



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

Clorofila "a" como indicador de aguas productivas y su asociación con altimetría en el Océano Pacífico Oriental

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
OCEANÓLOGO
PRESENTA
JORGE MANUEL LÓPEZ CALDERÓN

Ensenada, Baja California, Septiembre de 2002.

Resumen

Con el propósito de incrementar el conocimiento de la dinámica biofísica en el Océano Pacífico Oriental se analizó la variabilidad y asociación espacio-temporal de la anomalía del nivel del mar y la concentración de clorofila "a" para el área comprendida entre 75 y 150°O; 20°S y 30°N durante el periodo 1998-2001. Los datos de anomalía y clorofila fueron generados por los sensores TOPEX y SeaWiFS, respectivamente; ambas variables fueron interpoladas para una rejilla de 0.5x0.5°. La variabilidad fue analizada mediante las primeras tres Funciones Empíricas Ortogonales, el porcentaje de varianza explicado por los tres modos fue 35% para la anomalía y 59% para la clorofila. La anomalía mostró tres áreas principales de variación: al sur de 10°S, al este (provincia costera) y al oeste (provincia oceánica) de 110°O; de enero a junio las mayores variaciones se dieron en la provincia costera, de julio a diciembre en la provincia oceánica. La clorofila mostró dos áreas principales de variación: al este (provincia costera) y al oeste (provincia oceánica) de 100°O; de julio a octubre las mayores variaciones ocurrieron en la provincia oceánica, de noviembre a junio en la provincia costera; las concentraciones más altas de clorofila (para ambas provincias) ocurrieron entre 15°N y 15°S. La asociación entre variables fue determinada mediante la correlación de las primeras tres variables canónicas, los coeficientes de correlación fueron 0.99, 0.98 y 0.97, respectivamente; en la franja ecuatorial, frente al Golfo de Tehuantepec y al oeste de la península de Baja California ocurrieron las asociaciones más altas. Se observó la influencia de los fenómenos El Niño-La Niña (1998-99) durante la primer parte de las series de tiempo. Anomalías del nivel del mar, principalmente negativas, estuvieron asociadas con concentraciones altas de clorofila "a" para la mayor parte del Océano Pacífico Oriental.

CLOROFILA "a" COMO INDICADOR DE AGUAS PRODUCTIVAS Y SU ASOCIACIÓN CON ALTIMETRÍA EN EL OCÉANO PACÍFICO ORIENTAL

**TESIS
QUE PRESENTA:
JORGE MANUEL LÓPEZ CALDERÓN**

Aprobada por:



**M. en C. Héctor G. Manzo Monroy
Presidente del Jurado**



**Dr. Rubén Castro Valdez
Sinodal Propietario**



**Dr. Eduardo M. Santamaria del Ángel
Sinodal Propietario**

A mis padres, que han sido y serán mi más grande fortaleza y motivación.

A mi hermana, que quiero con toda el alma y que es sin lugar a dudas mi mejor amiga.

Agradecimientos

El orden en que mencione a todas aquellas personas que estuvieron conmigo durante algún momento de mi carrera es fortuito y desde luego no incluye a todas aquellas personas con las cuales estoy agradecido, tendría que escribir una tesis exclusivamente para eso.

A los miembros de mi comité de tesis por sus consejos y aportaciones para la realización de este trabajo: Hector Manzo, Eduardo Santamaria y Rubén Castro, en especial a Rubén que aunque entró en mi comité en último momento, me ayudo a observar mis resultados con un enfoque distinto.

A M.C. Román Lizarraga Arciniega por todos sus buenos consejos que me animaron durante la mayor parte de mi carrera. Al "jefe", Oc. Eduardo Gil Silva, por ser un excelente amigo y por todas aquellas comidas (atracones) en el Ortega's buffet.

A mis maestros de la licenciatura: Armando Rodríguez Pinal, Rafael Hernández Walls, Emilia Fregoso Becerra, Manuel Moreno, Asdrúbal Martínez, Yolanda Schramm, Antonio Trujillo, Héctor Bustos, Elizabeth Orellana, Adán Mejía, Josué Álvarez, Affonso Mascarenhas, cuyo carácter y enseñanza me ayudaron a ser mejor mi trabajo. A Mili, Nacho y Arturo, por toda la paciencia que tuvieron para atenderme en el almacén y preparar el material para las prácticas de laboratorio. A Mary y Lorena por ser tan amables conmigo y hacerme mis comprobantes de estudiante para pagar medio boleto en los camiones.

Y a toda la banda que no podía quedarse fuera: Dennise Castro, Lizz González, Estefania Medina, Adriana Puma, Lulú Simental, Andolsa Arévalo, las damas primero para primero para que no se quejen. Y ahora los machos: Andrés "Hormiga" Jiménez, Diego "Abue de Dios" Sánchez, Erick "Russo Rockosh" Rivera, que durante estos cinco años han sido mis mejores amigos y para los cuales las palabras de agradecimiento no son suficientes. Un muy particular agradecimiento para la banda de La Paz: al Capitán Flais, gracias por las críticas a la tesis K; a Edna Sánchez, Ernesto Vasquez, Armando Jaramillo, Felipe "Jelipano" Becerril y Guillermo "Momo" Fernández, que fueron mi familia adoptiva en Ensenada.

A todos mis tíos de Tijuana: Nena, Angélica, Sol, Tony, Higinio, Beto, y en particular a mi tía Paty de San Diego y a mis primos: Paty, Gaby, Estela, Verónica, Rubén y Juan.

Índice

Resumen.....	II
I. Introducción.....	1
II. Antecedentes.....	6
III. Área de Estudio.....	11
IV. Hipótesis.....	19
V. Objetivo general.....	19
V. I. Objetivos particulares.....	19
VI. Metodología	
VI. I. I. Datos TOPEX.....	20
VI. I. II. Procesado de datos.....	22
VI. I. III. Análisis numérico.....	24
VI. II. I. Imágenes SeaWiFS.....	30
VI. II. II. Procesado de datos.....	31
VI. II. III. Análisis numérico.....	33
VI. III. Correlación espacio-temporal entre anomalía del nivel del mar y concentración de clorofila "a".....	34
VII. Resultados	
VII. I. I. Arreglo para la media de la anomalía del nivel del mar.....	37
VII. I. II. Arreglo para la media de la concentración de clorofila.....	39
VII. II. Amplitudes temporales (anomalía y clorofila).....	40
VII. III. I. Arreglos para los tres primeros modos espaciales (anomalía).....	43
VII. III. II. Arreglos para los tres primeros modos espaciales (clorofila).....	46
VII. IV. I. Arreglos para los ciclos/meses negativos (1er. modo).....	48
VII. IV. II. Arreglos para los ciclos/meses negativos (2do. modo).....	50

VII. IV. III. Arreglos para los ciclos/meses negativos (3er. modo).....	51
VII. V. I. Arreglos para los ciclos/meses positivos (1er. modo).....	52
VII. V. II. Arreglos para los ciclos/meses positivos (2do. modo).....	55
VII. V. III. Arreglos para los ciclos/meses positivos (3er. modo).....	56
VII. VI. Correlación espacio-temporal entre anomalía del nivel del mar y concentración de clorofila "a".....	57
VIII. Discusión	
VIII. I. Arreglo para la media.....	62
VIII. II. Amplitudes temporales.....	64
VIII. III. Arreglos para los modos espaciales.....	65
VIII. IV. Arreglos para los ciclos/meses (positivos y negativos)...	70
VIII. V. Correlación canónica.....	74
IX. Conclusiones.....	75
X. Referencias.....	77
Apéndice 1.1 (Procesado de datos para anomalía del nivel del mar)....	80
Apéndice 1.2 (Análisis numérico para anomalía del nivel del mar).....	82
Apéndice 2.1 (Procesado de datos para clorofila "a").....	85
Apéndice 2.2 (Análisis numérico para clorofila "a").....	90
Apéndice 3 (Funciones Empíricas Ortogonales).....	94
Apéndice 4 (Correlación canónica).....	96

Lista de Tablas

Tabla I. Formato de los datos obtenidos del altímetro, en este caso se muestra el ciclo 196 (8-ene-1998) como ejemplo; los valores de las filas corresponden a los mínimos y máximos para cada columna.....	20
Tabla II. Ciclos no obtenidos y que fueron sustituidos con interpolaciones de los ciclos anterior y posterior inmediatos.....	23
Tabla III. Número de nodos terminales (áreas) antes y después de utilizar validación cruzada, para cada uno de los arreglos generados para la anomalía del nivel del mar y clorofila. c=ciclos, m=meses, N=nodos terminales o ramas.....	27
Tabla IV. Porcentajes, individual y acumulativo de la variabilidad explicada por cada modo, para anomalía del nivel del mar y concentración de clorofila.....	28
Tabla V. Estructura de los arreglos 3, 4 y 5 para los 148 ciclos muestreados; como criterio de agrupación se utilizó el signo de la amplitud de los primeros tres modos espaciales.....	29
Tabla VI. Bandas y longitudes de onda en el espectro del visible que utiliza SeaWiFS para determinar la concentración de clorofila "a" en la superficie del océano.....	30
Tabla VII. Estructura de los arreglos 3, 4 y 5 para los 48 meses muestreados; como criterio de agrupación se utilizó el signo de la amplitud de los primeros tres modos espaciales.....	34

Lista de Figuras

- Fig. 1. Ubicación del área de estudio junto con los puntos de la rejilla de interpolación..... 12
- Fig. 2. Corrientes oceánicas superficiales en el Océano Pacífico tropical para los meses de febrero (a) y agosto (b)..... 13
- Fig. 3. Profundidad media de la termoclina estacional (pies) para los meses de febrero (a) y agosto (b) para el Pacífico norte..... 16
- Fig. 4. Distribución espacial para la media de toda la serie (1998-2001) de la anomalía del nivel del mar (cm) (a) y el logaritmo de la concentración de clorofila "a" ($\ln\{\text{mg}/\text{m}^3\}$) (b). Se indican las áreas determinadas mediante un árbol de regresión, junto con su valor de anomalía y concentración de clorofila transformado a mg/m^338
- Fig. 5. Series de tiempo de las amplitudes del primer (a, b), segundo (c, d) y tercer (e, f) modos para la anomalía del nivel del mar (izquierda) y el logaritmo de la concentración de clorofila "a" (derecha). Se marcan divisiones horizontales para las amplitudes 5, 0, -5 (izquierda) y 0.5, 0 -0.5 (derecha)..... 42
- Fig. 6. Distribución espacial de la variabilidad para la anomalía del nivel del mar (izquierda) y el logaritmo de la concentración de clorofila "a" (derecha) para la primer (a, b), segunda (c, d) y tercer (e, f) FEO. Se indican las áreas determinadas utilizando un árbol de regresión y el porcentaje de varianza explicada por cada FEO..... 44

Lista de Figuras (continuación)

- Fig. 7. Distribución espacial de la anomalía del nivel del mar (cm) (izquierda) y el logaritmo de la concentración de clorofila "a" ($\ln\{\text{mg}/\text{m}^3\}$) (derecha) para el promedio de los ciclos/meses negativos de acuerdo a la primer (a, b), segunda (c, d) y tercer (e, f) amplitudes. Se indica el número de ciclos o meses promediados para cada caso. *=-6.77 cm; **=7.16 cm. Para la primer amplitud no hubieron meses negativos. Las concentraciones de clorofila de cada área están ya transformadas a mg/m^3 49
- Fig. 8. Distribución espacial de la anomalía del nivel del mar (cm) (izquierda) y el logaritmo de la concentración de clorofila "a" ($\ln\{\text{mg}/\text{m}^3\}$) (derecha) para el promedio de los ciclos/meses positivos de acuerdo a la primer (a, b), segunda (c, d) y tercer (e, f) amplitudes. Se indica el número de ciclos o meses promediados para cada caso. *=4.19 cm. Las concentraciones de clorofila de cada área están ya transformadas a mg/m^3 54
- Fig. 9. Correlación entre la primer (a), segunda (b) y tercer (c) variables canónicas para los campos de anomalía del nivel del mar vs. logaritmo de la concentración de clorofila "a". Se indican el coeficiente de correlación "r" y el número de datos utilizados "n"59
- Fig. 10. Estructura espacial de la primer (a, b), segunda (c, d) y tercer (e, f) variables canónicas para los campos de anomalía del nivel del mar (izquierda) y logaritmo de la concentración de clorofila "a" (derecha)..... 60

I. Introducción

Aunque la zona costera sostiene la mayor parte de las pesquerías por su alta productividad primaria, otras pesquerías de suma importancia se desarrollan en mar abierto; se ha observado que las capturas de atún en el Océano Pacífico Oriental (OPO) han estado relacionadas con la ocurrencia de remolinos de mesoescala (eddies), debido a que el movimiento del agua en el interior del remolino (tanto horizontal como vertical) tiende a crear zonas con una mayor concentración de material biogénico (entre ellos fitoplancton) que representan una fuente potencial de alimento para distintas especies pelágicas (Manzo-Monroy 2000).

El fitoplancton es la base de la trama trófica marina, participa en la modulación de ciclos biogeoquímicos (e.g. dióxido de carbono, nitrógeno, oxígeno) e indirectamente contribuye en la cadena trófica terrestre. La abundancia y ocurrencia del fitoplancton es comunmente cuantificada a través de la medición de la concentración de clorofila "a" en el medio; este fotopigmento es capaz de utilizar la energía solar en la elaboración de materia orgánica para el sustento de estos organismos microscópicos. Además de la energía solar, el fitoplancton requiere de materia inorgánica (nitratos, sulfatos, metales traza) en cantidades suficientes (dependiendo de la especie) para sintetizar su alimento.

Los cambios de la concentración de clorofila en la columna de agua obedecen a interacciones entre los sistemas océano-atmósfera: cambios en la cantidad de

luz solar recibida, disponibilidad de nutrientes, corrientes oceánicas superficiales y variaciones en la topografía de la superficie del océano. La mayoría de los fenómenos que ocurren en la superficie del océano son producto de la influencia combinada (en distinta proporción) de ambos sistemas (sin considerar el caso de las mareas que son producto de la atracción gravitacional de la luna y el sol y la rotación de la Tierra).

La atmósfera modifica la superficie del océano a través del forzamiento del viento, centros de alta y baja presión, precipitación y calentamiento solar (como factor atmosférico). La topografía de la superficie del océano presenta cambios también debido a: elevaciones o cuencas en el piso oceánico que, debido a la atracción gravitacional, generan ligeros domos o depresiones en la superficie del océano; corrientes superficiales que de acuerdo con su intensidad pueden modificar la rugosidad o elevación (por apilamiento) de la superficie del mar; y la evaporación que en ocasiones también puede provocar cambios en la rugosidad de la superficie oceánica.

La variación en la topografía de la superficie del océano también provoca cambios en la distribución de las propiedades físicas de la columna de agua; la temperatura y salinidad son de las más importantes puesto que en conjunto permiten conocer la densidad de una determinada parcela de agua, esta propiedad se utiliza para determinar, entre otras cosas, la estratificación de la columna de agua y la existencia de gradientes de presión que provocan el movimiento de masas de agua (Tolmazin 1985).

El cambio vertical abrupto de temperatura en la columna de agua se conoce como termoclina y constituye una barrera natural para la migración vertical de elementos bióticos y abióticos. En la mayoría de los océanos (latitudes tropicales y subtropicales) existen tres termoclinas: una termoclina estacional (~50 y 150 m) que migra verticalmente a lo largo del año; una termoclina tropical (más somera que la estacional) que se forma a bajas latitudes durante el invierno como remanente de la termoclina estacional; y una termoclina permanente ubicada por debajo de la termoclina estacional hasta aproximadamente 1000 m que se mantiene a lo largo del año (Tomczak y Godfrey 1994).

El cambio vertical en densidad (estratificación) puede ser medido con la frecuencia de Brunt-Väisälä (N) que mide la frecuencia (s^{-1}) de oscilación vertical de una partícula que es forzada de una capa con densidad σ_1 hacia otra capa con densidad σ_2 hasta que ésta alcance nuevamente el estado de reposo del que partió; entre mayor sea la frecuencia de oscilación mayor será la estratificación (Cushman-Roisin 1994) y menor será la posibilidad de que exista un flujo vertical de agua.

Por lo tanto en un océano con una alta estratificación, en el que el esfuerzo del viento (junto con las corrientes superficiales) ha producido una elevación (o depresión) en su superficie tendremos como consecuencia un transporte vertical de agua (bombeo de Ekman) ya sea hacia el fondo (o hacia la superficie) si se trata de un remolino anticiclónico o ciclónico; este transporte es máximo en el

centro del remolino y disminuye radialmente hacia su borde. Debido a la acumulación (o dispersión) de agua en la superficie del océano la termoclina estacional debajo del remolino presenta un desplazamiento contrario al ocurrido en la superficie, esta perturbación contribuye al intercambio de agua entre el agua por debajo de la termoclina y la capa superficial. Si la estratificación es demasiado fuerte (cosa que ocurre en el OPO) el transporte vertical se ve reducido, teniendo efecto únicamente en la capa superficial.

Por lo general los fenómenos ocurridos en la superficie del océano repercuten (aproximadamente) en los primeros 200 m de la columna de agua, a través del transporte vertical de agua (convección) y la propagación de energía. Debido a la presencia de los continentes y a que la columna de agua cercana a la zona costera es más somera, procesos como las surgencias son más intensos que en mar abierto. El calentamiento solar, los vientos, corrientes superficiales, entre otros, provocan la formación de una capa superficial (capa de mezcla) que se caracteriza por poseer propiedades hidrográficas homogéneas (salinidad, temperatura y densidad), su profundidad varía entre 50 y 150 m (dependiendo de la ubicación geográfica) pero puede ser más profunda durante el invierno (en latitudes polares) a causa del enfriamiento y posterior hundimiento (convección) de aguas superficiales. Durante la primavera y el verano la capa de mezcla se adelgaza debido al incremento de la temperatura superficial del mar (Tomczak y Godfrey 1994).

El límite inferior de la capa de mezcla se establece por la profundidad de la termoclina estacional, durante el invierno ésta se debilita o desaparece (e.g. en altas latitudes) lo que facilita el intercambio de masa y energía entre la capa inferior y la capa de mezcla. Esta capa inferior es dividida por la termoclina permanente que separa una columna de agua influenciada por la capa de mezcla de una capa con propiedades hidrogáficas de mar profundo (Tomczak y Godfrey 1994).

El conocer la variación espacial y temporal de los factores bióticos y abióticos anteriormente descritos, refiriéndonos al caso particular del OPO nos permite dar una explicación a los fenómenos que en el área ocurren (e.g. surgencias, corrientes de chorro (jets), remolinos de mesoescala, ondas oceánicas) y de ser posible elaborar modelos que, con un determinado nivel de certidumbre, permitan predecir dichos fenómenos.

Posteriormente el trabajar de manera conjunta con datos de captura y las variables aquí presentadas podría permitir mejorar la explicación de la dinámica espacio-temporal de una especie pelágica determinada y plantear estrategias para dirigir y planear el esfuerzo de pesca de la misma.

II. Antecedentes

De estudios que combinen el análisis de productividad primaria con la topografía de la superficie del mar tenemos el de Franks *et al.* (1986) quienes usaron un modelo de dinámica del plancton para comprobar que la alta biomasa de fitoplancton que aparece dentro de los remolinos anticiclónicos en la Corriente del Golfo de México puede ser consecuencia de la circulación asociada al decaimiento (por fricción) del remolino. Posteriormente Jenkins (1988) analizó el flujo vertical de nitrato cerca de Bermuda y sugirió que bastan algunos eventos de mesoescala al año para satisfacer el flujo cuantificado. McGillicuddy *et al.* (1998) realizó un estudio similar al anterior en el Mar de los Sargazos, en él utilizaron datos de boyas fijas, de cruceros, imágenes de satélite y un modelo numérico para encontrar que la dinámica de los remolinos de mesoescala es suficiente para balancear el flujo de nutrientes hacia la capa de mezcla en el Mar de los Sargazos.

Para el Atlántico norte, Oschlies y Garçon (1998) combinaron el uso de imágenes de satélite con un modelo numérico para cuantificar la contribución de los remolinos al flujo vertical de nitrato hacia la zona fótica y encontraron que para algunas áreas, los remolinos contribuyeron con alrededor de 1/3 del flujo total de nitrato en los subtropicos y en latitudes medias, sin embargo, existieron áreas en el giro subtropical donde esta contribución no fue suficiente para

mantener los niveles de productividad primaria observados, por lo que sugirieron que deben ser consideradas rutas alternas de nitrógeno.

Uno de los estudios más completos fue el hecho por Müller-Karger y Fuentes-Yaco (2000) quienes utilizaron imágenes del Coastal Zone Color Scanner (CZCS) Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) y series de tiempo (1946-1987) de viento y temperatura superficial del mar obtenidas del Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (COADS) para analizar el efecto de los remolinos de mesoescala sobre la concentración de pigmentos en el OPO, algunos de sus resultados fueron: un mayor número de remolinos respecto a lo anteriormente reportado (por observación y simulación), el número de remolinos anticiclónicos observados fue mayor al de los remolinos ciclónicos, el diámetro y las velocidades de propagación oscilaron entre los 100-500 km y 7.7-18.1 km/día, respectivamente, en tanto que la concentración de pigmentos en el interior de los remolinos fue de 2 a 10 mg/m³ (a 70 km de la costa) y de ~1 mg/m³ (a más de 600 km de la costa).

Referente a estudios enfocados a la medición de eventos de surgencia tenemos el de Stumpf (1975) quien utilizó imágenes infrarrojas diarias (diciembre de 1973) para identificar y delimitar surgencias ocurridas en el Golfo de Tehuantepec y encontró que al terminar cada uno de los cinco eventos de surgencia registrados apareció un remolino anticiclónico al oeste del Golfo, el mayor de estos con un diámetro de 200 km y sugirió que el remolino es una fase intermedia de la capa superficial del océano entre el episodio de

forzamiento por el viento y un estado no forzado. Legeckis (1988) realizó el mismo estudio para los Golfos de Papagayo y Panamá durante el mes de marzo de 1985, en este caso la señal de surgencia en el Golfo de Panamá adoptó la forma de una onda (con una longitud de entre 450 y 750 km) similar a las que ocurren a lo largo del ecuador, la surgencia en el Golfo de Papagayo fue estacionaria y para el Golfo de Tehuantepec no detectó indicadores de surgencia. Más recientemente Lluich-Cota *et al.* (1997) cuantificaron la variabilidad de concentración de pigmentos en el G. de Tehuantepec utilizando imágenes del CZCS (1978-1986) reportaron surgencias ($>0.3 \text{ mg/m}^3$) para los meses de octubre a abril, un área oligotrófica ($<0.2 \text{ mg/m}^3$) ubicada al oeste del Golfo, surgencias máximas para el Domo de Costa Rica (DCR) durante los meses de verano y parches de productividad en el área de julio a octubre asociados a eventos de tormenta tropical.

