



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL



**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA DESARROLLO
INTEGRAL REGIONAL-SINALOA**

DEPARTAMENTO DE MEDIO AMBIENTE

**VARIABILIDAD ESPACIO TEMPORAL DE LA CLOROFILA *a* Y LA
PRODUCTIVIDAD PRIMARIA EN EL SISTEMA FRONTAL DE BAJA CALIFORNIA
SUR**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRÍA EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE**

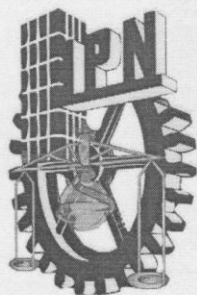
**PRESENTA:
DALIA GUADALUPE LÓPEZ ALCÁNTAR**

Guasave, Sinaloa, México, Diciembre de 2011

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

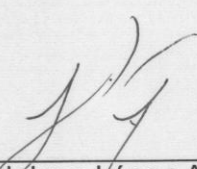
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS



En la Ciudad de Guasave el día 15 del mes noviembre del año 2011, el (la) que suscribe Biol. Dalia Guadalupe López Alcántar alumno (a) del Programa de Maestría en Recursos Naturales y Medio Ambiente con número de registro B091701, adscrito a CIIDIR-SIN, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de la Dra. Teresa Leticia Espinosa Carreón y cede los derechos del trabajo intitulado "Variabilidad espacio temporal de la Clorofila a y la productividad primaria en el Sistema Frontal de Baja California Sur", al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones dada_58@hotmail.com y tespinosac@ipn.mx . Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.



Dalia Guadalupe López Alcántar

Nombre y firma



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS Y DESIGNACIÓN DE DIRECTOR DE TESIS

Guasave, Sinaloa. a 13 de mayo del 2011

El Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CIIDIR-SINALOA en su sesión ordinaria No. 5 celebrada el día 12 del mes de mayo conoció la solicitud presentada por el(la) alumno(a):

López Alcántar Dalia Guadalupe

Apellido paterno

Apellido materno

Nombre (s)

Con registro: B 0 9 1 7 0 1

Aspirante de:

1.- Se designa al aspirante el tema de tesis titulado:
Variabilidad espacio temporal de la Clorofila a y la productividad primaria en el Sistema Frontal de Baja California Sur.

De manera general el tema abarcará los siguientes aspectos:
Procesos físicos interanuales, estacionales y de mesoescala, distribución de la Clorofila a Además, de la variabilidad de la productividad primaria

2.- Se designa como Director de Tesis al C. Profesor:
Dra. Teresa Leticia Espinosa Carreón

3.- El trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesis será elaborado por el alumno en:
Las instalaciones del CIIDIR-Unidad Sinaloa
que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios.

4.- El interesado deberá asistir a los seminarios desarrollados en el área de adscripción del trabajo desde la fecha en que se suscribe la presente hasta la aceptación de la tesis por la Comisión Revisora correspondiente:

El Director de Tesis

Dra. Teresa Leticia Espinosa Carreón



El Aspirante

Dalia Guadalupe López Alcántar

El Presidente del Colegio

Dr. Jorge Montiel Montoya



CIIDIR - IPN
UNIDAD SINALOA
DIRECCION

Medo Ambrak



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Guasave siendo las 10 horas del día 14 del mes de noviembre del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CIIDIR-SIN para examinar la tesis titulada:

"Variabilidad espacio temporal de la Clorofila a y la productividad primaria en el Sistema Frontal de Baja California Sur"

Presentada por el alumno:

López Alcántar Dalia Guadalupe
Apellido paterno Apellido materno Nombre(s)

Con registro:

B	0	9	1	7	0	1
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

Maestría en Recursos Naturales y Medio Ambiente

Después de intercambiar opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Director(a) de tesis

[Signature]

Dra. Teresa Leticia Espinosa Carreón

[Signature]

Dra. Diana Cecilia Escobedo Uñas

[Signature]

Dra. Apolmar Santamaría Miranda

[Signature]

Dr. Wenceslao Valenzuela Quiñonez

[Signature]

Dr. Mario Alonso Bueno Ibarra

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

[Signature]
Dr. Jorge Montiel Montoya



CIIDIR - IPN
UNIDAD SINALOA
CIIDIR - SIN

“La experiencia confirma que, por cada Hombre con anhelos legítimos de progreso y autosuperación, hay miles que desean vivir y vegetar en la ignorancia”.

Rodolfo Benavides

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a todas aquellas personas, que directa o indirectamente participaron en su elaboración.

Principalmente a mi familia ya que sin apoyo no podría haberse materializado, a mi mamá la profesora *Chayito*, a mi papá *Kiki*, a mi mano *Oscar* y sobre todo a mi enano, para ti...

Oscar David

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecerle primeramente a Dios por permitirme estar aquí.

A mi mamá por su apoyo incondicional, su comprensión y su paciencia.

A mi médico por todos los medicamentos recetados los cuales me ayudaron a seguir adelante.

Al CIIDIR-SINALOA, por permitirme haber escalado un eslabón más en mi vida, y a todas aquellas personas que laboran en esta institución.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para la realización del presente trabajo.

Al Programa Institucional de Formación de Investigación (PIFI) por el apoyo económico otorgado.

Muy especialmente a mi Directora de Tesis la Dra. Teresa Leticia Espinosa Carreón, por todos sus consejos y la paciencia que tuvo en el trayecto de la realización de este proyecto de investigación, además de la amistad brindada.

Mis más sinceros agradecimientos a los integrantes de mi comité tutorial, el cual estuvo conformado por los Doctores, Mario Bueno, Wenceslao Valenzuela, Apolinar Santamaria y Diana Escobedo, por hacerme sufrir y ponerme en aprietos en cada una de las evaluaciones, GRACIAS !!!.

A mi amigo y hermano el M. en C. Esteban Manuel Arbizu por sus consejos, su amistad y por todo lo que compartimos, también agradezco enormemente a la Dra. Marlenne Marzano Sarabia, por el apoyo brindado para la aplicación de los FEOs.

A su vez agradezco infinitamente a mis compañeros de generación y de no generación por haberme aguantado, especialmente a los de Medio Ambiente, a todos ustedes GRACIAS.

Esta tesis se desarrolló en las instalaciones del CIIDIR-IPN Unidad Sinaloa, en el departamento de Medio Ambiente. Contó con el financiamiento del proyecto SEP-CONACYT: SEP-2008-103898, Investigaciones Oceanográficas del Sistema Frontal de Baja California. Se contó con el apoyo de la beca CONACYT, así como la Institucional, y PIFI.

INDICE

I.- RESUMEN	i
II.- ABSTRACT	ii
III.- LISTA DE FIGURAS.....	iii
IV.- GLOSARIO.....	vi
1.- INTRODUCCIÓN	1
2.- ANTECEDENTES.....	3
3.- JUSTIFICACIÓN	8
4.- HIPOTESIS	9
5.- OBJETIVOS.....	10
5.1.- OBJETIVO GENERAL	10
5.2.- OBJETIVOS ESPECIFICOS	10
6.- ÁREA DE ESTUDIO	11
7.- METODOLOGÍA	13
7.1.- Obtención de imágenes de Clorofila a (Cla-a).....	13
7.2.- Obtención de imágenes de Temperatura Superficial del mar (TSM)	14
7.3.- Ciclo Estacional	14
7.4.- Índices Climáticos	15

7.5.- Productividad Primaria Modelada	16
7.6.- Funciones Empíricas Ortogonales (FEO's)	17
8.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19
8.1.- Clorofila a (Cla-a)	19
8.1.1.- Promedio General	19
8.1.2.- Climatología.....	20
8.1.3.- Ciclo estacional.....	22
8.2.- Temperatura Superficial del Mar	25
8.2.1.- Promedio General	25
8.2.2.- Climatología.....	26
8.2.3.- Ciclo estacional.....	28
8.3.- Índices climáticos	30
8.4.- Procesos interanuales.....	34
8.5.- Casos de estudio	37
8.5.1.- Condiciones El Niño 1997-1998	37
8.5.2.- Condiciones 2002.....	41
8.5.3.- Condiciones La Niña 2008.....	44
8.6.- Productividad Primaria Modelada	46
9.- DISCUSIÓN GENERAL.....	57
10.- CONCLUSIONES	58
11.- LITERATURA CITADA.....	60

I.- RESUMEN

El fitoplancton forma la etapa inicial en el proceso de producción de materia orgánica en el océano constituyendo el primer eslabón de la trama trófica. Los mecanismos dinámicos que controlan las variaciones en la disponibilidad de nutrientes y luz modifican los patrones de la variabilidad espacio-temporal de este. La concentración de Clorofila *a* (Cla *a*) ha sido utilizada como un indicador de la biomasa fitoplanctónica, el fitoplancton es responsable de la asimilación de CO₂ en el océano, proceso conocido como productividad primaria (PP). El Sistema Frontal de Baja California Sur (SFBCS) se encuentra al sur del Sistema de la Corriente de California frente a las costas de Baja California Sur (20° y 24° N, 107° y 117° W). Pese a que forma parte de uno de los ecosistemas más productivos del mundo, esta sistema ha sido poco estudiado, por lo que aún se desconoce la variabilidad de la Cla *a* y de PP. El objetivo del presente trabajo es describir la variabilidad espacio-temporal de la concentración de Cla *a* y PP, a partir de compuestos mensuales y semanales de imágenes de color del océano procedentes del sensor SeaWiFS, así como de temperatura superficial del mar (TSM) del sensor AVHRR, durante el periodo de 1997-2010 para la región del SFBCS. Se calculó el ciclo estacional tanto de Cla *a* como de la TSM mediante la serie de Fourier obteniendo el valor promedio de cada serie y la varianza explicada (VE) por el ciclo estacional. La distribución promedio de Cla *a* presentó los valores más altos cerca de la costa (>2mg m⁻³), con un gradiente que disminuye hacia mar adentro, las mayores concentraciones de Cla *a* se registraron en los meses de abril a junio (primavera) y el ciclo estacional mostro el 54% de VE para toda la serie de tiempo. El promedio general de la TSM nuestro isotermas perpendiculares a la costa y presentó un gradiente latitudinal. En primavera se presentaron las más bajas temperaturas en toda el área de estudio, estos resultados sugieren que las surgencias podrían ser el principal factor que contribuye a la variación estacional de la concentración de la Cla-*a* las cuales se presentan principalmente en primavera. La VE de la TSM fue del 82% para toda la serie de tiempo, al restarle el ciclo estacional a la serie de tiempo tanto de Cla-*a* como TSM se magnificaron los eventos interanuales, encontrando una relación con los eventos El Niño y La Niña, además de una estrecha relación con la Oscilación del Giro del Pacífico Norte (NPGO) en su fase positiva. El primer modo de las Funciones Empíricas Ortogonales (FEOs) para PP representa el 14.2% de VE, dicha variación está dada principalmente por eventos interanuales, encontrando dos áreas de influencia interanual, una costera y la otra oceánica.

Palabras clave: Clorofila, Productividad primaria, Variabilidad.

II.- ABSTRACT

Phytoplankton forms the initial stage in the process of organic matter production in the ocean, constituting the first link in the trophic plot. The dynamic mechanisms that control the variations in the availability of nutrients and light modify its patterns of the variability space-temporary. The concentration of chlorophyll *a* (Cla *a*) has been used as an indicator of the phytoplankton biomass, the phytoplankton is responsible for the CO₂ assimilation of in the ocean, this process is known as Primary Production (PP). The Southern Baja California Frontal System (SFBCS) is located to south of the California Current System in front of Southern Baja California coasts (20° y 24° N, 107° y 117° W). Even though it's part of one of the most productive ecosystems in the world, this system has been barely studied, which is why the variability of the Cla *a* and PP is still unknown. The objective of this work is to describe the space-temporary variability of the Cla *a* and PP, starting with monthly and weekly compounds of color images of the ocean coming from the SeaWiFS sensor, as well as the sea superficial temperature (TSM) from the AVHRR sensor, during the 1997 – 2010 period for the SFBCS region. The seasonal cycles of the Cla-*a* and TSM were calculated by Fourier analysis, obtained the average value of each series and the explained variance (VE) for the seasonal cycles. The average distribution of Cla *a* presented high values near the coast (>2mg m⁻³), with a gradient that diminishes out to sea, the highest concentrations of Cla *a* were registered from April to June (Spring) and the seasonal cycle showed 54% of VE for all the time series. The general average of the TSM shows perpendicular isotherms to the coast and presented a latitudinal gradient. The lowest temperatures in the study area were presented in Spring, these results suggest that the upwelling could be the main contributing factor for the seasonal variations of the Cla *a* concentration during spring. The VE of the TSM was of 82% for the whole time series, when subtracting the seasonal cycle from both Cla *a* and TSM time series, the interannual events were magnified, finding a relationship with the El Niño and La Niña events, in addition a strong relationship with the Oscillation of the North Pacific index (NPGO) in their positive phase. The first mode of the Orthogonal Empirical Functions (FEOs) for PP represents the 14.2% of VE, this variation is given mainly by interannual events, finding two areas of influence, one coastal an the other oceanic.

Key words: Chlorophyll, primary production, variability.

III.- LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del Sistema Frontal de Baja California Sur.....	13
Figura 2. Promedio de la concentración de la clorofila <i>a</i> obtenido mediante imágenes del SeaWiFS durante el periodo de septiembre de 1997 a septiembre de 2010.....	21
Figura 3. Promedio estacional de la concentración de la clorofila <i>a</i> obtenidos mediante imágenes del SeaWiFS durante el periodo de septiembre de 1997 a septiembre de 2010.	22
Figura 4. Varianza Explicada del ciclo estacional de la concentración de la clorofila <i>a</i> de septiembre 1997 hasta septiembre de 2010.	23
Figura 5. Variabilidad temporal y ciclo estacional de la Clorofila- <i>a</i> (mg m^{-3}) a partir de imágenes procedentes del SeaWiFS del periodo comprendido de septiembre de 1997 a septiembre de 2010.....	25
Figura 6. Promedio general de temperatura superficial del mar, obtenido a partir de compuestos mensuales procedentes del sensor AVHRR, del periodo comprendido de enero de 1997 a diciembre de 2009.	26
Figura 7. Promedio estacional de la temperatura superficial del mar obtenida mediante imágenes procedentes del sensor AVHRR durante el periodo de enero de 1997 a diciembre de 2009 de la región del SFBCS.....	28
Figura 8. Varianza Explicada del ciclo estacional de la temperatura superficial del mar obtenida de imágenes del sensor AVHRR, a partir de enero de 1997 a diciembre de 2009.....	30

Figura 9. Serie de tiempo de la temperatura superficial del mar a partir de enero de 1997 a diciembre 2009, obtenido de los promedios mensuales de los compuestos de AVHRR.....	31
Figura 10. Índice de la Oscilación Decadal del Pacífico, Índice Multivariado ENSO e índice de la Oscilación del Giro del Pacífico Norte a partir de septiembre 1997 a diciembre 2009.	34
Figura 11. Variabilidad temporal no-estacional de la Clorofila <i>a</i> y TSM a partir de imágenes procedentes del SeaWiFS y del AVHRR del periodo comprendido de septiembre de 1997 a diciembre de 2009.	37
Figura 12. Promedio de temperatura superficial del mar en la región del SFBCS obtenida mediante imágenes del AVHRR a partir de septiembre de 1997 a diciembre de 1997.	39
Figura 13. Promedio de temperatura superficial del mar en la región del SFBCS obtenida mediante imágenes del AVHRR a partir de enero de 1998 a diciembre de 1998.....	40
Figura 14. Anomalías de la concentración de Clorofila <i>a</i> durante el periodo de septiembre de 1997 a diciembre de 1997, obtenidas del sensor SeaWiFS.	41
Figura 15. Anomalías de la concentración de Clorofila <i>a</i> durante el periodo de enero de 1998 a diciembre de 1998, obtenidas del sensor SeaWiFS.	42
Figura 16. Anomalías de temperatura superficial del mar de 2002, calculas de la serie de enero a diciembre de 2002 a partir de imágenes de satélite procedentes del sensor AVHRR.....	43
Figura 17. Anomalías de la concentración de Clorofila <i>a</i> de 2002, calculas de la serie de septiembre a diciembre de 2002 a partir de imágenes de satélite procedentes del sensor SeaWiFS.	43

Figura 18. Anomalías de temperatura superficial del mar de 2008, calculas de la serie de enero de 1997 a diciembre de 2009 a partir de imágenes de satélite procedentes del sensor AVHRR.	46
Figura 19. Anomalías de la concentración de Clorofila <i>a</i> de 2008, calculas de la serie de septiembre de 1997 a diciembre de 2010 a partir de imágenes de satélite procedentes del sensor SeaWiFS.	46
Figura 20.- Análisis de correlación entre los índices climáticos y la productividad primaria en el Sistema Frontal de Baja California Sur a partir de imágenes de satélite durante septiembre de 1997 a diciembre de 2006.	50
Figura 21.- Imagen espacial y análisis temporal del primer modo de las Funciones Empíricas Ortogonales de la serie de septiembre de 1997 a diciembre de 2006, obtenido mediante imágenes de satélite de productividad primaria del Sistema Frontal de Baja California Sur.	52
Figura 22.- Imagen espacial y análisis temporal del segundo modo de las Funciones Empíricas Ortogonales de la serie de septiembre de 1997 a diciembre de 2006, obtenido mediante imágenes de satélite de productividad primaria del Sistema Frontal de Baja California Sur.	54
Figura 23.- Imagen espacial y análisis temporal del tercer modo de las Funciones Empíricas Ortogonales de la serie de septiembre de 1997 a diciembre de 2006, obtenido mediante imágenes de satélite de productividad primaria del Sistema Frontal de Baja California Sur.	55
Figura 24.- Imagen espacial y análisis temporal del cuarto modo de las Funciones Empíricas Ortogonales de la serie de septiembre de 1997 a diciembre de 2006, obtenido mediante imágenes de satélite de productividad primaria del Sistema Frontal de Baja California Sur.	57

IV.- GLOSARIO

Advección: Transporte horizontal de partículas que puede estar relacionado a un régimen de corriente.

Anomalía: Término utilizado para referirse a los valores por encima o por debajo del promedio general de una o más variables.

Armónicos: Serie de variaciones adecuadamente acomodadas en un mismo rango o frecuencia, configurando un ciclo.

Biomasa: Masa de un componente del ecosistema por unidad de área o volumen.

Capa de Mezcla: Capa superficial del océano la cual presenta condiciones homogéneas y es delimitada por un cambio brusco en la temperatura.

Ciclo estacional: Serie de fases que experimenta un fenómeno periódico, representado por armónicos comprendidos de una señal anual y una semianual.

Clorofila a: Pigmento fotosintético universal presente en organismo autótrofos. Con fórmula química $C_{55}H_{72}MgN_4O_5$. Su función principal es la absorción de la luz.

El Niño: Condiciones cálidas en el océano identificado por el calentamiento anómalo de la capa superficial del mar, el cual provoca un hundimiento de la termoclina, una reducción en la disponibilidad de nutrientes en la zona eufótica y por ende baja producción primaria.

ENSO: Ciclo de eventos El Niño/La Niña el cual se define como El Niño Oscilación del Sur, en el cual están relacionados procesos atmosféricos y oceánicos.

Escala estacional: Comprende una escala espacial de cientos a miles de kilómetros con una duración de un año.

Escala interanual: Escala espacio-temporal con una duración de uno a varios años, y con una extensión de miles hasta diez mil kilómetros.

Feopigmentos: Productos de la degradación de la Clorofila.

Fitoplancton: Grupo de organismos marinos autótrofos.

Fotosíntesis: Proceso mediante el cual se fija CO_2 del ambiente y es transformado en biomasa.

Frentes: Región definida por una alta productividad biológica, producto de la confluencia de masas de agua de diferentes densidades.

Irradiancia: Es la energía de la radiación solar que se recibe en una superficie determinada en un instante dado, la cual se mide en unidades de W/m^2 .

La Niña: Condiciones frías en el océano, producto de la intensificación de los vientos alisios, en el cual se presenta principalmente una termoclina más somera, alta disponibilidad de nutrientes, altas concentraciones de nutrientes y altos valores de producción primaria.

Mesoescala: Escala espacio-temporal que se caracteriza por presentar procesos físicos con una extensión de decenas hasta cientos de kilómetros y con una duración de semanas a meses.

Producción primaria: Es la cantidad de energía fijada por los vegetales en la fotosíntesis.

Productividad Primaria: Proceso que transforma carbono inorgánico en materia orgánica mediante la asimilación fotosintética del CO_2 introduciendo carbono en la cadena trófica acuática.

Radiancia: Flujo radiante emitido por unidad de superficie y por ángulo sólido.

Reflectancia: Cantidad de energía que es reflejada por un objeto luego de que esta incide sobre él. El resto de la energía incidente puede ser transmitida o absorbida por el objeto.

Remolino: Es un volumen de agua giratorio, producto del efecto de las mareas y corrientes, varían de metros a kilómetros, y de segundos a meses. Los hay de dos tipos: anticiclónico, con un giro en sentido de las manecillas del reloj y presentan

un núcleo cálido, mientras que el ciclónico, su giro contra las manecillas del reloj, y genera el ascenso de agua con baja temperatura, alta salinidad y frecuentemente rica en nutrientes.

Sensores remotos: instrumento capaz de detectar, caracterizar y cuantificar la energía que proviene de objetos situados a la distancia.

Surgencia: Afloramiento de las capas de agua subsuperficiales hacia la superficie en regiones orientales de los océanos en las zonas de convección, trayendo consigo una rica carga de sedimentos y nutrientes que permite una irrupción poblacional en los animales que se alimentan de ellos.

Termoclina: Capa del océano donde la temperatura disminuye muy bruscamente con la profundidad.

Zona Eufótica: Profundidad hasta donde llega el 1 % de irradiancia superficial en la columna de agua.

1.- INTRODUCCIÓN

El fitoplancton forma la etapa inicial en el proceso de producción de materia orgánica en el mar y ocupa el primer eslabón de la cadena trófica de los océanos siendo así el alimento básico de los consumidores (Platt *et al.*, 1992), llegando a determinar la riqueza específica de los niveles tróficos superiores.

Su composición, crecimiento y distribución, se encuentran controlados en forma compleja por una combinación de numerosos factores físicos, químicos y biológicos, entre los que destacan la luz, la disponibilidad de nutrientes y la profundidad de la capa de mezcla (Day *et al.*, 1989; Riley y Chester, 1989; Smayda, 1990), variando esta última a lo largo del año, donde el esfuerzo del viento y el calentamiento/enfriamiento de la columna de agua son los principales factores que la determinan (Kiefer y Kremer, 1981).

Uno de los ecosistemas más importantes y estudiados del Océano Pacífico Nor-Oriental es la Corriente de California (CC), la cual forma parte de el Sistema de la Corriente de California (SCC) (Lynn y Simpson, 1987; Thomas y Brickley, 2006), presentando importancia por los altos niveles de productividad primaria (PP) originados por los sistemas de surgencias costeras, las cuales aportan altas concentraciones de nutrientes inorgánicos en la columna de agua (Hernández *et al.*, 2004).

Los estudios realizados en el SCC empezaron en 1949 cuando el Departamento de Pesca de California, el Servicio de Pesquería de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) y el Departamento de Oceanología de Scripps formaron un programa denominado "California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations" (CalCOFI), el cual tenía como objetivo principal estudiar los aspectos ecológicos de la población de sardina, el área de estudio comprendía desde el Norte de California hasta el sur de la península de Baja California, incluyendo el Golfo de California, sin embargo, el área se limitó sólo en la región de EUA debido a que en 1983 se declaró la Zona Económica Exclusiva de México.

En 1997, el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) inició el programa “Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California” (IMECOCAL), diseñado para proveer descripciones cuantitativas de procesos físicos y biológicos que contribuyan a ampliar nuestra comprensión del papel que juega la estructura y procesos físicos en la dinámica del ecosistema de la Corriente de California, en el sector correspondiente a Baja California.

Al sur del SCC se encuentra el Sistema Frontal de Baja California Sur (SFBCS), Etnoyer y colaboradores (2004) describen esta zona como “una región biológicamente rica y dinámicamente activa”, la cual se caracteriza por presentar en la superficie oceánica estructuras horizontales con rasgos de frentes térmicos transitorios y variables tanto en espacio como en el tiempo, estos son producto de la confluencia de masas de agua de diferentes densidades las cuales inducen advección vertical de nutrientes (Bakun, 1996), estimulando el crecimiento del fitoplancton, y con ello la productividad primaria.

