

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA  
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLOGICAS

“ANÁLISIS DEL DESPLAZAMIENTO DE LOS EVENTOS EL NIÑO  
(1982-1984) Y (1997-1998) EN EL PACIFICO MEXICANO MEDIANTE  
IMÁGENES DE SATÉLITE”

T E S I S

Que para obtener el grado de:

**Maestro en Ciencias en Oceanografía Costera**

Presenta:

**Oc. Carolina del Carmen Cavazos Guerra**

Ensenada, B.C., Septiembre de 2003

**“Análisis del desplazamiento de los eventos El Niño (1982-1984)  
y (1997-1998) en el Pacífico Mexicano mediante imágenes de  
satélite”**

**T E S I S**

Que para obtener el grado de:

**Maestro en Ciencias en Oceanografía Costera**

Presenta:

**Oc. Carolina del Carmen Cavazos Guerra**

Aprobada por:

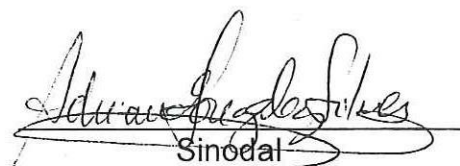


Presidente del Jurado  
Dr. Roberto Millán Núñez



---

Sinodal  
Dr. Eduardo Santamaría del Ángel



---

Sinodal  
Dra. Adriana González Silvera

## **RESUMEN**

Se obtuvieron imágenes del color del océano, en composiciones mensuales, de los sensores CZCS (Noviembre 1978 a Junio 1986), OCTS (Diciembre 1996 a Junio 1997) y SeaWiFS (Septiembre de 1997 a Diciembre del 2002) para el área comprendida entre los 10°- 32° N y de la costa hasta -118° W. El objetivo del trabajo fue analizar el desplazamiento de la onda cálida provocada por el ENSO, y sus consecuencias en los productores primarios para aguas del Pacífico Mexicano. También se utilizaron imágenes de la temperatura superficial del mar (AVHRR) para el mismo periodo que los sensores anteriores. Usando una regionalización previa del área, se bloquearon 305 estaciones por imagen. Con la finalidad de obtener la representatividad de la región por mes, se obtuvo la mejor combinación numérica de las estaciones por región mediante un Análisis de Funciones Empíricas Ortogonales (FEOS). Se calcularon las series de tiempo de las anomalías con base en los primeros FEOS por región por mes. Para calcular el tiempo de desplazamiento de la onda cálida, se implementó un análisis de correlación cruzada, donde se compararon las series de tiempo del Índice de Oscilación del Sur con las del FEO de cada grupo. Se observan anomalías negativas en la concentración de pigmentos más pronunciadas durante El Niño 1983-1984 en toda el área de estudio. Además, se observa un desplazamiento más rápido de la onda cálida y una recuperación en el sistema más rápida que durante El Niño 1997-1998. El grado de impacto de la onda cálida presenta diferencias entre regiones costeras con respecto a las regiones oceánicas. Las zonas caracterizadas por surgencias costeras sufren un retardo mayor en la señal de la presencia de un evento ENSO, presentando decaimiento en las concentraciones de pigmentos y clorofilas, meses después de que se observa en zonas más oligotróficas.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al programa de Maestría en Oceanografía Costera de la Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de California, por los conocimientos adquiridos en los dos años que me acogió y que me abrió las puertas hacia un mejor entendimiento de lo que es ser un Oceanólogo, y aumentar mi amor hacia esta Ciencia que es mi vida.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haberme brindado la oportunidad de continuar mis estudios de posgrado gracias a la beca de maestría otorgada.

Al comité de Tesis conformado por el Dr. Roberto Millán quien fungió como director de la presente, y a mis sinodales Dr. Eduardo Santamaría del Ángel y la Dra. Adriana González Silvera, por las revisiones, comentarios y sugerencias en la elaboración de este trabajo.

A Mati Kahru del Laboratorio de Sensores Remotos del SCRIPPS Institution UCSD (California, USA), por proporcionar las imágenes a 9 Km del *Coastal Zone Color Scanner* (CZCS) utilizadas en el presente trabajo.

Al C. Dr. Luis Soto Mardones, por su contribución, consejos, acertadas críticas, enseñanzas y sobre todo por su inigualable amistad.

A mis compañeras y grandes amigas del clan de chicas súper poderosas del posgrado: Alejandrina Jiménez Mercado, Ana María Ramírez Manguilar, Verónica Vizcaíno Ochoa, Tania Camiro Vargas y Nancy Pérez Morga con quienes compartí grandes momentos dentro y fuera del aula de clases. No quiero dejar de mencionar a los hombres de la generación, amigos y compañeros: Jushiro Zepeda Morales y Guillermo Horta Puga.

## **DEDICATORIA**

***A Mis Padres:***

***Eusebio Cavazos Liñán Y Cecilia Guerra Magaña***

## INDICE

<b>1.- INTRODUCCION .....</b>	<b>1</b>
<b>2.- OBJETIVOS.....</b>	<b>9</b>
<b>3.- ÁREA DE ESTUDIO .....</b>	<b>10</b>
<b>4.- METODOLOGÍA.....</b>	<b>13</b>
4.1 Origen de los datos .....	13
4.2 Agrupamiento de datos.....	16
4.3 Funciones Empíricas Ortogonales (FEO's) .....	19
4.4 Diagramas de Hovmoller.....	20
4.5 Correlación Cruzada.....	20
<b>5.- RESULTADOS .....</b>	<b>22</b>
5.1 Índice de la Oscilación del Sur (IOS).....	22
5.2 Descriptores Estadísticos.....	24
5.2.1 Temperatura Superficial del Mar.....	24
5.2.2 Concentración de Pigmentos/Clorofila-a .....	27
5.3 Series de Tiempo .....	32
5.3.1 Temperatura Superficial del Mar.....	32
5.3.2 Anomalías de Temperatura Superficial del Mar.....	37
5.3.3 Concentración de pigmentos ( $\text{mg m}^{-3}$ ) del CZCS (1979-1986).....	41
5.3.4 Anomalías de pigmentos ( $\text{mg m}^{-3}$ ) del CZCS (1979-1986).....	46
5.3.5 Concentración de Clorofila a ( $\text{mg m}^{-3}$ ) de OCTS-SeaWiFS (1996-2002) ...	51
5.3.6 Anomalías de Clorofila a ( $\text{mg m}^{-3}$ ) OCTS-SeaWiFS (1996-2002).....	56
5.4 Diagramas Hovmoller .....	61
5.4.1 Temperatura Superficial (AVHRR).....	61
5.4.2 Pigmentos (CZCS) y Clorofila a (OCTS-SeaWiFS).....	63
5.5 Funciones Empíricas Ortogonales (FEO's) Globales. ....	64
5.5.1 Temperatura (AVHRR).....	64
5.5.2 Pigmentos (CZCS) y Clorofila a (OCTS-SeaWiFS).....	64
5.6 Funciones Empíricas Ortogonales (FEO's) por Regiones.....	67
5.6.1 Temperatura (AVHRR).....	67
5.6.2 Pigmentos (CZCS) y Clorofila a (OCTS-SeaWiFS).....	67
5.7 Correlación Cruzada.....	71
5.7.1 Temperatura (AVHRR).....	71
5.7.2 Pigmentos (CZCS) .....	73
5.7.3 Clorofila a (OCTS-SeaWiFS).....	73
<b>6.- DISCUSIONES .....</b>	<b>76</b>
<b>7.- CONCLUSIONES .....</b>	<b>88</b>
<b>8.- REFERENCIAS .....</b>	<b>90</b>

## INDICE DE FIGURAS

✦	Figura 1. Patrón de circulación océano-atmósfera en el Océano Pacífico Ecuatorial. a) Condiciones normales, b) Condiciones ENSO, c) Condiciones de la Niña. (Fuente: NOAA, PMEL. <a href="http://www.pmel.noaa.gov">www.pmel.noaa.gov</a> ).....	2
✦	Figura 2. Transecto utilizado para calcular el IOS; a) Tahití (18°S, 150°W), b) Darwin (10°S, 130°E).....	5
✦	Figura 3. Área de estudio, Pacífico Mexicano. Los puntos indican las estaciones trazadas de las cuales fueron tomadas series de tiempo de las imágenes de satélite.....	12
✦	Figura 4. Estaciones ordenadas a partir de la regionalización de Alarcón (2003). a) División por Dominios b) Subdivisión de Dominios en Provincias.....	17
✦	Figura 5. Estaciones ordenadas en 20 regiones de acuerdo a la regionalización de Alarcón (2003).....	18
✦	Figura 6. Descriptores estadísticos por regiones de TSM de AVHRR (1982-2002).....	25
✦	Figura 7. Distribución espacial mensual de TSM de AVHRR (1982-2002).....	26
✦	Figura 8. Descriptores estadísticos de las concentraciones de pigmentos ( $\text{mg m}^{-3}$ ) de la base de datos del CZCS de 1979 a 1986.....	29
✦	Figura 9. Descriptores estadísticos de las concentraciones de clorofila a ( $\text{mg m}^{-3}$ ) obtenidos de las imágenes del OCTS-SeaWiFS de 1996-2002.....	29
✦	Figura 10. Distribución espacial mensual de pigmentos del CZCS (1979-1986).....	30
✦	Figura 11. Distribución espacial mensual de clorofila a del OCTS-SeaWiFS (1996-2002).....	31
✦	Figura 12. Serie de tiempo de TSM obtenida del AVHRR (1982-2002) en el Dominio de la Corriente de California; a) Provincia de Baja California (PBC) y b) Provincia de Baja California Sur (PBS).....	34
✦	Figura 13. Serie de tiempo de TSM obtenida del AVHRR (1982-2002) en el Dominio Tropical; a) Provincia Intertropical (PI), b) Provincia de la Boca del Golfo de California (PBGC) y c) Provincia Tropical Oceánica (PTO).....	35
✦	Figura 14. Serie de tiempo de TSM obtenida del AVHRR (1982-2002) en el Dominio Costero; a) Provincia Costera de Baja California (PCBC), b) Provincia Tropical Costera (PTC) y c) Provincia Centroamericana (PC).....	36
✦	Figura 15. Serie de tiempo de anomalías de TSM obtenida del AVHRR (1982-2002) en el Dominio de la Corriente de California; a) Provincia de Baja California (PBC) y b) Provincia de Baja California Sur (PBS).....	38
✦	Figura 16. Serie de tiempo de anomalías de la TSM obtenida del AVHRR (1982-2002) en el Dominio Tropical; a) Provincia Intertropical (PI), b)	

Provincia de la Boca del Golfo de California (PBGC) y c) Provincia Tropical Oceánica (PTO).....	39
✦ Figura 17. Serie de tiempo de anomalías de la TSM obtenida del AVHRR (1982-2002) en el Dominio Costero; a) Provincia Costera de Baja California (PCBC), b) Provincia Tropical Costera (PTC) y c) Provincia Centroamericana (PC).....	40
✦ Figura 18. Serie de tiempo de pigmentos ( $\text{mg m}^{-3}$ ) obtenida del CZCS (1979-1986) en el Dominio de la Corriente de California; a) Provincia de Baja California (PBC) y b) Provincia de Baja California Sur (PBS).....	43
✦ Figura 19. Serie de tiempo de pigmentos ( $\text{mg m}^{-3}$ ) obtenida del CZCS (1979-1986) en el Dominio Tropical; a) Provincia Intertropical (PI), b) Provincia de la Boca del Golfo de California (PBGC) y c) Provincia Tropical Oceánica (PTO).....	44
✦ Figura 20. Serie de tiempo de pigmentos ( $\text{mg m}^{-3}$ ) obtenida del CZCS (1979-1986) en el Dominio Costero; a) Provincia Costera de Baja California (PCBC), b) Provincia Tropical Costera (PTC) y c) Provincia Centroamericana (PC).....	45
✦ Figura 21. Serie de tiempo de anomalías de pigmentos obtenidos del CZCS (1979-1986) en el Dominio de la Corriente de California; a) Provincia de Baja California (PBC) y b) Provincia de Baja California Sur (PBS).....	48
✦ Figura 22. Serie de tiempo de anomalías de pigmentos del CZCS (1979-1986) en el Dominio Tropical; a) Provincia Intertropical (PI), b) Provincia de la Boca del Golfo de California (PBGC) y c) Provincia Tropical Oceánica (PTO).....	49
✦ Figura 23. Serie de tiempo de anomalías de pigmentos obtenidos del CZCS (1979-1986) en el Dominio Costero; a) Provincia Costera de Baja California (PCBC), b) Provincia Tropical Costera (PTC) y c) Provincia Centroamericana (PC).....	50
✦ Figura 24. Serie de tiempo de clorofila a ( $\text{mg m}^{-3}$ ) del OCTS-SeaWiFS (1996-2002) en el Dominio de la Corriente de California; a) Provincia de Baja California (PBC) y b) Provincia de Baja California Sur (PBS).....	53
✦ Figura 25. Serie de tiempo de clorofila a ( $\text{mg m}^{-3}$ ) del OCTS-SeaWiFS (1996-2002) en el Dominio Tropical; a) Provincia Intertropical (PI), b) Provincia de la Boca del Golfo de California (PBGC) y c) Provincia Tropical Oceánica (PTO).....	54
✦ Figura 26. Serie de tiempo de clorofila a ( $\text{mg m}^{-3}$ ) del OCTS- SeaWiFS de (1996-2002) en el Dominio Costero; a) Provincia Costera de Baja California (PCBC), b) Provincia Tropical Costera (PTC) y c) Provincia Centroamericana (PC).....	55
✦ Figura 27. Serie de tiempo de anomalías de clorofila a del OCTS- SeaWiFS (1996-2002) en el Dominio de la Corriente de California; a) Provincia de Baja California (PBC) y b) Provincia de Baja California Sur (PBS).....	58
✦ Figura 28. Serie de tiempo de anomalías de clorofila a del OCTS-SeaWiFS (1996-2002) en el Dominio Tropical; a) Provincia Intertropical (PI), b) Provincia de la Boca del Golfo de California (PBGC) y c) Provincia Tropical Oceánica (PTO).....	59

✦	Figura 29. Serie de tiempo de valores estandarizados de clorofila a del OCTS-SeaWiFS (1996-2002) en el Dominio Costero; a) Provincia Costera de Baja California (PCBC), b) Provincia Tropical Costera (PTC) y c) Provincia Centroamericana (PC).....	60
✦	Figura 30. Diagramas de Hovmoller; a) anomalías de TSM (1983 a 2002), b) anomalías de pigmentos del CZCS (1979-1986) y c) anomalías de clorofila a del OCTS-SeaWiFS (1996-2002) a lo largo de todo el borde continental mexicano. Las flechas sólidas indican la presencia de un ENSO, las flechas punteadas indican la presencia de La Niña.....	62
✦	Figura 31. Primer FEO o modo de la serie de tiempo de TSM (AVHRR); a) Estructura espacial y b) Estructura temporal.....	66
✦	Figura 32. Primer FEO de la serie de tiempo de pigmentos (CZCS); a1) Arreglo espacial, b1) Arreglo temporal; y Primer FEO de la serie de tiempo de Clorofila a (OCTS-SeaWiFS); a2) Arreglo espacial, b2) Arreglo temporal.....	66
✦	Figura 33. Primer modo o FEO por regiones de anomalías de TSM (AVHRR) .....	68
✦	Figura 34. Primer modo o FEO por regiones de anomalías de pigmentos del CZCS.....	69
✦	Figura 35. Primer modo o FEO por regiones de anomalías de clorofila a (OCTS-SeaWiFS).....	70
✦	Figura 36. Correlación Cruzada del primer FEO vs el IOS, de la serie de tiempo de TSM (AVHRR) de 1982-1986, el número en cada recuadro representa el lag donde se alcanza la correlación máxima. ....	72
✦	Figura 37. Correlación Cruzada del primer FEO vs el IOS, de la serie de tiempo de TSM de 1996-2002, el número en cada recuadro representa el lag donde se alcanza la correlación máxima. ....	72
✦	Figura 38. Correlación Cruzada del primer FEO de pigmentos del CZCS de 1979-1986 vs IOS, el número en cada recuadro representa el lag donde se alcanza la correlación máxima.....	75
✦	Figura 39. Correlación Cruzada del primer FEO de clorofila a del OCTS-SeaWiFS (1996-2002), vs IOS, el número en cada recuadro representa el lag donde se alcanza la correlación máxima. ....	75

**TABLA DE ABREVIACIONES**

<b>ENSO</b>	El Niño Southern Oscillation (El Niño Oscilación del Sur)
<b>IOS:</b>	Índice de Oscilación del Sur
<b>OS:</b>	Oscilación del Sur
<b>TSM:</b>	Temperatura de la superficie del mar
<b>CZCS:</b>	Coastal Zone Color Scanner
<b>SeaWiFS:</b>	Sea-viewing Wide Field-of-View Sensor
<b>OCTS:</b>	Ocean Color and Temperature Sensor
<b>AVHRR:</b>	Advanced Very High Resolution Radiometer
<b>FEO:</b>	Funciones Empíricas Ortogonales
<b>PBC:</b>	Provincia de Baja California
<b>PBS:</b>	Provincia de Baja California Sur
<b>PBGC:</b>	Provincia de la Boca del Golfo de California
<b>PI:</b>	Provincia Intertropical
<b>PTO:</b>	Provincia Tropical Oceánica
<b>PCBC:</b>	Provincia Costera de Baja California
<b>PTC:</b>	Provincia Tropical Costera
<b>PCA:</b>	Provincia Centroamericana
<b>CCCR</b>	Corriente Costera de Costa Rica
<b>SCC</b>	Sistema de la Corriente de California
<b>CNE</b>	Corriente ecuatorial del Norte

## 1.- INTRODUCCION

Debido a la rotación terrestre y al patrón de circulación océano-atmósfera, existe un afloramiento convectivo en las zonas aledañas al ecuador en el Pacífico Oriental, lo cual permite una termoclina cercana a la superficie y el constante afloramiento de agua fría y rica en nutrientes (Philander, 1990). Los vientos predominantes a lo largo de la costa son de sur a norte, con un esfuerzo sobre la superficie del mar, que produce un desplazamiento de las capas superiores hacia el oeste. Esto permite el desarrollo de organismos fitoplanctónicos, iniciadores de la cadena trófica, con la consecuente disponibilidad de alimento para los demás organismos mayores. En contraste, la zona litoral del Pacífico Occidental se caracteriza por aguas poco productivas, con temperatura superficial del mar cálida, una termoclina más profunda y condiciones atmosféricas húmedas (Fig. 1.a) (Arntz y Fahrbach, 1991).

Cuando el patrón atmosférico habitual del Pacífico Tropical se modifica, se presenta un evento El Niño-Oscilación del Sur (ENSO por sus siglas en inglés), debido a un proceso de interacción océano-atmósfera en larga escala (Trenberth, 1976). Es el mayor responsable de variabilidad climática interanual en escala global. Debido a que sus efectos impactan un amplio rango de componentes, este ha atraído la atención de muchos investigadores en el mundo (Diaz y Markgraf, 1992). El ENSO se asocia a cambios en el nivel del mar y en la presión atmosférica en el Pacífico Tropical. Se genera nubosidad y convección por una banda de agua cálida desarrollada a través del Pacífico Central al Ecuatorial Este, con presión atmosférica bajo la media en el Pacífico Este y arriba en la región Austral-Asiática (Philander, 1990). Los vientos alisos reducen su intensidad, y la masa de agua cálida se desplaza >3200 Km. hacia el Este a través del Pacífico Central (Fu *et al.*, 1986; Trenberth, 1999). La temperatura superficial del mar (TSM) en el Pacífico Ecuatorial Oriental aumenta, afectando zonas de surgencia y costas de Ecuador, Perú y Chile, de modo que las surgencias presentadas en esta zona se reducen (Enfield, 1991) (Fig. 1.b). Esto causa un decaimiento en la productividad primaria, reflejado en la disminución en las concentraciones de clorofila superficial, debido al poco aporte de nutrientes hacia la zona eufótica (Barber y Chávez, 1986; Feldman *et al.*, 1984).

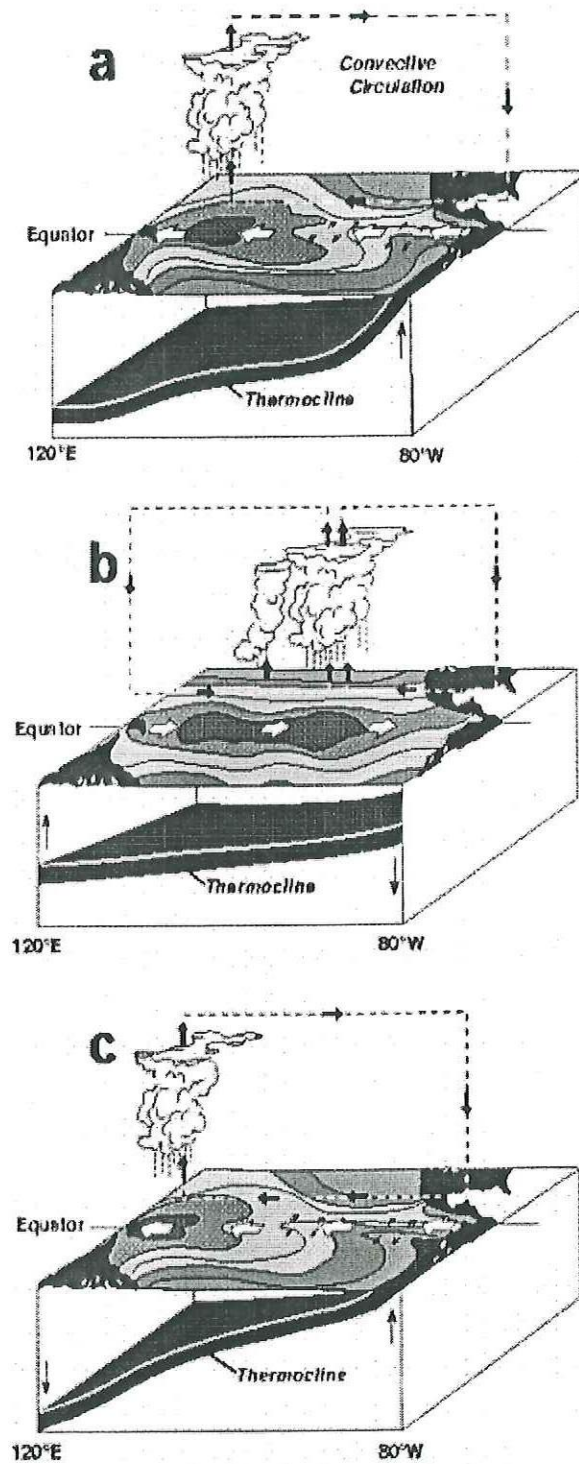


Figura 1. Patrón de circulación océano-atmósfera en el Océano Pacífico Ecuatorial. a) Condiciones normales, b) Condiciones ENSO, c) Condiciones de la Niña. (Fuente: NOAA, PMEL. [www.pmel.noaa.gov](http://www.pmel.noaa.gov))

Otra consecuencia del desplazamiento de agua cálida, es el incremento en la precipitación sobre el Pacífico Ecuatorial Oriental, debido a la gran evaporación generada a partir del calentamiento de la TSM en esta zona (Philander, 1990). A su vez, existe una disminución en la precipitación en la región del Pacífico Occidental.

La Niña o fase fría es la contraparte del ENSO, produce enfriamiento anormal en las aguas del Pacífico Oriental, con condiciones opuestas a las creadas por el ENSO; este evento es quizás, un modo de corregir el desequilibrio calorífico que provoca el ENSO (Philander, 1990; Tomczak y Godfrey, 1994) (Fig. 1c). En este periodo, los vientos alisios son más fuertes que lo usual, lo cual suscita que una gran cantidad de agua superficial cálida sea conducida hacia el oeste, causando que un gran volumen de agua fría profunda ascienda a la superficie. Esta "lengua fría" se extiende 4,800 kilómetros a lo largo del ecuador, desde Ecuador a Samoa (Suplee, 1999).

Existen varios modelos numéricos que intentan explicar el origen del ENSO, pero, dada la irregularidad en que se presentan los eventos anómalos y es muy difícil de predecir. Los eventos aparecen entre dos y siete años, con duración de cada evento de doce a dieciocho meses (Wyrky, 1975, 1976; Philander, 1990). Los modelos estadísticos empleados se basan en valores medios mensuales o estacionales de variables atmosféricas y oceánicas; con el análisis de los datos de registros climáticos pasados, se determina qué tipo de condiciones son propicias para un desarrollo del evento (Suplee, 1999).

El comportamiento del ENSO se asocia con la presión sobre el nivel del mar. Walker en 1923 (Allan, 1996), estudió las oscilaciones en la presión del nivel del mar que se documentaban en los océanos Pacífico e Índico nombrándola "Oscilación del Sur" (OS). Esencialmente, el signo de la presión de la OS se observa como un vaivén u oscilación entre el Pacífico Sureste y la región indonésica-Australiana, de modo que cuando la presión se encuentra por debajo de la media en una región, esta tiende a estar por arriba en la otra, en escalas que van desde mensual a anualmente (Díaz y Kiladis, 1992). Aunque fue hasta 1966 cuando Bjerknes (1969) señaló la cercana relación entre El Niño y la Oscilación del Sur.

El Índice de la Oscilación Del Sur (IOS) es una medida de las fluctuaciones de gran potencia en la presión atmosférica que ocurre entre el Pacífico Tropical Occidental y Oriental, es decir, el estado de la OS. Tradicionalmente, este índice se calcula con base a las diferencias en anomalía de la presión atmosférica entre Tahití (18°S, 150°W) y Darwin (10°S, 130°E) (Fig. 2). Ambas regiones se encuentran localizadas cerca de la OS, y particularmente estas estaciones han mantenido largos periodos de registros, de modo que el IOS ha podido ser calculado desde 1882 a la fecha (Ropelewski y Jones, 1987).

Varios estudios han señalado la correlación que existe entre las observaciones del comportamiento de la TSM en el Pacífico tropical y noreste con las variaciones en la OS (Emery y Hamilton, 1985). En general, la serie de tiempo del IOS coincide inversamente con los cambios en la TSM del Océano Pacífico Tropical Oriental (Philander, 1990). La fase negativa del IOS representa la presión atmosférica por debajo de la media a Tahití y la presión atmosférica arriba de la media a Darwin (Tomczak y Godfrey, 1994). Cuando los valores de IOS son negativos, se observa aumento en la TSM en el Pacífico Tropical Oriental, indicando eventos de El Niño. Cuando los valores son positivos, se observan aguas más frías en la misma región, lo cual indica un episodio típico de La Niña (Wyrtki, 1975; Tomczak y Godfrey, 1994). Además, se ha podido correlacionar la serie de tiempo del IOS con el comportamiento de la precipitación en las costas del Pacífico Ecuatorial Este (Ropelewski y Halpert, 1987) y algunas zonas en Centroamérica (Alfaro y Cid, 1999).

La serie de tiempo de los IOS y TSM en el Pacífico Ecuatorial Oriental, indica que el ciclo de ENSO tiene un periodo de aproximadamente cuatro años, aunque en el registro histórico el periodo ha variado entre dos y siete años. En 1980's y 1990's se destaca un ciclo de ENSO muy activo, con 5 episodios de ENSO (1982-83, 1986-87, 1991-93, 1994-95, y 1997-98) y 3 episodios de La Niña (1984-85, 1988-89, 1995-96). Este periodo también ofreció dos de los más fuertes episodios de El Niño del siglo (1982-83 y 1997-98), así como dos periodos consecutivos de El Niño durante 1991-1995 sin un episodio frío intermedio (Suplee, 1999; Trenberth, 1999; McPhaden, 1999).

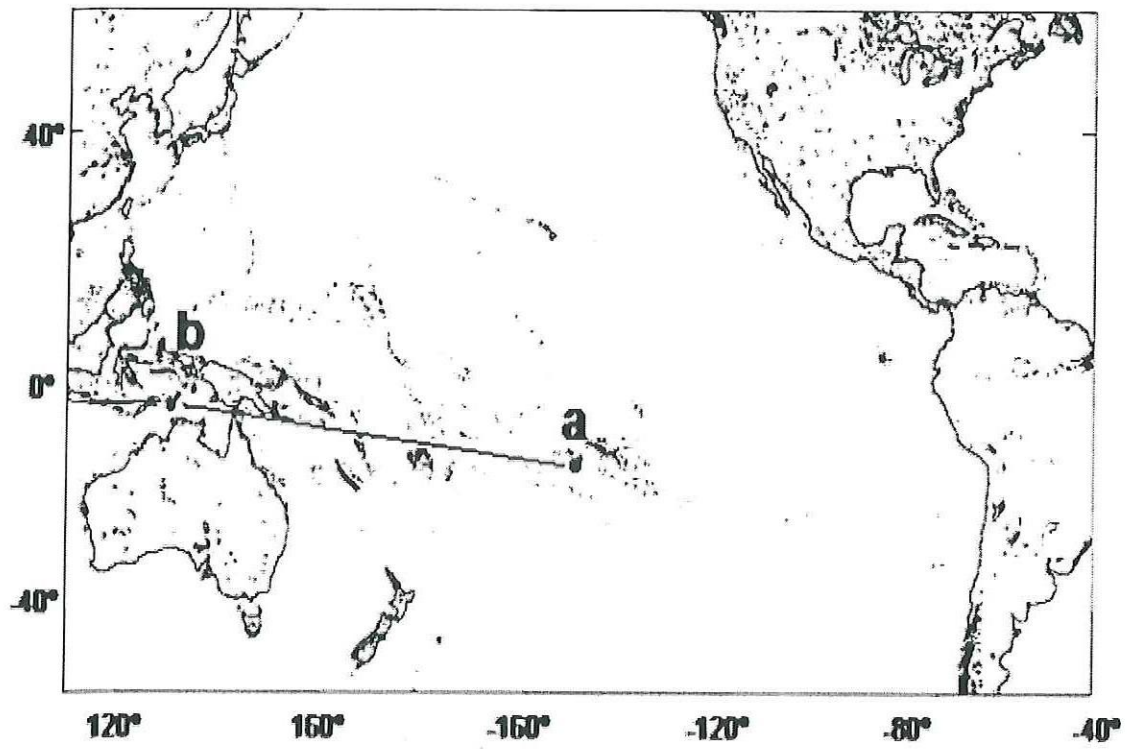


Figura 2. Transecto utilizado para calcular el IOS; a) Tahití (18°S, 150°W), b) Darwin (10°S, 130°E)

El ENSO registrado en 1982-84 es señalado por algunos autores como el más fuerte y catastrófico registrado (Diaz y Markgraf, 1992), mientras que el más reciente (1997-98), se destaca su amplio monitoreo y cobertura (McPhaden, 1999). Por tanto este último es el más ejemplificado al momento de efectuar modelos matemáticos, debido a la información presentada durante el desarrollo de este fenómeno.

Con el uso de técnicas sofisticadas de monitoreo globales de los océanos, se ha examinado con más detalle el desarrollo del ENSO, en escala temporal y espacial. Una de las herramientas de monitoreo de los océanos es el uso de sensores remotos, que aportan un enfoque más detallado del comportamiento espacio-temporal de variables oceanográficas, a partir de las propiedades bio-ópticas del agua. Nos sirven para demostrar los cambios físicos, químicos y biológicos que se presentan en la zona debido a diversas causas tanto naturales como antropogénicas (Gordon, *et al.*, 1983; Sathyenranath *et al.*, 1994; Platt *et al.*, 1995 y Longhurst *et al.*, 1995).

El color del océano es una propiedad bio-óptica del agua, bajo la influencia de ciertos parámetros que van desde el forzamiento solar, hasta las variaciones en espacio y tiempo de procesos biológicos (Bardey *et al.*, 1999). Esta propiedad ha permitido el uso de radiómetros que determinan la distribución de la radiancia en el espectro visible. Los radiómetros espectrales desarrollados y puestos en satélites miden la radiancia ascendente desde la superficie terrestre en un mapa bidimensional (Kirk, 1994). Los datos de TSM y color del océano pueden ser utilizados para la proyección de fenómenos de mesoescala en espacio y tiempo, ya que las estructuras observadas pueden ser comparadas en términos de asociación (Bardey *et al.*, 1999).

Una de estas herramientas más utilizadas actualmente es el *Advanced Very High Radiometer Resolution (AVHRR)*, a bordo de los satélites NOAA -7, -9, -11, el cual inició sus operaciones a partir de noviembre de 1981. Este radiómetro de cuatro o cinco canales mide la radiación emitida y reflejada en el visible, infrarrojo cercano y las regiones infrarrojas termales del espectro electromagnético. Es capaz de proporcionar información de la radiación de superficie global de día y noche en tiempo real, la cual es transformada en unidades de temperatura (McClain, 1985).

En octubre de 1978 fue puesto en órbita el satélite Nimbus-7, transportando el sensor *Coastal Zone Color Scanner* (CZCS), diseñado para generar información de la concentración de los pigmentos fotosintéticos del océano (clorofila a + feopigmentos). Este sensor permaneció en funcionamiento hasta junio de 1986, captando imágenes globales del comportamiento espacio-temporal de los pigmentos. Durante El Niño en 1982-83, el CZCS, junto con el radiómetro de alta resolución AVHRR proporcionaron la cobertura espacio-temporal mas completa del evento (Fiedler, 1984).

Posteriormente, operó el sensor japonés *Ocean Color Temperature Sensor* (OCTS) con mediciones de concentraciones de clorofila superficial, con muy corta duración de monitoreo desde noviembre de 1996 a junio de 1997. Después fue colocado en orbita el satélite SeaStar con el sensor *Sea-viewing Wide Field of view Sensor* (SeaWiFS), que orbita desde septiembre 1997; este sensor proporciona valores de concentración de clorofila a superficial (Baith *et al.*, 2001). Al igual que el CZCS, estos sensores, junto con las mediciones de TSM a través del AVHRR fueron capaces de cubrir el comportamiento espacio-temporal de concentraciones de clorofila a durante el evento ENOS 1997-98.