Como estudios enfocados al análisis de la topografía de la superficie del mar tenemos el de Stumpf y Legeckis (1977) quienes analizaron remolinos de mesoescala en el OPO a través de imágenes infrarrojas y mencionan que los remolinos estuvieron asociados con vientos formadores de surgencias y que se desplazaron hacia el oeste con una velocidad de 13 km/día y un diámetro aproximado de 300 km. McCreary *et al.* (1989) mediante el uso de modelos matemáticos analizaron la respuesta del Golfo de Tehuantepec al forzamiento por vientos perpendiculares a la costa y apuntaron que un forzamiento simétrico provocó un flujo ageostrófico hacia afuera de la costa, la formación de un

remolino anticiclónico al oeste del Golfo y un remolino ciclónico (más pequeño) el este del mismo; una vez que el forzamiento cesó el remolino anticiclónico fue propagado hacia el oeste como una onda de Rossby, mientras que el remolino ciclónico fue disipado.

Hansen y Maul (1991) analizaron la propagación de remolinos anticiclónicos en el Pacífico tropical mediante boyas rastreadas por satélite, batitermógrafos, datos de CTD y del altímetro Geosat, y sugirieron que la formación de remolinos se debió a la conservación de vorticidad potencial de la Contracorriente Ecuatorial (CcE) al virar hacia el norte conforme se acercaba a la costa centroamericana; los remolinos que detectaron se ubicaron entre 9 y 14°N y mencionaron que es su carácter no lineal lo que los hace desplazarse hacia el oeste.

Por su parte Giese *et al.* (1994) combinaron datos del altímetro TOPEX y de boyas ancladas para analizar la variabilidad de la anomalía del nivel del mar en el Pacífico este tropical, sus resultados señalan la existencia de dos bandas de variabilidad a 5 y 7°N y a 10 y 12°N, la existencia de la primer banda se atribuyó al esfuerzo de corte entre la CcE y la Corriente Ecuatorial del Sur (CES) mientras que la segunda se asoció con la formación de remolinos anticiclónicos, de entre 10 y 25 cm de altura, en los Golfos de Tehuantepec y Papagayo.

En 1989, Trasviña *et al.* (1995) analizó la respuesta del océano superficial al forzamiento por fuertes vientos del norte en el Golfo de Tehuantepec, uno de

los resultados de este estudio fué el observar al oeste del Golfo la formación de un remolino anticiclónico de ~200 km de diámetro en tanto que al este del Golfo se formó un pequeño remolino ciclónico debido a un débil flujo geostrófico superficial.

Se ha mencionado que los remolinos continúan su migración hacia mar abierto en dirección oeste-suroeste, transportando materia orgánica (nutrientes y microorganismos) y energía cinética en su interior. Por lo cual, para este trabajo se utilizará un área de estudio que cubra una mayor extensión de mar abierto en comparación con las áreas utilizadas en trabajos anteriores (Hansen y Maul 1991; Müller-Karger y Fuentes-Yaco 2000).

Desde un punto de vista económico, la materia transportada hacia mar abierto en el interior de los remolinos parece jugar un papel importante en el sostenimiento de actividades pesqueras, tales como las del atún aleta amarilla y el barrilete. De ahí en parte la importancia de conocer más a fondo la distribución espacial y temporal de fitoplancton en el área y su posible asociación con estructuras de mesoescala; lo que incrementaría la confiabilidad al determinar zonas de pesca combinando el uso de imágenes de color del océano y anomalía del nivel del mar.

III. Área de Estudio

La región del OPO analizada para este trabajo quedó limitada longitudinalmente por los meridianos 150 y 75°O y latitudinalmente por los paralelos 20°S y 30°N (Figura 1) se incluyen la costa oeste de México, Centroamérica y parte de Sudamérica.

El área se encuentra dominada por los vientos alisios salvo intrusiones, en su mayor parte invernales, de frentes fríos provenientes de Norteamérica que cruzan el macizo continental a través de depresiones en la orografía del Istmo de Tehuantepec, Nicaragua y Panamá, estas ráfagas de viento desplazan agua hacia mar abierto que es reemplazada por agua adyacente y de surgencia (Legeckis 1988; Stumpf 1975.) Los vientos alisios muestran variación en su intensidad a lo largo del año, durante los meses de diciembre a abril los alisios del noreste son más intensos que aquellos provenientes del sureste, de julio a octubre ocurre lo contrario (Wyrki 1965.)

De acuerdo con Wyrki (1965) es posible identificar seis corrientes oceánicas superficiales a lo largo del año (Figura 2):

- Corriente de California (CC).- Localizada al norte del área de estudio fluye en dirección sur; durante los meses de febrero a junio la Corriente alcanza su máximo con velocidades de 0.1 m/s y llega hasta los 15°N. En julio su flujo comienza a debilitarse y de agosto a diciembre la Corriente es desviada hacia el oeste antes de alcanzar los 20°N.

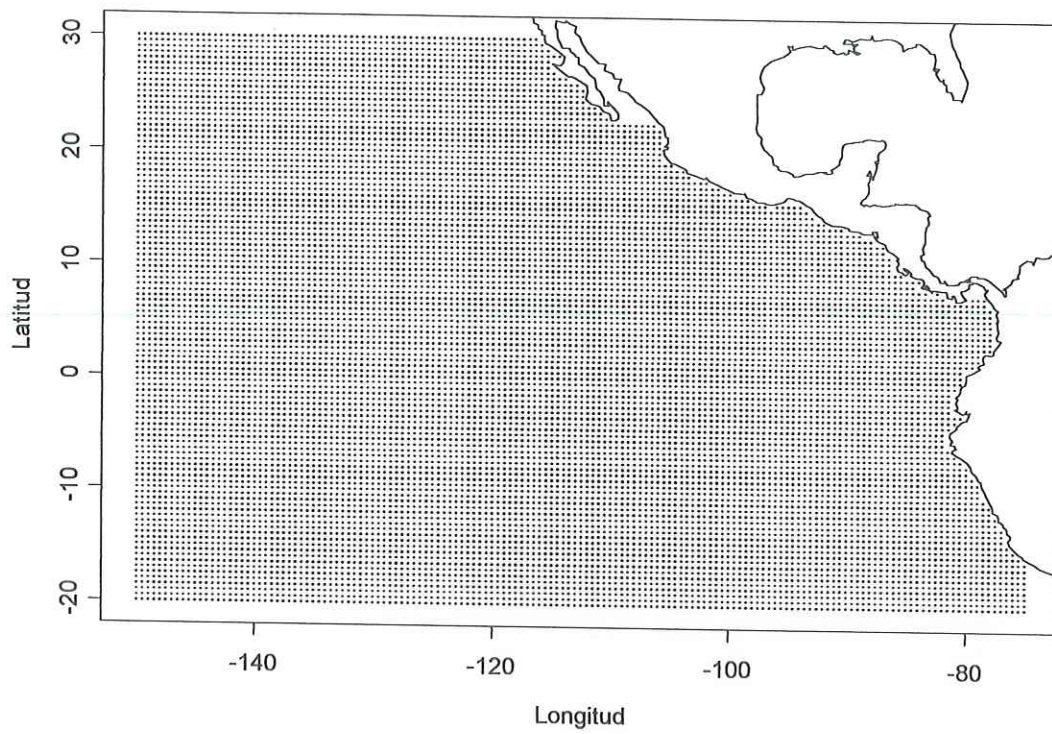
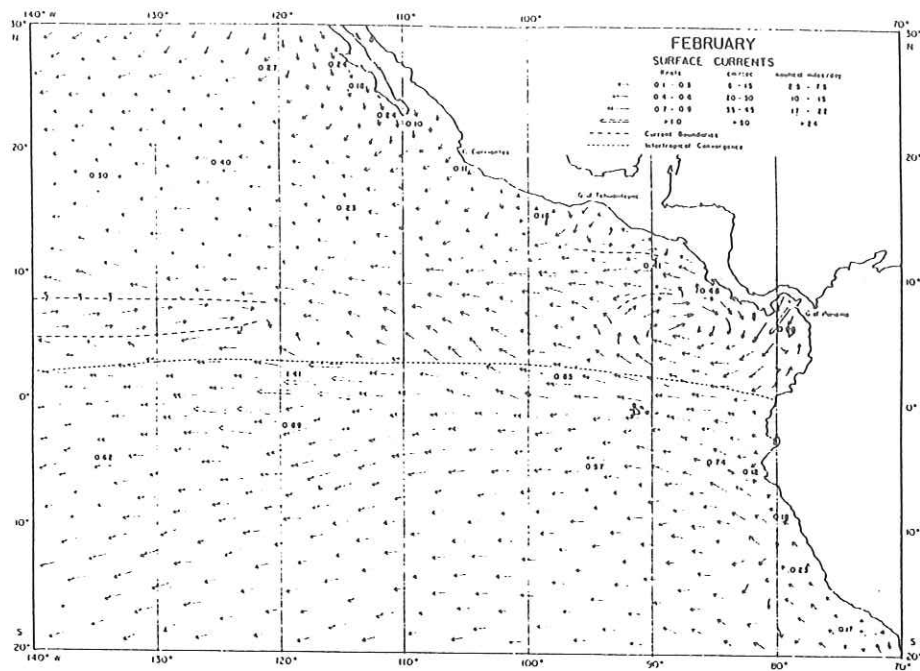
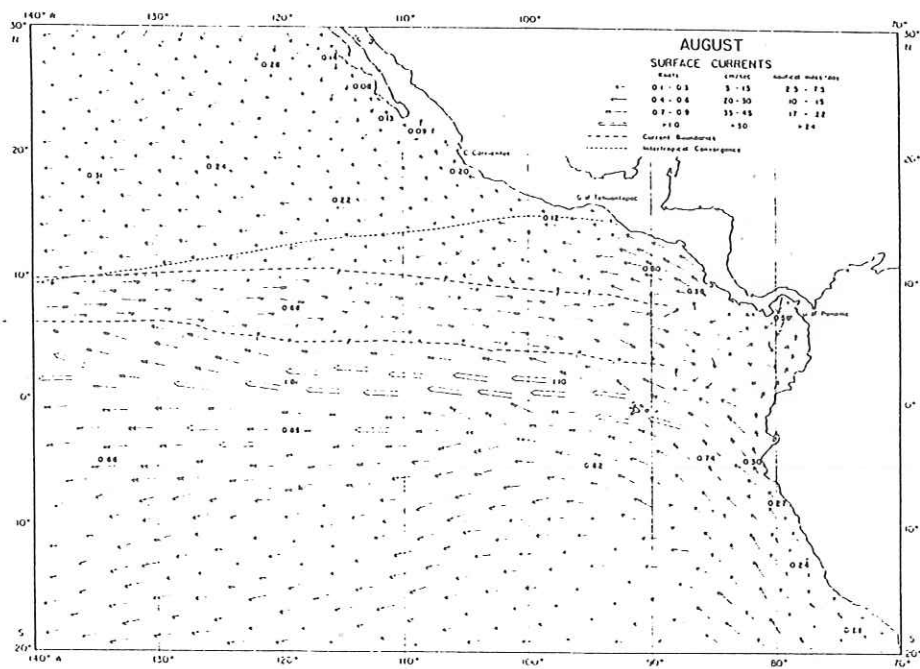


Figura 1. Ubicación del área de estudio junto con los puntos de la rejilla de interpolación.



a



b

Figura 2. Corrientes oceánicas superficiales en el Océano Pacífico tropical para los meses de febrero (a) y agosto (b) (tomado de Wyrski 1965).

- Contracorriente Ecuatorial (CcE).- Fluye en dirección este y migra estacionalmente entre los 4 y los 11°N, asimismo su ancho oscila entre 3 y 5° de latitud. La CcE se forma en mayo (140°O) y alcanza su máximo (88°O) de agosto a octubre, con velocidades promedio de 0.39 m/s entre 130 y 110°O. De febrero a marzo llega sólo hasta los 120°O y en el mes de abril desaparece.
- Corriente Ecuatorial del Norte (CEN).- Fluye hacia el oeste durante todo el año alrededor de los 11°N. Entre marzo y julio la Corriente es abastecida por la CC, el resto del año sus aguas provienen principalmente del Pacífico oriental tropical (CcE.) Su velocidad promedio es de 0.1 m/s.
- Corriente Costera de Costa Rica (CCCR).- Fluye en dirección noroeste a lo largo de la costa de Centroamérica y México. Durante su máximo, en junio y julio, llega hasta Cabo Corrientes con velocidades de 0.2 m/s de agosto a diciembre la Corriente se aleja de la costa después de pasar el G. de Tehuantepec y pasa a formar parte de la CEN. De enero a marzo la Corriente se desvía hacia el oeste, antes de alcanzar el G. de Tehuantepec, al llegar a la costa de Costa Rica.
- Corriente Ecuatorial del Sur (CES).- Fluye hacia el oeste a ambos lados del ecuador, al sur de éste las velocidades de la corriente son uniformes a lo largo del año, en tanto que al norte sus velocidades muestran una variación estacional y alcanzan su máximo de julio a noviembre 0.78 m/s.

Entre los meses de marzo y abril se forma un flujo con dirección este entre los 100 y 120°O que en el mes de mayo alcanza su máximo desarrollo, se ha sugerido que este flujo representa un ascenso de la Subcorriente Ecuatorial (Corriente de Cromwell) como consecuencia del decremento de los vientos alisios.

- Corriente del Perú.- Esta formada por una corriente costera (Corriente Costera del Perú {CCP}) una corriente oceánica (Corriente Oceánica del Perú {COP}) y una contracorriente (Contracorriente del Perú {CcP}.) Ambas corrientes fluyen en dirección noroeste, la CCP con velocidades de 0.1 m/s y la COP con velocidades un poco mayores. Entre ambas corrientes se encuentra la CcP, un flujo subsuperficial débil e irregular con dirección sur, que aparece en superficie durante los meses de noviembre a febrero y desaparece de julio a octubre.

El Pacífico tropical se caracteriza por poseer una termoclina somera (Figura 3) al este de los 100°O su profundidad es menor a los 30 m durante todo el año, excepto de septiembre a noviembre en una banda aproximadamente a 5°N donde la termoclina se sitúa a 45 m. Al oeste de 100°O la termoclina muestra una variabilidad estacional, con profundidades que en promedio oscilan entre los 30 y 60 m (Robinson y Bauer 1971).

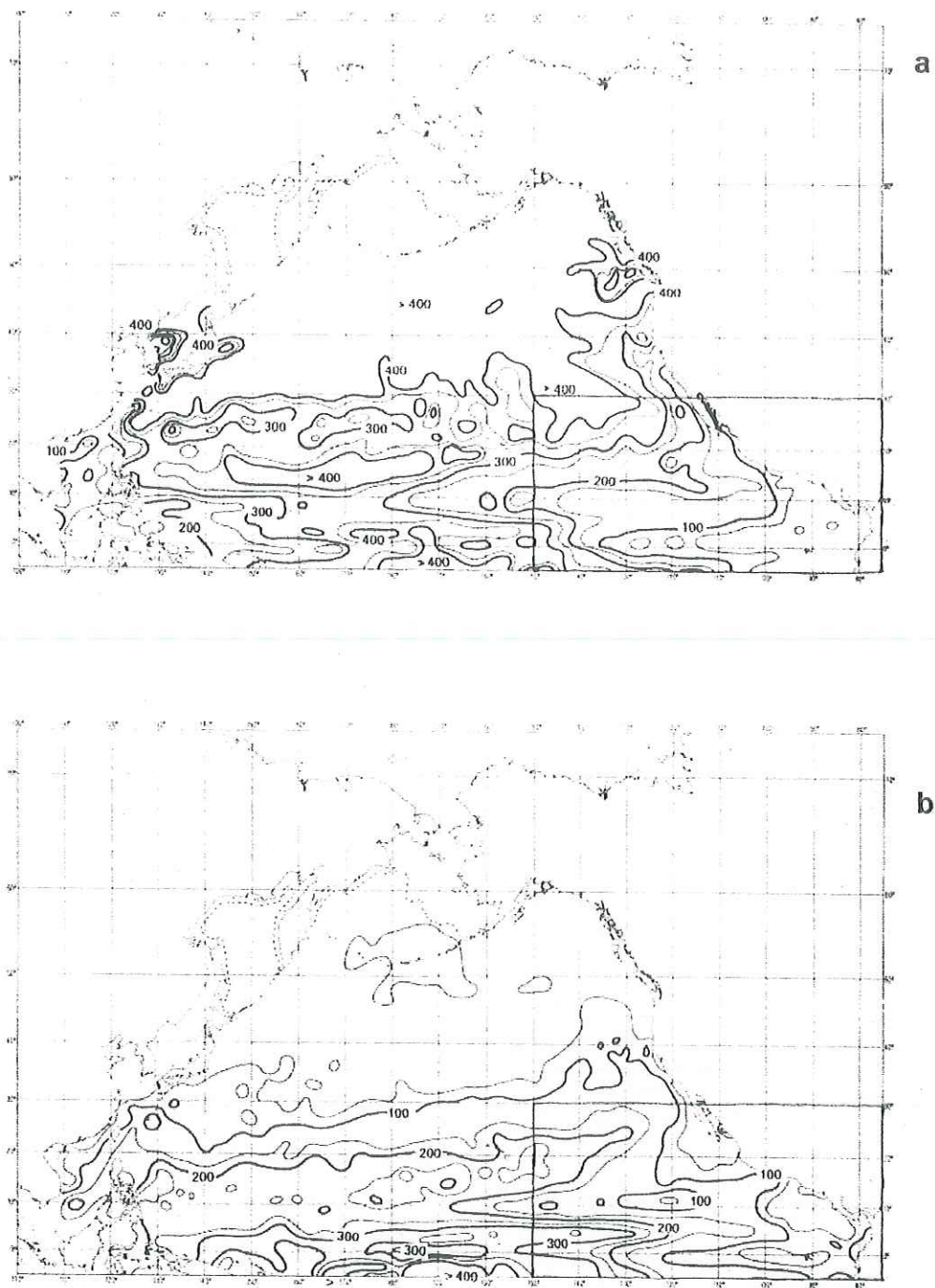


Figura 3. Profundidad media de la termoclina estacional (pies) para los meses de febrero (a) y agosto (b) para el Pacífico norte (tomado de Robinson y Bauer 1971).

La estratificación en el OPO muestra un máximo anual bien definido (picnoclina) cerca de la superficie (<100 m) lo que indica la presencia de una capa de agua cálida y con baja salinidad para la mayor parte del área. Hacia la costa la picnoclina tiende a intensificarse; al norte de 15°N la picnoclina no es tan acentuada (Emery *et al.* 1984).

Cerca de la costa existen cuatro zonas en las que estacionalmente se ha reportado la ocurrencia de surgencias: el Golfo de Tehuantepec, con surgencias de noviembre a enero (Stumpf 1975; Lluch-Cota *et al.* 1997); los Golfos de Panamá y Papagayo con altas concentraciones de pigmentos de febrero a abril (Legeckis 1988; Lluch-Cota *et al.* 1997) y en la zona conocida como Domo de Costa Rica (DCR) con surgencias de mayo a octubre (Wyrcki 1964; Hofmann *et al.* 1981; Lluch-Cota *et al.* 1997).

El DCR es un remolino ciclónico centrado alrededor de 90°O y 8°N, conocido también como Domo Termal de Costa Rica (DTCR) debido a que su temperatura es de 2 a 5°C menor a la de sus alrededores (Müller-Karger y Fuentes-Yaco 2000). El DCR fue descrito por Wyrcki (1964) como una zona con bajas temperaturas, termoclina somera (~10 m) altos contenidos de fosfato y salinidad y una saturación de oxígeno baja, todos estos indicadores de surgencia.

El área que cubre el Domo es de aproximadamente 150 a 400 km de diámetro. Inicialmente se hipotetizó que el DCR era un rasgo permanente de la circulación en el Pacífico tropical y que su formación se debía a la interacción

de la CEN, la CCCR y la CcE frente a la costa de Costa Rica que da lugar a la formación de un remolino ciclónico (Wyrтки 1964). Estudios posteriores han demostrado que la presencia del DCR no es permanente y que su formación (de mayo a octubre) se debe en gran parte a la presencia de un campo de viento ciclónico, promotor de surgencia, en el área; sin embargo durante algunas épocas del año la surgencia del DCR puede ser promovida por la inestabilidad generada entre las corrientes superficiales ya mencionadas (Hofmann *et al.* 1981).

A pesar de ser espacialmente reducida, la surgencia del DCR ha sido reconocida como significativa debido a la presencia de aguas ricas en nutrientes localizadas debajo de la delgada capa superficial, sin embargo, son necesarios más estudios para comprender su variabilidad estacional (Wyrтки 1964; Hofmann *et al.* 1981).

IV. Hipótesis

Existe una asociación entre la topografía de la superficie del océano y la concentración de clorofila "a" para el OPO que cambia de acuerdo a la posición geográfica y época del año.

V. Objetivo general

Determinar la asociación espacio-temporal entre los campos de distribución de clorofila "a" y anomalía del nivel del mar para el Océano Pacífico oriental en el periodo 1998-2001.

V.I. Objetivos particulares

Determinar la variabilidad de la anomalía del nivel del mar para el Océano Pacífico oriental.

Determinar la variabilidad de la concentración de clorofila "a" para las aguas superficiales en el Océano Pacífico oriental.

Establecer la correlación entre la anomalía del nivel del mar y la concentración de clorofila "a".