Tanto la concentración de la Clorofila *a* (Cla-*a*) y la PP se ven afectadas por procesos particulares de cada zona geográfica, que son modulados por factores ambientales tanto locales como globales, situados en diferentes escalas espacio-temporales (interanual, estacional y mesoescala) (González-Morales *et al.*, 1993; Gaxiola-Castro *et al.*, 2002; Espinosa-Carreón, 2005). Dentro de los procesos interanuales se encuentra la Oscilación del Giro del Pacífico Norte que en su fase positiva propicia condiciones favorables para el incremento de la Cla-*a*, así como de la PP (Di Lorenzo *et al.*, 2008). Sin embargo, el SFBCS se encuentra fuera de los límites del área de estudio del programa IMECOCAL, aún a pesar de que en ocasiones el monitoreo de estaciones se extiende hacia el sur de dicha área, éste es insuficiente, por esta razón es necesario realizar estudios con la finalidad de conocer los procesos espacio-temporales que controlan la variabilidad tanto de la temperatura superficial del mar y de la Cla-*a* como indicador “proxy” de biomasa fitoplanctónica así como la tasa de asimilación de carbono (PP), para conocer el papel que el SFBCS juega en el ciclo del carbono.

2.- ANTECEDENTES

Las imágenes de los sensores remotos proporcionan datos de la concentración media de pigmentos fotosintéticos en la primera profundidad óptica (Kirk, 1994), profundidad a la cual la irradiancia es reducida a $1/e$ de su valor superficial (Cervantes-Duarte *et al.*, 2000; Fuentes-Yaco *et al.*, 2008), la utilización de esta herramienta ha facilitado estudios a nivel global y local de la estimación de biomasa fitoplanctónica en diferentes escalas espacio-temporales.

El primer sensor dirigido para el estudio de la oceanografía biológica fue el Coastal Zone Color Scanner (CZCS), diseñado para generar información de la concentración de los pigmentos fotosintéticos (clorofila *a* + feopigmentos). Fue lanzado en 1978, su misión duró hasta 1986, dicho sensor estaba equipado con 6 bandas espectrales, 4 de ellas en el espectro de luz visible, la primera banda en el azul (433-453 nm) para la absorción de la clorofila, la segunda en el verde (510-530 nm) para la concentración de clorofila, la tercera en el amarillo (540-560 nm) para la absorción de materia orgánica disuelta o sedimentos suspendidos y la cuarta en el rojo (660-680 nm) para la absorción de aerosoles, una quinta en el infrarrojo cercano (700-800 nm), para “observar” la vegetación terrestre y la sexta en el infrarrojo térmico (10500-12500 nm), para detectar la temperatura superficial del mar, este sensor permitió que oceanógrafos estudiaran regiones extensas del océano (Barocio-León *et al.*, 2007).

Zuria *et al.*, en 1995 emplearon datos del Satélite CZCS en la región frente a Baja California Sur analizando la concentración de Cla-*a* como indicador de la biomasa fitoplanctónica, mostrando la asociación entre los fenómenos físicos, como movimientos de masas de agua y la ocurrencia de eventos de surgencias con valores altos de concentración de Cla *a*.

En septiembre de 1997 fue lanzado el sensor Sea viewing Wide Field of view Sensor (SeaWiFS), a bordo del satélite OrbView-2. Con respecto al CZCS, a este sensor se le añadieron dos bandas en el infrarrojo intermedio para la corrección atmosférica y bandas en el azul y azul intermedio, para proporcionar

estimaciones más exactas de clorofila en presencia de materia orgánica disuelta (MOD).

Uno de los estudios realizados utilizando compuestos mensuales de satélite del SeaWiFS con una resolución de 4x4 km por píxel, es el de Thomas y Brickley (2006) los cuales reportan la distribución que presenta la clorofila en la CC de los 23-50° N durante septiembre de 1997 a diciembre de 2005, encontrando anomalías positivas durante el invierno (febrero) en la parte norte de la CC y débilmente negativas en la región sur, mientras que en primavera (mayo y junio) reportan anomalías negativas en la parte norte de California hasta Cabo Mendocino para 2005, debido a las altas temperaturas registradas para esa zona.

El Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) es un radiómetro de cuatro o cinco canales (dependiendo de la versión) que mide la radiación emitida y reflejada en el espectro de luz visible, infrarrojo cercano y las regiones infrarrojas termales del espectro electromagnético. Inició sus operaciones a partir de noviembre de 1981 a bordo de los satélites NOAA -7, 9 y 11. Este sensor es capaz de proporcionar información de la radiancia superficial global de día y noche en tiempo real información que mediante algoritmos es transformada en unidades de temperatura superficial del mar (McClain, 1985).

La combinación de datos obtenidos de satélites han proporcionado seguimientos de procesos interanuales (Cavazos-Guerra, 2003, Venegas *et al.*, 2008), como el evento de El Niño el cual se caracteriza por transportar agua cálida y con mayor salinidad desde los trópicos hacia la región de la Corriente de California, induciendo calentamiento en la capa superficial y un incremento en el nivel medio del mar (Durazo y Baumgartner, 2002). La presencia de este evento hace más profunda la termoclina, lo que reduce la disponibilidad de nutrientes hacia la zona eufótica, como resultado del incremento de la estratificación en la columna de agua (Durazo y Baumgartner, 2002; Durazo, 2010). Lo anterior trae como consecuencia una disminución en la producción del fitoplancton al presentarse una disminución en el enriquecimiento de la zona eufótica en años ENSO (El Niño/Southern Oscillation por sus siglas en inglés) (Barber y Chavez 1983; Barber *et al.*, 1985). Por lo contrario, en condiciones frías ó los eventos La Niña se intensifican los procesos de mezcla, generando una termoclina más

somera y un incremento en el transporte de aguas frías y ricas en nutrientes hacia la superficie (Hernández *et al.*, 2004).

En 2004, Hernández y colaboradores analizan los efectos del ENSO en la producción primaria frente a Baja California y reportan que se incrementa un año antes de que ocurra un ENSO, disminuye durante el evento y aumenta de nuevo un año después. El fenómeno ENSO es el resultado de un complejo sistema de fluctuaciones climáticas entre el océano y la atmósfera. Los efectos de los años ENSO en la capa pelágica del océano están asociados con disminuciones en la biomasa fitoplanctónica (Feldman *et al.*, 1984) y en la PP (Barber y Chavez, 1983), lo cual está relacionado con decrementos en la concentración de nutrientes inorgánicos en la zona eufótica (Dugdale, 1967; Barber y Chavez, 1983).

En la región sur de la CC durante el año 2000, Espinosa-Carreón (2005) utilizando imágenes de satélite, realizó un estudio sobre la relación entre los procesos físicos de mesoescala y la PP, en el cual reporta que la PP presenta mecanismos de fertilización principalmente en las zonas de surgencias, así como en el Frente Ensenada. En ese mismo año Durazo *et al.*, describen las condiciones oceanográficas frente a las costas de Baja California y la influencia de un evento El Niño débil (2002-2003) mediante datos *in situ*, reportan que el evento fue enmascarado por la intrusión de Agua Subártica hasta los 28°N, lo que provocó un incremento de la biomasa fitoplanctónica dos veces mayor que la reportada para El Niño 1997-1998.

En 2004, Kahru y colaboradores realizaron un estudio sobre la PP en la CC evaluando diferentes modelos para calcular la productividad primaria neta, la cual se define como: la producción primaria total, menos las pérdidas debido a la respiración del fitoplancton. Concluyendo que el modelo VGPM (Vertical Generalized Production Model) se ajusta a datos tomados *in situ*, dado que este modelo incluye el parámetro de temperatura superficial del mar (TSM), el cual está íntimamente relacionado con la disponibilidad de nutrientes en la columna de agua.

Barocio-León *et al.* (2007) realizaron un estudio sobre PP en la zona eufótica del SCC dividiendo el área en subregiones de acuerdo con la

clasificación de Millán-Núñez *et al.* (1997), encontraron que las variaciones interanuales de las subregiones costeras están relacionadas con los factores físicos y climatológicos que afectan las surgencias, mientras que las variaciones interanuales en mar adentro aunque son mínimas, están asociadas con la circulación oceánica.

En 2008 Gaxiola-Castro *et al.*, analizan la respuesta del ecosistema pelágico a la variabilidad interanual del océano frente a Baja California y reportan que las anomalías negativas de Cla-a podrían estar afectadas por procesos ecológicos subsuperficiales de abajo hacia arriba y viceversa, asociado a la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO por sus siglas en inglés) en su fase cálida, ya que la profundidad de la nutriclina en la CC está relacionada con el índice de la PDO, siendo más profunda cuando el índice es positivo, además la salinidad presente en la región causa una condición subsuperficial como un tapón que obstruye el transporte vertical de nutrientes hacia la capa superficial, el fitoplancton principalmente diatomeas, responden a estos procesos de limitación de nutrientes, induciendo baja abundancia.

Para 2008 Di Lorenzo y colaboradores describen la Oscilación del Giro del Pacífico Norte (NPGO) como un patrón climático que emerge del segundo modo de la aplicación de las Funciones Empíricas Ortogonales (FEOs) de la altura del nivel del mar, el cual tiene una correlación positiva con fluctuaciones de largo plazo de salinidad, nutrientes y Cla-a en la CC. Dichos autores mencionan que cuando existe una intensificación del giro, este provoca un acarreo de agua de origen subártico (fría y rica en nutrientes) y una intensificación de surgencias costeras, que a su vez conducen a un mayor aporte de nutrientes y con ello un aumento de la concentración de Cla-a en el SCC.

Entre los estudios realizados en el SFBCS se encuentran los desarrollados por Etnoyer *et al.* 2004 y 2006 donde reportan la distribución de mamíferos superiores como la ballena azul y la tortuga marina del género *Careta*, encontrando que estas especies permanecen durante cierto tiempo frente a las costas de Baja California Sur ya que las estructuras identificadas como frentes térmicos mediante las imágenes de temperatura indican una alta concentración de fitoplancton la cual es la base de la cadena trófica en el océano.

3.- JUSTIFICACIÓN

Los océanos son parte integral de los procesos naturales del ciclo del carbono a escala global y constituyen un gran reservorio, los procesos biológicos en el océano contribuyen a la absorción de CO₂ (Falkowski *et al.*, 2000), el cual es fijado por el fitoplancton a través de la fotosíntesis, este proceso promueve el flujo de CO₂ de la atmosfera hacia el océano (Maher y Dennis, 2001), la exportación de CO₂ hacia la profundidad del océano se le conoce como bomba biológica (Treguer, 2000) y se calcula que entre el 30 y 50 % del CO₂ liberado a la atmósfera, es removido y exportado de la superficie hacia grandes profundidades del océano como carbono inorgánico disuelto y carbono biogénico derivado de la PP (Tans *et al.*, 1990).

El fitoplancton presenta respuestas al forzamiento físico, tales como la influencia de los procesos interanuales y de mesoescala (Durazo *et al.*, 2005; Gaxiola-Castro *et al.*, 2008), dichas respuestas cambian de región en región, en la porción sur de la CC las propiedades físicas, químicas y biológicas presentan una alta variabilidad espacial y temporal (Durazo y Baumgartner, 2002; Hernández *et al.*, 2004) afectando tanto la distribución del fitoplancton, como la incorporación de carbono (Espinosa-Carreón, 2005), debido principalmente a eventos interanuales tales como El Niño/La Niña, la Oscilación Decadal del Pacífico y la Oscilación del Giro del Pacífico Norte, los cuales producen condiciones positivas o negativas para el primer nivel de las redes tróficas en el océano. Conocer la respuesta de la TSM y la Cla-a (como una estimación proxy de la biomasa fitoplanctónica), así como de la PP en el SFBCS, a dichos eventos, lo cual permitirá conocer las zonas de influencia de estos, además de servir como base para entender la importancia

4.- HIPÓTESIS

La variabilidad de la biomasa fitoplanctónica y la productividad primaria en la zona eufótica están relacionadas con los procesos interanuales principalmente con la Oscilación del Giro del Pacífico Norte.

5.- OBJETIVOS

5.1.- OBJETIVO GENERAL

Identificar la variabilidad espacio-temporal de la Clorofila *a* y la productividad primaria en el Sistema Frontal de Baja California Sur durante el periodo de 1997-2010 utilizando imágenes de satélite.

5.2.- OBJETIVOS ESPECIFICOS

Identificar mediante imágenes de satélite los patrones espacio-temporales de la Clorofila *a* y temperatura superficial del mar.

Relacionar los patrones de variación temporal de la Clorofila *a* y temperatura superficial del mar, con diferentes índices climáticos.

Identificar los principales procesos que controlan los patrones de variación de la producción primaria en la zona eufótica.

6.- ÁREA DE ESTUDIO

El Sistema Frontal de Baja California Sur (SFBCS) se encuentra, aproximadamente a 150 Km de la costa de Baja California Sur, entre los 20 y 28° latitud N y entre 107 y 117° longitud W (figura 1), el sistema se define como una región biológicamente rica y dinámicamente activa (Etnoyer *et al.*, 2004).

El SFBCS es una región que manifiesta en la superficie oceánica una alta densidad de estructuras horizontales con rasgos de frentes térmicos. Su origen se puede atribuir en parte a la confluencia de aguas frías de baja salinidad de la Corriente de California (CC) y aguas templadas de la Corriente de Davidson, más conocida como Contracorriente de California (CcC) (Etnoyer *et al.*, 2004).

Se estima que la CC posee un ancho de 100 Km y una rapidez promedio inferior de 25 cm seg⁻¹. Comparado con las corrientes de frontera orientales, es un flujo relativamente poco profundo (se localiza entre la superficie de 0 a 300 m) (Bograd *et al.*, 2001), recorre de norte a sur, gran parte de la costa oeste de Norteamérica. Esta corriente es generada por el campo de vientos de gran escala (Lynn y Simpson, 1987). Su variación estacional se manifiesta en su localización, fuerza y profundidad (Durazo *et al.*, 2005) a lo largo y a través de la dirección del flujo de origen subártico (Sverdrup *et al.*, 1942; Pavlova, 1966; Hickey, 1978).

La CC se intensifica durante primavera y verano debido al efecto de los vientos dominantes del Nor-Noroeste, los cuales por un lado, impulsan el agua hacia el sur y por otro, como resultado del transporte de Ekman, y por balance de masas, generan eventos intensos de surgencias costeras (González-Ruelas, 2000; De la Cruz-Orozco *et al.*, 2007). Hacia el final del verano los vientos disminuyen, y la componente nor-noroeste se atenúa. A partir de esta época se desarrolla la Contracorriente de California (CcC) que fluye hacia el polo desde Baja California hasta Punta Concepción, EUA (Hickey, 1979; Lynn y Simpson, 1987).

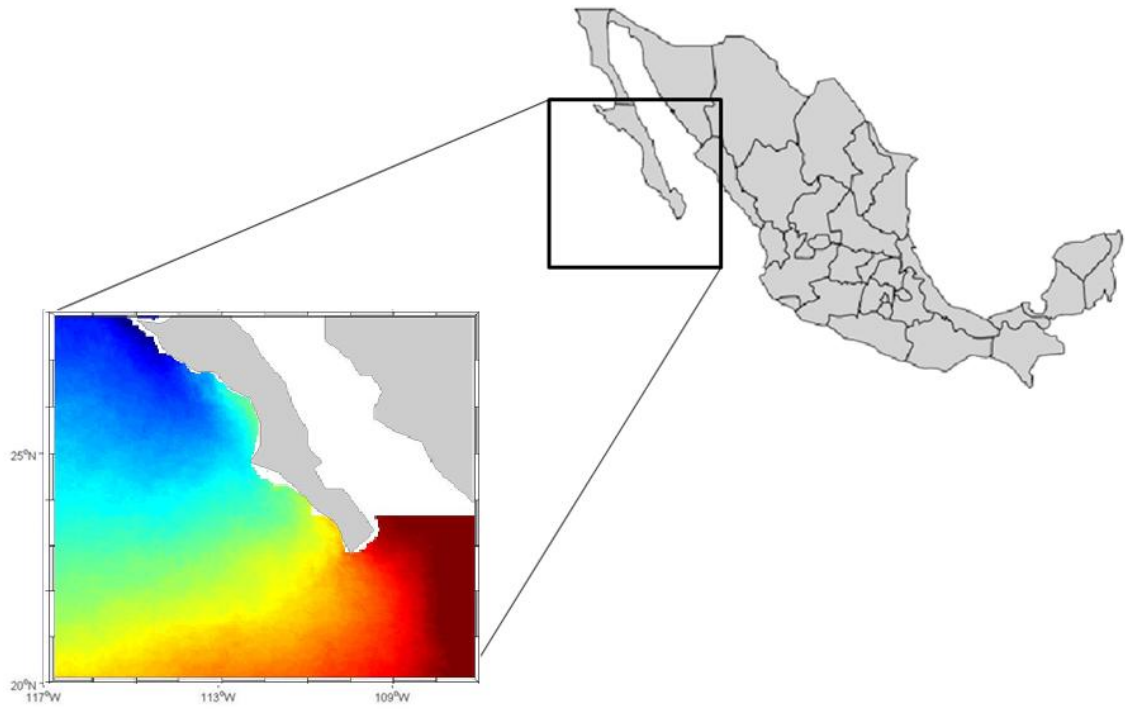


Figura 1. Ubicación del Sistema Frontal de Baja California Sur

7.- METODOLOGÍA

Este trabajo de tesis forma parte del proyecto multidisciplinario “Estudio del Sistema Frontal de Baja California Sur”. Para su realización fue necesaria la obtención de compuestos satelitales mensuales para analizar la variabilidad de los procesos interanuales y estacionales de la clorofila *a*, temperatura superficial del mar y la productividad primaria.

7.1.- Obtención de imágenes de Clorofila *a* (Cla-*a*)

Las imágenes de color se obtuvieron de la página (<http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS>) del SeaWiFS. Las cuales proporcionan la estimación de la concentración de clorofila en miligramos por metro cúbico de la primera profundidad óptica (mg Cla-*a* m⁻³) (Witzleb, 2001). El procesamiento desde el nivel-0 hasta la obtención de la estimación de Cla-*a*, así como las correcciones por nubes y por ozono fue realizado por especialistas del Oceandata. A partir de diciembre de 2009 se encuentran disponibles la nueva versión L3 de todos los compuestos globales, la cual es producto de una recalibración del algoritmo OC (R2009) (O'Reilly *et al.*, 2000). La resolución de los compuestos es de 9x9 km por pixel.

Se obtuvieron composiciones globales mensuales a partir de septiembre de 1997 a septiembre de 2010, utilizando el paquete computacional MatLab© (**Matrix Laboratory**) se recortó la región del Sistema Frontal de Baja California Sur entre los 20°N y 28°N y de 107°W a 117°W. Una vez obtenido el área de interés con la ayuda de MatLab se realizó el análisis de las imágenes, descrito posteriormente en la sección 7.3 Ciclo Estacional.

7.2.- Obtención de imágenes de Temperatura Superficial del mar (TSM)

Las composiciones mensuales de TSM se obtuvieron del sensor AVHRR a bordo del NOAA-14 con una resolución espacial de 4x4 km por pixel del sitio web: (ftp://podaac.jpl.nasa.gov/pub/sea_surface_temperature/avhrr/pathfinder/data_v5/monthly/night/04km) (utilizando los compuestos de noche para evitar la contaminación por reflectancia), comprendiendo el periodo de enero de 1997 hasta diciembre de 2009. Los datos del AVHRR fueron adquiridos directamente del Ocean Imaging Corp, y se utilizó MatLab para recortar el área de interés (20-28°N y 107-117°W) y el análisis de los datos obtenidos, que al igual que las imágenes de clorofila se describe en la siguiente sección.

7.3.- Ciclo Estacional

El ciclo estacional de Cla-a y TSM se calculó mediante la transformada de Fourier (F) ajustando a las series de tiempo el valor medio y los armónicos anual y semianual:

$$F(\bar{x}, t) = A_0(\bar{x}) + A_1(\bar{x}) \cos(\omega t - \varphi_1) + A_2(\bar{x}) \cos(2\omega t - \varphi_2) \quad (\text{ec. 1})$$

Donde:

A_0 , A_1 , A_2 son la amplitud media, la amplitud anual, y la amplitud semianual para cada serie de tiempo para cada píxel, respectivamente; $\omega = \frac{2\pi}{365.25}$ es la frecuencia anual; φ_1, φ_2 son las fases de los armónicos anual y semianual respectivamente; t es el tiempo (año-día).

A partir de la amplitud media de cada píxel se elaboraron los campos promedio de Cla-a y la TSM.

Para conocer la variabilidad estacional promedio representativa de toda el área de estudio de Cla-a y TSM mensual se utilizó la ecuación 1, pero sin el valor medio. Por lo que el “cero” de cada serie de tiempo representa el valor medio.

La variabilidad interanual promedio o señal no-estacional de los compuestos mensuales de Cla-a y TSM, se obtuvo a partir de restar el valor medio, así como las señales anual y semianual. Una vez obtenida dicha señal se aplicó un análisis estadístico de correlación cruzada entre estas señales y los índices climáticos con la finalidad de obtener la posible relación entre estos, ya que se sugiere que existe una covariabilidad con respecto al tiempo.

7.4.- Índices Climáticos

El Niño/Oscilación del Sur (ENSO) es el fenómeno más importante que causa variabilidad climática a nivel global, El Índice Multivariado ENSO (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/people/klaus.wolter/MEI/table.htm>), es el encargado de captar dicho fenómeno, mediante diferentes variables observadas en el Pacífico Tropical (temperatura superficial del mar, anomalías del nivel medio del mar, precipitación, presión atmosférica, nubosidad y vientos). Donde las anomalías positivas indican presencia de un evento cálido (El Niño) y las anomalías negativas a un evento frío (La Niña), por otro lado la NOAA presenta un nuevo índice que monitorea los eventos El Niño/La Niña, dicho índice es llamado ONI (Ocean Niño Index) (http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml) este índice refleja anomalías de la temperatura superficial del mar, para poder identificar un año El Niño o La Niña esta debe estar por encima o por debajo de 0.5 y -0.5 respectivamente, dichas anomalías fueron tomadas de la media de 3 meses.

El Índice de Oscilación Decadal del Pacífico (PDO por sus siglas en inglés) (<http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest>), es un índice que se obtiene a partir de la temperatura superficial del mar de largo periodo, desde los 20° Norte en el Océano Pacífico, obteniendo anomalías positivas y negativas restando el promedio global (Mantua, 2000). Cuando el índice es positivo, las aguas del Océano Pacífico Norte suelen ser cálidas, siendo esto contrario cuando se presentan anomalías negativas (Null, 2002) estas fases producen patrones similares a eventos El Niño/La Niña (Gershunov y Barnett, 1998), la diferencia

entre el PDO y el ENSO, es la escala de tiempo, el primero puede persistir hasta 30 años, mientras que el último dura un par de años (Mantua, 2001).

La Oscilación del Giro del Pacífico Norte (NPGO por sus siglas en inglés) (<http://www.o3d.org/npgo/data/NPGO.txt>) es un patrón climático derivado del segundo modo dominante de la variabilidad de la altura del nivel del mar, aplicando funciones empíricas ortogonales (FEOs) para el Pacífico Noroeste, se le nombra así porque sus fluctuaciones reflejan cambios en la intensidad de la circulación del giro del Pacífico Norte. El NPGO está relacionado con fluctuaciones de salinidad, nutrientes y clorofila de largo plazo observadas en la CC por CalCOFI y en el Golfo de Alaska.

7.5.- Productividad Primaria Modelada

Las variaciones en la productividad primaria, asociados a los cambios globales de los ciclos biogeoquímicos ha tenido profunda influencia en la geoquímica de la Tierra por más de 3 billones de años (Falkowski *et al.*, 1998). Behrenfeld y Falkowski (1997a) propusieron un algoritmo para estimar la PP integrada en la zona eufótica (PP_{eu}) denominado modelo de productividad vertical generalizado (VGPM, del acrónimo en inglés). Este modelo se basa en la respuesta media del fitoplancton a las condiciones ambientales (irradiancia, temperatura y profundidad de la zona eufótica). Es de fácil aplicación debido a su sencillez matemática, ya que se basa en la relación empírica entre la temperatura superficial del mar (TSM) y el parámetro fotosintético llamado *la tasa máxima de fijación de carbono normalizado por unidad de clorofila en la columna de agua* (P^B_{opt} , $[mgC (mgChl-a h)^{-1}]$) lo que permite utilizar información satelital (Behrenfeld y Falkowski 1997b).

Para analizar la Productividad Primaria de la zona eufótica (PP_{eu}) se obtuvieron compuestos mensuales de la página de Ocean Productivity (<http://orca.science.oregonstate.edu>), de septiembre de 1997 a diciembre de 2006, las cuales fueron calculadas mediante el modelo VGPM. Este modelo utiliza información derivada de dos sensores remotos, el SeaWiFS y el AVHRR. Del SeaWiFS se obtienen las imágenes de pigmentos fotosintéticos ($Chl-a_{sat}$), de

irradiancia superficial (E_{PAR}) y el coeficiente de atenuación de luz difusa a 490 nm (K_{490}). Del AVHRR se obtiene la temperatura superficial del mar (TSM_{sat}).