La mayoría de las investigaciones efectuadas acerca del impacto de El Niño-Oscilación de Sur (ENSO) en México se han enfocado en su mayoría hacia parámetros físicos y meteorológicos, siendo los biológicos menos documentados (Lavaniegos *et al.*, 2002) Los registros *in situ* del evento ENSO en 1982-83 se centran en el área de la Corriente de California. En este periodo se registró un descenso en la productividad primaria en las zonas de surgencia, debido a una baja disponibilidad de nutrientes (Fiedler, 1984).

En el Pacífico Tropical se cuentan con datos de TSM y meteorológicos, tomados durante el evento ENSO 1982-83. Reyes y Mejía (1991) registraron aumento considerable en el número de huracanes presentados en esta zona durante el evento calido e igualmente anomalías de TSM positivas.

Gracias al desarrollo de sensores de color del océano en esas fechas, se logra registrar evidencias del evento calido y su impacto en la comunidad biológica, en este

caso en los iniciadores de la cadena trófica (fitoplancton) a través de la interpretación de los datos derivados de concentración de pigmentos fotosintéticos.

Santamaría-del-Ángel *et al.*, (1994) con la ayuda de imágenes satelitales de color del océano (*Coastal Zone Color Scanner*, CZCS), analizaron el comportamiento del fenómeno ENSO 1982-84 en el Golfo de California. Zuria-Jordan *et al.* (1995) analizaron el comportamiento espacio temporal de pigmentos con la ayuda de imágenes del CZCS y detectaron la influencia del ENSO 1982-83 en un transecto frente a las costas de Baja California Sur hasta Cabo Corrientes (Jalisco). Lluch-Cota *et al.* (1997), analizaron la variabilidad espaciotemporal de pigmentos fotosintéticos en el Golfo de Tehuantepec y áreas adyacentes con la ayuda de imágenes del CZCS, encontrando que la mayor variación interanual fue durante El Niño 1982-83. Su influencia se reflejó en muy bajas concentraciones de pigmentos asociadas con una termoclina profunda en toda el área de estudio. Además, registraron el evento La Niña en 1985 en la región oriental, con concentraciones elevadas de biomasa fitoplanctónica asociadas con una termoclina somera.

En México no existen trabajos donde se utilicen conjuntamente tres herramientas de monitoreo espacio-temporal, como son los sensores para medición de color del océano (CZCS, OCTS, SeaWiFS) y los sensores de temperatura (AVHRR) a través de las cuales fue posible registrar los eventos ENSO más fuertes del siglo pasado. En este trabajo, además de recopilar toda la información disponible de estos tres sensores durante los periodos ENSO 1982-1983 y ENSO 1997-1998, y de cubrir una amplia zona espacial que cubre todo el Pacífico Mexicano, se trata de comparar estadísticamente la diferencia entre el desplazamiento de estos dos eventos a través de aguas territoriales, tomando como punto comparativo el registro de las anomalías de la presión del aire sobre el nivel del mar (IOS) en el Pacífico Ecuatorial Oeste.

## **2.- OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

- Analizar y comparar la evolución y el desplazamiento de los eventos ENSO 1982-1984 y 1997-1998 a través del Pacífico Mexicano mediante imágenes de satélite de color (CZCS, OCTS y SeaWiFS) y de temperatura (AVHRR) del océano.

### **Objetivos Específicos**

- Estimar el comportamiento espacio-temporal del color del océano y la temperatura superficial del mar a lo largo de todo el Pacífico Mexicano, mediante series de tiempo extraídas de imágenes de satélite.
- Estimar la presencia y permanencia de El Niño, La Niña y un estado No-Niño en aguas del Pacífico Mexicano.

### **3.- ÁREA DE ESTUDIO**

El área de estudio comprende las latitudes de 11° N hasta 32° N a lo largo del Pacífico Central Oriental Mexicano, abarcando longitudinalmente desde la línea base costera hasta los 118° W (Fig. 3). Se excluye la zona del Golfo de California por ser considerado un cuerpo de agua costero con características físico-biológicas propias.

El Océano Pacífico Mexicano, se encuentra conformado principalmente por dos grandes sistemas: la región sur del Sistema de la Corriente de California (SCC), que se desplaza a lo largo de la Península de Baja California; y el Pacífico Tropical que comprende desde Cabo Corrientes hasta la frontera con Guatemala (Wyrcki, 1967).

El SCC esta constituida de aguas frías y de baja salinidad debido a su origen polar (Lynn y Simpson, 1987), caracterizada por una alta variabilidad de vientos e intensas surgencias costeras en verano. Como patrón general el agua de la Corriente de California es desviada hacia el oeste antes de los 20° N, aunque, en condiciones invernales extremas, su desplazamiento puede alcanzar latitudes más bajas (Wyrcki, 1967). Presenta un flujo superficial hacia el ecuador durante los meses de abril-septiembre, que es cuando se presentan los periodos de surgencia costera que prevalece durante primavera y verano, donde la temperatura superficial de las regiones influenciadas por la misma disminuyen a 15° C ó menos (Tomczak y Godfrey, 1994).

El Pacífico Tropical, se caracteriza por aguas con un desplazamiento hacia el polo, y con una temperatura relativamente alta en las capas superficiales y salinidades bajas, debido a que el aporte de agua por lluvia excede a la evaporación (Fiedler, 1992). Se encuentra influenciado por la Corriente Norecuatorial (CNE), que fluye hacia el oeste todo el año alrededor de los 11° N. Entre marzo y julio la corriente es abastecida por agua del SCC, el resto del año sus aguas provienen del Pacífico Oriental Tropical.

La Corriente Costera de Costa Rica (CCCR), inicia su desplazamiento en la cuenca de Panamá hacia el norte por Centro América y México, donde es conocida

como Corriente Mexicana. En junio y julio llega hasta Cabo Corrientes, alejándose durante agosto y diciembre de la línea de costa donde pasa a formar parte de la CNE. La TSM fluctúa entre 26 y 28° C. La intrusión del agua superficial Subtropical propicia cambios anuales de 5° C ó más en el área cercana a Cabo Corrientes, mientras que en el Golfo de Tehuantepec oscila entre los 3° y 4° C (Wyrki, 1965).

Dentro del sistema del Pacífico Tropical, predominan áreas de surgencias costeras muy importantes. Las surgencias presentadas en toda la costa este del Golfo de California hasta Cabo Corrientes (Roden, 1964), las cuales se generan por vientos provenientes del noroeste en invierno (diciembre a mayo). Mientras que más al sur, en el Golfo de Tehuantepec se resalta una lengua de aguas productivas, de octubre a abril, con máximo desarrollo de noviembre a enero (Lluch-Cota *et al.*, 1997). En la zona costera, entre la frontera de México con Guatemala se presentan surgencias estacionales, debido a que existen dos mecanismos que producen aguas ricas en esta zona: la surgencia costera del Golfo de Papagayo, de octubre a abril, que causa una amplia cobertura espacial de aguas productivas de febrero a abril (Lluch-Cota *et al.*, 1997); y las surgencias provocadas por la intrusión de agua proveniente del Domo de Costa Rica, provocando concentraciones altas de pigmentos en verano (Fiedler, 2002).

En septiembre, el Pacífico Tropical Mexicano se caracteriza por valores altos de TSM, extendiéndose incluso hacia el mes de octubre (Reyes y Mejía, 1991). La mayor parte de las perturbaciones tropicales en esta región, ocurren entre mayo y octubre, época en que se presenta el mayor índice de precipitaciones en esta región.

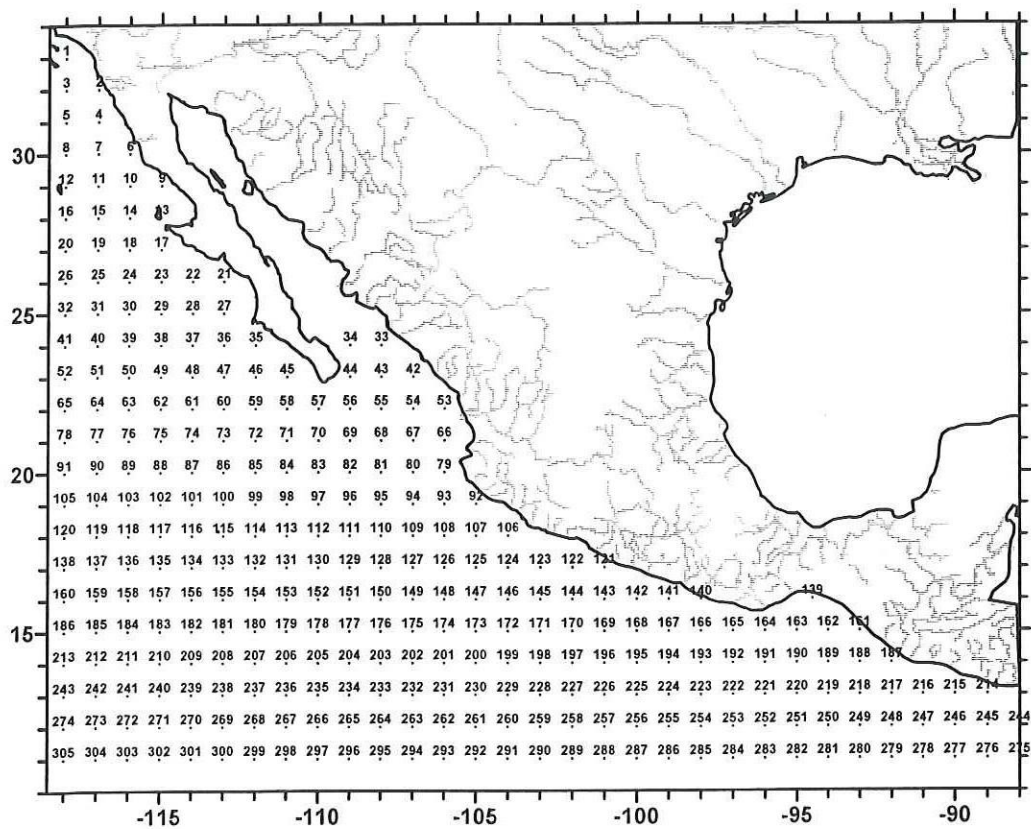


Figura 3. Área de estudio, Pacífico Mexicano. Los puntos indican las estaciones trazadas de las cuales fueron tomadas series de tiempo de las imágenes de satélite.

## **4.- METODOLOGÍA**

### **4.1 Origen de los datos**

Se utilizaron composiciones mensuales de imágenes GAC (Global Area Coverage), del *Coastal Zone Color Scanner* (CZCS a 9 Km de píxel). La concentración de pigmentos fue calculada utilizando los algoritmos bio-ópticos y correcciones atmosféricas descritas en Gordon *et al.*, (1983). Los datos fueron procesados y proporcionados por el Laboratorio de Sensores Remotos del SCRIPPS Institution UCSD (California, USA). Abarcan desde enero de 1979 a junio de 1986, periodo de operación del sensor y en el cual se logra detectar la presencia del ENSO 1982-83.

Para analizar el comportamiento del siguiente episodio de ENSO (1997-98), se utilizaron composiciones mensuales del *Ocean Color and Temperature Sensor* (OCTS a 9 Km de píxel) de noviembre de 1996 a junio 1997, e imágenes del *Sea-viewing Wide Field-of-View Sensor* (SeaWiFS a 9 Km. de píxel) del periodo desde septiembre de 1997 a diciembre de 2002. Las Imágenes base fueron generadas en IDL, correspondiendo a imágenes GAC re proyectadas en formato HDF en valores georeferenciados. Las imágenes son distribuidas por el Goddard Space Flight Center (GSFC/NASA), y las concentraciones de clorofila-a fueron calculadas a través del Reprocesamiento 4 (SeaDAS).

Se estableció una red de 305 estaciones, las cuales se encontraban equidistantes geográficamente entre sí a un grado y que equivalen a un área de 1 X 1 píxeles por locación, para de esta forma, evitar tendencias hacia una sola zona ya fuera costera u oceánica.

Se obtuvieron para cada estación series de tiempo de concentración de pigmentos ( $\text{mg m}^{-3}$ ), para el periodo que abarca de enero de 1979 a junio 1986 de la base de datos del CZCS. Otro conjunto de series de tiempo corresponde a la de concentración de clorofila-a ( $\text{mg m}^{-3}$ ) proveniente de la base de datos del OCTS y SeaWiFS para el periodo que abarca desde junio de 1996 a diciembre 2002. En los

meses de julio y agosto de 1997, no existen registros de sensores de color durante ese periodo, sin embargo estos espacios se llenaron, mediante una interpolación lineal.

Por otra parte, se obtuvieron series de tiempo de la temperatura superficial del mar (TSM) de composiciones mensuales del AVHRR MCSST, con datos promediados del *Multi-Channel Sea-Surface Temperature* (MCSST) derivados del NOAA *Advanced Very High Radiometer Resolution* (AVHRR a 9 km); que abarcaban originalmente desde el periodo de inicio de operaciones (octubre de 1981), sin embargo, solo se consideraron para el presente trabajo, datos extraídos a partir de Noviembre de 1982 hasta Diciembre del 2002, debido a las erupciones del volcán Chichonal en México en abril de 1982, lo cual obstaculizó las mediciones del MCSSTs por la densa capa de polvo volcánico distribuida en una amplia banda zonal producto de las erupciones. Este efecto fue perceptible el resto de 1982. El algoritmo del MCSST rechazó todas las medidas de día con nubes contaminadas sobre áreas tropicales y subtropicales. (McClain, 1989). Estas imágenes fueron proporcionadas por el *Jet Propulsion Laboratory* (JPL/NASA).

Las series de tiempo de TSM y pigmentos (ó clorofila-a) fueron estandarizadas en cada estación a través del tiempo, mediante una transformación z. Los datos estandarizados de esta manera serán denominados simplemente como anomalías de TSM ó pigmentos (clorofila-a):

$$Z = \frac{x - \bar{x}}{\sqrt{\frac{\sum x - \bar{x}}{n - 1}}}$$

donde:

$x - \bar{x}$  = Valor de cada observación menos la media de un conjunto de datos

$\sqrt{\frac{\sum x - \bar{x}}{n - 1}}$  = Desviación estándar de la serie de tiempo

Por otra parte, se obtuvo la serie de tiempo del Índice de Oscilación del Sur (IOS), la cual es utilizada como variable atmosférica de control, durante las mismas fechas de nuestras series de tiempo de los datos extraídos de las imágenes satelitales.

El IOS se determina por la diferencia entre las anomalías estandarizadas del valor mensual de la presión atmosférica sobre el Océano Pacífico Ecuatorial (Tahití y Darwin) y es calculada de una base de datos producida desde 1956 a la fecha, la cual fue obtenida de <http://www.cpc.ncep.noaa.gov>. Es calculada de la siguiente forma:

#### ESTANDARIZACION DE LA PRESION SOBRE NIVEL DEL MAR

$$\text{Desviación estándar Tahití} = \sqrt{\frac{\sum (\text{PNM Tahiti (Actual)} - \text{PNM Tahiti (Media)})^2}{\text{No. de Meses}}}$$

$$\text{Tahití} = \frac{(\text{Actual Tahiti (PNM)} - \text{Media Tahití (PNM)})}{\text{Desviación estándar Tahití}}$$

$$\text{Desviación estándar Darwin} = \sqrt{\frac{\sum (\text{PNM Darwin (Actual)} - \text{PNM Darwin (Media)})^2}{\text{No. de Meses}}}$$

$$\text{Darwin} = \frac{(\text{Actual Darwin (PNM)} - \text{Mean Darwin (PNM)})}{\text{Desviación estándar Darwin}}$$

**La ecuación del IOS =**

$$\text{Desviación Estándar mensual (DSM)} = \sqrt{\frac{\sum (\text{Tahití} - \text{Darwin})^2}{\text{No. de Meses}}}$$

$$\text{IOS} = (\text{Tahití} - \text{Darwin}) / \text{DSM}$$

## 4.2 Agrupamiento de datos

Las 305 estaciones (Fig. 3) fueron ordenadas con el objetivo de compactar la información y lograr una más fácil interpretación de resultados, de modo que existiera representatividad zonal dentro de nuestra área de estudio. Se utilizó la regionalización efectuada por Alarcón (2003). Este autor dividió las aguas del Pacífico Mexicano en tres grandes dominios siguiendo los lineamientos señalados por Longhurst *et al.*, (1995); el Dominio del Sistema de la Corriente de California; el Dominio Tropical, y el Dominio Costero (Fig. 4.a). A su vez, estos fueron divididos en provincias (Fig. 4.b). El Dominio del Sistema de la Corriente de California, abarca aguas oceánicas y la banda de transición de la Península de Baja California, se divide en dos provincias, la Provincia de Baja California (PBC) y la Provincia de Baja California Sur (PBCS). El Dominio Tropical abarca aguas del Pacífico Tropical Mexicano y se divide en tres provincias, la Provincia de la Boca del Golfo de California (PBGC), la Provincia Intertropical (PI) y la Provincia Tropical Oceánica (PTO). Finalmente, el Dominio Costero, que abarca aguas próximas al borde costero y se divide en tres provincias; la Provincia Costera de Baja California (PCBC), y por otro lado, la Provincia Tropical Costera (PTC) y la Provincia de Centro América (PCA) (Fig. 4.b). Las provincias fueron subdivididas en grupos o regiones. Se establecieron 25 regiones biogeográficas a lo largo de todo el Pacífico Mexicano desde la frontera Sur de México, (aproximadamente desde los 11° N), hasta la frontera Norte (33° N). Las 305 estaciones se congregaron en 20 de los 25 grupos establecidos por Alarcón (2003) (Fig. 5).

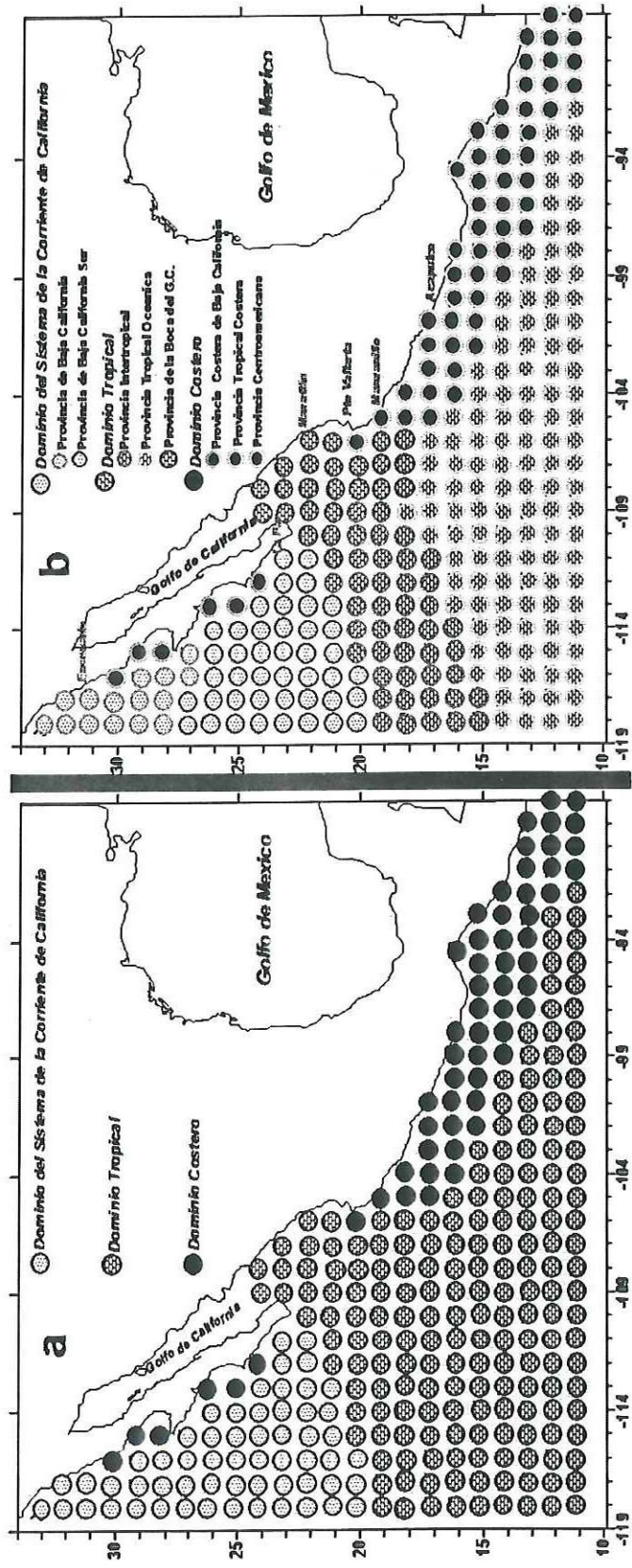


Figura 4. Estaciones ordenadas a partir de la regionalización de Alarcón (2003). a) División de Dominios b) Subdivisión de Dominios en Provincias.

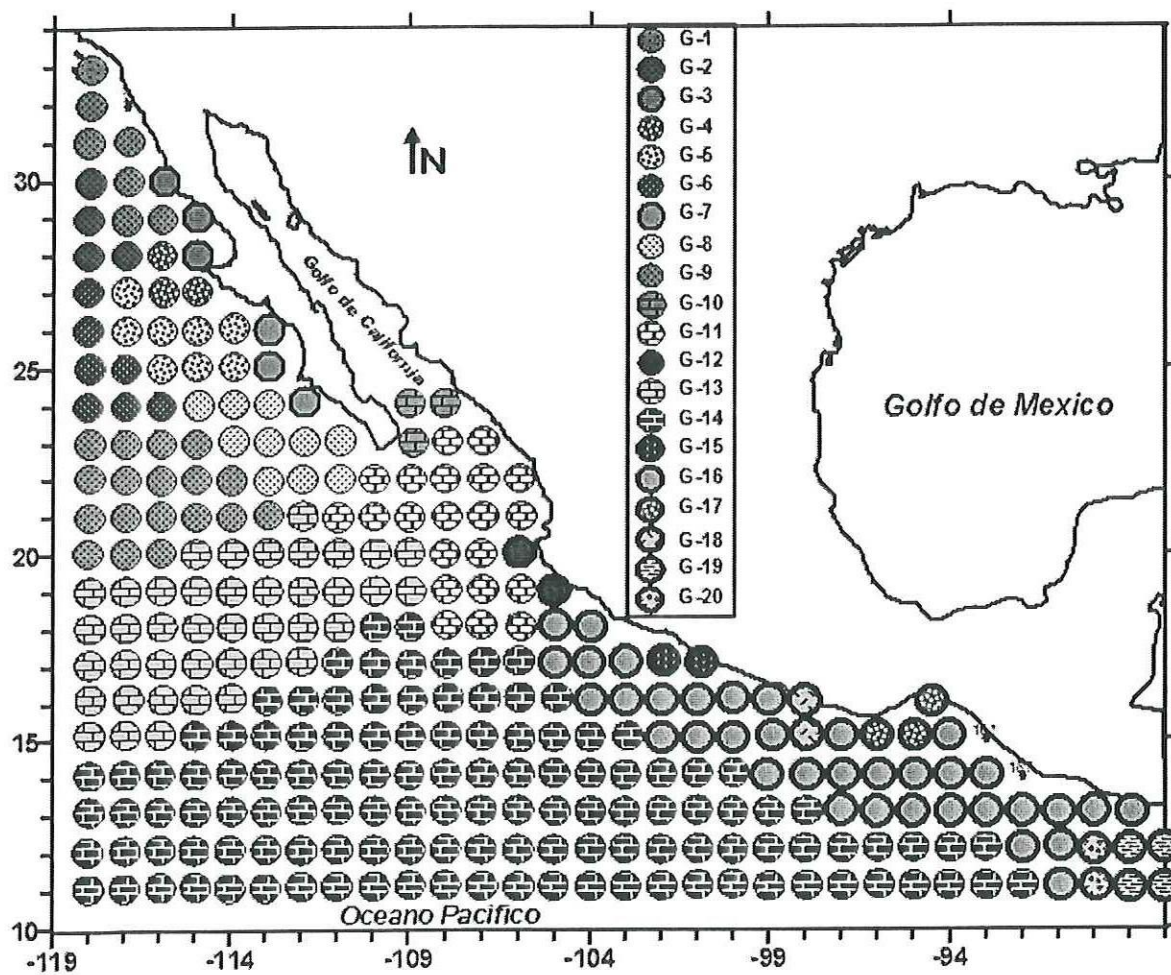


Figura 5. Estaciones ordenadas en 20 regiones de acuerdo a la regionalización de Alarcón (2003).

### 4.3 Funciones Empíricas Ortogonales (FEO's)

Para obtener una representatividad de la variabilidad de TSM y color de cada región por mes, se creó la mejor combinación numérica utilizando un Análisis de Funciones Empíricas Ortogonales (FEO's).

Este análisis se usa generalmente para detectar solo oscilaciones estáticas, sin embargo es una herramienta útil para analizar imágenes de satélite de color, debido a que provee una descripción compacta de la variabilidad espacial y temporal simultáneamente en términos de funciones ortogonales o modos estadísticos, reduciendo la información original (Emery y Thompson, 1997). De esta manera se utilizan los modos que contienen el mayor porcentaje de varianza, y que representan las señales dominantes de nuestra serie de tiempo en el área de estudio, quedando en los modos inferiores las contribuciones asociadas a otro tipo de procesos o escalas (Soto-Mardones *et al.*, 1997). Algebraicamente se representan de la siguiente forma:

$$\psi(\chi_m, t) = \sum_{i=1}^M [a_i(t)\phi_{im}]$$

donde:

$\Psi$  = es la matriz con las  $N$  funciones ortogonales, siendo  $\chi_m, t$ , el número de observaciones con respecto a su posición y tiempo

$a_i$  = la matriz de dependiente del tiempo

$\phi_{im}$  = es la matriz con las  $N$  funciones o numero de modos espaciales, que presenta la condición de ortogonalidad.

Uno de los inconvenientes de utilizar este análisis es que se requiere una base de datos completa sin espacios vacíos (Kim *et al.*, 2000). La serie del CZCS contiene algunos píxeles sin datos debido a la presencia de nubes, siendo severa en los meses de julio y agosto, que corresponden a la época crítica de lluvias en el Pacífico Tropical Mexicano (Reyes y Mejía, 1991). Estos espacios vacíos se llenaron con la ayuda de una interpolación lineal espacio-temporal, utilizando datos de las imágenes del mes anterior y posterior al espacio vacío, tomando en cuenta los valores de las estaciones aledañas al punto vacío que si contenían datos.

Se obtuvo el primer FEO's o modo del análisis de componente principal de las anomalías de cada serie de tiempo; este primer modo presenta el mayor porcentaje de varianza espacio-temporal (región-mes), con un comportamiento similar al presentado por las anomalías, marcando puntualmente cualquier cambio que se presente diferente a los cambios estacionales que se registran durante toda la serie de tiempo.

#### **4.4 Diagramas de Hovmoller**

Estos diagramas son diseñados considerando una estructura espacial fija, la cual varía en el tiempo. El objetivo de estos diagramas es observar claramente la evolución de una señal que se propaga en una dirección determinada. Para el presente trabajo se consideró la estructura latitudinal frente al borde continental mexicano (entre 11° N y 33° N) siguiendo la línea de costa (el primer píxel) contra el tiempo. Se consideraron cada una de las bases de datos de TSM y pigmentos-clorofila *a*.

#### **4.5 Correlación Cruzada**

Se implementó un análisis estadístico de correlación cruzada entre las series de tiempo del IOS y las del FEO de cada grupo, registrándose a que mes correspondía el grado máximo de correlación entre ellos. Este procedimiento permitió calcular el tiempo de desplazamiento de la masa de agua cálida, desde el punto en donde es calculado IOS en el Pacífico Occidental (ver Fig. 2), hasta afectar cada una de las regiones bloqueadas mediante el análisis de FEO's.

El análisis de correlación cruzada mide la similitud entre dos conjuntos de datos numéricos sobre una escala absoluta de [-1, 1] (Stockburger, 1996). Usualmente se utiliza el coeficiente de Correlación de Pearson ( $r$ ), para medir el grado de asociación lineal. Nuestros datos no presentan una distribución lineal, por lo cual se utilizó el coeficiente de Correlación de Spearman. El método de Spearman trabaja asignando previamente un ordenamiento (rank) por separado a cada observación en cada grupo, donde se asigna 1 al valor más pequeño en la columna, 2 al próximo más pequeño, y así sucesivamente. Para valores repetidos se asigna el promedio entre un valor

asignado y el siguiente. Posteriormente, se aplicó la ecuación para determinar el coeficiente de correlación de Pearson (Emery y Thomson, 1997).

$$r = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{S_x S_y}$$

donde:

$r$  = Coeficiente de Correlación  
 $(x_i - \bar{x})$  = valor de cada observación de la primer muestra menos la media de la muestra  
 $(y_i - \bar{y})$  = valor de cada observación de la segunda muestra menos la media de la muestra  
 $S_x S_y$  = desviación estándar de la muestra 1 y muestra 2.

El coeficiente de correlación óptima se encuentra para dos valores en el tiempo, mediante un número de desfases (lags) predeterminado, partiendo desde el lag 0, que corresponde al estado en que ambas series de tiempo estén colocadas igualmente lado a lado. Después se calcula el desplazamiento que sufre la segunda serie de datos que representa al IOS, mientras la otra (FEO) queda fija hasta completar el coeficiente de correlación para cada lag, siendo el que presente mayor grado de correlación, el que tomaremos como mes representativo de la señal máxima de la presencia de la onda de agua cálida en nuestro punto de estudio.

Si  $x(t) = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  y  $y(t) = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ , son dos series de tiempo, la correlación cruzada es la correlación entre  $x(t)$  y  $y(t)$ , o entre  $x(t)$  y  $y(t + \tau)$  para el lag  $\tau$  (Emery y Thomson, 1997). De modo que:

$$r_{xy}(\tau) = E[x(t)y(t + \tau)]$$

Debido a que la duración promedio de un evento ENSO varia de 12 a 18 meses (Wyrky, 1975, 1976; Philander, 1990), al efectuar este análisis se designó un rango de 24 desfases (lags) los cuales corresponden al numero de meses donde existía el mayor grado de correlación de cada FEO vs el IOS.

## **5.- RESULTADOS**

### **5.1 Índice de la Oscilación del Sur (IOS)**

La serie de tiempo de IOS en el Pacífico ecuatorial oriental desde 1979 hasta 2002 (Fig. 6), muestra las fases negativas en la presión barométrica que coincide con el ciclo del ENSO. Esta tiene un periodo aproximado de cuatro años, la cual históricamente ha variado entre 2 y 5 años, que es el tiempo de desplazamiento (Philander, 1990). En las décadas 80's y 90's se destaca un ciclo de ENSO muy activo. La figura 6 muestra el comportamiento del IOS, donde se destaca la presencia de 5 episodios ENSO en 1982-83, 1986-87, 1991-1993, 1994-95, y 1997-98 (flechas sólidas) y 3 episodios de La Niña en 1984-85, 1988-89, 1998-99 (flechas punteadas). Por otra parte, también se observan periodos prolongados en que predomina la fase negativa, como por ejemplo entre 1990 y 1996 sin un episodio frío intermedio.

Midiendo el intervalo de tiempo en que se registraron las máximas fases negativas de la presión del nivel del mar, se puede observar el amplio intervalo de tiempo al presentarse el evento ENSO 82-83. Este abarcó un total de 19 meses con valores negativos comenzando desde febrero de 1982 hasta agosto de 1983, alcanzando el máximo valor negativo de  $-4.6$  en febrero de 1983. Para el periodo donde se registra el evento ENSO 97-98, se presenta un intervalo de anomalías negativas de 14 meses, que comienza a partir de marzo de 1997 y que culmina en abril de 1998, con valor máximo negativo de  $-3.5$  en febrero 1998. En ambos casos el máximo valor negativo se presenta exactamente un año después de la primera señal de fase negativa en el IOS, los cuales se presentaron durante el verano austral en el transecto de donde son registrados.

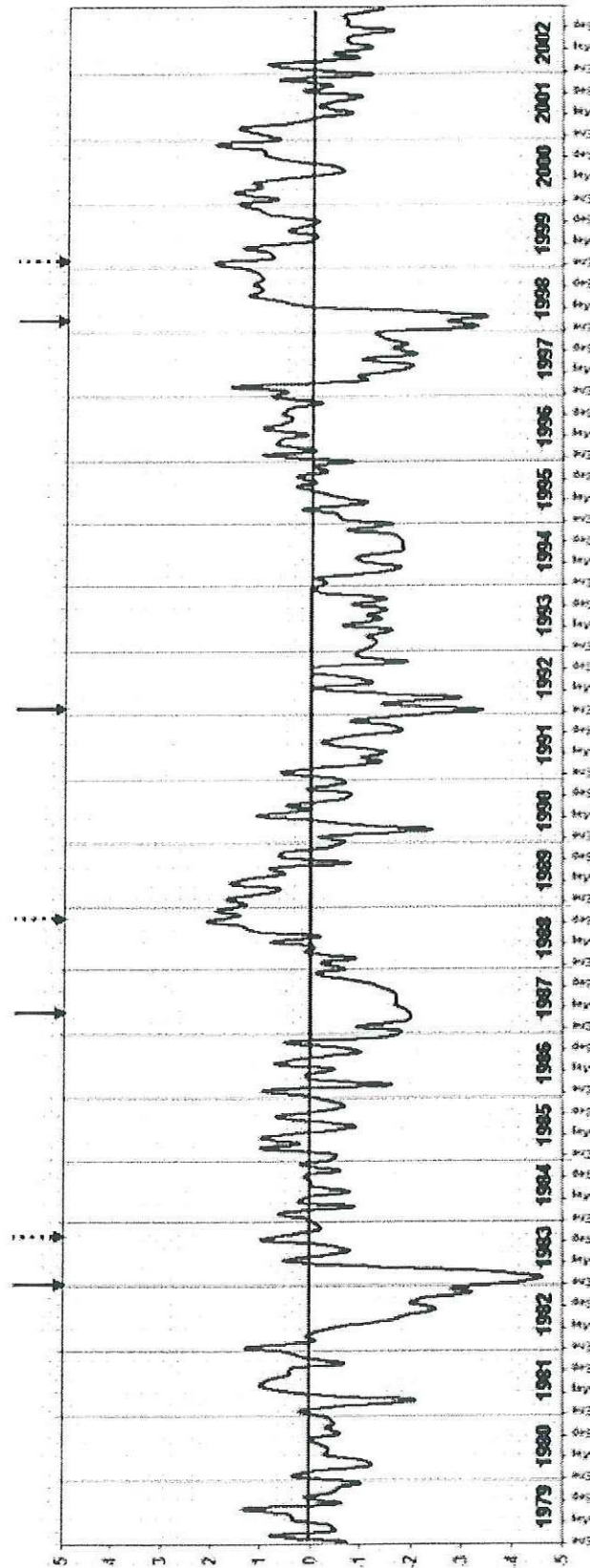


Figura 6. Índice de Oscilación del Sur (IOS), anomalías de la presión sobre el nivel del mar entre Darwin-Tahití de 23 años. Las flechas sólidas señalan eventos ENSO. las flechas punteadas señalan períodos de La Niña. Fuente de datos <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>

## 5.2 Descriptores Estadísticos

### 5.2.1 Temperatura Superficial del Mar

Se calcularon los descriptores estadísticos (media, máximos y mínimos) de la TSM ( $^{\circ}\text{C}$ ), que abarca desde noviembre de 1982 a 2002 de la base de datos AVHRR por regiones (o grupos) conformadas, para observar el patrón general en el espacio (Fig. 7). Se observa que existe una reducción de la TSM conforme nos desplazamos a latitudes mayores. Las regiones adyacentes a la península de Baja California (región 1 al 9), presentan los valores más bajos de TSM con valores promedio de  $18^{\circ}\text{C}$ , valores máximos que no superan los  $25^{\circ}\text{C}$  y mínimos en los meses de invierno que promedian  $15^{\circ}\text{C}$  (Fig. 7 y 8).

