

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Programa de Posgrado en Ciencias
en Ecología Marina**

**Variabilidad espacio-temporal de la biomasa y producción
fitoplanctónicas frente al Sur de California y Norte de Baja
California**

Tesis

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Uriel Mirabal Gómez

Ensenada, Baja California, México
2015

Tesis defendida por
Uriel Mirabal Gómez
y aprobada por el siguiente Comité

Dr. José Rubén Lara Lara
Codirector del Comité

Dr. Saúl Álvarez Borrego
Codirector del Comité

Dr. Modesto Ortiz Figueroa
Miembro del Comité

Dr. Jorge Adrián Rosales Casián
Miembro del Comité



Dr. Alberto Rivas Camargo
Coordinador del Posgrado en
Ecología Marina

Dr. Jesús Favela Vara
Director de Estudios de Posgrado

Uriel Mirabal Gómez © 2015

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor

Resumen de la tesis de **Uriel Mirabal Gómez**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ecología Marina.

Variabilidad espacio-temporal de la biomasa y producción fitoplanctónicas frente al sur de California y norte de Baja California

Resumen aprobado por:

Dr. José Rubén Lara Lara
Codirector de Tesis

Dr. Saúl Álvarez Borrego
Codirector de Tesis

Una característica del Sistema de la Corriente de California (SCC) es el Frente Ensenada, que genera dos flujos costeros que causan disminución de la intensidad de surgencias en la parte norte y aumento al sur del frente. Con el fin de comparar el efecto del Frente Ensenada y de otros fenómenos físicos, se generaron series de tiempo de temperatura superficial del mar (SST), biomasa y producción fitoplanctónicas (Chl_{sat} , PP) de imágenes satelitales de 2002 a 2014, para dos transectos de 250 km perpendiculares a la costa: uno frente a La Jolla (FLJ) y otro frente a Bahía San Quintín (FBSQ); y también para dos cuadrantes de $18 \times 18 \text{ km}^2$ cercanos a la costa, frente a las mismas localidades. Se obtuvieron promedios mensuales ensamblados de cada variable para generar un año promedio para cada transecto como una aproximación a la climatología anual. La climatología de los transectos muestra Chl_{sat} y PP con valores altos en la zona costera (hasta $>10 \text{ mg m}^{-3}$ y $>4 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), disminuyendo hacia mar adentro ($\sim 0.1 \text{ mg m}^{-3}$ y $0.4 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), mientras que la SST presentó, en general, valores mínimos en la zona costera ($\sim 15.0 \text{ }^\circ\text{C}$) y máximos mar adentro ($\sim 21.0 \text{ }^\circ\text{C}$). La SST presentó mínimos y máximos a menudo, sobre todo en FLJ, que sugieren fenómenos de mesoescala como meandros y remolinos. El impacto de estos fenómenos en la biología se aprecia más en FLJ que en FBSQ. En FBSQ se presentan valores más altos de Chl_{sat} que en FLJ. La variación de Chl_{sat} y PP en ambos transectos mostró condiciones biológicas separadas en dos épocas: la primera que comprendió de febrero a junio; y la segunda de julio a enero. En la primera época se presentaron valores mayores que en la segunda. Esto tiene relación con la dinámica del SCC y la estacionalidad de las surgencias costeras. Esta variación estacional no es tan marcada como en otras regiones oceánicas, no implica una situación oligotrófica en invierno. Las variaciones de SST, Chl_{sat} y PP de año a año de ambos transectos, y en los cuadrantes costeros, tuvieron componentes claros estacionales e interanuales, con la mayor variación en el componente estacional. El análisis espectral muestra que la varianza de Chl_{sat} y PP en el cuadrante frente a Bahía de San Quintín fue mayor que en el de La Jolla. Contrario a lo reportado para otras zonas frente a la península, en el área de estudio hubo impactos significativos de los eventos El Niño de tipo Pacífico central del siglo XXI (2002-2003, 2004-2005 y 2009-2010). El impacto del ENSO de 2004-2005 fue más fuerte que el de 2009-2010, sobre todo en FBSQ, donde Chl_{sat} bajó a $<1 \text{ mg m}^{-3}$. El ENSO de 2014 es de tipo Pacífico oriental y tuvo un efecto muy claro en FLJ, pero no en FBSQ. La dinámica costera hace que los impactos de El Niño sean diferentes en las diversas regiones costeras del SCC.

Palabras clave: **Sistema de la Corriente de California, Surgencias costeras, Frente Ensenada, Producción fitoplanctónica, Temperatura superficial del mar.**

Abstract of the thesis presented by **Uriel Mirabal-Gómez** as a partial requirement to obtain the Master in Science degree in Marine Ecology.

Spatio-temporal variability of phytoplankton biomass and production off southern California and northern Baja California

Abstract approved by:

Dr. José Rubén Lara-Lara
Thesis Codirector

Dr. Saúl Álvarez-Borrego
Thesis Codirector

A characteristic of the California Current System (CCS) is the Ensenada Front, which generates two coastal fluxes that cause a decrease of upwelling intensity to the north and its increase to the south of the front. Sea surface temperature (SST), and phytoplankton biomass and production (Chl_{sat} , PP) time series were generated from satellite imagery of the period 2002-2014, for 250 km transects perpendicular to the coast: one off La Jolla (FLJ), and another off Bahía San Quintín (FBSQ); and also for two $18 \times 18 \text{ km}^2$ quadrants near the coast, off the same localities. Average monthly values were obtained for each variable to generate an “average year” for each transect as an approximation to the yearly climatology. This climatology shows a spatial variation of Chl_{sat} and PP with values higher in the coastal zone (up to $>10 \text{ mg m}^{-3}$ and $>4 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) than offshore ($\sim 0.1 \text{ mg m}^{-3}$ and $0.4 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), while SST presented, in general, minimum values at the coastal zone ($\sim 15.0 \text{ }^\circ\text{C}$) and maxima offshore ($\sim 21.0 \text{ }^\circ\text{C}$). Often, SST presented minima and maxima, especially in FLJ, that suggest mesoscale phenomena such as eddies and meanders. The impact of these phenomena on the biology is more evident in FLJ than in FBSQ. There were higher Chl_{sat} values in FBSQ than in FLJ. Variation of Chl_{sat} and PP in both transects showed biological conditions separated into two periods: the first one was in February-June; and the second from July through January. During the first period there were higher Chl_{sat} and PP values than during the second. This has a close relation with the physical dynamics of the CCS and with the seasonality of coastal upwelling. This seasonal variation is not as dramatic as in other oceanic regions, it does not imply an oligotrophic situation during winter. The year-to-year SST, Chl_{sat} and PP variations, of both transects and also in the coastal quadrants, had clear seasonal and interannual components, with the larger variation in the seasonal component. Spectral analysis shows that Chl_{sat} and PP variance of the quadrant off San Quintín Bay was larger than that off La Jolla. Contrary to what has been reported for other areas off the peninsula, in the study area there were significant impacts of the El Niño events of the central Pacific type in the XXI century (2002-2003, 2004-2005 y 2009-2010). The ENSO 2004-2005 impact was stronger than that of the 2009-2010 event, mainly in FBSQ, where Chl_{sat} was as low as $<1 \text{ mg m}^{-3}$. The 2014 ENSO is of the eastern Pacific type and it has had a very clear effect on FLJ, but not on FBSQ. Coastal dynamics makes the El Niño impacts to be different in the diverse coastal regions of the CCS.

Keywords: California Current System, Coastal upwelling, Ensenada Front, Phytoplankton Production, Sea surface temperature.

Para mis papás

Sergio Mirabal García
y
María del Rosario Gómez González

Por estar siempre a mi lado, alentándome a seguir adelante, por el amor y cariño que me han dado a lo largo de mi vida y por su apoyo incondicional para la realización de cada uno de mis sueños.

Agradecimientos

Al CONACYT por el apoyo económico brindado para poder realizar mis estudios de Maestría y por el apoyo a través del proyecto “Red Nacional de Monitoreo de Flujos de Carbono en los Ecosistemas Costeros del Pacífico Mexicano y el Golfo de México” (CB-2011-01-167361).

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B. C., por la oportunidad de continuar con mi formación académica y personal.

A la Administración Nacional de la Atmósfera y del Espacio (NASA por sus siglas en inglés), de Estados Unidos, por poner a la disposición del público en general, y particularmente de la comunidad científica internacional, la valiosísima información que genera con los sensores orbitando en satélites.

A mis directores de tesis y amigos Dr. Rubén Lara Lara y Dr. Saúl Álvarez Borrego por compartir su conocimiento, guiarme y aconsejarme en el proceso de este trabajo de tesis.

A mi comité de tesis Dr. Jorge Rosales y Dr. Modesto Ortiz por proveer acertados comentarios para el desarrollo de este trabajo.

Al personal docente y administrativo del CICESE, especialmente a todos aquellos con quienes tuve la fortuna de convivir: Elena Solana, Lorena Linacre, Lydia Ladah, Ernesto García, Bertha Lavaniegos, Helmut Maske, Carmen Bazán, Norma Fuentes, Dolores Sarracino, Citlali Romero, Ivonne Best y en especial a mi amiga Elizabeth Farías.

A mis hermanas Gabriela y Rosario por su cariño y apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida.

A mis sobrinos quienes son la alegría de mi vida y el motivo para seguir superándome, buscando ser un ejemplo de orgullo para ellos; Víctor Hugo, Sofía Libertad, Abril Eugenia y Kevin Isaac.

A toda mi familia gracias por el apoyo y cariño que siempre me han sabido brindar.