VI. Metodología

Para analizar la variabilidad de los campos de anomalía del nivel del mar y concentración de clorofila "a" se utilizaron datos de los sensores remotos TOPEX y SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field of view Sensor).

VI. I. I. Datos TOPEX

El satélite TOPEX/POSEIDON lleva consigo dos altímetros (del mismo nombre) y gira alrededor de la Tierra en una órbita circular a una altitud de 1,336 km; cada 9.9156 días (un ciclo) el satélite repite su trayectoria (o pase) sobre la superficie terrestre (± 1 km) con un margen de error, para las mediciones hechas por TOPEX menor a 5 cm.

Los datos del altímetro TOPEX eran de escala global (con una resolución espacial variable en longitud y de 1° en latitud) se encontraban agrupados en ciclos y cubrieron del ciclo 196 (08-ene-1998) al 342 (26-dic-2001), un total de 148 ciclos, cada uno de estos contenía la siguiente información:

Tabla I. Formato de los datos obtenidos del altímetro, en este caso se muestra el ciclo 196 (8-ene-1998) como ejemplo; los valores de las filas corresponden a los mínimos y máximos para cada columna.

Latitud ($^\circ$)	Longitud ($^\circ$)	Bandera	Fecha	Desviación (cm)	P
-60	0.01	-8,359.3	4,755.72	-82.16	1
60	359.99	8,357.9	4,765.56	244.97	32

Nota.- Para una explicación del valor de cada columna leer el texto de la página 21.

Las columnas 1 y 2 dan la posición geográfica de cada una de las mediciones hechas a lo largo del pase o trayectoria. La tercer columna indica la dirección del pase (ascendente o descendente) dependiendo si el signo es positivo o negativo, respectivamente. Aquí también se da información acerca de la longitud a la cual el sensor realiza el cruce por el ecuador (en este caso: 359.3° descendiendo y 357.9° ascendiendo).

Las unidades de la fecha son días, tomando como inicio el día 01-ene-1985, es decir las fechas 4,755.72 y 4,765.56 corresponden al 08-ene-1998 y 17-ene-1998 respectivamente (intervalo que forma al ciclo196). Para obtener la fecha de cualquier ciclo de una manera sistemática se utiliza la siguiente ecuación:

$$T = 2822.17 + 9.9156 * (N - 1)$$

donde:

T = es el número de días transcurridos (a partir de 1985) para el ciclo dado

2822.17= corresponde al día 23-sep-1992

N = es el número de ciclo

Para obtener el valor de desviación del nivel del mar (cm), previamente, al dato registrado por el altímetro, se le restó el valor que se obtuvo al promediar todas las mediciones hechas durante 1993-1995, es por eso que se define como una desviación (de la media) en lugar de una anomalía del nivel del mar. Este fue el

valor que utilizamos para este trabajo, sin embargo por comodidad nos referiremos a él simplemente como anomalía del nivel del mar.

El dato de la sexta columna (P) indica el número de lecturas (con una duración de 1s cada una) que se promediaron para obtener el valor correspondiente de anomalía del nivel del mar.

VI. I. II. Procesado de datos

A continuación se describe brevemente el método seguido para ajustar los datos del altímetro a una malla con una resolución de $0.5 \times 0.5^\circ$ ($\sim 55 \times 55$ km) que correspondió a nuestra área de estudio (Figura 1). Todos los comandos utilizados para esta operación se encuentran en el Apéndice 1.1.

De los 148 ciclos, 13 no pudieron ser obtenidos (Tabla II) y fueron reemplazados por interpolaciones entre los ciclos inmediatos (anterior y posterior) disponibles.

Cada ciclo fue abierto en Excel y se guardó tal cual como un documento *.xls que es un formato reconocido por el paquete de cómputo S-Plus 2000; en él se realizó el resto del procesamiento. El primer paso consistió en generar la rejilla de $0.5 \times 0.5^\circ$ (ver Apéndice 1.1).

Tabla II. Ciclos no obtenidos y que fueron sustituidos con interpolaciones de los ciclos anterior y posterior inmediatos.

Ciclo no disponible	Fecha correspondiente
197	18-ene-1998
209	17-may-1998
216	26-jul-1998
224	13-oct-1998
233	10-ene-1999
234	20-ene-1999
243	19-abr-1999
256	26-ago-1999
266	03-dic-1999
278	31-mar-2000
289	18-jul-2000
299	26-oct-2000
307	13-ene-2001

Como segundo paso se seleccionaron sólo aquellos valores que correspondieran a nuestra rejilla (150-75°O y 20°S-30°N) para después separar las columnas 1, 2 y 5 (ver Tabla I) del resto (longitud, latitud y anomalía). Para ajustar los valores de anomalía a la rejilla se aplicó un algoritmo de regresión local conocido como loess que genera una función o superficie de regresión para una variable dependiente (anomalía o clorofila) a partir de la combinación lineal de dos o más variables independientes (longitud y latitud) y sus interacciones (Chambers y Hastie 1993). La ecuación de un loess es de la forma:

$$y_i = g(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip}) + \varepsilon_i$$

donde:

y_i = predicción hecha para la variable independiente en un punto de la rejilla

g = es la superficie de regresión

x_{ip} = cada una de las variables independientes y sus interacciones

ε_i = error hecho por el ajuste

Después de generar el modelo estadístico (loess) se obtuvieron sus valores de predicción para cada punto de nuestra rejilla (ver Apéndice 1.1). Una vez interpolada la rejilla (con dimensión 151x101) se transformó a un vector columna y se le agregaron los vectores columna "longitud" y "latitud" para georeferenciar cada valor (longitud, latitud, anomalía.) Posteriormente se generó otra rejilla de la que se eliminaron todos aquellos puntos cuya posición estuviera en tierra y se utilizó para blanquear la rejilla de interpolación, la longitud del vector ya blanqueado fue 12,452. Por último se formó un bloque con los valores de posición en las primeras dos columnas y los valores de anomalía para los 148 ciclos en las siguientes columnas (longitud, latitud, h196,..., h342).

VI. I. III. Análisis numérico

Una vez que se tuvieron interpolados los valores de anomalía del nivel del mar para la malla de 0.5x0.5° del ciclo 196 al 342 (1998-2001) se procedió al análisis de su variabilidad (Apéndice 1.2) para lo cual se utilizaron las siguientes técnicas estadísticas: "Funciones Empíricas Ortogonales" (FEO's) y "árboles de

regresión”.

Las funciones empíricas ortogonales es una técnica utilizada para comprimir la variabilidad contenida en un conjunto de series de tiempo (matriz de dimensiones $M \times N$) (Kelly 1988), esta variabilidad es representada a través de funciones ortogonales, que posteriormente son relacionadas con procesos que ocurren en la realidad, generalmente los primeros modos o funciones contienen la mayor parte de la variabilidad (ya sea espacial o temporal). Se definen como *funciones empíricas* ya que sólo muestran el comportamiento (concentrado) de la variabilidad de los datos y no están directamente relacionadas a ningún fenómeno real (son adimensionales), su forma algebraica es:

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

donde:

ψ = matriz con las N funciones empíricas ortogonales

a_i = matriz con las N amplitudes dependientes del tiempo

ϕ_{im} = matriz con las N funciones o modos espaciales

Las FEO's permiten expresar la variabilidad de una matriz de datos D ($M \times N$) como el producto de tres matrices: una matriz U (funciones espaciales) una matriz A (amplitudes temporales) y una matriz S (valores característicos) que indica el porcentaje de variabilidad explicado por cada función (ver Apéndice 3).

El árbol de regresión es una técnica numérica que utiliza como parámetro la heterogeneidad de la “desviación” (suma ponderada de los cuadrados del error respecto al ajuste aplicado) y separa en nodos o ramas aquellos datos más homogéneos entre sí; hasta obtener “n” nodos terminales homogéneos o, con un número de datos ≤ 5 por nodo terminal (Venables y Ripley 1994). Debido a que el número de nodos terminales generado por cada árbol (entre 16 y 28) era poco funcional para nuestros objetivos, fue necesario utilizar otra función estadística conocida como “validación cruzada”, ésta permite aproximar un número mínimo de nodos terminales a un determinado árbol sin que exista un incremento significativo en su desviación. A esta acción se le denomina “podado”. Después de haber podado los árboles el número de nodos terminales se redujo en un 68% (Tabla III).

Para analizar la variabilidad espaciotemporal de la anomalía del nivel del mar se generaron cinco arreglos: para el primero se utilizó la media de los 148 ciclos [longitud, latitud, media]; para el segundo se agruparon los tres primeros modos espaciales U_{1-3} [longitud, latitud, modo1, modo2, modo3]; y para los últimos tres se formaron tres bloques (para los 148 ciclos) en donde el factor de agrupación fue el signo de las amplitudes (A) de los primeros tres modos espaciales; previamente a cada una de las amplitudes se les aplicó una estandarización tipo Z para poder hacer comparaciones entre ellas.

Tabla III. Número de nodos terminales (áreas) antes y después de utilizar validación cruzada, para cada uno de los arreglos generados para la anomalía del nivel del mar y clorofila. c=ciclos; m=meses, N=nodos terminales o ramas.

Arreglo		Anomalía		Clorofila	
		N. iniciales	N. finales	N. iniciales	N. finales
1	media	17	6	22	7
2	modo 1	16	5	22	7
	modo 2	24	5	22	7
	modo 3	28	8	23	7
3 1er. amplitud	c/m -	28	8	---	---
	c/m +	18	9	22	7
4 2da amplitud	c/m -	23	10	23	6
	c/m +	20	8	21	6
5 3er. amplitud	c/m -	21	9	19	6
	c/m +	25	8	23	6

No hubo amplitudes negativas para el arreglo 3 (1er. amplitud) de clorofila.

Para el arreglo de la media se graficó la correspondiente distribución espacial de la anomalía del nivel del mar junto con las áreas determinadas con el árbol de regresión podado. Para los siguientes cuatro arreglos se llevó a cabo el mismo procedimiento.

Para construir la matriz D a partir de la cual se obtuvieran las FEO's se formó un bloque de dimensiones $12,452 \times 148$ en donde las filas representaban los puntos dentro de la malla de interpolación (espacio) y las columnas a cada uno de los ciclos del satélite (tiempo.) A esta matriz se le aplicó una Descomposición en Valores Singulares (DVS) que es un método numérico que permite obtener de una manera más sencilla las matrices U (funciones espaciales) y A (amplitudes temporales) que constituyen las FEO's (Venables y Ripley 1994).

$$D = USV^T$$

donde:

D = matriz de datos original

U = funciones o modos espaciales

S = eigenvalores o valores característicos

V^T = matriz transpuesta de las funciones o modos temporales

Además de las matrices, se obtuvieron los valores singulares S con los que se determinó el porcentaje de variabilidad (Tabla IV) explicado por cada FEO. Finalmente se decidió tomar los primeros tres modos (columnas) de la matriz U debido a que estos fueron los que agruparon el mayor porcentaje de la varianza relativa. Estos fueron agrupados en un bloque junto con las columnas de longitud y latitud para formar el 2do. arreglo.

Tabla IV. Porcentajes, individual y acumulativo de la variabilidad explicada por cada modo, para anomalía del nivel del mar y concentración de clorofila.

Modo	Anomalía del nivel del mar		Concentración de clorofila	
	% individual	% acumulativo	% individual	% acumulativo
1	17.594		38.431	
2	10.367	27.961	14.227	52.658
3	6.769	34.730	6.993	59.651

En los últimos tres arreglos, para cada modo se produjeron dos bloques (ver Apéndice 1.2) uno con todos aquellos ciclos cuya amplitud fuera positiva y otro para los ciclos con amplitudes negativas (Tabla V) posteriormente se trabajó con el valor promedio de cada uno de estos bloques.

Tabla V. Estructura de los arreglos 3, 4 y 5 para los 148 ciclos muestreados; como criterio de agrupación se utilizó el signo de la amplitud de los primeros tres modos espaciales.

Arreglo 3 (1er. modo)			
Ciclos negativos	Meses corresp.	Ciclos positivos	Meses corresp.
001-009	ene,08-mar,29 ('98)	010-011	abr,07-17 ('98)
012	abr,27 ('98)	013-148	may,07-dic,26 ('98-'01)
ciclos totales	10	ciclos totales	138
Arreglo 4 (2do. modo)			
Ciclos negativos	Meses corresp.	Ciclos positivos	Meses corresp.
033-040	nov,22-ene,30 ('98-'99)	001-032	ene,08-nov,12 ('98)
056-078	jul,08-feb,01 ('99-'00)	041-055	feb,09-jun,28 ('99)
097-115	ago,07-feb,02 ('00-'01)	079-096	feb,11-jul,28 ('00)
131-148	jul,10-dic,26 ('01)	116-130	feb,12-jun,30 ('01)
ciclos totales	68	ciclos totales	80
Arreglo 5 (3er. modo)			
Ciclos negativos	Meses corresp.	Ciclos positivos	Meses corresp.
001-007	ene,08-mar,09 ('98)	008-038	mar,19-ene,10 ('98-'99)
039-055	ene,20-jun,28 ('99)	056-073	jul,18-dic,23 ('99)
074-092	dic,30-jun,19 ('99-'00)	093-109	jun,29-dic,04 ('00)
110-129	dic,14-jun,20 ('00-'01)	130-146	jun,30-dic,06 ('01)
147-148	dic,16-dic,26 ('01)		
ciclos totales	65	ciclos totales	83

El producto de las funciones espaciales U con las amplitudes A reproducen el comportamiento de la variable original D , entre mayor sea el número de funciones/amplitudes utilizadas en el producto mayor será su similitud al

comportamiento de la variable original. Por lo tanto la oscilación de cada amplitud es un indicador sobre la variación de la función espacial en el tiempo, más no siempre tiene una interpretación física directa.

El hecho de que la amplitud para algunos ciclos sea positiva o negativa sugiere que la similitud entre dos ciclos adyacentes será mayor si sus amplitudes poseen el mismo signo que si éstas son de signo contrario. Esa es la razón por la que se decidió agrupar por “ciclos positivos” y “ciclos negativos”.

VI. II. I. Imágenes SeaWiFS

El sensor SeaWiFS se encuentra a bordo del satélite SeaStar y orbita la Tierra a una altura de 705 km con un tiempo de revisita de 1 día. SeaWiFS determina a través de 8 bandas en el espectro visible (Tabla VI) la concentración de clorofila “a” (mg/m^3) para la superficie del océano.

Tabla VI. Bandas y longitudes de onda en el espectro del visible que utiliza SeaWiFS para determinar la concentración de clorofila “a” en la superficie del océano.

Banda	Longitud de onda (nm)
1	402 – 422
2	433 – 453
3	480 – 500
4	500 – 520
5	545 – 565
6	660 – 680
7	745 – 785
8	845 – 885

Se obtuvieron 48 imágenes mensuales globales de color del océano, correspondientes al periodo de enero de 1998 a diciembre de 2001 con una resolución de 9x9 km.

VI. II. II. Procesado de datos

Se utilizaron los paquetes de cómputo Windows Image Manager (WIM versión 5.33) y Matrix Laboratory (MatLab versión 5.3) para extraer el área de estudio de las imágenes globales y reducir su resolución a $0.5 \times 0.5^\circ$ (~55x55 km). Algunos de los comandos utilizados a continuación se incluyen en el Apéndice 2.1.

El primer paso consistió en extraer el área de estudio de cada una de las imágenes, combinando una imagen del área de estudio generada en WIM con la imagen global; posteriormente se guardó la imagen extraída.

En MatLab se generó un algoritmo para sustituir todos aquellos pixeles que tuvieran el valor 66.83 que indica que la concentración de clorofila para ese punto no pudo ser determinada debido a nubosidad o a problemas con el sensor y en su lugar se utilizó un valor interpolado en 3 dimensiones (espacio y tiempo.) Cada una de las imágenes interpoladas se salvo en formato *.mat para continuar su procesamiento en S-Plus.

Para facilitar la edición del algoritmo en S-Plus se renombraron las imágenes *.mat en orden ascendente: m1 para enero '98 hasta m48 para diciembre '01.

Para disminuir la resolución de las imágenes a $0.5 \times 0.5^\circ$ se utilizaron las mismas

rejillas (interpolación y blanqueo) del procesamiento para imágenes TOPEX. Antes que eso, cada imagen *.mat (600x800 píxeles) se transformó a un vector columna para formar un bloque de tres columnas (longitud, latitud e imagen) a cada uno de estos bloques se le aplicó un loess, al utilizarlo sobre la rejilla de interpolación se obtuvieron dos cosas: los valores para cada punto en la rejilla y eliminar algunos píxeles que aún después de la interpolación en 3 dimensiones continuaron sin valor de clorofila.

Una vez que se generaron los valores para la rejilla de interpolación, ésta se transformó en un vector columna y se unió a las columnas de posición (longitud y latitud) para después extraer de ellos (con la rejilla blanqueadora) todos aquellos puntos que cayeran en tierra (ver Apéndice 2.1.) El bloque final se formó con las coordenadas de longitud y latitud en las primeras dos columnas y las concentraciones de clorofila para los 48 meses en las siguientes (longitud, latitud, m1,..., m48) la dimensión de este bloque fue 12,452x50.

El propósito de utilizar las mismas rejillas para ambos datos (TOPEX y SeaWiFS) fue el de tener valores para los mismos puntos geográficos del área de estudio.

VI. II. III. Análisis numérico

Debido a que la distribución de frecuencias para las imágenes de clorofila fue similar a una Poisson fue necesario utilizar el logaritmo de su concentración $[\ln(\text{mg}/\text{m}^3)]$ como unidad en el posterior análisis estadístico. Hacerlo de esta manera permitió que las bajas concentraciones de clorofila, características de mar abierto, no perdieran representatividad al ser procesadas conjuntamente con concentraciones altas del pigmento, características de la zona costera.

El procedimiento estadístico seguido con las imágenes interpoladas de clorofila (ver Apéndice 2.2) fue similar al aplicado en las imágenes de anomalía del nivel del mar. Se agruparon los 48 meses (que formaron nuestra serie de tiempo) en una matriz D a partir de la cual se obtuvieron las FEO's, en donde las columnas representaron los 48 meses y las filas los 12,452 puntos en la rejilla de interpolación. De acuerdo al porcentaje de varianza explicado se seleccionaron sólo las primeras tres FEO's.

Nuevamente para analizar la variabilidad espacial se generaron cinco arreglos: en el primer arreglo se utilizó la media de los 48 meses $[\text{longitud}, \text{latitud}, \text{media}]$; en el segundo se agruparon los tres primeros modos espaciales U_{1-3} $[\text{longitud}, \text{latitud}, \text{modo1}, \text{modo2}, \text{modo3}]$; y para los tres restantes se formaron tres bloques (para los 48 meses) en donde el factor de agrupación fue el signo que tuvieran las amplitudes de los primeros tres modos espaciales (Tabla VII).

Tabla VII. Estructura de los arreglos 3, 4 y 5 para los 48 meses muestreados; como criterio de agrupación se utilizó el signo de la amplitud de los primeros tres modos espaciales.

Arreglo 3				Arreglo 4				Arreglo 5			
Amplitud 1				Amplitud 2				Amplitud 3			
lon	lat	mes-	mes+	lon	lat	mes-	mes+	lon	lat	mes-	mes+
		---	m01-m48			m08	m01-m07			m01-m05	m06-m12
		---	---			m12-m48	m09-m11			m13-m18	m19-m21
		---	---			---	---			m22-m30	m31-m34
		---	---			---	---			m35-m42	m43-m45
		---	---			---	---			m46-m48	---
meses totales			48	meses totales		38	10	meses totales		31	17

La primer amplitud (arreglo 3) fue positiva para los 48 meses muestreados.

A cada uno de los arreglos se le aplicó un árbol de regresión, junto con su validación cruzada. El propósito de usar árboles de regresión fue el establecer una diferenciación espacial del área de estudio con base en la heterogeneidad de cada una de las variables.

VI. III. Correlación espacio-temporal entre anomalía del nivel del mar y concentración de clorofila "a"

Para terminar de cumplir con los objetivos planteados se determinó la correlación que existió entre los campos de anomalía del nivel del mar y concentración de clorofila "a" al aplicar un análisis de correlación canónica. Éste genera una matriz con las combinaciones lineales para cada uno de los campos dados, tales que la correlación entre las variables canónicas es máxima; el número de combinaciones lineales, correlaciones y variables canónicas

realizadas es igual al número mínimo de columnas (variables) presentes en ambos campos (Manly 1995).

Para generar la variable canónica correspondiente es necesario multiplicar a cada una de las combinaciones lineales por su respectivo campo de datos original.

$$\begin{array}{l} P_i = x_i S_1 \\ Q_i = y_i S_2 \end{array}$$

donde:

P_i y Q_i = son las variables canónicas para cada uno de los campos

x_i y y_i = son las matrices con las combinaciones lineales de cada variable

S_1 y S_2 = son las matrices con los datos originales de cada campo

Existe también una condición de ortogonalidad e independencia mutua y se refiere a que la 2da. correlación canónica es ortogonal e independiente a la primera, la 3er. correlación canónica es ortogonal e independiente a la 1er. y 2da. correlaciones canónicas y así sucesivamente.

En este caso la dimensión de los campos de anomalía y clorofila fue la misma (12,452x48) en donde las filas representaron cada uno de los puntos dentro de la malla de interpolación y las columnas cada uno de los meses muestreados.

Los comandos utilizados para esta operación se incluyen en el Apéndice 4.

Se realizó un promedio mensual para el campo de anomalía del nivel del mar, ya que su unidad temporal fue de ciclos, de aproximadamente 10 días cada

uno. Posteriormente se aplicó la función de correlación canónica al par de campos. De este análisis se obtuvieron las correlaciones para cada una de las variables canónicas, además de los coeficientes de correlación para cada uno de los campos. Con base en el valor de correlación de cada una de las variables canónicas se decidió sólo utilizar las primeras tres de cada campo, de la misma forma que se utilizaron sólo las primeras tres FEO's.