Para la estimación de la productividad primaria se aplica el siguiente algoritmo (Behrendeld y Falkowski, 1997b):

$$PP_{eu} = 0.66125 \cdot P_{opt}^B \left[\frac{E_o}{E_o + 4.1} \right] Z_{eu} \cdot C_{opt} \cdot D_i$$

Este modelo facilita el uso de datos provenientes de sensores remotos al utilizar el P_{opt}^B como parámetro fotoadaptativo, el cual se obtiene a partir de las imágenes de Cla-a y TSM (suponiendo que son uniformes a través de la columna de agua), donde E_o es la radiación fotosintéticamente activa la cual es proporcionada por las imágenes de SeaWiFS de E_{PAR} , Z_{eu} se obtiene mediante los compuestos de K_{490} , C_{opt} se obtiene de los compuestos de clorofila del SeaWiFS y D_i que es la duración de horas luz.

La función de este modelo es la conversión de unidades de biomasa a una tasa fotosintética. Como resultado se obtienen mejores resoluciones espacio temporales de las estimaciones de productividad primaria modelada en la zona eufótica (PP_{eu}), lo que permite relacionar la comunidad fitoplanctónica con las condiciones ambientales y con ello posibilita el estudio del efecto que los cambios ambientales tienen sobre la variabilidad de la PP_{eu} (Cepeda-Morales, 2004).

7.6.- Funciones Empíricas Ortogonales (FEO's)

El análisis de FEO's proporciona una descripción compacta de la variabilidad temporal y espacial de una serie de datos en términos de funciones ortogonales o modos estadísticos. De manera general, la mayor parte de la varianza de una serie espacialmente distribuida se encuentra en los primeros modos de las funciones ortogonales cuyos rasgos pueden estar relacionados con mecanismos dinámicos (Silveira, 1998).

El método estadístico de las funciones empíricas ortogonales se emplea para conocer los patrones dominantes de la serie en espacio y tiempo. El procesamiento extrae la estructura espacial y la variabilidad temporal, cuantificando la varianza de la serie en modos ortogonales (independientes entre sí). Los modos o estructuras que contienen el mayor porcentaje de la varianza son las que representan a las señales dominantes en la región de estudio, quedando en los modos inferiores las contribuciones asociadas a otro tipo de procesos o escalas (Espinosa-Carreón, 2005).

De manera general el análisis de FEO's parte de una serie de tiempo (datos obtenidos en una cierta localidad en un tiempo determinado). En este estudio cada uno de las imágenes de PP están constituidas por un número determinado de píxeles (localidad) que corresponden al período de septiembre de 1997 a diciembre de 2006. Mediante el programa computacional WIM-WAM^{MR} se obtuvieron los modos dominantes estacionales esto se hizo con el apoyo de la Dra. Marlene Manzano Sarabia Profesora/Investigadora de la Universidad Autónoma de Sinaloa-Unidad Mazatlán.

Se aplicaron FEO's únicamente a las imágenes de productividad primaria debido a que por un lado, ésta es estimada a partir de los compuestos de Cla-a y TSM (entre otros), y estadísticamente no es válido comparar variables resultantes y de las que se alimentó el modelo, y por otro, la PP proporciona una estimación de la asimilación de carbono en la columna de agua hasta el límite de la zona eufótica, la serie comprendió de septiembre de 1997 a diciembre de 2006 con una resolución espacial de 4x4 km por pixel.

8.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1.- Clorofila (Cla-a)

8.1.1.- Promedio General

El promedio general de Cla-a obtenido a partir de 150 compuestos mensuales de la serie de septiembre de 1997 a septiembre de 2010 muestra un patrón espacial con un gradiente de concentración mayor en la costa ($>2 \text{ mg m}^{-3}$), el cual disminuye conforme se aleja de ésta siendo $<0.2 \text{ mg m}^{-3}$ en la zona oceánica, coincidiendo con lo descrito por Kahru y Mitchell (2000), Espinosa-Carreón (2005) y Barocio-León *et al.*, (2007) para la Corriente de California frente a las costas de Baja California al norte de la región del SFBCS y con lo descrito por Cavazos-Guerra (2003) para la región del Pacífico Tropical Mexicano. Se pueden observar tres marcadas zonas en el área de estudio (eutrófica, mesotrófica y oligotrófica) de acuerdo a lo descrito por Kahru y Mitchell (2000), la primera se encuentra aproximadamente hasta los 100 km de la costa, la segunda zona entre los 100 y 180 km, y la tercer zona a partir de 180 km hacia mar adentro (figura 2).

En la region de la boca del Golfo de Califonia se observan bajas concentraciones de Cla-a, coincidiendo con lo descrito por Espinosa-Carreón y Valdez-Holguín (2007) debido que en esta región se presenta la convergencia de tres diferentes masas de agua superficiales; el Agua del Golfo de California, el Agua Superficial Ecuatorial y el Agua Subsuperficial Subtropical, la cuales influyen en los procesos físicos, químicos y biológicos que se llevan a cabo en dicha región (Torres-Orozco, 1993). Álvarez-Borrego y Lara-Lara (1991) mencionan que esta dinámica ocasiona que en la zona eufótica se presenten bajas concentraciones de nutrientes y oxígeno disuelto, con baja salinidad y alta temperatura, estas condiciones provocan que en dicha región se presenten características oligotróficas, y bajos valores de producción.

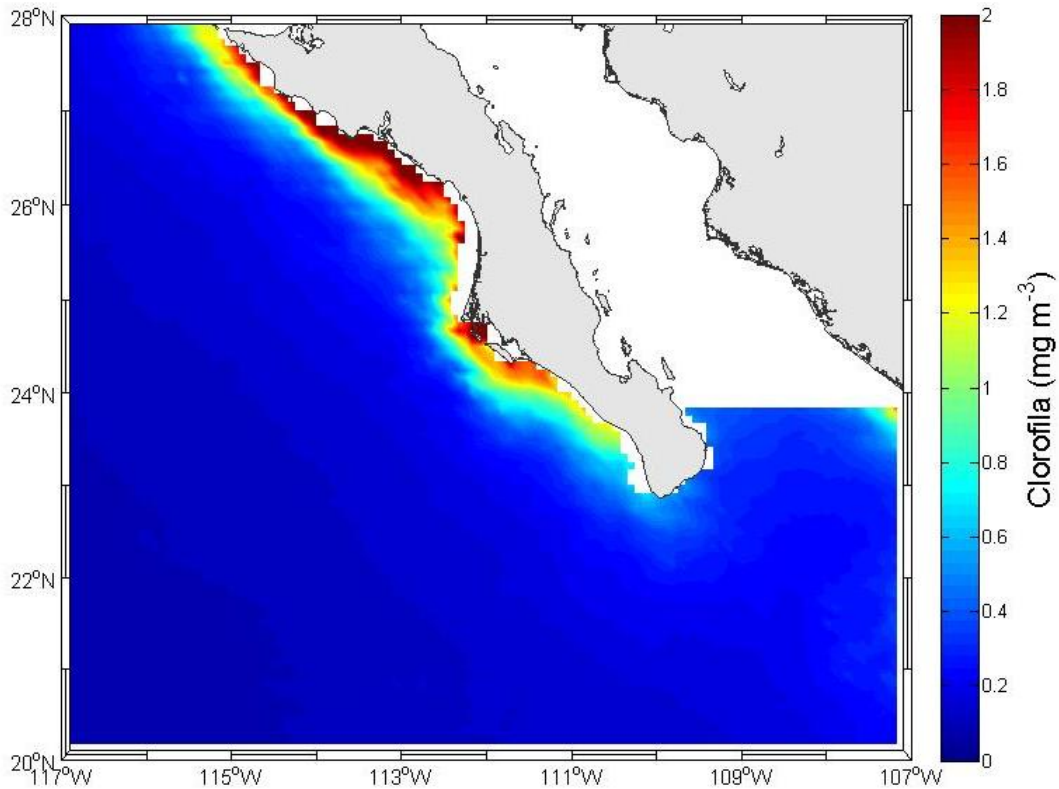


Figura 2. Promedio de la concentración de la clorofila a obtenido mediante imágenes del SeaWiFS durante el periodo de septiembre de 1997 a septiembre de 2010.

8.1.2.- Climatología

Los promedios estacionales (climatología) de Cla-a de invierno (enero-marzo), primavera (abril-junio), verano (julio-septiembre) y otoño (octubre-diciembre) (figura 3), muestran el mismo gradiente que el promedio general, encontrando la mayores concentraciones en primavera ($>2 \text{ mg m}^{-3}$), debido principalmente a que en esta época del año los vientos del nor-noreste se intensifican, lo que permite que el flujo de agua se dirija hacia el ecuador paralelo a la costa, por balance de masas y como resultado del transporte de Ekman, se generan en esta época surgencias costeras de acuerdo con lo descrito por Álvarez-Borrego *et al.* (1978), Zuria *et al.* (1995), Gonzáles-Ruelas (2000), Cazares-Guerra (2003), Espinosa-Carreón *et al.* (2004), De la Cruz-Orozco *et al.* (2007), Espinosa-Carreón *et al.* (2007) y Durazo *et al.* (2010), dichas surgencias

traen consigo agua con baja temperatura y ricas en nutrientes, estimulando el crecimiento del fitoplancton y los altos valores de registrados de Cla-a en la costa.

Las altas concentraciones presentadas en primavera son seguidas por verano e invierno, siendo en otoño donde se muestran las más bajas concentraciones en la costa. Las bajas concentraciones registradas en otoño pueden deberse a que en esa época se registran las temperaturas más altas, debido a la intensificación de la Contracorriente de California (CcC) la cual transporta agua cálida proveniente del ecuador pegada a la costa, esta intrusión de agua provoca que las surgencias lleven agua con temperaturas cálidas y baja en nutrientes (Durazo *et al.*, 2010) lo anterior coincide con la climatología de otoño donde se presentan las más bajas concentraciones en la costa.

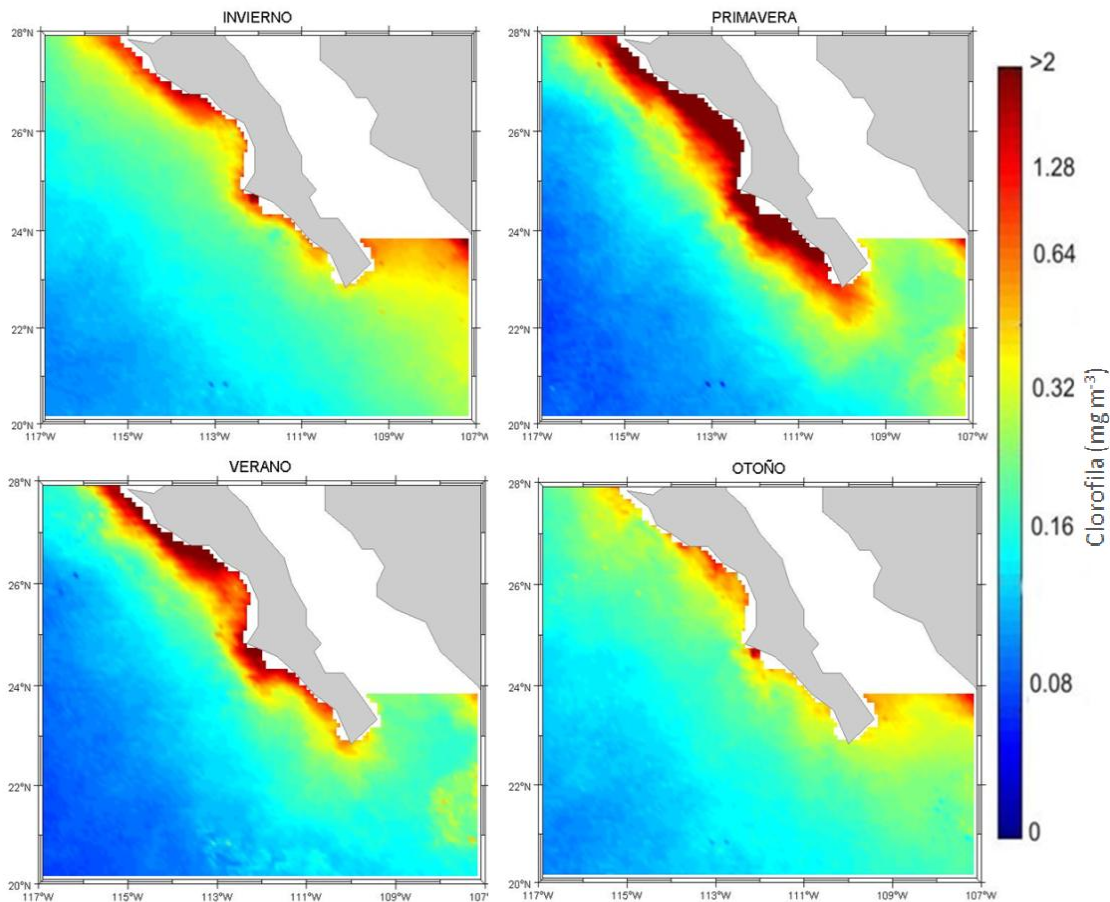


Figura 3. Promedio estacional de la concentración de la clorofila a obtenidos mediante imágenes del SeaWiFS durante el periodo de septiembre de 1997 a septiembre de 2010.

8.1.3.- Ciclo estacional

Con lo que respecta al ajuste del ciclo estacional espacialmente representa >40% de varianza explicada (señal anual más la semianual) para toda la serie de tiempo y la mayor parte del área de estudio, de acuerdo con lo reportado por Espinosa-Carreón, (2005) y Gaxiola-Castro *et al.* (2010) este valor coincide con los valores encontrados para la región IMECOCAL (22-33°N y 112-120° W), en la boca del Golfo de California la varianza explicada también representa >40 %, en el resto del área fue menor al 20%, lo que sugiere que en estas zonas la variabilidad de la Cla-a podría estar influenciada por procesos diferentes al ciclo estacional (figura 4) y sugieren estar relacionados con la presencia de remolinos y frentes los cuales no pueden ser observados en este análisis ya que son procesos de mesoescala que presentan una variabilidad espacial que va de decenas a cientos de kilómetros y estacional de semanas a meses (Gómez-Valdés, 1984; Cervantes-Duarte *et al.*, 1993).

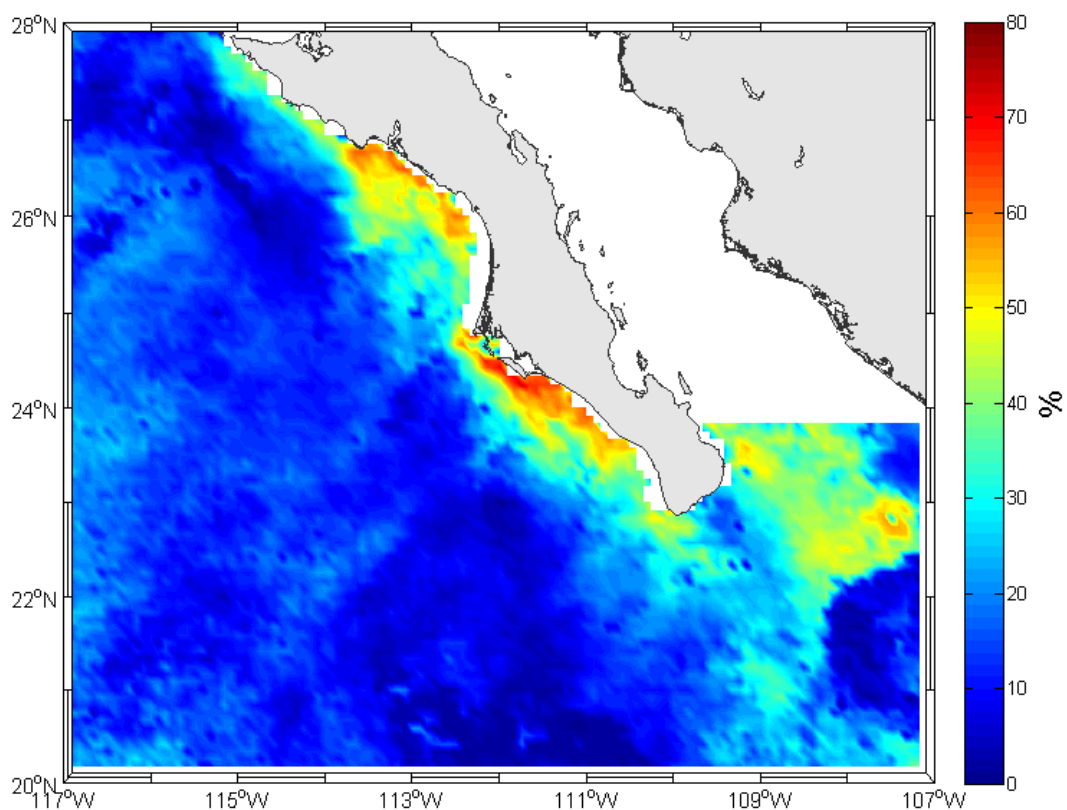


Figura 4. Varianza Explicada del ciclo estacional de la concentración de la clorofila a de septiembre 1997 hasta septiembre de 2010.

En cuanto al ajuste de ciclo estacional para la serie de tiempo, este explica el 54% de la variabilidad total para la serie temporal comprendida de septiembre de 1997 a septiembre de 2010 (cada punto representa el valor promedio de la imagen mensual) (figura 5), la señal describe una oscilación periódica que se repite año tras año. El ciclo estacional muestra que en el mes de junio se registra la mayor concentración de Cla-a (fase) y la mínima en el mes de octubre de cada año, esto de acuerdo con el promedio de la climatología por mes y el ajuste del ciclo estacional. En el año de 2007 Espinosa-Carreón y Valdez-Holguín reportan para el Golfo de California que la mayor concentración se presenta en los meses de febrero y marzo y la mínima en mayo y junio debido a que esta región está influenciada por surgencias costeras las cuales se presentan en las costas de Sonora y Sinaloa en invierno y primavera lo que provoca que en los meses de febrero y marzo se presenten las mayores concentraciones difiriendo con lo encontrado para el área de estudio del presente trabajo. Espinosa-Carreón *et al.* (2004) reportan en los meses de abril y octubre como los meses más contrastantes para el área IMECOCAL, siendo el mes de abril el que presenta la mayor concentración de Cla-a y octubre el de menor concentración, con lo que respecta al presente trabajo se encuentra un desfase entre la región IMECOCAL y el SFBCS en cuanto a los meses de mayor concentración, pero coinciden que el mes de octubre es cuando se presentan las más bajas concentraciones de Cla-a para ambas regiones. Estos desfases entre las diferentes aéreas de estudio pudieran ser producidas por cuestiones latitudinales donde el esfuerzo del viento que es dirigido hacia el ecuador y la topografía local que se presenta en cada una de estas zonas, provocan que las surgencias se presenten dos meses antes en el área IMECOCAL con respecto a las presentes en el SFBCS y con respecto al Golfo de California, (Zaytsev *et al.*, 2003).

En toda la serie de tiempo resalta considerablemente la anomalía positiva de clorofila registrada en abril y mayo de 2008 de 0.5 mg m^{-3} por encima del valor medio y del ciclo estacional presentándose unos meses antes del ajuste armónico, probablemente esta anomalía puede haber sido ocasionada por el evento La Niña el cual provoca un aumento en la concentración de Cla-a (Espinosa-Carreón *et al.*, 2004). Además de esta alta anomalía positiva del 2008, se registran otras menores, pero aun por encima de los armónicos en los años de

2002, 2003 y 2009 lo que sugiere una respuesta a condiciones frías. La mayor anomalía negativa se presentó a finales de 1998 con 0.16 mg m^{-3} por abajo del valor medio, originada probablemente por el evento de El Niño 1997-1998. Tanto las anomalías positivas como negativas serán analizadas con más detalle posteriormente en la sección de eventos interanuales, los cuales están enmascarados por el ciclo estacional (figura 5).

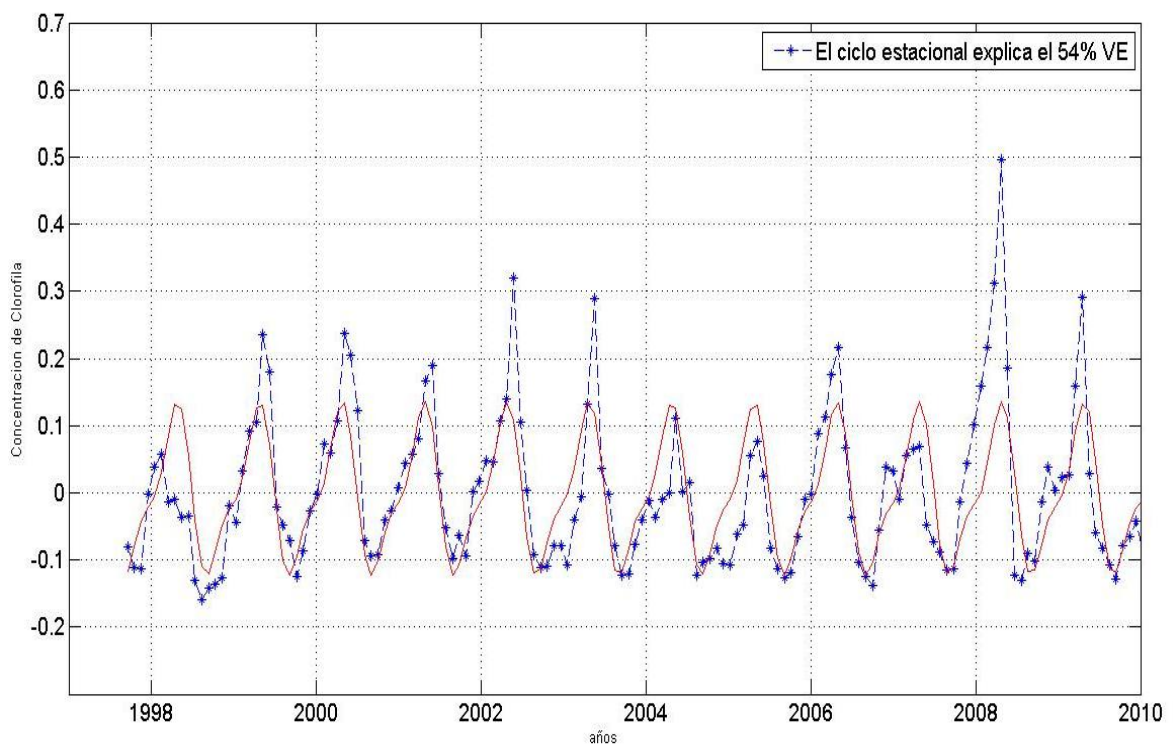


Figura 5. Variabilidad temporal y ciclo estacional de la Clorofila-a (mg m^{-3}) a partir de imágenes procedentes del SeaWiFS del periodo comprendido de septiembre de 1997 a septiembre de 2010.

8.2.- Temperatura Superficial del Mar

8.2.1. Promedio General

Con respecto a la temperatura superficial del mar (TSM) se obtuvieron 156 compuestos mensuales que corresponden al periodo de enero de 1997 a diciembre de 2009, el promedio general espacial para la TSM muestra un fuerte gradiente latitudinal, con isotermas perpendiculares a la costa con temperaturas que van de 18 a 28 °C de norte a sur (figura 6). Parés-Sierra *et al.*, (1997) mencionan que el campo promedio de TSM es resultado del proceso del calentamiento (enfriamiento) superficial del océano, lo que provoca los fuertes gradientes latitudinales, estos gradientes también fueron observados por Cavazos-Guerra (2003), reportando que a latitudes mayores se encuentran las más bajas temperaturas debido al predominio de agua de la Corriente de California la cual acarrea aguas polares de baja temperatura (Lynn y Simpson, 1987) como lo observado en el promedio general.