A mis amigos de San Luis Potosí, quienes a pesar de la distancia siguen estando presentes; Alma Delfina, Alma Delia, Diana Carolina, Edgar Adrián, Itzá y Mónica Edith.

A mis amigos Oceanólogos, por brindarme su amistad, lealtad y compañerismo: Alejandra, Alma Aracely, Anabel, Carmen Gabriela, Francisco Javier, Gabriela, Gaspar, Graciela, Guillermo, Lizbeth Berenice, Miguel Geovanny, Viridiana y muy especialmente para Angélica, Claudia Janete, Erick Daniel, José Marina y Maritza.

A mis amigos con quienes he vivido grandes experiencias en estos últimos años: Alejandra Yaireb, José Carlos, Juan Manuel, Luis Enrique, Luz y Mario Rafael, pero muy especialmente para; Alberto, Ivonne, Jesús Rigoberto, José Alfredo, Karen, Karen Raquel y Ramón, siempre los últimos de la fiesta.

Y a todas aquellas personas que de forma directa o indirecta ayudaron en la consolidación de este trabajo.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español	ii
Resumen en inglés	iii
Dedicatorias	iv
Agradecimientos	v
Lista de figuras	viii
Lista de tablas	x
Capítulo 1 - Introducción	
1.1 Introducción.....	1
1.2 Antecedentes.....	6
1.3 Justificación.....	7
1.4 Hipótesis.....	7
1.5 Objetivos.....	7
1.5.1 Objetivo general.....	7
1.5.2 Objetivos particulares.....	8
Capítulo 2 - Materiales y métodos	
2.1 Área de estudio.....	9
2.2 Métodos.....	10
2.3 Análisis estadístico.....	11
Capítulo 3 - Resultados	
3.1 Aproximación a la climatología.....	13
3.2 Variación de año a año.....	14
Capítulo 4 – Discusiones	33
Capítulo 5 – Conclusiones	40
Lista de referencias bibliográficas	42

Lista de figuras

Figura		Página
1	Esquema simplificado del Frente Ensenada. Las áreas sombreadas presentan concentraciones altas de clorofila y las áreas claras tienen concentraciones bajas (tomada de una imagen del sensor Coastal Zone Color Scanner (CZCS). La topografía dinámica aparece sobre-dibujada con líneas continuas; las flechas indican la dirección de las corrientes geostróficas. Se aprecia el Frente Ensenada con un flujo geostrófico hacia la costa, así como un flujo geostrófico compensatorio hacia mar adentro inmediatamente al sur de Bahía de San Quintín. Hay una lengüeta de clorofila alta al sur y oeste de Bahía de San Quintín (tomado de Álvarez-Borrego, 2004, quien lo adaptó de Peláez y McGowan, 1986).....	4
2	Transectos y cuadrantes muestreados para las dos zonas: frente al sur de California; y frente al norte de Baja California.....	9
3	Variación espacial de SST, Chl_{sat} y PP para el “año promedio”, mes a mes (aproximación a la climatología), en los transectos de la figura 1. A la izquierda el transecto FLJ y a la derecha el FBSQ. El eje de las abscisas muestra la distancia en km de la costa hacia mar adentro. La línea azul representa SST, la línea verde representa Chl_{sat} y la línea roja PP. Nótese que las escalas cambian para ciertos períodos.....	15
4	Ejemplos de SST para diferentes meses de distintos años a la izquierda el transecto FLJ y a la derecha el transecto FBSQ.....	23
5	Diagrama Hovmöller para SST en el transecto frente a La Jolla.	24
6	Diagrama Hovmöller para SST en el transecto frente a Bahía San Quintín.....	24
7	Diagrama Hovmöller para Chl_{sat} en el transecto frente a La Jolla	26
8	Diagrama Hovmöller para Chl_{sat} en el transecto frente a Bahía San Quintín.....	26
9	Ejemplos de transectos de FLJ con la distribución espacial de SST, Chl_{sat} y PP.....	27
10	Series de tiempo de SST para FLJ y FBSQ respectivamente.....	30

Lista de figuras (continuación)

11	Series de tiempo de Chl_{sat} y PP en las zonas FLJ y FBSQ respectivamente.....	31
12	Espectros de varianza de las series de tiempo de SST ($^{\circ}\text{C}$), Chl_{sat} (mg m^{-3}) y PP ($\text{g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), de los dos cuadrantes: a y b corresponden a SST; c y d corresponden a Chl_{sat} ; e y f corresponden a PP, para los cuadrantes frente a La Jolla y frente a Bahía San Quintín, respectivamente en cada caso. Nótese que las escalas de densidad espectral de Chl_{sat} y PP son diferentes para cada cuadrante.....	32
13	Imágenes bidimensionales de Chl_{sat} del área de estudio para diciembre de 2010 (arriba) y enero de 2011 (abajo). El Pin 1 muestra la ubicación de La Jolla y el pin 2 la de Bahía de San Quintín.....	36
14	Índice Multivariado de El Niño, MEI (http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/table.html).....	37

Lista de tablas

Tabla		Página
1	Mínimos y máximos de SST (°C), de ambos transectos, para valores obtenidos cerca de la costa (Cos, de 0 a 50 km) y valores en la zona oceánica (Oce, de 50 a 250 km).....	20
2	Mínimos y máximos de Chl _{Sat} (mg m ⁻³) y PP (g C m ⁻² d ⁻¹) FLJ para valores obtenidos cerca de la costa (Cos, de 0 a 50 km) y valores en la zona oceánica (Oce, de 50 a 250 km).....	21
3	Mínimos y máximos de Chl _{Sat} (mg m ⁻³) y PP (g C m ⁻² d ⁻¹) FBSQ para valores obtenidos cerca de la costa (Cos, de 0 a 50 km) y valores en la zona oceánica (Oce, de 50 a 250 km).....	22
4	Resultados de las pruebas de Mann-Whitney comparando conjuntos de datos pareados de Chl _{Sat} , según se indica (FLJ = La Jolla; FBSQ = Bahía de San Quintín; C= costera; O= oceánica). Los valores significativos se marcaron en negritas....	29

Capítulo 1- Introducción

1.1 Introducción

En los sistemas acuáticos la biomasa y producción fitoplanctónicas se consideran clave, ya que son la base principal de las redes tróficas que se desarrollan en el ecosistema pelágico. En el océano, el fitoplancton es el encargado principal de realizar el proceso de transformación de carbono inorgánico en materia orgánica mediante la asimilación fotosintética del CO₂, introduciendo carbono orgánico en la cadena trófica. Mediante este proceso el fitoplancton mismo es sostenido, además de hacerlo para otros organismos presentes en el ecosistema (Gaxiola-Castro *et al.*, 2010).

Por otro lado la productividad primaria (PP) en los océanos depende de las condiciones ambientales a las cuales están sujetas las poblaciones fitoplanctónicas (Reyes-Salinas *et al.*, 2003). Debido a esto resulta esencial conocer su variabilidad espacial y temporal a nivel global, lo cual ayuda a comprender los procesos que controlan el flujo de carbono en los océanos, así como los cambios en las poblaciones de recursos pesqueros y el acoplamiento del forzamiento físico-biogeoquímico de los ecosistemas pelágicos (Gaxiola-Castro *et al.*, 2010; Sosa-Avalos *et al.*, 2010; Barocio-León *et al.*, 2007).

Existen distintas formas de estimar la PP, mediante la aplicación de una gran variedad de métodos, entre los que destacan comúnmente: la producción de oxígeno disuelto (Gaardner y Gran, 1927); incorporación de carbono 14 (¹⁴C) (Steemann-Nielsen, 1952); mediciones de fluorescencia de la clorofila (Kiefer *et al.*, 1989); y la utilización de sensores remotos en conjunto con modelos (Platt *et al.*, 1991).

Los sistemas satelitales de observación son de gran importancia en los estudios del medio ambiente marino (Cerdeira-Estrada y López-Saldaña, 2011). Esto se debe a que las imágenes satelitales proporcionan datos de la concentración de clorofila *a* (Chl_{Sat}) en la superficie del océano (Barocio-León *et al.*, 2007). Esta capa superficial corresponde a la primera profundidad óptica, la cual puede variar desde algunos centímetros hasta varios metros, dependiendo de la concentración de los constituyentes que se encuentran

en el agua (Kirk, 1994). Debido a esto es que pueden llevarse a cabo determinaciones de la variabilidad de diferentes procesos físicos y biológicos a escala global, e inclusive estudiar sus cambios temporales (Espinoza-Carreón *et al.*, 2007).

Por otro lado, mediante imágenes satelitales es posible observar el efecto de procesos físicos diferentes, esto es importante debido a que ayuda a la identificación de mayores concentraciones de clorofila cerca de la costa que en mar adentro (Barocio-León *et al.*, 2007).

Uno de los ecosistemas más importantes y estudiados es el Sistema de la Corriente de California (SCC), ya que es altamente reconocido porque presenta alta productividad oceánica (Espinoza-Carreón *et al.*, 2007; Hernández-De la Torre *et al.*, 2004). El lado norte de este sistema se encuentra delimitado por el giro subártico y el sur por la Corriente Norecuatorial (Lynn y Simpson, 1987; Hernández-De-la-Torre *et al.*, 2004). Debe su nombre principalmente al hecho de que se encuentra ubicado entre 850 y 900 km de la costa de California hacia mar adentro. Entre sus principales características se destacan su baja temperatura y salinidad, una alta concentración de oxígeno disuelto, así como su velocidad media frente a California, alrededor de 25 cm s^{-1} ; el flujo medio de esta corriente es hacia el ecuador (Lynn y Simpson, 1987).