VII. Resultados

VII. I. I. Arreglo para la media de la anomalía del nivel del mar

La imagen correspondiente al promedio de los 148 ciclos (Figura 4a) quedó dividida de acuerdo a su árbol de regresión podado en tres áreas principales: el área I separada del resto por una línea aproximadamente a 10°S , fué la única con valor de anomalía positivo (0.13 cm); el área II conformó la provincia costera con una anomalía de -2.56 cm; la tercer área (provincia oceánica) quedó dividida en cuatro áreas más con anomalías negativas que fueron de -3.15 a -7.05 cm. Asimismo, se apreció que la anomalía del nivel del mar para toda el área de estudio presentó un patrón zonal, distribuido a lo largo de cuatro bandas: la primera situada al sur de 10°S (anomalías positivas); la segunda, y más importante, entre 10°S y 5°N (área III); otra entre 5 y 13°N (área IV) y una cuarta al norte de los 13°N (áreas V y VI.)

Los rasgos más sobresalientes para el promedio de las anomalías son: una banda con anomalías positivas (0.13 cm) al sur de 10°S , la depresión en el nivel del mar (-7.05 cm) ubicada en el área III que alcanzó a penetrar en el área II y una zona con anomalías negativas (-5.88 cm) ubicada al suroeste de la península de Baja California. Entre las zonas con anomalía negativa se situó una banda a aproximadamente 10°N con valores de anomalía positivos (área IV y II) a pesar de que el valor promedio para esas áreas fue negativo.

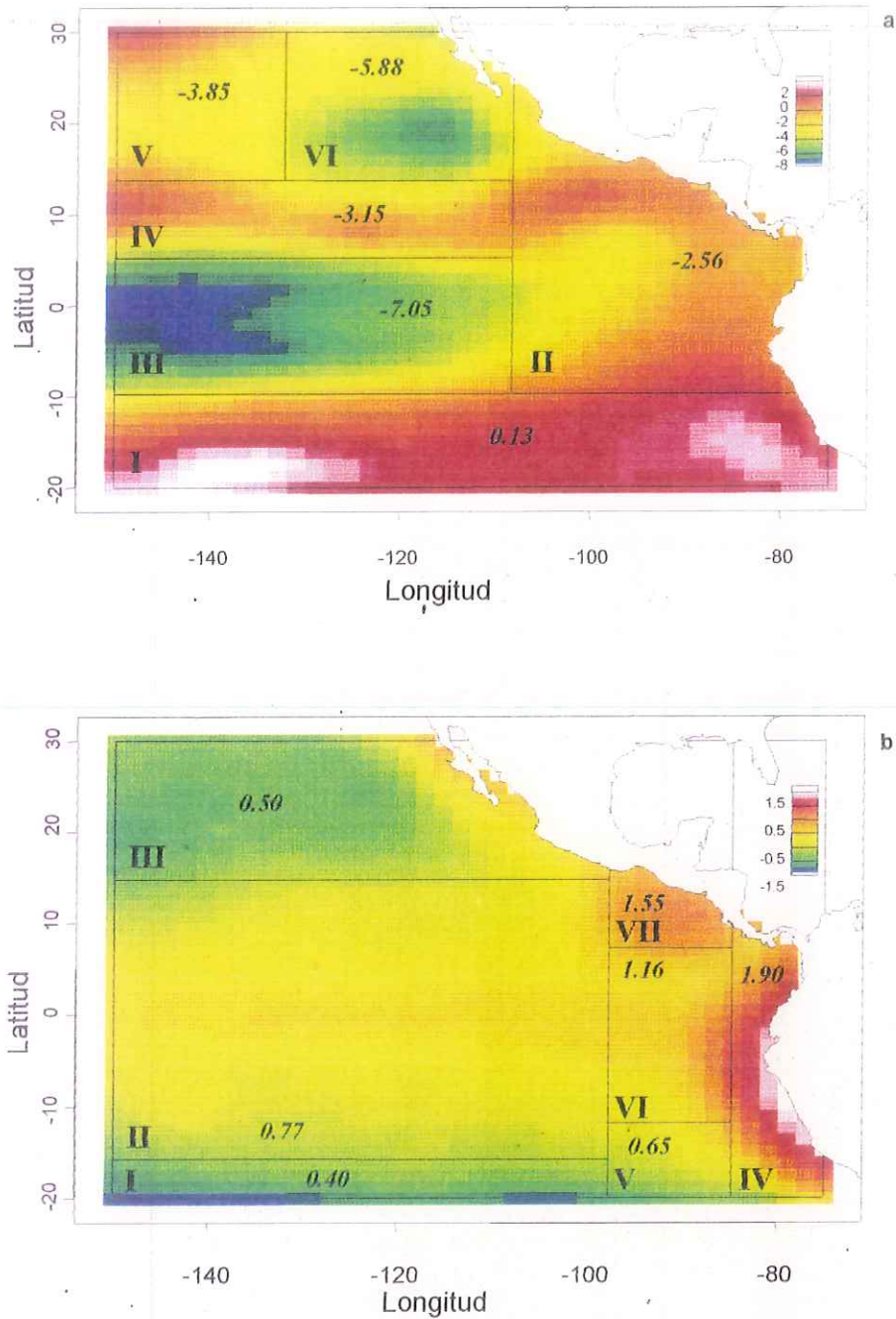


Figura 4. Distribución espacial para la media de toda la serie (1998-2001) de la anomalía del nivel del mar (cm) (a) y el logaritmo de la concentración de clorofila "a" ($\ln\{mg/m^3\}$) (b). Se indican las áreas determinadas mediante un árbol de regresión, junto con su valor de anomalía y concentración de clorofila transformado a mg/m^3 .

La banda al sur de 10°S presentó las mayores anomalías positivas frente a la costa de Perú y en 140°O y 20°S. La actividad frente a las costas de Centroamérica y el sureste de México fue menor respecto a la de mar abierto.

VII. I. II Arreglo para la media de la concentración de clorofila

La unidad utilizada para elaborar las estructuras espaciales y árboles de regresión fué el logaritmo de la concentración de clorofila "a" ($\ln\{\text{mg}/\text{m}^3\}$) para facilitar su interpretación las concentraciones ajustadas por el árbol de regresión, para cada una de las áreas que se mencionan a continuación, fueron transformadas a mg/m^3 .

El número de nodos terminales iniciales fue de 22, aplicando la validación cruzada éste fué reducido a 7 áreas (Tabla III) tres para la provincia oceánica y cuatro para la provincia costera (Figura 4b). Esta última presentó valores altos de concentración de clorofila (alrededor de $2 \text{ mg}/\text{m}^3$) frente a la costa sudamericana; el segundo sitio donde se presentaron altas concentraciones de clorofila fue al sureste del G. de Tehuantepec ($1.5 \text{ mg}/\text{m}^3$). Por su parte en la provincia oceánica las concentraciones más altas se ubicaron alrededor de la banda ecuatorial ($\sim 1 \text{ mg}/\text{m}^3$) y disminuyeron más rápidamente al alejarse hacia el sur que hacia el norte debido tal vez a la profundidad a la que se encontraba la termoclina (Figura 3).

El área III (Figura 4b) presentó concentraciones mayores ($0.50 \text{ mg}/\text{m}^3$) que el área I ($0.40 \text{ mg}/\text{m}^3$). Esto podría indicar que el área al norte de 14°N tiene una

mayor productividad que aquella al sur de 15°S , considerando la concentración de clorofila como un indicador de fitoplancton. El área adyacente a la península de Baja California presentó valores de alrededor de $1\text{mg}/\text{m}^3$. Esta condición con altas concentraciones de clorofila ecuatoriales que disminuyen al alejarse del mismo y concentraciones altas también cercanas a la costa, algunas veces, son asociadas a condiciones no-Niño o La Niña, dependiendo (entre otras cosas) de la topografía de la superficie oceánica y del patrón de circulación atmosférico.

VII. II. Amplitudes temporales (anomalía y clorofila)

Las gráficas de las amplitudes para los tres primeros modos espaciales de la anomalía del nivel del mar y la concentración de clorofila "a" se muestran en la figura 5; todas ellas fueron previamente estandarizadas para hacer válida la comparación entre amplitudes. Para la anomalía, la amplitud del 2do. y 3er. modo presentaron una periodicidad anual. Para el 2do modo (Figura 5c) su amplitud mostró una disminución en la altura relativa de sus crestas conforme avanzó la serie de tiempo; el 3er. modo (Figura 5e) en cambio, presentó alturas iguales para las crestas de 1999 a 2001, la cresta de 1998 fue un poco mayor al resto, esto pudo deberse a la condición de El Niño 1997-98. La amplitud de la anomalía para el primer modo mostró un comportamiento distinto, presentando valores negativos solamente para el primer semestre de 1998, durante este año sus valores de amplitud incrementaron de manera casi lineal; de 1999 a 2001 la amplitud osciló con una periodicidad cercana a la anual, con las crestas

presentes en el primer semestre y los valles en el segundo semestre de cada año.

La periodicidad para las amplitudes de la concentración de clorofila fue menor a la anual (10 meses) con excepción del 3er modo (que fue anual); la amplitud del 1er. modo (Figura 5b) mostró un rápido incremento durante 1998, para el resto de la serie mostró los valores más bajos durante el primer semestre y los valores más altos para el segundo semestre de cada año. La amplitud del 2do. modo presentó sus valores más altos durante 1998 (Figura 5d) que disminuyeron abruptamente del primer al segundo semestre de ese año, durante los siguientes semestres su oscilación fue baja y con amplitudes exclusivamente negativas. La 3er. amplitud mostró una periodicidad anual con un mayor número de amplitudes negativas respecto a las positivas; la cresta a finales de 1998 tuvo la mayor altura relativa, las tres crestas siguientes tuvieron una altura menor que incrementó gradualmente hacia el final de la serie de tiempo.

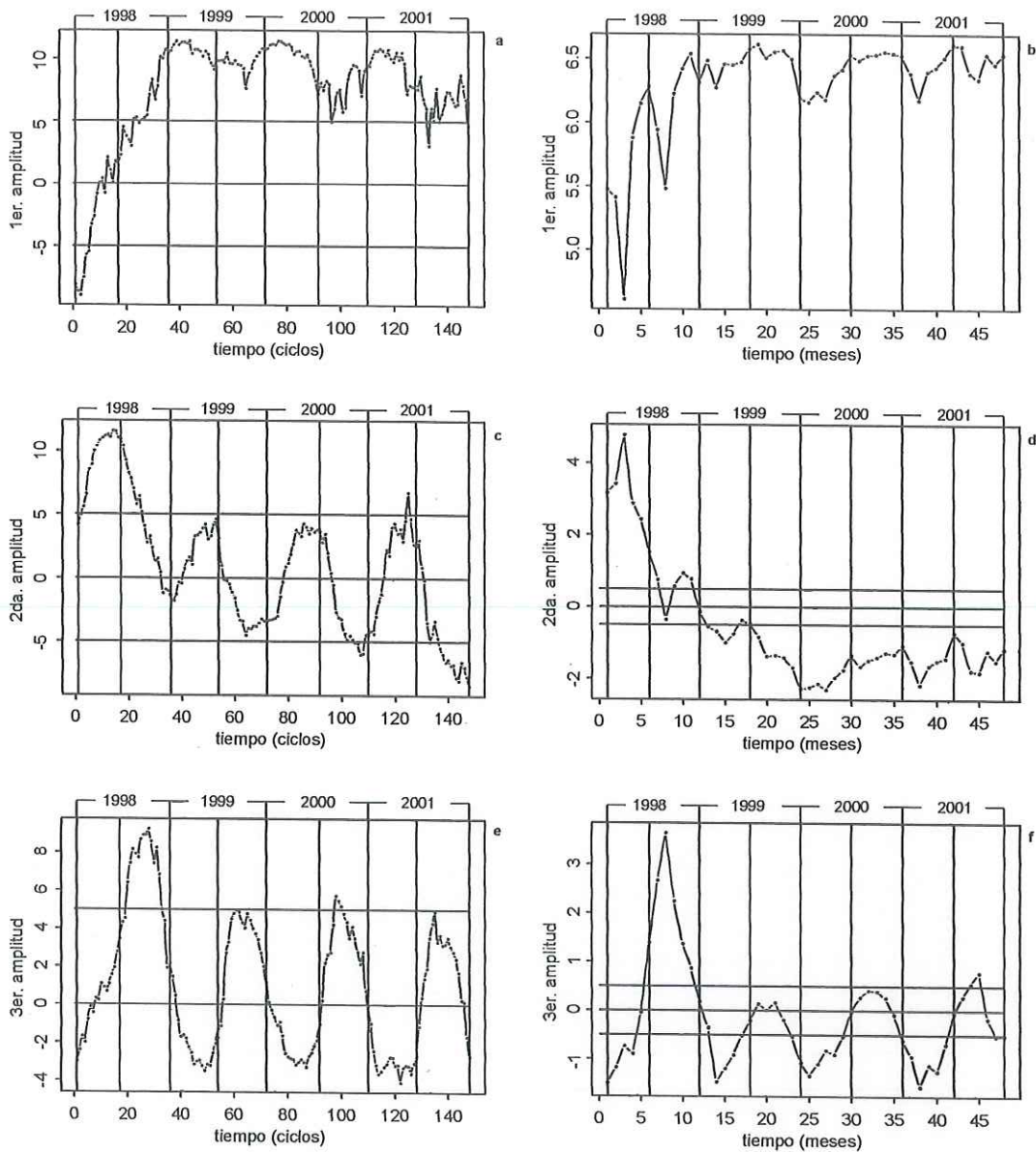


Figura 5. Series de tiempo de las amplitudes del primer (a, b), segundo (c, d) y tercer (e, f) modo para la anomalía del nivel del mar (izquierda) y el logaritmo de la concentración de clorofila "a" (derecha). Las divisiones verticales corresponden a los 8 semestres muestreados. Se marcan divisiones horizontales para las amplitudes 5, 0, -5 (izquierda) y 0.5, 0, -0.5 (derecha).

VII. III. I. Arreglos para los tres primeros modos espaciales (anomalía)

El 1er. modo explicó el 17.59% de la variabilidad total de los datos (Tabla IV); mediante el árbol de regresión podado se delimitaron cinco áreas para la región (Figura 6a): un área ubicada por debajo de los 10°S, dos áreas entre los 10°S y 7°N y otras dos al norte de 7°N. Esta vez los valores proporcionados por el ajuste son adimensionales (se trata de funciones ortogonales) y sólo son un indicador de la heterogeneidad de la variable en el área de estudio. Las zonas con alta variabilidad, ya sea positiva o negativa, indican que el grado de heterogeneidad de la variable (anomalía o clorofila) fue mayor en comparación con el de zonas con variabilidades cercanas a cero.

El patrón espacial representado por la 1er. función espacial muestra mayor variabilidad en la provincia oceánica respecto a la provincia costera excepto al sur de la costa de Baja California donde se observaron dos centros con variabilidad negativa. La actividad oceánica fue dominada por un centro ecuatorial de variabilidad negativa ubicado entre 150 y 100°O y en menor proporción por un centro ubicado al suroeste del área de estudio (150°O, 20°S). La estructura de este modo fue similar a aquella de la media de toda la serie (Figura 4a).

El 2do. modo explicó el 10.36% de la variabilidad total de los datos (Tabla IV) y como se puede ver en la figura 6c quedó dividido en cinco áreas. La primera de ellas al este de 111°O constituyó la provincia costera, en tanto

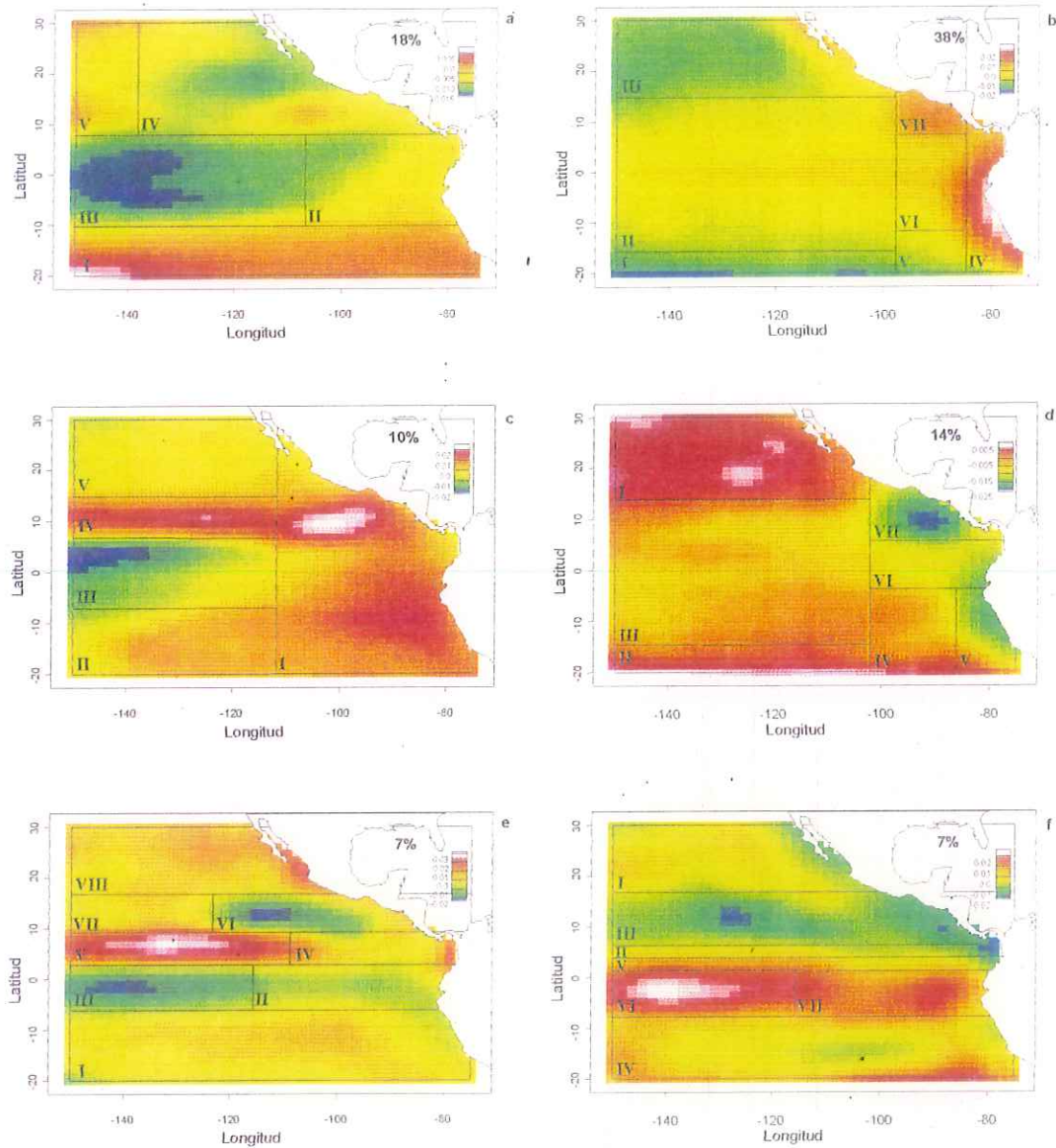


Figura 6. Distribución espacial de la variabilidad para la anomalía del nivel del mar (izquierda) y el logaritmo de la concentración de clorofila "a" (derecha) para la primer (a, b), segunda (c, d) y tercer (e, f) FEO. Se indican las áreas determinadas utilizando un árbol de regresión y el porcentaje de varianza explicado por cada FEO.

que la provincia oceánica quedó dividida en cuatro áreas más, dispuestas zonalmente y separadas por los paralelos 7°S , 6°N y 14°N .

Esta vez la variabilidad fue mayor para la provincia costera; el principal centro de variabilidad positiva se ubicó al suroeste del G. de Tehuantepec y abarcó la provincia oceánica a aproximadamente 10°N ; un segundo centro (del mismo signo) se encontró frente a la costa de Ecuador y cubrió una mayor extensión de la provincia costera que el anterior. La actividad en la provincia oceánica fue representada por una estructura ecuatorial, de variabilidad negativa, localizada entre 150° y 120°O .

El 3er modo explicó el 6.76% de la variabilidad total de los datos (Tabla IV) y de acuerdo con su árbol de regresión quedó dividido en 8 áreas (Figura 6e) seis de las cuales quedaron dispuestas entre 8°S y 16°N , las áreas I y VIII quedaron ubicadas al sur y al norte del resto.

El 3er. modo mostró la mayor parte de la variabilidad en la anomalía del nivel del mar entre 15°N y 15°S , siendo ligeramente mayor en la provincia oceánica que en la costera. Al norte y al sur de 2°N se encontraron los principales centros de variabilidad (positiva y negativa) que abarcaron desde 150°O hasta 110°O y la costa de Perú, respectivamente. Al suroeste de Cabo Corrientes se encontró el segundo centro de variabilidad negativa (entre 120° y 90°O). A diferencia de los primeros dos modos aquí se observaron indicadores de alta variabilidad positiva en el Golfo de Panamá y en la boca del Golfo de California.

VII. III. II. Arreglos para los tres primeros modos espaciales (clorofila)

El 1er. modo explicó el 38.43% de la variabilidad de la clorofila en nuestros datos. La distribución espacial de los contornos de concentración (Figura 6b) fue la misma que para el caso de la media de los 48 meses (Figura 4b) al igual que el número y la delimitación de áreas. Ya que los modos son adimensionales ahora la escala de los contornos sólo puede ser interpretada como un indicador de la variabilidad; nuevamente, las zonas con alta variabilidad, ya sea positiva o negativa, indican que el grado de heterogeneidad de la variable fue mayor en comparación con el de zonas con variabilidades cercanas a cero.

Adyacente a la costa se presentaron dos centros de alta variabilidad positiva, el más importante frente a la costa de Sudamérica (área IV) y el segundo al sureste del Golfo de Tehuantepec (área VII). En la provincia oceánica se encontraron dos centros de alta variabilidad negativa, el mayor de ellos (numéricamente) en el área I y el segundo (más extenso que el anterior) en el área III. El área II se encontró una banda ecuatorial de variabilidad positiva que abarcó desde 150 hasta 100°O.

El 2do. modo espacial explicó el 14.22% de la variación en la concentración de clorofila de nuestros datos. Para su distribución espacial (Figura 6d) se generaron 7 áreas, tres para la provincia oceánica y cuatro para la provincia costera. En esta ocasión la actividad en la provincia oceánica quedó restringida al norte de 13°N; y para la provincia costera al sureste del G. de Tehuantepec y

adyacente a la costa de Sudamérica. Para el resto del área de estudio no se encontraron variaciones importantes en su variabilidad.