Las regiones localizadas en el sistema del Pacífico Tropical, presentan temperaturas altas. La TSM puede ser superior a los  $30^{\circ}\text{C}$  durante los meses de verano (junio-septiembre). Se puede observar el predominio de la isoterma de los  $30^{\circ}\text{C}$  en estos meses a lo largo de toda la zona costera del Pacífico Tropical Mexicano. La zona oceánica dentro del mismo sistema presenta temperaturas cálidas, pero ligeramente más bajas (1 a  $2^{\circ}\text{C}$  menores) que las presentadas en la zona costera (Fig. 8 y 9).

Las regiones 12 (Cabo Corrientes) y 17 (Golfo de Tehuantepec), en el Pacífico Tropical, caracterizadas por presentar surgencias costeras en invierno (Zuria-Jordan *et al.*, 1995; Lluch-Cota, *et al.*, 1997), no muestran una variabilidad tan abrupta como en el caso de las surgencias presentadas en las zonas adyacentes a la península de Baja California (Fig. 7 y 8). Aunque en la región 17 se destaca una ligera lengüeta de agua menos cálida desde octubre hasta el mes de abril, que resalta sobre las regiones adyacentes. En la región localizada en la Boca del Golfo de California (región 10) se observan claramente valores de TSM bajos durante los meses de invierno (diciembre-marzo) (Fig. 8), presentando esta región valores muy altos de TSM durante los meses de verano ( $>30^{\circ}\text{C}$ ).

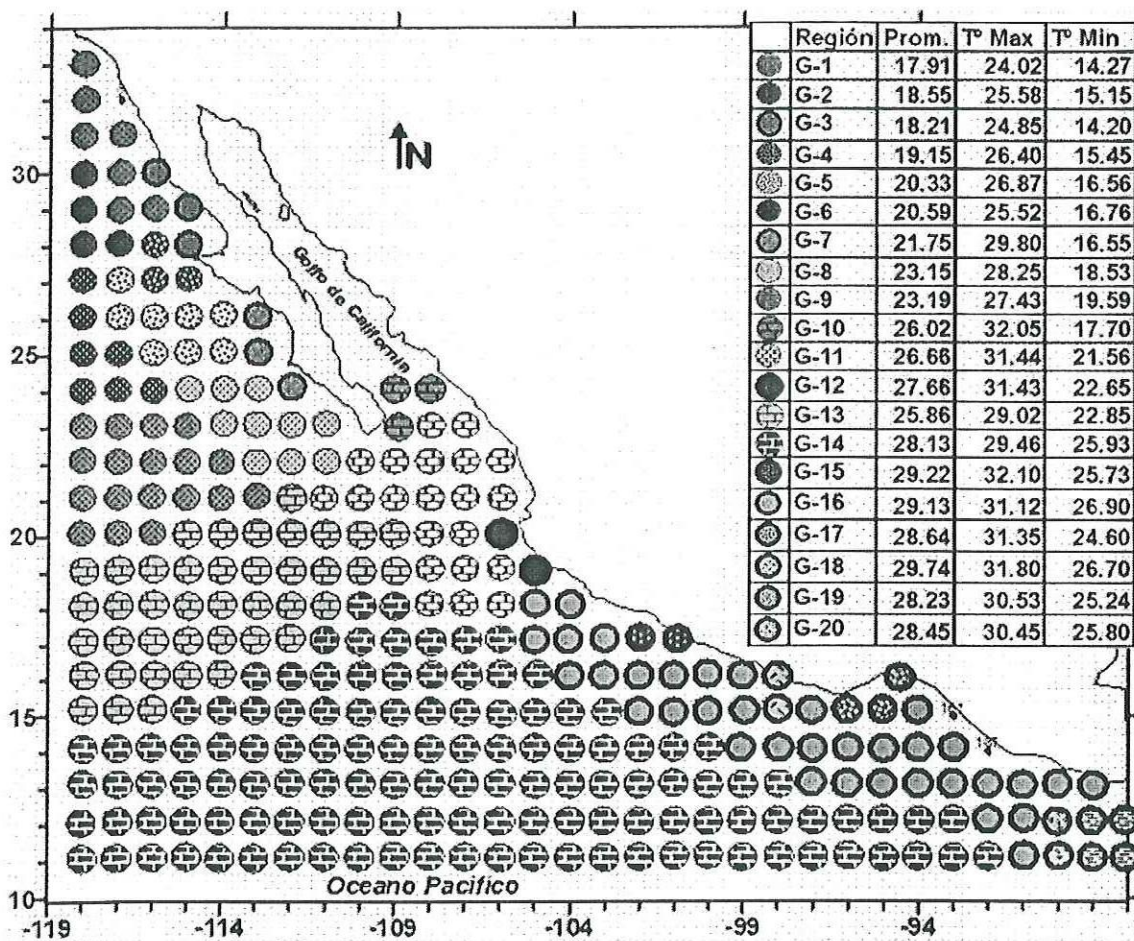


Figura 6. Descriptores estadísticos por regiones de TSM de AVHRR (1982-2002)

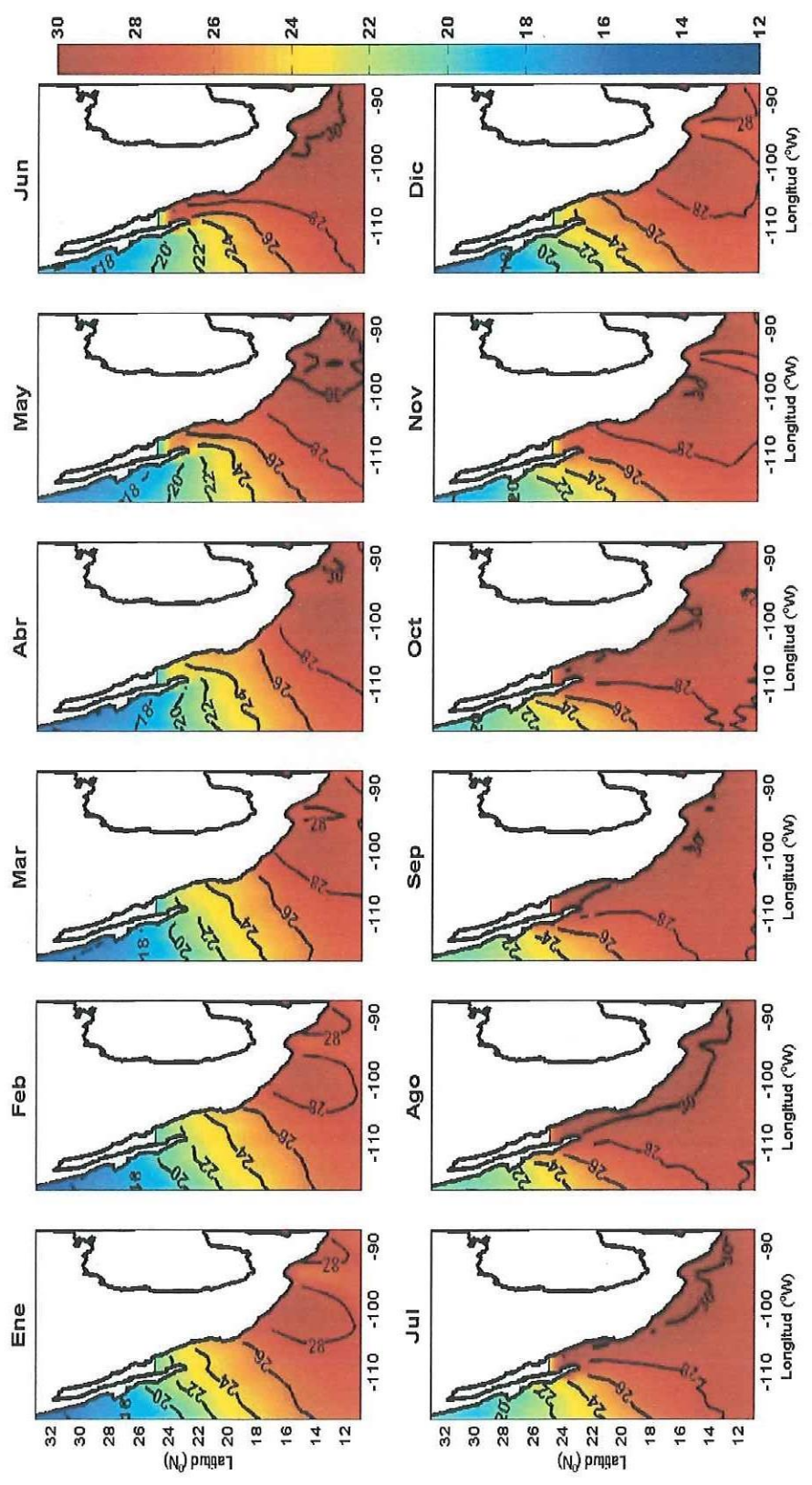


Figura 7. Distribución espacial mensual de TSM de la base de datos AVHRR (1982-2002)

### 5.2.2 Concentración de Pigmentos/Clorofila-a

Se calcularon descriptores estadísticos (media, máximos y mínimos) de las concentraciones de pigmentos (clorofila a + feopigmentos en  $\text{mg m}^{-3}$ ) de la base de datos del CZCS (1979-1986) para cada grupo (región) (Fig. 9). Asimismo, para las concentraciones de clorofila a ( $\text{mg m}^{-3}$ ) de la base de datos conjunta OCTS y SeaWiFS (1996-2001) (Fig. 10).

Los valores promedio, en ambos casos, son mayores en las regiones ubicadas dentro del Dominio Costero. En particular, con mayores concentraciones en zonas de surgencia, como las áreas que comprenden la región 3 (media de pigmentos de  $1.24 \text{ mg m}^{-3}$  y de clorofila  $0.73 \text{ mg m}^{-3}$ ), y la región 7 (media de pigmentos  $0.5 \text{ mg m}^{-3}$  y clorofila de  $0.41 \text{ mg m}^{-3}$ ). Estas regiones se encuentran adyacentes a la península de BC, y presentan máximos de pigmentos superiores a  $3 \text{ mg m}^{-3}$  y concentraciones de clorofila a superiores a  $4 \text{ mg m}^{-3}$ , durante los meses de verano (junio-septiembre), que se observan claramente en las Figuras 11 y 12.

La región 12, frente a Cabo Corrientes (Jalisco), se caracteriza por presentar surgencias de invierno (Zuria-Jordan, 1995) con valores promedio de pigmentos de  $0.4 \text{ mg m}^{-3}$  y con concentraciones máximas  $>1 \text{ mg m}^{-3}$ . La pluma de máximas concentraciones de pigmentos (CZCS) y de clorofilas (OCTS-SeaWiFS) comienza en el mes de enero, con valores máximos durante el mes de marzo y decayendo completamente en junio (Fig. 11 y 12).

Otra zona de surgencias en el Pacífico Tropical se encuentra en el Golfo de Tehuantepec (región 17), donde encontramos concentraciones de pigmentos promedio de  $0.7 \text{ mg m}^{-3}$ , con valores máximos superiores a  $2 \text{ mg m}^{-3}$ . La pluma de concentraciones altas de pigmentos y clorofila se observa todo el año, enfatizándose en los meses de octubre a marzo (Fig. 11 y 12).

Las regiones con bajas concentraciones de pigmentos son las que se encuentran alejadas de la línea de costa, con concentración de pigmentos y clorofilas menores en las regiones 6 y 9, localizadas en una zona de transición por frente a las

costas de la Península de BC con concentraciones de pigmentos y clorofila promedio de  $0.1 \text{ mg m}^{-3}$ . En el Pacífico Tropical, las regiones 13 y 14 localizadas en aguas oceánicas, presentaron valores medios de  $0.1 \text{ mg m}^{-3}$  con muy poca variabilidad anual (Fig. 9 y 10).

Las 2 últimas regiones que se encuentran en la zona costera al sur, en el límite de México con Guatemala (regiones 19 y 20), presentan concentraciones altas de pigmentos y clorofila *a* cercanas a  $0.5 \text{ mg m}^{-3}$ , con concentraciones de pigmentos máximas superiores a 2 y  $1 \text{ mg m}^{-3}$  respectivamente (Fig 9). Este patrón se invierte para Clorofila *a*, donde las concentraciones máximas presenta valores superiores a  $1 \text{ mg m}^{-3}$  en la región 19 y  $2 \text{ mg m}^{-3}$  para la región 20 (Fig 10). En ambas regiones, las concentraciones mínimas tanto de pigmentos como de Clorofila *a* presentan valores  $< 0.1 \text{ mg m}^{-3}$ .

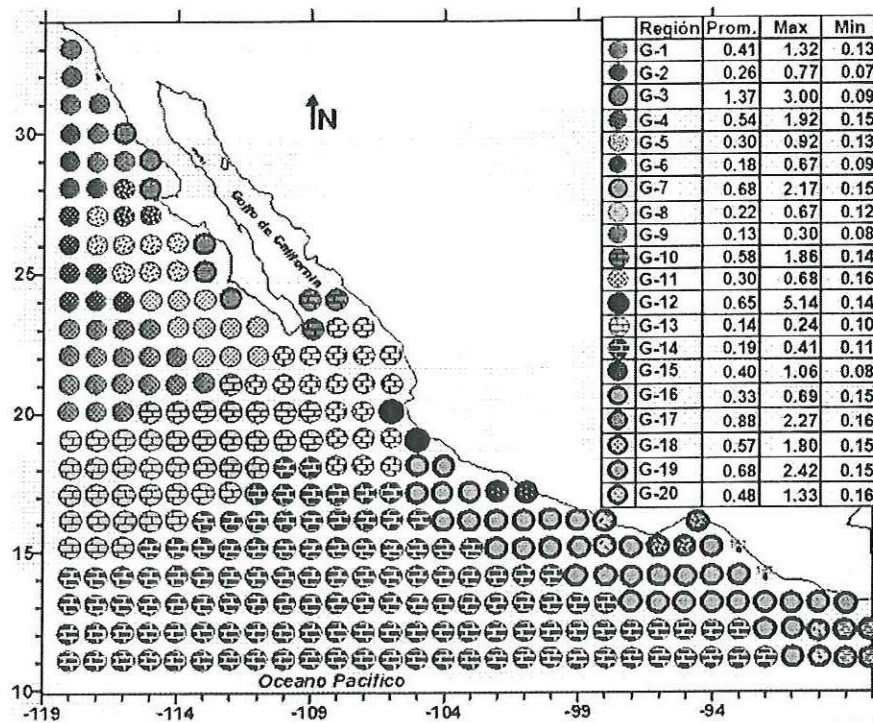


Figura 8. Descriptores estadísticos de las concentraciones de pigmentos ( $\text{mg m}^{-3}$ ) de la base de datos del CZCS de 1979 a 1986.

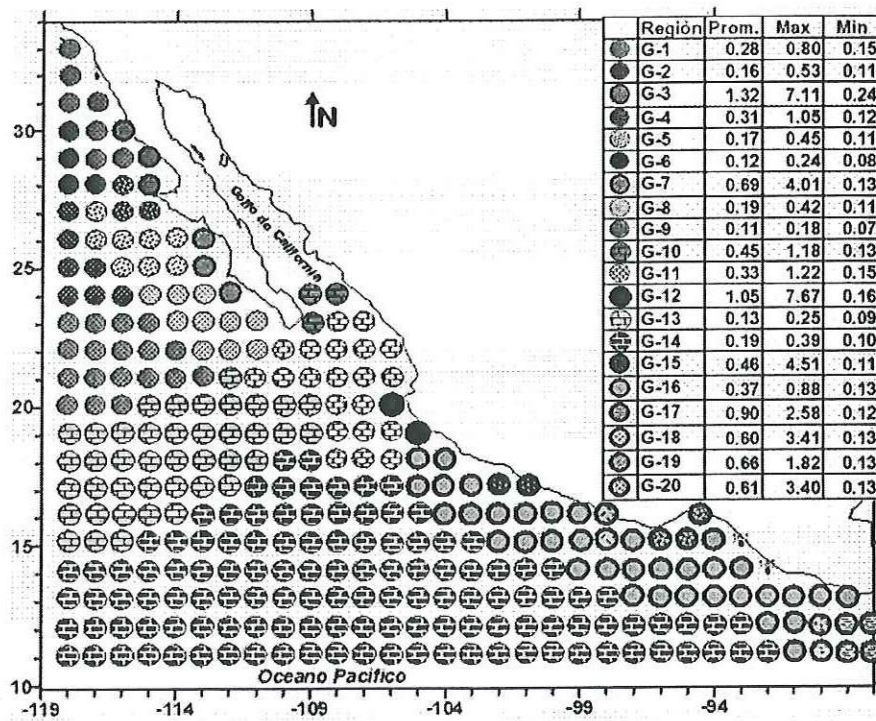


Figura 9. Descriptores estadísticos de las concentraciones de clorofila a ( $\text{mg m}^{-3}$ ) obtenidos de las imágenes del OCTS-SeaWiFS de 1996-2002

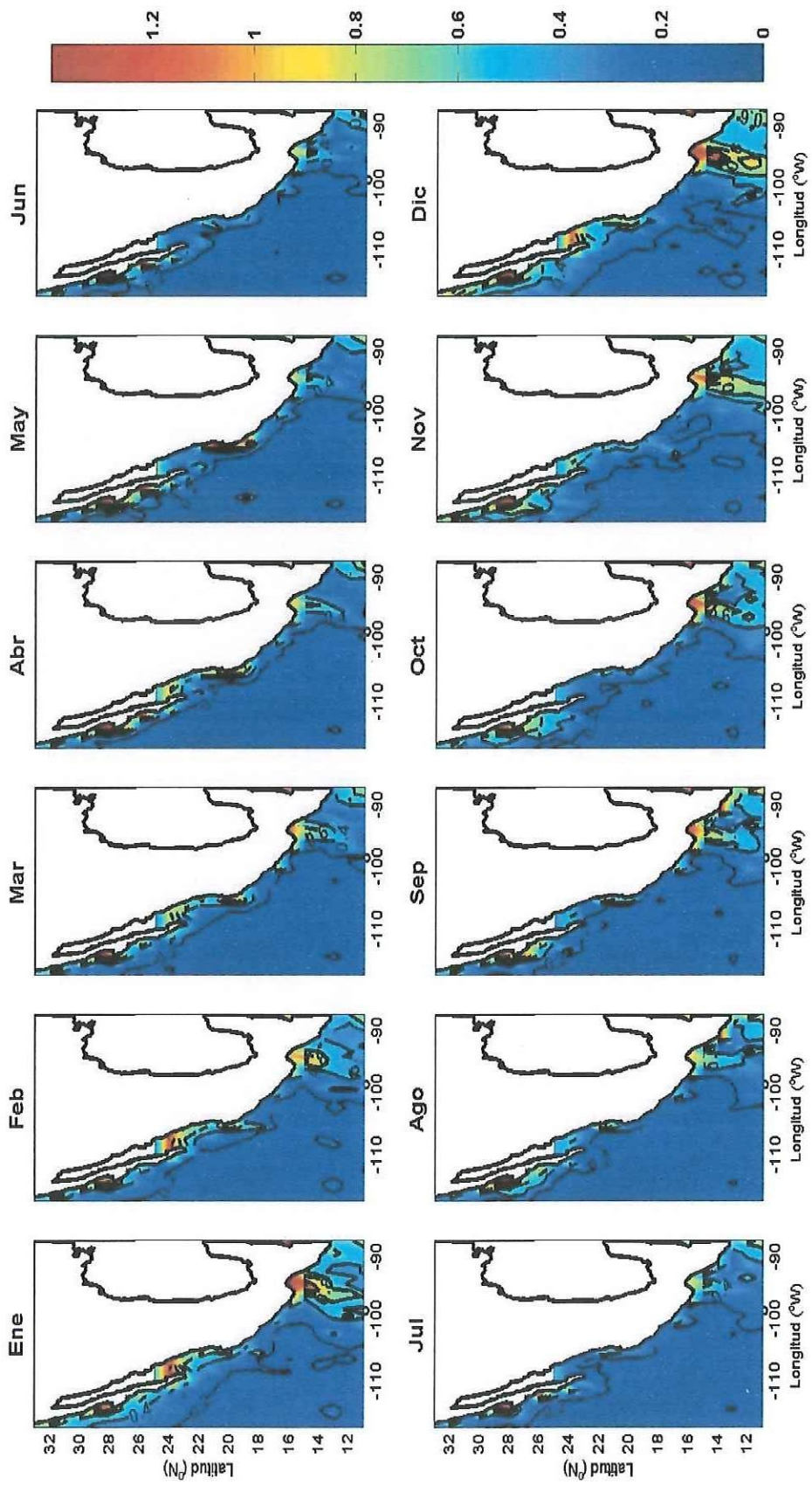


Figura 10. Concentración de pigmentos mensual espacial de la base de datos del CZCS 1979-1986

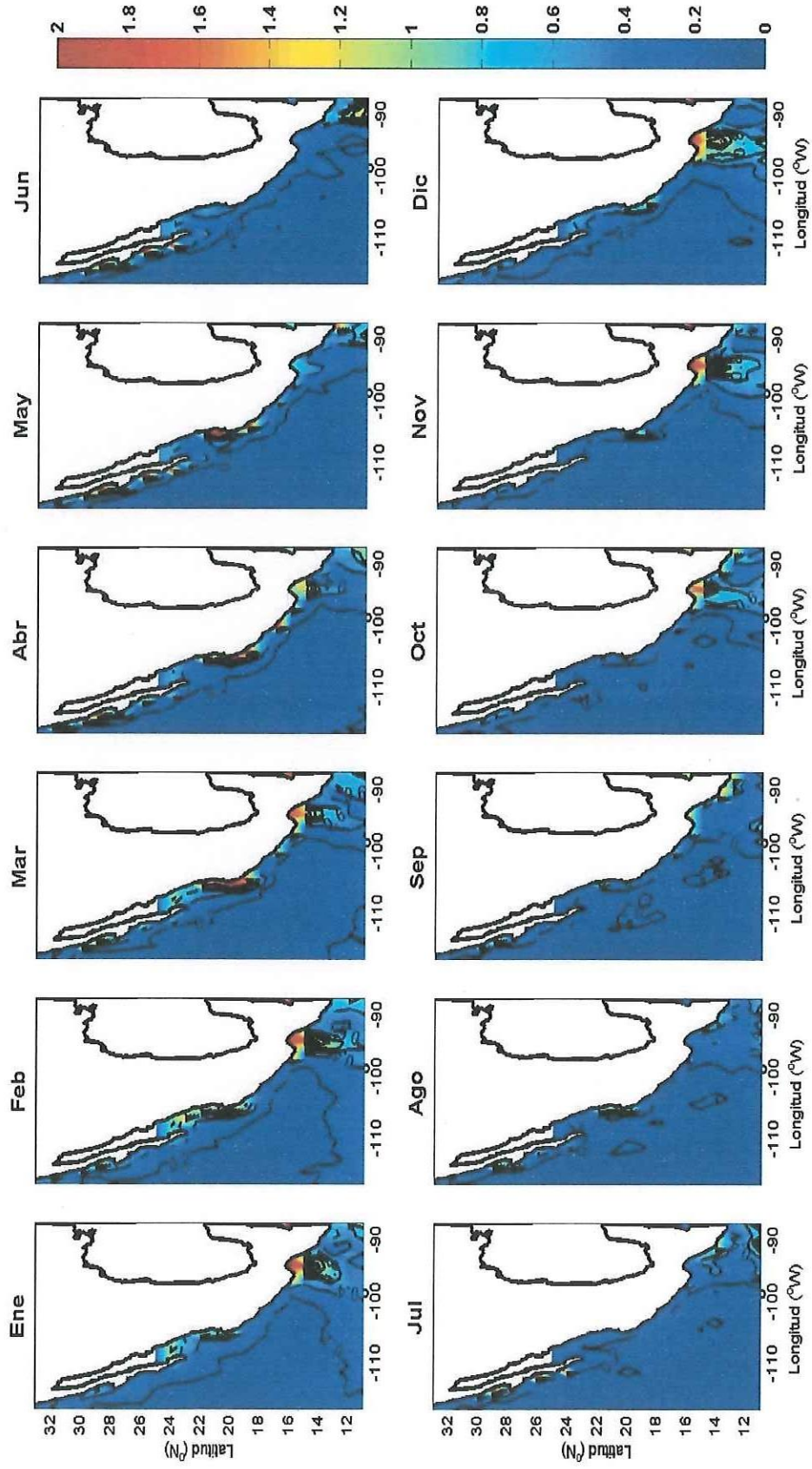


Figura 11. Concentración de Clorofila a mensual espacial de la base de datos del OCTS-SeaWiFS 1996-2002

## 5.3 Series de Tiempo

### 5.3.1 *Temperatura Superficial del Mar*

Las series de tiempo de la TSM fueron extraídas y agrupadas por regiones, para mejor visualización y análisis. Estas, a su vez, son conjuntadas gráficamente de acuerdo a la provincia a la que corresponden (Fig.13-15). Los valores más bajos de temperatura de todas las regiones a través del tiempo se presentan en las provincias dentro del Dominio del Sistema de la Corriente de California, frente a BC (Fig. 13). Los grupos en la PBC (Fig. 13.a) presentan el mismo patrón de variabilidad estacional entre sí, con mínimos en invierno ( $15^{\circ}\text{C}$ ) y máximos en verano ( $20\text{-}22^{\circ}\text{C}$ ). El máximo de TSM de la PBC se registra en septiembre de 1983 con valores superiores a  $25^{\circ}\text{C}$ , con un segundo valor máximo en septiembre de 1997 con TSM mayor a  $22^{\circ}\text{C}$ . La PBCS (Fig. 13.b) presenta valores promedio de TSM mas altos, pero con el mismo patrón estacional; temperaturas mínimas en invierno ( $18\text{-}20^{\circ}\text{C}$ ) y máximas en verano ( $24\text{-}26^{\circ}\text{C}$ ). Se distinguen valores máximos de TSM para los grupos de esta provincia, en los veranos de 1983, 1992 y 1997 con TSM superior a  $26^{\circ}\text{C}$ , sin embargo estos valores no sobresalen notablemente del patrón normal estacional. Por otro lado los valores mínimos de TSM de toda la serie se presentaron en los inviernos de 1989 y 1999 con TSM menor a  $17^{\circ}\text{C}$ .

Las provincias dentro del Dominio del Pacifico Tropical (Fig. 14) presentan una variación estacional menos marcada (PI y PTO) con una TSM promedio anual superior a los  $26^{\circ}\text{C}$ . Los máximos de TSM en la PI (Fig. 14.a) se registran en los veranos de 1992 y 1997 con valores superiores a  $28.5^{\circ}\text{C}$ . Mientras que para la PTO (Fig. 14.c) los máximos se registran en los veranos de 1987 y 1997 con TSM mayor a  $29^{\circ}\text{C}$ . Dentro de este mismo Dominio, la PBGC (Fig. 14.b) también presenta valores altos de TSM, con intervalos de variación estacional más amplios. Los valores máximos de TSM promedio durante los meses de verano superan los  $30^{\circ}\text{C}$ , mientras que en invierno disminuye hasta valores cercanos a los  $20^{\circ}\text{C}$ . Es interesante señalar que la TSM máxima de toda la serie se registra en septiembre de 1997 con  $31^{\circ}\text{C}$ .

En el Dominio Costero (Fig. 15), se presenta una variación anual de la TSM discorde entre las provincias que conforman este dominio. El patrón estacional de la PCBC (Fig. 15.a) es similar al de la PBC, pero con mayor variación interanual, con TSM promedio menor en la región 3; esta se encuentra localizada frente a las costas de Baja California donde dominan aguas de la Corriente de California, con valores mínimos de TSM en invierno ( $15^{\circ}\text{C}$ ) y con máximos en verano ( $23^{\circ}\text{C}$ ), en septiembre de 1983 se registra el valor más alto de toda la serie ( $25^{\circ}\text{C}$ ). Dentro de la misma provincia, la región 7 se localiza frente a las costas de BCS, donde existe intrusión de aguas más cálidas provenientes del Pacífico Tropical. Los valores de TSM durante los meses de verano promedian los  $27^{\circ}\text{C}$ , alcanzando  $30^{\circ}\text{C}$  como valor máximo de la serie en septiembre de 1997. En ambas regiones se observan máximos en los meses de agosto a octubre.

Dentro del mismo Dominio Costero; la PTC (Fig. 15.b) se encuentra dominada por aguas más cálidas y se localiza a frente a la línea de costa que va desde Cabo Corrientes hasta el Golfo de Tehuantepec. Los valores de TSM promedio son superiores a los  $28^{\circ}\text{C}$ . Todas las regiones dentro de la misma provincia presentan un comportamiento similar, exceptuando la región 12, donde existen variaciones estacionales de temperatura más claras, debido a la presencia de surgencias costeras en invierno, donde las temperaturas llegan a descender durante los meses de febrero y marzo hasta los  $25^{\circ}\text{C}$ , mientras que en verano la TSM alcanza los  $30^{\circ}\text{C}$ . Los registros de TSM máximos se presentaron en los meses de julio y agosto de 1997 ( $>31^{\circ}\text{C}$ ). La PCA (Figura 15.c) se encuentra dominada completamente por agua procedente de la Corriente de Costa Rica (CCR), propensamente cálida y con poca variabilidad estacional (mediana de  $28^{\circ}\text{C}$ ). Sin embargo a lo largo de 1997 y 1998 predominan temperaturas altas en las dos regiones que comprenden esta provincia con temperaturas superiores a los  $30^{\circ}\text{C}$ .

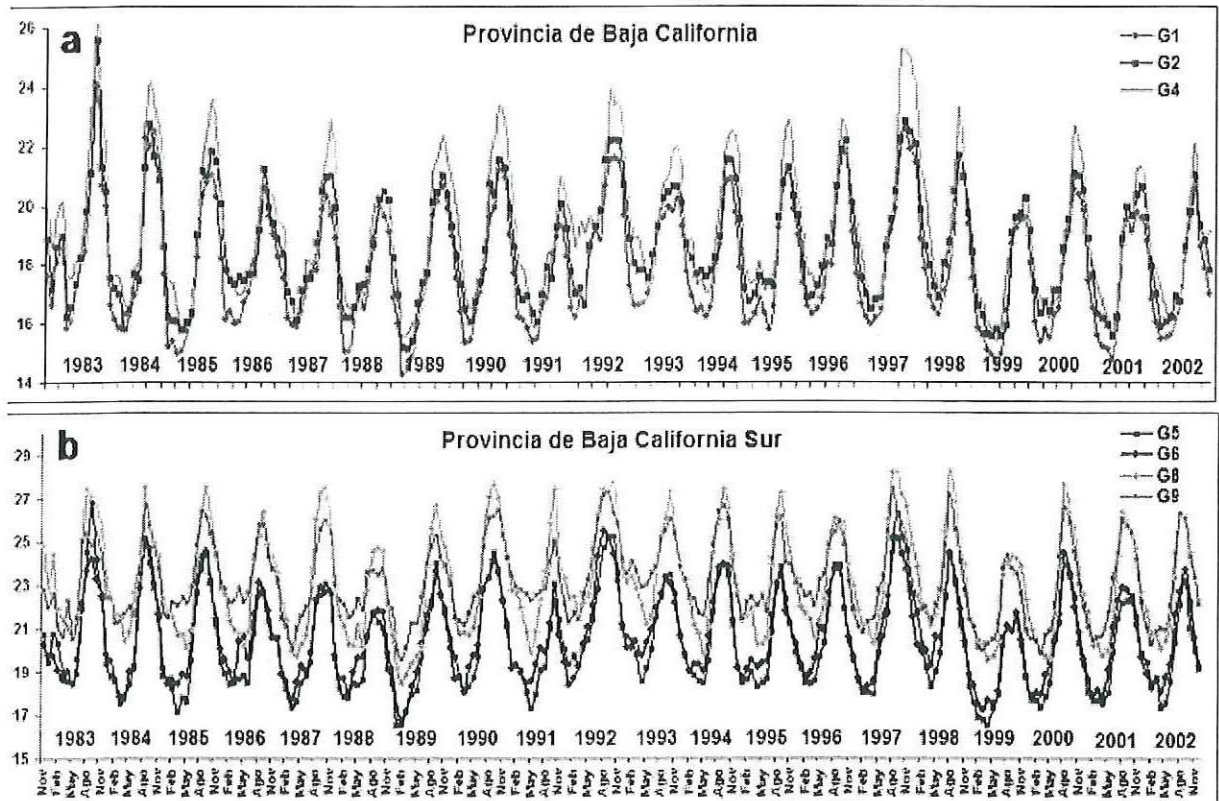


Figura 12. Serie de tiempo de TSM obtenida del AVHRR (1982-2002) en el Dominio de la Corriente de California; a) Provincia de Baja California (PBC) y b) Provincia de Baja California Sur (PBS).