En el SCC ocurren una gran variedad de procesos físicos tales como las surgencias costeras, advección, mezcla turbulenta, ondas internas y remolinos, los cuales contribuyen a la variabilidad de la biomasa y productividad del fitoplancton, porque abastecen de nutrientes inorgánicos a la zona eufótica (Reyes-Salinas *et al.*, 2003). Otro punto a destacar sobre el SCC es el hecho de que el esfuerzo del viento forma una franja de agua de surgencias costeras que presentan bajas temperaturas además de ser ricas en nutrientes. Estas surgencias costeras son producidas por el transporte de Ekman hacia fuera de la costa y con el consecuente transporte vertical de agua subsuperficial (Ekman, 1903).

Las surgencias son procesos oceanográficos caracterizados por el ascenso de aguas subsuperficiales con alto contenido de nutrientes (Arévalo-Martínez y Franco-Herrera, 2008), las cuales estimulan el crecimiento del fitoplancton. El SCC transporta

aguas de baja temperatura ricas en nutrientes (transporte geostrófico) y junto con la surgencia costera, soporta un ecosistema altamente productivo (Schneider *et al.*, 2005). Estas condiciones generan impactos notables en áreas donde su intensidad es mayor, incrementando la PP (Arévalo-Martínez y Franco-Herrera, 2008).

La costa de la península de Baja California desde la frontera entre México y Estados Unidos hasta Punta Eugenia está más influenciada por el SCC que al frente de la parte sur de California, frente a la zona de San Diego. Las condiciones eutróficas generalmente se limitan a una franja costera asociada con los eventos de surgencia, especialmente durante los primeros meses del año (invierno y primavera) en la parte sur, y durante fines de primavera y verano en la parte norte (Fargion *et al.*, 1993). Lynn y Simpson (1987) definieron tres dominios: el oceánico, el costero y una zona de transición intermedia centrada de 200 a 300 km mar adentro, paralela a la costa y coincidiendo con el núcleo del SCC.

La región oceánica frente a la costa occidental de la península de Baja California presenta surgencias costeras en respuesta a vientos a lo largo de la costa, con un flujo superficial predominante hacia el ecuador como respuesta al mecanismo forzante y una contracorriente subsuperficial dirigida hacia el polo que fluye a lo largo del talud continental (Durazo *et al.*, 2010). Cerca de la costa noroccidental hay un cambio estacional en la dirección de este flujo superficial (Lynn & Simpson, 1987), debido al Frente Ensenada, perpendicular a la costa y de alrededor de 160 a 500 km de longitud (Peláez y McGowan, 1986; Gaxiola-Castro y Álvarez-Borrego, 1991; Haury *et al.*, 1993). En la zona oceánica, esta región frontal separa las aguas eutróficas y más frías (al norte) y oligotróficas (al sur) y es una estructura que persiste a lo largo del año (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 2002). Puede ser considerada el límite sur del Southern California Bight. Este frente es detectable durante la mayor parte del año, pero es fuerte desde finales de marzo hasta principios de junio y muestra un desplazamiento latitudinal de alrededor de 150 km a lo largo de todo el año (Santamaría-del-Ángel *et al.* 2002).

El Frente Ensenada coincide claramente con un flujo geostrófico del SCC intenso hacia la costa. Al toparse con la línea de costa, este flujo se divide en dos: uno dirigido al norte, que forma la intrusión oligotrófica de la Southern California Bight y otro dirigido al

sur (Peláez y McGowan, 1986). Este último hace un cambio de dirección hacia mar abierto frente a la Bahía de San Quintín, de una manera similar a como lo hace el flujo que se aleja de la costa frente a Point Conception, en California. Estos flujos hacia mar abierto intensifican las surgencias (Álvarez-Borrego, 2004).

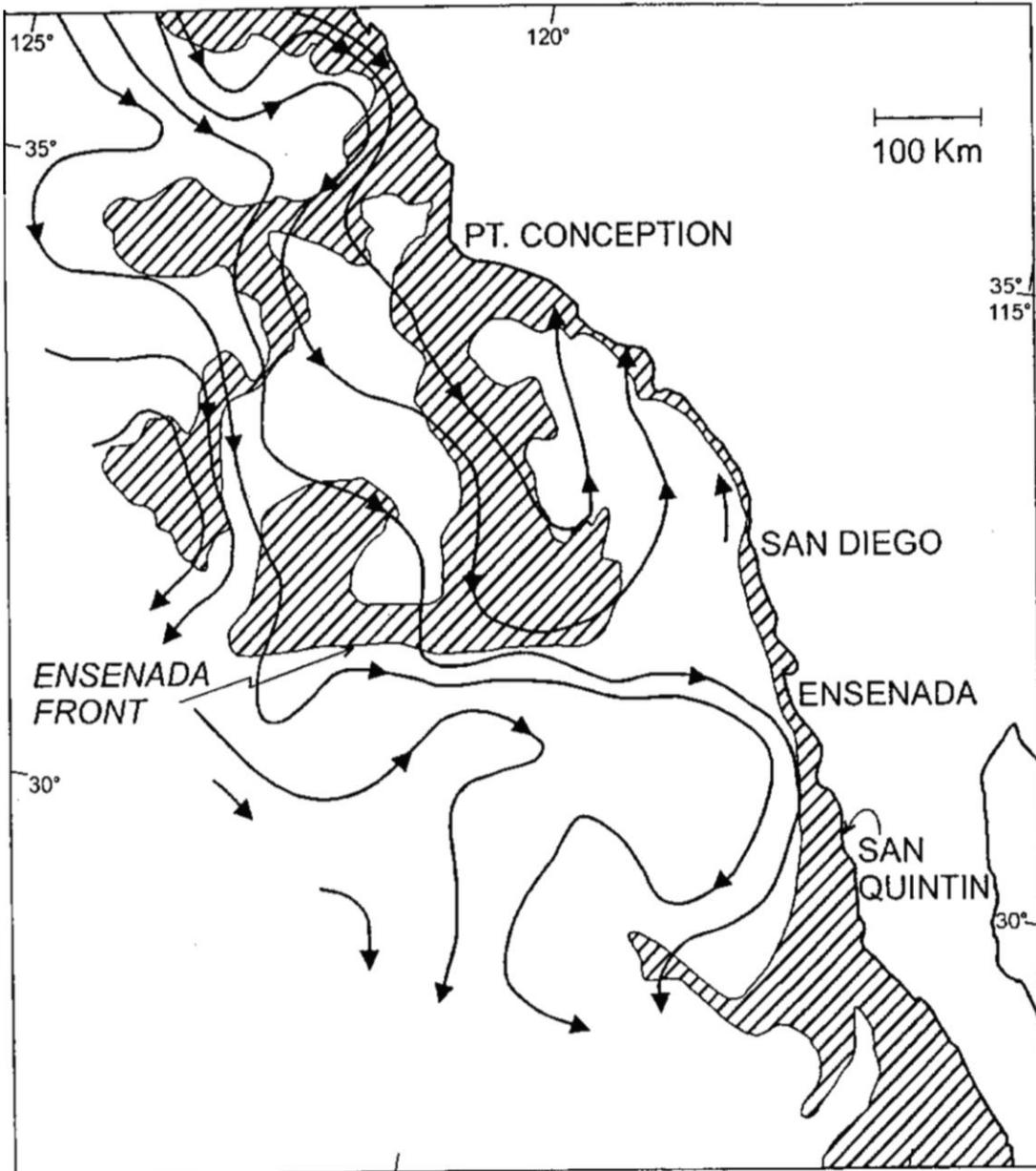


Figura 1. Esquema simplificado del Frente Ensenada. Las áreas sombreadas presentan concentraciones altas de clorofila y las áreas claras tienen concentraciones bajas (tomada de una imagen del sensor Coastal Zone Color Scanner (CZCS)). La topografía dinámica aparece sobredibujada con líneas continuas; las flechas indican la dirección de las corrientes geostroficas. Se aprecia el Frente Ensenada con un flujo geostrofico hacia la costa, así como un flujo geostrofico compensatorio hacia mar adentro inmediatamente al sur de Bahía de San Quintín. Hay una lengüeta de clorofila alta al sur y oeste de Bahía de San Quintín (tomado de Álvarez-Borrego, 2004, quien lo adaptó de Peláez y McGowan, 1986).

Al final de otoño y principios de invierno, en la zona estrecha costera se da un flujo superficial hacia el polo, frente la península y el sur de California. Este es el flujo conocido como contracorriente superficial costera (IC por sus siglas en inglés “Inshore Countercurrent”), comúnmente conocido como corriente de Davidson (Reid, 1988; Lynn y Simpson, 1987).

El SCC también se ve afectado por perturbaciones de gran escala espacial y temporal, como lo es El Niño (ENSO por sus siglas en inglés “El Niño Southern Oscillation”) (Quinn *et al.*, 1978). El Niño es un fenómeno que se presenta cada año y se intensifica cada tres a ocho años. Inicia por anomalías en el campo de vientos del Océano Pacífico Ecuatorial. Su efecto en el SCC es que la temperatura aumenta en la capa superficial, se eleva el nivel del mar en la zona costera y la termoclina se hunde, por lo que las surgencias transportan aguas relativamente cálidas hacia la superficie con bajas concentraciones de nutrientes. Por otro lado, La Niña es la fase del ENSO con aguas de baja temperatura y con un incremento en la productividad primaria (Espinoza-Carreón *et al.*, 2007). En la región sur del SCC ocurre una variabilidad estacional e interanual en la biomasa del fitoplancton forzada además por los ciclos de El Niño-La Niña así como por diversos procesos locales como surgencias costeras, remolinos, frentes y meandros (Gaxiola-Castro *et al.*, 2010).