La provincia oceánica mostró dos centros de variabilidad positiva al suroeste de la península de Baja California y en el extremo noroeste del área de estudio. Mientras que el centro de variabilidad negativa al sureste de Tehuantepec fue el más importante para la provincia costera y, debido a su ubicación, posiblemente estuvo relacionado con el DCR. En el límite austral del área de estudio existió un banda delgada de alta variabilidad positiva que probablemente estuvo asociada con el ligero incremento de actividad que se observó en la porción sur del área III.

El 3er. modo explica el 6.99% de la variabilidad total de los datos y tuvo una estructura distinta a la de los casos anteriores. Esta vez la diferenciación de áreas fue preferentemente zonal (Figura 6f) y se dio principalmente entre los paralelos 16°N y 7°S. La actividad al sur del ecuador fue ligeramente mayor y tuvo en la provincia oceánica el mayor centro de variabilidad positiva (área VI.) Al norte del ecuador se observaron indicadores de alta variabilidad negativa frente al G. de Papagayo, G. de Panamá y en la provincia oceánica (130°O, 12°N) contenidos en una banda de variabilidad negativa que cubrió desde la costa hasta los 150°O (área III) que coincidió con el camino seguido por la CEN. Entre 1 y 6°N se presentó una zona de transición entre los índices de variabilidad negativo y positivo (al norte y al sur del ecuador) esto también fue observado en el 3er. modo de la anomalía del nivel del mar (Figura 6e).

VII. IV. I. Arreglos para los ciclos/meses negativos (1er. modo)

Las anomalías para los *ciclos negativos* (Figura 7a) fueron positivas excepto para el área I; en la provincia costera se presentaron las anomalías más altas que estuvieron entre los 7.16 y 15.97 cm. Los ciclos negativos correspondieron únicamente a los primeros tres meses de 1998 (Tabla V) y para ellos se formaron 8 áreas de las cuales cinco se ubicaron en la provincia costera en donde igualmente se presentaron las mayores anomalías. La elevación más importante se presentó al suroeste del G. de Tehuantepec y se extendió ligeramente hacia la provincia oceánica, la segunda elevación ocurrió frente a la costa de Ecuador y se extendió hacia la provincia oceánica en una banda más ancha. Este patrón fue muy similar a aquel presentado por la 2da. FEO (Figura 6c).

La actividad en la provincia oceánica fue menor, con una delgada banda ecuatorial con anomalías negativas que llegó hasta 120°O, y el área I con algunos parches de anomalías negativas. Esta estructura con anomalías positivas cercanas a la costa, indicadoras de una termoclina profunda, generalmente es asociada con la ocurrencia del fenómeno de El Niño.

Para la concentración de clorofila la 1er. amplitud fue la única que tuvo valores positivos para los 48 meses muestreados (Figura 5b) además tuvo un comportamiento similar al de la 1er. amplitud para la anomalía del nivel del mar (Figura 5a) con un incremento rápido en sus valores para 1998 y una oscilación mejor definida de 1999 a 2001.

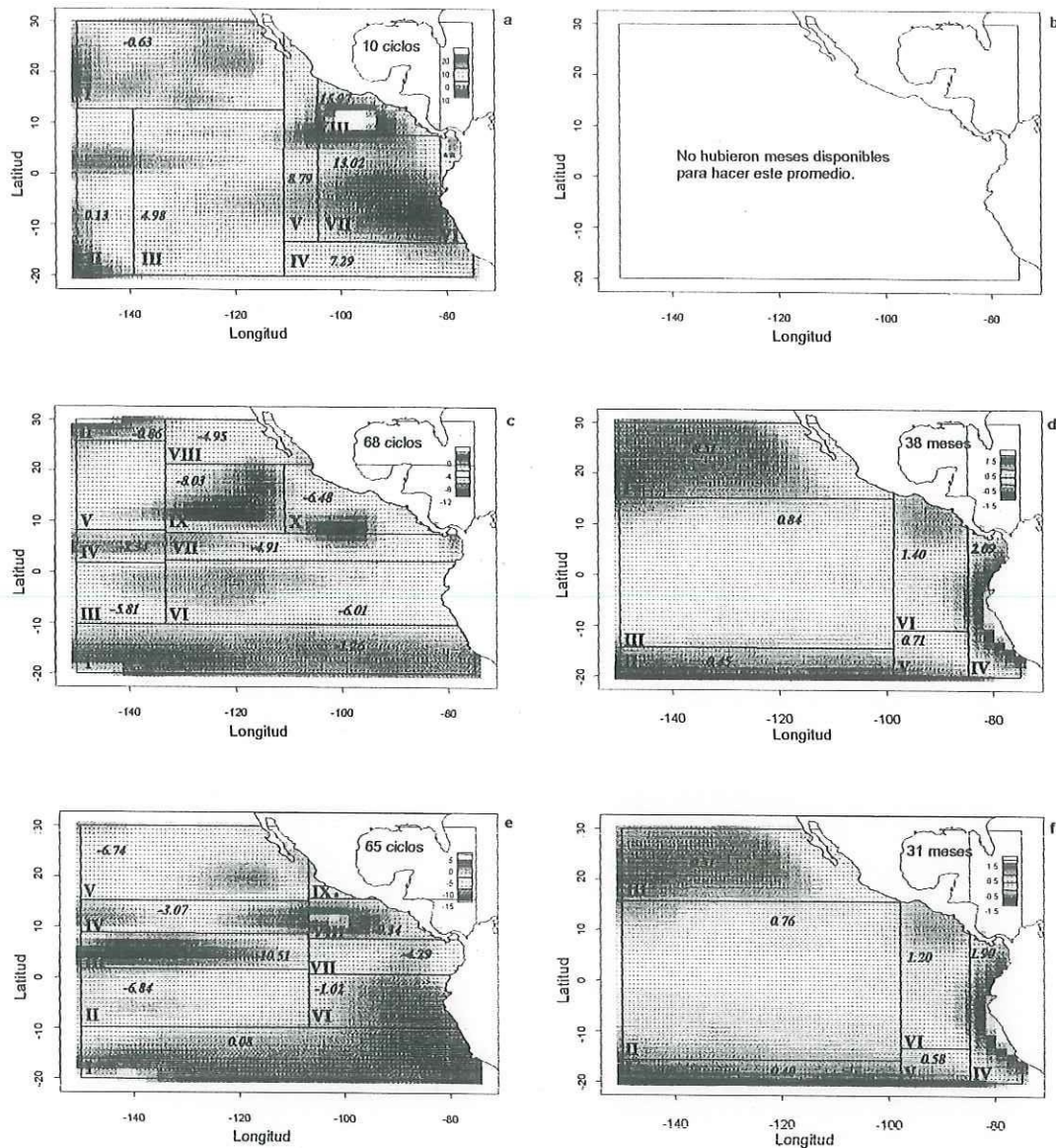


Figura 7. Distribución espacial de la anomalía del nivel del mar (cm) (izquierda) y el logaritmo de la concentración de clorofila "a" ($\ln\{mg/m^3\}$) (derecha) para el promedio de los ciclos/meses negativos de acuerdo a la primer (a, b), segunda (c, d) y tercer (e, f) amplitudes. Se indica además el número de ciclos o meses promediados para cada caso. *=-6.77 cm; **=7.16 cm. Para la primer amplitud no hubieron meses negativos. Las concentraciones de clorofila de cada área están ya transformadas a mg/m^3 .

VII. IV. II. Arreglos para los ciclos/meses negativos (2do. modo)

El número de *ciclos negativos* fue 68 contra 80 ciclos positivos (Tabla V) esta es la amplitud (Figura 5c) que presenta el mayor número de ciclos negativos respecto a los positivos; se debe considerar además que gran parte de estos ciclos positivos (40%) pertenecen al año de 1998. El promedio de los ciclos negativos (Figura 7c) quedó conformado por los meses de agosto a diciembre, excepto por el año de 1998 en donde el intervalo fue más restringido (Tabla V). La distribución espacial de la anomalía del nivel del mar para los ciclos negativos fue similar a aquella de la 3er. FEO (Figura 6e) sin embargo el número de áreas, en este caso, fue mayor. En esta ocasión el límite entre las provincias costera y oceánica fué desplazada hasta 133°O, con cinco áreas para la provincia costera y cuatro para la provincia oceánica; el área al sur de 10°S, sin embargo, permaneció como un área con anomalías preferentemente positivas.

Las anomalías negativas se ubicaron al suroeste de la península de Baja California y del Golfo de Tehuantepec, una tercer anomalía negativa (de menor intensidad) se ubicó al sur del ecuador y cubrió desde los 140 hasta 100°O. Las mayores anomalías positivas se encontraron en la provincia oceánica, al norte y al sur del área de estudio, al norte del ecuador se encontró otra banda con anomalías positivas que llegó hasta 120°O.

Contrario a lo ocurrido para la anomalía del nivel del mar, el número de *meses negativos* fue mayor al de meses positivos para la segunda y tercer amplitudes

(Tabla VII). Se formaron seis áreas: tres para la provincia oceánica y tres para la provincia costera (Figura 7d). El área con la concentración mas alta (2.09 mg/m^3) se encontró frente a Sudamérica, la siguiente más alta estuvo al sureste del G. de Tehuantepec (1.40 mg/m^3). Las concentraciones más altas en mar abierto se situaron entre 15°N y 14°S (0.84 mg/m^3); le siguió el área al norte de 15°N (0.51 mg/m^3). Al sur de 14°S se encontraron las concentraciones más bajas (0.45 mg/m^3).

Las altas concentraciones de clorofila en la costa se extendieron ligeramente hacia mar abierto (debido al esfuerzo del viento y estructuras de mesoescala) mientras que la clorofila ecuatorial disminuyó a un menor ritmo hacia el hemisferio norte que hacia el hemisferio sur.

VII. IV. III. Arreglos para los ciclos/meses negativos (3er. modo)

Los meses de enero a junio formaron el grupo de *ciclos negativos*, para 1998 este intervalo fue 2 meses más corto (Tabla V). Su estructura espacial (Figura 7e) fue similar a aquella del 2do. modo (Figura 6c). Nuevamente se marcó el área al sur de 10°S como la única con una anomalía ajustada positiva. La anomalía positiva al suroeste del G. de Tehuantepec y su extensión hacia la provincia oceánica no son tan marcadas como en la 2da. FEO; en cambio la anomalía negativa al suroeste de la península de Baja California es ahora más evidente y puede ser observada incluso en la boca del Golfo de California. Por otro lado el Golfo de Panamá fue la única región de Centro y Sudamérica que

presentó anomalías negativas.

La estructura del promedio de los *meses negativos* (Figura 7f) correspondió a los meses de noviembre a junio similar al intervalo de amplitudes positivas de la anomalía del nivel del mar, 3er. amplitud (Figura 5e). Por otro lado su estructura espacial fue similar a la de la 2da. amplitud negativa (Figura 7d) con tres áreas para la provincia costera y tres áreas para la provincia oceánica, las concentraciones de clorofila, en este caso, fueron ligeramente menores para las seis áreas. El área IV siguió presentando la concentración de clorofila más alta (1.90 mg/m^3) le siguió el sureste del G. de Tehuantepec con 1.20 mg/m^3 . Nuevamente para la provincia oceánica las mayores concentraciones de clorofila se encontraron en las áreas II, III y I, sucesivamente.

La banda ecuatorial con alta concentración de clorofila fue menos intensa para esta amplitud que para la 2da. amplitud negativa. La banda a 20°S , de 150°O hasta $\sim 90^\circ\text{O}$, ha presentado las concentraciones más bajas del pigmento para todos los casos.

VII. V. I. Arreglos para los ciclos/meses positivos (1er. modo)

El número de *ciclos positivos* fue muy superior al de ciclos negativos y cubrió la mayor parte de nuestro intervalo de tiempo (Figura 5a) esta es una de las razones por las que su distribución espacial (Figura 8a) fue similar a aquella de la media de toda la serie (Figura 4a) sin embargo la disposición y el número de áreas fue distinto.

El patrón general de tres áreas se conservó, la provincia oceánica mantuvo cuatro áreas, pero la provincia costera ahora quedó dividida en cuatro áreas. Las anomalías siguen siendo negativas para todas las áreas, incluso para el área I que anteriormente era de signo contrario. Esta estructura, con un área ecuatorial tan extensa con anomalías negativas, se asocia con el fenómeno oceanoatmosférico dominado La Niña.

El promedio de *meses positivos* para la 1er. amplitud (Figura 8b) por consiguiente, fue el mismo que el de la media de toda la serie (Figura 4b), al igual que la posición y el número de áreas establecidas, con altas concentraciones del pigmento para la provincia costera (este de 97°O) los valores más altos se encontraron a lo largo de la costa sudamericana (1.90 mg/m³) y al sureste del Golfo de Tehuantepec (1.55 mg/m³). En la provincia oceánica las concentraciones fueron menores: 0.40 mg/m³ para la franja al sur de 15°S, 0.50 mg/m³ para el área al norte de 14°N y 0.77 mg/m³ para la banda ubicada entre 15°S y 14°N. La división en 97°O refleja el contraste que existe entre las provincias costera y oceánica en cuanto a concentración de clorofila se refiere. La alta concentración de clorofila encontrada cerca de costa continuó hacia mar abierto a lo largo de la banda ecuatorial. A lo largo de la costa de la península de Baja California se observó una franja con concentraciones mayores a 1 mg/m³.

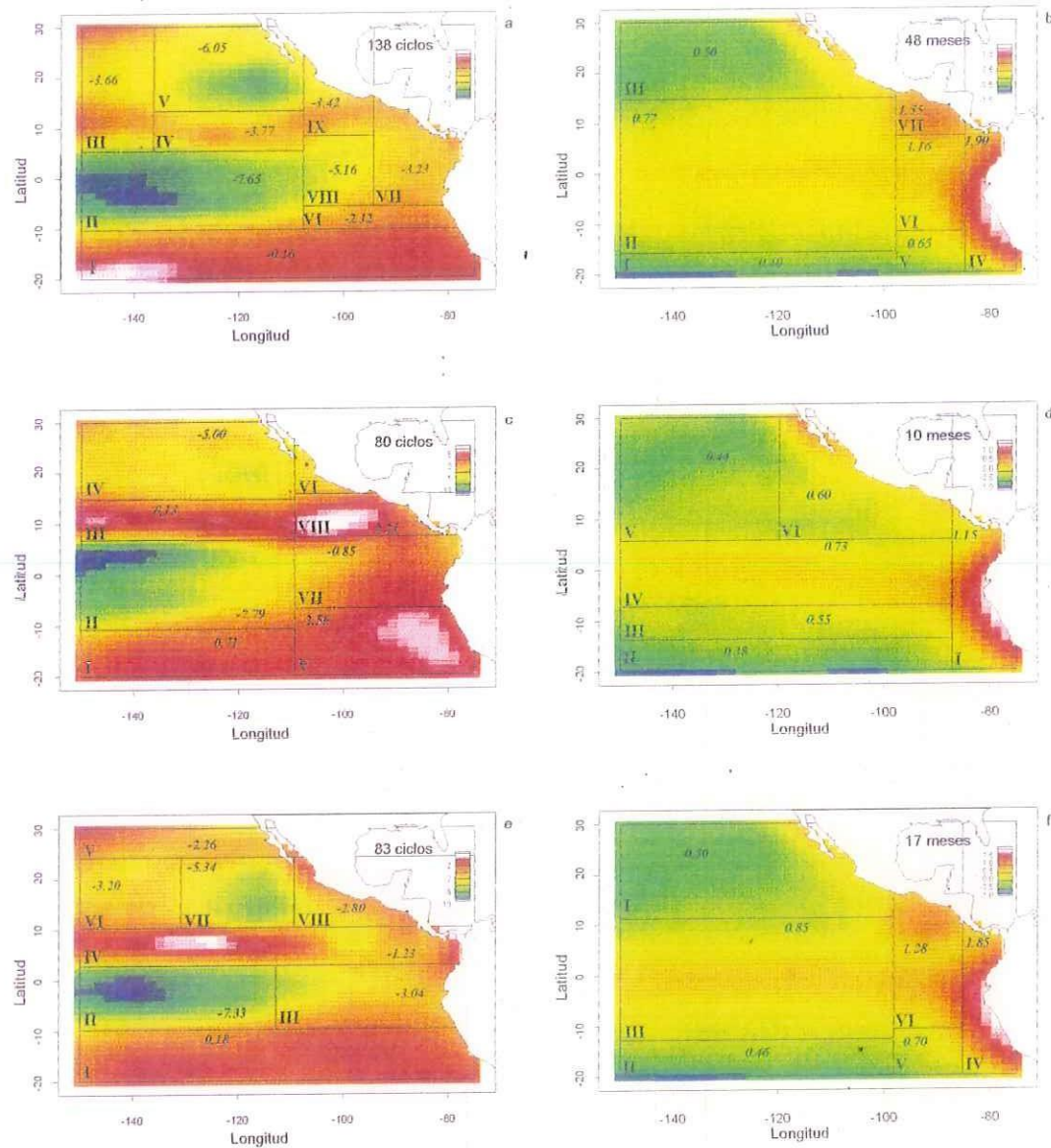


Figura 8. Distribución espacial de la anomalía del nivel del mar (cm) (izquierda) y el logaritmo de la concentración de clorofila "a" ($\ln\{mg/m^3\}$) (derecha) para el promedio de los ciclos/meses positivos de acuerdo a la primer (a, b), segunda (c, d) y tercer (e, f) amplitudes. Se indica además el número de ciclos o meses promediados para cada caso. $*$ =4.1990 cm. Las concentraciones de clorofila de cada área están ya transformadas a mg/m^3 .

VII. V. II. Arreglos para los ciclos/meses positivos (2do. modo)

El promedio de los *ciclos positivos* (Figura 8c) estuvo conformado por los meses de febrero a junio, excepto para el año 1998 en donde el intervalo fue de 11 meses (Tabla V). Esta distribución tuvo mayor semejanza con la 2da. FEO (Figura 6c) sin embargo, el número de áreas generadas fue mayor. Esta vez la división entre la provincias costera y oceánica ocurrió en 109°O y cubrió toda el área de estudio, tanto al este como al oeste se conformaron cuatro áreas más. Las diferencias más importantes que estos ciclos tuvieron respecto a la 2da. FEO fueron: un incremento de las anomalías positivas ubicadas frente a la costa de Sudamérica así como el hecho de que abarcaron más allá de la provincia costera, y un ligero incremento de las anomalías negativas al suroeste de la península de Baja California.

La posición de las áreas para el promedio de *meses positivos* (Figura 8d) fue distinta a la del resto de los promedios y es el único en el que la división entre las provincias costera y oceánica no apareció a $\sim 97^{\circ}\text{O}$, por consiguiente la división en 87°O fue considerada como el límite entre ambas provincias. La provincia costera permaneció como una sola área con una concentración ajustada de 1.15 mg/m^3 . Por su parte la provincia oceánica se dividió en 5 áreas: dos áreas al norte de 5°N y dos al sur de 7°S . La máxima concentración de clorofila se sigue encontrando a lo largo de la costa sudamericana. Esta alta concentración continuó a lo largo de dos bandas, la principal a lo largo de la banda ecuatorial y la segunda adyacente a la costa de Centroamérica y México.

Este es el único promedio en el que no se observó un máximo de clorofila al sureste del Golfo de Tehuantepec, similar a lo ocurrido en la 3er. FEO (Figura 6f).

VII. V. III. Arreglos para los ciclos/meses positivos (3er. modo)

Los meses que conformaron el promedio de *ciclos positivos* fueron de junio a diciembre, que fue un intervalo similar al de los ciclos negativos para la 2da. amplitud (Tabla V). Su estructura espacial (Figura 8e), por otro lado, semejó a aquella del 3er. modo (Figura 6e) con un mismo número de áreas pero en distinta posición. El área al sur de 10°S se mantuvo como la única con anomalías preferentemente positivas. No existió una división (como las anteriores) entre las provincias costera y oceánica, así que con las divisiones entre las áreas II y III, VII y VIII se determinó un límite a 110°O.

Al norte y al sur de 2°N se encontraron las máximas anomalías positivas y negativas, respectivamente. Al suroeste de la península de Baja California y del G. de Tehuantepec se encontraron anomalías negativas que en la 3er. FEO aparecieron como una sola banda. Por último en la boca del Golfo de California y en los Golfos de Panamá y Papagayo se observaron anomalías positivas. Lo que puede ser asociado con una termoclina más profunda de lo habitual.

El promedio de *meses positivos* (Figura 8f) correspondió a los meses de julio a octubre, similar al intervalo de tiempo de la 3er. amplitud de la anomalía del nivel del mar (Figura 5e). Su estructura espacial es similar al de las figuras

anteriores, así como el número y la posición de sus áreas. Las áreas I y II presentaron las concentraciones más bajas (0.50 y 0.46 mg/m^3) y flanquearon al área III que presentó la mayor concentración de pigmento obtenida para la banda ecuatorial (0.85 mg/m^3 .) En la provincia costera las concentraciones más bajas se ubicaron en las áreas V y VI (0.70 y 1.28 mg/m^3) con la concentración más alta en el área IV (1.85 mg/m^3). El área III mostró una reducción latitudinal de 4° al norte y 3° al sur respecto a la 3er. amplitud negativa (Figura 7f).

De todos los casos anteriores éste fue el que presentó la concentración de clorofila ecuatorial más alta, lo que debe estar asociado a una termoclina más somera y a un importante flujo vertical de nutrientes.

VII. VI. Correlación espacio-temporal entre anomalía del nivel del mar y concentración de clorofila "a"

La correlación entre las primeras tres variables canónicas fue mayor a 0.95 (Tabla VIII) la gráfica de ellas mostró una correlación positiva entre ambos campos para las tres variables (Figura 9). Anomalías del nivel del mar altas, ya sean positivas o negativas, pueden ser asociadas con concentraciones altas de clorofila.

Tabla VIII. Correlación para las primeras tres variables canónicas entre los campos de anomalía del nivel del mar y concentración de clorofila "a".