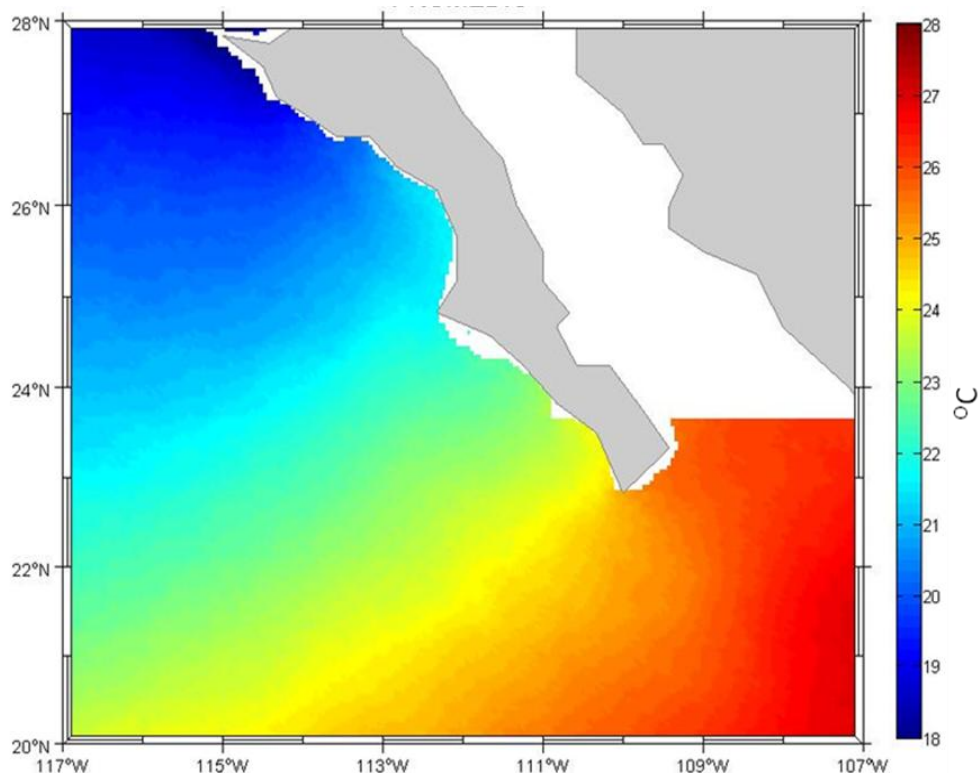


Figura 6. Promedio general de temperatura superficial del mar, obtenido a partir de compuestos mensuales procedentes del sensor AVHRR, del periodo comprendido de enero de 1997 a diciembre de 2009.

8.2.2.- Climatología

El patrón de corrientes marinas superficiales es controlado por el patrón de vientos, donde la variación estacional de los vientos superficiales sobre la región de la Corriente de California (CC) tienen una componente norte principalmente en primavera (Reid *et al.*, 1958) su variación estacional es principalmente en la magnitud (Bakun y Nelson 1975), la CC es una corriente superficial de 0 a 300 metros de profundidad, la cual fluye paralela a la costa desde Columbia Británica, Canadá, hasta el extremo sur de la Península de Baja California (Lynn y Simpson, 1987), por otro lado la Contracorriente de California (CcC) es un flujo superficial que fluye hacia el polo y aparece en otoño cuando los vientos se debilitan, formando así una zona de transición (Roden, 1971) entre Agua Ecuatorial Subsuperficial de la CcC (cálida) y aguas frías de origen Subártico esta zona de transición puede variar en su posición geográfica, Parés *et al.* (1997) mencionan que esta zona se encuentra aproximadamente entre los 30°N y los 35°N, sin embargo, en los resultados obtenidos en el presente trabajo se puede observar que en primavera la transición se encuentra hacia los 20°N mientras que en otoño por encima de los 26°N (figura 7).

La climatología de la TSM muestra un patrón similar al promedio general con respecto a las isotermas que se encuentran perpendiculares a la costa (figura 7). Encontrando que en primavera es cuando se presentan las más bajas temperaturas en toda el área de estudio, en esta época las temperaturas bajas (21°C) se localizan hasta los 22°N debido a que en esta época se ha reportado que la CC llega a latitudes más bajas por el aumento en la intensidad de los vientos nor-noreste lo que incrementa el flujo de esta corriente hacia el sur, coincidiendo con la época en que se presentan los eventos de surgencias relacionados con las altas concentraciones de Cl-a (Álvarez-Borrego *et al.*, 1978; Zuria *et al.*, 1995; González-Ruelas, 2000; Cazares-Guerra, 2003; Espinosa-Carreón *et al.*, 2004; De la Cruz-Orozco *et al.*, 2007; Espinosa-Carreón y Valdez-Holguín, 2007), mientras que en otoño se presentan las más altas temperaturas (21-28 °C) coincidiendo con lo reportado por Durazo *et al.* (2010) y difiriendo con lo reportado por Cavazos-Guerra (2003) donde este último autor reporta para el área de la península de Baja California bajas temperaturas en invierno, y no en

primavera, altas temperaturas en verano, y no en otoño. En la boca del Golfo de California en verano y otoño, se encuentran las temperaturas más altas debido principalmente al flujo máximo de salida de agua cálida del Golfo de California que se presenta entre octubre y noviembre (Mascarenhas *et al.*, 2004).

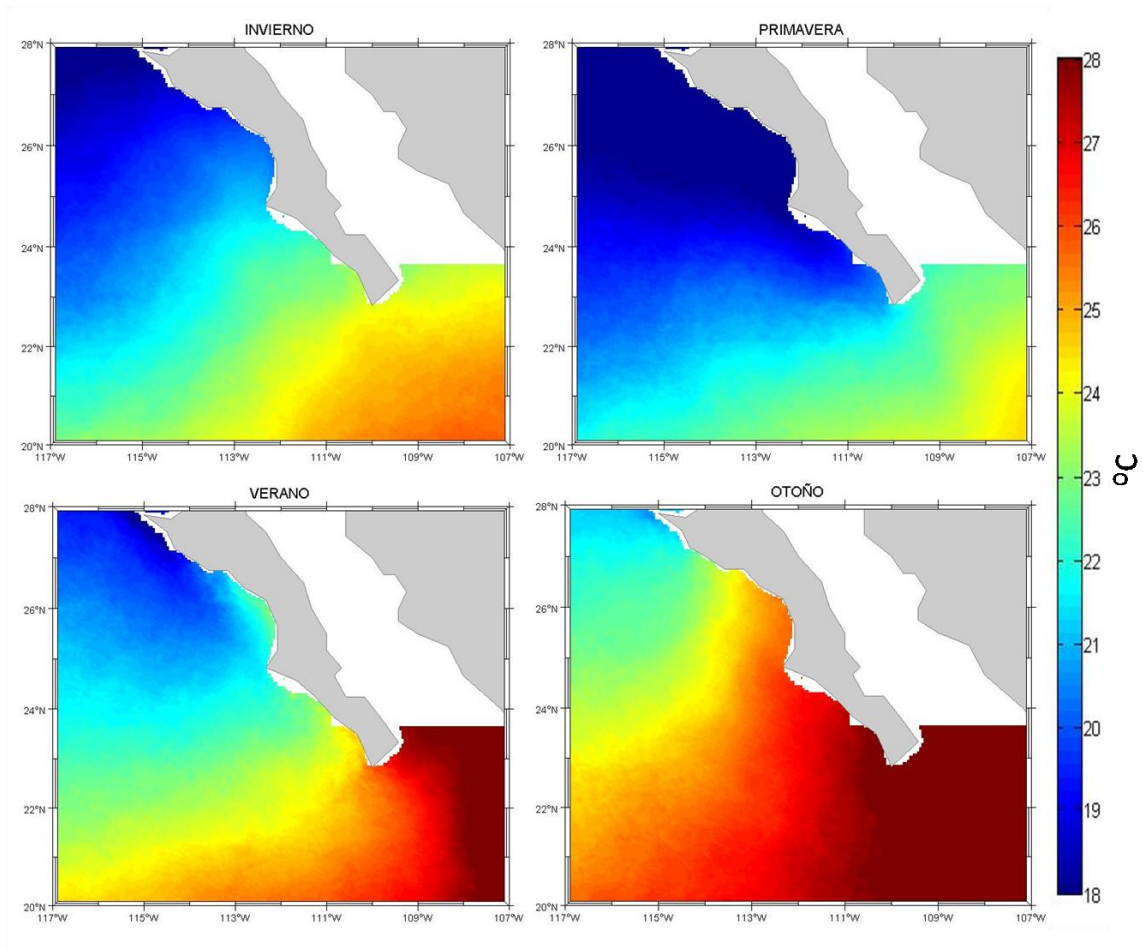


Figura 7. Promedio estacional de la temperatura superficial del mar obtenida mediante imágenes procedentes del sensor AVHRR durante el periodo de enero de 1997 a diciembre de 2009 de la región del SFBCS.

8.2.3.- Ciclo estacional

Espacialmente la varianza explicada (VE) por el ciclo estacional calculado mediante la serie de Fourier para la TSM fue >70 % en toda el área (figura 8). Se observa que en la boca del Golfo de California, la variabilidad de la TSM que responde a la influencia del ciclo estacional fue superior al 90%, de acuerdo con lo reportado por Soto-Mardones *et al.* (1999) para el Golfo de California y se debe a que la variabilidad de la TSM está asociada mayormente a la escala anual, lo que indica que la mitad del año sea cálida y la otra fría, dichos autores sugieren además, que tal estacionalidad puede explicarse en términos del efecto del viento el cual tiene carácter estacional, sopla del noroeste a surdurante el invierno y del sudeste a norte.... durante el verano por lo que genera surgencias costeras del lado del continente en invierno y del lado de la península en el verano. De acuerdo con Parés-Sierra *et al.* (1997) indican que el patrón estacional la variabilidad es controlada por procesos internos tales como la advección vertical (surgencias costeras) y la advección horizontal, por lo que en este trabajo se sugiere que la diferencia de porcentaje de VE por el ciclo estacional en la boca del Golfo de California pudiera estar influenciada por la estacionalidad de las masas de Agua de la Corriente de California y del Agua Ecuatorial.

Frente a la zona costera de Baja California Sur se registró un área con un valor aproximado de 85% de VE relacionado de nueva cuenta con la presencia de surgencias estacionales (Parés-Sierra *et al.*, 1997). El área donde se localizó la menor VE fue al sur de Punta Eugenia, Goericke *et al.* (2004), Soto-Mardones *et al.* (2004) y Espinosa-Carreón (2005) identificaron que la región cercana a Punta Eugenia es una zona donde se presentan meandros y remolinos. Valdez-Diarte (2010) en un trabajo realizado en la zona IMECOCAL reportó para 2008 un remolino frente a Punta Eugenia, conforme a la baja VE en esta zona y de acuerdo a lo descrito anteriormente por estos autores se sugiere que en esta región es un área con predominio de procesos físicos de mesoescala (Strub y James, 2000, Soto-Mardones *et al.*, 2004) los cuales influyen sobre las costas de Punta Eugenia disminuyendo así la influencia del ciclo estacional.

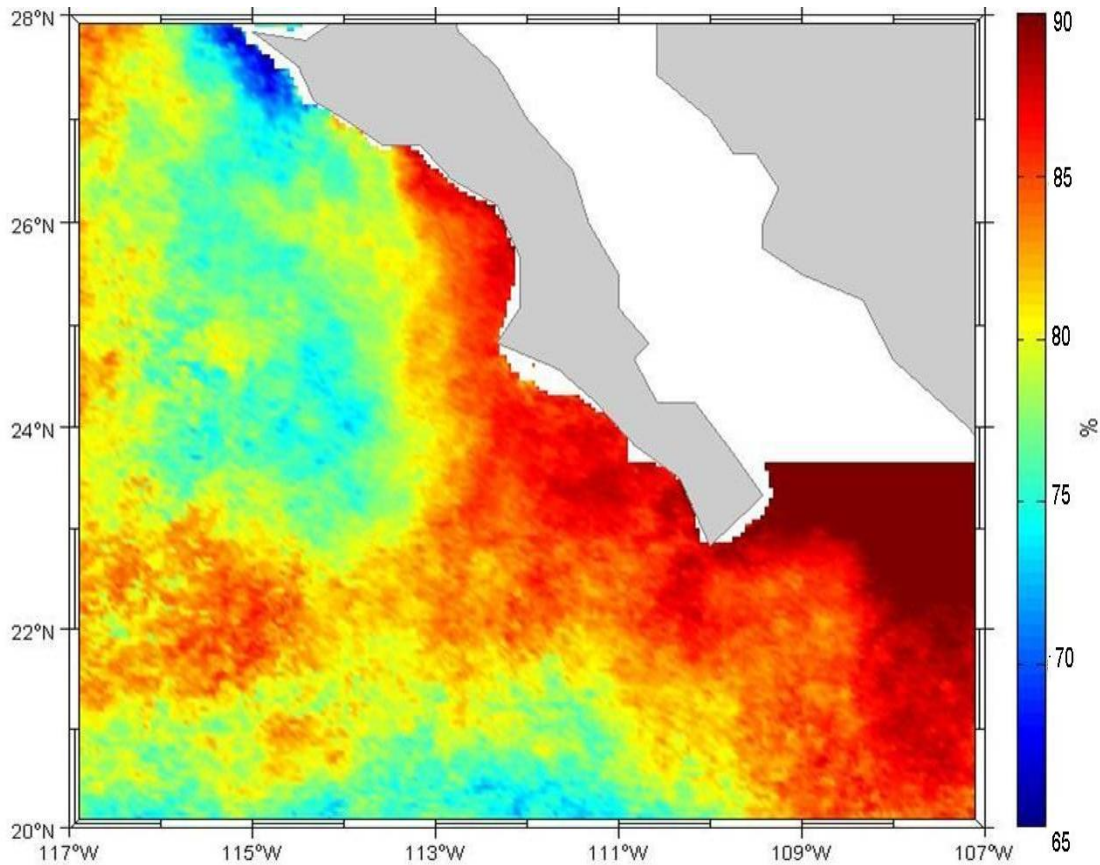


Figura 8. Varianza Explicada del ciclo estacional de la temperatura superficial del mar obtenida de imágenes del sensor AVHRR, a partir de enero de 1997 a diciembre de 2009.

El ajuste del ciclo estacional para la serie de tiempo de la TSM mensual promedio, responde al 82% de la varianza explicada, en los primeros meses del año se registran anomalías negativas, encontrando que entre abril y mayo se encuentra la amplitud negativa más baja del ciclo (época fría), mientras que en septiembre y octubre se presentan las temperaturas más cálidas, de acuerdo al ajuste del ciclo siendo mayo y octubre los meses más contrastantes (figura 9). Los patrones de variación de las corrientes están gobernados por el régimen de los vientos provocado que éstas a su vez causen variabilidad en la temperatura, por lo que las bajas temperaturas (anomalías negativas) presentes en abril y mayo son producidas por la intensificación de la Corriente de California (transporta agua fría y poco salada) y las anomalías positivas presentadas en septiembre y octubre son provocadas por un lado, por la disminución de los vientos alisios y por otro, por la intrusión de agua cálida proveniente del Ecuador (Contracorriente de California). Se puede observar una anomalía positiva por encima del ajuste

armónico del ciclo estacional a finales de 1997 (puntos azules) y se presenta después del ajuste (línea roja), también es notable la anomalía negativa registrada en el 2008 la cual es seguida por las presentadas en los años 1999, 2000 y 2001 aunque de menos amplitud que la primera. Dichas anomalías presentes por encima o por debajo del ajuste del ciclo estacional pudieran estar asociadas a eventos tales como El Niño y La Niña respectivamente.

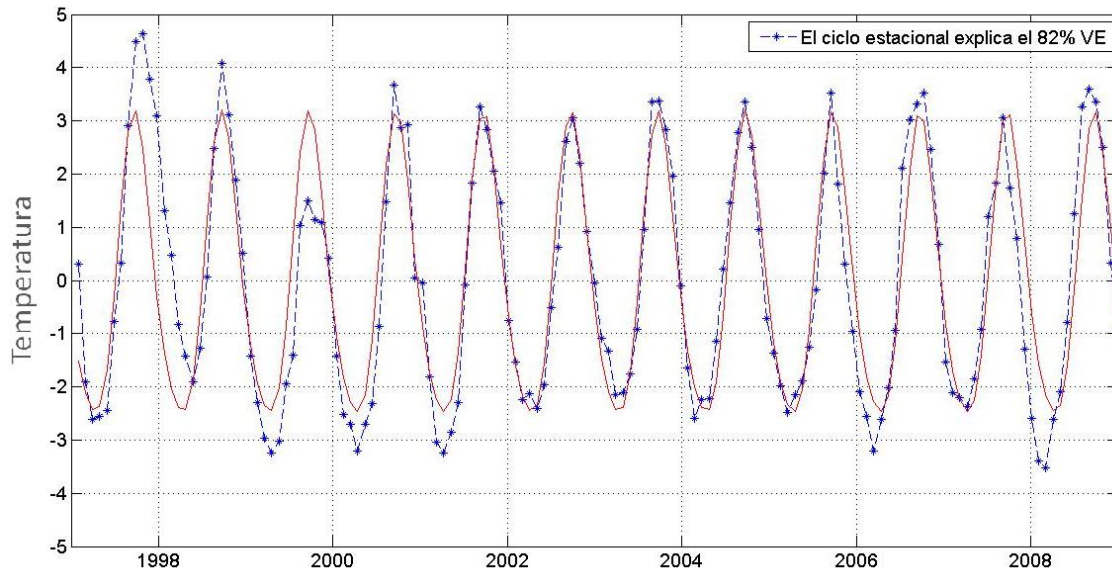


Figura 9. Serie de tiempo de la temperatura superficial del mar a partir de enero de 1997 a diciembre 2009, obtenido de los promedios mensuales de los compuestos de AVHRR.

8.3.- Índices Climáticos

El Niño/Oscilación del Sur (ENSO) es el fenómeno más importante que causa variabilidad climática a nivel global, este fenómeno es el resultado de un complejo sistema de fluctuaciones climáticas entre el océano y la atmósfera (Rasmusson *et al.*, 1990) relacionado con la intensidad y dirección de los vientos alisios, temperatura superficial del mar (TSM), presión atmosférica y nivel del mar. El ENSO es considerado actualmente como la señal dominante del cambio global para escalas de tiempo interanual y sus efectos en la capa pelágica en los años que se presenta El Niño están asociados con disminuciones en la abundancia del

fitoplancton (Feldman *et al.*, 1984) y en la producción primaria (Barber y Chávez, 1983; Barber *et al.*, 1985).

El principal efecto sobre el fitoplancton está relacionado con decrementos en la concentración de nutrientes en la zona eufótica, lo cual ha sido plenamente demostrado durante El Niño de 1982-83 (Barber y Chávez, 1986) y El Niño 1997-98 (Hayward *et al.*, 1999; Bograd *et al.*, 2001; Durazo y Baumgartner, 2002). Estos años se caracterizan por un incremento en la temperatura superficial de mar, y altas anomalías del nivel del mar, provocando que la termoclina se hunda, producto de esto se ha observado una disminución en la biomasa fitoplanctonica (Barber y Chávez, 1986; Chávez *et al.*, 2002; Durazo y Baumgartner, 2002), por otro lado, La Niña se caracteriza por un descenso en la TSM y una elevación de la termoclina que incrementa la presencia de surgencias costeras, con elevada disponibilidad de nutrientes y en consecuencia altas concentraciones de biomasa fitoplanctonica (Shwing *et al.*, 2002; Espinosa-Carreón, 2005).

El Índice Multivariado ENSO (MEI) es el encargado de monitorear dicho fenómeno, donde anomalías positivas indican presencia de un evento cálido (El Niño) y negativas un evento frío (La Niña). Así como el MEI el Índice Oceánico El Niño (ONI) monitorea los cambios de eventos fríos o cálidos en el Océano Pacífico mediante cambios en la temperatura superficial del mar estos eventos tienen que tener una duración igual o mayor a 5 meses para ser considerados como El Niño o La Niña, además la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) clasifica en tres escalas las condiciones como débil (de 0.5 a 0.9), moderado (1.0 a 1.4) y fuerte (>1.5).

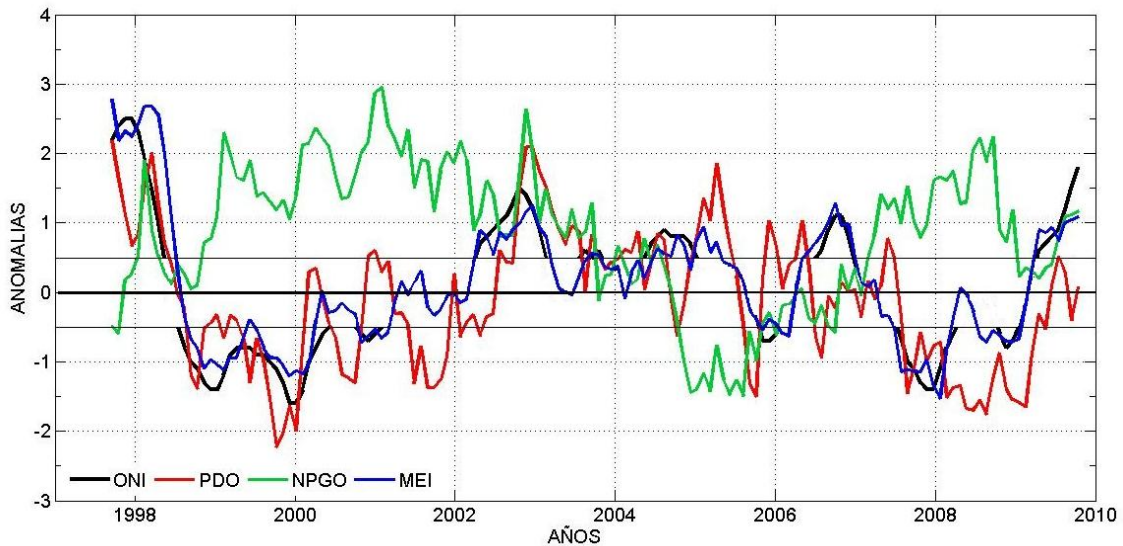
Otro índice que ha sido utilizado para monitorear los cambios climáticos es el Índice de Oscilación Decadal del Pacífico (PDO por sus siglas en inglés) el cual origina para el océano Pacífico Norte en su fase positiva climas muy similares a El Niño y en la negativa similar a La Niña (Gershunov y Barnett, 1998; Mantua, 2000).

Por otro lado se tiene el índice de la Oscilación del Giro del Pacífico Norte (NPGO por sus siglas en inglés) el cual es un patrón climático derivado del segundo modo dominante de la variabilidad de la altura del nivel del mar para el

Pacífico Noreste, este índice muestra las fluctuaciones de la intensidad de la circulación del Giro del Pacífico Norte relacionado con niveles de salinidad y nutrientes, donde las fluctuaciones de estos últimos provocan cambios en las concentraciones del fitoplancton, de este modo el NPGO es un fuerte indicador de las fluctuaciones en los mecanismos de conducción dinámica de los ecosistemas planctónicos este índice también se encuentra relacionado con condiciones ENSO pero de forma inversa a los índices anteriormente mencionados (Di Lorenzo *et al.*, 2008).

En la figura 10 se muestra la variabilidad de los índices anteriormente mencionados, se puede observar que en 1997 e inicios de 1998 el MEI presentó anomalías positivas indicando la presencia de El Niño 97-98, al igual que el ONI (McPhaden, 1999; Chávez *et al.*, 2002; Collins *et al.*, 2002; Lynn y Bograd, 2002; Strub y James, 2002; Hernández *et al.*, 2004), acoplándose con la fase cálida del PDO. Para el Pacífico Ecuatorial oriental el efecto de El Niño está bien establecido y para la región de la CC se reportó la presencia de aguas cálidas superficiales provenientes del Pacífico Central Norte, con un alto nivel del mar y un hundimiento de la nutriclina, además de una disminución en los procesos de mesoescala y un incremento de flujo de agua junto a la costa con dirección hacia el polo (Durazo y Baumgartner, 2002), el NPGO en ese periodo mostró una recuperación de anomalías negativas a finales de 1997 a positivas a inicios de 1998, manteniéndose con anomalías positivas hasta finales de 2004, indicando así un aumento en la circulación anticiclónica del Giro del Pacífico Norte y con ello un incremento de agua fría proveniente del polo.

A partir de finales del 1998 hasta inicios de 2002, el MEI y el PDO muestran un cambio hacia condiciones frías (anomalías negativas), indicando un evento La Niña 1999-2002 (Hernández *et al.*, 2004), sin embargo, y de acuerdo con el ONI se presentó en esos años un año La Niña moderado, coincidiendo con valores positivos del NPGO los cuales se presentan hasta 2004. Se ha reportado que en condiciones La Niña, se presentan bajas temperaturas, bajos niveles del nivel del mar provocando que la termoclina sea menos profunda, por lo que se incrementa la disponibilidad de nutrientes en la zona eufótica, y con ello un incremento en la biomasa fitoplánctonica (Chávez *et al.*, 2002).



Fig

ura 10. Índice de la Oscilación Decadal del Pacífico, Índice Multivariado ENSO e índice de la Oscilación del Giro del Pacífico Norte a partir de septiembre 1997 a diciembre 2009.

Se puede observar que para 2002-2003 el ONI indica un evento El Niño Moderado y el MEI indican la presencia de un evento El Niño, Durazo *et al.*, (2005) reportan dicho evento para la CC como un año El Niño débil por debajo de los 100 m, y en la capa superficial (0-100m) la presencia de agua de origen subártico, además de zonas con altas concentraciones de Cla-a, dicho aumento en la concentración de los pigmentos fotosintéticos así como la intrusión de agua fría superficial, no lo asocian con ningún índice climático, sin embargo, esos resultados podrían estar relacionados con la fase positiva que presenta el NPGO, ya que en esta fase este índice muestra correlación con incrementos en Cla-a provocados por una mayor disponibilidad de nutrientes, así mismo, se ha demostrado un incremento de surgencias costeras provocadas por la intensificación de los vientos y de la CC (Di Lorenzo *et al.*, 2008).