Los promedios estacionales de la temperatura superficial del mar (SST, por sus siglas en inglés) y nutrientes muestran que en la región del SCC se presentan surgencias costeras a lo largo del año. Durante la primavera existe una actividad reducida de remolinos en el SCC. Durante el resto del año se observan giros y meandros, aunque con un flujo predominante hacia el sur (Durazo *et al.*, 2010).

El objetivo principal de esta investigación fue caracterizar la variabilidad espacial y temporal de la biomasa y producción del fitoplancton frente a La Jolla, California, y frente a la Bahía de San Quintín, Baja California, para comparar dos condiciones oceanográficas diferentes por su posición con respecto al Frente Ensenada. El análisis se llevó a cabo mediante información generada por sensores remotos en las escalas estacional e interanual, con énfasis en procesos físicos como surgencias, además del fenómeno de El Niño.

1.2 Antecedentes

Se han realizado esfuerzos para estimar la PP en el SCC a partir de experimentos con muestras de agua e incubaciones con ^{14}C y mediante el uso de modelos que utilizan la Chl, la radiación fotosintéticamente activa (PAR, por sus siglas en inglés) y los parámetros de la relación fotosíntesis-irradiancia (curvas P-E). En algunos casos la Chl fue la derivada de datos de satélite (Chl_{sat}). Como ejemplos, ha habido esfuerzos de investigadores integrados en programas, tales como el programa CalCOFI y el Programa IMECOCAL (Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California; <http://imecocal.cicese.mx>) frente a Baja California (Gaxiola-Castro y Álvarez-Borrego, 1986; Kahru y Mitchell, 2002; Hernández-de-la-Torre *et al.* 2003; Aguirre-Hernández *et al.* 2004).

En el SCC se han realizado muestreos oceanográficos desde que inició el programa CalCOFI (California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations) en 1949, los cuales han generado las series de tiempo oceanográficas más completas y extensas del mundo (Lynn y Simpson, 1987). El programa IMECOCAL ha estudiado la región frente a Baja California desde 1997, con una cobertura trimestral. En este marco se han descrito las variables relacionadas con PP y con los procesos físicos asociados, con el propósito de entender cómo es la influencia que ejercen en el aporte de nutrientes inorgánicos para la síntesis de carbono y en la red trófica de la región (Martínez-Gaxiola *et al.*, 2010).

Para estimar la tasa de asimilación de carbono en la zona eufótica (PP $\text{mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$) se ha utilizado el modelo propuesto por Behrenfeld y Falkowski (1997) (VGPM, por sus siglas en inglés). Las variables de entrada del modelo son: Chl_{sat} ; PAR; el coeficiente de atenuación vertical de la luz difusa a 490 nm (K_{490}) a partir del cual se calcula la profundidad de la zona eufótica (Z_{eu}); temperatura superficial del mar; horas luz del día solar (DL); y el parámetro fotosintético P_{opt}^B . Este último es la razón fotosintética en el óptimo de luz en la columna de agua, normalizada por unidad de Chl, y que se estima a partir de un polinomio de séptimo orden utilizando SST, suponiendo que ésta y Chl son constantes con la profundidad. El Modelo de Producción Verticalmente Generalizado (VGPM) se describe mediante la siguiente ecuación:

$$PP_{\text{eu}} = 0.66125 P_{\text{opt}}^B \left[\frac{E_0(\text{PAR})_{\text{sat}}}{E_0(\text{PAR}) + 4.1} \right] Z_{\text{eu}} \text{chl} \alpha D_i .$$

1.3 Justificación

El Frente Ensenada es persistente durante todo el año y altera la dinámica costera, esta inhibe las surgencias costeras al norte, mientras que las intensifica al sur. Además el frente presenta un movimiento latitudinal estacional el cual es afectado por eventos El Niño o La Niña (Lara-Lara *et al.*, 1980; Álvarez-Borrego y Álvarez-Borrego, 1982; Álvarez Borrego, 2004).

Se monitorearon las zonas frente a La Jolla y Bahía de San Quintín porque permiten observar un contraste del efecto del frente en la dinámica física costera y su impacto en la biología.

1.4 Hipótesis

1. Los valores de Chl_{sat} y PP son significativamente mayores frente a San Quintín que frente a La Jolla, en la zona costera (primeros 50 km).
2. En la zona oceánica, a ≥ 200 km de la costa, Chl_{sat} y PP no son significativamente diferentes frente a La Jolla y frente a Bahía de San Quintín.
3. Chl_{sat} y PP disminuyen significativamente frente a La Jolla y Bahía de San Quintín durante un evento El Niño.
4. La variación estacional de Chl_{sat} y PP en la zona costera es significativa en ambas zonas.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

El objetivo principal de esta investigación fue caracterizar la variabilidad espacial y temporal de la biomasa y producción del fitoplancton en el SCC en dos localidades particulares: frente a La Jolla, sur de California; y frente a Bahía de San Quintín, norte de Baja California. Esto fue con el fin de caracterizar el impacto de fenómenos físicos

diversos, con especial atención al impacto de las surgencias costeras al norte y al sur del Frente Ensenada. La caracterización se llevó a cabo en escalas estacional e interanual.

1.5.2 Objetivos particulares

- Generar series de tiempo de julio de 2002 a diciembre de 2014 de SST, Chl_{sat} y PP para dos transectos perpendiculares a la costa y para dos localidades costeras.
- Determinar las diferencias de SST, Chl_{sat} y PP entre los dos lugares.
- Evaluar el efecto diferencial de las surgencias costeras en SST, Chl_{sat} y PP frente a La Jolla y frente a Bahía de San Quintín.
- Determinar el efecto de la secuencia de los eventos ENSO en la SST, Chl_{sat} y PP frente a las dos localidades.

Capítulo 2- Materiales y métodos

2.1 Área de estudio

El área de estudio incluye el SCC frente al sur de California y norte de Baja California, desde la costa hasta 250 km mar adentro. Se trazaron dos transectos perpendiculares a la costa: uno frente a La Jolla, California; y otro frente a Bahía de San Quintín, Baja California.

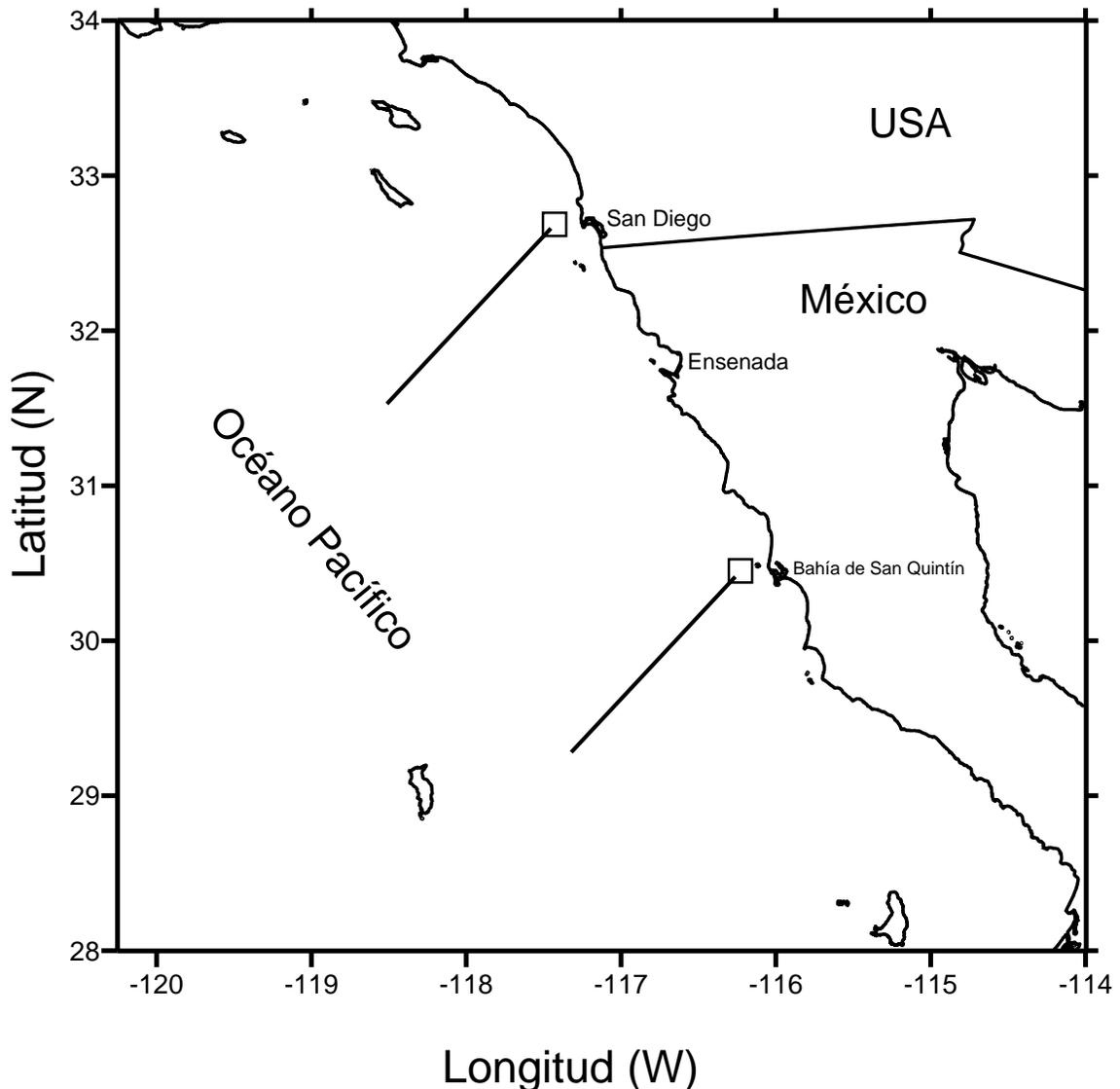


Figura 2.- Transectos y cuadrantes muestreados para las dos zonas: frente al sur de California; y frente al norte de Baja California.