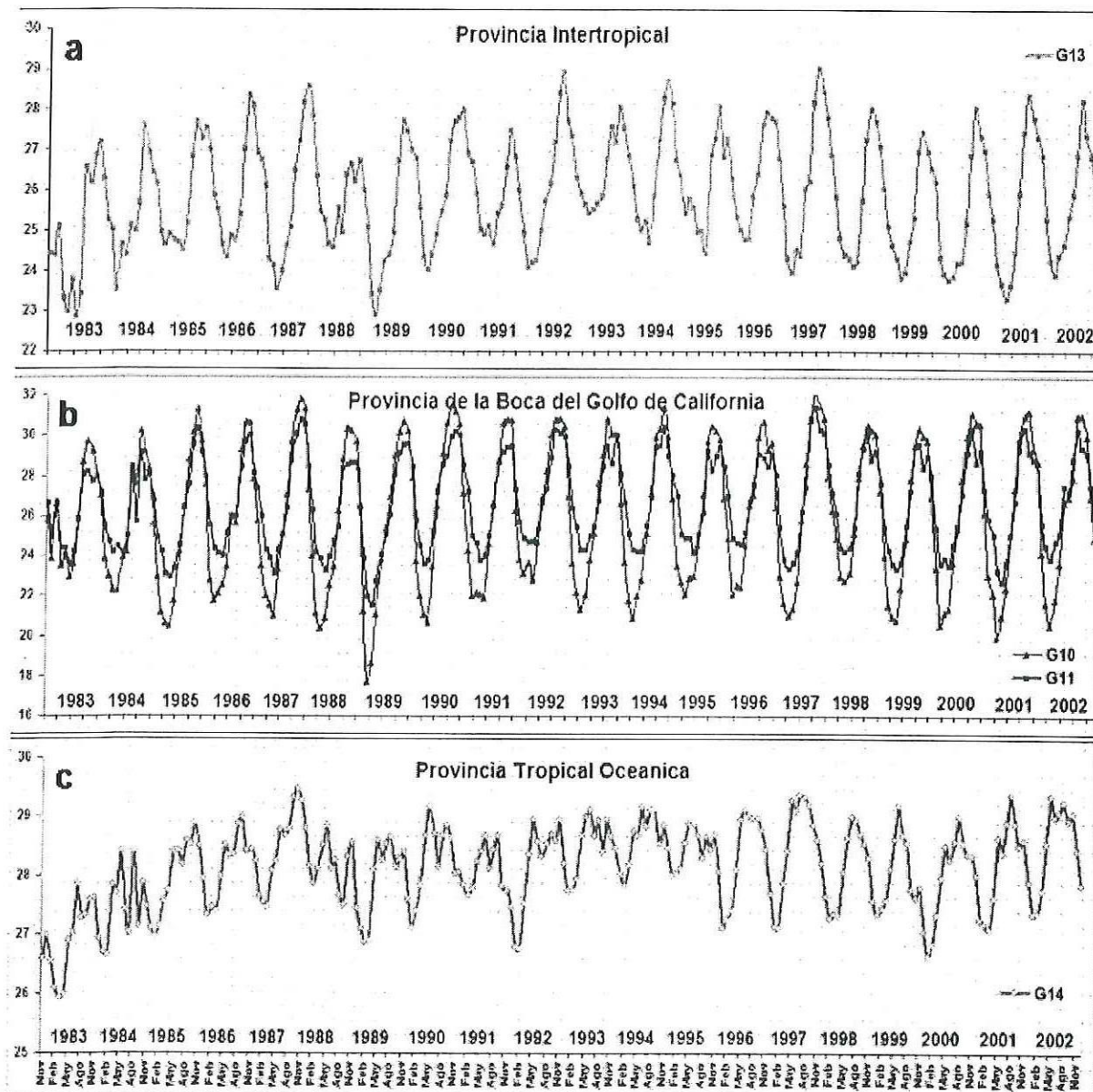


Figura 13. Serie de tiempo de TSM obtenida del AVHRR (1982-2002) en el Dominio Tropical; a) Provincia Intertropical (PI), b) Provincia de la Boca del Golfo de California (PBGC) y c) Provincia Tropical Oceánica (PTO).

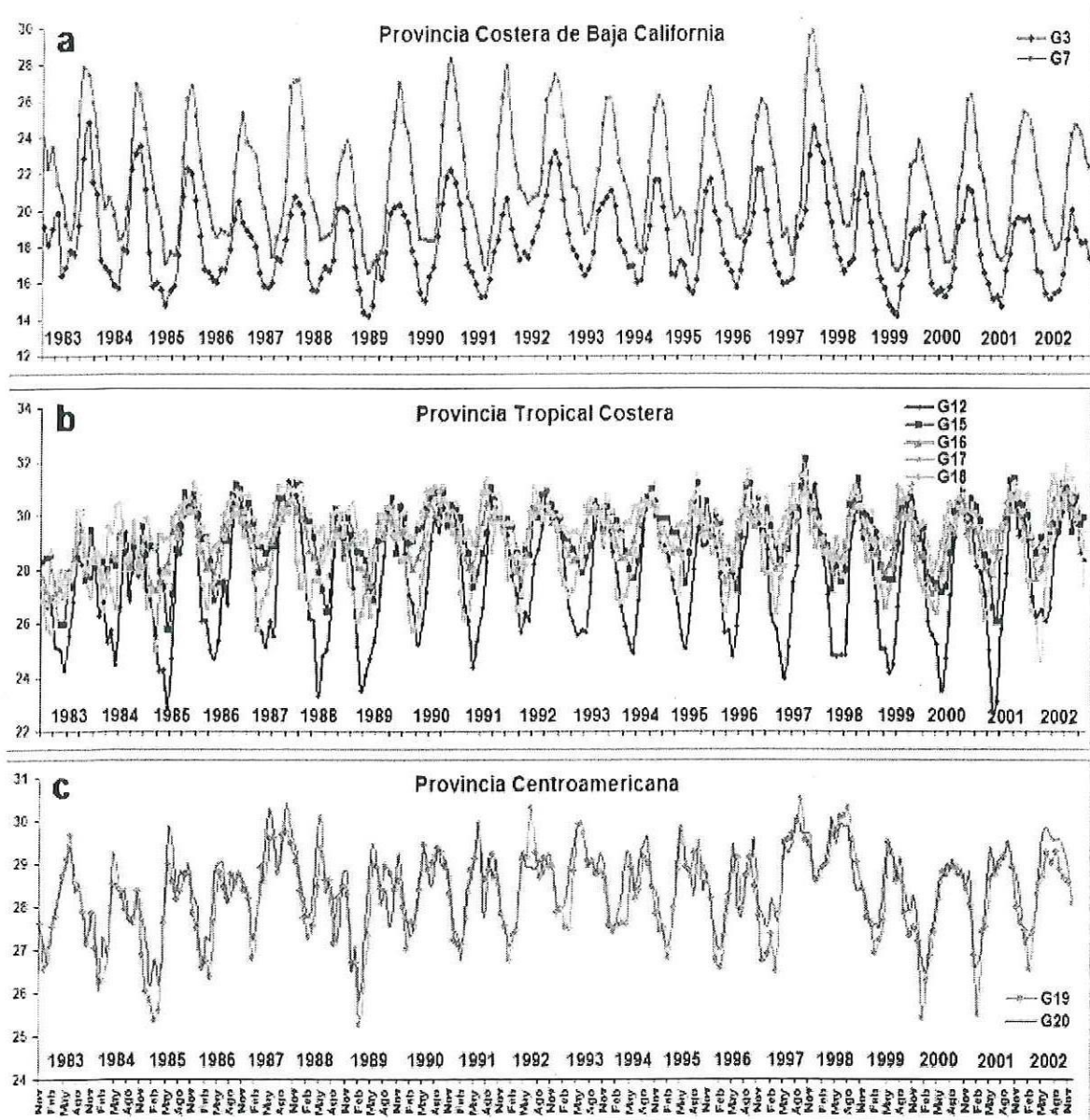


Figura 14. Serie de tiempo de TSM obtenida del AVHRR (1982-2002) en el Dominio Costero; a) Provincia Costera de Baja California (PCBC), b) Provincia Tropical Costera (PTC) y c) Provincia Centroamericana (PC).

### **5.3.2 Anomalías de Temperatura Superficial del Mar**

En las anomalías de TSM, se detecta la presencia del ENSO. Los siguientes gráficos, presentan la serie de tiempo del IOS junto a las anomalías de la TSM.

En Dominio del Sistema de la Corriente de California (Fig. 16), los valores de las anomalías oscilan entre -1 y +1. Además, se observa que los máximos de la anomalía de la TSM coinciden con las máximas fases negativas del IOS. Al comparar con el comportamiento de este último durante 1982-83, las anomalías máximas de nuestra serie de tiempo (+3), ocurren después de que se presentó la fase negativa más conspicua en el IOS. No es el caso para la fase negativa presentada en 1997-98, donde la mayor anomalía positiva de TSM (+2.5), se registró 5 meses antes de que el IOS alcanzara su máxima fase negativa, para después ascender abruptamente.

En el Dominio Tropical (Fig. 17), se presenta un patrón diferente a las señaladas anteriormente, donde predominan anomalías negativas de TSM durante la mayor fase negativa del IOS en 1982-83. Para la fase negativa de 1997-98 (febrero de 1998), las mayores anomalías de TSM se registraron meses antes (septiembre de 1997) con valores de anomalía positiva de +2, las cuales son similares a las presentadas en el Dominio del Sistema de la Corriente de California.

Las anomalías de TSM presentadas para la PCBC (Fig. 18.a), presentan una conducta similar a la de las Provincias localizadas en el Dominio del Sistema de la Corriente de California. Se observan altas anomalías positivas de TSM durante las fases negativas más altas de la serie de tiempo del IOS (1982-83 y 1997-98). La máxima anomalía positiva de TSM (+2) se registra en septiembre de 1983, meses después de la máxima de la fase negativa del IOS. Para 1997-98 se presenta casi meses antes de la máxima fase negativa del IOS. En las PTC y PCA (Fig. 18.b y 18.c), se observa un comportamiento menos claro de anomalías positivas y negativas de TSM debido a la poca variabilidad interanual existente. Sin embargo en 1997-98 si se observa cierto despunte en las anomalías positivas de TSM las cuales se presentan ligeramente antes de la máxima la fase negativa del IOS en esta fecha.

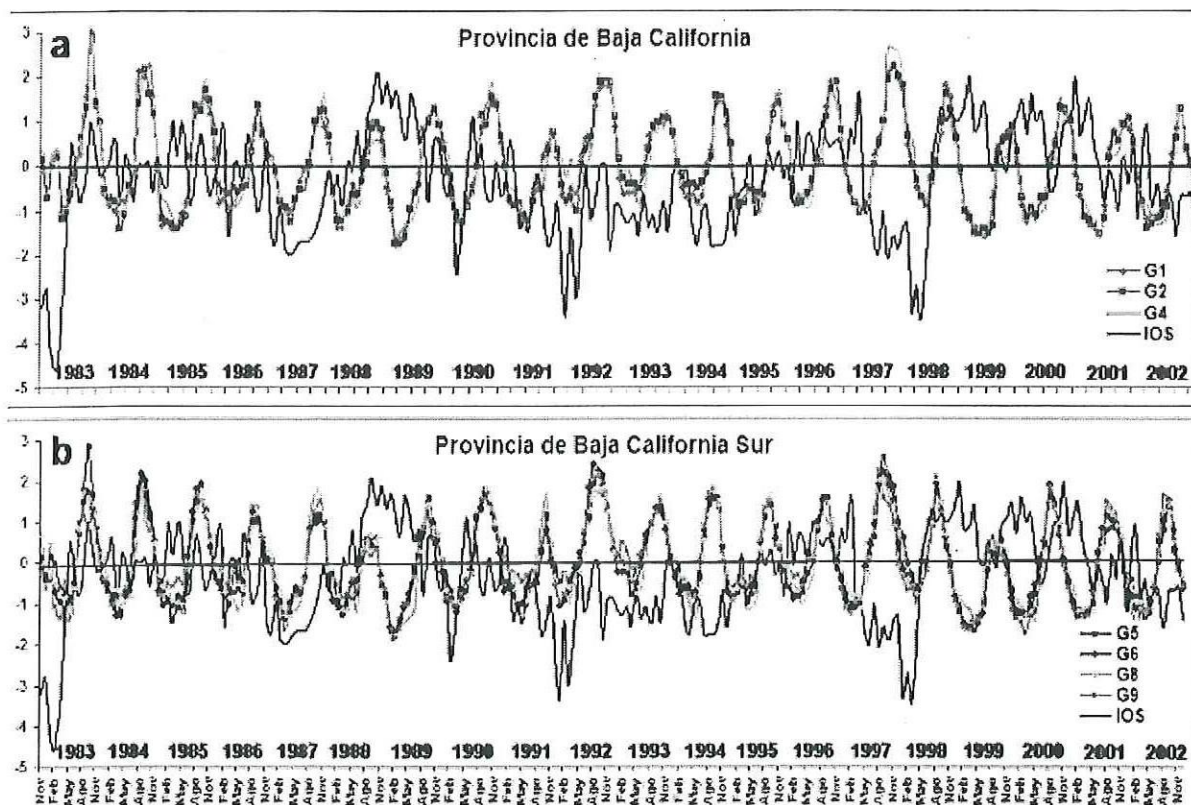


Figura 15. Serie de tiempo de anomalías de TSM obtenida del AVHRR (1982-2002) en el Dominio de la Corriente de California; a) Provincia de Baja California (PBC) y b) Provincia de Baja California Sur (PBS).

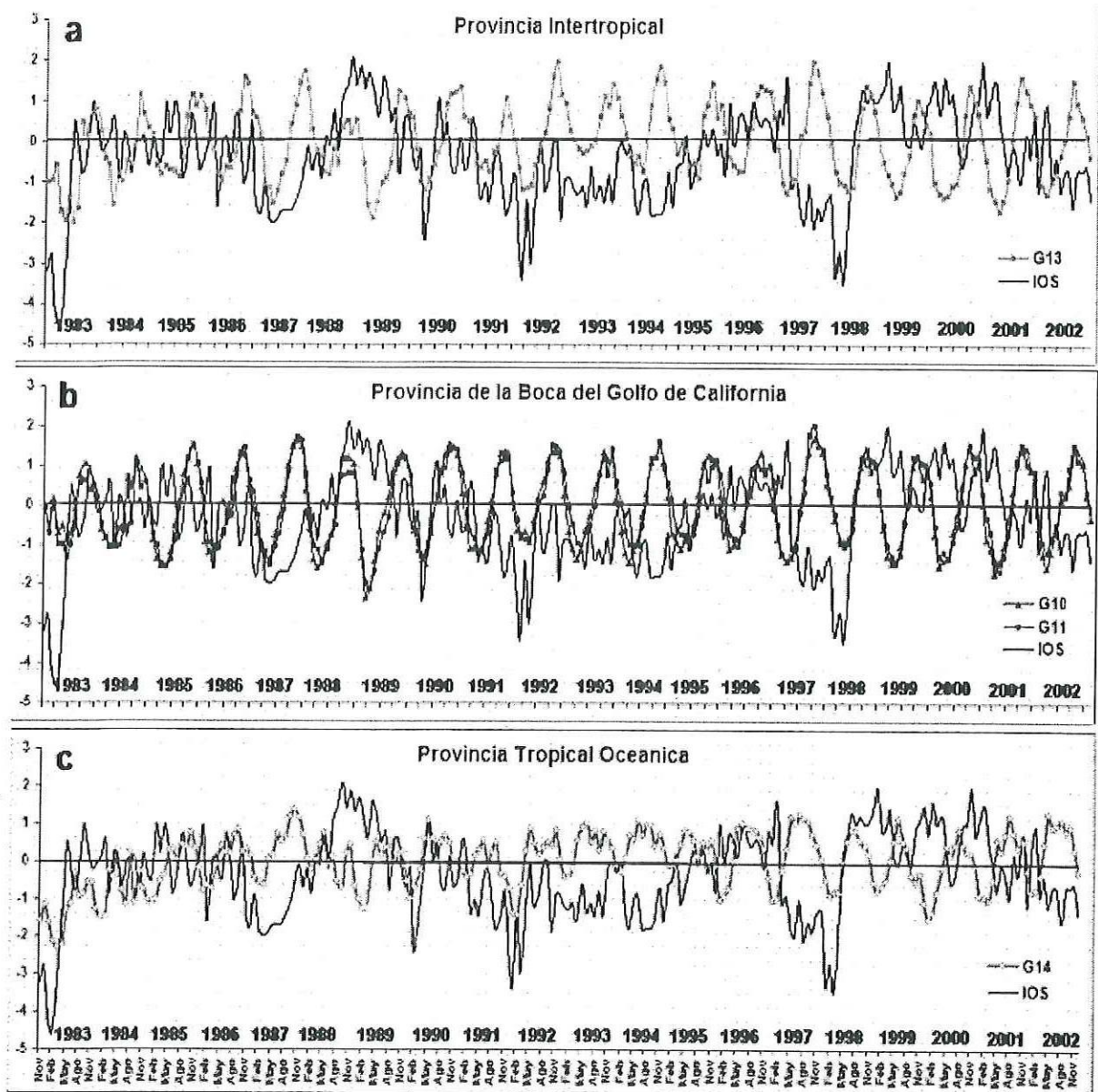


Figura 16. Serie de tiempo de anomalías de la TSM obtenida del AVHRR (1982-2002) en el Dominio Tropical; a) Provincia Intertropical (PI), b) Provincia de la Boca del Golfo de California (PBGC) y c) Provincia Tropical Oceánica (PTO).

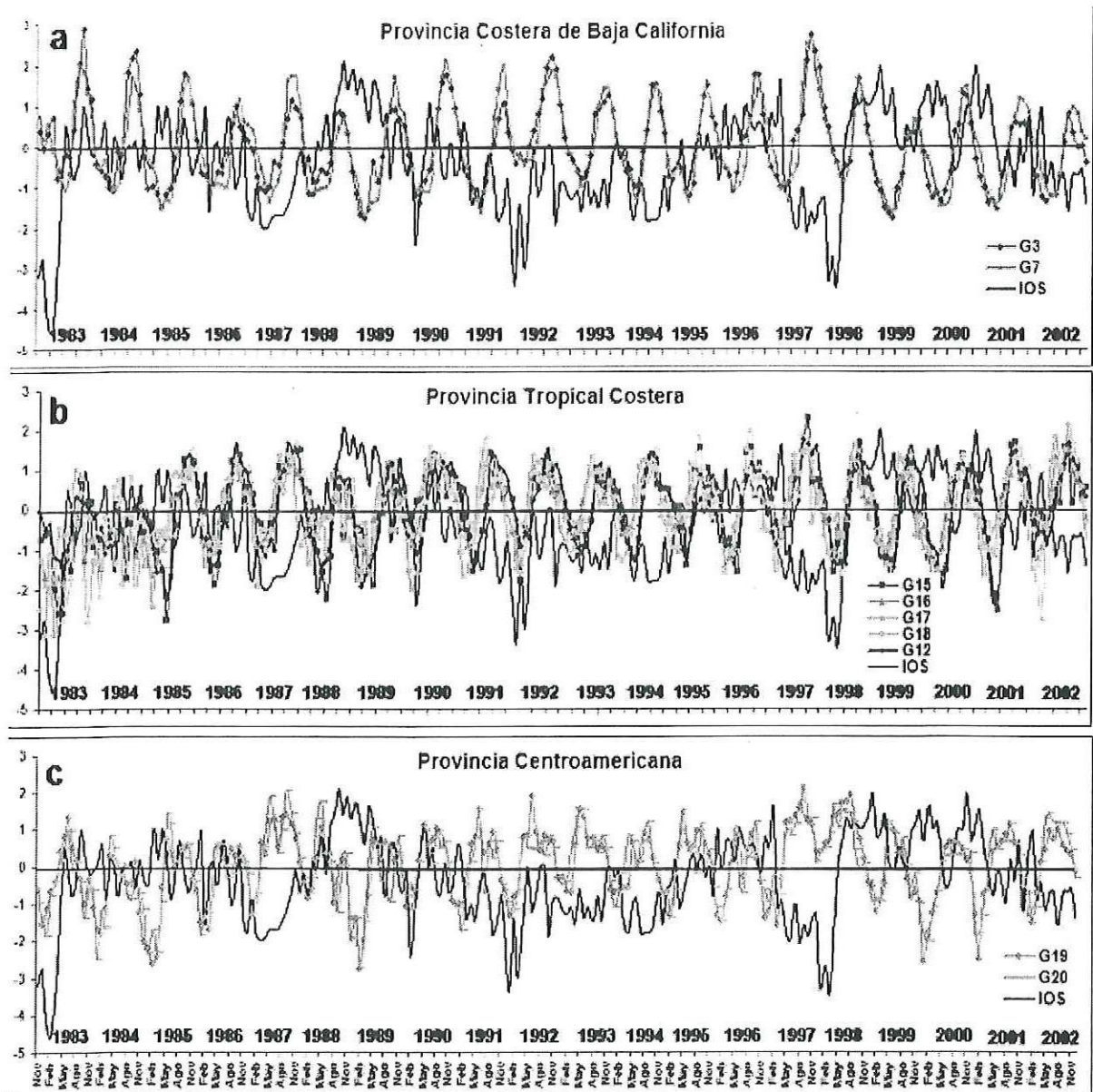


Figura 17. Serie de tiempo de anomalías de la TSM obtenida del AVHRR (1982-2002) en el Dominio Costero; a) Provincia Costera de Baja California (PCBC), b) Provincia Tropical Costera (PTC) y c) Provincia Centroamericana (PC).

### 5.3.3 Concentración de pigmentos ( $\text{mg m}^{-3}$ ) del CZCS (1979-1986)

Se presentan las concentraciones de pigmentos ( $\text{mg m}^{-3}$ ) del CZCS (1979 a 1986) en cada grupo y congregadas en provincias. Dentro del Dominio del Sistema de la Corriente de California, se localiza la PBC (Fig. 19.a), donde se presentan altas concentraciones de pigmentos que aumentan en verano ( $>1 \text{ mg m}^{-3}$ ). Sin embargo, se observa una atenuación considerable de las mismas en el verano de 1982 y 1983 ( $<0.5 \text{ mg m}^{-3}$ ), extendiéndose hasta el invierno de 1984, donde casi se sobreponen los máximos de pigmentos con los que esperaríamos para el siguiente verano (1984). Sin embargo, se siguen manteniendo concentraciones bajas de pigmentos en comparación con las presentadas al inicio de la serie. En la PBCS (Fig. 19.b) se observa un comportamiento similar. Los valores máximos en verano, no sobrepasan  $1 \text{ mg m}^{-3}$ . La atenuación en la concentración de pigmentos es menos crítica que la presentada en la figura anterior. En general se observan valores bajos en la concentración de pigmentos en el verano de 1980, con valores inferiores a  $0.4 \text{ mg m}^{-3}$  que se mantuvieron el resto del año. En 1983 también se observó una disminución crítica en la concentración de pigmentos ( $<0.3 \text{ mg m}^{-3}$ ) que se mantuvo hasta el verano de 1985.

La variabilidad anual de la concentración de pigmentos en las provincias localizadas en el Dominio Tropical (Fig. 20) es menos notable, debido a su localización en aguas mayormente oligotróficas que presentan concentraciones máximas menores a  $0.4 \text{ mg m}^{-3}$ . Esto sucede en las PI y PTO (Fig. 20.a y 20.c) donde el comportamiento de la serie de tiempo es muy similar para ambas provincias, con poca variabilidad estacional. Durante la mayor parte de 1983 y durante todo 1984 las concentraciones de pigmentos no rebasan el  $0.1 \text{ mg m}^{-3}$ . Sin embargo, en la PBGC (Fig. 20.b), se observa una marcada variabilidad estacional, donde se presentan concentraciones altas en invierno, alcanzando máximos  $>1 \text{ mg m}^{-3}$ , y a su vez se observa una ligera atenuación de las mismas durante el verano 1983-84, con máximos en invierno inferiores a los de años anteriores.

La variabilidad en la concentración de pigmentos en la PCBC, en el Dominio Costero (Fig. 21.a), se encuentra también caracterizada por altas concentraciones de pigmentos, donde encontramos valores superiores a los  $2 \text{ mg m}^{-3}$  durante los meses de

verano. Se observa atenuación en concentraciones en el verano de 1983 cuando se observan valores  $<0.5 \text{ mg m}^{-3}$ , las cuales permanecieron hasta el verano de 1984, en las dos regiones que conforman esta Provincia.

Dentro del Dominio Costero, las regiones dentro de la PTC (Fig. 21.b) presentan concentraciones de pigmentos con menor variabilidad y valores promedio de  $1 \text{ mg m}^{-3}$ . Las regiones 12 y 17, se caracterizan por surgencias costeras durante invierno. La región 12 (frente a Cabo Corrientes), llega a alcanzar concentraciones  $>3 \text{ mg m}^{-3}$ , precedida de la región 17 (Golfo de Tehuantepec) con concentraciones de pigmentos  $>2 \text{ mg m}^{-3}$ . Las regiones 15, 16 y 18 alcanzan concentraciones máximas  $<1 \text{ mg m}^{-3}$ . Sin embargo durante de 1982 a 1984, la concentración de pigmentos para todas las regiones sufrió un decremento llegando a igualarse con valores  $<0.5 \text{ mg m}^{-3}$ , pero recuperándose nuevamente durante la primavera de 1985.

Lo mismo ocurrió en las regiones pertenecientes a la PCA (Fig. 21.c), donde se observa una disminución en la concentración de pigmentos durante 1982 y 1983, con concentraciones  $<0.3 \text{ mg m}^{-3}$ , seguidas de valores altos de pigmentos durante la primavera de 1984 y alcanzando en verano de 1985, valores  $>1 \text{ mg m}^{-3}$ .

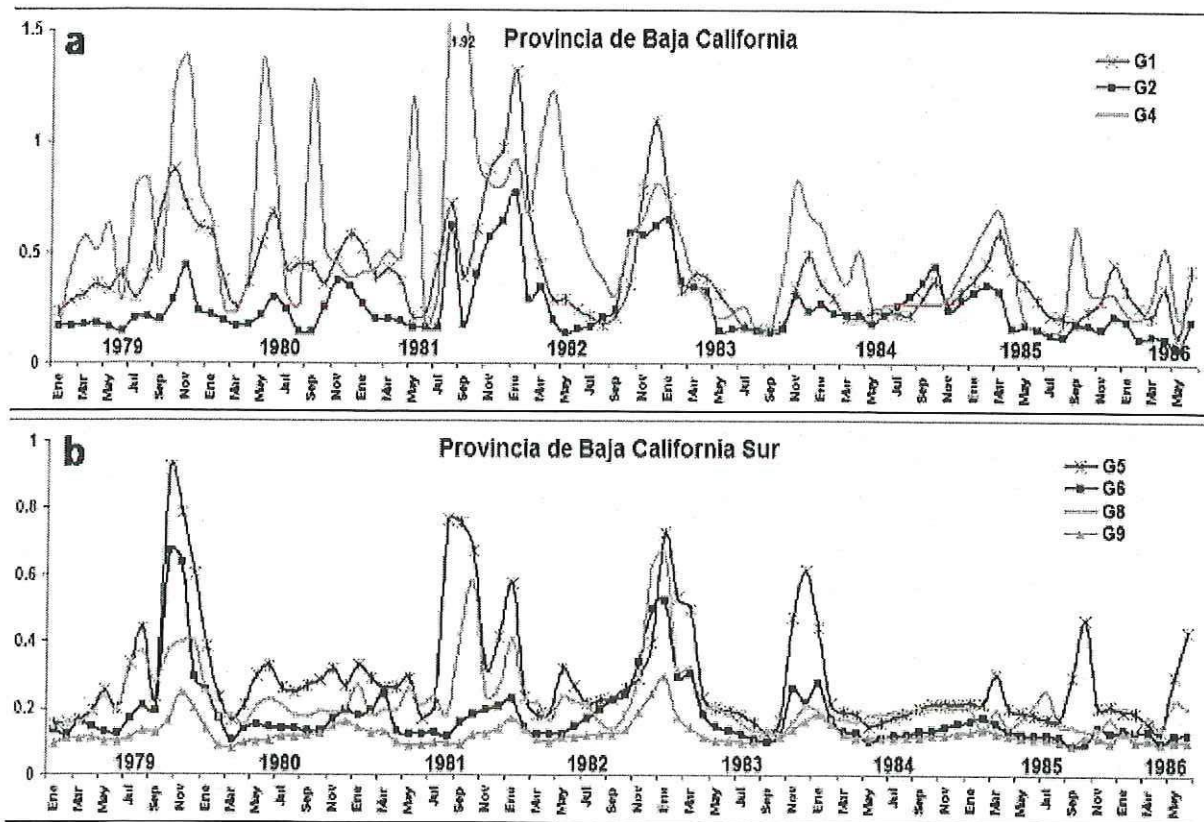


Figura 18. Serie de tiempo de pigmentos ( $\text{mg m}^{-3}$ ) obtenida del CZCS (1979-1986) en el Dominio de la Corriente de California; a) Provincia de Baja California (PBC) y b) Provincia de Baja California Sur (PBS).

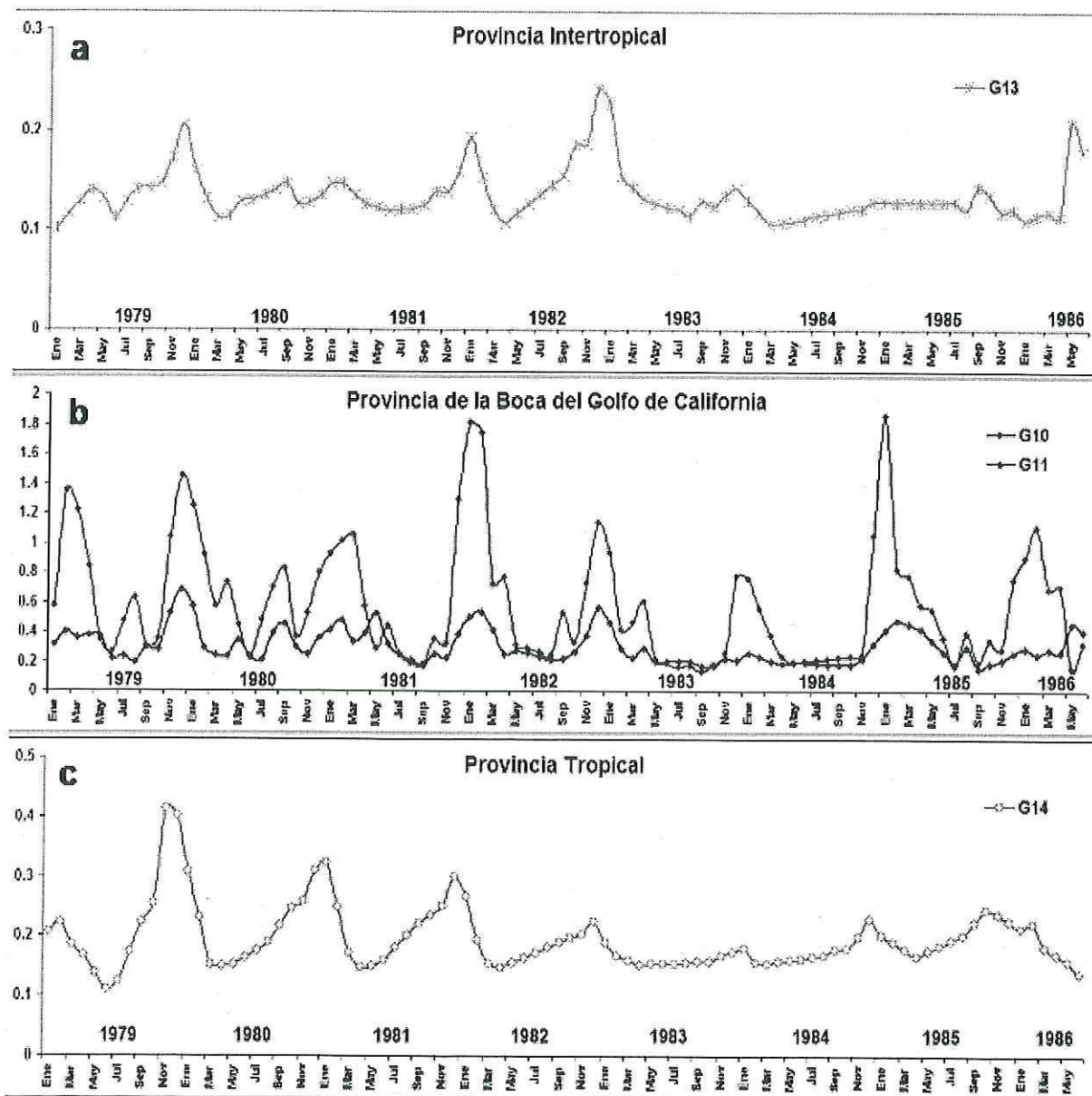


Figura 19. Serie de tiempo de pigmentos ( $\text{mg m}^{-3}$ ) obtenida del CZCS (1979-1986) en el Dominio Tropical; a) Provincia Intertropical (PI), b) Provincia de la Boca del Golfo de California (PBGC) y c) Provincia Tropical Oceánica (PTO).