Durazo *et al.*, (2010) describe un evento frío relacionado con La Niña 2007-2008, en la figura 10 se observa que está relacionado con anomalías negativas del PDO, MEI, el ONI lo describe como un evento La Niña Moderado,, mientras que el NPGO presentó anomalías positivas, las cuales se extienden hasta inicios de 2009, el año 2008-2009 el ONI lo clasifica como un año normal.

8.4.- Procesos interanuales

Con respecto a la estimación de biomasa fitoplanctónica dada por la concentración de Cla-a, esta tiende a disminuir cuando se presentan las condiciones cálidas (El Niño), y se incrementa en los eventos fríos (La Niña), contrario al comportamiento de la TSM (Durazo y Baumgartner, 2002; Espinosa-Carreón *et al.*, 2004). Para conocer los procesos interanuales y de gran escala que pudieran estar afectado la variabilidad de la Cla-a y TSM a la serie de tiempo de ambas variables se les resto el ciclo estacional (figura 11) la co-variabilidad de estas dos variables indican un coeficiente de co-variabilidad significativo de 0.67

(n=148 $\alpha=0.05$).

En la región del SFBCS se presentaron tanto anomalías negativas como positivas de Cla-a en los años 1997-1998, mientras que la TSM presentó anomalías positivas (figura 11) coincidiendo con los índices climáticos MEI y PDO (figura 10) en su fase cálida (El Niño), de acuerdo con lo reportado por McPhaden (1999), Chávez *et al.* (2002), Collins *et al.* (2002), Lynn y Bograd (2002), Strub y James (2002) y Hernández *et al.* (2004) para el Pacífico Oriental, este evento ha sido reportado como uno de los más fuertes, sin embargo, para el área del SFBCS los efectos de este evento no se ven reflejados en las concentraciones de la Cla-a durante la duración de El Niño 1997-1998 ya que presenta anomalías positivas a inicios de 1998, las cuales podrían estar relacionadas con la fase positiva del NPGO la cual se presenta al mismo tiempo que el incremento de la Cla-a.

Después de presentar dichas anomalías positivas, la concentración de la Cla-a decae a mediados de 1998 y vuelve a incrementarse a partir de 1999, después de ese periodo (1998-1999) se registró una oscilación para Cla-a y la TSM mayormente positivas para la primera y negativas para la segunda indicando un evento La Niña (Durazo *et al.*, 2009), dicho evento ha sido reportado para el océano Pacífico tropical desde 1999 hasta primavera de 2000 (Espinosa-Carreón *et al.*, 2004). Schwing y colaboradores en 2002 así como Durazo y colaboradores en 2009 mencionan que las condiciones La Niña se presentaron desde 1998 hasta 2002, sin embargo, de acuerdo con el MEI que es el índice que monitorea

los eventos El Niño/La Niña a finales de 1998 inicia un periodo La Niña el cual termina a mediados de 2000 cuando el índice muestra condiciones neutras, mostrando de nueva cuenta anomalías negativas a finales de 2000 e inicios de 2001, manteniéndose de nuevo en condiciones neutras desde mediados de 2001 hasta los primeros dos meses de 2002, cambiando a condiciones El Niño en primavera de 2002, el cual dura hasta mediados de 2003 dicho periodo es reportado como un año El Niño débil (Durazo *et al.*, 2005), las anomalías negativas de la TSM para el SFBCS características de los eventos La Niña se observaron a finales de 1999, recuperándose en el último mes de ese año y presentando de nueva cuenta anomalías negativas a inicios de 2000 para ese años parece tener más relación la TSM con las fluctuaciones del PDO que con las del MEI (figura 11).

La concentración de Cla-a (figura 11) presentó mayormente anomalías positivas desde inicios de 1999 hasta finales de 2002, a pesar de que en 2002-2003 se presentó un evento El Niño (de acuerdo con el ONI y el MEI, figura 10) este no se ve reflejado en la concentración de Cla-a si no que en esa época presenta una anomalía positiva más alta que las que se esperarían para los años La Niña anteriores, dicha anomalía podría estar relacionada con la fase positiva del NPGO que se presentó desde inicios de 1999 y termina hasta 2004 lo que pudo haber provocado un mayor número de surgencias y por ende una mayor disponibilidad de nutrientes en la zona eufótica (Di Lorenzo *et al.*, 2008) dicha relación entre el aumento de la Cla-a y el NPGO no ha sido documentado para otras regiones en ese año, por lo que es importante considerar esta asociación para el SFBCS.

El incremento de la anomalía positiva de la Cla-a a mediados de 2002 ($>0.2 \text{ mg m}^{-3}$) coincide con anomalías negativas registradas para TSM, sin embargo, dichas anomalías negativas de TSM no son tan grandes como la registrada para finales de 1999 donde se esperarían que la anomalía de Cla-a fuese más alta, por el evento La Niña 1998-2001 (Hernández *et al.*, 2004), el cual no se observa tan pronunciado como el incremento de 2002, a pesar que se presenta en un año El Niño, sugiriendo que estas condiciones podrían estar relacionadas con procesos de mesoescala locales.

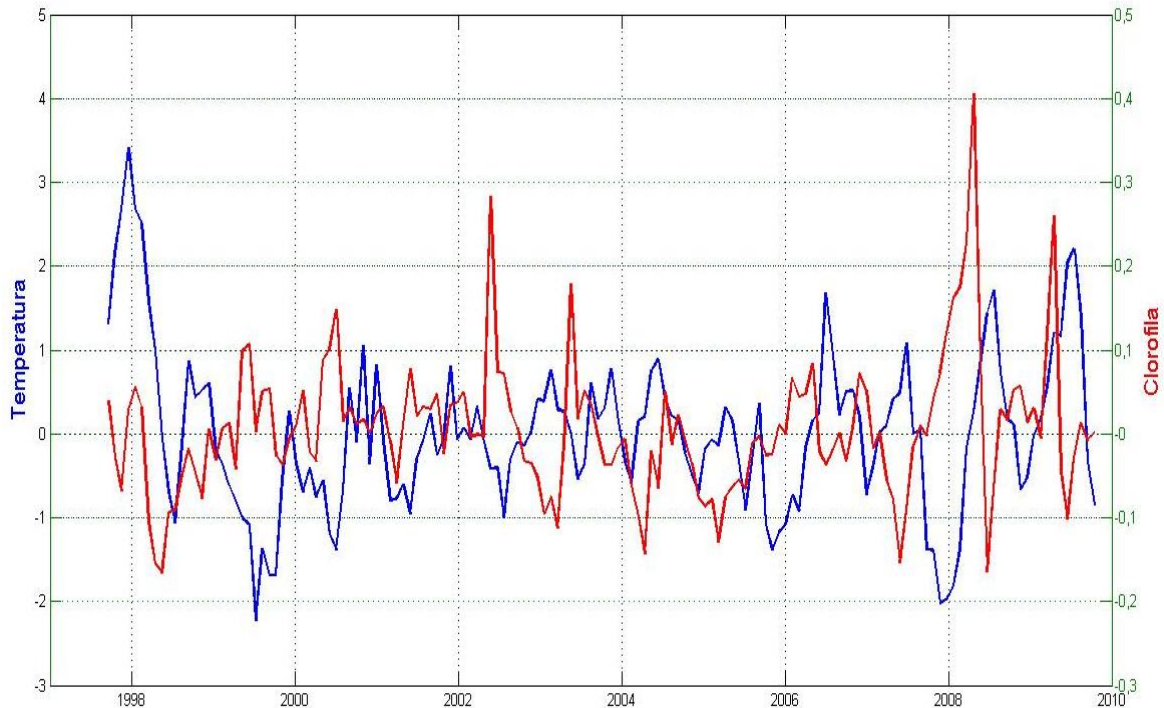


Figura 11. Variabilidad temporal no-estacional de la Clorofila a y TSM a partir de imágenes procedentes del SeaWiFS y del AVHRR del periodo comprendido de septiembre de 1997 a diciembre de 2009.

De acuerdo a McClatchie *et al.* (2009), desde el verano de 2007 hasta el inicio de 2009, el SCC estuvo dominado por condiciones La Niña, con una transición hacia condiciones El Niño en la primavera de 2009. A finales de 2007 la TSM presentó anomalías negativas, lo que pudo haber favorecido para que a inicios de 2008 se presentara la mayor anomalía positiva para la Cla-a ($>0.3 \text{ mg m}^{-3}$), el índice MEI desde inicios de 2007 presentó anomalías negativas sugiriendo que evidentemente hubo un evento La Niña el cual se mantuvo hasta inicios de 2009, además existe un acoplamiento con condiciones frías del PDO, estas condiciones de acuerdo con lo reportado por algunos autores proporcionan un medio adecuado para el incremento de la biomasa fitoplanctónica este incremento es atribuido al efecto de una mayor disponibilidad de nutrientes en la zona eufótica debido a la elevación de la nutriclina producto del efecto de los años La Niña (Chávez *et al.*, 2002; Shwing *et al.*, 2002; Hernandez *et al.*, 2004; Espinosa-Carreón, 2005; Espinosa-Carreón *et al.*, 2007). Por otro lado el ONI muestra que las condiciones La Niña sólo se presentaron para 2007 como un año La Niña Moderada, y el 2008 como un año con condiciones normales, estas condiciones

coinciden con anomalías positivas del NPGO las cuales inician justamente cuando el MEI y el PDO presentan condiciones frías, el decremento de la TSM ocurre con un pequeño desfase entre los índices, las anomalías registradas en ese año son de la misma magnitud que las registradas en La Niña 1998-2001, las cuales tendieron a ser positivas a inicios de primavera de 2008.

El incremento registrado de Cla-a en 2008 (figura 11) es el mayor en toda la serie de tiempo (septiembre 1997 a septiembre de 2010) y se registró inmediatamente después del descenso de TSM, una vez presentado este incremento en la Cla-a esta cae drásticamente en verano de 2008 aun cuando los índices climáticos (MEI y PDO) indican condiciones frías, Valdez-Diarte (2010) reporta que en el mes de junio de 2008 no se ven reflejados los efectos del evento La Niña en la concentración de la Cla-a para la región IMECOCAL mediante un análisis *in situ*, lo mismo pasa para la zona del SFBCS a mediados de 2008 donde la TSM tiende a aumentar y la Cla-a decae drásticamente, a pesar de que el NPGO muestra anomalías positivas y el ONI condiciones normales.

8.5.- Casos de estudio

8.5.1.- Condiciones El Niño 1997-1998

Los mecanismos asociados a El Niño resultan directamente en un calentamiento anómalo de la capa superficial a todo lo largo del Pacífico mexicano, por una modificación en los patrones de circulación de los vientos dominantes de la zona El Niño 1997-1998 es uno de los eventos más documentados para todo el Océano Pacífico Oriental (Hayward *et al.*, 1999; Bograd *et al.*, 2000; Durazo y Baumgartner, 2002, entre otros). Específicamente para la región de la Corriente de California se reportó la presencia de agua cálida superficial proveniente del Pacífico Central Norte, pobre en nutrientes debido al hundimiento de la nutriclina, además de una disminución de procesos de mesoescala, así como un incremento del flujo hacia el polo (McPhaden, 1999; Chávez *et al.*, 2002; Durazo y Baumgartner, 2002). Para toda la región del SFBCS se observó un aumento en temperatura en 1997 (figura 12) la cual va incrementándose de sur a norte, debido a la intrusión de agua cálida ecuatorial,

para 1998 se puede observar una disminución de la influencia del agua cálida, lo que sugiere que el flujo hacia el polo disminuye (figura 13).

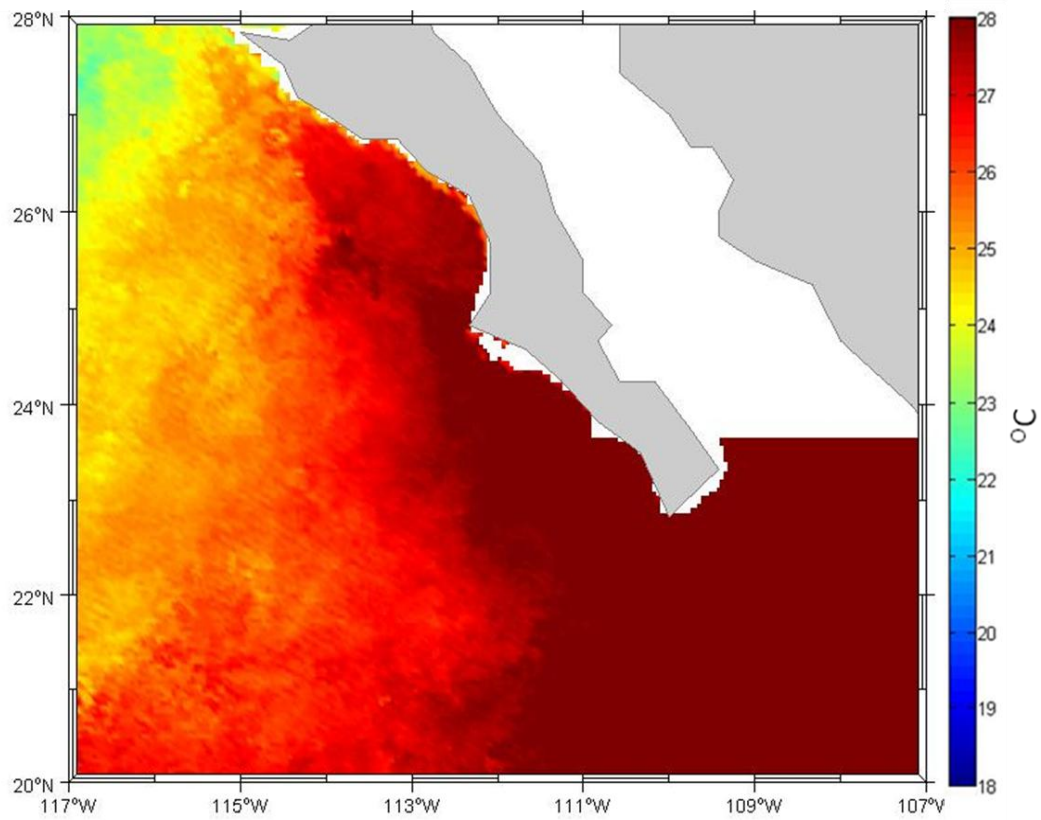


Figura 12. Promedio de temperatura superficial del mar en la región del SFBCS obtenida mediante imágenes del AVHRR a partir de septiembre de 1997 a diciembre de 1997.

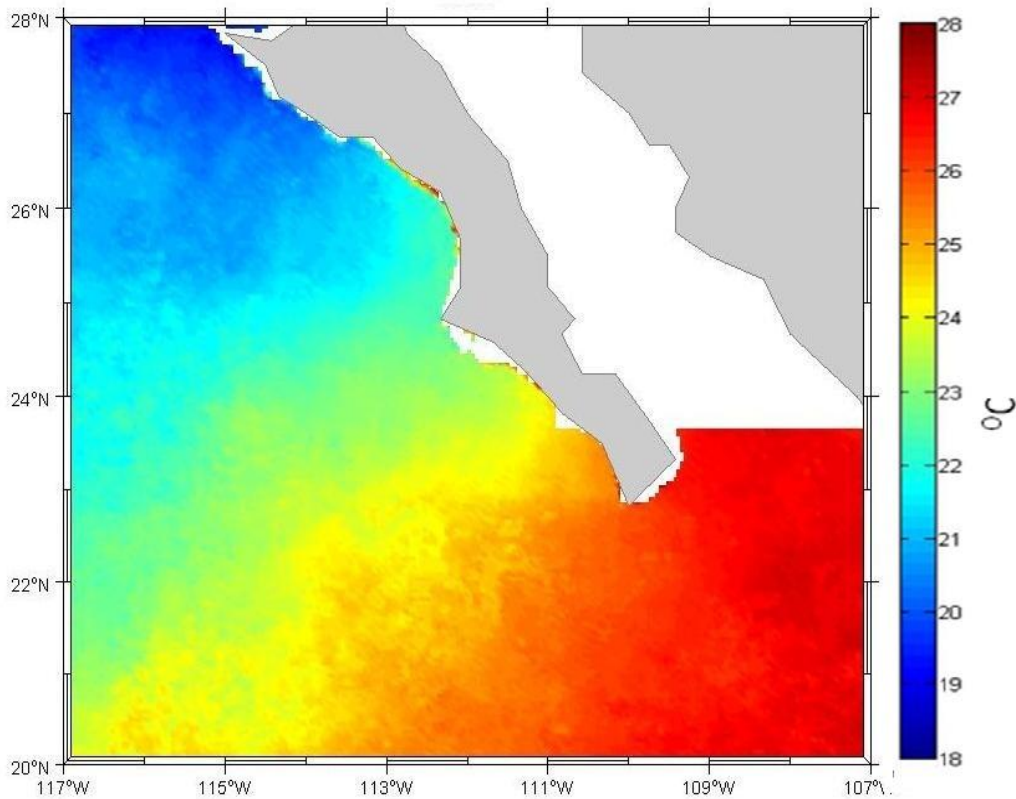


Figura 13. Promedio de temperatura superficial del mar en la región del SFBCS obtenida mediante imágenes del AVHRR a partir de enero de 1998 a diciembre de 1998.

En cuanto a la concentración de Cla-a para el año de 1997 presentó anomalías negativas principalmente en la zona costera, mientras que en la región oceánica se puede observar anomalías positivas (figura 14), se ha reportado que el incremento de fitoplancton en aguas cálidas es debido a la abundancia de cianobacterias fijadoras de nitrógeno principalmente por *Trichodesmium* (Dupouy 1992), los florecimientos de estas cianobacterias se han observado durante años ENSO en periodos de transición (Westberry y Siegel, 2006). Subramaniam *et al.* (2002) demuestran que los algoritmos estándar para estimar las concentraciones de clorofila a partir de las imágenes de satélite subestiman la concentración de clorofila debido a *Trichodesmium* por un factor de al menos cuatro, debido al autosombreado producido por las colonias, sin embargo, Westberry y Siegel (2006) mencionan que la firma óptica de *Trichodesmium* es mucho más sutil que lo que se había descrito y que la subestimación se da quizás para florecimientos extremadamente densos. Por lo anterior se sugiere que las anomalías positivas en la región oceánica pudieron ser producidas por la interacción de otras

comunidades fitoplanctónicas, que junto a las cianobacterias realizan las anomalías positivas de clorofila en la región oceánica del SFBCS.

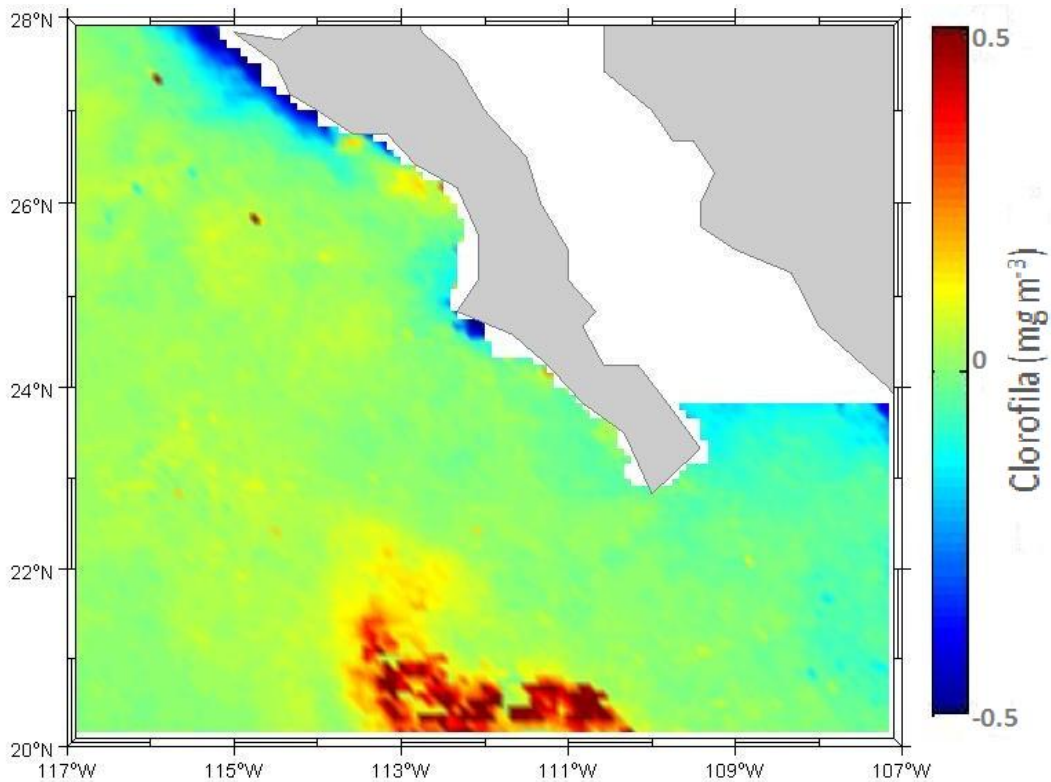


Figura 14. Anomalías de la concentración de Clorofila a durante el periodo de septiembre de 1997 a diciembre de 1997, obtenidas del sensor SeaWiFS.

Espinosa-Carreón (2005) menciona que el final de un evento El Niño es más dramático que el inicio de este, esto se puede observar en la concentración de Cla-a en el SFBCS ya que presentó las mayores anomalías negativas en toda costa del sistema en 1998 al final del evento El Niño (figura 15). Gaxiola-Castro y colaboradores (2010) reportan para la región IMECOCAL bajas concentraciones de Cla-a para 1997-1998 a pesar de que para ese periodo se tuvieron condiciones positivas del índice costero de surgencias.

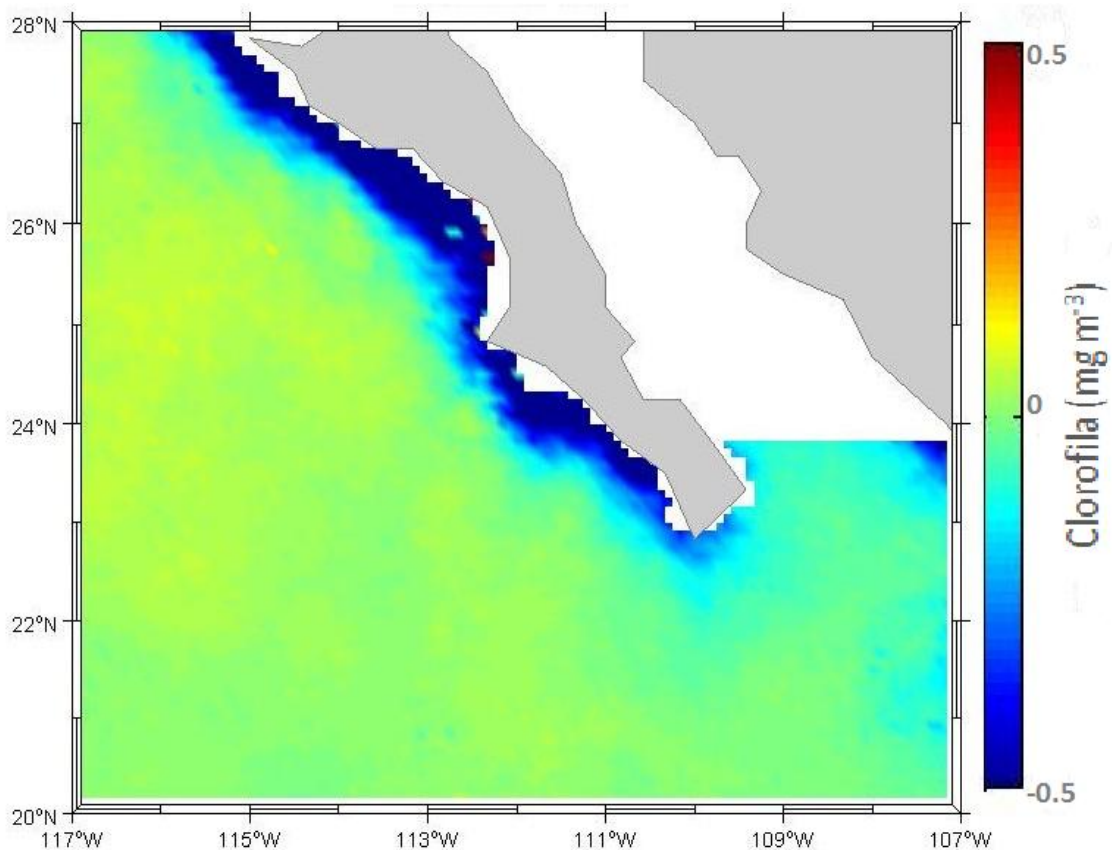


Figura 15. Anomalías de la concentración de Clorofila a durante el periodo de enero de 1998 a diciembre de 1998, obtenidas del sensor SeaWiFS.