La Jolla, en San Diego California, se localiza, a los $32^{\circ} 50' 15''$ N, $117^{\circ} 10' 5''$ W, y forma parte del Southern California Bight, en el cual ocurren cambios de corriente

superficial costera hacia el polo y presenta variación estacional. Mientras que Bahía de San Quintín (BSQ) se encuentra localizada en la costa noroccidental de Baja California entre 30° 24' N y 30° 30' N; y 115° 57' W y 116° 01' W. La zona frente a La Jolla está inmersa en el remolino ciclónico del Southern California Bight y tiene además la influencia de las surgencias frente a Point Conception. La zona frente a BSQ se caracteriza por ser de alta productividad y presentar surgencias particularmente intensas en primavera y verano en la cercanía de su boca (Lara-Lara *et al.*, 1980; Millán-Núñez *et al.*, 1982; Álvarez-Borrego y Álvarez-Borrego, 1982).

En la región cercana a la boca de BSQ, en mar abierto, los eventos de surgencia ocurren de abril a octubre, con los más intensos en primavera y verano como resultado del dominio de los vientos del noroeste (Álvarez-Borrego y Álvarez-Borrego, 1982) y la circulación costera inducida por el Frente Ensenada (Álvarez-Borrego, 2004). Frente a BSQ la circulación oceánica presenta dos componentes, uno paralelo a la costa y hacia el ecuador y otro hacia mar adentro, a manera de compensar parcialmente el flujo del océano hacia la costa que se da en el Frente Ensenada (Álvarez-Borrego, 2004).

2.2 Métodos

Las series de tiempo se generaron a partir de composiciones mensuales de SST y Chl_{sat} del sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer que navega a bordo del satélite Aqua (Earth Observing System PM) (Aqua-MODIS). Los datos de SST y Chl_{sat} se obtuvieron de julio de 2002 a diciembre de 2014. Estas composiciones mensuales se descargaron de la página de la NASA (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>), con una resolución de 9x9 km², nivel 3 de procesamiento (L3), el cual tiene información en bytes-formato valor, posición geográfica y filtros para remover la información no útil. Los datos de PP se descargaron para las mismas fechas de la página de la Universidad Estatal de Oregón (<http://www.science.oregonstate.edu/ocean.productivity>). Las imágenes se descargaron en formato .hdr (Hierarchical Data Format). Los datos de las imágenes de TSM corresponden a la radiación de 11 μm (infrarrojo) en periodo diurno y se expresan en °C. Los sensores de color del océano miden la radiancia visible ascendente promedio de la primera profundidad óptica del océano. Si se considera que el límite inferior de la zona eufótica está justo donde llega el 1% de la irradiancia superficial, de acuerdo a la

Ley de Lambert-Beer la zona eufótica tiene 4.6 profundidades ópticas, por lo tanto los satélites miden la radiancia que asciende de aproximadamente un 22% de la zona eufótica (cerca de la quinta parte superficial de la columna eufótica). Las radiancias ascendentes de longitudes de onda dentro del visible se convierten a Chl_{sat} mediante algoritmos empíricos (Kirk 1994).

El índice multivariado de los eventos ENSO (MEI por sus siglas en inglés) se utilizó para distinguir entre eventos El Niño, La Niña y “condiciones normales” y se obtuvo de la página de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/table.html>).

Las imágenes de satélite se procesaron con el software de la NASA “SeaWiFS Data Analysis System” (SeaDAS) (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/seadas/>). Se extrajo un perfil para cada variable y para cada uno de los dos transectos: uno frente a La Jolla (FLJ) y otro frente a BSQ (FBSQ), con el fin de describir su variación espacial y temporal. Estos transectos tuvieron una longitud de 250 km y fueron perpendiculares a la costa (Fig. 2). Para describir la variación temporal más en detalle se generaron series de tiempo de los promedios mensuales de las variables en un cuadro de 18×18 km² frente a La Jolla (centrado en 31.66° N, 116.99° W) y frente a BSQ (centrado en 30.66° N, 116.33° W) (Fig. 2), de julio de 2002 a diciembre de 2014. A estas series de tiempo se les aplicó un análisis para caracterizar la magnitud relativa de las diferentes escalas de variabilidad.

Se describió una primera aproximación a la climatología de la región mediante la generación de un año promedio para las tres variables. Lo cual consiste en promediar todos los datos de cada enero de todos los años de las series de tiempo, después el de todos los febreros y así sucesivamente para los demás meses (Arroyo-Loranca *et al.*, 2015).

2.3 Análisis estadístico

Los histogramas de Chl_{sat} muestran un sesgo muy fuerte hacia los valores bajos, por lo que sus distribuciones no fueron normales. Por lo tanto, se decidió hacer pruebas no paramétricas Mann-Whitney para probar diferencias de Chl_{sat} entre las dos “épocas” de cada zona en cada transecto, entre las dos zonas de cada transecto, y entre

transectos. Además se hicieron pruebas Kruskal-Wallis para probar si hubo diferencias significativas entre años, en cada transecto. Al encontrar diferencias significativas se realizaron pruebas post hoc para encontrar cuales años tenían diferencias con otros.

Se aplicó análisis de series de tiempo para las tres variables, de cada cuadrante costero, con el fin de caracterizar en qué frecuencias se dieron los componentes de varianza.

Capítulo 3- Resultados

3.1 Aproximación a la climatología

En general, el “año promedio” presentó una variación espacial muy clara de Chl_{sat} y PP de la costa hacia mar adentro, con valores más altos en la zona cercana a la costa. En cambio, en general SST mostró una variación espacial diferente con valores menores en la costa que en mar adentro frente a las dos zonas, sobre todo en FBSQ. En FLJ se presentaron períodos con otro comportamiento de la variación de SST, con inversión del gradiente con valores mayores cerca de la costa que en mar adentro. En junio se presentaron variaciones irregulares de SST en ambos transectos (Fig. 3)

En el “año promedio”, en FLJ la diferencia de SST de la costa hacia mar adentro fue desde unas pocas décimas hasta ~ 5.7 °C. El valor máximo se presentó en septiembre para FLJ, llegando a una temperatura de 20.8 °C a ~ 50 km de la costa, mientras que los mínimos ocurrieron en enero, febrero y marzo, con valores de ~ 15.2 °C, cerca de la costa. En este transecto, SST prácticamente no varió espacialmente en mayo, fluctuando pocas décimas de grado alrededor de 17 °C; en junio, julio y agosto el gradiente espacial se revertió con los valores mayores en la costa y menores en la zona oceánica. Para FBSQ, las diferencias espaciales de SST fueron desde unas pocas décimas hasta ~ 6.7 °C. En este transecto el valor máximo se presentó también en septiembre, con ~ 21.2 °C, mientras que los mínimos ocurrieron en febrero, marzo y abril, con valores ~ 14.7 °C.

En función de la distribución espacial de Chl_{sat} , la zona costera se puede considerar desde la costa hasta ~ 50 km en ambos transectos (Fig. 3; ver también los diagramas Hovmöller en las figuras 7 y 8), por lo que la zona oceánica es de esta distancia hacia mar adentro. En general, si se toma el valor de 2 mg m^{-3} como criterio de separación de aguas eutróficas y mesotróficas en la zona costera, la climatología de Chl_{sat} en ambos transectos mostró condiciones biológicas separadas en dos épocas: la primera época para FLJ fue de marzo a junio, siendo abril el mes cuando se presentó el valor más alto en este transecto (3.2 mg m^{-3}); y la primera época para FBSQ fue de febrero a junio, siendo marzo el mes con el valor máximo en este transecto (11.9 mg m^{-3}); la segunda época fue de julio a febrero para FLJ y de julio a enero para FBSQ, en la cual se observaron valores bajos comparados con los de la época descrita anteriormente. En

esta segunda época el valor más alto de Chl_{sat} fue 1.3 mg m^{-3} para FLJ en agosto y 1.5 mg m^{-3} para FBSQ en enero, en la zona costera. En todo el “año promedio” el valor más bajo de ambos transectos fue $\sim 0.1 \text{ mg m}^{-3}$ y se presentó en la zona más oceánica (200 a 250 km).

Las curvas de PP fueron muy similares a las de Chl_{sat} , con valores altos en las zonas cercanas a la costa y disminuyendo considerablemente conforme aumenta la distancia a ésta. En ambos transectos, al igual que en el caso de Chl_{sat} se observaron las mismas dos épocas bien marcadas. En FLJ, el valor máximo de la primera época se presentó en abril ($4.9 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) y el de la segunda en julio ($3.0 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), en la zona costera. Los mínimos fueron $\sim 0.5 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ para toda la primera época y $\sim 0.4 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ para toda la segunda época (con excepción de enero y julio que tuvieron mínimos de 0.5 y 0.6 $\text{g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, respectivamente), y se presentaron en la zona más alejada de la costa. En FBSQ, en la primera época se observó un máximo de PP también en abril de $4.3 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, y en la segunda época también fue en julio con $1.6 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, ambos en la zona costera. El valor mínimo de PP para FBSQ, en ambas épocas fue $0.4 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, y se presentó en la zona más alejada de la costa.