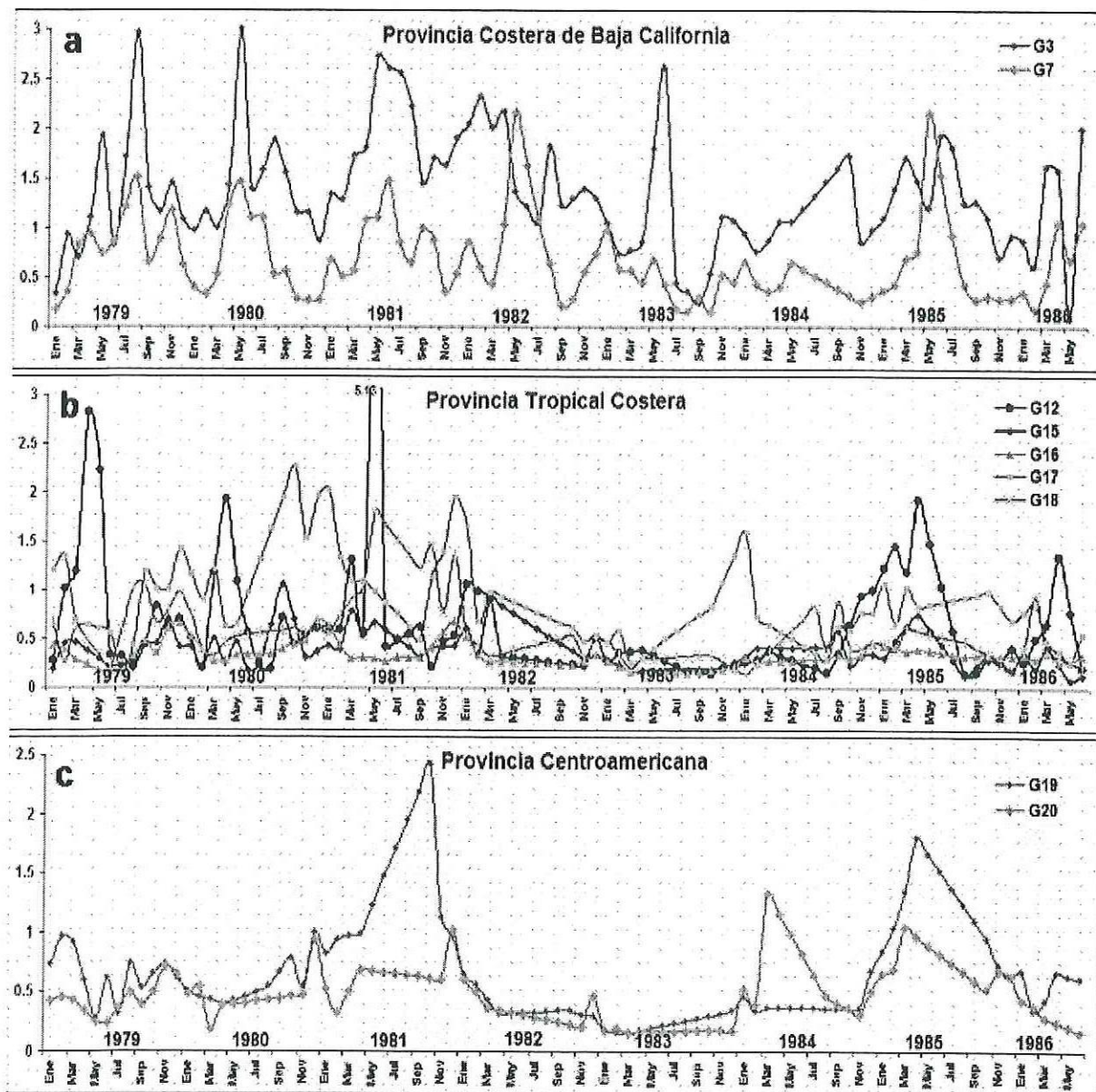


Figura 20. Serie de tiempo de pigmentos ( $\text{mg m}^{-3}$ ) obtenida del CZCS (1979-1986) en el Dominio Costero; a) Provincia Costera de Baja California (PCBC), b) Provincia Tropical Costera (PTC) y c) Provincia Centroamericana (PC).

### **5.3.4 Anomalías de pigmentos ( $\text{mg m}^{-3}$ ) del CZCS (1979-1986)**

A continuación se presentan las anomalías de la concentración de pigmentos del CZCS de los grupos distribuidos en provincias. Conjuntamente se presentan las anomalías del IOS para una comparación del periodo en que se presentó el ENSO 82-83 contra las anomalías de pigmentos. Dentro del Dominio del Sistema de la Corriente de California, las regiones que conforman la PBC (Fig. 22.a), presentan un patrón similar para todas las regiones, con anomalías positivas de concentraciones de pigmentos que van desde -0.6 a +3. La máxima anomalía positiva se presenta en enero de 1982 para las regiones 1 y 2. En la región 4, esta se presentó en agosto de 1981, con valores de +3. También se presentaron anomalías positivas muy altas coincidentes con las mismas fechas de la máxima fase negativa del IOS (febrero de 1983). Sin embargo, durante el verano del mismo año, se observan anomalías negativas de concentración de pigmentos muy marcadas. En la PBCS (Fig. 22.b) se presenta un patrón similar a la anterior, donde las máximas anomalías positivas de concentración de pigmentos coinciden con la máxima fase negativa del IOS, proseguido de anomalías negativas muy marcadas en septiembre de 1983. Nuevamente se presentan anomalías positivas para invierno de 1984 pero no tan conspicuas como las presentadas durante 1983.

En el Dominio Tropical (Fig. 23), se presentan las mayores anomalías positivas de toda la serie (+2), en las mismas fechas de la mayor fase negativa del IOS. En la PI (Fig. 23.a) aparecen anomalías cercanas a 0, a partir de abril de 1983. Lo mismo para la PBGC (Fig. 23.b). Inmediatamente después de estas anomalías presentadas en invierno de 1983, se observa una tendencia de anomalías negativas la mayor parte de 1983 y todo 1984, presentando nuevamente anomalías positivas en la concentración de pigmentos hasta el invierno de 1985. Las anomalías de concentración de pigmentos en la PTO (Fig. 23.c), no presentan un patrón completamente definido, las mayores anomalías positivas se observan en diciembre de 1979, presentando decremento en los picos de anomalías positivas en los años posteriores, siendo en invierno de 1984 donde estas anomalías son cercanas a 0, las cuales se mantienen durante toda la serie de tiempo restante.

En la PCBC, en el Dominio Costero (Fig. 24.a), se observan anomalías negativas en 1983 y 1984, siendo más marcadas al final del verano de 1983 (-1). Dentro del mismo Dominio, la PTC (Fig. 24.b), presenta anomalías negativas desde 1982 hasta verano de 1984. Y con anomalías positivas en 1984-85. Lo mismo ocurre para las regiones de la PCA (Fig. 24.c) donde la tendencia de anomalías negativas se extiende desde verano de 1982 hasta 1984, alcanzando anomalías cercanas a 0 en invierno de este año.

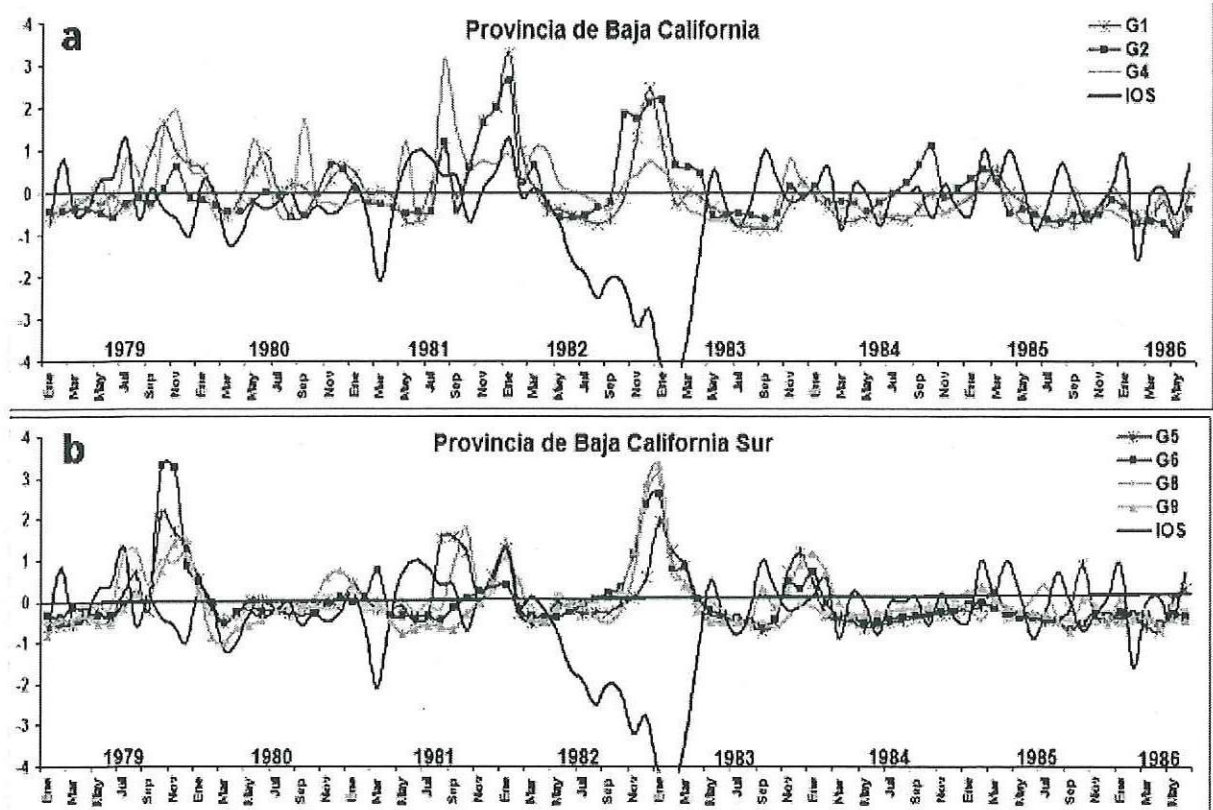


Figura 21. Serie de tiempo de anomalías de pigmentos obtenidos del CZCS (1979-1986) en el Dominio de la Corriente de California; a) Provincia de Baja California (PBC) y b) Provincia de Baja California Sur (PBS).

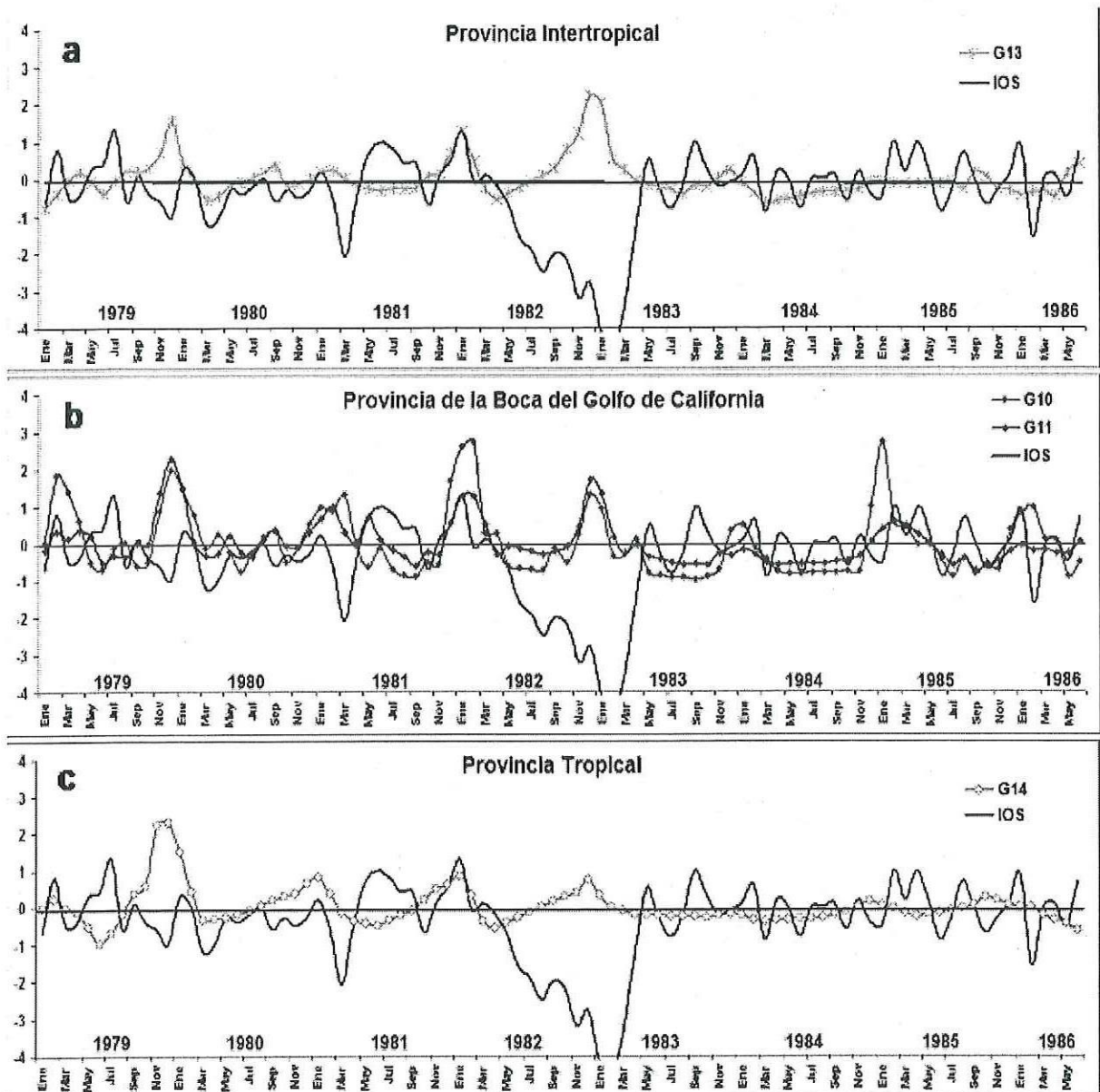


Figura 22. Serie de tiempo de anomalías de pigmentos del CZCS (1979-1986) en el Dominio Tropical; a) Provincia Intertropical (PI), b) Provincia de la Boca del Golfo de California (PBGC) y c) Provincia Tropical Oceánica (PTO).

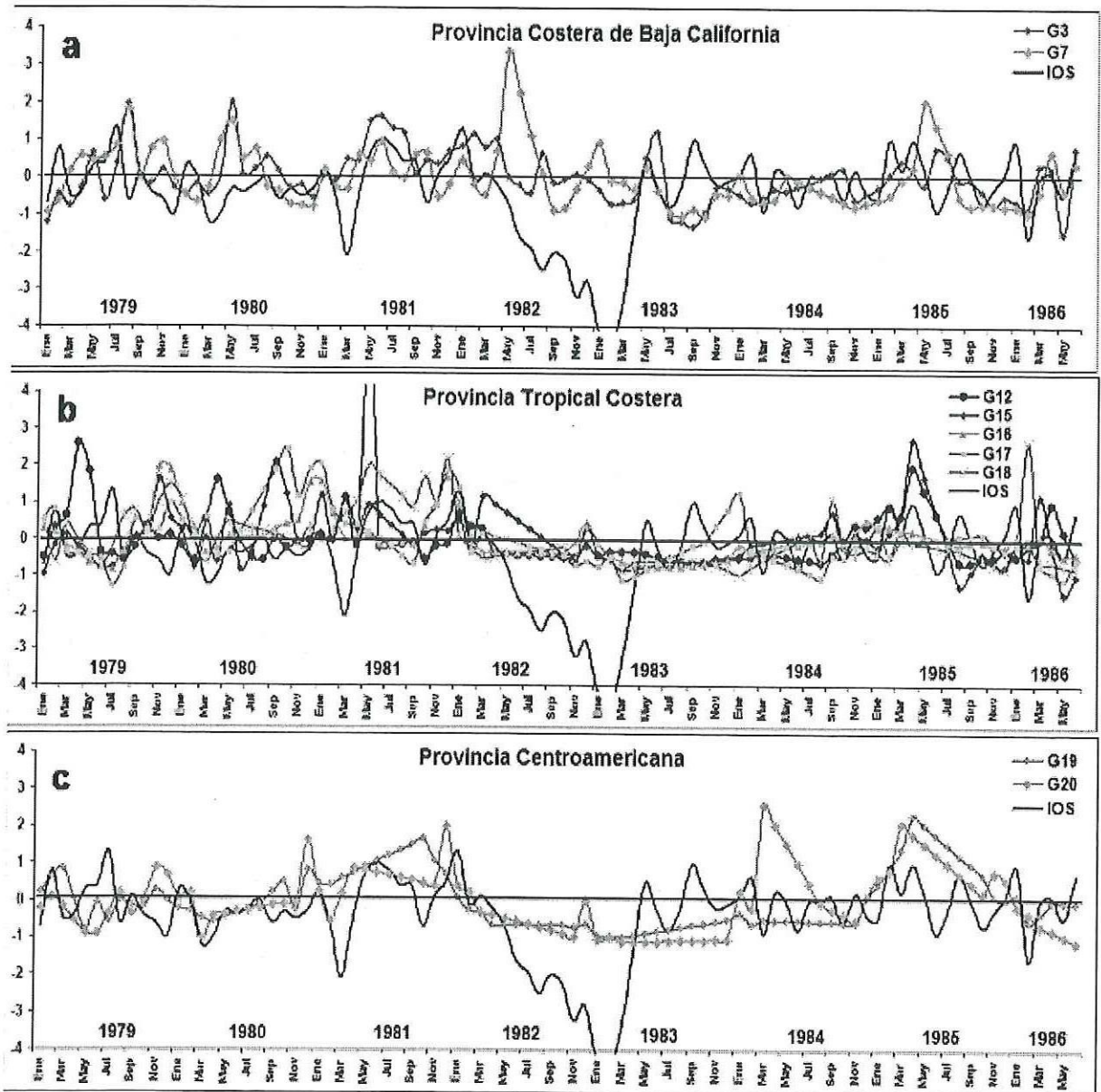


Figura 23. Serie de tiempo de anomalías de pigmentos obtenidos del CZCS (1979-1986) en el Dominio Costero; a) Provincia Costera de Baja California (PCBC), b) Provincia Tropical Costera (PTC) y c) Provincia Centroamericana (PC).

### 5.3.5 Concentración de Clorofila a ( $\text{mg m}^{-3}$ ) de OCTS-SeaWiFS (1996-2002)

Se presentan las series de tiempo de clorofila a ( $\text{mg m}^{-3}$ ) de la base de datos conjunta del OCTS- SeaWiFS (Nov 96 a Dic-02).

Dentro del Dominio del Sistema de la Corriente de California, se muestra la concentración de clorofila a para la PBC (Fig. 25.a), el cual presenta un ciclo estacional más o menos constante. Para las tres regiones que conforman esta provincia se observa una escasa producción de clorofilas durante la serie de tiempo del OCTS (Noviembre de 1996-junio de 1997), con concentraciones de clorofila  $<0.35 \text{ mg m}^{-3}$ , aumentando la concentración en octubre de 1997 para la región 2 ( $0.5 \text{ mg m}^{-3}$ ) y en enero-febrero de 1998 para las regiones 1 y 4 ( $>0.4 \text{ mg m}^{-3}$ ). Todas las regiones sufren un decremento marcado en la concentración de clorofilas en verano de ese año. En la PBCS (Fig. 25.b) el patrón no es tan marcadamente estacional. Las concentraciones máximas de clorofila se presentan en invierno y primavera de 1998 para todas las regiones, resaltando la concentración de clorofila en la región 5 que alcanza casi los  $0.5 \text{ mg m}^{-3}$  en febrero de 1998, y presentando un comportamiento similar en la primavera del 2002. Lo mismo sucede para todas las regiones que conforman esta provincia, donde los máximos picos de clorofila se presentan en estas fechas, presentando valores bajos desde la mitad de 1998 hasta el 2000.

La serie de tiempo de clorofilas para las PI y PTO (Fig. 26.a y 26.c) dentro del Dominio Tropical, presentan concentraciones bajas de clorofilas por pertenecer a zonas oligotróficas. La PI presenta valores no mayores a los  $0.2 \text{ mg m}^{-3}$  de concentración de clorofila, con un máximo en septiembre de 1997 ( $0.25 \text{ mg m}^{-3}$ ) decayendo nuevamente en diciembre. Mientras que la PTO presenta un máximo de concentración de clorofilas en diciembre de 1999 con valores que sobrepasan los  $0.4 \text{ mg m}^{-3}$ . El valor más bajo en esta provincia se presentó en julio de 1998 con apenas  $0.1 \text{ mg m}^{-3}$ .

En la PBGC, perteneciente al mismo Dominio Tropical (Fig. 26.b), la concentración de clorofila a fue baja en los veranos de 1997 y 1998 ( $>0.2 \text{ mg m}^{-3}$ ), con

valores altos durante invierno y primavera, por las surgencias de la época, pero no tan marcadas ( $0.4 \text{ mg m}^{-3}$ ) como se presentan en comparación a las mismas épocas los años posteriores, donde encontramos concentraciones  $>1 \text{ mg m}^{-3}$ .

En el Dominio Costero, las regiones localizadas dentro de la PCBC (Fig. 27.a), presentan estacionalidad muy marcada con concentraciones altas de clorofila  $> 2 \text{ mg m}^{-3}$  en primavera y verano, debido a surgencias costeras. Sin embargo, se observa una marcada atenuación en la producción de clorofilas al inicio de la serie de tiempo en 1997 y principios de 1998, alcanzando valores de  $1 \text{ mg m}^{-3}$  durante la época de surgencias, con recuperación del sistema hasta la primavera de 1999, con valores de clorofila mayores a  $3 \text{ mg m}^{-3}$ .

Dentro de la PTC (Fig. 27.b) existe un patrón claro de estacionalidad para la región 12 (frente a Cabo Corrientes), donde se presentan concentraciones de clorofilas  $>3 \text{ mg m}^{-3}$  durante la época de surgencias de invierno-primavera. En las demás regiones dentro de esta provincia, si se observa una atenuación en la producción de clorofilas, mostrándose mas marcadamente en la región 17 caracterizada por surgencias de invierno, donde existió una completa atenuación en la concentración de clorofilas con valores  $<1 \text{ mg m}^{-3}$  durante el invierno de 1998, recuperándose nuevamente para invierno de 1999, donde se alcanzaron los máximos de clorofila de esta época con valores  $>2 \text{ mg m}^{-3}$ . Para las regiones localizadas en la PCA (Fig. 27.c), se registra una marcada disminución en la concentración de clorofilas durante todo 1997 y 1998, con concentraciones  $<1 \text{ mg m}^{-3}$ , aumentando estos valores en 1999 con concentraciones de clorofila promedio  $>1 \text{ mg m}^{-3}$  para las dos regiones que conforman esta provincia.

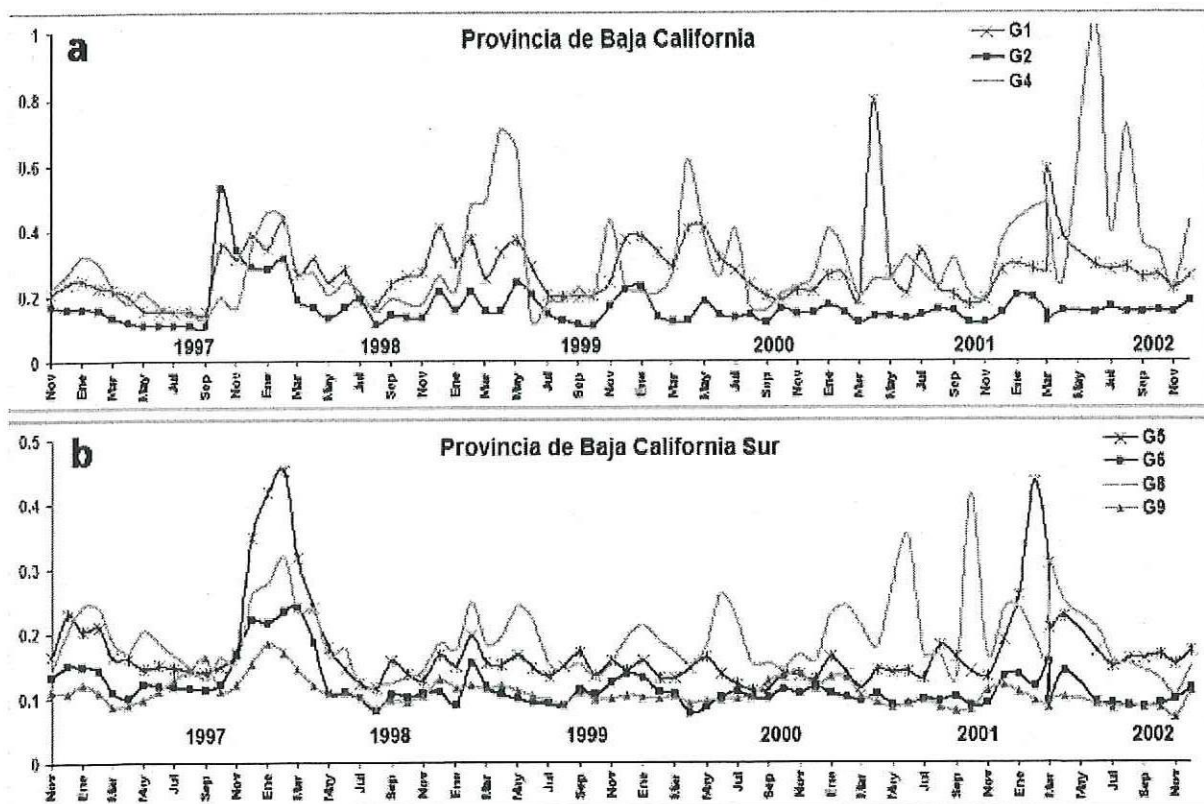


Figura 24. Serie de tiempo de clorofila *a* (mg m<sup>-3</sup>) del OCTS-SeaWiFS (1996-2002) en el Dominio de la Corriente de California; a) Provincia de Baja California (PBC) y b) Provincia de Baja California Sur (PBS).

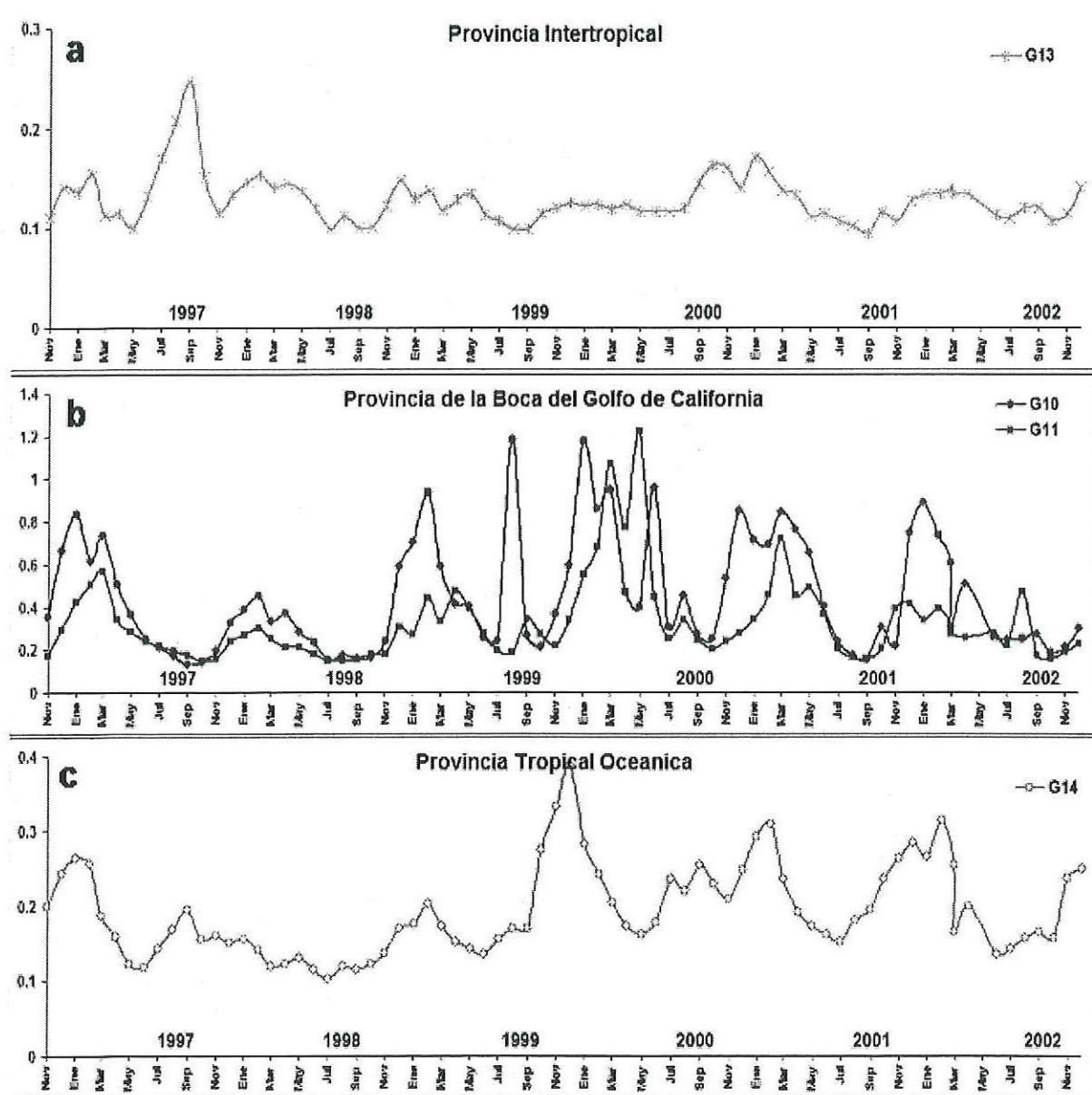


Figura 25. Serie de tiempo de clorofila a ( $\text{mg m}^{-3}$ ) del OCTS-SeaWiFS (1996-2002) en el Dominio Tropical; a) Provincia Intertropical (PI), b) Provincia de la Boca del Golfo de California (PBGC) y c) Provincia Tropical Oceánica (PTO).

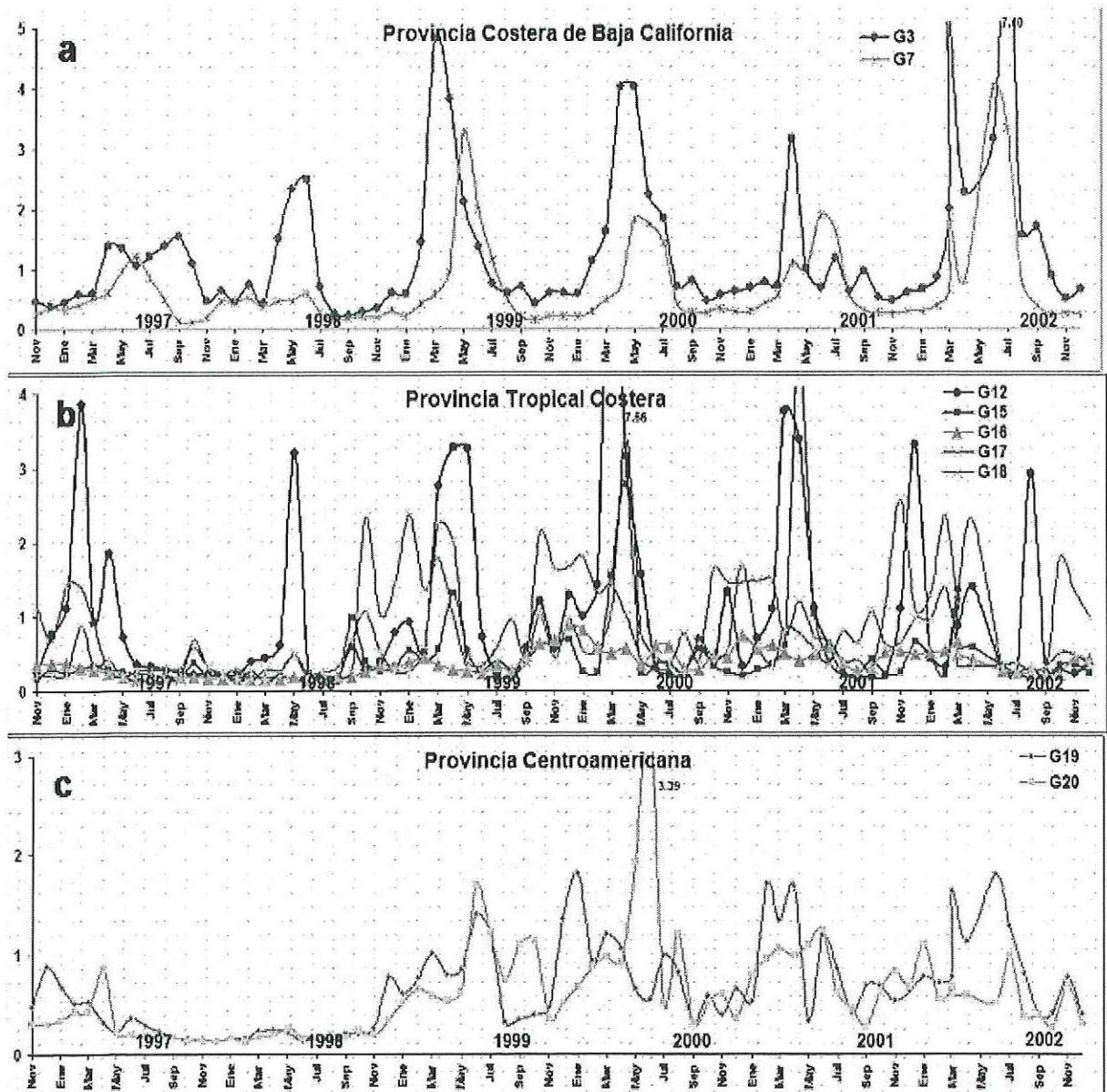


Figura 26. Serie de tiempo de clorofila a ( $\text{mg m}^{-3}$ ) del OCTS- SeaWiFS de (1996-2002) en el Dominio Costero; a) Provincia Costera de Baja California (PCBC), b) Provincia Tropical Costera (PTC) y c) Provincia Centroamericana (PC).

### **5.3.6 Anomalías de Clorofila a ( $mg\ m^{-3}$ ) OCTS-SeaWiFS (1996-2002)**

Se presentan las anomalías de la serie de tiempo del OCTS-SeaWiFS de cada región en cada Provincia, junto con el IOS para comparar el comportamiento de la serie de tiempo de anomalías de la concentración de clorofila a contra las anomalías del IOS que coinciden con la presencia del evento cálido ENSO 1997-98 y la posterior aparición del evento frío La Niña 98-99.