8.5.2.- Condiciones 2002

El año 2002-2003 estuvo enmarcado por un evento El Niño de acuerdo con el Índice Multivariado ENSO (MEI) y el Índice Oceánico El Niño (ONI), para este periodo se podría esperar bajas concentraciones de Cla-a y altas TSM, sin embargo, para el SFBCS esto no fue observado, la TSM presentó anomalías neutras y negativas en toda la región (figura 16) y la Cla-a anomalías positivas en toda la región principalmente en la región costera (figura 17).

McPhaden (2004) describe este periodo como un evento moderado para el Pacífico Ecuatorial al igual como se observa en el ONI, Venrick *et al.* (2003) identificaron la presencia de El Niño 2002-2003 en el SCC reportando la presencia de agua fría y menos salada cercana a la superficie durante 2002 y un

débil calentamiento a inicios de 2003, en la serie de tiempo no-estacional se observa dicho patrón (Figura 11).

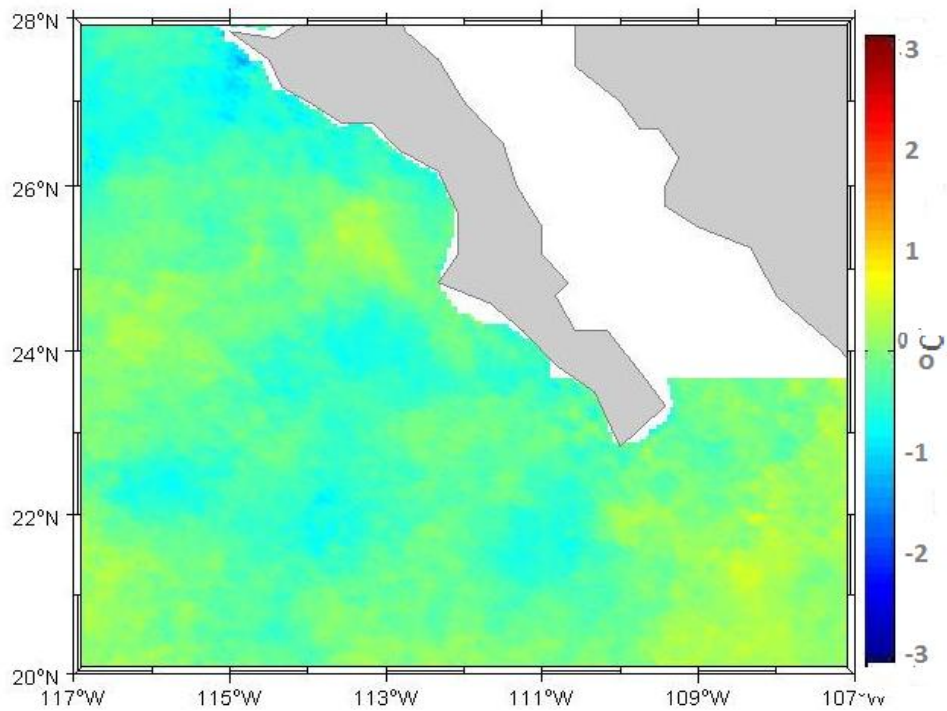


Figura 16. Anomalías de temperatura superficial del mar de 2002, calculadas de la serie de enero a diciembre de 2002 a partir de imágenes de satélite procedentes del sensor AVHRR.

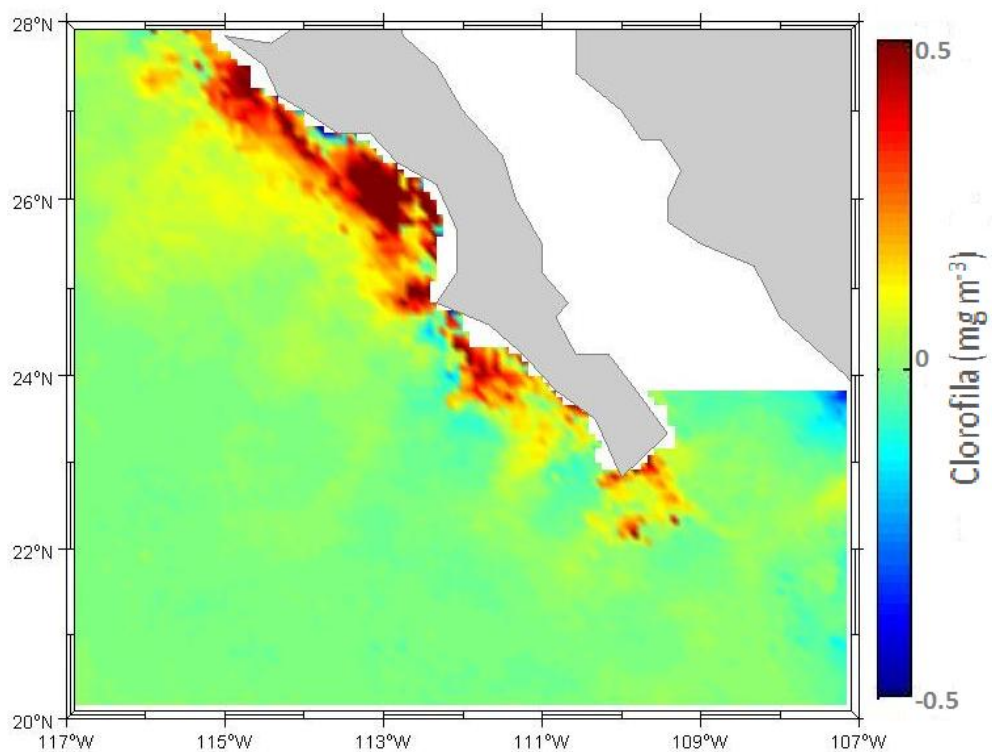


Figura 17. Anomalías de la concentración de Clorofila *a* de 2002, calculas de la serie de enero a diciembre de 2002 a partir de imágenes de satélite procedentes del sensor SeaWiFS.

Durazo *et al.* (2005) no encontraron evidencias que sugieran la presencia de un evento El Niño, tal como fue definido para eventos previos como por ejemplo El Niño 1997-1998, dichos autores encontraron la ocurrencia de vientos hacia el ecuador más fuertes que lo normal originando un mayor transporte de agua de origen subártico, lo que provocó que la influencia de El Niño haya sido enmascarada por la presencia de agua fría y de menor salinidad (Bograd y Lynn, 2003), la cual favoreció a la presencia de anomalías positivas de Cla-*a*, este evento de 2002-2003 fue nombrando como año El Niño débil. Gaxiola-Castro y colaboradores en 2010, reportan bajas concentraciones de nutrientes en toda la región de IMECOCAL para la serie de 1997 a 2005 con un inusual aumento de nutrientes para 2002 y la mayor concentración de Clorofila integrada de la serie de 1998-2007, altos niveles de clorofila-*a* en la CC fueron también medidos por Schwing *et al.* (2002) en el invierno de 2002 frente a las costas de California, ellos atribuyeron el incremento de la Cla-*a* a la intensificación de las surgencias costeras por arriba de lo normal, relacionada con anomalías climáticas presentes en el Océano Pacífico.

Ninguno de los trabajos anteriormente mencionados relacionan las bajas TSM y las anomalías positivas de Cla-*a* con el índice de Oscilación del Giro del Pacífico Norte (NPGO) esta oscilación esta correlacionada significativamente con fluctuaciones de salinidad, nutrientes y clorofila la cuales reflejan los cambios de la intensidad de la circulación del Giro del Pacífico Norte, relacionado con la intensidad de los vientos los cuales provocan surgencias costeras en el SCC, en su fase positiva se intensifica la CC así como los vientos por lo tanto existe un mayor número de surgencias (Di Lorenzo *et al.*, 2008). En toda la serie de tiempo observada a partir de 1997-2010 las mayores amplitudes registradas para el NPGO fueron de 1998-2004, a pesar que en anteriores trabajos no relacionan estas condiciones anómalas con el NPGO, todos los trabajos coinciden en el aumento de surgencias costeras, la intensificación de los vientos así como de la CC y altos valores de nutrientes (Schwing *et al.*, 2002; Bograd y Lynn, 2003;

Durazo *et al.*, 2005; Gaxiola-Catro *et al.*, 2010), por lo tanto los eventos anómalos que se presentaron en 2002 fueron producidos por la fase positiva del NPGO.

8.5.3.- Condiciones La Niña 2008

El año de 2008 estuvo enmarcado por un año La Niña el cual inició a mediados de 2007 de acuerdo con el MEI y el ONI, y terminó a inicios de primavera de 2008. De acuerdo a McClatchie *et al.* (2009), desde el verano de 2007 hasta el inicio de 2009, el Sistema de la Corriente de California estuvo dominado por condiciones del evento La Niña, con una transición hacia condiciones El Niño en la primavera de 2009.

El inicio de 2008 se caracterizó por una fuerte influencia de La Niña, que se debilitó hacia el mes de marzo con la reducción significativa de las anomalías de color en el océano (MacClatchie *et al.*, 2009). Para julio de 2008 se reporta la influencia de agua de la CC (fría y poco salada) en la región IMECOCAL (Hayward *et al.*, 1999; Jerónimo 2007), para el SFBCS se puede observar anomalías positivas de TSM en gran parte del área de estudio (figura 18) principalmente en la región costera, las cuales pudieron ser provocadas por la influencia de las condiciones de La Niña aunado con la fase positiva del NPGO, en cuanto a la concentración de Cla-a, esta presenta anomalías positivas (>0.5) en toda el área con anomalías negativas en la costa al sur de punta Eugenia, las cuales pudieron ser producidas por procesos locales, como una disminución de surgencias costeras en dicha zona.

En 2009 McClatchie y colaboradores describen que la variación de la Cla-a al sur de Punta Concepción está más influenciada por la relación del NPGO que por las propias condiciones que se presentan en el año La Niña 2008, esto también puede ampliarse para la región del SFBCS donde presenta altas concentraciones de Cla-a debido tal vez al acoplamiento de las fases frías del ONI, el MEI y el PDO, con la fase positiva del NPGO a inicios de 2008.

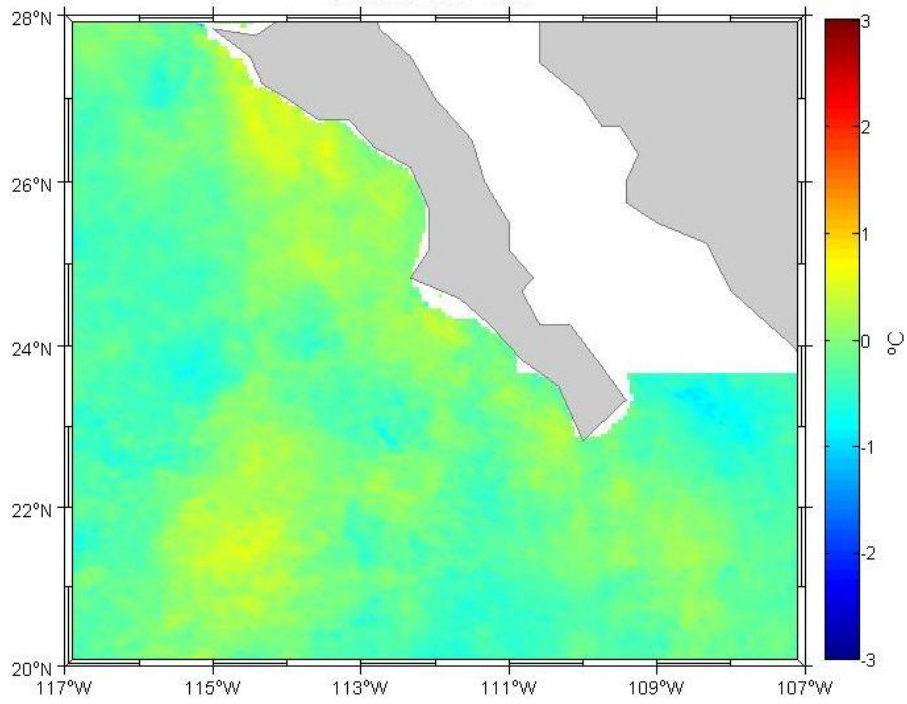


Figura 18. Anomalías de temperatura superficial del mar de 2008, calculas de la serie de enero a diciembre de 2008 a partir de imágenes de satélite procedentes del sensor AVHRR.

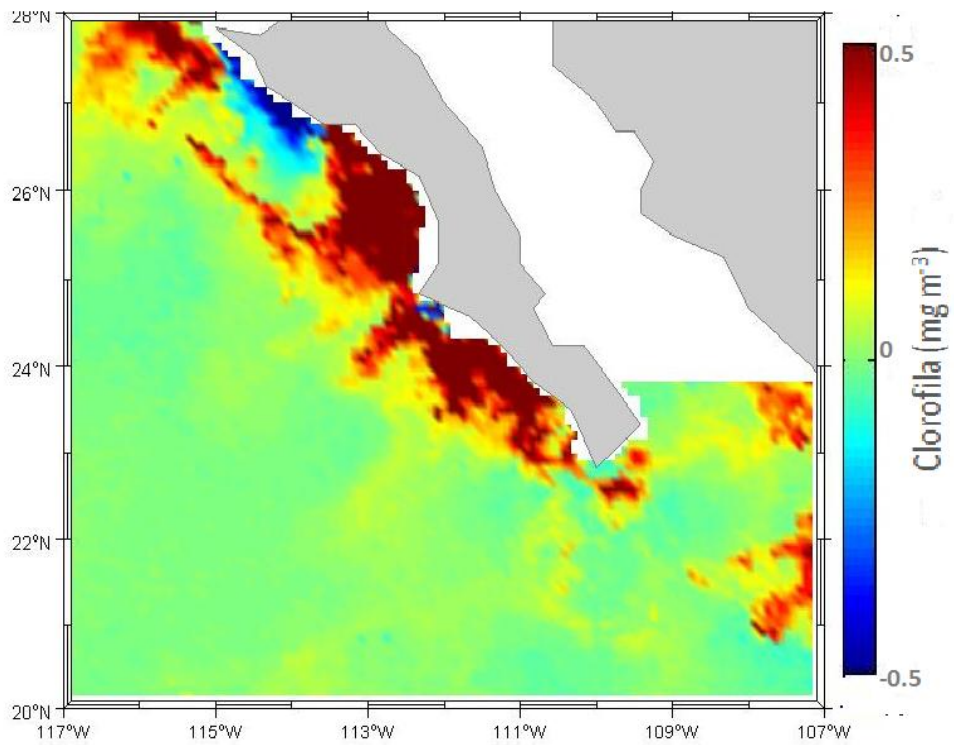


Figura 19. Anomalías de la concentración de Clorofila *a* de 2008, calculas de la serie de enero a diciembre de 2008 a partir de imágenes de satélite procedentes del sensor SeaWiFS.

Valdez-Diarte (2010) reportó para julio de 2008 en la región de IMECOCAL, la intrusión de agua con baja salinidad y de baja temperatura de la CC, sin embargo, no encuentra evidencia de La Niña para ese mes lo cual se ve reflejado en bajas concentraciones del Cla-*a* y PP, encontrando bajos niveles de los parámetros fotosintéticos infiriendo que posiblemente se debió a la presencia de una comunidad fitoplanctonica diferente, esto comparado con otros años de estudio en esa región. El promedio de la concentración de clorofila (figura 5) muestra que para el mes de julio la concentración de la Cla-*a* decae drásticamente después de haber presentado la mayor anomalía en el mes de abril de toda la serie de septiembre de 1997 a septiembre de 2010, esta baja concentración se presenta en los meses de junio a septiembre de 2010 (con ciclo estacional), justamente cuando el índice ONI muestra condiciones normales para el Océano Pacífico, el PDO muestra condiciones frías, el MEI se recupera a condiciones neutras, y el NPGO se mantiene en su fase positiva (figura 10), por lo que estas condiciones sugieren la influencia de otros procesos ajenos al ciclo estacional y a los eventos interanuales, lo que provocó altas TSM las cuales de acuerdo con el ciclo estacional no se presentan en esos meses, coincidiendo con bajas concentraciones de Cla-*a* (figura 19).

8.6.- Productividad Primaria Modelada

En la zona eufótica de los océanos contemporáneos se produce una captación del carbono inorgánico del orden de 35 a 45 Pg (Peta gramo = 10^{15} g) de carbono por año vía fotosíntesis del fitoplancton (Cepeda-Morales, 2004). Esta captación está relacionada con sólo 1 a 2 % de la biomasa global de plantas, o un 30 a 60 % de la asimilación global de carbono de la Tierra (Sakshug *et al.*, 1997; Falkowski *et al.*, 1998), de los cuales 16 Pg son exportados al interior del océano mediante la bomba biológica (Slegenthaler y Sarmiento, 1993). El secuestro del CO₂ atmosférico por el océano, y la sustentabilidad de las capturas de peces de

interés comercial, están controladas por la producción de carbono orgánico nuevo a través de su consumo por organismos de niveles tróficos mayores en la zona eufótica (Zeu) y de su transporte vertical hacia el fondo marino (Chen-Tung, 2003). Actualmente con la información derivada de sensores remotos se ha podido estudiar de manera global y local las interacciones del fitoplancton como productor primario y su relación con el medio ambiente a diferentes escalas espacio-temporales (Platt *et al.*, 1992; Falkowski *et al.*, 1998; Field *et al.*, 1998; Behrenfeld *et al.*, 2002). Uno de los modelos actualmente utilizados para conocer la tasa de asimilación fotosintética mediante la utilización de compuestos satelitales es el propuesto por Behrenfeld y Falkowski (1997b), el cual permite estimar la PP integrada en la Zeu, de manera global y local, a dicho modelo se le conoce como Modelo de Productividad Vertical Generalizado (VGPM del acrónimo en inglés).

La productividad primaria en el océano se ve afectada por procesos particulares de cada zona geográfica, los cuales son modulados por factores ambientales tanto locales como globales (Gaxiola-Castro *et al.*, 1999; Gaxiola-Castro *et al.*, 2002; Espinosa-Carreón, 2005). Dentro los de los eventos interanuales más documentados para el océano Pacífico se encuentra El Niño, los efectos más importantes producidos por este en la capa pelágica del océano se relacionan con la disminución de la abundancia del fitoplancton (Feldman *et al.*, 1984) y por ende una reducción de la producción primaria (Barber y Chávez, 1983; Barber *et al.*, 1985), donde el efecto sobre la columna de agua es el decremento en la concentración de nutrientes inorgánicos en la Zeu debido al hundimiento de la termoclina (Barber y Chávez, 1986) contrario a los eventos fríos (La Niña).

Para conocer la influencia de los procesos interanuales en la PP, se aplicó el coeficiente de correlación entre la PP y los diferentes índices climáticos (ONI, MEI, PDO y NPGO), esto con el fin de conocer su relación con la PP y las diferentes zonas de influencia de estos en el SFBCS. Se ha reportado que la productividad primaria se correlaciona negativamente con el índice MEI y ONI así como también con el PDO, indicando que en condiciones calidas es baja la PP y en condiciones frías proporcionan condiciones optimas par el aumento de la PP,

además de que las condiciones positivas del NPGO favorecen el afloramiento del fitoplancton así como el incremento de la PP, teniendo una correlación positiva con este último índice (Gaxiola-Castro *et al.*, 2010; Di Lorenzo *et al.*, 2008; Kahru y Mitchell, 2002).

Mediante la correlación se pudo observar que la mayor parte de la región costera del SFBCS se presentan correlaciones negativas entre la PP y los índices climáticos MEI, ONI y PDO, sin embargo en la región oceánica se localizó un área donde se presentan correlaciones positivas con el MEI y el ONI, misma región que el PDO no presenta correlación alguna (figura 20).

En cuanto el NPGO y la PP presentaron una correlación positiva en la mayor parte del SFBCS principalmente en la región costera, donde la influencia de este índice solo se confina en el área donde los demás índices muestran correlaciones negativas con la PP, resaltando de nueva cuenta el área oceánica por encima de los 22° N. Barocio-León y colaboradores (2007) mencionan que las variaciones interanuales para las subregiones costeras están relacionadas con los factores físicos y climatológicos que afectan principalmente a las surgencias, mientras que las variaciones interanuales mar adentro son mínimas, hecho observado mediante las correlaciones con los índices climáticos, donde se observó que la región costera (donde se presentan las surgencias) fue donde presentó la relación con todos los índices climáticos utilizados en el presente trabajo.

Mediante el análisis de componentes principales o Funciones Empíricas Ortogonales (FEOs) se obtuvieron los principales patrones espacio-temporales que causan variabilidad en la productividad primaria (PP) en el Sistema Frontal de Baja California Sur, para esto se utilizaron 112 compuestos mensuales de PP con una resolución espacial de 4x4 km por pixel, obteniendo así 112 modos, de los cuales los primeros 4 tienen el porcentaje mayor de varianza explicada (34.8 %), donde primeramente se obtuvieron las anomalías por mes, esto quiere decir que a cada uno de los meses se les extrajo el promedio correspondiente por mes. La interpretación de los modos se realizó con base en el patrón espacial y su variación fue dada por la serie de tiempo correspondiente.

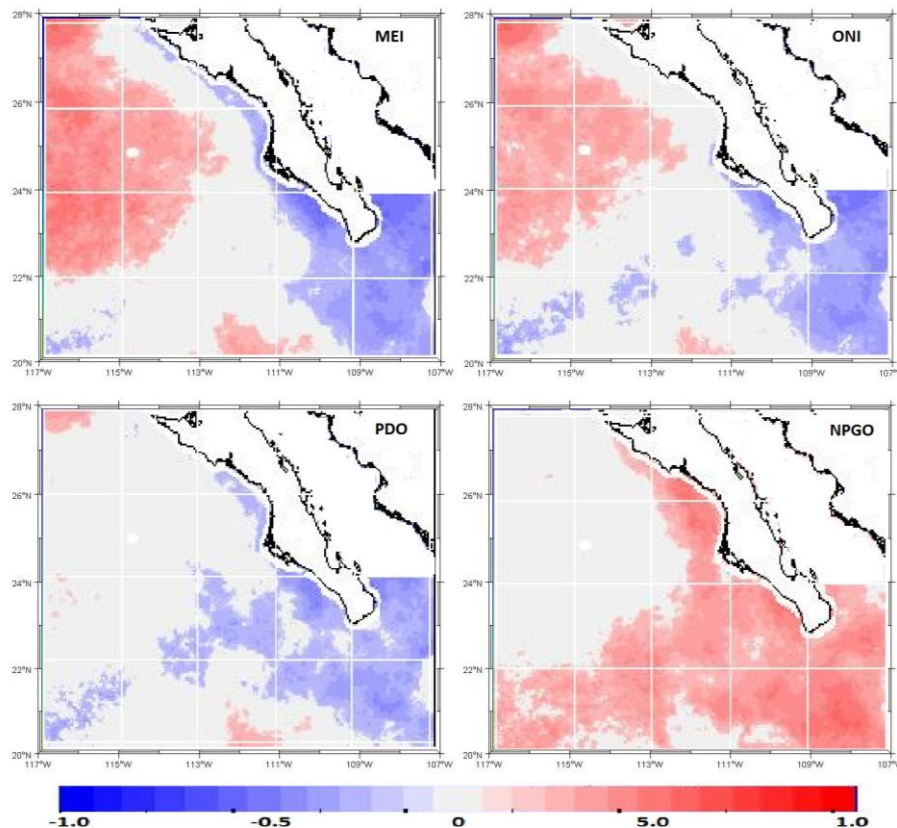


Figura 20.- Análisis de correlación entre los índices climáticos y la productividad primaria en el sistema frontal de Baja California Sur a partir de imágenes de satélite durante septiembre de 1997 a diciembre de 2006.

El primer modo representó el 14.2 % de toda la variabilidad de la PP en el SFBCS, en el patrón temporal se observan las fluctuaciones de la PP a lo largo del tiempo la cual tiene una correlación negativa de -0.64 y -0.59 con los índices MEI y ONI respectivamente, las cuales son significativas, mientras que el patrón espacial se pueden observar dos zonas muy marcadas, la región oceánica por encima de los 22°N y la región costera (figura 20), más adelante se dará una explicación más detallada sobre la coincidencia con la influencia de los procesos físicos relacionados con los índices climáticos. En este modo se muestra claramente que en la región oceánica, cuando se presenta un evento El Niño, no hay una respuesta negativa de la PP, si no que al estar presente, hay un incremento y no una disminución de PP, como se había reportado en años El

Niño (Barber y Chávez, 1983; Barber *et al.*, 1985; Lynn *et al.*, 1998), mientras que en eventos La Niña, en esta misma región oceánica presenta baja PP y no alta como se había reportado en otros trabajos (Hayward *et al.*, 1999), la correlación entre la PP y el índice climático NPGO fue positiva y estadísticamente significativa ($0.37_{n=112} \alpha=0.05$) con esto se reafirma la influencia de la Oscilación del Giro del Pacífico Norte en el área de estudio.