3.2 Variación de año a año

La variación de SST de año a año de ambos transectos tuvo componentes claros estacionales e interanuales. La distribución espacial de SST en FLJ fue en general muy irregular, con varios mínimos y máximos ocurriendo en la mayoría de los meses, aunque con cierta tendencia a tener los valores más bajos cerca de la costa (sólo se ilustran algunos transectos particulares como ejemplos en la figura 4). Las diferencias entre los máximos y mínimos fueron a menudo de pocas décimas de grado, pero excepcionalmente hasta de $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Fig. 4). En FBSQ la distribución espacial de SST fue más regular y monótonica, con valores en general menores cerca de la costa que en la zona oceánica. En la zona costera, para el período de estudio el rango de SST de FLJ fue de $13.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $22.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$, y en la zona oceánica fue de $11.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $22.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$; el de la zona costera de FBSQ fue de $13.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $22.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y el de la oceánica fue de $12.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $22.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Las diferencias de SST entre ambos transectos, para el mismo año, fueron similares en las dos zonas, costera y oceánica, excepcionalmente de hasta $1.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ en la costera y

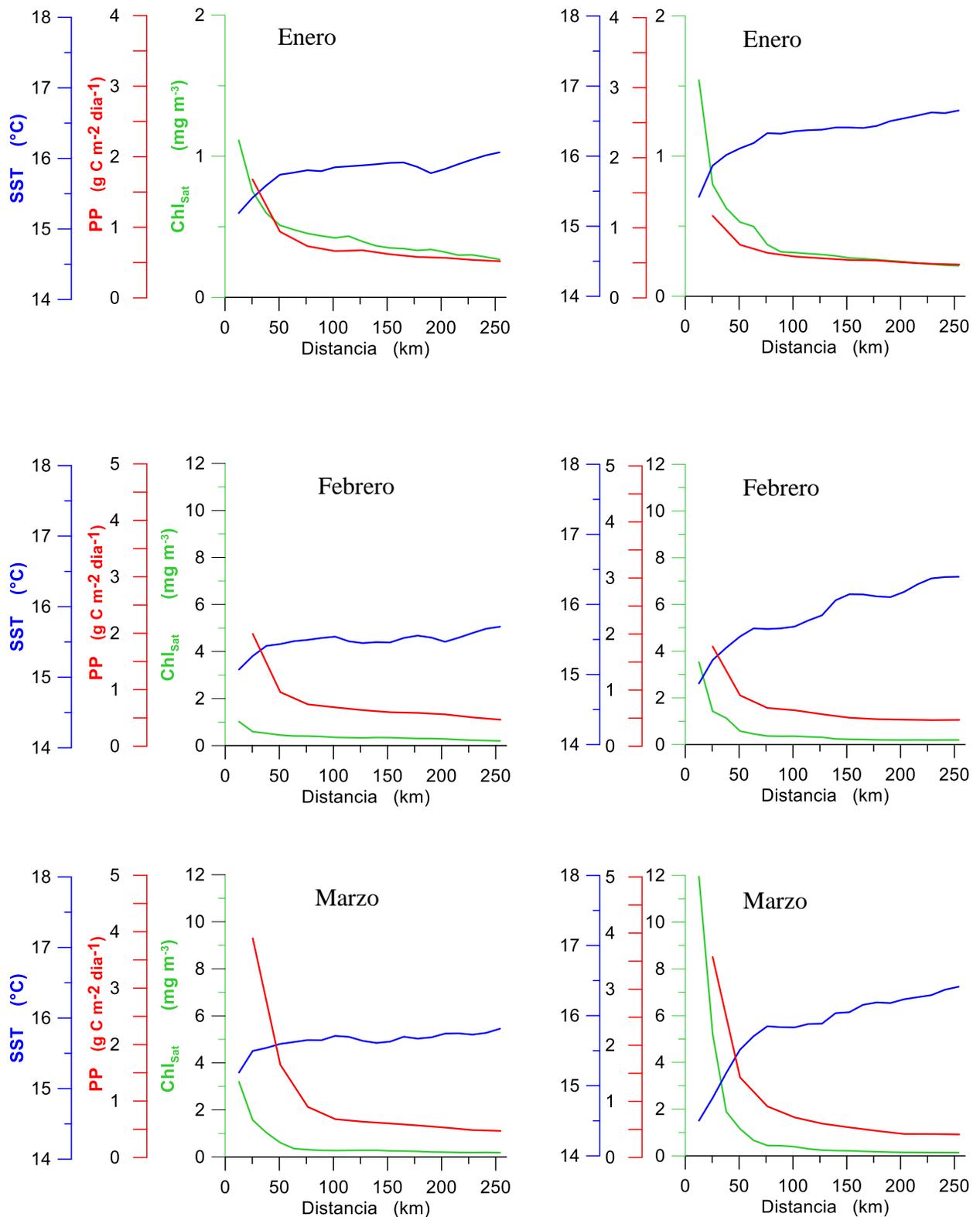


Figura 3.- Variación espacial de SST, Chl_{sat} y PP para el “año promedio”, mes a mes (aproximación a la climatología), en los transectos de la figura 1. A la izquierda el transecto FLJ y a la derecha el FBSQ. El eje de las abscisas muestra la distancia en km de la costa hacia mar adentro. La línea azul representa SST, la línea verde representa Chl_{sat} y la línea roja PP. Nótese que las escalas cambian para ciertos períodos.

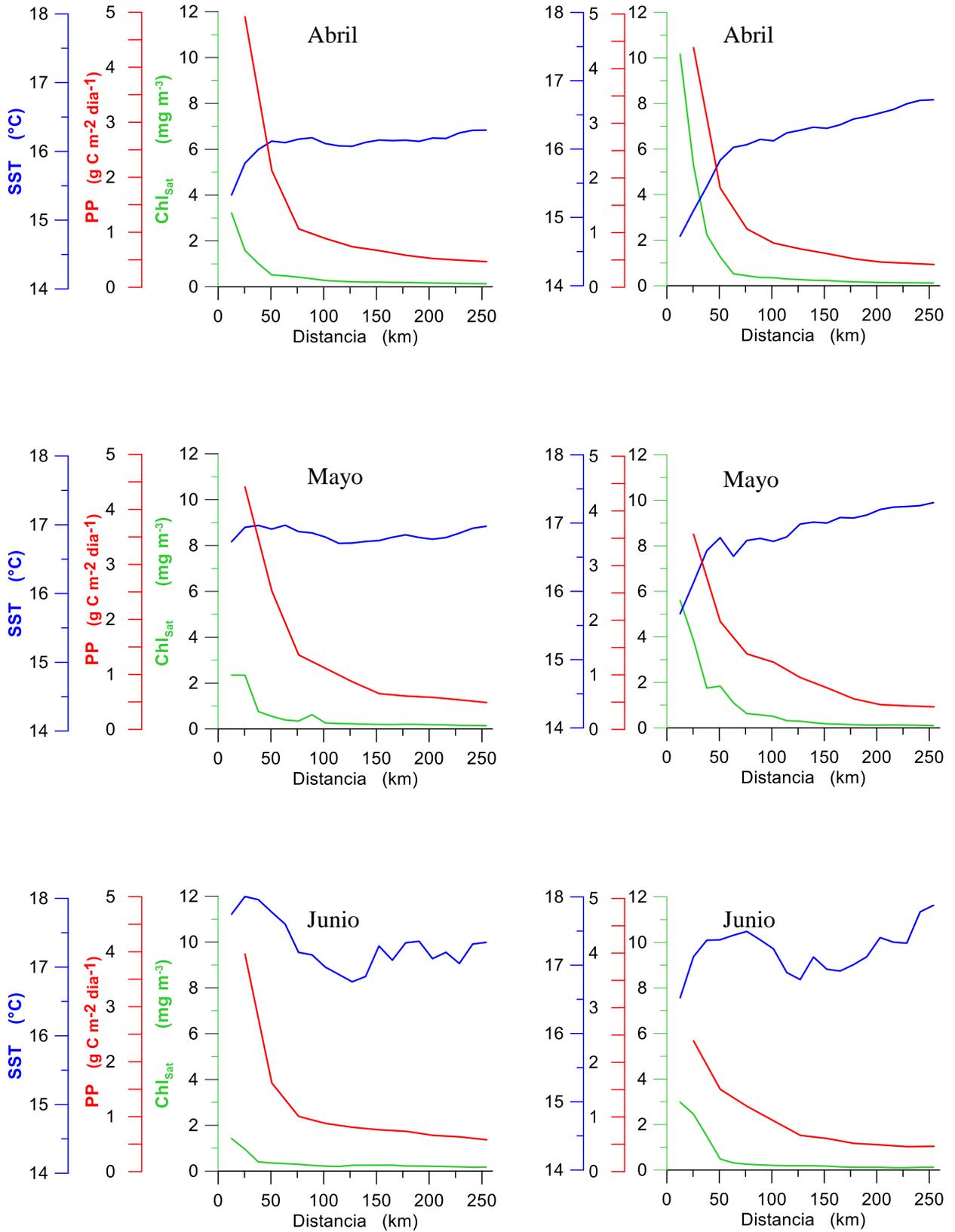


Figura 3. Continuación.