Dentro del Dominio del Sistema de la Corriente de California, en la PBC (Fig. 28.a), al inicio de la señal de la fase máxima negativa del IOS, se observan anomalías negativas en concentración de pigmentos en las regiones de esta Provincia. Sin embargo, poco antes del máximo de la fase negativa del IOS, existe un incremento abrupto de anomalías positivas en la concentración de clorofilas en todas las regiones, coincidente con la época de surgencia de verano (Septiembre de 1997), y extendiéndose hasta invierno de 1998, donde nuevamente se observan anomalías negativas a mediados de 1998. Durante la primavera-verano de 1999 se mantienen anomalías ligeramente positivas, las cuales se mantienen cercanas a 0 durante 2000-2001. La PBCS (Fig. 28.b), muestra un comportamiento similar, sin embargo las mayores anomalías positivas en la concentración de clorofilas se presentaron exactamente en las mismas fechas (febrero-marzo de 1998), en que se presenta la máxima fase negativa del IOS, para después dar paso a la fase positiva, que fue donde se presentaron las anomalías negativas de concentración de pigmentos más marcadas para todas las regiones pertenecientes a esta provincia. Posteriormente las anomalías tienen una tendencia ligeramente negativa con valores cercanos a 0, durante toda la serie de tiempo restante.

En el Dominio Tropical, las PI y PTO (Fig. 29.a y 29.b), localizadas en aguas más oligotróficas, presentan un comportamiento análogo, con anomalías cercanas a 0 en ambas provincias. Se observa un comportamiento similar al presentado por el IOS, difiriendo durante la fase negativa del IOS, que no coincide con el patrón de las Provincias donde las anomalías presentan un comportamiento ligeramente positivo, y presentando las máximas anomalías negativas al comenzar la fase positiva (fría) del IOS, en el verano de 1998.

Para la PBGC (Fig. 29.b) existe un patrón de anomalías negativas durante toda la fase negativa del IOS, presentando únicamente picos de anomalías positivas durante el invierno de 1998, para después decaer nuevamente con anomalías negativas (-1) en verano de 1998. Las máximas anomalías positivas para la región 10 se presentan en 1998, no siendo así para la región 11 donde la tendencia negativa permanece hasta verano del 2000 donde se presentan las mayores anomalías positivas de toda la serie de tiempo.

En la PCBC, dentro del Dominio Costero (Fig. 30.a), existe una estacionalidad muy clara, presentando las mayores anomalías positivas de concentración de Clorofila durante las épocas de surgencias de verano en la zona, las cuales se vieron casi anuladas en el verano del 1997 y 1998, con valores negativos muy cercanos a 0, durante toda la fase negativa del IOS, y recuperándose casi al final de la fase positiva del IOS, en primavera-verano de 1999.

Mas al sur, la PTC y la PCA (Fig. 30.b y 30.c), presentan anomalías negativas predominantes durante la fase negativa del IOS, persistiendo inclusive cuando se invierte el patrón del IOS hacia la fase positiva, siendo al final de esta donde se comienzan a observar anomalías positivas en la concentración de clorofilas en las regiones de ambas Provincias, hasta la primavera de 1999. Durante toda la serie de tiempo restante 2000-02 se presentan comportamientos estacionales en las anomalías de la concentración de Clorofilas, sin embargo al final de la serie se puede observar anomalías negativas ligeramente mas marcadas, por el inicio de una nueva tendencia negativa del IOS.

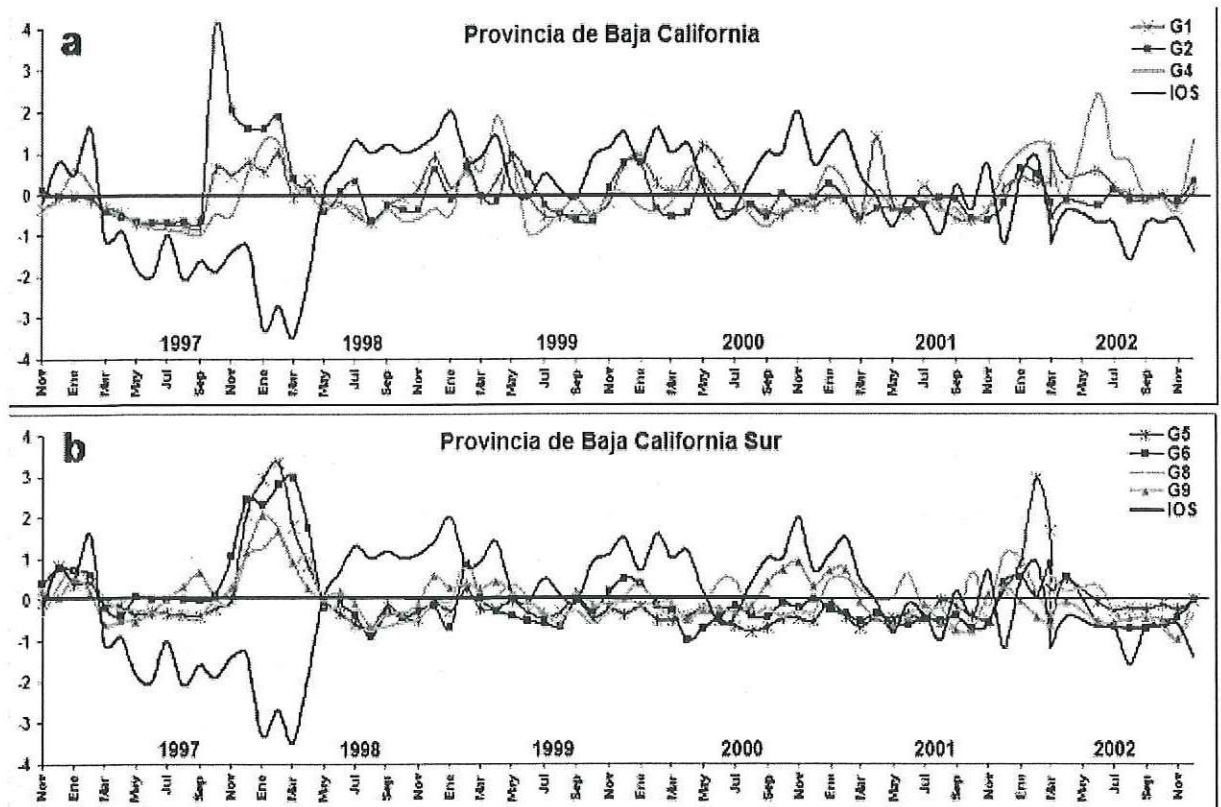


Figura 27. Serie de tiempo de anomalías de clorofila a del OCTS- SeaWiFS (1996-2002) en el Dominio de la Corriente de California; a) Provincia de Baja California (PBC) y b) Provincia de Baja California Sur (PBS).

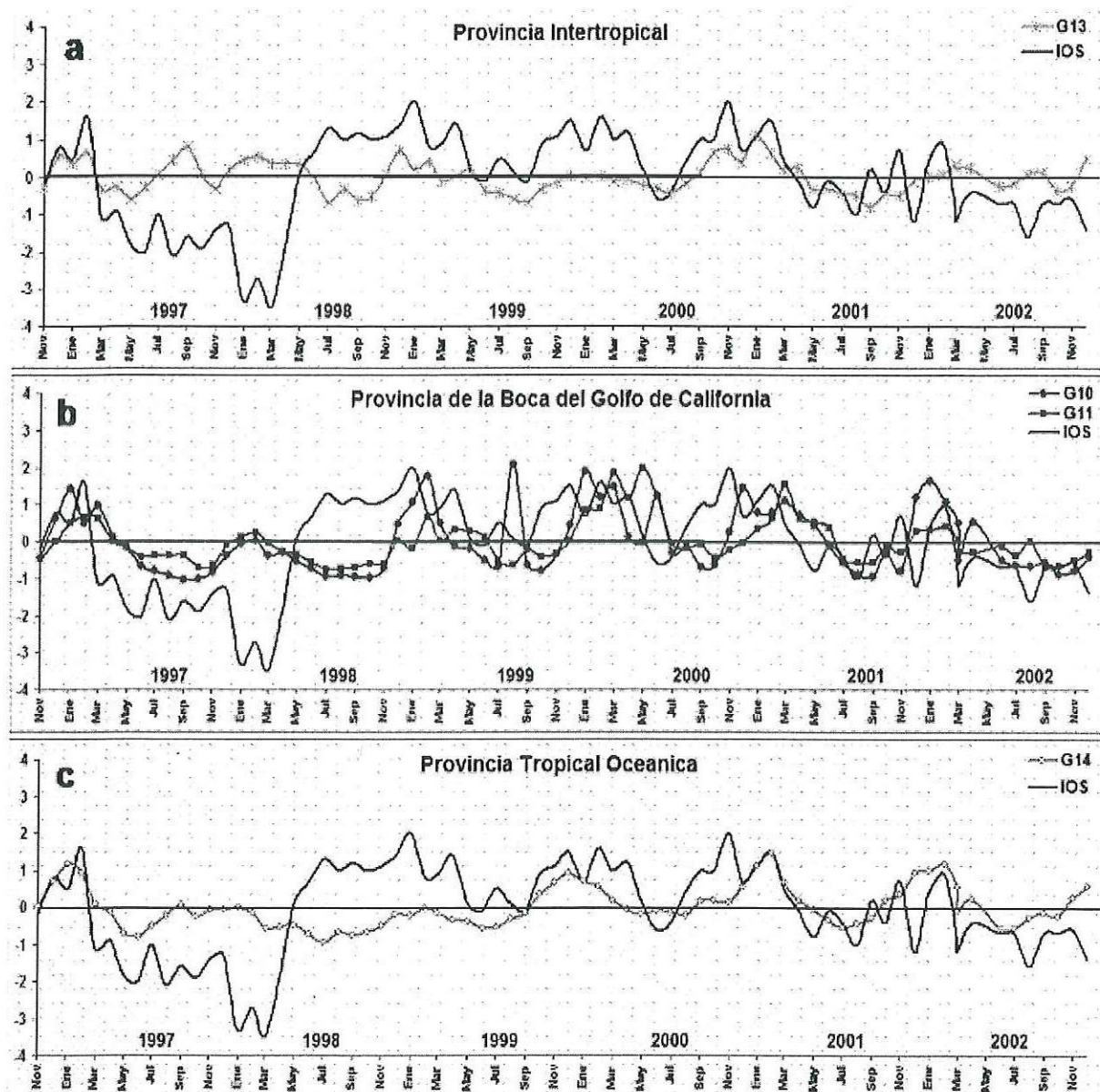


Figura 28. Serie de tiempo de anomalías de clorofila a del OCTS-SeaWiFS (1996-2002) en el Dominio Tropical; a) Provincia Intertropical (PI), b) Provincia de la Boca del Golfo de California (PBGC) y c) Provincia Tropical Oceánica (PTO).

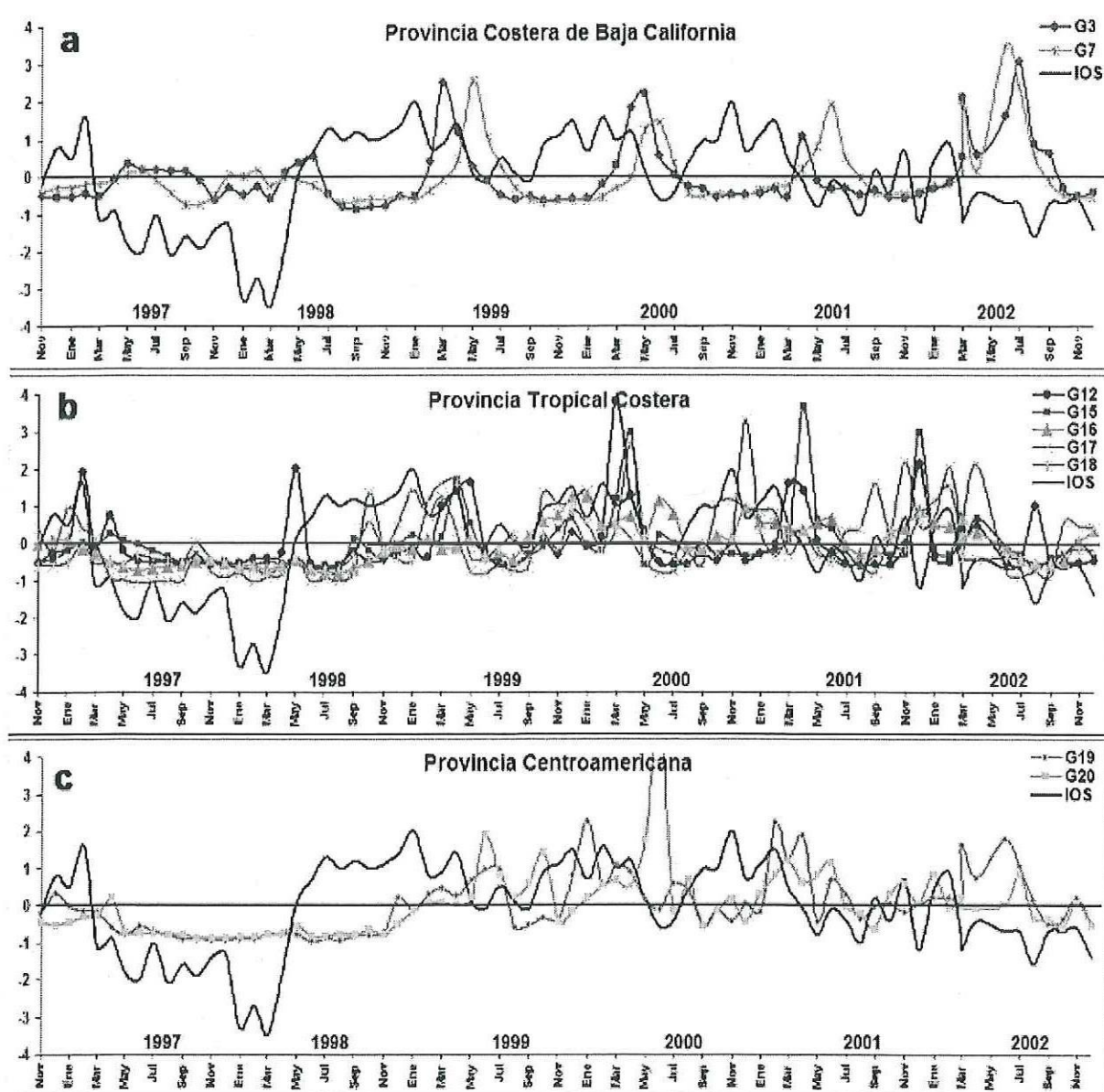


Figura 29. Serie de tiempo de valores estandarizados de clorofila a del OCTS-SeaWiFS (1996-2002) en el Dominio Costero; a) Provincia Costera de Baja California (PCBC), b) Provincia Tropical Costera (PTC) y c) Provincia Centroamericana (PC).

## 5.4 Diagramas Hovmoller

En estos diagramas observamos la evolución de señales anómalas que se propagan a lo largo del borde oriental, en este caso, detectamos la señal del ENSO y La Niña dentro de cada base de datos.

### 5.4.1 Temperatura Superficial (AVHRR)

La Figura 31.a muestra las anomalías de la TSM desde 1983 a 2002, considerando la estructura latitudinal fija (11° N a 33° N) siguiendo la línea de costa (el segundo píxel). Debido a que las anomalías de TSM presentan una variación estacional, es difícil señalar puntualmente la presencia del fenómeno. Sin embargo, en el diagrama se observan los mayores valores anómalos (positivos y negativos) coincidentes con los eventos ENSO y La Niña. Las flechas sólidas muestran eventos cálidos, las flechas punteadas muestran la presencia de un evento frío.

Se observan anomalías positivas de TSM (+3) durante El Niño 83-84 a partir de 22° N, no siendo muy claras en latitudes más bajas. Sin embargo, en 1985, durante la presencia de La Niña, las anomalías negativas más marcadas de TSM se presentan en la zona en latitudes bajas, siendo poco perceptible a partir de los 25° N. Se observa también la presencia de El Niño 86-86, sin embargo, este provocó anomalías positivas marcadas hasta los 27° N, siendo casi imperceptible su presencia a latitudes más altas. La Niña 89, es mucho más marcada que la presentada anteriormente a lo largo de todo el borde costero mexicano, con anomalías de TSM de -1 en invierno de ese año. También se observa la presencia de anomalías positivas de TSM durante El Niño 92-93, enfatizándose más en latitudes altas (a partir de 23° N). Este no fue precedido de anomalías negativas de TSM que caracterizan la aparición de un evento frío. La franja de anomalías positivas de TSM durante 1997-1998 es más amplia, siendo más intensa conforme nos desplazamos hacia el Norte. En invierno de 1999, se observan claras anomalías negativas de TSM, coincidentes con la presencia de La Niña presentada en esas fechas.

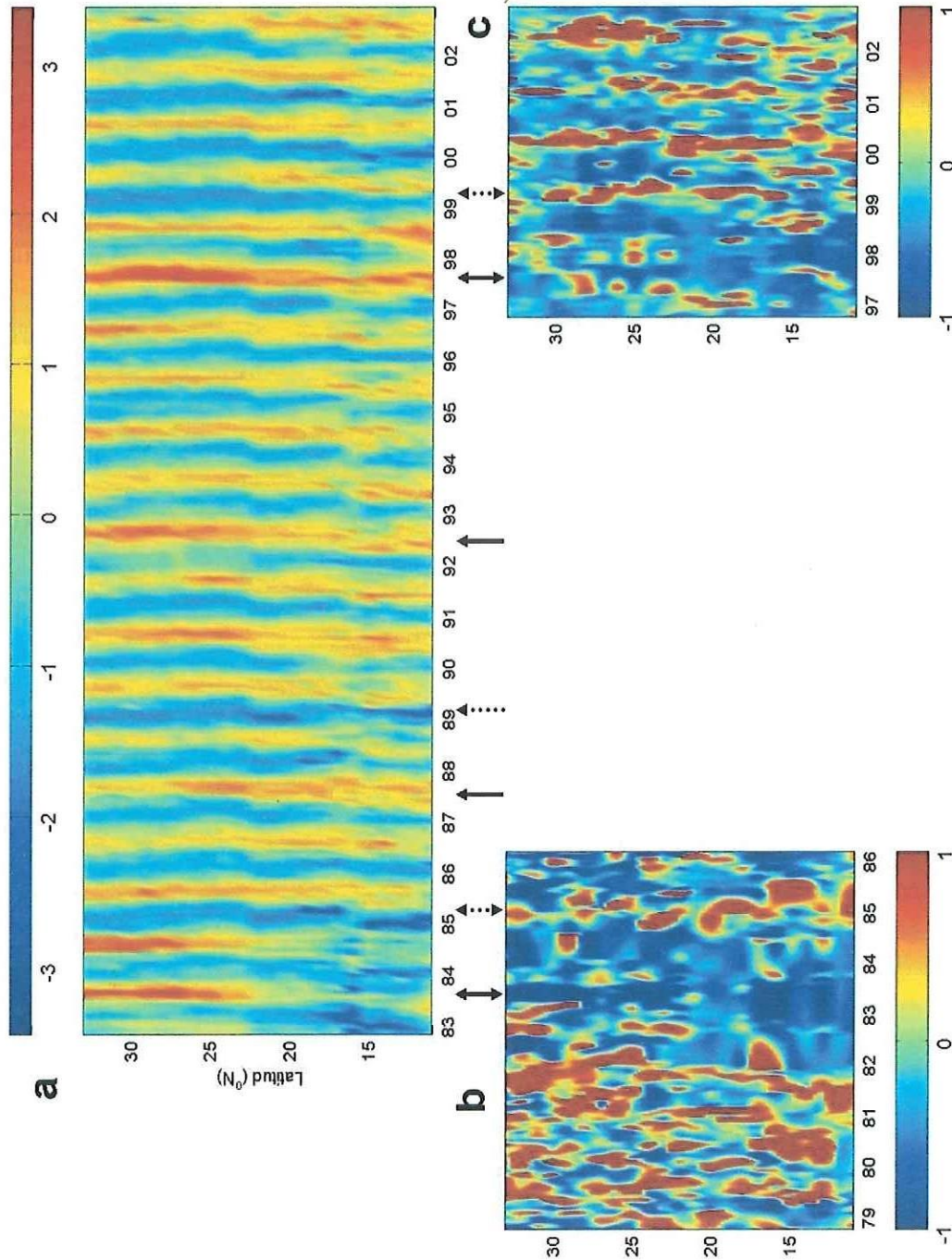


Figura 30. Diagramas de Hovmoller: a) anomalías de TSM (1983 a 2002), b) anomalías de pigmentos del CZCS (1979-1986) y c) anomalías de clorofila a del OCTS-SeaWIFS (1996-2002) a lo largo de todo el borde continental mexicano. Las flechas sólidas indican la presencia de un ENSO, las flechas punteadas indican la presencia de La Niña.

#### 5.4.2 Pigmentos (CZCS) y Clorofila *a* (OCTS-SeaWiFS)

Se muestra el comportamiento temporal de anomalías de pigmentos de la base de datos del CZCS de 1979 a 1986 del primer píxel frente a la línea costera desde 11° N a 33° N (Fig. 31.b). En este caso no se presenta un comportamiento estacional claro de las anomalías de pigmentos. Se puede observar que el inicio de la serie temporal de 1979 hasta 1982 se encuentra caracterizado por anomalías positivas de pigmentos a lo largo de toda la franja costera, siendo hasta mediados de 1982, cuando comienza una tendencia hacia anomalías negativas. En la mayor parte de 1983 y 1984 existe un predominio de anomalías negativas de pigmentos. La flecha sólida señala los valores críticos (anomalía -1) durante el verano de 1983, que es la etapa de la máxima fase cálida ENSO 1983-84. En el verano de 1984 también predominan anomalías negativas, aunque menos acentuadas (-0.6). Es hasta el invierno de 1985 cuando se revierte la tendencia hacia anomalías positivas, lo cual coincide con la presencia de la fase fría La Niña (flecha punteada). Sin embargo, se observa claramente que estas no llegan a igualar a las anomalías positivas previas a ENSO.

La Figura 31.c muestra el comportamiento temporal de anomalías de Clorofila *a* de la base de datos del OCTS-SeaWiFS de 1996 a 2002 del primer píxel frente a la línea costera desde 11°N a 33°N. Aquí se observa un comportamiento de anomalías de clorofilas más o menos estacional, con el predominio de anomalías positivas en invierno de cada año. El inicio de la serie de tiempo se encuentra caracterizado por anomalías negativas, coincidente con la presencia del evento cálido ENSO 1997-98. Los valores negativos más acentuados (-1), se presentan casi por igual en los veranos de 1997 y 1998 a lo largo de toda la línea costera. Es hasta el invierno de 1999 cuando se revierte este patrón hacia anomalías positivas grandes de clorofila *a* (+1), coincidentes con la presencia de La Niña en 1999, sin embargo se puede observar que la franja más ancha de anomalías positivas a lo largo de toda la línea costera, se presenta en invierno-primavera del 2000.

## 5.5 Funciones Empíricas Ortogonales (FEO's) Globales.

### 5.5.1 Temperatura (AVHRR)

Se presenta la estructura espacial (Fig. 32.a) y temporal (Fig.32.b) del primer FEO o modo obtenido de la secuencia mensual de imágenes de anomalías de TSM. Este contiene el mayor porcentaje de varianza (53%). La estructura temporal, que modula la estructura espacial, muestra amplitudes cambiantes debido a la influencia de variabilidad estacional, aunque, son evidentes las mayores amplitudes en los eventos anómalos. La estructura espacial muestra la mayor variabilidad sobre los  $\sim 18^\circ$  N. Resalta las mayores amplitudes frente a la boca del Golfo de California, mostrando la influencia que tiene este sobre el Pacífico. La variabilidad de toda el área de estudio está dominada por la Corriente de California, Boca del Golfo de California y Golfo de Tehuantepec. El segundo y tercer modo representan el 18% y 5% de varianza respectivamente de la variabilidad total (no mostrados en la figura), en ambos la estructura temporal todavía tiene la influencia de la señal estacional.

### 5.5.2 Pigmentos (CZCS) y Clorofila *a* (OCTS-SeaWiFS)

Se presenta la estructura espacial (Fig. 33.a1) y temporal (Fig. 33.b1) del primer FEO o modo obtenido de la secuencia mensual de datos de anomalías del CZCS. Los tres primeros modos representan un 38 % de la varianza explicada. La estructura espacial y temporal no rescatan en general, el comportamiento global de los pigmentos. La estructura temporal del primer modo, el cual es más representativo con el 23% de la varianza explicada, este muestra de 1979 a 1983, un aparente comportamiento estacional con las mayores amplitudes positivas, y en lo que resta de la serie de tiempo, no muestra fluctuaciones significativas. La estructura espacial muestra la mayor variabilidad en las regiones costeras, siendo coherente con lo observado por Zuria-Jordan *et al.*, (1995) y Luch-Cota (1997, 2000).

La estructura espacial (Fig. 33.a2) y temporal (Fig. 33.b2) del primer FEO o modo obtenido de la secuencia mensual de datos de anomalías de clorofila *a*, muestra que los tres primeros modos representan un 35 % de la varianza explicada. Es decir,

se repite el patrón mostrado por los pigmentos. La estructura temporal del primer modo, muestra un comportamiento estacional excepto el decaimiento de la clorofila en el Niño 1997-98. La estructura espacial muestra la mayor variabilidad en las regiones costeras y en bajas latitudes. En resumen, los tres primeros modos se caracterizan por un mínimo de amplitudes en el periodo de ENSO.

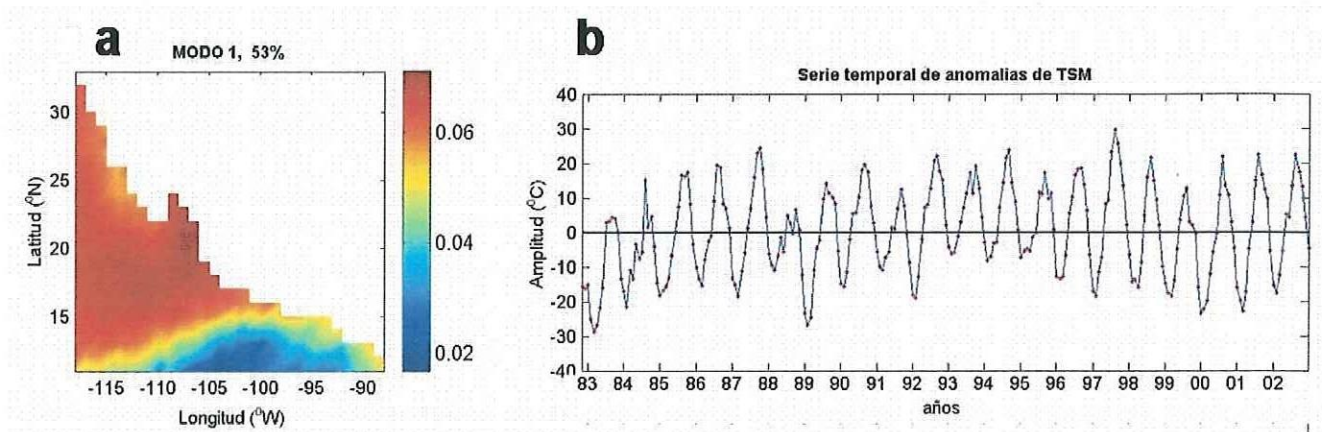


Figura 31. Primer FEO o modo de la serie de tiempo de TSM (AVHRR); a) Estructura espacial y b) Estructura temporal

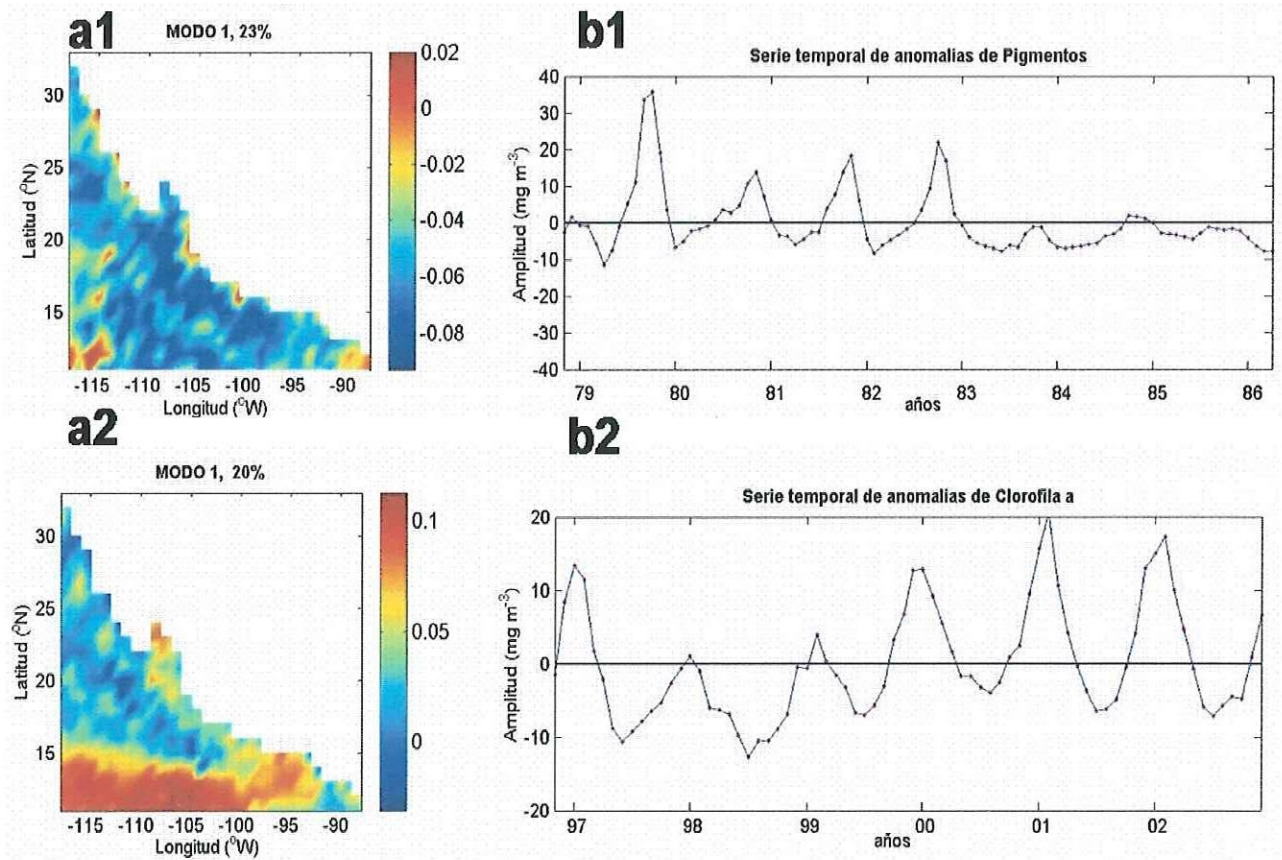


Figura 32. Primer FEO de la serie de tiempo de pigmentos (CZCS); a1) Arreglo espacial, b1) Arreglo temporal; y Primer FEO de la serie de tiempo de Clorofila a (OCTS-SeaWiFS); a2) Arreglo espacial, b2) Arreglo temporal

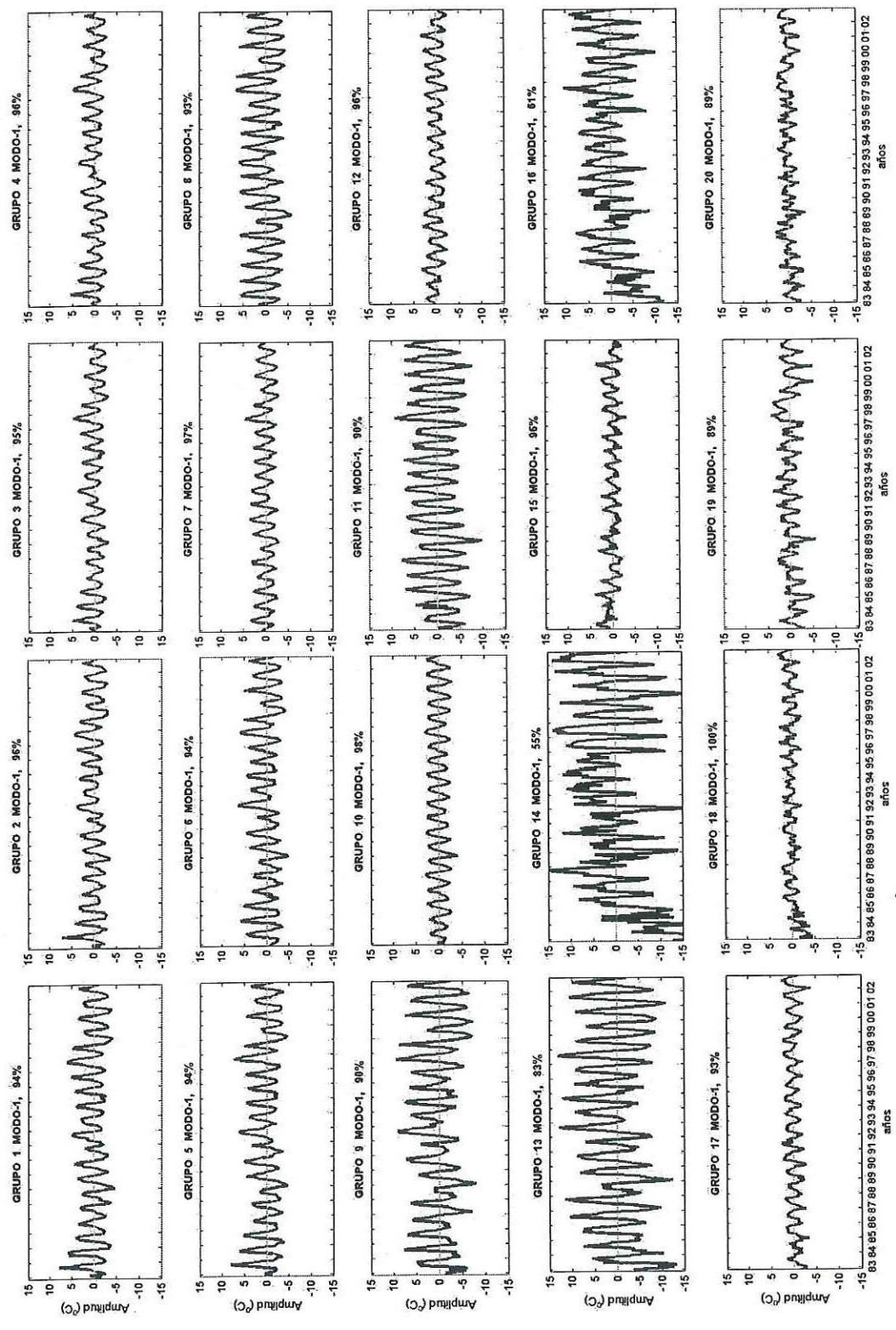


Figura 33. Primer modo o FEO por grupos, de anomalías de TSM.