Variable canónica anomalía-clorofila	Correlación
1	0.9922
2	0.9800
3	0.9766

En la figura 10 se muestran las estructuras espaciales de las primeras tres variables canónicas para la anomalía del nivel del mar y la concentración de clorofila. En ellas se observa que la similitud entre las estructuras de correlación para ambos campos es alta.

Para la primer variable canónica (Figuras 10a y b) las correlaciones más altas se dieron en la mayor parte de la región que correspondió a la provincia costera y en la banda ecuatorial; en la porción noroeste de la provincia oceánica se observó también una correlación entre ambas variables pero no tan intensa como la anterior. En la banda ecuatorial se observaron tres máximos en 135, 105 y 85°O.

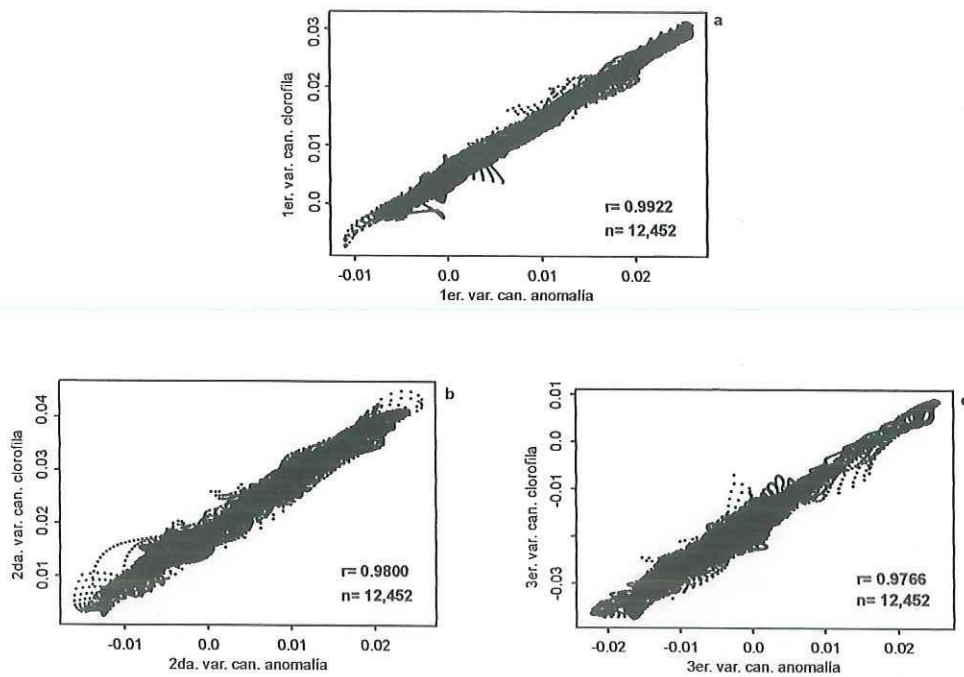


Figura 9. Correlación entre la primer (a), segunda (b) y tercer (c) variables canónicas para los campos de anomalía del nivel del mar vs. logaritmo de la concentración de clorofila "a". Se indican el coeficiente de correlación "r" y el número de datos utilizados "n".

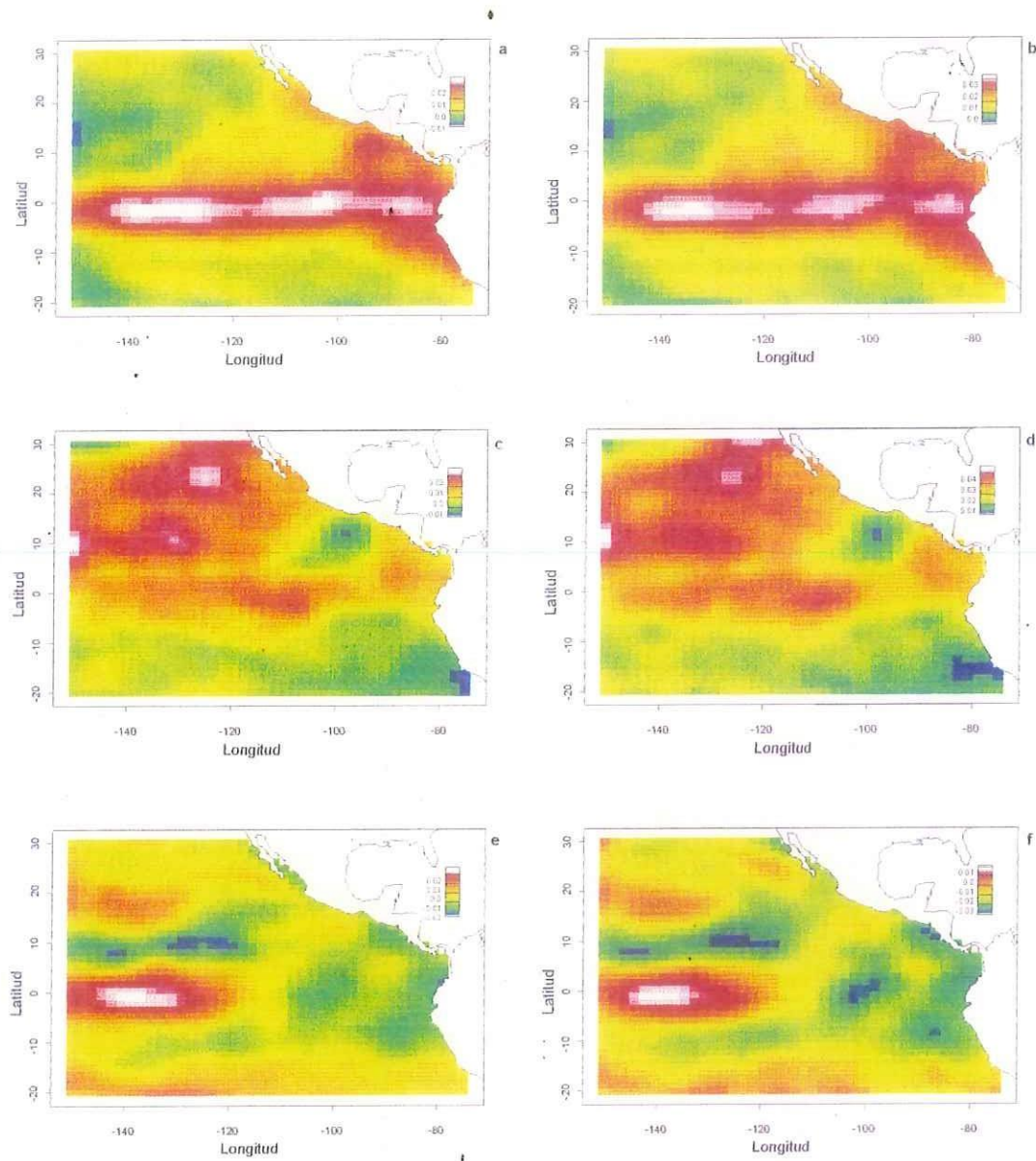


Figura 10. Estructura espacial de la primer (a, b), segunda (c, d) y tercer (e, f) variables canónicas para los campos de anomalía del nivel del mar (izquierda) y logaritmo de la concentración de clorofila "a" (derecha.)

Para la segunda variable canónica (Figuras 10c y d) las correlaciones más importantes se dieron en la parte noroeste de la provincia oceánica con un máximo al noroeste de la península de Baja California y en la banda de 10°N. Al suroeste del G. de Tehuantepec ocurrió además otra estructura que indica una correlación espacio-temporal entre ambas variables; así también frente a la costa de Perú se observó un patrón similar al anterior pero más difuso.

Para la tercer variable canónica (Figuras 10e y f) no hubo una estructura que dominara la mayor parte del área de estudio; en la banda ecuatorial de la provincia oceánica se presentó la estructura de correlación más importante, seguida de una banda no tan intensa a 20°N. En la provincia costera se observaron estructuras de correlación frente a las costas de Sudamérica y el Golfo de Papagayo.

VIII. Discusión

En este trabajo se analizó la variabilidad espacio-temporal de los campos de anomalía del nivel del mar y concentración de clorofila "a", además de verificar la asociación existente entre ellos. El promedio de ambos campos y las tres primeras funciones o modos espaciales se utilizaron para analizar la variabilidad espacial, mientras que para la variabilidad temporal se utilizaron las tres primeras amplitudes obtenidas mediante FEO's.

VIII. I. Arreglo para la media

Las principales variaciones en la anomalía del nivel del mar se dieron en la provincia oceánica (Figura 4a). El centro de anomalía negativo al suroeste de la península de Baja California posiblemente esté relacionado con alguna actividad de mesoescala; la presencia de este centro probablemente produjo una disminución de la estratificación de la capa superficial y un incremento en el movimiento vertical de agua (surgencias); aquí la termoclina se encuentra más profunda que en lugares más al sur o cerca de costa (Figura 3) por lo tanto el agua desplazada hacia la superficie no es tan rica en nutrientes, así como la concentración de clorofila (área III, Figura 4b).

La banda de anomalía que va del Golfo de Tehuantepec hasta 150°O (entre 9 y 14°N) marca la ruta que siguen la mayor parte de los remolinos generados por el esfuerzo del viento (Tehuanos) hacia mar abierto; lo que concuerda con lo observado por Hansen y Maul (1991) esta banda está asociada con el campo

de clorofila sólo en el área frente a los Golfos de Tehuantepec y Papagayo (área VII).

La anomalía negativa encontrada en el área III (Figura 4a) puede ser una consecuencia de la divergencia ecuatorial provocada por los vientos alisios y está asociada a la banda ecuatorial con alta concentración de clorofila en mar abierto (Figura 4b.) La dimensión y magnitud de esta depresión en la superficie del océano han sido utilizadas como un indicador del fenómeno océano-atmosférico La Niña, que de acuerdo a Murtugudde *et al.* (1999) inició hacia el segundo semestre de 1998 y continuó durante el primer semestre de 1999, producido principalmente, por una intensificación de los vientos del oeste (provenientes del noreste de Australia) acompañado de un descenso en la intensidad de los vientos del este (alisios).

Las concentraciones de clorofila más bajas se dieron en el área I, en el único lugar donde las anomalías fueron principalmente positivas; estas elevaciones, sin embargo, no son de la magnitud que se observan durante un fenómeno de El Niño, pero que sí estuvieron asociadas con la termoclina más profunda para nuestra área de estudio puesto que las concentraciones de clorofila del área I (Figura 4b) fueron las más bajas. Un caso excepcional fue el ocurrido frente a las costas de Sudamérica, en donde se observaron las concentraciones de clorofila más altas para toda el área de estudio en tanto que las anomalías del nivel del mar fueron de poca magnitud (principalmente al sur de 10°S) lo que sugiere que la Corriente del Perú pudo ser la responsable de incrementar la

concentración de clorofila superficial a través del proceso de surgencia.

VIII. II. Amplitudes temporales

La periodicidad de las amplitudes para los modos espaciales de la anomalía del nivel del mar fue anual (Figuras 5c y e) con excepción de la primer amplitud para el año 1998, que incrementó de manera casi lineal, debido probablemente a que éste fue un año en el que se presentaron los fenómenos El Niño-La Niña (Wilson y Adamec 2001.) La periodicidad de las primeras dos amplitudes para la concentración de clorofila (Figuras 5b y d) fue un poco menor a la anual (diez meses) sin embargo éstas fueron semejantes a las amplitudes para los modos de la anomalía del nivel del mar, lo que nos habla de una similitud en la variabilidad temporal de ambos campos, particularmente para la amplitud del 1er. modo (Figura 5a).

La relación de la primer amplitud (de 1999 a 2001) entre los campos de anomalía y clorofila fue inversa (Figuras 5a y b): disminuyó de principios hacia finales de año para la anomalía, e incrementó (con el mismo ritmo) para la clorofila. La tendencia de la segunda amplitud fue la de disminuir su magnitud conforme avanzó el tiempo, tanto para la anomalía del nivel del mar como para la concentración de clorofila (Figuras 5c y d). La periodicidad de la tercer amplitud para ambos campos se encontró en fase (Figuras 5e y f) con las amplitudes máximas ocurridas en el segundo semestre de cada año y las mínimas durante el primer semestre de cada año. A pesar de que el valor de las

amplitudes en ocasiones no tiene una interpretación física directa, nos da una idea acerca de la variabilidad en el área, esto nos permite plantear para el caso de la primer amplitud la existencia de una asociación inversa entre ambos campos además de ser el más influenciado por las condiciones Niño-Niña; para la segunda amplitud se propone que su tendencia, ya mencionada, representa la alta actividad anormal generada durante 1998 y la subsecuente disminución de las estructuras anómalas para los siguientes años. La oscilación de la tercer amplitud muestra una relación más directa con procesos físicos para ambos campos, lo que indica que las fuentes de variabilidad para ambos campos tuvieron la misma ocurrencia temporal (esfuerzo del viento, estructuras de mesoescala, surgencias.) Para esta amplitud (Figuras 5e y f) el efecto de las condiciones Niño-Niña fue menor (comparado con las amplitudes anteriores) siendo más evidente para la 3er. amplitud de la concentración de clorofila (Figura 5f).

VIII. III. Arreglos para los modos espaciales

Para el 1er. modo de la anomalía del nivel del mar (Figura 6a) se marcan de una manera más difusa las dos zonas de variabilidad identificadas previamente por Giese *et al.* (1994): de 120°O hacia la costa (entre 10 y 12°N) y la segunda de 165 a 110°O (entre 5 y 7°N). Una de las razones por las que las bandas perdieron definición fue que a nuestros datos de anomalía no se les sustrajo el armónico anual, tal como se hizo en el trabajo citado. En la parte noroeste del

área de estudio (área V) el patrón de anomalía dibujó una forma zigzageante que coincide con lo observado por Wilson y Adamec (2001) y es atribuido a la oscilación de la profundidad de la termoclina debido a la disminución de los vientos del oeste (relacionado esto con el evento El Niño). Generalmente el valor de anomalía del nivel del mar es un indicador de la profundidad de la termoclina (Wilson y Adamec 2001); anomalías positivas, generalmente se traducen en hundimientos de la termoclina y viceversa. Considerando esto para el primer modo de la anomalía (Figura 6a) que fue similar a la media (Figura 4a) tenemos (acertadamente) que para la mayor parte del OPO las anomalías negativas están asociadas con una termoclina somera (Figura 3) esto incrementa la posibilidad de que exista un ingreso (hacia la capa de mezcla) de agua por debajo de la termoclina, aunque también es importante mencionar que debido a la alta estratificación existente en los primeros 100 m de la columna de agua (Emery *et al.* 1984) la convección es contrarrestada o se da únicamente en el interior de la misma capa de mezcla. De cualquier forma el agua que llega a la superficie es dispersada horizontalmente (por advección) y, si contiene la suficiente cantidad de nutrientes, posteriormente podría promover la productividad primaria en la zona. Estas áreas de productividad primaria intensificada podrían corresponder entonces a las áreas II y III que encontramos en la figura 5b, cuyas concentraciones de clorofila serían menores de no presentarse este tipo de fenómenos.

Para el 2do. modo de la anomalía (Figura 6c) la alta variabilidad positiva

ocurrida frente al G. de Tehuantepec posiblemente representó actividad de mesoescala generada debido al forzamiento del viento (Nortes) y a la posterior propagación de los remolinos allí generados en dirección oeste, más allá de los 150°O (área IV). El frente sinuoso entre las variabilidades negativas y positivas de las áreas I, II y III pudo representar el producto de la interacción entre la CES y la CcE, que llevan consigo características de mar costero y de mar abierto, respectivamente.

Cushman-Roisin *et al.* (1990) mencionan que la dirección de desplazamiento de los remolinos (ciclónicos y anticiclónicos) depende de la suma de dos componentes: la dinámica interna del remolino y la reacción del fluido desplazado por el mismo remolino; los remolinos ciclónicos debido al efecto Coriolis presentan una convergencia de agua en su frontera este y una divergencia de agua en su frontera oeste, lo que provoca que el remolino sea desplazado hacia el este; en un remolino anticiclónico ocurre el caso contrario, hay convergencia en su frontera oeste y divergencia en su frontera este lo que lo desplaza hacia el oeste. Al desplazarse el remolino (ya sea al este o al oeste) la masa de agua circundante es desplazada meridionalmente, hacia el norte y hacia el sur de su posición inicial, con lo que adquiere vorticidad anticiclónica y ciclónica (respectivamente) debido al principio de conservación de vorticidad relativa y que genera un desplazamiento hacia el oeste. De estas dos componentes generalmente la segunda es mayor y los remolinos, ciclónicos o anticiclónicos, tienden a desplazarse hacia el oeste.

La concentración de clorofila para el 2do. modo (Figura 6d) mostró la mayor parte de su variabilidad positiva en el área I, con su máximo al suroeste de la península de Baja California, similar a lo observado en el 1er. modo de la anomalía (área IV, Figura 6a). Por primera vez pudo observarse la posible influencia del DCR en la concentración de clorofila (área VII) que de acuerdo a Hoffman *et al.* (1981) y Wyrski (1964) es de vital importancia pues posee una termoclina somera (hasta 10 m) que facilita la entrada de nutrientes a la capa de mezcla y participa de manera significativa en el sostenimiento de poblaciones de organismos pelágicos económicamente importantes (e.g. atún, anchoveta). Al comparar este resultado con el obtenido por Wilson & Adamec (2001) tuvimos coincidencias sólo para la actividad en el área III y frente a la costa de Sudamérica.

Para el 3er. modo de la anomalía (Figura 6e) se observan más claramente las dos zonas de alta variabilidad mencionadas por Giese *et al.* (1994), aquí la banda de variabilidad posiblemente asociada con la inestabilidad entre la CcE y la CEN (área V) apareció como una variabilidad positiva, en tanto que la banda asociada a la propagación de eddies generados por el esfuerzo del viento en los Golfos de Tehuantepec y Papagayo (área VI) apareció como una variabilidad negativa. Se podría suponer que esta diferencia de signo tenga alguna relación con el hecho de que cada una de las zonas tiene una fuente de variación distinta. El límite entre la CcE y la CEN se define a 10°N, que en este caso quedó demarcado por la frontera sur de las áreas VI y VII.

Por primera vez se observó el área del Golfo de Panamá (área IV) como una zona de variabilidad positiva, lo mismo ocurrió con el área ubicada entre Cabo Corrientes y Cabo San Lucas (área VIII). De acuerdo con lo mencionado por Müller-Karger y Fuentes-Yaco (2000) el origen de la variabilidad en el Golfo de Panamá es el forzamiento producido por la variación estacional de los vientos alisios; la alta variabilidad al sureste de Cabo San Lucas pudo ser debida a cambios en la intensidad del sistema de corrientes: CC, CCCR y CEN. Los únicos rasgos coincidentes con Wilson y Adamec (2001) fueron las bandas encontradas en las áreas V y VI y la variabilidad positiva en el G. de Panamá, las razones de esta baja coincidencia pudieron ser debido a: diferencias en la resolución de la malla de interpolación o a un desfaseamiento en los límites de las series de tiempo.

La variabilidad de la concentración de clorofila del 3er. modo (Figura 6f) tuvo una asociación inversa con los signos de variabilidad del campo de anomalía (Figura 6e) además la variabilidad negativa en el Golfo de Panamá y la banda con variabilidad negativa observada a lo largo de 10°N fueron observadas en la 3er. FEO de clorofila reportada por Wilson y Adamec (2001).

VIII. IV. Arreglos para los ciclos/meses (positivos y negativos)

El objetivo de agrupar los datos con base en el comportamiento de sus amplitudes fue para ubicar de manera más específica el periodo de tiempo en el que las principales estructuras espaciales ocurrieron. Después de analizar cada uno de los promedios se concluyó que para el caso de la anomalía, la estructura de los ciclos positivos correspondió a aquella de su respectivo modo espacial, en tanto que la estructura de los ciclos negativos correspondió a la de un modo distinto al correspondiente. El campo de concentración de clorofila presentó una menor variación tanto espacial como temporal respecto al de anomalía del nivel del mar; las principales variaciones se dieron en la intensidad de la banda de clorofila ecuatorial y en la presencia/ausencia del centro de alta concentración de clorofila frente al Golfo de Tehuantepec. Los meses positivos fueron los que presentaron la mayor intensidad en la banda de clorofila ecuatorial y la menor actividad en el Golfo de Tehuantepec, lo contrario ocurrió con los meses negativos.

Debido a que los 48 meses para la amplitud del primer modo espacial fueron positivos no pudo hacerse una comparación con el promedio de ciclos negativos respectivo (Figura 7a). De este último podemos afirmar que su estructura espacial corresponde a aquella explicada por el 2do. modo (Figura 6c) y se ubica entre los meses de enero a abril de 1998, una época dominada casi por completo por el evento El Niño, las anomalías positivas tan altas (principalmente frente al Golfo de Tehuantepec, ~16 cm) en esta ocasión sí se

encuentran asociadas a un hundimiento de la termoclina en la provincia costera y a la ausencia de eventos de surgencia para la mayor parte del Pacífico tropical (Murtugudde *et al.* 1999). Tal vez esta condición influyó en la inexistencia de meses negativos para el 1er. modo. El área I es la única con anomalías negativas debido, tal vez, a que es en esta época cuando la CC es más intensa y transporta, aún durante un evento Niño, cantidades significativas de agua hacia mar abierto.

La estructura espacial de los ciclos positivos para la primer amplitud (Figura 8a) fue similar al promedio de toda la serie (Figura 4a) ya que incluye 138 de los 148 ciclos muestreados; las estructuras que en él se observan son las mismas y por lo tanto se supone que son las que dominaron el área durante el periodo de tiempo muestreado, posterior a 1998 (Wilson y Adamec 2001) (anomalías negativas para la mayor parte del OPO). Algo similar ocurrió con los meses positivos para clorofila (Figura 8b) pues se trata de la misma estructura que la de su media (Figura 4b).

La estructura de ciclos negativos para la segunda amplitud (Figura 7c) semeja aquella de la 3er. FEO (Figura 6e) y comprende los meses de agosto a diciembre (verano-invierno) periodo en el que la CcE, CES y la Corriente del Perú son más intensas; las bandas en las áreas IV y VI podrían ser atribuidas al efecto de las primeras dos. La anomalía para el OPO muestra una termoclina profunda asociada con la CcE (área IV) y dos bandas con una termoclina más somera a 15°N y 5°S, que se unen conforme se acercan a la costa, esta

topografía coincide con la reportada para esos meses por Robinson y Bauer (1971).