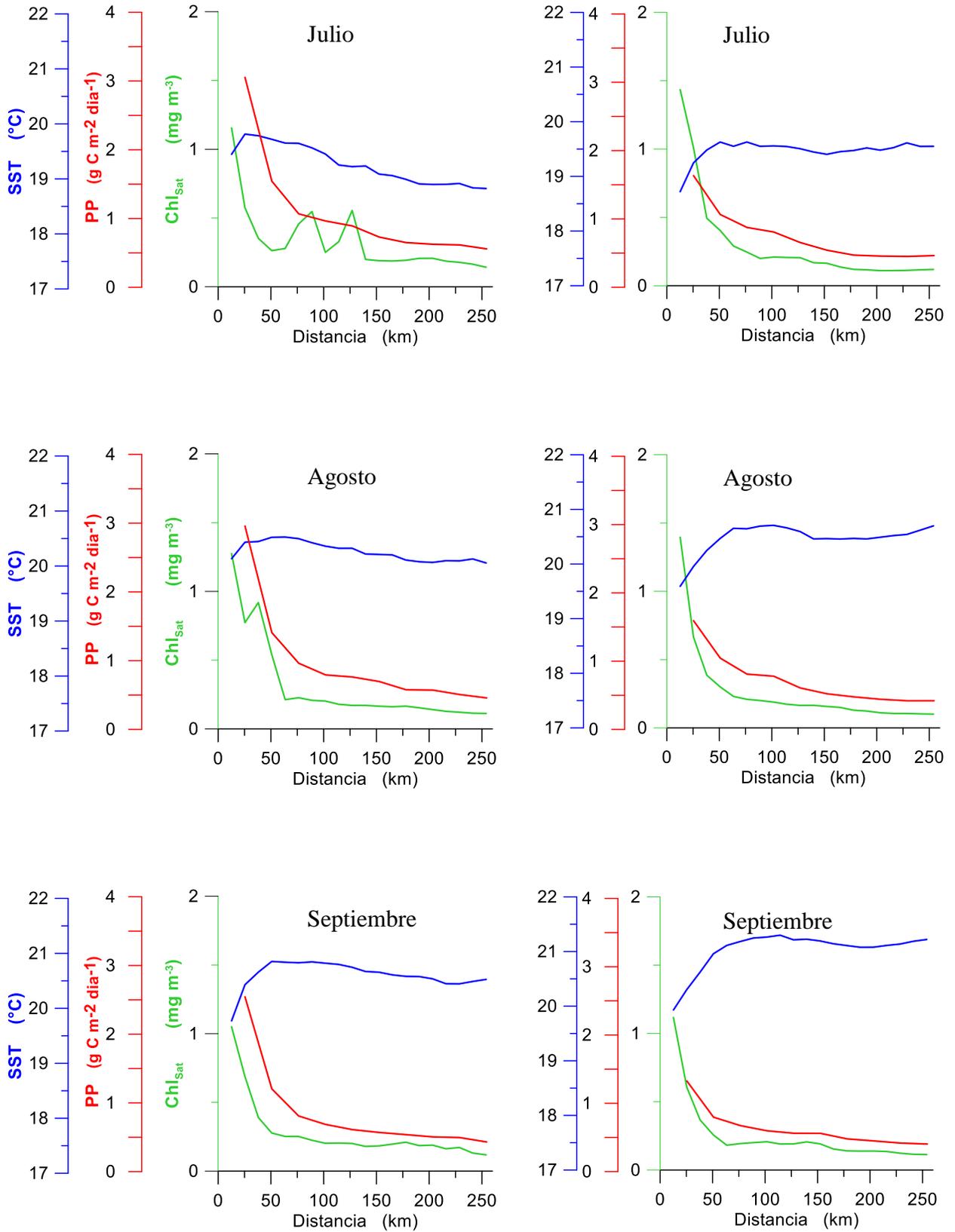


Figura 3. Continuación.

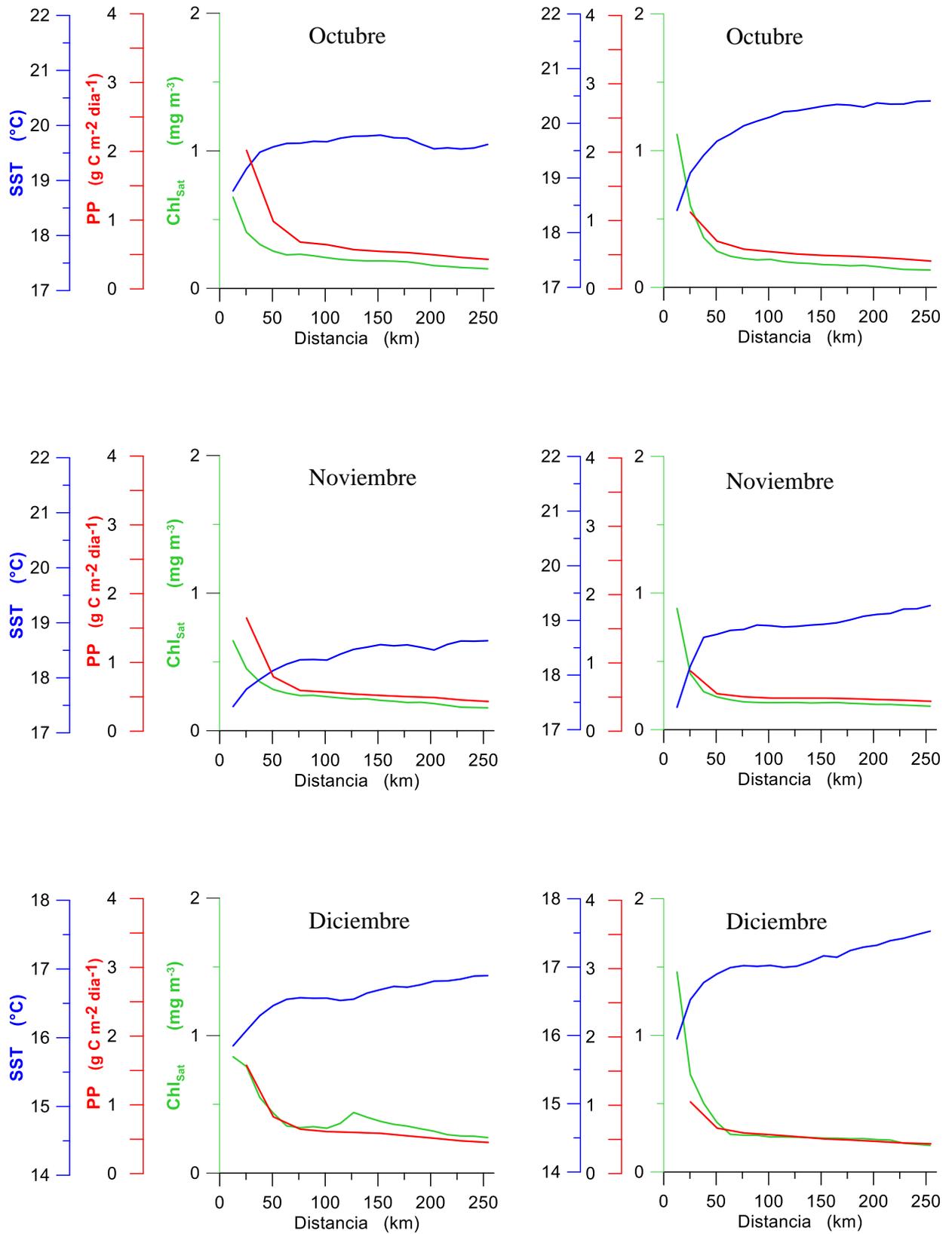


Figura 3. Continuación.

hasta 2.3 °C en la oceánica, con la zona costera de FLJ a menudo con valores mayores que los de FBSQ. Cerca de la costa la SST mínima ocurrió en invierno-primavera en ambos transectos; la SST máxima ocurrió en verano y principios de otoño, de nuevo en ambos transectos. Los valores mínimos de SST en las aguas oceánicas se registraron también en invierno y primavera; y los máximos se registraron en agosto y septiembre en FLJ y en agosto-octubre en FBSQ (Tabla I). Los diagramas Hovmöller (Figs. 5 y 6) pierden mucho detalle de la variación porque los colores no reflejan los cambios finos, sin embargo permiten visualizar los cambios estacionales e interanuales con facilidad. Por ejemplo, en 2014 se tuvieron SST más elevadas que en el resto de los años, en ambos transectos. También se aprecia que en la primera época hay un gradiente intenso de SST con aguas más frías en la zona costera que en la zona oceánica, mientras que en la segunda época las aguas son relativamente calientes en toda la extensión de los transectos.

La reversión del gradiente de SST en FLJ, para cambiar de aguas más frías a más calientes en la zona costera, con relación a las de la zona oceánica, varió de año a año pero se presentó más a menudo entre junio y agosto, aunque algunos años comenzó en mayo y terminó hasta septiembre. Cuando se presentó la reversión del gradiente, las diferencias de SST entre las aguas cálidas de la zona costera y las de menor SST de la zona oceánica fueron entre décimas de °C (la mayoría de los casos) y ~2.5 °C.