A finales de 1997 y todo 1998, en la región costera y en la boca del Golfo de California se observa baja PP relacionada con el evento El Niño. Para 1999 y hasta finales de 2001, el sistema mostró una recuperación con anomalías positivas las cuales también fueron principalmente en la región costera relacionado de nueva cuenta con eventos interanuales en este caso La Niña y con un aumento en la intensificación del Giro del Pacífico Norte el cual estuvo presente desde principios de 1999 hasta inicios de 2004, en este modo se observa la influencia de El Niño débil (Durazo *et al.*, 2005) pero de nueva cuenta se observa que la influencia de éste sólo estuvo confinado en la región costera y las anomalías negativas producto de este son menores que para 2003, año que no estuvo enmarcado por ningún evento cálido relevante en el cual se presenta baja PP en la región costera.

A finales de 2004 e inicio 2005 los índices climáticos (figura 10) muestran anomalías positivas del MEI, ONI y PDO y anomalías negativas de NPGO, indicando la presencia de un evento cálido (El Niño) y una disminución del Giro del Pacífico Norte, la PP (figura 21) en ese periodo mostró valores negativos, cambiando a valores positivos en el segundo semestre de 2005 y manteniéndose así hasta mediados de 2006, periodo donde el MEI y el ONI muestran anomalías negativas indicando la presencia de La Niña además de una intensificación del NPGO el cual empieza a finales de 2005 manteniéndose en ascenso en los años posteriores. De nueva cuenta la PP presentó valores bajos a finales de 2006 coincidiendo con un evento El Niño de acuerdo con el MEI y el ONI el cual se presenta a partir del segundo semestre de ese año, todo lo anterior se observa en el modo temporal, sin embargo, como se mencionó anteriormente, espacialmente el sistema responde de forma particular en cada una de las zonas observadas

(oceánica y costera), donde mientras la costera presenta baja productividad primaria, la oceánica presenta alta y viceversa.

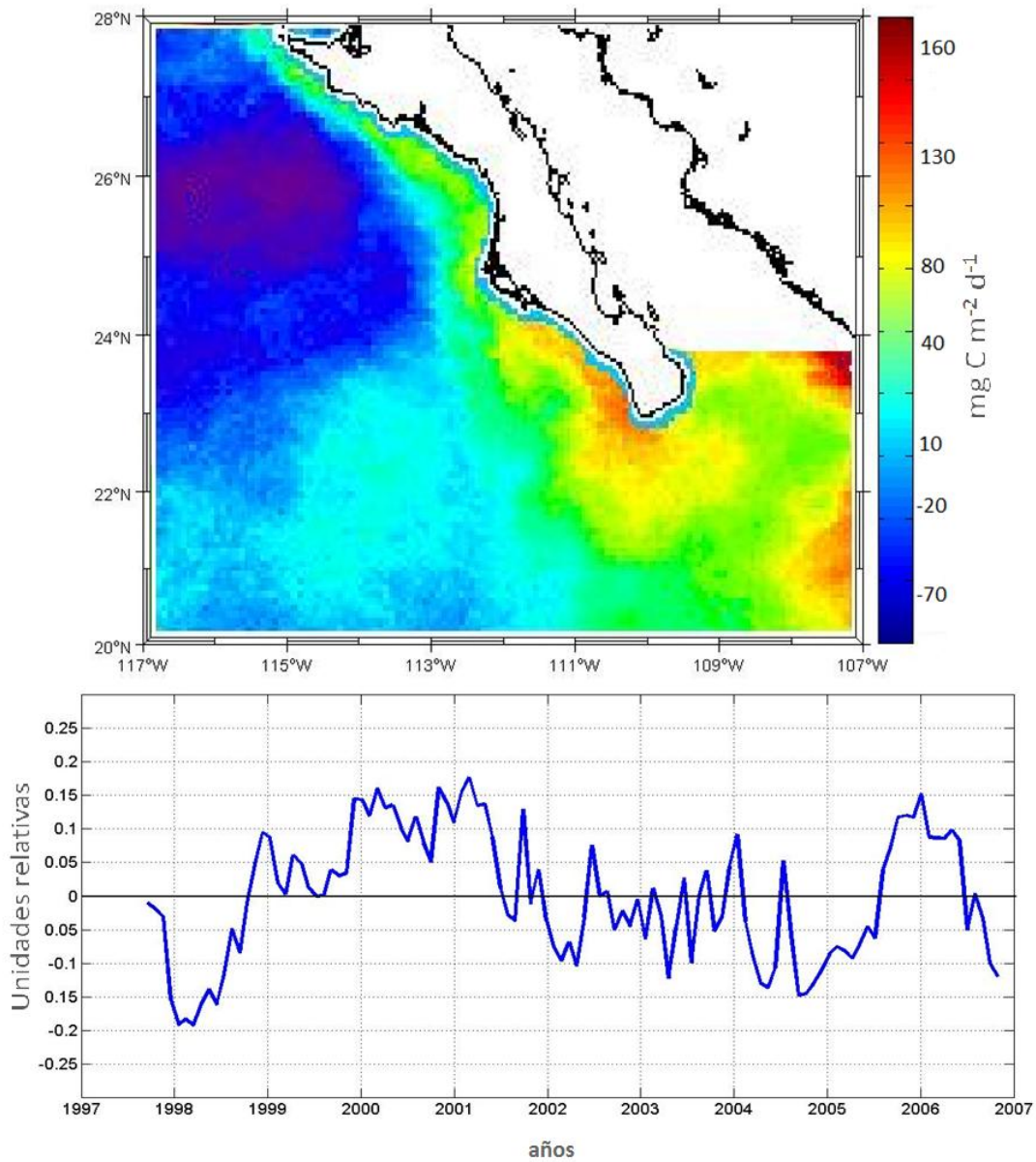


Figura 21.- Imagen espacial y análisis temporal del primer modo de las Funciones Empíricas Ortogonales de la serie de septiembre de 1997 a diciembre de 2006, obtenido mediante imágenes de satélite de productividad primaria del sistema Frontal de Baja California Sur.

En cuanto al segundo modo obtenido de los FEOs este representa el 9.7% de varianza explicada (figura 22), en este modo se puede observar temporalmente que en 1997 presenta el valor más alto de toda la serie, seguido de oscilaciones entre valores positivos y negativos siendo los primeros los que se

repiten más, observando también que los años 2001 y 2002 fue donde se presentan la más baja PP, cabe destacar que este modo no presentó correlaciones significativas con ningún índice climático, espacialmente se pueden observar tres zonas muy marcadas, una región costera, una zona de transición entre la región costera y oceánica, y la otra oceánica, esta última presenta una tasa de asimilación fotosintética $>40 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, y la costera anomalías negativas inferiores a $-80 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, estos valores fluctúan de acuerdo a la serie temporal, por ejemplo, la anomalía positiva de 1997 indica que los valores positivos sólo se presentaron espacialmente donde se encuentran anomalías positivas, indicando así también que las anomalías negativas espacialmente se magnifican. Para 2001-2002 donde la serie muestra anomalías negativas, espacialmente (figura 22) en la zona costera dichas anomalías fueron positivas, evidenciando una intensificación de surgencias costeras estimulando el crecimiento del fitoplancton, y elevando así la PP, dichas anomalías positivas durante esos años solo se presentaron en la región costera, esto coincide con la intensificación que tuvo el Giro del Pacífico Norte y la intrusión de agua de origen subártico, lo que permitió una mayor disponibilidad de nutrientes (Durazo *et al.*, 2005; Di Lorenzo *et al.*, 2008; Gaxiola-Castro *et al.*, 2010).

El tercer modo representa el 6.6 % de varianza explicada, en este se puede observar espacialmente que toda la región frente a las costas de Baja California Sur presenta anomalías positivas, observando de nueva cuenta la región oceánica por encima de los 22°N al igual que el primer modo, y anomalías negativas solo en la región costera de Sinaloa y Nayarit (figura 23), este modo presenta una correlación positiva y significativa sólo con el índice NPGO de 0.28 ($n=112$, $\alpha= 0.05$), además de que en la serie temporal se puede observar que las anomalías positivas se presentan año tras año principalmente en invierno y primavera coincidiendo con la época que se presentan las surgencias costeras, este modo podría estar relacionado también con la estacionalidad de las corrientes principalmente de la Contracorriente Costera (CcC) ya que se observa espacialmente una zona de mayor de anomalías positivas, junto a la costa, y temporalmente se observa que las anomalías negativas se presentan principalmente en otoño, época en la cual la CcC se intensifica con un flujo costero hacia el polo.

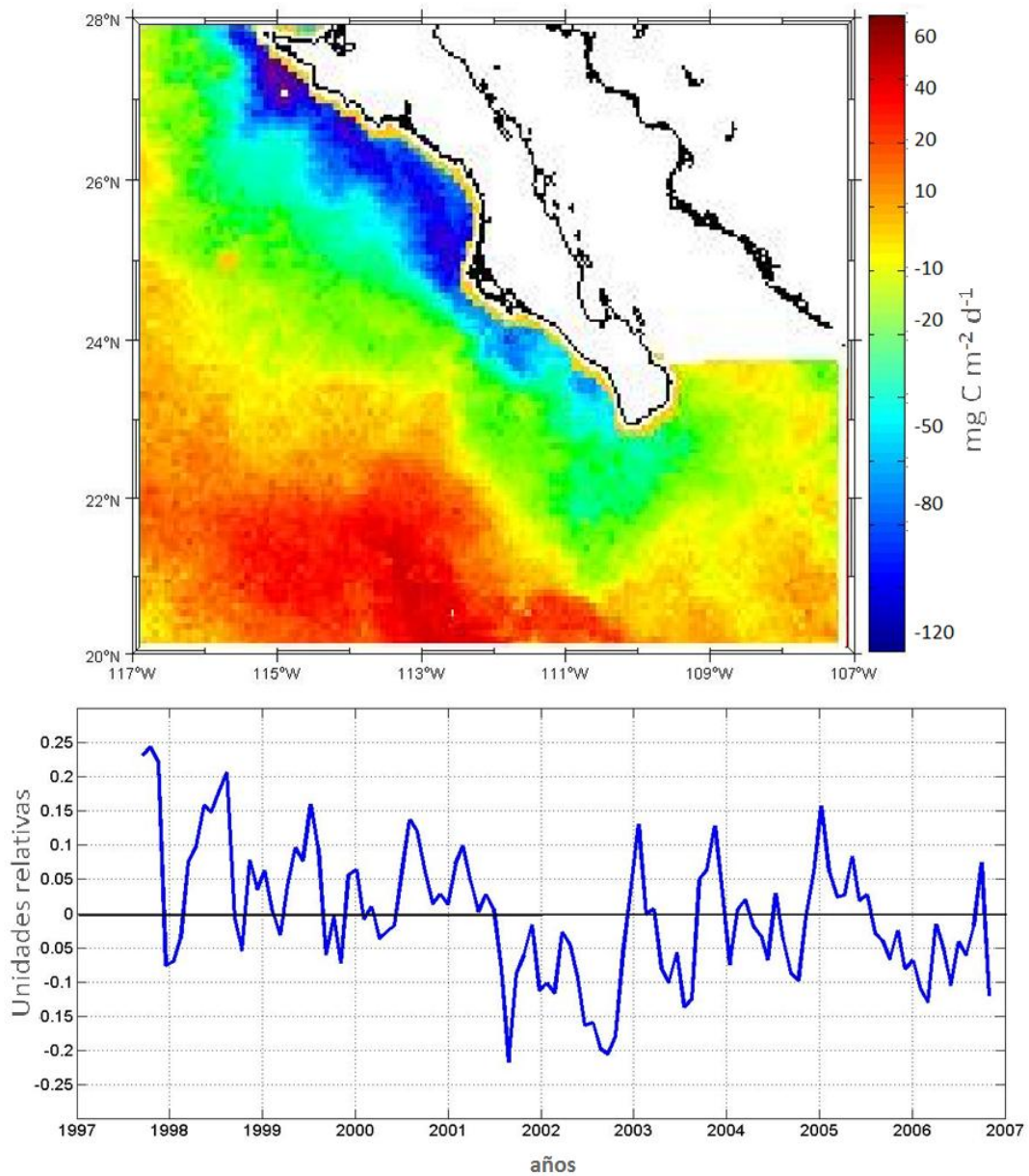


Figura 22.- Imagen espacial y análisis temporal del segundo modo de las Funciones Empíricas Ortogonales de la serie de septiembre de 1997 a diciembre de 2006, obtenido mediante imágenes de satélite de productividad primaria del sistema Frontal de Baja California Sur.

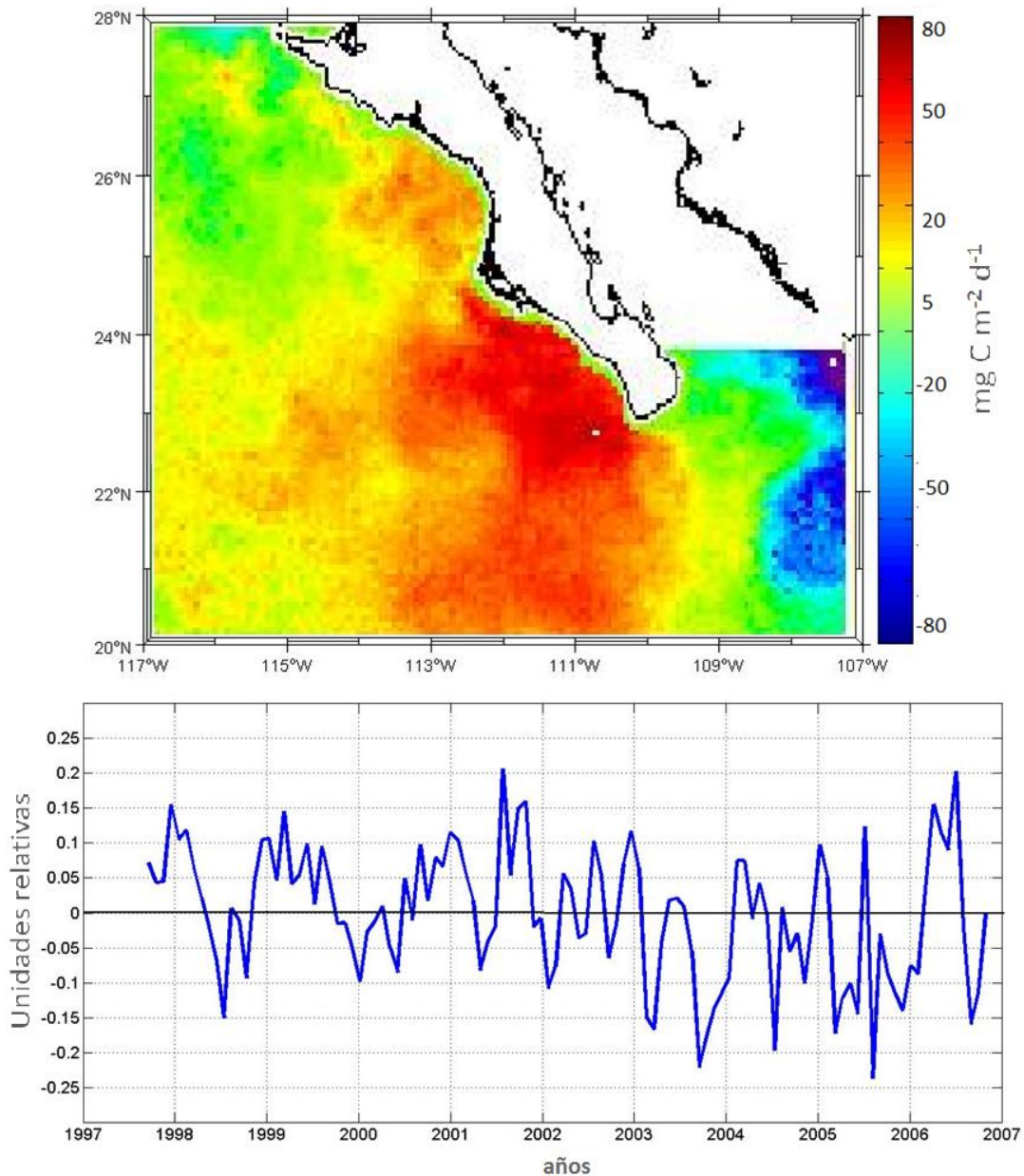


Figura 23.- Imagen espacial y análisis temporal del tercer modo de las Funciones Empíricas Ortogonales de la serie de septiembre de 1997 a diciembre de 2006, obtenido mediante imágenes de satélite de productividad primaria del sistema Frontal de Baja California Sur.

El cuarto modo (figura 24) representó el 4.3 % de varianza explicada en el cual se observa que espacialmente destaca de nueva cuenta una región oceánica ahora al norte de los 24°N, además de una región costera de los 24°N a los 28°N, la primera con anomalías positivas y la segunda presentando anomalías negativas, de acuerdo con la serie temporal mientras que en una zona las

anomalías son negativas en la otra son positivas y viceversa. Espinosa-Carreón (2005) reporta que a finales de otoño y durante invierno se registró un remolino ciclónico, mientras que a finales de invierno y primavera-verano se presentó uno anticiclónico, esto en la región frente a Punta Eugenia, reportando que mientras que se registró el remolino anticiclónico, se presentaron surgencias costeras en esta zona, además de reportar que la TSM presentó un ciclo estacional bien definido, con anomalías negativas de temperatura de diciembre a mayo y positivas de junio a noviembre, como resultado del calentamiento superficial del mar, todo esto se ve reflejado en este modo (figura 24), ya que se observa que principalmente en los meses de otoño e invierno, se presentan principalmente anomalías positivas en la región costera de Punta Eugenia coincidiendo con las anomalías negativas de TSM ya reportadas para esa región (Espinosa-Carreón, 2005)

Además de estas dos regiones se observó una tercera región la cual se encuentra debajo de los 24°N frente a Los Cabos, lo que sugiere una zona donde se presentan remolinos recurrentes, al igual que el reportado para Punta Eugenia, presentándose en la misma época del año.

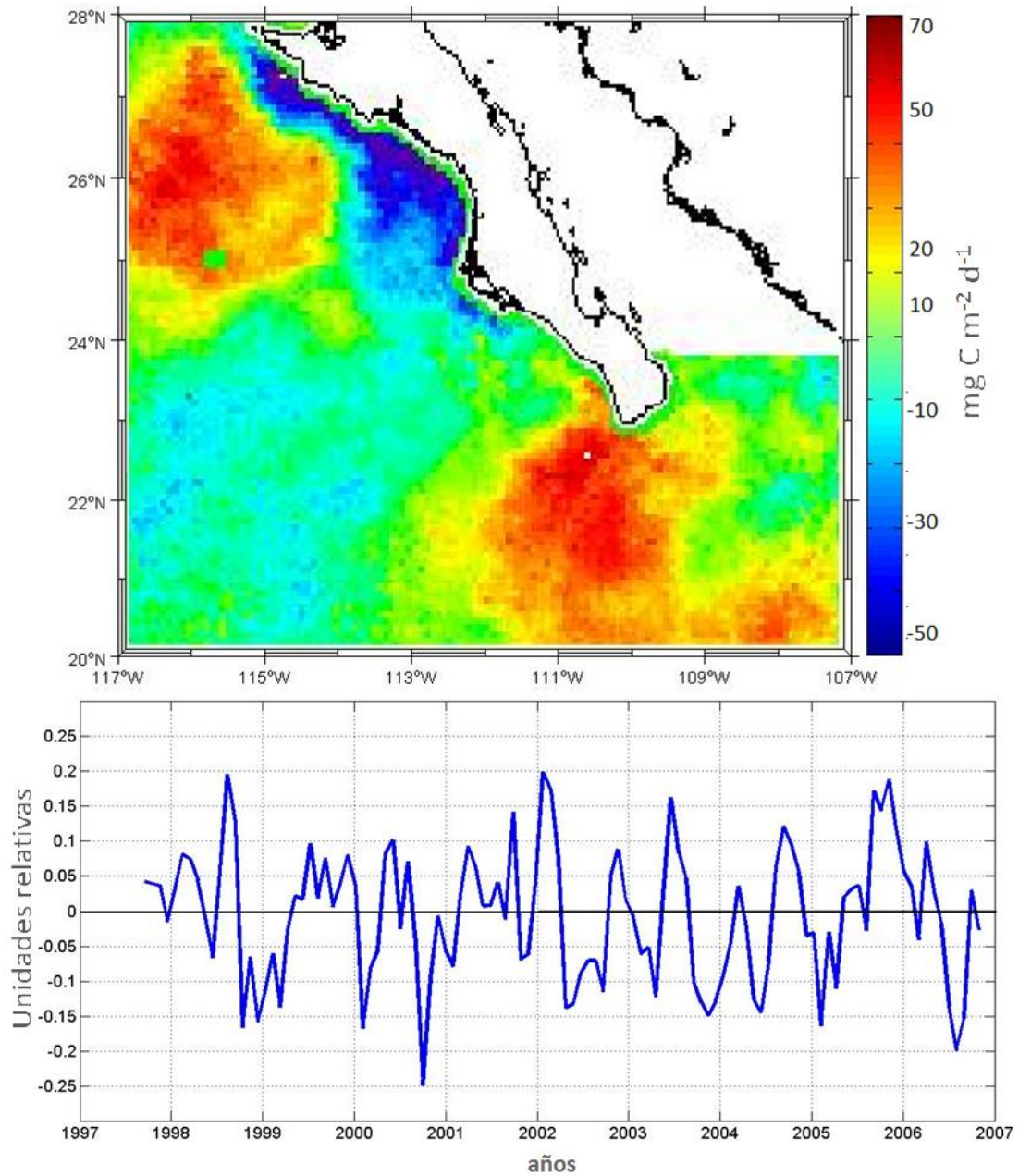


Figura 24.- Imagen espacial y análisis temporal del cuarto modo de las Funciones Empíricas Ortogonales de la serie de septiembre de 1997 a diciembre de 2006, obtenido mediante imágenes de satélite de productividad primaria del sistema Frontal de Baja California Sur.

9. DISCUSIÓN GENERAL

Desde el punto de vista de la dinámica químico-biológica, las áreas costeras son operadas por pulsos de eventos de viento que activan el mecanismo de surgencias, que a su vez son los responsables de la inyección de nutrientes en la zona eufótica (Hutchins *et al.*, 1998), de acuerdo con los resultados obtenidos de Cla-a, TSM y PP, el SFBCS, se puede describir como una zona de recurrencia de surgencias costeras, las cuales se presentan principalmente en primavera, además de presentar una variabilidad interanual influenciada principalmente por la Oscilación del Giro del Pacífico Norte, donde tanto la alta concentración de Cla-a y los altos niveles de PP, están influenciadas principalmente por las anomalías positivas del NPGO, y no necesariamente con las condiciones que se presentan en años La Niña, lo cual fue reportado por McClatchie *et al.* (2009) para la región norte del SCC.

Los diferentes resultados, indican que el SFBCS puede ser considerada además como una zona donde se presentan estructuras de mesoescala, como remolinos, los cuales son producto tanto de la geometría de la costa, como de la interacción de la Corriente de California que se dirige hacia el ecuador en la capa superficial y la Contracorriente de California con dirección al polo (Soto-Mardones *et al.*, 2004), Los resultados sugieren además que debido probablemente a la advección que sufre la CC hacia mar abierto, lo cual provoca que en la región oceánica se presentan estructuras de mesoescala recurrentes principalmente al norte de los 22°N.

La influencia de El Niño, se observó principalmente en los años 1997-1998, con bajas concentraciones de Cla-a y PP las cuales se presentaron principalmente en la región costera, además de alta TSM, observando que la influencia de los índices climáticos se presentan principalmente en la región costera.

10. CONCLUSIONES

De acuerdo con los datos obtenidos mediante compuestos de imágenes de satélite tanto de la Cla-a como de TSM se observó que en la región costera del SFBCS es donde se presenta la mayor variabilidad estacional, producida principalmente por la presencia de surgencias.

La época donde se presentan las más altas concentraciones de Cla-a es en primavera, coincidiendo con las más bajas TSM en toda el área.

La TSM en el SFBCS presentó el 82% de la variabilidad explicada por el ciclo estacional mientras que la Cla-a presentó el 54 % de varianza explicada.

La variabilidad no-estacional de Cla-a presentó mayor relación con el índice de la Oscilación del Giro del Pacífico Norte que con los eventos de El Niño/La Niña, mientras que la TSM está más relacionada con las fluctuaciones del MEI.

En el área de estudio se evidenció la presencia de El Niño 1997-1998 con altas TSM y anomalías negativas de Cla-a principalmente en 1998.

