. *Nature*. 282: 677-680.
- Escalante, F., J. Valdez-Holguín, S. Álvarez-Borrego, J. Lara-Lara.** 2013. Variación temporal y espacial de temperatura superficial del mar, clorofila *a* y productividad primaria en el golfo de California. *Ciencias Marinas*. 39: 203-215.
- Espinosa-Carreón, L.** 1996. Productividad primaria y su relación con algunas variables Bio-ópticas en la bahía de Todos Santos, Baja California, México. Tesis de Maestría. CICESE. Ensenada, B. C. 157 p.

- Falkowski, P. & J. Raven.** 1997. Aquatic Photosynthesis. Blackwell Sci., Massachussets. 375 p.
- Falkowski, P., R. Barber & V. Smetacek.** 1998. Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production. *Science*. 281: 200-206.
- Falkowski, P. & R. Scholes.** 2000. The global carbon cycles: a test of our knowledge of earth as a system. *Science* 290: 291-296.
- Fielder, P., F. Chavez, D. Behringer & S. Reilly.** 1992. Physical and biological effects of Los Niños in the eastern tropical Pacific, 1986-1989. *Deep-Sea Res.* 39: 199-219.
- Gaxiola-Castro, G. & S. Alvarez-Borrego.** 1986. Productividad primaria del Pacífico mexicano. Primary Productivity of the Mexican Pacific. *Cienc. Mar.* 12: 26-33.
- Gaxiola-Castro, G.** 1994. Efectos de algunos procesos físicos sobre la fisiología y productividad del fitoplancton marino. Tesis Doctoral. CICESE. Ensenada, B. C. 145 p.
- Gaxiola-Castro, G. & F. Müller-Karger.** 1998. Seasonal phytoplankton pigment in the Eastern Tropical Pacific Ocean as determined by CZCS imagery. En: Brown R (ed.), Remote Sensing of the Pacific Ocean by Satellites. Southwood Press Pty Limited, Australia. 277 p.
- GRID, ARENDAL.** <http://www.grida.no/> (Consulta: 20 de septiembre del 2014).
- Hérmendez, B.** 2002. Variabilidad interanual de las anomalías de la temperatura superficial del mar en aguas cubanas y su relación con eventos El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). *Invest. Mar.* 30: 21-23.
- Kahru, M. & B. Mitchell.** 2000. Influence of the 1997-98 El Niño on the surface chlorophyll in the California Current. *Geophysical Research Letters*. 27: 2937-2940.

- Kiefer, D., S. Chamberlin & R. Booth.** 1989. Natural fluorescence of chlorophyll a: Relationship to photosynthesis and chlorophyll concentration in the western south Pacific gyre. *Limnol Oceanogr.* 35:808-884.
- Kirk, J.** 1994. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Cambridge University Press, London. 509 p.
- Lambert, C., T. Bianchi & P. Santschi.** 1999. Cross-shelf changes in phytoplankton community composition in the Gulf of Mexico (Texas shelf/slope): use of plant pigments as biomarkers. *Continental Shelf Research.* 19: 1-21.
- Lara-Lara, J. & C. Bazán-Guzmán.** 2005. Distribución de clorofila y producción primaria por clases de tamaño en la costa del Pacífico mexicano. *Cienc. Mar.* 31: 11-21.
- Lluch-Cota, S. & S. Álvarez-Borrego.** 1998. Variabilidad temporal de las surgencias por viento en la costa continental del Golfo de California. *GEOS.* 18: 315-317.
- Longhurst, A., S. Sathyendranath, T. Platt & C. Caverhill.** 1995. An estimate of global primary production in the ocean from satellite radiometer data. *J. Plankton Res.* 17: 1245-1271.
- López-Sandoval, D., J. Lara-Lara, M. Lavín, S. Álvarez-Borrego & G. Gaxiola-Castro.** 2009. Productividad primaria en el Pacífico oriental tropical adyacente a Cabo Corrientes, México. *Ciencias marinas.* 35: 169-182.
- Manzano-Sarabia, M. & C. Salinas-Savala.** 2008. Variabilidad estacional e interanual de la concentración de clorofila-a y temperatura superficial del mar en la región occidental del Golfo de México: 1996-2007. *Interciencia.* 33: 628-634.
- Marra, J.** 2002. Approaches to the measurements of plankton production. En: P. J. le B. Williams, D. N. Thomas & C. S. Reynolds (eds.). Phytoplankton

productivity: carbon assimilation in marine and freshwater ecosystems. Blackwell Science. New York. 108 p.