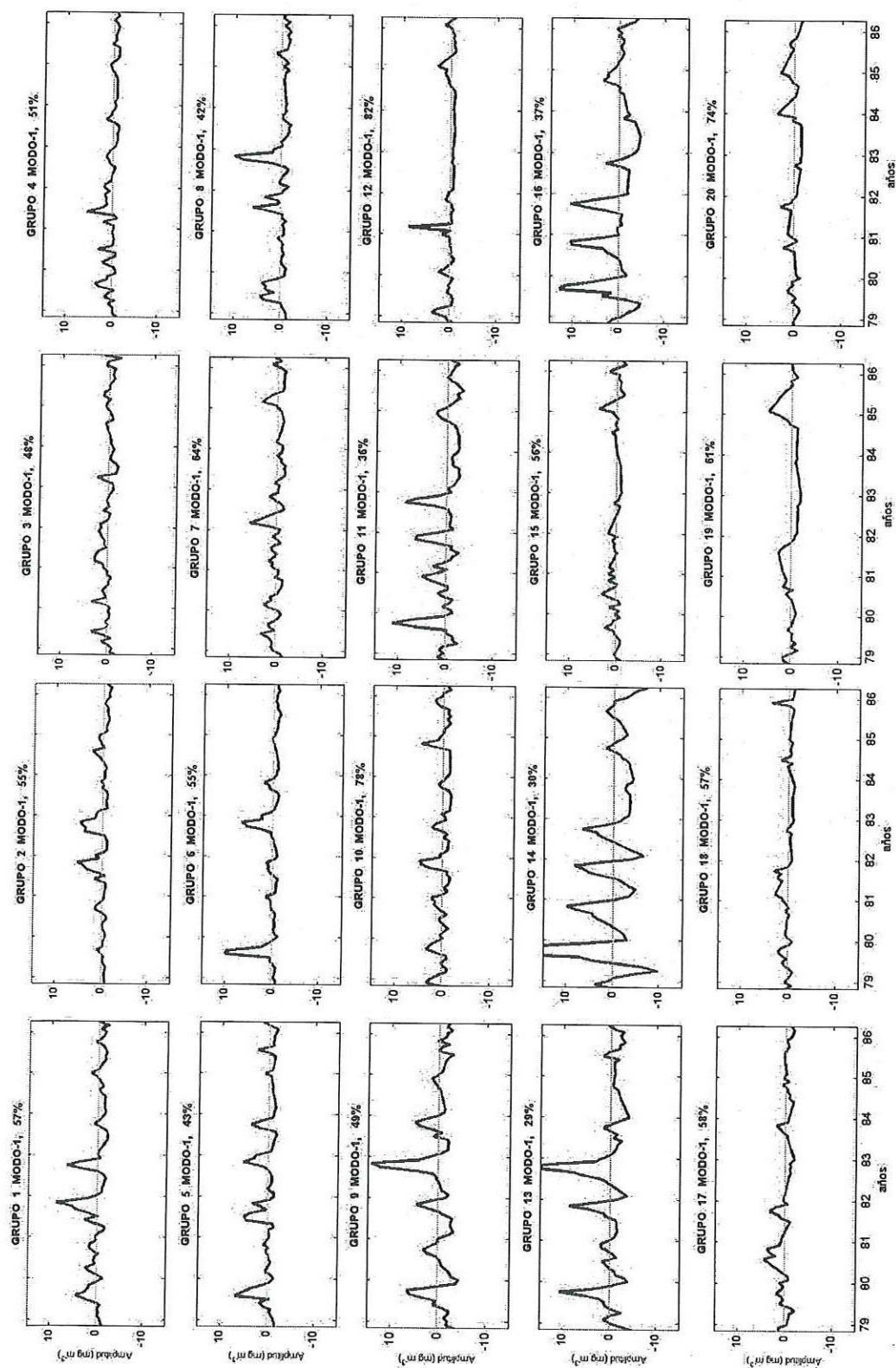


Figura 34. Primer modo o FEO por grupos, de anomalías de pigmentos del CZCS.

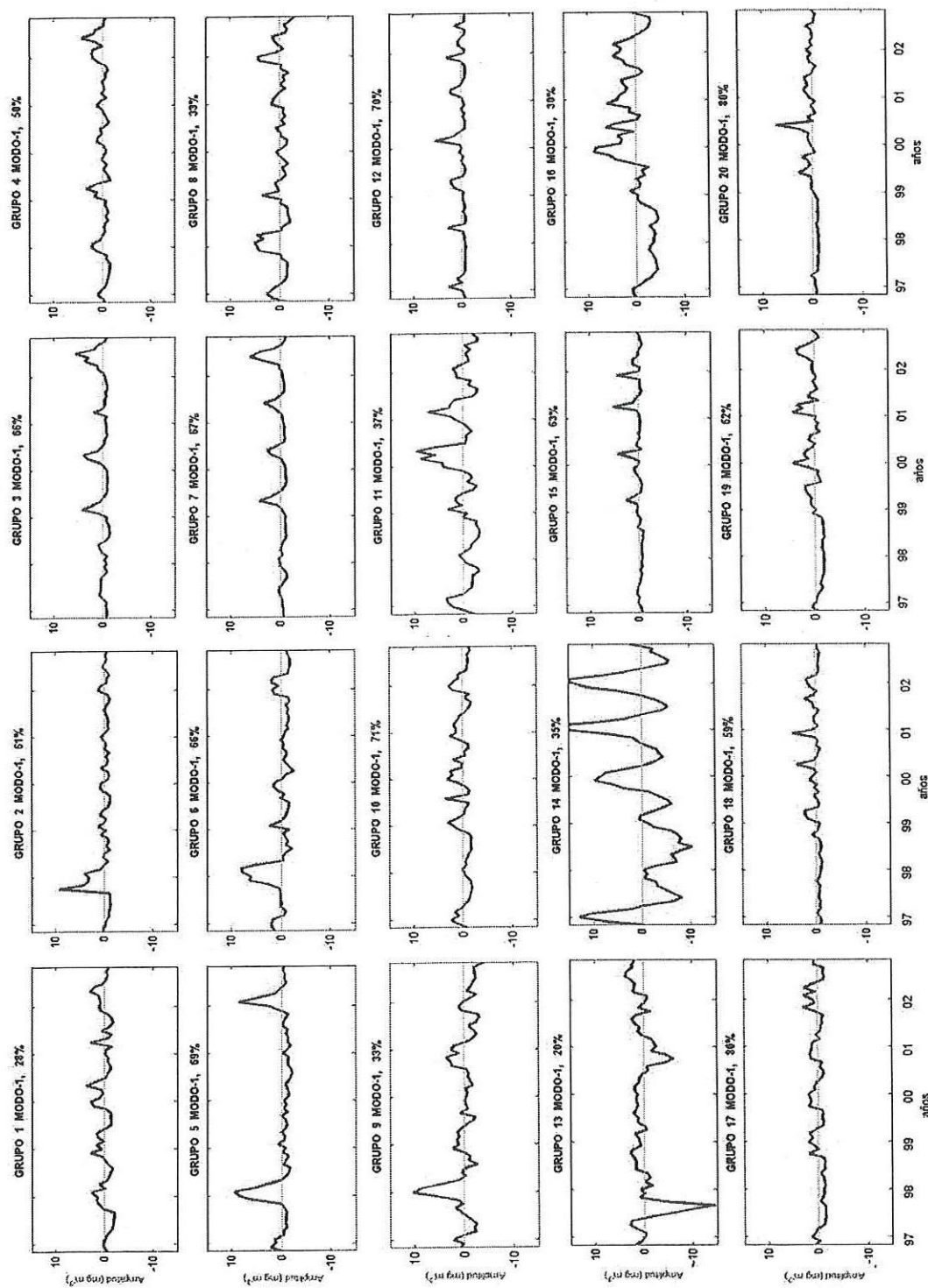


Figura 35. Primer modo o FEO por grupos, de anomalías de clorofila a (OCTS-SeaWiFS)

## 5.7 Correlación Cruzada

### 5.7.1 Temperatura (AVHRR)

Se presentan los gráficos de las correlaciones efectuadas, las cuales se presentan en un mapa con divisiones por regiones para mejor visualización de resultados. Para correlacionar la TSM contra el IOS, se dividió la serie de tiempo en dos partes. Se efectuó la correlación de cada FEO de la TSM vs el IOS, comparando solo el lapso de 1983 a 1985 (Fig. 37). El número de lag o desfase es el mes después de la máxima fase negativa del IOS cuando se observan las máximas correlaciones negativas de TSM. Se observa una tendencia en desplazamiento de sur a norte de la onda de agua cálida en la zona oceánica. En la región 14 se presenta la máxima correlación negativa, en el desfase 0, lo que sugiere que esta fue la zona inicialmente afectada por la masa de agua cálida. Se observa un aumento en el número de desfases o meses, conforme nos acercamos a las regiones ubicadas en la parte norte (en la zona oceánica). Las regiones ubicadas en la zona costera en el Pacífico Tropical se aíslan de este comportamiento. En particular las regiones cercanas a la línea de costa muestran un retardo muy marcado, sin mostrar una tendencia clara de la presencia de la señal en la latitudinal. La región 18, localizada en el Golfo de Tehuantepec, representa la zona con una señal más retardada con un desfase de 12 meses. Le siguen las regiones 19 y 20 localizadas dentro de la PCA con un desfazamiento de 10 meses. La región 8 ubicada en Cabo corrientes, presenta un desfase de 8 meses, y finalmente todas las regiones dentro del Dominio del Sistema de la Corriente de California, presentan un retardo de 7 meses.

La correlación efectuada en la otra parte de la serie de tiempo de TSM, la cual abarca de 1996 a 2002 (Fig. 38), presenta una mayor uniformidad entre lags, sin ningún indicio de un desplazamiento en la señal de la onda cálida hacia cada grupo latitudinal o longitudinalmente. Lo que se observó fue que la máxima señal de la fase negativa del IOS se presentó exactamente 6 meses después (marzo de 1998), de que se presentaron las máximas anomalías positivas de TSM lo que ocurrió principalmente en septiembre de 1997. La señal máxima del IOS decayó inmediatamente para dar paso a una fase positiva o fría (La Niña), cosa distinta a lo que sucedió con el evento del 82-83, cuya fase negativa se mantuvo durante varios meses (Ver Fig. 6).

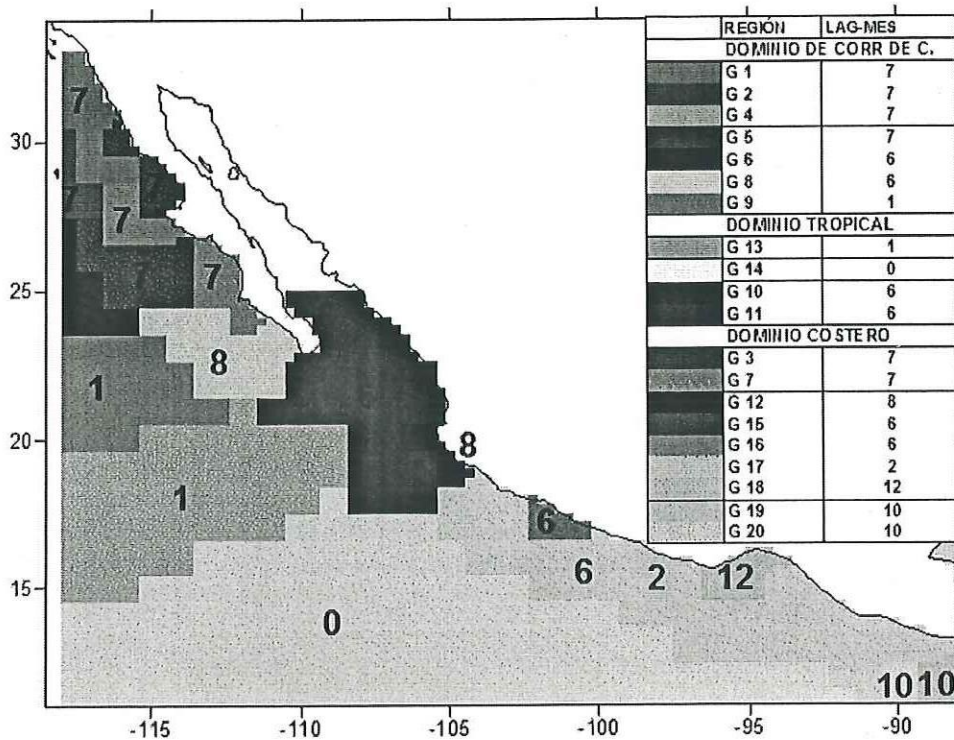


Figura 36. Correlación Cruzada del primer FEO vs el IOS, de la serie de tiempo de TSM (AVHRR) de 1982-1986, el número en cada recuadro representa el lag donde se alcanza la correlación máxima.

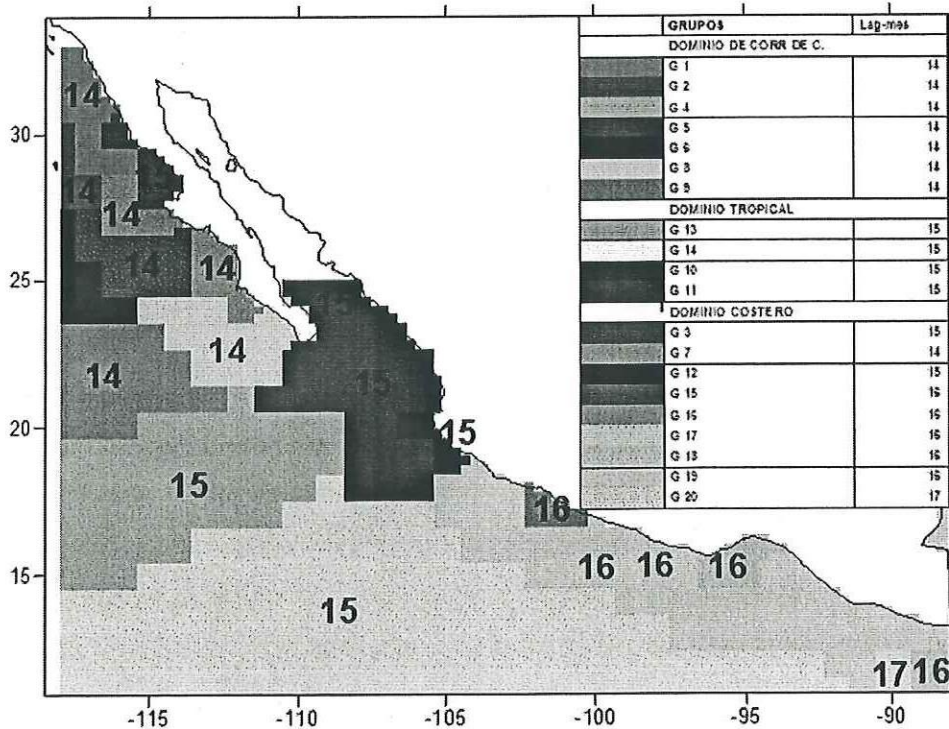


Figura 37. Correlación Cruzada del primer FEO vs el IOS, de la serie de tiempo de TSM de 1996-2002, el número en cada recuadro representa el lag donde se alcanza la correlación máxima.

### 5.7.2 Pigmentos (CZCS)

Se efectuó la correlación del FEO de pigmentos del CZCS de cada región vs el IOS, en el periodo 1982 a 1985, para detectar la señal del ENSO 1982-83 en cada una de las regiones (Fig. 39). Se debe tener en cuenta que el número de lag o desfase equivale al número de mes en que se observa la máxima asociación entre el decaimiento de pigmentos en cada región con la fase negativa máxima del IOS.

En general, se observa un desplazamiento de la señal en la latitudinal de sur a norte. Las regiones ubicadas en el Pacífico Tropical muestran una señal temprana, siendo las regiones costeras tropicales (regiones 15, 16, 17, 19 y 20) las que presentan la máxima señal negativa del IOS casi conjunta con las más amplias anomalías negativas. Se observa un aumento en el número de meses, conforme nos acercamos a los grupos ubicados en la parte norte. En las regiones dentro del Dominio de la Corriente de California, el desfazamiento fue superior a los 12 meses, a partir de la zona de transición. Contrario a lo presentado en TSM efectuando el mismo análisis, las regiones dentro del Dominio Costero presentan una señal más temprana en comparación a las regiones adyacentes oceánicas, lo cual se puede observar claramente en las regiones 3 y 7 adyacentes a la península de Baja California, ambas con un desfase de 8 meses. Las regiones adyacentes a la Boca del Golfo de California presentan también un retardo en la señal de decaimiento de pigmentos asociado a la fase negativa máxima del IOS (15 meses). Lo mismo sucede en particular, con la región 18 ubicada en el Golfo de Tehuantepec, con un retardo de 8 meses.

### 5.7.3 Clorofila *a* (OCTS-SeaWiFS)

La correlación efectuada del FEO de cada región de la serie de clorofila *a* del OCTS-SeaWiFS vs el IOS, que abarcó de 1997 a 2000 (Fig. 39), muestra un comportamiento similar de la efectuada en el CZCS. Igualmente las áreas con una señal más temprana se encontraron en la parte más sureña del Pacífico Mexicano, con un desfazamiento de 0 meses en todas las regiones en la zona costera en el Pacífico Tropical (regiones 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19 y 20). Esto a diferencia del análisis

efectuado para el ENSO 82-84, no discrimina la presencia de la señal en la zona oceánica y la zona costera. Se observa un retardo mayor a partir de la zona de transición hasta el área dominada por la Corriente de California. Sin embargo, aquí el retardo fue menor a los 12 meses en la parte más oceánica en este sistema. Dentro de esta misma zona, las regiones adyacentes a la línea de costa (regiones 3 y 7) presentaron un retardo en la señal mucho mayor. Las regiones cercanas a la Boca del Golfo de California (regiones 10 y 11), presentaron el mayor retardo con 22 lags (meses).

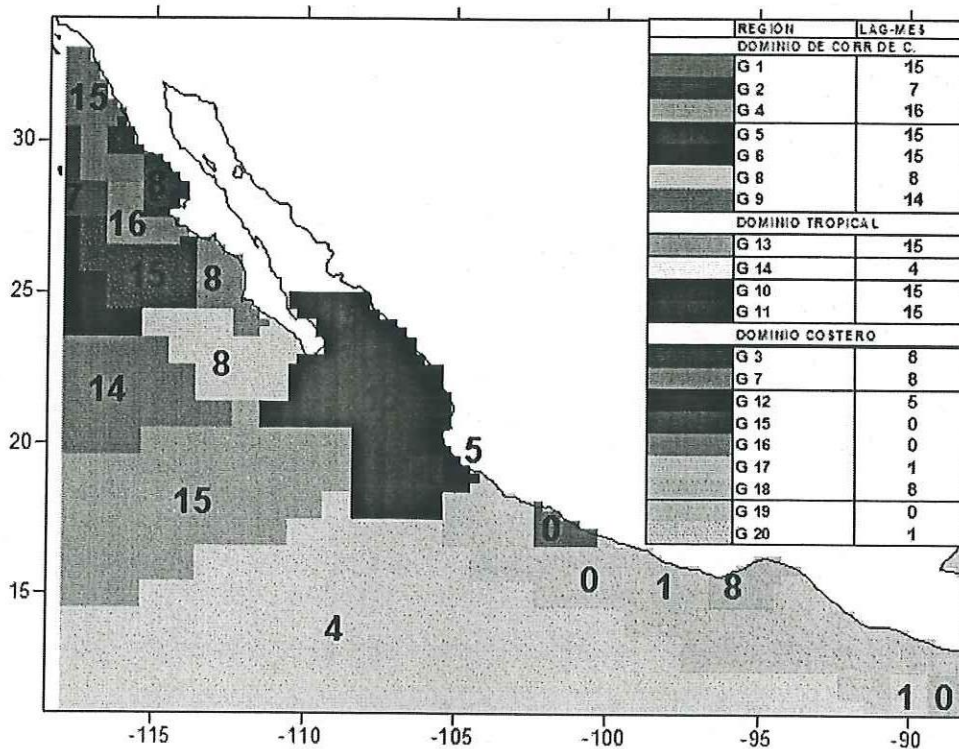


Figura 38. Correlación Cruzada del primer FEO de pigmentos del CZCS de 1979-1986 vs IOS, el número en cada recuadro representa el lag donde se alcanza la correlación máxima.

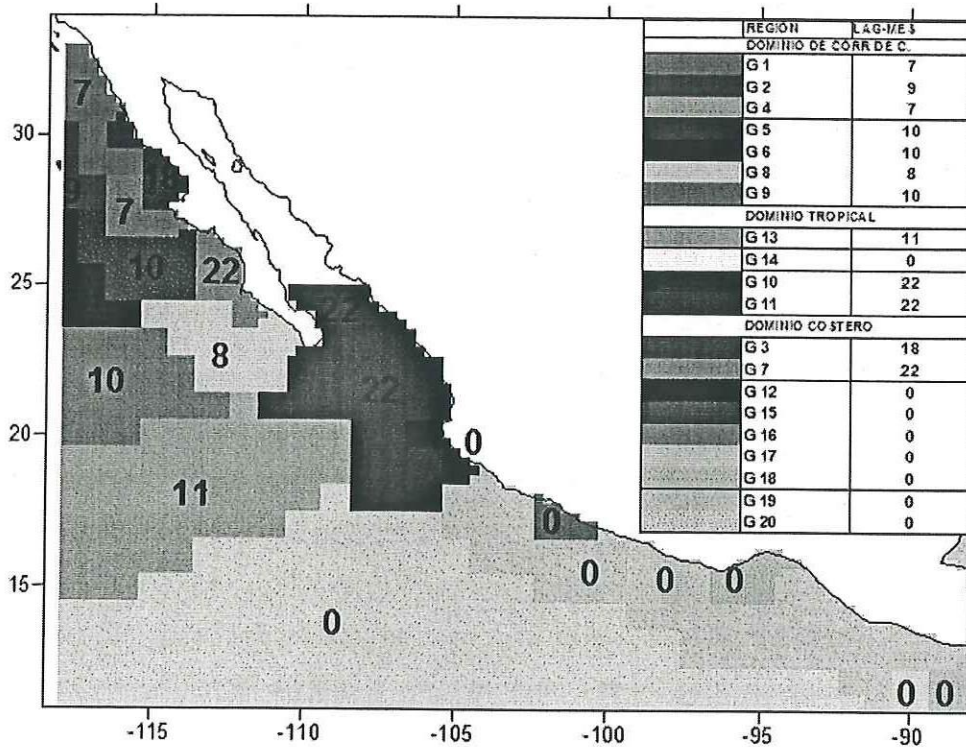


Figura 39. Correlación Cruzada del primer FEO de clorofila a del OCTS-SeaWiFS (1996-2002), vs IOS, el número en cada recuadro representa el lag donde se alcanza la correlación máxima.

## 6.- DISCUSIONES

La distribución espacial de Temperatura Superficial del Mar (TSM) mostró un incremento hacia el ecuador (Fig. 7). Las regiones dentro del Dominio del Sistema de la Corriente de California presentaron los valores más bajos, debido a la influencia directa del Sistema de la Corriente de California (SCC) que acarrea aguas polares (Lynn y Simpson, 1987). En nuestra distribución espacial, en los meses de marzo a junio se observó la intrusión de esta agua fría, donde la TSM a lo largo de la Península de Baja California fue  $<18^{\circ}$  C. Esto se asocia a la presencia de vientos del noroeste, que favorecen la aparición de surgencias todo el año, siendo más intensas en primavera y verano (Svedrup et al., 1942; Tomczak y Godfrey, 1994).

En la Boca del Golfo de California, se presentaron amplias variaciones temporales de TSM, causadas principalmente por vientos e interacción con el Océano Pacífico (Roden, 1964, Wyrski, 1966, Lavín y Organista, 1988). La TSM más baja se registró en invierno (diciembre-marzo), cuando se presentan surgencias en el lado continental de la Boca del Golfo, debido al efecto del viento que circula del noroeste (Badan-Dagon et al. 1985). En nuestra distribución espacial (Fig. 7), se observó la intrusión de agua cálida a partir de mayo debido al esfuerzo del viento proveniente del sureste (Lavin et al., 1997) lo cual acarrea agua del Pacífico Tropical. Se ha reportado la presencia de surgencias de verano del lado de la península, aunque en menos escala que las de invierno, debido a la intensa estratificación en la columna de agua en verano (Santamaría-del-Ángel et al., 1998).

Las regiones localizadas en el Dominio del Pacífico Tropical presentan TSM mayores, debido a la intrusión del Agua Superficial Subtropical proveniente del ecuador (Wyrski, 1965), lo que ocasiona poca variabilidad la mayor parte del año. En esta misma área, pero ya dentro del Dominio Costero (región 12 en Cabo Corrientes y región 17 en el Golfo de Tehuantepec), predominan surgencias costeras en invierno (Zuria-Jordan et al., 1995; Lluch-Cota et al., 1997). En nuestra distribución espacial (Fig. 7), esta señal no es tan clara en la región 12, si la comparamos con las surgencias presentadas frente a la península de Baja California. Es posible que la evolución de este evento sea enmascarado en nuestra composición mensual.

Para el Golfo de Tehuantepec (región 17), la pluma de agua mas fría (Fig. 7), puede ser observada la mayor parte del año, siendo más notable en los meses de octubre a mayo, posiblemente debido a la persistencia de vientos provenientes del continente, que generan un desplazamiento de agua cálida superficial hacia el oeste, lo que permite un aporte de agua más fría hacia la superficie. Se ha reportado la formación de giros ciclónicos y anticiclónicos en esta zona a través de mediciones del esfuerzo de viento (Martínez-Díaz-de-León *et al.*, 1999), temperatura superficial del mar (Trasviña *et al.*, 1995), y mediante imágenes de color del océano (Müller-Karger y Fuentes-Yaco 2000; González-Silvera *et al.*, 2003).

La serie de TSM se caracterizó por abarcar un periodo continuo de aproximadamente 20 años. Las anomalías de TSM (Fig. 15, 16 y 17) mostraron la presencia de los eventos cálidos asociados al ENSO registrados en 1982-83, 1986-87, 1991-93, y 1997-98, siendo los más intensos en 1982-84 y 1997-98. Además, se observaron los eventos fríos asociados a La Niña de 1985, 1989 y 1999. También se presento este mismo comportamiento en el diagrama de distribución temporal a lo largo de la línea de costa (Fig. 30.a).

Las máximas anomalías positivas de TSM para el Dominio del Sistema de la Corriente de California, se presentaron durante el ENSO 1982-84, lo cual coincide con lo reportado por Pares-Sierra y O'Brien (1989). Estos autores efectuaron un modelo donde determinan que la variabilidad interanual en el forzamiento del viento y la altura del nivel del mar en el SCC, se asocia principalmente a variaciones de origen ecuatorial, mientras que la variabilidad estacional ha sido asociada por vientos forzados local y remotamente. Durante el ENSO 1991-93, también se presentaron anomalías positivas de TSM elevadas, aunque en menor grado que el ENSO 1982-84 (Fig. 30.a). Este evento también fue producto de la combinación del forzamiento atmosférico remoto y local, que es reflejado en el comportamiento de la altura del nivel del mar (Lynn *et al.*, 1995). Por otro lado, el ENSO 1997-98 se caracterizó por una expansión de la Corriente Norecuatorial (CNE), la cual transportó aguas cálidas y salinas hacia el norte (Lynn *et al.*, 1998; Durazo y Baumgartner, 2002).

La presencia del ENSO 1982-84 en la zona de la Boca del Golfo de California ha sido estudiada anteriormente por diversos autores, con mediciones *in situ* en la altura del nivel del mar (Robles-Pacheco y Christensen, 1983), Temperatura del Mar (Mee *et al.*, 1985) y concentraciones de clorofila a (Lara-Lara, 1984). También ha sido detectado en esta área utilizando imágenes del color del océano (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1994; Zuria-Jordan *et al.*, 1995). Nuestra serie de tiempo en esta área no muestra un patrón definido de anomalías positivas altas de TSM durante ese periodo (Fig. 16.b). Sin embargo, las mediciones de pigmentos (las cuales se muestran mas adelante) si rescatan la señal de la presencia del ENSO 1982-84.

Tomando en cuenta solo la TSM, para las regiones ubicadas en el Dominio de la Corriente de California, podemos suponer que el ENSO 1982-83 se caracterizó por ser más intenso, debido a la franja de anomalías positivas presentes en los veranos de 1983 y 1984 (Fig. 30.a). Sin embargo no encontramos el mismo comportamiento hacia el sur, en el Pacífico Tropical a partir de los 22° N, donde las anomalías son poco perceptibles. Esta diferencia puede ser causada por la influencia de factores atmosféricos, como lo fue la erupción del volcán Chichonal en abril de 1982, el cual generó una gran cantidad de polvo volcánico, que contaminó parte de la serie de TSM en bajas latitudes, durante 1982-84 ([http://podaac.jpl.nasa.gov:2031/DATASET\\_DOCS/avhrr\\_wkly\\_mcsst.html](http://podaac.jpl.nasa.gov:2031/DATASET_DOCS/avhrr_wkly_mcsst.html) y McClain, 1989). Este hecho puede ser el causante de que en toda la zona del Pacífico tropical, la TSM no presenta un patrón bien definido del comportamiento interanual de la TSM de 1982 a 1984, aunado a la poca variabilidad estacional existente en la zona. Sin embargo, al momento de efectuar la correlación del FEO por regiones de TSM vs el IOS (Fig. 37), si se logra registrar el desplazamiento de la señal del ENSO 1982-1984 en el Pacífico Tropical.

La propagación de la señal del ENSO 1982-83 (Fig. 37) se presenta inicialmente en la zona oceánica a bajas latitudes, lo que señala que la propagación de la señal del ENSO se manifestó más tardíamente en la línea de costa en la parte del sur. Esto puede ser explicado por el forzamiento del viento proveniente del continente que provoca surgencias en la zona del Golfo de Tehuantepec y Papagayo (Trasviña *et al.*, 1995). La presencia de surgencias pudo generar un afloramiento de agua fría, aunque posiblemente en menor escala durante este periodo, lo que evitó un aumento

simultáneo en las anomalías positivas de TSM en la zona costera con respecto a la zona oceánica.

La señal del ENSO 1997-98 (Fig. 38), aparece simultáneamente a lo largo de toda el área de estudio. De acuerdo con nuestra correlación, la masa de aguas cálidas durante el ENSO 1997-98 se desplazó inicialmente por la zona oceánica para luego penetrar hacia la zona costera, anteponiéndose al desplazamiento de sur a norte. Soto-Mardones y Pares-Sierra (2003), a través de un análisis de TSM a lo largo de todo el borde continental Este, encontraron anomalías positivas en la fase inicial del ENSO en la región norte ( $\sim 30^\circ$  N), además de las presentadas en el ecuador. Estos autores señalan además, la posible relación con la asimetría e inclinación de la línea de costa en la zona con respecto al ecuador, las cuales juegan un rol muy importante en la propagación de la señal del ENSO.

Las mayores anomalías negativas de TSM en toda nuestra área de estudio, se presentaron en los inviernos de 1989, 1999 y 2000. Esto es característico de un evento La Niña, la cual produce un enfriamiento anormal en las aguas del Pacífico Oriental, con condiciones opuestas a las creadas por el ENSO; este evento es quizás, un modo de corregir el desequilibrio calorífico que provoca el ENSO (Philander, 1990; Tomczak y Godfrey, 1994).

La Niña de 1989 se muestra como la más intensa a lo largo de toda nuestra área de estudio (Fig. 30.a), a pesar de que el ENSO en 1986-87 no se caracterizó por ser de gran magnitud. Lo anterior puede ser debido a que el equilibrio calorífico del sistema, no fue completo al presentarse La Niña en 1985, posterior al ENSO 1982-84. La Niña en 1999-2000 también se caracterizó por ser de gran magnitud (Fig. 30.a). Bograd *et al.* (2000) señalan que esto fue posiblemente debido a una inusual alta presión atmosférica generada en la parte norte del pacífico, permitiendo un incremento en el forzamiento anticiclónico de vientos, que incluye el forzamiento de vientos a lo largo de la línea costera oeste de Norteamérica, favoreciendo así un incremento de surgencias. Schwing *et al.* (2000), a partir de datos *in situ* de anomalías de temperatura superficial costera y altura del nivel del mar, reportaron un aumento en las surgencias presentadas en el Sistema de la Corriente de California durante La Niña de 1999.

En los tres eventos fríos, en la línea de costa, la señal de La Niña es más fuerte en el Pacífico Tropical y decae hacia las altas latitudes (Fig. 30.a). Esto podría ser debido al desplazamiento hacia el oeste de la CNE (Corriente Norecuatorial) durante el invierno, además de la intensificación de vientos desde el continente en este mismo periodo (Chelton, 2000). Es posible que, al presentarse La Niña, el forzamiento del viento sobre esta zona se incrementara, por lo que el volumen de agua fría que aflora a la superficie, causado por el desplazamiento de aguas cálidas superficiales hacia el oeste, se incrementara también.

Los datos de pigmentos generados por el CZCS mostraron ser un buen complemento, además de los datos de TSM presentados previamente, para ratificar el desplazamiento del ENSO en nuestra área de estudio.