El campo de clorofila respectivo (Figura 7d) no muestra mucha variación respecto a los casos anteriores, excepto que la banda ecuatorial es menos intensa y la concentración de clorofila al sur del G. de Tehuantepec es mayor.

La estructura de los ciclos positivos para la segunda amplitud (Figura 8c) fue la misma que la de la 2da. FEO (Figura 6c) y correspondió a los meses de febrero a junio, cuando la CC alcanza su máximo (Wyrcki 1965) la CCCR lo hace hasta finales de este periodo (junio). La termoclina durante esta época comienza a disminuir su profundidad, debido al esfuerzo de los vientos alisios del noreste (Wyrcki 1965) y al calentamiento solar. Además de lo ya mencionado para esta estructura en el segundo modo espacial, podemos agregar que la anomalía negativa del área IV está dominada por la CC. La variabilidad de este campo de clorofila (Figura 8d) es la menos significativa de todas, ya que está formada por dos bloques temporalmente disímiles: enero-julio y septiembre-noviembre, por lo tanto explica de manera combinada lo ocurrido para dos épocas del año.

Los ciclos negativos de la tercer amplitud (Figura 7e) son una combinación entre la 1er. y 2da. FEO's (Figuras 6a y c) su periodo de tiempo va de enero a junio que coincide con la intensificación de los vientos alisios del noreste y con el paso centros de alta presión que generan para el sureste de Mexico y Centroamérica vientos intensos conocidos como Nortes (Müller-Karger y Fuentes-Yaco 2000). Nuevamente, como lo mencionan Giese *et al.* (1994), las

anomalías positivas a 10°N son asociadas con estos vientos y la propagación de remolinos anticiclónicos con alturas de entre 10 y 25 cm; por otro lado las anomalías negativas observadas a 5°N (-10.51 cm) son atribuidas al incremento de la inestabilidad en la columna de agua causada por el forzamiento entre las corrientes ecuatoriales (CEN y CcE.) y a la presencia durante el inicio de 1999 de La Niña (Wilson y Adamec 2001).

Esta vez el periodo de tiempo para los meses negativos (Figura 7f) fue de enero a mayo (en fase con el campo de anomalía respectivo) la concentración de clorofila al sur del Golfo de Tehuantepec se vio incrementada debido a la intensificación de los vientos que alejan el agua superficial de la costa y permiten la entrada de agua que se encuentra por debajo de la termoclina hacia la superficie, fenómeno que ya ha sido descrito entre otros por Trasviña *et al.* (1995). El área al oeste de Baja California muestra también una alta concentración de clorofila debido, en parte, a una mayor actividad de la CC.

Los ciclos positivos para la tercer amplitud (Figura 8e) abarcaron los meses de junio a diciembre que coinciden con el máximo para la CcE, CES y la Corriente del Perú. Las anomalías fueron negativas para todo el OPO excepto para el área I de la cual se infiere presentó la termoclina más profunda. La termoclina más somera se encontró en la provincia oceánica a lo largo del ecuador, esto indica que para esa área se pueden esperar concentraciones altas de clorofila. Esta suposición se cumple al observar la distribución de clorofila correspondiente (Figura 8f) en donde se tiene la banda ecuatorial de clorofila

más intensa para todo el estudio.

La variabilidad del campo de anomalía del nivel del mar durante el evento El Niño-98 se concentró en la provincia costera con anomalías positivas que provocaron un hundimiento de la termoclina y la consecuente disminución de la actividad biológica en el área. Este comportamiento es similar a lo observado en la 2da. FEO (Figura 6c). Durante el primer semestre de 1999 se presentó la contraparte de El Niño (La Niña) que involucró una disminución en la profundidad de la termoclina y una mayor concentración de clorofila; un comportamiento similar se observó en la 1er. FEO (Figura 6a).

VIII. V. Correlación canónica

Para confirmar estadísticamente la asociación observada entre los campos de anomalía y clorofila se obtuvieron sus primeras tres variables canónicas, los resultados se muestran en la tabla VIII y en la figura 9. La correlación para los tres casos fue mayor a 0.95 con las estructuras de correlación más importantes ubicadas a lo largo de la banda ecuatorial, en la región noroeste del área de estudio y al suroeste del Golfo de Tehuantepec. Las correlaciones más bajas se presentaron en la franja al sur de 10°S en donde la mayor parte del tiempo se presentaron anomalías positivas y las concentraciones más bajas de clorofila, excepto en la zona frente a la costa peruana en donde la surgencia fue prácticamente permanente.

IX. Conclusiones

1. La variabilidad espaciotemporal para la anomalía del nivel del mar se dividió en tres áreas principales: un área al sur de 10°S con anomalías preferentemente positivas, un área al este de 110°O (provincia costera) y un área al oeste de 110°O (provincia oceánica) ambas con anomalías principalmente negativas. Durante los meses de enero a junio las principales variaciones en anomalía se dieron en la provincia costera, de julio a diciembre ocurrieron en la provincia oceánica.
2. La variabilidad de la concentración de clorofila "a" en el OPO quedó separada en dos áreas principales: una provincia costera, al este de 100°O , con concentraciones altas de clorofila adyacentes a la costa de Sudamérica y al sur del Golfo de Tehuantepec; y una provincia oceánica, al oeste de 100°O , con altas concentraciones de clorofila entre 15°N y 15°S ; que disminuyeron más rápidamente hacia el sur que hacia el norte del ecuador. De julio a octubre ocurrieron las mayores concentraciones de clorofila en la provincia oceánica; de noviembre a junio las concentraciones de clorofila en la provincia costera fueron mayores.

3. Los valores de correlación para las primeras tres variables canónicas apoyaron la asociación observada entre las distribuciones espaciales de anomalía y clorofila, lo que permitió sostener que valores altos de la anomalía del nivel del mar, principalmente negativa, estuvieron asociados con concentraciones altas de clorofila "a" para la mayor parte del OPO, la asociaciones máximas se encontraron a lo largo del ecuador, frente al Golfo de Tehuantepec y al oeste de la península de Baja California.

4. Un aspecto interesante para analizar en futuros trabajos sería estudiar la variabilidad espaciotemporal exclusivamente para la provincia oceánica, lo cual permitiría determinar de una manera más precisa cambios en la concentración de clorofila, que aunque pequeños respecto a las concentraciones costeras son de vital importancia para la actividad biológica en el océano abierto.

Referencias

- Chambers, J.M. y T.J. Hastie. (eds.) 1993. *Statistical models in S*. Computer science series. Chapman & Hall. E.U.A. pp. 309-373.
- Cushman-Roisin, B.; E.P. Chassignet; B. Tang. 1990. *Westward motion of mesoscale eddies*. Journal of Physical Oceanography. **20**: 758-768.
- . 1994. *Introduction to geophysical fluid dynamics*. Prentice-Hall. Nueva Jersey. 320 pp.
- Emery, W.J.; W.G. Lee; L. Magaard. 1984. *Geographic and seasonal distributions of Brunt-Väisälä frequency and Rossby radii in the North Pacific and North Atlantic*. Journal of Physical Oceanography. **14**: 294-317.
- Franks, P.J.S.; J.S. Wroblewski; G.R. Flierl. 1986. *Prediction of phytoplankton growth in response to the frictional decay of a warm-core ring*. Journal of Geophysical Research. **91**(C6): 7,603-7,610.
- Giese, B.S.; J.A. Carton; L.J. Holl. 1994. *Sea level variability in the eastern tropical Pacific as observed by TOPEX and Tropical Ocean-Global Atmosphere Tropical Atmosphere-Ocean experiment*. Journal of Geophysical Research. **99**(C12): 24,739-24,748.
- Hansen, D.V. y G.A. Maul. 1991. *Anticyclonic current rings in the eastern tropical Pacific Ocean*. Journal of Geophysical Research. **96**(C4): 6,965-6,979.
- Hofmann, E.E.; A.J. Busalacchi; J.J. O'Brien. 1981. *Wind generation of the Costa Rica Dome*. Science. **214**: 552-554.
- Jenkins, W.J. 1988. *Nitrate flux into the euphotic zone near Bermuda*. Nature. **331**: 521-523.
- Kelly, K.A. 1988. *Comment on "Empirical orthogonal functions analysis of Advanced Very High Resolution Radiometer surface temperature patterns in Santa Barbara Channel" by G.S.E. Lagerloef and R.L. Bernstein*. Journal of Geophysical Research. **93**(12): 15,753-15,754.
- Legeckis, R. 1988. *Upwelling off the gulfs of Panama and Papagayo in the tropical Pacific during March 1985*. Journal of Geophysical Research. **93**(C12): 15,485-15,489.

- Lluch-Cota, S.E.; S. Álvarez-Borrego; E.M. Santamaría-del-Ángel; F.E. Müller-Karger; S. Hernández-Vásquez. 1997. *El golfo de Tehuantepec y áreas adyacentes: variación espaciotemporal de pigmentos fotosintéticos derivados de satélite*. Ciencias Marinas. **23**(3): 329-340.
- Manly, B.F.J. 1995. *"Multivariate statistical methods: a primer."* 2da. ed. Chapman & Hall. Inglaterra.
- Manzo-Monroy, H.G. 2000. *Distribution of the tuna fishing fleet associated to eddies an Rossby waves at 10°N in the eastern Pacific Ocean*. En: Färber Lorda, J. (ed.). *Oceanography of the Eastern Pacific*. Vol. I. CICESE, 105 pp.
- McCreary, J.P.Jr.; H.S. Lee; D.B. Enfield. 1989. *The response of the coastal ocean to strong offshore winds: with application to circulations in the Gulf of Tehuantepec and Papagayo*. Journal of Marine Research. **47**: 81-109.
- McGillicuddy, D.J.Jr.; A.R. Robinson; D.A. Siegel; H.W. Jannasch; R. Johnson; T.D. Dickey; J. McNeil; A.F. Michaels; A.H. Knap. 1998. *Influence of mesoscale eddies on new production in the Sargasso Sea*. Nature. **394**: 263-265.
- Müller-Karger, F.E. y C. Fuentes-Yaco. 2000. *Characteristics of wind-generated rings in the eastern tropical Pacific Ocean*. Journal of Geophysical Research. **105**(C1): 1271-1284.
- Murtugudde, R.G.; S.R. Signorini; J.R. Christian; A.J. Busalacchi; C.R. McClain; J. Picaut. 1999. *Ocean color variability of the tropical Indo-Pacific basin observed by SeaWiFS during 1997-1998*. Journal of Geophysical Research. **104**(C8): 18351-18366.
- Oschlies, A. y V. Garçon. 1998. *Eddy-induced enhancement of primary production in a model of the north Atlantic Ocean*. Nature. **394**: 266-269.
- Robinson, M.K. & R.A. Bauer. 1971. *Atlas of monthly mean sea surface and subsurface temperature and depth of the top of the thermocline north Pacific Ocean*. Fleet Numerical Weather Central. Monterey, CA. 96 p.
- Stumpf, H.G. 1975. *Satellite detection of upwelling in the Gulf of Tehuantepec, Mexico*. Journal of Physical Oceanography. **5**: 383-388.
- y R.V. Legeckis. 1977. *Satellite observations of mesoscale eddy dynamics in the eastern tropical Pacific Ocean*. Journal of Physical Oceanography. **7**: 648-658.

- Tolmazin, D. 1985. *Elements of dynamic oceanography*. Allen & Unwin Inc. Massachussets. 181 pp.
- Tomczak, M. y J.S. Godfrey. 1994. *Regional oceanography: an introduction*. Pergamon. Gran Bretaña. 422 pp.
- Trasviña, A.; E.D. Barton; J. Brown; H.S. Velez; P.M. Kosro; R.L. Smith. 1995. *Offshore wind forcing in the Gulf of Tehuantepec, Mexico: the asymmetric circulation*. Journal of Geophysical Research. **100**(C10): 20,649-20,663.
- Venables, W.N. y B.D. Ripley. 1994. *Modern applied statistics with S-Plus*. Statistics and Computing. Springer-Verlag. Nueva York. 462 pp.
- Wilson, C. y D. Adamec. 2001. *Correlations between surface chlorophyll and sea surface height in the tropical Pacific during the 1997-1999 El Niño-Southern Oscillation event*. Journal of Geophysical Research. **106**(C12): 31,175-31,188.
- Wyrski, K. 1964. *Upwelling in the Costa Rica Dome*. Fishery Bulletin. **63**(2): 355-372.
- 1965. *Corrientes superficiales del Océano Pacífico Oriental tropical*. Inter-American Tropical Tuna Commission Bulletin. **IX**(5): 279-304.

Apéndice 1.1

Procesado de datos para anomalía del nivel del mar

A continuación se muestran los comandos utilizados en S-Plus 2000 para procesar las imágenes TOPEX:

Genera la malla de $0.5 \times 0.5^\circ$ para el área de estudio (rejilla de interpolación):

```
>nlon<-seq(-150,-75,by=0.5)
>nlat<-seq(-20,30,by=0.5)
>nlat<-rev(nlat)
>grid<-expand.grid(lon=nlon,lat=nlat) #genera la malla de  $0.5 \times 0.5^\circ$  (~55x35 km)
```

El nombre de los ciclos obtenidos de la red era cycle012 al 342. Aquí se extraen los datos cuyas coordenadas caen dentro de nuestra área de estudio y se separan las columnas 1, 2 y 5 del resto (ver Tabla I):

```
>lat<-cycle196[,1] #extrae del archivo global los valores de
altimetria,
>lon<-cycle196[,2] #longitud y latitud que nos interesan.
>h<-cycle196[lat >= -20 & lat <= 30 & lon >= 210 & lon <= 285,]
>lon<-h[,2]-360; lat<-h[,1]; h<-h[,5]
>tpx196<-data.frame(lon,lat,h)
.
.
.
>lat<-cycle342[,1]
>lon<-cycle342[,2]
>h<-cycle342[lat >= -20 & lat <= 30 & lon >= 210 & lon <= 285,]
>lon<-h[,2]-360; lat<-h[,1]; h<-h[,5]
>tpx342<-data.frame(lon,lat,h)
```

Genera la superficie de regresión (loess) para cada uno de los ciclos:

```
>tpxlo196<-loess(h ~ lon * lat, data=tpx196, span=0.05, degree=2)
.
. #genera un modelo de regresión local con los datos de cada ciclo
.
>tpxlo342<-loess(h ~ lon * lat, data=tpx342, span=0.05, degree=2)
```

Produce los valores para la rejilla de interpolación:

```
#genera una matriz de valores de altimetría para la
>tpred196<-predict.loess(tpxlo196,grid)      #malla (interpolación).
.
.
>tpred342<-predict.loess(tpxlo342,grid)
```

Elimina las filas y columnas de los extremos que la interpolación genera con valores NA (Not Available):

```
>tpred196<-rbind(tpred196[2,5:105],tpred196[2:150,5:105],tpred196[150,5:105])
.
.      #se eliminan los NA's de las orillas de la imagen (0.5x0.5°)
.
>tpred342<-rbind(tpred342[2,5:105],tpred342[2:150,5:105],tpred342[150,5:105])
```

Transforma la rejilla a un vector columna y agrega los vectores columna longitud y latitud:

```
>h<-matrix(tpred196,ncol=1)
>tpred196<-data.frame(malla,h)
.
.      #cambia la matriz de interpolación a un #vector columna (0.5°) y
.      #a una arreglo de tres columnas (longitud,latitud,desviación)
>h<-matrix(tpred342,ncol=1)
>tpred342<-data.frame(malla,h)
```

Blanquea la rejilla de interpolación y despliega su gráfica como comprobación:

```
>tpred196<-merge(bmalla,tpred196,by=1:2)
>image(interp(tpred196$lon,tpred196$lat,tpred196$h))
.      #elimina los puntos que caen en tierra de la malla
.      #de interpolación y hace una gráfica de prueba (0.5x0.5°)
.
>tpred342<-merge(bmalla,tpred342,by=1:2)
>image(interp(tpred342$lon,tpred342$lat,tpred342$h))
```

Forma el bloque para los 148 ciclos:

```
>tpx9801<-data.frame(lon,lat,tpred196$h,...,tpred342$h)
```

Apéndice 1.2

Análisis numérico para anomalía del nivel del mar

Breve descripción del análisis numérico para la anomalía del nivel del mar (S-Plus 2000):

Elimina las columnas de posición de la matriz D , aplica la descomposición en valores singulares (DVS) y obtiene el porcentaje de variabilidad explicado por cada modo espacial:

```
>tpx9801.feo<-as.matrix(tpx9801[,-1:-2])
>dimnames(tpx9801.feo)<-NULL
>D9801<-svd.Matrix(tpx9801.feo)
>u9801<-D9801$vector$left           funciones espaciales U
>v9801<-D9801$vector$right         funciones temporales
>s9801<-D9801$values                valores característicos S
>a9801<-v9801%*%diag(s9801)         amplitudes A
>svar9801<-(s9801/sum(s9801))*100
```

Obtiene el promedio de los 148 ciclos y los une a las columnas de posición (1er. arreglo):

```
>media9801<-matrix(1,12452,1) #vector columna de unos
>for (i in 1:12452) {
>+ media9801[i]<-mean(tpx9801.feo[i,])
>}
>lon<-grid$lon
>lat<-grid$lat
>ttx9801<-data.frame(lon,lat,media9801)
```

Estandariza la matriz de amplitudes A :

```
>a9801mean<-sweep(a9801,1,apply(a9801,1,mean))
>a9801sdev<-apply(a9801,1,stdev)
>a9801norm<-a9801mean/a9801sdev
```

Genera el árbol de regresión, validación cruzada y podado para el 1er. arreglo (longitud, latitud, media):

```
>ttx9801.tr<-tree(media9801~lon+lat,data=ttx9801)
>ttx9801.kv<-cv.tree(ttx9801.tr,,prune.tree)
>ttx9801.pr<-prune.tree(ttx9801.tr,best=6)
```

Genera el 2do. arreglo (longitud, latitud, modo1, modo2, modo3) y aplica el árbol de regresión, validación cruzada y podado para el modo 1:

```
>tu9801<-data.frame(tpx9801[,1:2],u9801[,1:4])
>tu98011.tr<-tree(modo1~lon+lat,data=tu9801)
>tu98011.cv<-cv.tree(tu98011.tr,,prune.tree)
>tu98011.pr<-prune.tree(tu98011.tr,best=5)
```

Árbol de regresión, validación cruzada y podado para el modo 2:

```
>tu98012.tr<-tree(modo2~lon+lat,data=tu9801)
>tu98012.cv<-cv.tree(tu98012.tr,,prune.tree)
>tu98012.pr<-prune.tree(tu98012.tr,best=5)
```

Árbol de regresión, validación cruzada y podado para el modo 3:

```
>tu98013.tr<-tree(modo3~lon+lat,data=tu9801)
>tu98013.cv<-cv.tree(tu98013.tr,,prune.tree)
>tu98013.pr<-prune.tree(tu98013.tr,best=8)
```

Agrupar (y promediar) todos aquellos ciclos con amplitud negativa o positiva (respecto a la 1er. amplitud; 3er. arreglo):

```
>neg19801<-cbind(tpx9801.feo[,1:9],tpx9801.feo[,12])
>pos19801<-cbind(tpx9801.feo[,10:11],tpx9801.feo[,13:148])
>mod19801<-matrix(1,12452,2)
>for (i in 1:12452) {
>+ mod19801[i,1]<-mean(neg19801[i,])
>+ mod19801[i,2]<-mean(pos19801[i,])
>+}
>mod19801<-data.frame(tpx9801[,1:2],mod19801)
```

Agrupar (y promediar) todos aquellos ciclos con amplitud negativa o positiva (respecto a la 2da. amplitud; 3er. arreglo):

```
>neg29801<-cbind(tpx9801.feo[,33:40],tpx9801.feo[,56:78],
>+ tpx9801.feo[,97:115],tpx9801.feo[,131:148])
>pos29801<-cbind(tpx9801.feo[,1:32],tpx9801.feo[,41:55],
>+ tpx9801.feo[,79:96],tpx9801.feo[,116:130])
>mod29801<-matrix(1,12452,2)
>for (i in 1:12452) {
>+ mod29801[i,1]<-mean(neg29801[i,])
>+ mod29801[i,2]<-mean(pos29801[i,])
>+}
>mod29801<-data.frame(tpx9801[,1:2],mod29801)
```

Agrupar (y promedia) todos aquellos ciclos con amplitud negativa o positiva (respecto a la 3er. amplitud; 3er. arreglo):

```
>neg39801<-cbind(tpx9801.feo[,1:7],tpx9801.feo[,39:55],
>+             tpx9801.feo[,74:92],tpx9801.feo[,110:129],
>+             tpx9801.feo[,147:148])
>pos39801<-cbind(tpx9801.feo[,8:38],tpx9801.feo[,56:73],
>+             tpx9801.feo[,93:109],tpx9801.feo[,130:146])
>mod39801<-matrix(1,12452,2)
>for (i in 1:12452) {
>+ mod39801[i,1]<-mean(neg39801[i,])
>+ mod39801[i,2]<-mean(pos39801[i,])
>+}
>mod39801<-data.frame(tpx9801[,1:2],mod39801)
```

Árboles de regresión para los ciclos positivos y negativos, validación cruzada y podado (respecto a la 1er. amplitud; 3er. arreglo):

```
>tpos1.tr<-tree(mod19801.2~lon+lat,data=mod19801)
>tpos1.kv<-cv.tree(tpos1.tr,,prune.tree)
>tpos1.pr<-prune.tree(tpos1.tr,best=9)
>tneg1.tr<-tree(mod19801.1~lon+lat,data=mod19801)
>tneg1.kv<-cv.tree(tneg1.tr,,prune.tree)
>tneg1.pr<-prune.tree(tneg1.tr,best=8)
```