Martínez-Gaxiola, M., R. Sosa-Ávalos & G. Gaxiola-Castro. 2007. Producción de carbono orgánico en los mares mexicanos (1998-2005). En: Hernández-de la Torre, B., y G. Gaxiola-Castro (editores). Carbono en ecosistemas acuáticos de México. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT. México, D.F. 266 p.

Millero, F. 1996. Chemical oceanography. 2nd edition Press. 469 p.

Morel, A. 1991. Light and marine photosynthesis: A spectral model with geochemical and climatological implications. *Prog. Oceanogr.* 26: 263-306.

Morel, A., M. Babin & Y. Dandonneau. 1996. Measured and modeled primary production in the northeast Atlantic (EUMELI JGOFS program): The impact of natural variations in photosynthetic parameters on model predictive skill. *Deep-Sea Res.* 43: 1273-1304.

Murillo, M., R. Cervantes, G. Gaxiola, S. López, F. Aguirre, E. González, Á. Jiménez y F. Hernández. 2013. Variabilidad de la productividad primaria y de pigmentos fotosintéticos en una zona de surgencias de la región Sur de la corriente de California. *CICIMAR Océánides.* 28: 23-36.

Platt, T., S. Sathyendranath, C. Caverhill & M. Lewis. 1988. Oceanic primary production and available light: Further algorithms for remote sensing. *Deep-Sea Res.* 35: 855-879.

Platt, T., C. Caverhill & S. Sathyendranath. 1991. Basin-scale estimates of oceanic primary production by remote sensing: The North Atlantic. *J. Geophys. Res.* 96: 15147-15159.

Platt, T., N. Hoepffner., V. Stuart & C. Brown. 2008. Why Ocean Colour?. The Societal Benefits of Ocean-Colour Technology. IOCCG. Reports of the

International OceanColour Coordinating Group. No. 7, IOCCG. Darmouth, Canadá. 141 p.

Quinn, W., V. Neal & S. Mayolo. 1987. El Niño occurrences over the past four and half centuries. *Journal of Geophysical Research*. 92:449-461.

Raymont, J. 1980. Plankton and productivity in the oceans Vol I- Phytoplankton. Pergamon Press, New York, N.Y. 660 p.

Reyes-Salinas, A., R. Cervantes-Duarte, R. Morales-Pérez y E. Valdez-Holguín. 2003. Variabilidad estacional de la productividad primaria y su relación con la estratificación vertical en la Bahía de La Paz, B. C. S. *Hidrobiológica*. 13(2):103-110.

Rich, J., D. Hollander & E. Birchfield. 1999. Role of regional bioproductivity in atmospheric CO₂ changes. *Global Biogeochemical Cycles*. 13: 531-553.

Robles-Jarero, G. & J. Lara-Lara. 1993. Phytoplankton biomass and primary productivity by size classes in the Gulf of Tehuantepec, México. *J. Plank. Res.* 15: 1341-1358.

Sakshaug, E., A. Bricaud, Y. Dandonneau, P. Falkowski, D. Kiefer, L. Legendre, A. Morel, J. Parslow & M. Takahashi. 1997. Parameters of photosynthesis: definitions, theory and interpretation of results. *J. of Plankton Res.* 19:1637-1670.

Sarmiento, J. & M. Bender. 1994. Carbon biogeochemistry and climate change. *Photosynthesis Res.* 39: 209-34.

Sathyendranath, S. & T. Platt. 1993. Remote sensing of water-column primary production. International Council for Exploration of the Sea Marine. *Science Symposium*. 197: 236-243.

Schlitzer, R. 2000. Applying the adjoint method for biogeochemical modeling: export of particulate organic matter in the world ocean. En: Kasibhatla P, Heimann M, Rayner P, Mahowald N, Prinn R, Hartley D (eds.), Inverse

methods in global biogeochemical cycles. *Geophys. Monogr. Ser.* 114: 107-124.

Strikland, J. & T. Parsons. 1968. A practical handbook of seawater analysis. *Fisheries Res. Bd. Canada. Bulletin* 167. 293 p.

Sze, P. 1993. A biology of the algae. Brown Publishers. Dubuque. 260 p.

Williams, P. J. & B. von Bodungen. 1989. Group report: Export productivity from the photic zone, in *Productivity of the Ocean: Present and Past*, edited by W. H. Berger, V. S. Smetacek, and G. Wefer, John Wiley, Hoboken, N. J. 115 p.

Zuria-Jordán, I., S. Alvarez-Borrego, E. Santamaría & F. Müller-Karger. 1995. Estimación de la biomasa fitoplanctónica, derivada de datos de satélite, frente a Baja California Sur. *Cienc. Mar.* 21: 265-280.