Mediante datos de sensores remotos en el SFBCS no se evidenció la presencia El Niño 2002-2003, encontrándose en ese periodo altas concentraciones de Cla-a relacionadas con la fase positiva del NPGO.

En la región del SFBCS fue evidente la variabilidad causada por el ciclo estacional como por eventos interanuales, tal fue el caso de 2007-2008 donde la influencia tanto de La Niña como la fase fría del PDO provocaron bajas temperaturas y una alta concentración de pigmentos fotosintéticos, en consecuencia del aumento de surgencias costeras producto de la fase positiva del NPGO.

En el SFBCS se identificó una zona al norte de los 22°N donde las condiciones ENSO no influyen, debido probablemente a la recurrencia de remolinos ciclónicos/anticiclónicos.

El primer modo de la productividad primaria estimada en la zona eufótica (14.2% de varianza explicada obtenida mediante los FEOs), está relacionada con la señal interanual, observando las zonas de influencia de los índices climáticos.

La correlación entre la Oscilación del Giro del Pacífico Norte y la productividad primaria fue positiva influyendo principalmente en la zona costera, observando la influencia de este giro sólo en el primer y el tercer modo de las Funciones Empíricas Ortogonales.

11.- LITERATURA CITADA

Aguirre-Gómez, R. 2002. Los mares mexicanos a través de la percepción remota. Temas selectos de Geografía de México. Plaza y Valdés Editores, Instituto de Geografía, UNAM. México. 95 p. ISBN: 968-856-951-8.

Álvarez-Borrego S. & Lara-Lara J.R. 1991. The physical environment and primary productivity of the Gulf of California. En: Dauphin JP & Simoneit B (eds) The Gulf and Peninsular Province of the California's. American Association of Petroleum Geologists.47, Tulsa: 555–567.

Alvarez-Borrego S., Rivera J.A., Gaxiola-Castro G., Acosta-Ruíz M.J. y Schwartzlose R.A. 1978. Nutrientes en el Golfo de California. Ciencias Marinas. 6: 13-22 p.

Amador-Buenrostro, A. y M. Figueroa-Rodríguez, 1997. Glosario de términos oceanográficos. En: M. F. Lavín, editor. Contribuciones a la Oceanografía Física en México. Monografía No. 3. Unión Geofísica Mexicana, 265-272 p.

Bakun, A. 1996. Patterns in the ocean: ocean processes and marine propagation dynamics. California Sea Grant/CIB, La Paz, México. 323 pp.

Bakun, A. y C. S. Nelson. 1977. "Climatology of upwelling related processes off Baja California". CalCOFI. Rep. 19: 107-127 p.

Barber, R. T. and Chavez, F.P. 1986. Ocean variability in relation to living resources during the 1982-83 El Niño. Nature, 319: 279-285 p.

Barber, R. T. y Chavez, F. P. 1983. Biological consequences of El Niño. Science 222:1203-1210 p.

Barber, R. T., Kogelschatz J.E. and Chavez, F.P. 1985. Origin of productivity anomalies during the 1982-83 El Niño. CalCOFI Rep., 26: 65-71 p.

Barocio León, O. A., R. Millán Núñez, E. Santamaría del Ángel y A González Silvera. 2007. Productividad primaria del fitoplancton en la zona eufótica del

Sistema de la Corriente de California estimada mediante imágenes del CZCS. *Ciencias Marinas*, 33(001): 59-72 p.

Behrenfeld, M., y P. Falkowski. 1997a. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnol. Oceanogr.*, 42, 1-20 p.

Behrenfeld, M., y P. Falkowski. 1997b. A consumer's guide phytoplankton primary productivity models. *Limnol. Oceanogr.*, 42, 1479-1491p.

Bograd, S. J., T. K. Chereskin y D. Roemmich. 2001. Transport of mass, heat, salt and nutrients in the southern California Current System: Annual cycles and interannual variability. *J. Geophys. Res.*, 106: 9255-9275 p.

Bograd, S.J. and Lynn, R.J. 2003. Anomalous subarctic influence in the southern California Current during 2002. *Geophys. Res. Lett.*, 30, 8020, doi: 10.1029/2003GL017446.

Cavazos-Guerra Carolina C. 2003. Análisis del desplazamiento de los eventos El Niño (1982-1984) y (1997-1998) en el Pacífico Mexicano mediante imágenes de satélite. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Baja California, FACIMAR. 101 pp.

Cepeda Morales, J. C. 2004. Aplicación de un modelo para estimar la producción primaria por sensores remotos en la región sur de la Corriente de California: Evaluación y consideraciones. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Baja California, FACIMAR. 85 pp.

Cervantes-Duarte, R., J. L. Mueller, C. C. Trees, H. Maske, S. Alvarez-Borrego y R. Lara-Lara. 2000. "Profundidad de la zona eufótica, atenuación de la irradiancia y K₄₉₀ de sensores remotos en las provincias bio-ópticas del Golfo de California". *Ciencias Marinas*. 26: 533-560 p.

Cervantes-Duarte, R., S. Aguíñiga-García y S. Hernández-Trujillo. 1993. "Condiciones de surgencia asociadas a la distribución de zooplancton en San Hipólito, B. C. S." *Ciencias Marinas*. 19: 117-135 p.

Chávez, F. P., J. T. Pennington, C. G. Castro, J. P. Ryan, R. P. Michisaki, B. Schlining, P. Walz, K. R. Buck, A. McPhaden y C. A. Collins. 2002. "Biological and chemical consequences of the 1997-1998 El Niño in central California waters". *Progr. Oceanogr.* 54: 205-232 p.

Chávez, F. P., J. T. Pennington, C. G. Castro, J. P. Ryan, R. P. Michisaki, B. Schlining, P. Walz, K. R. Buck, A. McPhaden y C. A. Collins. 2002. "Biological and chemical consequences of the 1997-1998 El Niño in central California waters". *Progr. Oceanogr.* 54: 205-232 p.

Chen-Tung, A.C., 2003. New vs. export production on the continental shelf. *Deep-Sea Res.* 1150: 1327–1333 p.

Collins, C. A., C. G. Castro, H. Asanuma, T. A. Rago, S.-K. Han, R. Durazo y F. P. Chávez. 2002. "Changes in the hydrography of Central California waters associated with the 1997-98 El Niño". *Progr. Oceanogr.* 54: 129-147 p.

Day J. W., C. A. Hall, W. M. Kemp y A. Yañez-Arancibia. 1989. *Estuarine Ecology*. John Wiley and Sons, Inc., USA. 558 p.

De la Cruz Orozco, M.E., G Gaxiola-Castro, J. García-Córdova, G. Friederich, F. Chavez y J. Gómez-Valdés. 2007. Presión parcial del Bióxido de Carbono ($p\text{CO}_2$) frente a Baja California. En: *Carbono en ecosistemas acuáticos de México*. Hernández-de-la-Torre, B. y Gaxiola-Castro G. (eds), SEMARNAT, INE, CICESE. cap. 27: 397-410 p.

Di Lorenzo E., Schneider N. Cobb KM, Chhak, K, SPJ francos, Miller AJ, JC McWilliams, SJ Bograd, H Arango, E. Curchister, TM Powell y Rivere P., 2008. North Pacific Gyre Oscillation links ocean climate and ecosystem change. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L08607, doi:10.1029/2007GL032838.

Dugdale, R. C. y J.J. Goering. 1967. "Uptake of new and regenerated forms of nitrogen in primary productivity". *Limnol. Oceanogr.* 12: 196-206 p.

Dupouy, C. 1992. Discoloured waters in the Melanesian archipelago (New Caledonia and Vanuatu). The value of the Nimbus-7 Coastal Zone Colour Scanner observations, in *Marine Pelagic Cyanobacteria: Trichodesmium and Other*

Diazotrophs, edited by E. J. Carpenter, D. G. Capone and J. Rueter, Kluwer Academic Publishers, 177-191 p.

Durazo R, Ramírez-Manguilar AM, Miranda LE, Soto-Mardones LA. 2010. Climatología de variables hidrográficas en la Corriente de California frente a Baja California. En: Gaxiola-Castro G, Durazo R (eds.), *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California, 1997–2007: Diez años de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California*. Pp. 25-57.

Durazo R., G. Gaxiola-Castro, B. Lavaniegos, R. Castro-Valdés, J. Gómez-Valdés y A. Mascarenhas. 2005. Condiciones oceanográficas frente a la costa occidental de Baja California, 2002-2003: Influencia de El Niño débil y del incremento de agua subártica. *Ciencias Marinas*. 31: 537-552.

Durazo, R. y Baumgartner, T. R. 2002. Evolution of oceanographic conditions off Baja California: 1997-1999. *Prog. Oceanograf.*, 54 (1-4): 7-31.

Espinosa Carreón T. L. 2005. Producción primaria en relación a procesos físicos de mesoescala en la región sur de la Corriente de California. Tesis de Doctorado. CECESSE Ensenada, México. 170 p.

Espinosa-Carreón T. L., G. Gaxiola-Castro, J. M. Robles-Pacheco, S. Nájera-Martinez. 2001. Temperatura, salinidad, nutrientes y clorofila a en aguas costeras de la Ensenada del sur de California. *Ciencias Marinas*. 27(3): 397-422.

Espinosa-Carreón T.L. y J. E. Valdez-Holgín. 2007. Gulf of California interannual chlorophyll variability, *Ecología Aplicada*, 6(1,2): 83-92

Espinosa-Carreón, T. L., T. Strub., E. Beier, F. Ocampo-Torres y G. Gaxiola-Castro. 2004. Seasonal and interannual variability of satellite-derived chlorophyll pigment, surface height, and temperature of Baja California. *J. Geophys. Res.* 109, C03039. doi: 10.29/2003JC002105.

Etnoyer P., D. Canny, B. Mate B. y L. Morgan. 2004. Persistent pelagic habitat in the Baja California to Bering Sea (B2B) Ecoregion, *Oceanography*, 17, 1, 90-101

Etnoyer P., D. Canny, B. R. Mate., L. Morgan, J. G. Ortega-Ortiz y W. J. Nichols. 2006. Sea-surface temperature gradients across blue whale and sea turtle foraging trajectories off the Baja California Peninsula, México. *ELSEVIER Deep-Sea Research II* 53 (2006) 340-358.

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

Falkowski, P., R. J. Scholes, E. Boyle, J. Canadell, D. Canfield, J. Elser, N. Gruber, K. Hibbard, P. Högberg, S. Linder, F. T. Mackenzie, B. Moore III, T. Pedersen, Y. Resenthal, S. Seitzinger, V. Smetacek y W. Steffen. 2000. The global carbon cycle: A testy of our knowledge of earth as a system. *Science*, 290:291-295.

Feldman, G., Clark, D., Halpern, D. 1984. Satellite color observations of the phytoplankton distribution in the eastern equatorial Pacific during the 1982-1983 El Niño. *Science*, 226: 1069–1071.

Field, C., M. Behrenfeld, J. Raderson, y P. Falkowski. 1998. Primary Production of the Biosphere: Integrating Terrestrial and Oceanic Components. *Science*, 281: 237-240.

Fuentes-Yaco, C., J.E. Valdez-Holguín, E. Devred, T. Platt, S. Sathyendranath, J. Halfar, L. Godínez Orta, y J.M. Borges . 2007. Teledección del impacto del Huracán Ignacio (2003) en el Pacífico Oriental. Cap. 19: 279-292, In: B. Hernández de la Torre y G. Gaxiola Castro (eds.), *Carbono en Ecosistemas Acuáticos de México*, Instituto Nacional de Ecología and CICESE, México

Gaxiola-Castro G, Cepeda-Morales J, Najera-Martinez S, Espinosa-Carreón TL, De la Cruz-Orozco ME, Sosa-Avalos R, Aguirre-Hernández E, Cantu-Ontiveros JP. 2010. Biomasa y producción del fitoplancton. En: Gaxiola-Castro G, Durazo R (eds.), *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California, 1977–2007: Diez años de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California*. Pp. 59-85.

Gaxiola-Castro G., R. Durazo, B. Lavaniegos, M. E. de la Cruz-Orozco, E. Millán-Núñez, L. Soto-Mardones y J. Cepeda-Morales. 2008. Respuesta del ecosistema

pelágico a la variabilidad interanual del océano frente a Baja California. *Ciencias Marinas*. 34(2): 263-270.

Gaxiola-Castro, G., S. Álvarez-Borrego, S. Nájera-Martínez, y A. Zirino. 2002. Efecto del las ondas internas en el fitoplancton del Golfo de California. *Cien. Mar.*, 28(3), 297-309.

Gaxiola-Castro, G., S. Álvarez-Borrego, S. Nájera-Martínez, y A. Zirino. 2002. Efecto del las ondas internas en el fitoplancton del Golfo de California. *Cien. Mar.*, 28(3), 297-309.

Gershunov, A. and T.P. Barnett. 1998. Interdecadal modulation of ENSO teleconnections. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(12): 2715-2725.

Gómez-Valdés, J. 1984. "Estructura hidrográfica promedio frente a Baja California". *Ciencias Marinas*. 9(2): 75-86 p.

González-Ruelas M. E. 2000. Estructura termohalina de las aguas, corrientes y ondas internas en la costa occidental de México. Tesis de doctorado. Universidad de Colima. 142 pp

González-Morales A., G. Gaxiola-Castro y R. Lara-Lara. 1993. Daily Photosynthesis Parameters y Biomass from size-Fractionated Phytoplankton off Baja California. *Est. Coast. Shelf Scie.*, 36, 147-158.

Hayward, T. L., T. R. Baumgartner, D. M. Checkley, R. Durazo, G. Gaxiola-Castro, K. D. Hyrenbach, A. W. Mantyla, M. M. Mullin, T. Murphree, F. B. Schwing, P. E. Smith y M. Tegner. 1999. "The State of the California Current, 1998-1999: transition to cool-water conditions". *CalCOFI. Rep.* 40: 29-62 p.

Hernández-de la Torre, B., G. Gaxiola-Castro y S. Nájera-Martínez. 2004. Efectos del ENSO en la producción primaria frente a Baja California. *Ciencias Marinas*. 30: 427-441.

Hickey, B.M. 1979. The California Current System-hypothesis and facts. *Progress in Oceanography* 8:191-279.

Hutchins, D. A., y K. W. Bruland. 1998. Fe-limited diatom growth and Si :N uptake ratios in a coastal upwelling regime. *Nature* 393: 561–564.

Jerónimo-Moreno, G. 2007. Variabilidad termohalina de la capa superior del océano en la región sur de la Corriente de California. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Tesis doctoral

Kahru, M. y G. Mitchell. 2000. “Influence of 1997-1998 El Niño on the surface chlorophyll in the California Current”. *Geophys. Res. Lett.* 27: 2937-2940 p.

Kahru, M., and B. G. Mitchell. 2008. Ocean color reveals increased blooms in various parts of the World, *Eos Trans. AGU*, 89(18), 170, doi:10.1029/2008EO180002.

Kahru, M., Marinone, S.G., Lluch-Cota, S.E., Pares-Sierra, A., Mitchell, G., 2004. Ocean color variability in the Gulf of California: scales from the El Niño–La Niña cycle to tides. *Deep Sea Research II* 51, 139–146.

Kahru, M., R. Kudela, M. Manzano-Sarabia, and B. G. Mitchell. 2009. Trends in primary production in the California Current detected with satellite data. *Journal of geophysical research*, vol. 114, c02004, doi:10.1029/2008jc004979.

Kiefer, D. A., and J. N. Kremer. 1981. Origins of the vertical patterns of phytoplankton and nutrients in the temperate, open ocean: A stratigraphic hypothesis, *Deep Sea Res.*, 28, 1087– 1105.

Krik, J. 1994. *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*. Cambridge Univ. Press, **Cambridge**, país 509 p.

Lynn, R. J. y J. J. Simpson. 1987. The California Current System: the seasonal variability of physical characteristics. *J. Geophys. Res.* 92: 12947-12966 p.

Maher, B. A. y P. F. Dennis. 2001. Evidence against dust-mediated control of glacial- interglacial changes in atmospheric CO₂. *Nature* 411(6834): **176-80**.

Mann, K. H. y Lazier, J.R.N. 1991. *Dynamics of Marine Ecosystems, Biological-Physical Interactions in the Oceans*. Blackwell Scient. Pub., Boston, 466 pp.

Mantua, N.J. 2000. PDO Index. <http://jisao.washington.edu/pdo/>. Accessed 5 December 2003.

Mantua, N.J. 2001. The Pacific Decadal Oscillation. *In: Encyclopedia of Global Environmental Change*, John Wiley & Sons, Inc.

Mascarenhas A., Castro R., Collins, C., R. Durazo, 2004. Seasonal variation of geostrophic velocity and heat flux at the entrance to the Gulf of California. *J. Geophysical Res.*, 109(7).

McClain, E., Pichel, W., y Walton, C. 1985. Comparative Performance of AVHRR-Based Multichannel Sea Surface Temperatures, *J. Geophysical. Res.* 90, 11587-11601.

McClatchie, S. (ed.) 2009. Report on the NMFS California Current Ecosystem Survey (CCES) (April and July–August 2008). U.S. Dep. Commer., NOAA Tech. Memo. NOAA-TM-NMFS-SWFSC-438, 98 pp. <http://swfsc.noaa.gov/publications/tm>.

McPhaden, M. J. 1999. “Genesis and evolution of the 1997-1998 El Niño”. *Science*. 283: 950-954 p.

McPhaden, M.J. (2004). Evolution of the 2002–2003 El Niño. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 85, 677, doi:10.1175/BAMS-85-5-677.

Millán-Núñez R, Álvarez-Borrego S, Trees CC. 1997. Modeling the vertical distribution of chlorophyll in the California Current System. *J. Geophysical, Res.* 102: 8587-8595.

Munk, P, P.O. Larsson, D. Danielsen, E. Moksness. 1995. Larval and small juvenile cod *Gadus morhua* concentrated in the highly productive areas of a shelf break front. *Marine ecology progress series*, 125 (1-3): 21-30.

Null, J. 2002. El Niño has a weather-making partner: Pacific Decadal Oscillation. *In: San Jose Mercury News (17 January 2002)*.

O'Reilly, J.E., y 24 Coauthors, 2000: SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3. *NASA Tech. Memo. 2000-206892, Vol. 11*, S.B. Hooker and E.R. Firestone, Eds., NASA Goddard Space Flight Center, 49 pp

Owen, R.W. 1980. "Eddies of the California Current System: physical and ecological characteristics". En: D. Power (ed). "The California Island: Proceedings of a multi-disciplinary symposium". Santa Barbara Museum of Natural History, **237-263**

Parés-Sierra, A., M. López y E. Pavía. 1997. "Oceanografía Física del Océano Pacífico Nororiental". En: M. Lavín (ed). "Contribuciones a la Oceanografía Física en México" Monografía 3, Unión Geofísica Mexicana. 1-24 p.

Pavlova, Y. V. 1966. Seasonal variations of the California Current. *Oceanology*. 6: **806-814**.

Platt, T., S. Sathyendranath, O. Ulloa, W. Harrison, N. Hoepffner y J. Goes. 1992. Nutrient control of phytoplankton photosynthesis in the Western North Atlantic. *Nature*, 356, 229-231.

Rasmusson, E.M., X. Wang y Ch.F. Ropelewski. 1990. The biennial component of ENSO variability. *J. Mar. Syst.*, 1: 71-96.

Reid, J. L., I.G. Roden y J.G. Wyllie. 1958. "Studies of the California Current System". Progress Report, CalCOFI, 1 July 1956-1 January 1958, La Jolla, CA. 28-56 p

Riley, J. P. y R. Chester. 1989. Introducción a la química marina. AGT Editor, S. A., México. 459 pp.

Roden, I. 1971. Aspect of transition zone in the Northeastern Pacific. *J. Geophys. Res.*, 5:**3462-3475**.

Roughgarden, J., S. Gaines and H. Possingham. 1988. Recruitment dynamics in complex life cycles. *Science*, 242 (4872): 1460-1466.

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

Schwing, F. B., S. J. Bograd, C. A. Collins, G. Gaxiola-Castro, J. García, R. Goericke, J. Gómez-Valdés, A. Huyer, K. D. Hyrenbach, P. M. Kosro, B. E. Lavaniegos, R. J. Lynn, A. W. Mantyla, M. D. Ohman, W. T. Peterson, R. L. Smith, W. J. Sydeman, E. Venrick y P. A. Wheeler. 2002. "The state of the California Current, 2001-2002: will the California Current keep its cool, or is El Niño Looming. *CalCOFI Rep.* 43: 31-73 p.

Silveira Mascarenhas, A. Jr. 1998. *Procesamiento y Análisis de Datos Oceanográficos*. Universidad Autónoma de Baja California, México. 274 pp

Slegenthaler, U. y L. Sarmiento. 1993. Atmospheric Carbon dioxide and the ocean. *Nature.*, 365: 119125.

Smayda, T. J. 1990. Novel and nuisance phytoplankton blooms in the sea: Evidence for a global epidemic. In: E. Granéli, B. Sundström, L. Edler and D.M. Anderson [eds.] *Toxic marine phytoplankton*. Proc. 4th. Int. Conf. Elsevier. 29-40 pp

Soto-Mardones L., Marinone S. G., Parés-Sierra A. 1999. Variabilidad espaciotemporal de la temperatura superficial del mar en el Golfo de California. *Ciencias Marinas*. 25 (1): 1-30

Strub, P. T. y C. James. 2000. "Altimeter-derived variability of surface velocities in the California Current System, 2. Seasonal circulation and eddy statistics". *Deep-Sea Res. II*. 47: 831-870 p.

Strub, P. T. y C. James. 2002. "The 1997-1998 Oceanic El Niño signal along the Southeast and Northeast Pacific Boundaries – An altimetric view". *Progr. Oceanogr.* 54: 439-458 p.

Subramaniam, A., C. W. Brown, R. R. Hood, E. J. Carpenter, and D. G. Capone. 2002. Detecting *Trichodesmium* blooms in SeaWiFS imagery, *Deep Sea Res., Part II*, 49(1 –3), 107–121.

Sverdrup, H. U., M. W. Johnson y R. H. Fleming. 1942. The Oceans, their physics, chemistry and general biology. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J. 1087 pp.

Tans PP, Fung I y Takahashi T. 1990. Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget. *Science* 247;1431-39.

Thomas A. C. y P. Brickley. 2006. Satellite measurements of chlorophyll distribution during spring 2005 in the California Current. *Geophysical research letters*, vol. 33, l22s05, doi:10.1029/2006gl026588

Torres-Orozco E. 1993. Análisis volumétrico de las masas de agua del Golfo de California. Tesis de Maestría. CICESE.

Treguer, P. P. 2000. Silica control of carbon dioxide. *Nature* 406:358-359

Valdez-Diarte S. 2010. Producción primaria fitoplanctónica en la Región sur de la Corriente de California durante julio de 2008. Tesis de Licenciatura. Universidad de Occidente 66pp

Venegas R., P.T. Strub, E. Beier, R.M. Letelier, A.C. Thomas, T. Cowles, C. James, L. Soto-Mardones y C. Cabrera. 2008. Satellite-derived variability in chlorophyll, wind stress, sea surface height, and temperature in the northern California Current System. *J. Geophysical. Res.* 113, C03015, doi:10.1029/2007JC004481.

Venrick, E. L., S. J. Bograd, D. Checkley, R. Durazo, G. Gaxiola-Castro, J. Hunter, A. Huyer, K. D. Hyrenbach, B. E. Lavaniegos, A. Mantyla, F. B. Schwing, R. L. Smith, W. J. Sydeman y P. A. Wheeler. 2003. "The state of the California Current, 2002-2003: Tropical and Subarctic influences vie for dominance". *CalCOFI. Rep.* 44: 28-62pp

Westberry T. K y Siegel D. A. 2006. Spatial and temporal distribution of *Trichodesmium* blooms in the world's oceans. *Global biogeochemical cycles*, Vol. 20, GB4016, doi:10.1029/2005GB002673, 2006

Witzleb W. R. 2001. Phytoplankton Productivity along CalCOFI Line 67. *Operational Oceanography* OC3570. 16 pp

Wooster, W. S. y J. L. Reid, Jr. 1963. Eastern boundary currents, p. 253-280. En: The Sea, Vol. II. (M. N. Hill, Ed.). Interscience. Publ., New York. 554 pp.

Wyrski, K. 1965. Surface currents of Eastern Tropical Pacific Ocean. Inter-Am. Trop. Tuna Comm. IX(5): 279-304.

Zaytsev, O., R. Cervantes-Duarte, O. Montante y A. Gallegos-García. 2003. "Coastal upwelling activity on the Pacific shelf of the Baja California Peninsula". J. Oceanogr. 59: 489-502 p.

Zuria Jordan, I. L., S. Álvarez-Borrego, E. Santamaría del Ángel y F. E. Muller K. 1995. Estimación de biomasa fitoplanctónica, derivada de datos de satélite, frente a Baja California Sur. Ciencias Marinas. 21(003): 265-280