Árboles de regresión para los ciclos positivos y negativos, validación cruzada y podado (respecto a la 2da. amplitud; 3er. arreglo):

```
>tpos2.tr<-tree(mod29801.2~lon+lat,data=mod29801)
>tpos2.kv<-cv.tree(tpos2.tr,,prune.tree)
>tpos2.pr<-prune.tree(tpos2.tr,best=8)
>tneg2.tr<-tree(mod29801.1~lon+lat,data=mod29801)
>tneg2.kv<-cv.tree(tneg2.tr,,prune.tree)
>tneg2.pr<-prune.tree(tneg2.tr,best=10)
```

Árboles de regresión para los ciclos positivos y negativos, validación cruzada y podado (respecto a la 3er. amplitud; 3er. arreglo):

```
>tpos3.tr<-tree(mod39801.2~lon+lat,data=mod39801)
>tpos3.kv<-cv.tree(tpos3.tr,,prune.tree)
>tpos3.pr<-prune.tree(tpos3.tr,best=8)
>tneg3.tr<-tree(mod39801.1~lon+lat,data=mod39801)
>tneg3.kv<-cv.tree(tneg3.tr,,prune.tree)
>tneg3.pr<-prune.tree(tneg3.tr,best=9)
```

Apéndice 2.1

Procesado de datos para clorofila "a"

Algoritmo realizado en MatLab (versión 5.3) para sustituir los pixeles sin valor de clorofila "a" por un valor interpolado en 3 dimensiones:

El algoritmo se corría en bloques de seis meses, para el primer y segundo semestres de cada año por separado. Se muestran unidos para no repetir el algoritmo completo. Aquí se cargan los archivos y renombran para simplificar el trabajo:

```
>>disp('carga los archivos')
>>load diciembre99;
>>load enero00;
>>load febrero00;
>>load marzo00;
>>load abril00;
>>load mayo00;

load junio00
load julio00
load agosto00
load septiembre00
load octubre00
load noviembre00

>>x1=diciembre99;
>>x2=enero00;
>>x3=febrero00;
>>x4=marzo00;
>>x5=abril00;
>>x6=mayo00;

x1=junio00;
x2=julio00;
x3=agosto00;
x4=septiembre00;
x5=octubre00;
x6=noviembre00;

>>a1=x1;
>>a2=x2;
>>a3=x3;
>>a4=x4;
>>a5=x5;
>>a6=x6;
```

Sustituye cada valor de 66.83 por NAN (Not A Number) y une los seis meses en un arreglo de tres dimensiones:

```
>>disp('encuentra y sustituye cada bandera (66.83) por NAN')
>>k=find(a1==66.83);
>>a1(k)=NaN;
>>k=find(a2==66.83);
>>a2(k)=NaN;
>>k=find(a3==66.83);
>>a3(k)=NaN;
>>k=find(a4==66.83);
>>a4(k)=NaN;
>>k=find(a5==66.83);
>>a5(k)=NaN;
>>k=find(a6==66.83);
>>a6(k)=NaN;
>>sems=cat(3,a1,a2);
>>sems=cat(3,sems,a3);
>>sems=cat(3,sems,a4);
>>sems=cat(3,sems,a5);
>>sems=cat(3,sems,a6);
```

Calcula la media del arreglo tridimensional y sustituye cada NAN por el valor promedio correspondiente:

↳ Rutina 1: Cálculo de una imagen promedio a partir de imágenes mensuales (6 de ellas) para sustituir huecos dejados por banderas (nubes) en las imágenes individuales.

```
>>disp('calcula la media ignorando los NAN's')
>>for i=1:600
    for j=1:800
        media(i,j)=nanmean(sems(i,j,:));
    end
end
%
%
>>disp('sustituye cada NAN por su correspondiente valor promedio')
>>disp('imagen 1...')
>>for i=1:600
    for j=1:800
        if x1(i,j)==66.83
            x1(i,j)=media(i,j);
        end
    end
end

>>disp('imagen 2...')
>>for i=1:600
    for j=1:800
        if x2(i,j)==66.83
            x2(i,j)=media(i,j);
        end
    end
end

>>disp('imagen 3...')
>>for i=1:600
    for j=1:800
        if x3(i,j)==66.83
            x3(i,j)=media(i,j);
        end
    end
end

>>disp('imagen 4...')
>>for i=1:600
    for j=1:800
        if x4(i,j)==66.83
            x4(i,j)=media(i,j);
        end
    end
end

>>disp('imagen 5...')
>>for i=1:600
    for j=1:800
        if x5(i,j)==66.83
            x5(i,j)=media(i,j);
        end
    end
end
```

```

>>disp('imagen 6...')
>>for i=1:600
    for j=1:800
        if x6(i,j)==66.83
            x6(i,j)=media(i,j);
        end
    end
end
end

```

Para hacer más representativo cada uno de los valores promedio sustituidos se realiza una interpolación en 3 dimensiones del arreglo anterior y una interpolación en dos dimensiones para disminuir el "ruido" en la imagen:

*Rutina 2: Ahora se interpola tanto en espacio (x,y) como en tiempo (z) para el bloque de imágenes mensuales.

```

>>disp('forma el cubo e interpola en tres dimensiones')
>> [x,y,z]= meshgrid(1:800,1:600,1:6);

>>bloque= cat(3,x1,x2);
>>bloque= cat(3,bloque,x3);
>>bloque= cat(3,bloque,x4);
>>bloque= cat(3,bloque,x5);
>>bloque= cat(3,bloque,x6);
>>k=interp3(bloque,x,y,z);
>>dic99=k(:,:,1);          jun00=k(:,:,1);
>>ene00=k(:,:,2);         jul00=k(:,:,2);
>>feb00=k(:,:,3);         ago00=k(:,:,3);
>>mar00=k(:,:,4);         sep00=k(:,:,4);
>>abr00=k(:,:,5);         oct00=k(:,:,5);
>>may00=k(:,:,6);         nov00=k(:,:,6);

>>disp('realiza el filtrado en dos dimensiones')
>>dic99=medfilt2(dic99);   jun00=medfilt2(jun00);
>>ene00=medfilt2(ene00);   jul00=medfilt2(jul00);
>>feb00=medfilt2(feb00);   ago00=medfilt2(ago00);
>>mar00=medfilt2(mar00);   sep00=medfilt2(sep00);
>>abr00=medfilt2(abr00);   oct00=medfilt2(oct00);
>>may00=medfilt2(may00);   nov00=medfilt2(nov00);

```

Incrementa el contraste en la imagen para poder detectar diferencias pequeñas entre concentraciones de clorofila:

```

>>dic99=nlfilter(dic99,[2 2],'sum(x(:))');
>>disp('Listo diciembre')
>>ene00=nlfilter(ene00,[2 2],'sum(x(:))');
>>disp('Listo enero')
>>feb00=nlfilter(feb00,[2 2],'sum(x(:))');
>>disp('Listo febrero')
>>mar00=nlfilter(mar00,[2 2],'sum(x(:))');
>>disp('Listo marzo')

```

```

>>abr00=nlfilter(abr00,[2 2],'sum(x(:))');
>>disp('Listo abril')
>>may00=nlfilter(may00,[2 2],'sum(x(:))');
>>disp('Listo mayo')
>>jun00=nlfilter(jun00,[2 2],'sum(x(:))');
>>disp('Listo junio')
>>jul00=nlfilter(jul00,[2 2],'sum(x(:))');
>>disp('Listo julio')
>>ago00=nlfilter(ago00,[2 2],'sum(x(:))');
>>disp('Listo agosto')
>>sep00=nlfilter(sep00,[2 2],'sum(x(:))');
>>disp('Listo septiembre')
>>oct00=nlfilter(oct00,[2 2],'sum(x(:))');
>>disp('Listo octubre')
>>nov00=nlfilter(nov00,[2 2],'sum(x(:))');
>>disp('Listo noviembre')

```

Salva la imágenes interpoladas en formato *.mat:

```

>>save dic00 dic00      -v4
>>save ene01 ene01     -v4
>>save feb01 feb01     -v4
>>save mar01 mar01     -v4
>>save abr01 abr01     -v4
>>save may01 may01     -v4

```

Aquí se presentan los comandos utilizados en S-Plus 2000 para el procesado de las imágenes de clorofila interpoladas:

Cambia el formato de la imagen a tipo matriz, genera los vectores longitud y latitud para ella y forma el bloque:

```

>m1<-as.matrix(m1)
>dimnames(m1)<-NULL
>chl<-matrix(m1,ncol=1)

>lon<-sort(rep(seq(-150,-75,75.01/800),600))
>lat<-rep(seq(-20,32,52.01/600),800)
>lat<-rev(lat)
>m1<-data.frame(lon,lat,chl)
.
.
.
>m48<-data.frame(lon,lat,chl)

```

Genera la superficie de regresión (loess) y genera los valores para la rejilla de interpolación:

```
>mlo1<-
>+loess(chl~lon*lat,na.action=na.omit,data=m1,span=0.05,degree=2,family=c("symm
>+etric"))
#regresión local que genera una función de
#interpolación
.
.
>mlo48<-
>+loess(chl~lon*lat,na.action=na.omit,data=m48,span=0.05,degree=2,family=c("sym
>+metric"))

>mpred1<-predict(mlo1,grid) #interpolación que eliminar NA's (malla de 0.5°)
.
.
>mpred48<-predict(mlo48,grid)
```

Elimina las filas y columnas de los extremos con NA's generados por la interpolación:

```
>mpred1<-rbind(mpred1[1:150,],mpred1[150,])
>mpred1<-cbind(mpred1[,2],mpred1[,2:105]) #repite la primer columna y la
#última #fila de la matriz ya que son
#los #únicos elementos con NA que
#quedan
```

Asigna valores a los vectores longitud y latitud, transforma la matriz de interpolación a vector columna y la une las columnas de posición:

```
>lonn<-grid$lon
>latt<-grid$lat
>h<-matrix(mpred1,ncol=1)
>swfdat1<-data.frame(lonn,latt,h) #arreglo de valores de clorofila interpolados
#a la malla de 0.5x0.5°
```

Blanquea la rejilla de interpolación y despliega su gráfica como comprobación:

```
>swfdat1<-merge(bgrid,swfdat1,by=1:2) #se eliminan los puntos correspondientes
#a #tierra, Golfo de México y Mar Caribe
.
.
>swfdat48<-merge(bgrid,swfdat48,by=1:2)

>image(interp(swfdat1$lonn,swfdat1$latt,swfdat1$h)) #imagen para comprobación
```

Apéndice 2.2

Análisis numérico para clorofila "a"

A continuación se muestran los comandos utilizados en S-Plus 2000 en el análisis numérico para la concentración de clorofila "a":

Forma el bloque con los 48 meses:

```
>swif9801<-data.frame( swf1, swf2 [,3])
>swif9801<-data.frame( swif9801, swf3 [,3])
.
.
.
>swif9801<-data.frame( swif9801, swf48 [,3])
```

Cambia el formato del bloque anterior a matriz, aplica el logaritmo natural a toda la matriz y adiciona un factor de corrección de 0.1; aplica la DVS y determina el porcentaje de variabilidad explicado por cada modo:

```
>swif9801.feo<-as.matrix(swif9801)
>dimnames(swif9801.feo)<-NULL
>lnswif9801.feo<-log(swif9801.feo+0.1)
>DD9801<-svd.Matrix(lnswif9801.feo)
>uu9801<-DD9801$vector$left           #funciones espaciales U
>vv9801<-DD9801$vector$right         #funciones temporales
>ss9801<-DD9801$values                 #valores característicos S
>aa9801<-vv9801%*%diag(ss9801)       #amplitudes A
>ssvar9801<- (ss9801/sum(ss9801)) *100
```

Determina la media para los 48 meses muestreados y genera el 1er. arreglo (longitud, latitud, media) :

```
>mean9801<-matrix(1,12452,1)
>for (i in 1:12452) {
>+ mean9801[i]<-mean(lnswif9801.feo[i,])
>+}
>lon<-swif9801[,1]
>lat<-swif9801[,2]
>lnswif9801.frame<-data.frame(lon,lat,mean9801)
```

Genera el árbol de regresión para el 1er. arreglo, así como su validación cruzada y su podado:

```
>tswif9801.tr<-tree(mean9801~lon+lat,data=lswif9801.frame)
>tswif9801.kv<-cv.tree(tswif9801.tr,,prune.tree)
>tswif9801.pr<-prune.tree(tswif9801.tr,best=7)
```

Genera el 2do. arreglo (longitud, latitud, modo1, modo2, modo3) el árbol de regresión, validación cruzada y podado para el modo 1:

```
>tmodos9801<-data.frame(lon,lat,uu9801[,1:3]) #modos 1 al 3
>tmodos98011.tr<-tree(modo1~lon+lat,data=tmodos9801)
>tmodos98011.kv<-cv.tree(tmodos98011.tr,,prune.tree)
>tmodos98011.pr<-prune.tree(tmodos98011.tr,best=7)
```

Árbol de regresión, validación cruzada y podado para el modo 2 (2do. arreglo):

```
>tmodos98012.tr<-tree(modo2~lon+lat,data=tmodos9801)
>tmodos98012.kv<-cv.tree(tmodos98012.tr,,prune.tree)
>tmodos98012.pr<-prune.tree(tmodos98012.tr,best=7)
```

Árbol de regresión, validación cruzada y podado para el modo 3 (2do. arreglo):

```
>tmodos98013.tr<-tree(modo3~lon+lat,data=tmodos9801)
>tmodos98013.kv<-cv.tree(tmodos98013.tr,,prune.tree)
>tmodos98013.pr<-prune.tree(tmodos98013.tr,best=7)
```

Forma el bloque de meses positivos respecto a la 1er. amplitud (3er. arreglo):

```
>pos19801<-lswif9801.frame
>mod19801<-pos19801 #porque todos los ciclos son positivos
```

Forma el bloque de meses positivos y negativos para la 2da. amplitud (3er. arreglo):

```
>neg29801<-cbind(lswif9801.feo[,8],lswif9801.feo[,12:48])
>pos29801<-cbind(lswif9801.feo[,1:7],lswif9801.feo[,9:11])
>mod29801<-matrix(1,12452,2)
>for (i in 1:12452) {
>+ mod29801[i,1]<-mean(neg29801[i,])
>+ mod29801[i,2]<-mean(pos29801[i,])
>+}
>mod29801<-data.frame(lswif9801[,1:2],mod29801)
```

Forma el bloque de meses positivos y negativos para la 3er. amplitud (3er. arreglo):

```
>neg39801<-cbind(lnswif9801.feo[,1:5],lnswif9801.feo[,13:18],
>+             lnswif9801.feo[,22:30],lnswif9801.feo[,35:42],
>+             lnswif9801.feo[,46:48])
>pos39801<-cbind(lnswif9801.feo[,6:12],lnswif9801.feo[,19:21],
>+             lnswif9801.feo[,31:34],lnswif9801.feo[,43:45])
>mod39801<-matrix(1,12452,2)
>for (i in 1:12452) {
>+ mod39801[i,1]<-mean(neg39801[i,])
>+ mod39801[i,2]<-mean(pos39801[i,])
>+}
>mod39801<-data.frame(lnswif9801[,1:2],mod39801)
```

Árbol de regresión, validación cruzada y podado para los meses positivos, 1er. amplitud (3er. arreglo):

```
>tpos1.tr<-tree(mod19801~lon+lat,data=mod19801)
>tpos1.kv<-cv.tree(tpos1.tr,,prune.tree)
>tpos1.pr<-prune.tree(tpos1.tr,best=7)
```

Árbol de regresión, validación cruzada y podado para los meses positivos, 2da. amplitud (3er. arreglo):

```
>tpos2.tr<-tree(mod29801.2~lon+lat,data=mod29801)
>tpos2.kv<-cv.tree(tpos2.tr,,prune.tree)
>tpos2.pr<-prune.tree(tpos2.tr,best=6)
```

Árbol de regresión, validación cruzada y podado para los meses negativos, 2da. amplitud (3er. arreglo):

```
>tneg2.tr<-tree(mod29801.1~lon+lat,data=mod29801)
>tneg2.kv<-cv.tree(tneg2.tr,,prune.tree)
>tneg2.pr<-prune.tree(tneg2.tr,best=6)
```

Árbol de regresión, validación cruzada y podado para los meses positivos, 3er. amplitud (3er. arreglo):

```
>tpos3.tr<-tree(mod39801.2~lon+lat,data=mod39801)
>tpos3.kv<-cv.tree(tpos3.tr,,prune.tree)
>tpos3.pr<-prune.tree(tpos3.tr,best=6)
```

Árbol de regresión, validación cruzada y podado para los meses negativos, 3er. amplitud (3er. arreglo):

```
>tneg3.tr<-tree(mod39801.1~lon+lat,data=mod39801)
>tneg3.kv<-cv.tree(tneg3.tr,,prune.tree)
>tneg3.pr<-prune.tree(tneg3.tr,best=6)
```

Apéndice 3

Funciones Empíricas Ortogonales

Existen distintos métodos que permiten comprimir la variabilidad de un conjunto de series de tiempo, el análisis de componentes principales (ACP) y el análisis de factores son algunos de los más conocidos, éste último es ampliamente utilizado en el campo de las ciencias sociales. En oceanografía se utiliza un método equivalente conocido como Función Empírica Ortogonal (FEO) su forma algebraica es:

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

Donde, ψ representa una matriz de dimensiones $N \times M$, en donde N equivale a las estaciones muestreadas o puntos geográficos conocidos y M es el número de mediciones que se tienen para cada estación. m equivale a los N puntos dentro de la matriz de muestreo y t representa los M tiempos muestreados. $a_i(t)$ son las M amplitudes temporales que modulan a cada una de las M funciones espaciales ϕ_{im} .

Suponiendo que se tenga información de 1000 boyas ancladas y que cada una de ellas registró durante 30 días alguna variable oceanográfica (e.g. temperatura superficial) tendríamos una matriz D de 1000×30 . Si se desea analizar su variabilidad utilizando FEO's primero que nada se debe sustraer la media de cada una de las filas y eliminar la tendencia (si existe) mediante una regresión. Posteriormente se aplica la Descomposición en Valores Singulares (DSV) que da como resultado dos matrices y un vector: una matriz U (funciones espaciales) de dimensiones 1000×30 , una matriz V (funciones temporales) de dimensiones 30×30 y un vector S (valores característicos) con 30 elementos.

$$D = USV^T$$

Ahora, en U tenemos las 30 funciones espaciales generadas para el conjunto de 1000 boyas, en V están las 30 funciones temporales para los 30 días muestreados y la suma de los 30 elementos de S da la variabilidad total contenida en el conjunto de datos. Generalmente en los primeros 3 ó 4 modos espaciales se encuentra contenida la mayor parte de la variabilidad de los datos.

El producto de los elementos de V por una matriz que contenga en su diagonal principal los elementos de S generan la matriz A (30×30) que proporciona las amplitudes temporales que modulan a cada una de las funciones espaciales. Sus filas representan los 30 días muestreados y sus columnas las 30 amplitudes para cada una de las 30 funciones espaciales.

$$A = VS$$

Por lo tanto, el producto de los elementos de las matrices U por la transpuesta de A da como resultado la matriz de datos inicial D' que es idéntica a D siempre y cuando se incluyan todos los modos espaciales en la multiplicación. Sin embargo lo que se desea es explicar la mayor parte de la variabilidad con el menor número de funciones ortogonales posible; suponiendo que con los primeros tres modos explicaríamos el 70% de la variabilidad de nuestros datos, no sería necesario utilizar los 27 modos restantes. Así que multiplicaríamos una matriz U de dimensiones 1000×3 por la transpuesta de la matriz A de dimensiones 3×30 . El resultado sería una matriz de 1000×30 que representaría el 70% de la variabilidad para el área que cubrieron las 1000 boyas durante 30 días.

Algebraicamente la sumatoria de las funciones ortogonales (utilizando los primeros tres modos) se vería de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \psi(x_m, t_1) &= \sum_{i=1}^3 a_i \phi_{im} + a_2 \phi_{2m} + a_3 \phi_{3m} \\ \psi(x_m, t_2) &= \sum_{i=1}^3 a_i \phi_{im} + a_2 \phi_{2m} + a_3 \phi_{3m} \\ &\vdots \\ \psi(x_m, t_{29}) &= \sum_{i=1}^3 a_i \phi_{im} + a_2 \phi_{2m} + a_3 \phi_{3m} \\ \psi(x_m, t_{30}) &= \sum_{i=1}^3 a_i \phi_{im} + a_2 \phi_{2m} + a_3 \phi_{3m} \end{aligned}$$

Cada una de las sumatorias representa los valores correspondientes a las 1000 boyas para un tiempo dado. De tal forma que al combinarlas generan el campo que teníamos inicialmente (1000×30 .)

Es importante recordar que el nombre de empíricas nos refiere a que estas funciones no se relacionan directamente con procesos físicos que ocurren en la realidad, simplemente muestran el patrón de comportamiento de la variabilidad, ya sea espacial o temporal. El resultado de obtener las funciones ortogonales espaciales o temporales es idéntico (Kelly, 1988).

Apéndice 4

Correlación canónica

Estos son los comandos utilizados en S-Plus 2000 para realizar la correlación canónica entre los campos de anomalía del nivel del mar y concentración de clorofila "a".

Genera una matriz unitaria que contendrá los promedios mensuales producidos por el algoritmo que promedió todos aquellos meses formados por 3 ciclos:

```
>tpxcor<-matrix(1,12452,48)

>for (i in 1:12452) {
>+ k<-0
>+ for (j in 43:48) {
>+   tpxcor[i,j]<-mean(tpx9801.feo[i,(j+k):(j+k+2)])
>+   k<-k+2
>+ }
>+}
```

Los meses que contaban con 2 ó 4 ciclos se promediaron por separado, ya que fueron relativamente pocos:

```
>for (i in 1:12452) {
>+ k<-85
>+ for (j in 42) {
>+   tpxcor[i,j]<-mean(tpx9801.feo[i,(j+k):(j+k+3)])
>+   #k<-k+2
>+ }
>+}
```

Aplica la función correlación canónica sobre los campos de anomalía y clorofila:

```
>correl<-cancor(tpxcor,lswif9801.feo)
```

Genera los valores de las primeras tres variables canónicas para la anomalía del nivel del mar y la concentración de clorofila "a":

```
>ssh<-tpxcor%%correl$coef[,1:3]
>chl<-lswif9801.feo%%correl$ycoef[,1:3]
```