De acuerdo a nuestra distribución espacial mensual de concentraciones de pigmentos (Fig. 10), a lo largo del Dominio del Sistema de la Corriente de California se presentan altas concentraciones de pigmentos durante todo el año ( $>1 \text{ mg m}^{-3}$ ) incrementándose conforme nos acercamos a la zona costera. Se observan las mayores concentraciones al sur desde marzo que persisten hasta octubre. Se ha reportado aumento en la concentración de pigmentos en estas fechas (primavera y verano) debido al aumento de los procesos de surgencias que causan un transporte hacia la superficie de agua fría con altas concentraciones de nutrientes (Barber y Chávez, 1986; Tomczak y Godfrey, 1994).

En la parte más al norte ( $32^\circ \text{ N}$ ), se observa ligeramente la presencia del Frente de Ensenada (Fig.10). Este Frente se caracteriza por presentar una estructura oceanográfica en forma de M entre Punta Concepción (California, USA) y Punta Vizcaíno (Baja California, México), con concentraciones altas de pigmentos debido a los eventos de surgencias durante todo el año y a la morfología de la zona. Tiene un desplazamiento estacional dependiendo de la interacción entre el SCC y la Contracorriente Costera. Fue descrita inicialmente por Peláez and McGowan (1986) utilizando imágenes del color del océano. Thomas y Strub (1990), Santamaría-del-Ángel *et al.*, (2002) utilizando la misma herramienta, determinaron una presencia más fuerte durante marzo a julio. Aunque la resolución de nuestra distribución espacial no

permiten observar claramente el desplazamiento del Frente, si se observa un incremento en concentraciones de pigmentos en esta zona en noviembre y diciembre. Santamaría-del-Ángel *et al.* (2002), discriminando años El Niño y no-El Niño, reportaron un desplazamiento del Frente en noviembre en su parte oceánica hacia el sur, mientras que la parte costera del Frente se desplaza hacia el norte. Ellos atribuyen este comportamiento debido a que el SCC desvía su flujo hacia el sur por la parte oceánica, siendo desplazada por la Contracorriente Costera. Este efecto pudo ser detectado en nuestra distribución espacial.

Se observa claramente que existe un afloramiento permanente frente a Punta Vizcaíno a la mitad de la Península de Baja California (Fig. 10), el cual no presenta un patrón temporal definido. De acuerdo con algunos autores (Lynn y Simpson, 1987; Durazo y Baumgartner, 2002), esta zona se caracteriza por ser muy dinámica, asociada a la presencia de giros que rotan anticiclónicamente (Soto-Mardones *et al.*, 2003).

La serie temporal en el mismo Dominio del Sistema de la Corriente de California presenta altas concentraciones de pigmentos (Fig. 18 y 20.a) durante los años No-El Niño. Sin embargo, durante la máxima fase cálida de ENSO 1982-83 se presentó un decaimiento significativo en concentraciones de pigmentos, que ha sido reportada por diversos autores (Simpson, 1983; Fiedler, 1984; Thomas *et al.*, 1994). MacGowan (1983) utilizando mediciones *in situ* de concentración de clorofilas, reportó valores muy bajos durante la primavera y verano de 1983. En nuestras series de tiempo obtenidas para cada región, las bajas concentraciones de pigmentos son más acentuadas en la parte costera en los veranos de 1983 y 1984 (Fig. 20.a), alargándose incluso hasta principios de 1985. Lo anterior puede ser debido al incremento en la TSM durante el ENSO y a la profundización de la termoclina (Lynn y Simpson, 1987), por lo cual decaen notablemente el efecto de las surgencias disminuyendo el aporte de nutrientes hacia la superficie. En el diagrama Hovmoller (Fig. 30.a), es posible observar esta tendencia donde se presentan anomalías positivas de TSM muy elevadas durante los veranos de 1983 y 1984, que coinciden con anomalías negativas en la concentración de pigmentos (Fig. 30.b) y que persisten la mayor parte de 1983 y 1984.

La parte más oceánica dentro del mismo Dominio (regiones 2, 6 y 9) (Fig. 18.a y 18.b) también se caracterizó por una disminución de las concentraciones de pigmentos, aunque no tan acentuada como en la zona costera. De acuerdo a nuestro análisis de correlación de FEOS de pigmentos vs IOS (Fig. 39), la señal del ENSO 1982-84 fue más retardada en la zona oceánica que en la zona costera. Esto pudo ser causado por el desplazamiento de agua cálida a través de la Contracorriente costera hacia el norte, la cual desplazó el flujo del SCC más al oeste por la zona oceánica.

Durante el resto de la serie de tiempo (Fig. 18.a, 18.b y 20.a), ya no se presentaron anomalías positivas de pigmentos excepcionalmente grandes, a pesar de detectar la presencia de un evento La Niña en el invierno de 1985-1986. Posiblemente, el impacto en esta zona de la Niña no fue lo suficientemente fuerte para estabilizar el sistema después del desplome en la población fitoplanctónica causado por el ENSO 1982-84. Aunque, cabe señalar que nuestra serie de datos abarca hasta junio de 1986. Es probable que haya existido una recuperación de anomalías positivas en la concentración de pigmentos posterior a ese periodo. Sin embargo, no se cuenta con datos del color del océano a partir del verano de 1986 para afirmar este hecho. Por otro lado, se cuenta con datos de TSM que podrían apoyar esta hipótesis. Conociendo que el comportamiento de la TSM y pigmentos mantiene una asociación inversa, se puede sugerir que, al ya no presentarse anomalías excepcionalmente elevadas de TSM en nuestra serie de tiempo después de ese periodo (Fig. 30.a), es posible que las concentraciones de pigmento hayan sufrido un incremento significativo posterior a junio de 1986.

Durante el ENSO 1997-98 se observó que la clorofila *a* (Fig 24) en el Dominio del Sistema de la Corriente de California, en los veranos de estos años, presentó un comportamiento similar al observado en las anomalías de pigmentos (CZCS) para el ENSO 1982-84. Se observa una rápida recuperación en la concentración de pigmentos al comparar la diferencia entre los valores de invierno y verano-otoño 1998. Esto coincide a lo reportado por Lavaniegos *et al.*, (2002) quien utilizó datos *in situ* de CTD, ADCP y muestras de agua. En marzo de 1998, se presentó la fase cálida máxima de la señal del ENSO (Fig. 6), para dar paso inmediatamente a la fase fría asociada a la presencia de La Niña. Es en el invierno de 1999, cuando se presentaron las mayores

anomalías positivas de clorofila *a*, asociado al evento La Niña, siendo mas intensa en la región costera que la oceánica. Lo anterior concuerda con lo reportado por Swing *et al.* (1999), quienes a partir de datos de temperatura superficial y nivel del mar, reportaron un incremento en el índice de surgencias registradas en el área dominada por el SCC.

En la Boca del Golfo de California (Fig. 10) se presentaron concentraciones altas de pigmentos durante los meses de invierno ( $>1 \text{ mg m}^{-3}$ ), posiblemente debido a la presencia de surgencias generadas en la costa del lado continental del Golfo de California (Badan-Dagon *et al.*, 1985). Durante el verano (julio a septiembre), existe un aumento crítico en la temperatura, causado por transporte de aguas cálidas oceánicas del Pacífico Tropical (Soto-Mardones *et al.*, 1997; Lavín *et al.*, 1997). Esto provoca la presencia de agua cálida oligotrófica que causa un decaimiento en las concentraciones de pigmentos ( $\sim 0.2 \text{ mg m}^{-3}$ ) durante junio y julio (Fig. 19.b). Sin embargo, Santamaría-del-Ángel *et al.*, (1998), utilizando datos del color del océano, reportaron la presencia de surgencias de verano adyacentes a la Península de Baja California. En nuestra serie temporal se observó un ligero incremento en las concentraciones de pigmentos ( $>0.5 \text{ mg m}^{-3}$ ) en agosto y septiembre, debido probablemente al efecto de estas surgencias.

Al analizar la serie de tiempo en las regiones (regiones 10 y 11) adyacentes a la Boca del Golfo de California (Fig. 19.b), el retardo en la señal en las regiones ubicadas en esta zona fue hasta de 15 meses. Esto posiblemente es causado por la influencia de surgencias costeras de verano que si bien son menos intensas que las de invierno (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1998), pudieron haber retardado la señal de los ENSO en estas regiones. Otra posible causa puede ser el incremento en la precipitación en el noroeste mexicano y en Baja California que durante el periodo ENSO 1982-84 (Reyes y Rojo, 1985), con un consecuente aumento en el escurrimiento del continente hacia el océano, lo cual pudo haber provocado un aporte significativo de material suspendido. La resolución radiométrica del CZCS no permite diferenciar clorofila *a* de material suspendido (Sathyendranath, 2000), aunque ambas variables suelen estar asociadas. Este hecho puede haber causado el incremento en las concentraciones de pigmentos (y sedimento) observado en nuestros datos. Esta misma área presentó mayor

estacionalidad de la señal en los periodos No- El Niño y una extensión temporal de las anomalías negativas durante el ENSO 1982-83.

La distribución espacial mensual, a lo largo de la línea de costa en el Pacífico Central Tropical, desde los 11° N a los 20° N, cerca de Cabo Corrientes, presenta altas concentraciones de pigmentos la mayor parte del año (Fig 10). Las mayores concentraciones se presentaron de febrero a mayo, debido a la presencia de surgencias costeras en invierno. Esto coincide a lo encontrado por Álvarez-Borrego (1983) con mediciones *in situ* de concentración de clorofila *a* y por Zuria-Jordan *et al.* (1995) quienes utilizaron imágenes del CZCS. Se observa una reducción crítica en los meses de junio a julio, debido a la intrusión de agua de la CNE.

En esta misma área, se presentaron anomalías negativas de pigmentos durante el ENSO 1982-83 incluyendo el año 1984 (Fig. 20.b). Las series efectuadas a lo largo de toda la base de la línea costera, mediante el diagrama de Hovmoller (Fig. 30.b) corroboran la intensa disminución en las concentraciones de pigmentos en esta área. La banda temporal de anomalías negativas más amplia se debe a la cercanía de esta zona con la región ecuatorial, la cual es afectada primero por las señales anómalas. Además, la CNE se mantuvo durante un periodo mas amplio, lo cual provocó una profundización en la termoclina y un empobrecimiento en nutrientes en la capa superficial. Se observa además la presencia del evento de La Niña en 1985-1986, con anomalías positivas de pigmentos. Los resultados observados en las series temporales concuerdan a los mostrados por las estructuras temporales de los FEO (Fig. 32).

Para las regiones ubicadas en el Pacífico Tropical, Luch-Cota *et al.* (1997) mencionan que los datos de concentración de clorofila tomados *in situ* son escasos y que es difícil corroborar si las mediciones efectuadas por el CZCS son confiables. Sin embargo, a pesar de la escasez de datos de pigmentos tomados *in situ* en esa zona, además del hecho de haber efectuado una interpolación en tercera dimensión (espacio-tiempo) durante la época de lluvias en la zona, se pudo observar una variabilidad significativa de pigmentos que permitió una detección clara en la señal de la presencia del ENSO 1982-1984, en donde la concentración de pigmentos sufrió un decremento considerable (Fig. 22, 23, 24 y 30.b).

En la parte más sureña del Pacífico Tropical Mexicano los afloramientos costeros se presentan de septiembre hasta abril en el Golfo de Tehuantepec y Papagayo (González-Silvera *et al.*, 2003), cuando los vientos inician la mezcla de aguas superficiales cerca de la costa, asociados a su vez con el desplazamiento hacia el ecuador del Domo de Costa Rica (Fielder, 2002). En nuestra distribución espacial (Fig. 10), las mayores concentraciones de pigmentos en el Golfo de Tehuantepec se presentaron de septiembre a enero. Para el Golfo de Papagayo se observaron concentraciones altas permanentes, aunque no tan elevadas como las presentadas en Tehuantepec. La presencia de surgencias en esta zona originan el incremento en las concentraciones de pigmentos, a pesar de que en el mismo periodo el Domo de Costa Rica se encuentra alejado de la línea costera, por lo que se considera más importante la influencia del empuje del viento. (Fielder, 2000; González-Silvera *et al.*, 2003)

Durante el ENSO 1982-84, al sur del Pacífico Tropical Mexicano hasta Centroamérica, se observó un decremento en la concentración de pigmentos desde principios de 1982 hasta 1984, con concentraciones mínimas durante el verano de 1983 (Fig 20.a y 20.b). Durante este periodo, se presentaron anomalías negativas permanentes de pigmentos, incluso durante invierno (Ver Fig. 30.b).

Para la misma época, en el Golfo de Tehuantepec y áreas adyacentes (región 17) la reducción en surgencias costeras impidió que existiera afloramiento de nutrientes en las zonas aledañas al Golfo, exceptuando una pequeña porción, localizada cerca de la línea de costa en el Golfo de Tehuantepec, donde es posible que este fenómeno local permitiera que siguieran presentándose altas concentraciones de pigmentos (Fig. 20.b). Las regiones cercanas a Centroamérica fueron afectadas rápidamente por la señal de la onda cálida proveniente del ecuador, debido a la cercanía con este (Fig. 20.c y 38).

La señal del ENSO 1982-83 para pigmentos del CZCS vs. el IOS, muestra tiempos de desfase de menos de un mes (Fig. 38) en Centroamérica y la parte sur del Pacífico Tropical. Es decir, cuando se registra la fase máxima negativa del IOS, se registran también en esta zona, las concentraciones más bajas de pigmentos, esto debido a que el IOS, antes de alcanzar su valor negativo más grande, sufrió un

decremento progresivo, el cual coincide con el comportamiento de anomalías negativas de pigmentos en esta zona (Ver Fig. 23.b y 23.c). Como se explico anteriormente, esto es debido a la cercanía de esta zona con el ecuador.

Por otra parte, hacia latitudes más altas, y a partir de la zona de transición entre aguas del Pacifico Tropical y aguas del SCC, el desfase fue mayor a 12 meses. Esto ocurre probablemente por la influencia del SCC que, debido a su flujo continuo de aguas frías y ricas en nutrientes, amortiguó la presencia de la onda calida en esta zona (Fig. 38). Es interesante notar que durante la señal negativa máxima del IOS, en el área de la SCC región presentó concentraciones de pigmentos mucho mas elevados que en otras épocas (Fig. 21). Esto probablemente este asociado a fenómenos locales anteriores al periodo analizado en este estudio.

Durante el ENSO 1997-98 se observa también una fuerte atenuación en la concentración de clorofila *a*, siendo mas crítico en las regiones centroamericanas. La Niña en 1999, por otro lado se caracterizó por mostrar un aumento de clorofila *a* (Fig. 30.c).

Para el periodo ENSO 1997-98, la diferencia del desplazamiento costero y oceánico se muestra similar al observado para el ENSO 1982-84 (Fig. 39). Igualmente, el desfase en la zona tropical hasta Centroamérica es igual a 0, debido a la sincronía de esta zona con las variaciones en el Ecuador. A diferencia de lo presentado durante el ENSO 1983-84, hacia altas latitudes fue menos retardada (<12 meses) (Fig. 39). Estas diferencias en los tiempos pueden ser explicadas en que ambos eventos se comportan en forma diferente, debido a la presencia de anomalías positivas de TSM en el área norte (~30°) en la fase inicial del ENSO 1997-98 (Soto-Mardones y Pares-Sierra, 2003). Es posible que esto haya evitado que el agua proveniente del SCC amortiguara la presencia de la onda cálida proveniente del ecuador.

En las áreas adyacentes a la Península de Baja California y Boca del Golfo, el retardo en el desfase puede ser asociado a que en esta zona durante el invierno se presentan lluvias, las cuales se incrementan durante un evento ENSO (Rasmuson y Wallace, 1983; Reyes-Coca y Troncoso-Gaytan, 2001). Esto probablemente favorece

el escurrimiento de material terrígeno del continente hacia la zona oceánica, que podrían representar un aporte de nutrientes para sostener la comunidad fitoplanctónica en estas áreas.

En este trabajo, se compararon series de tiempo de variables muy distintas entre si, como lo son imágenes de color vs TSM provenientes de sensores remotos. Sin embargo, gracias a que se trabajó más con patrones de variabilidad en el comportamiento mensual de series de tiempo, se pudo tener una idea de las similitudes y diferencias entre los dos eventos ENSO llamados por algunos autores los más catastróficos del siglo y sus remanentes. Con la ayuda de herramientas estadísticas, se logro sopesar mejor las señales presentadas, lo cual es mucho mas efectivo que presentar una simple imagen, que si bien muestra ilustrativamente la distribución de nuestras variables a modo espacial, no nos son de gran ayuda al momento de intentar hacer una análisis espacio-tiempo.

Gracias a esto, pudimos encontrar la relación que existe entre la influencia de la TSM sobre el aumento o disminución de pigmentos o clorofilas, debido a eventos globales (ENSO) o eventos locales (surgencias, precipitación). En el presente trabajo, a pesar de no contar con mediciones *in situ* de las variables analizadas u otras mediciones como lo son datos de vientos, corrientes o altura del nivel del mar, pudimos corroborar nuestra hipótesis acerca de la diferencia en escala y magnitud de los ENSO 1982-84 y ENSO 1997-98. El desplazamiento del ENSO 1982-84 si bien, fue más lento, presentó un tiempo de permanencia mas largo, lo cual provocó un colapso sobre la comunidad fitoplanctónica, siendo más visible en la zona costera con respecto a la oceánica. La presencia de La Niña en 1985 fue poco perceptible, lo cual no ayudó a un incremento en surgencias, por lo que las concentraciones de pigmentos no presentaron un aumento elevado. El ENSO 1997-98, tuvo un desplazamiento en la señal más rápido, con presencia de anomalías negativas de TSM casi simultaneas a lo largo de todo el área de estudio, lo cual se reflejó en el rápido decaimiento en la concentración de clorofila *a*. Sin embargo, a pesar de no haber efectuado una correlación que asociara la señal de La Niña de 1999. Las anomalías positivas de Clorofila *a* durante este periodo (Fig. 27, 28 y 29) reflejan la recuperación mas rápida de todo el sistema durante el ENSO 1997-98 que durante el ENSO 1982-1984.

## **7.- CONCLUSIONES**

Las evoluciones temporales de temperatura superficial del mar (TSM) en todas las regiones, muestran una señal anual con claras diferencias de amplitud desde sur a norte. En promedio, la TSM disminuye hacia las altas latitudes y su variabilidad aumenta. Las diferencias de amplitudes entre la regiones costeras y oceánicas, puede estar asociado con procesos de surgencias, las cuales están presente la mayor parte del año.

La distribución espacial mensual de las concentraciones de pigmentos y clorofila *a* muestran las mayores concentraciones a lo largo de la línea de costa. Las concentraciones más altas se encuentran frente a Baja California en los periodos de primavera-verano (marzo-septiembre), cuando los procesos de surgencia son más intensos. En la Boca del Golfo de California las mayores concentraciones tanto de pigmentos como de clorofila *a* se presentan en invierno, asociados también con la presencia de surgencias en esa época del lado continental. Además se presentan concentraciones ligeramente altas durante las surgencias de verano presentadas del lado de la Península de Baja California.

En las regiones costeras de Cabo Corrientes y el Golfo de Tehuantepec, predominan valores altos de concentraciones durante la mayor parte del año, que se intensifican en invierno debido a la presencia de surgencias generadas por el aumento del esfuerzo del viento sobre la superficie oceánica. En periodos cálidos asociados a ENSO las concentraciones disminuyen drásticamente y en eventos fríos asociados a La Niña las concentraciones aumentan levemente.

En la escala interanual, al comparar los eventos ENSO 1982-83 y el ENSO 1997-98, se muestran diferencias en intensidad y duración. La señal del ENSO 1982-83 mostró un desplazamiento lento pero muy marcado, detectado inicialmente en las regiones ubicadas en el sur tanto en TSM como en color del océano. La señal en la TSM es mas uniforme durante el ENSO 1997-98, ya que la onda de agua cálida se desplazo inicialmente por la región oceánica.

Para los datos de color, ambos eventos (ENSO 1982-1984 y ENSO 1997-98) presentaron un comportamiento en su avance sur-norte similar, aunque a escalas temporales diferentes. En los periodos asociados a La Niña, a lo largo del borde costero, existe un aumento simultáneo de las concentraciones de pigmentos y clorofilas.

La presencia de la Niña después de los eventos ENSO varía. La Niña en 1985 se presentó después de que el ENSO provocó un decaimiento en concentraciones de pigmentos durante dos años. La Niña posterior al ENSO 1997-98 se presentó inmediatamente después de la fase negativa máxima del evento cálido. Queda claro que la recuperación en el sistema fue mucho más rápida que en ENSO 1982-84.

El incremento de lluvias durante un evento ENSO en la zona adyacente a la Península de Baja California y Noroeste mexicano, podrían jugar un papel importante en el sostenimiento de organismos fitoplanctonicos en estas áreas.

Como recomendación para futuros estudios relacionados al análisis de la evolución de los ENSO. Sería interesante resaltar la importancia de efectuar un análisis similar, pero en un área, que además de abarcar el área de estudio, se extendiera hacia áreas más oceánicas, para constatar el posible desplazamiento simultaneo de la señal del ENSO 1997-1998 en el ecuador y en la zona norte.

Con la ayuda de herramientas estadísticas y matemáticas, se pueden comparar series de tiempo de variables distintas entre si, como lo son imágenes de color vs TSM provenientes de sensores remotos. Analizando el patrón de variabilidad espacio-temporal, se puede detectar la presencia y evolución de un fenómeno de gran magnitud como lo es el ENSO. Esto es más efectivo que presentar una simple imagen, que si bien muestra ilustrativamente la distribución de nuestras variables a modo espacial, no nos son de gran ayuda al momento de intentar hacer un análisis espacio-tiempo.

## 8.- REFERENCIAS

- Alarcón, M., Santamaría del Angel, E., Millán-Núñez, R. y Gonzalez-Silvera, A. (2003) Regionalización del Pacífico Mexicano con base en concentraciones de pigmentos fotosintéticos derivados de imágenes de satélite del Coastal Zone Color Scanner (CZCS). En preparación.
- Allan, R. (1996) El Niño Southern Oscillation and climatic variability. CSIRO. Australia.
- Arntz, W. y Fahrbach, E. (1991) El Niño, Experimento climático de la naturaleza. *Fondo de Cultura Económica*. México. 312
- Badan-Dagon, A., Koblinsky, D. J., Baumgartner, T. (1985) Spring and summer in the Gulf of California: Observation of surface thermal patterns. *Ocean. Acta*, 8, 13- 22.
- Baith, K., Lindsay, R., Fu, y Maclain (2001) Data Analysis System Developed for Ocean Color Satellite Sensors. *American Geophysical Union*. 82, 18.
- Barber, R.T., y Chavez, F.P. (1986) Ocean variability in relation to living resources during the 1982-1983 El Niño. *Nature*. 319, 279-285.
- Bardey, P., Garnesson, P., Moussu, G., Wald, L. (1999) Joint analysis of temperature and ocean colour satellite images for mesoscale activities in the Gulf of Biscay. *Int. Journal Remote Sensing*, 20, 7 1329-1341.
- Bjerknes, J. (1969) Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Monthly Weather Review*. 97, 163-172.
- Bograd, S.J., DiGiacomo P.M., Durazo R., Hayward T.L., Hyrenbach K.D., Lynn R.J., Mantyla A.W., Schwing F.B., Sydeman W.J., Baumgartner T., Lavaniegos B. and Moore C.S. (2000) The state of the California Current, 1999-2000: Forward to a New Regime? *CalCOFI. Rep.* 41:26-52.

- Chelton, D.B.; Freilich, M.H. y Esbensen, S.K., (2000). Satellite observations of the wind jets off Central America. Part I: Case studies and statistical characteristics. *Monthly Weather Review* 128, 1993-2018.
- Díaz, H. y Kiladis, G. (1992) Atmospheric teleconnections associated with the extreme phase of the Southern Oscillation. *El Niño, Historical and Paleoclimatic Aspects of the Southern Oscillation*. H. Díaz and V. Markgraf, (Ed) Cambridge University Press. 7-28.
- Durazo R. y Baumgartner, T. (2002) Evolution of oceanographic conditions off Baja California: 1997-1999. *Progress in Oceanography*, 54,7-31.
- Emery, W.J. y Hamilton. K. (1985) Atmospheric forcing of internannual variability in the northeast Pacific Ocean, connections with El Niño. *J. Geoph. Res.* 90:857-868.
- Emery, W. y Thomson, R. (1998) Data analysis methods in physical oceanography. Pergamon. p.634. Gran Bretaña.
- Feldman, G., Clark, D. y 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
- Fiedler, P. C. (1984) Satellite Observations of the 1982-1983 El Niño along the U. S. Pacific Coast. *Science* 22(44654): 1251-1254.
- Fiedler, P. C. (2002) The annual cycle and biological effects of the Costa Rica Dome. *Deep-Sea Research I.* (49) 321-338
- Fu, C., Diaz, H. y Fletcher, J. (1986) Characteristics of the response of sea surface temperature on the central Pacific associated with warm episodes of the Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*. 114: 1716-1738.

- Gonzalez-Silvera, A., Santamaría-del-Ángel, E., Millán-Núñez R. y Manzo-Monroy, H. (2003) Satellite observations of mesoscale eddies in the Gulfs of Tehuantepec and Papagayo (Eastern Tropical Pacific). *Deep Sea Research* (En prensa).
- Gordon, H., Clark, D., Brown, J., Brown, O., Evans, R. y Broenkow, W. (1983) Phytoplankton pigment concentrations in the Middle Atlantic Bight: comparison of ship determinations and CZCS estimates. *Applied Optics*. 22, 20–36.
- Kiladis, G. y Díaz, H. (1989) Global climatic anomalies associated with extremes in the southern oscillation. *J. Climate*, 2, 1069-1090.
- Kim, S., K., Saitoh, S., Ishizaka, J., Isoda, Y., Kishino, M. (2000) Temporal and spatial variability of Phytoplankton Pigment concentrations in the Japan Sea derived from CZCS images. *Journal of Oceanography*. 56, 527-538.
- Lavaniegos, B., Jiménez-Pérez L. y Gaxiola-Castro, G. (2002) Plankton response to El Niño 1997-1998 and La Niña 1999 in the southern region of the California Current. *Progress in Oceanography*, 54(1-4):33-58.
- Lluch-Cota, S., Alvarez-Borrego, S., Santamaría-del-Ángel, E., Müller, F., Hernández, S. (1997) El Golfo de Tehuantepec y áreas adyacentes: variación espaciotemporal de pigmentos fotosintéticos derivados de satélite. *Ciencias Marinas*, 23(3): 329-340.
- Lluch-Cota, S. (2000) Coastal upwelling in the eastern Gulf of California. *Oceanologica Acta*. 23 (6) 731–740.
- Longhurst, A., Sathyendranath, S., Platt, T., Caverhill, C. (1995) An estimate of global primary production in the ocean production in the ocean from satellite radiometer data. *Journal of Plankton Research*, 17, 1245-1271.
- Lynn, R. y Simpson, J. (1987) The California Current system: The seasonal variability of its physical characteristics, *J. Geoph. Res.*, 92, 12,947-12,966.

- Lynn, R., Baumgartner, T., García, J., Collins, C., Hayward T.L., Hyrenbach K.D., Mantyla A.W., Murphree T., Shankle A., Schwing F.B., Sakuma K.M. y Tegner M.J. (1998) The State of the California Current, 1997-1998: transition to El Niño conditions. *Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest. Rep.* 39:25-49.
- Martínez-Díaz-de-León, A., Robinson, I., Ballesteros D. y Coen E. (1999) Wind driven ocean circulation features in the Gulf of Tehuantepec, Mexico, revealed by combined SAR and SST satellite sensor data. *Int. J. rem. Sens.* 20, 8, 1661- 1668
- McClain, E., Pichel, W., y Walton, C. (1985) Comparative Performance of AVHRR-Based Multichannel Sea Surface Temperatures, *J. Geoph. Res.* 90, 11587-11601.
- McClain, E.P. (1989) Global sea surface temperatures and cloud clearing for aerosol optical depth estimates, *Int. J. Remote Sensing*, 10, 763-769.
- McGowan, J.A. (1983) Biological effects of the 1983 Californian El Niño. Presented at the annual CALCOFI, Idylwild, California.
- McPhaden, M.J. (1993) TOGA-TAO and the 1991-93 El Niño-Southern Oscillation Event. *Oceanography*, 6, 36-44.
- McPhaden, M.J. (1999) The child prodigy of 1997-98. *Nature*. 398, 559-562.
- Müller-Karger, F., Fuentes-Yaco, C. (2000) Characteristics of wind-generated rings in the eastern tropical Pacific Ocean. *J. Geophy. Res.* 105, 1271-1284.
- Pelaez, J. y McGowan, J. A. (1986) Phytoplankton pigment patterns in the California Current as determined by satellite. *Limnol. Oceanogr.* 31, 5. 927-950.
- Philander, S. G. H. (1990) El Niño, La Niña, and the southern oscillation. Academic Press. Inc. San Diego, California. 289 p.

- Platt, T., Sathyendranath, S., Longhurst, A. (1995) Remote sensing of primary production in the ocean: promise and fulfillment. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.* 348, 191-202.
- Rasmusson, E.M. y Wallace, J.N. (1983) Meteorological aspects of the El Niño / Southern Oscillation. *Science* 222, 1195-1202.
- Reyes, S. y Rojo P. (1985) Variabilidad de la precipitación en la península de Baja California. *Revista de Geofísica* 22/23. pp. 111-128.
- Reyes, S. y Mejía, A. (1991) Tropical Perturbations in the Eastern Pacific and the precipitation field over North-Western Mexico in relation to the ENSO phenomenon. *International Journal of Climatology*. 11, 515-528.
- Roden, G.I. (1964) Oceanographic aspects of the Gulf of California. *Marine Geology of the Gulf of California*. En: Tj.H. Van Andel and G.G. Shor, Jr. (eds.) *Mem. Am. Assoc. Pet. Geol.*, 3: 30-58.
- Ropelewski, C. y Halpert, M. (1987) Global and regional scale precipitation associated with El Niño/Southern Oscillation. *Mon. Weather Rev.* 115, 1606-626.
- Santamaría del Ángel, E., Álvarez-Borrego, S. y Müller-Karger, F. (1994) The 1982-1984 El Niño in the Gulf of California as seen in coastal zone color scanner imagery. *J. Geophys. Res.* 99: 7423-7431.
- Santamaría-del-Ángel, E., Álvarez-Borrego, S., Millán-Núñez R. y Müller-Karger, F. (1998) Sobre el efecto débil de las surgencias de verano en la biomasa fitoplanctónica del Golfo de California. *Rev. Soc. Mex. Hist. Nat.* 49:207-212.
- Santamaría-del-Ángel, E., Millán-Núñez R., Müller-Karger, F. y Gonzalez-Silvera, A. (2002) The color signature of the Ensenada Front and its seasonal and interannual variability. *CalCOFI Rep.*, 43, 155-161.

- Sathyendranath, S., Hoge, F., Platt, T. y Swift, R. (1994) Detection of phytoplankton pigments from ocean colour: improved algorithms. *Applied Optics*, 33, 1081–1089.
- Soto-Mardones, L.A., Marinone, S.G., Parés-Sierra, A. (1999) Variabilidad espacio temporal de la temperatura superficial del mar en el Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 25(1): 1-30.
- Soto-Mardones L., Parés-Sierra, A., Garcia, J., Durazo, R., y Hormazabal, S. (2003) Analysis of the mesoscale structure in the IMECOCAL region (off Baja California) from Hydrographic, ADCP and Altimetry Data, *Deep Sea Research (En prensa)*.
- Soto-Mardones L. y Parés-Sierra, A. (2003) Comparison between the oceanic dynamic of the areas north and south of the oriental border of the Pacific. *J. Geoph. Res. (En prensa)*.
- Svedrup, H.U., Johnson, M.W. y Fleming, H. (1942) The Oceans, their physics, chemistry and general biology, 1087 p. *Pretience Hall*, Englewood Cliffs, N.J.
- Suplee, C. (1999) El Niño/La Niña: Nature's Vicious Cycle. *National Geograp. Magazine* 195(3) 72-95.
- Shwing, F., Moore, C., Ralston, S. y Sakuma, K. (2000) Record Coastal Upwelling in the California Current in 1999. *CalCOFI Rep.*, 41, 148-160
- Thomas, A.C., Huang, F., Strub. P. y James, C. (1994) Comparison of the seasonal and interannual variability of phytoplankton pigment concentrations in the Peru and California Current systems. *J. Geoph. Res.*, 99 (7), 355-370.
- Thomas, A.C., y Strub. P. T (1990) Seasonal and interannual variability of pigment concentration across a California Current frontal zone. *J. Geophy. Res.* 95:13023–13042.

- Tomczak, M. y Godfrey, J. (1994) *Regional Oceanography: an Introduction*, Pergamon New York 422p.
- Trasviña, A., Barton, E.D., Brown, J., Velez, H.S., Kosro, P.M. y Smith, R.L. (1995) Offshore wind forcing in the Gulf of Tehuantepec, México: The asymmetric circulation. *J. Geophys. Res.* 100, 20649-20663.
- Trenberth, K.E. (1976) Spatial and temporal variations of the Southern Oscillation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 102: 639-653
- Trenberth, K.E. (1999) The Extreme Weather Events of 1997 and 1998. *Consequences*. 5 (1) 3-15
- Wyrki, K. (1967) Circulation and Water Masses in the Eastern Equatorial Pacific Ocean. *Int. Journal Oceanol. and Limnol.* 1 (2) 117-147.
- Wyrki, K. (1975) El Niño, The dynamic response of the equatorial Pacific Ocean to atmospheric forcing. *Journal of Physical Oceanography*, 5: 572-584.
- Wyrki, K. (1982) The Southern Oscillation, ocean-atmosphere interaction and El Niño. *Mar. Technol. Soc. J.* 16, 3-10.
- Wyrki, K., E. Stroup, W. Patzert, R. Williams, Quinn W. (1976) Predicting and Observing El Niño. *Science* 191, 343-346.
- Zuria-Jordán, I., Álvarez-Borrego, S., Santamaría del Ángel, E., Müller-Karger, F. (1995) Estimación de biomasa fitoplanctónica, derivada de datos de satélite, frente a Baja California Sur. *Ciencias Marinas*, 21(3): 265-280.