La zona costera de ambos transectos tuvo variaciones de Chl_{sat} y PP con componentes estacionales e interanuales claros (Tablas 2 y 3). La prueba de Kruskal-Wallis para los datos de Chl_{sat} de la zona costera y de la primera época, de ambos transectos, tuvo como resultado una variación interanual significativa (FLJ: $H = 89.0$, $n = 570$, $p < 0.001$; FBSQ: $H = 41.4$, $n = 574$, $p < 0.001$). La variación de año a año de Chl_{sat} y PP del transecto FLJ presentó una zona costera con valores en general relativamente altos ($\geq 1.0 \text{ mg m}^{-3}$ y $\geq 1.0 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) en primavera y verano extendiéndose desde la costa hasta ~50 km, aunque en ocasiones hubo valores máximos de estas propiedades en mar adentro (70-160 km). Frecuentemente también se presentaron valores $> 1.0 \text{ mg m}^{-3}$ y $> 1.0 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ en otoño e invierno. Mientras que la variación de año a año de Chl_{sat} y PP en el transecto FBSQ presentó una zona costera con valores a menudo relativamente altos ($\geq 1.0 \text{ mg m}^{-3}$ y $\geq 1.0 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) en invierno, primavera y verano.

Tabla 1. Mínimos (Min) y máximos (Max) de SST (°C) para cada año, de ambos transectos, para valores obtenidos cerca de la costa (Cos, de 0 a 50 km) y valores en la zona oceánica (Oce).

“Cos”													
FLJ	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
SST	16.2	14.8	14.8	15.0	13.9	14.3	13.5	14.9	15.2	14.2	14.2	14.1	15.8
Min	Dic	Abr	Feb	Dic	Mar	Dic	Abr	Feb	Dic	Mar	Mar	Feb	Abr
SST	19.6	21.7	21.8	21.2	21.7	21.8	21.3	21.6	19.1	19.6	21.8	21.2	22.7
Max	Jul	Sep	Sep	Ago	Jul	Ago	Ago	Sep	Oct	Sep	Sep	Sep	Sep
“Oce”													
FLJ	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
SST	16.3	15.7	15.2	15.7	15.0	14.9	13.0	15.2	11.9	14.4	14.8	14.7	15.8
Min	Dic	Jun	Feb	Feb	Mar	Ene	Jun	May	Jun	Feb	Mar	Feb	Feb
SST	19.8	21.6	21.8	21.1	21.8	21.1	20.9	21.6	19.2	20.3	22.0	21.2	22.9
Max	Sep	Sep	Sep	Ago	Ago	Ago	Ago	Sep	Ago	Sep	Sep	Sep	Sep
“Cos”													
FBSQ	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
SST	15.8	13.6	14.5	14.6	13.2	13.6	13.7	14.0	14.2	13.2	13.6	14.1	15.2
Min	Dic	May	Feb	Abr	Mar	Abr	Feb	Mar	Dic	Mar	Mar	Feb	Abr
SST	19.5	21.7	21.8	20.8	22.0	21.4	20.7	21.7	18.8	20.2	22.2	21.1	22.8
Max	Sep	Sep	Sep	Ago	Sep	Ago	Oct	Sep	Sep	Sep	Sep	Ago	Sep
“Oce”													
FBSQ	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
SST	16.8	13.4	15.2	16.0	14.4	15.2	14.6	14.7	12.0	15.9	15.1	14.8	16.3
Min	Dic	Jun	Feb	Feb	Mar	Abr	Feb	Mayo	Jun	Mar	Mar	Feb	Feb
SST	20.4	21.8	22.1	21.5	22.1	21.1	21.2	21.9	19.1	20.9	22.5	21.5	23.3
Max	Sep	Sep	Sep	Ago	Sep	Sep	Oct	Sep	Ago	Sep	Sep	Sep	Oct

Tabla 2. Mínimos y máximos de Chl_{sat} (mg m^{-3}) y PP ($\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$) para cada año, en FLJ, para valores obtenidos cerca de la costa (Cos, de 0 a 50 km) y valores de la zona oceánica (Oce, de 50 a 250 km).

“Cos”	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Chl_{sat}	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
Min	Jul	Feb	Ago	Mar	Jul	Ago	Ago	Ago	May	Ago	Ago	Ago	Oct
PP	0.6	0.5	0.5	0.5	0.7	0.8	0.7	0.6	0.8	0.8	0.6	0.5	0.4
Min	Dic	Ene	Feb	Feb	Feb	Ago	Nov	Oct	Dic	Dic	Ago	Dic	Dic
Chl_{sat}	1.3	11.9	2.9	7.5	5.0	4.3	9.6	3.6	3.1	6.4	9.6	3.0	2.5
Max	Ago	May	Jun	Ago	Mar	May	Abr	Jun	Ago	Mar	Mar	Abr	Abr
PP	3.5	5.5	5.4	8.6	6.3	5.9	7.5	7.5	4.7	4.4	5.3	4.0	3.1
Max	Jul	May	Abr	Jun	Abr	Abr	Abr	Jun	Mar	Jun	Mar	Abr	May
“Oce”	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Chl_{sat}	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	0.1	<0.1	<0.1
Min	Sep	Oct	Jul	Jul	Jul	Ago	Ago	Jul	Nov	May	Sep	Jun	Sep
PP	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2
Min	Sep	Feb	Nov	Mar	Feb	Sep	Ago	Jul	Nov	Sep	Sep	Jun	Dic
Chl_{sat}	0.6	0.5	0.4	4.2	4.6	0.7	1.9	0.7	1.7	1.1	0.8	0.5	0.2
Max	Ago	Sep	Feb	Jul	May	Feb	Abr	Feb	Dic	Ene	May	Feb	Feb
PP	1.2	2.8	0.8	2.9	2.1	1.4	1.6	1.3	1.4	1.6	1.5	1.4	0.9
Max	Ago	May	Jun	Jul	May	Abr	Abr	Jun	Jul	Abr	May	Jul	May

En la zona costera los rangos de Chl_{sat} y PP para el período de estudio fueron: 0.1 a 11.9 mg m^{-3} para FLJ y 0.1 a 38.6 mg m^{-3} para FBSQ; y 0.4 a 8.6 $\text{g C m}^{-2} \text{día}^{-1}$ para FLJ y 0.3 a 6.5 $\text{g C m}^{-2} \text{día}^{-1}$ para FBSQ, respectivamente. En FLJ, algunas veces el máximo de Chl_{sat} no estuvo adyacente a la costa sino entre 30 y 150 km (Fig. 5). En FBSQ, algunas pocas veces el máximo de Chl_{sat} estuvo en el segundo pixel adyacente a la costa. En FBSQ, en la zona costera, los años 2005, 2011 y 2012 tuvieron valores de Chl_{sat} excepcionalmente altos, hasta de 38.6 mg m^{-3} (Tabla 3).

Los valores mínimos de Chl_{sat} de cada año, de las aguas más alejadas de la costa de FLJ fluctuaron entre 0.1 y 0.2 mg m^{-3} , y para FBSQ fluctuaron alrededor de $\sim 0.1 \text{ mg m}^{-3}$; mientras que los mínimos de PP para FLJ fluctuaron entre 0.2 y 0.3 $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$, y

para FBSQ entre 0.2 y 0.4 g C m⁻² d⁻¹. En estas aguas oceánicas, los máximos de Chl_{sat} fluctuaron entre 0.2 y 4.6 mg m⁻³ en FLJ, y en general entre 0.2 y 0.7 mg m⁻³ en FBSQ, con algunos valores >1.0 mg m⁻³ y excepcionalmente hasta 6.1 mg m⁻³; mientras que el intervalo de los máximos oceánicos de PP fue de 0.8 a 2.9 g C m⁻² d⁻¹, en FLJ, y 0.6 a 3.1 g C m⁻² d⁻¹ en FBSQ. No hubo una tendencia para la ocurrencia de los valores mínimos en períodos particulares del año en la zona oceánica, pero los máximos generalmente ocurrieron en primavera y verano, en ambos transectos (Tablas 2 y 3).

Tabla 3. Mínimos y máximos de Chl_{sat} (mg m⁻³) y PP (g C m⁻² d⁻¹) para cada año, en FBSQ, para valores obtenidos cerca de la costa (Cos, de 0 a 50 km) y valores de la zona oceánica (Oce, de 50 a 250 km).

“Cos”	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Chl _{sat}	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
Min	Nov	Sep	Jul	Mar	Ago	Sep	Sep	Sep	Oct	Sep	Jul	Jul	Jun
PP	0.5	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.4	0.4	0.5	0.5	0.4	0.5	0.3
Min	Nov	Nov	Ene	Feb	Sep	Ene	Oct	Sep	Oct	Nov	Sep	Nov	Nov
Chl _{sat}	1.7	15.8	6.0	22.5	9.7	12.1	16.8	16.0	15.6	38.6	20.5	5.7	9.6
Max	Nov	May	Abr	Abr	Abr	Abr	Mar	Mar	Abr	Mar	Mar	Mar	Mar
PP	1.8	6.1	2.9	6.0	4.5	6.4	6.1	4.2	6.5	5.6	4.9	4.1	2.5
Max	Sep	May	Abr	Abr	Abr	Abr	Mar	Abr	May	Mar	Mar	Abr	Abr
“Oce”	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Chl _{sat}	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Min	Oct	Ago	Abr	Jul	Jun	Sep	Sep	Sep	Ago	May	May	May	Jun
PP	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2
Min	Oct	Oct	Feb	Mar	Abr	May	Mar	Sep	Oct	May	Ago	Dic	Dic
Chl _{sat}	0.5	6.1	0.7	0.6	2.4	0.6	1.8	1.8	2.5	0.5	0.7	1.2	0.2
Max	Oct	May	Sep	Jul	Mar	Jun	Mar	May	May	May	May	Mar	Abr
PP	1.0	3.1	1.4	2.2	2.0	1.7	1.6	2.2	2.2	1.8	1.5	1.2	0.6
Max	Sep	May	Abr	Jul	Mar	Jun	Abr	May	May	Jun	May	Abr	Abr

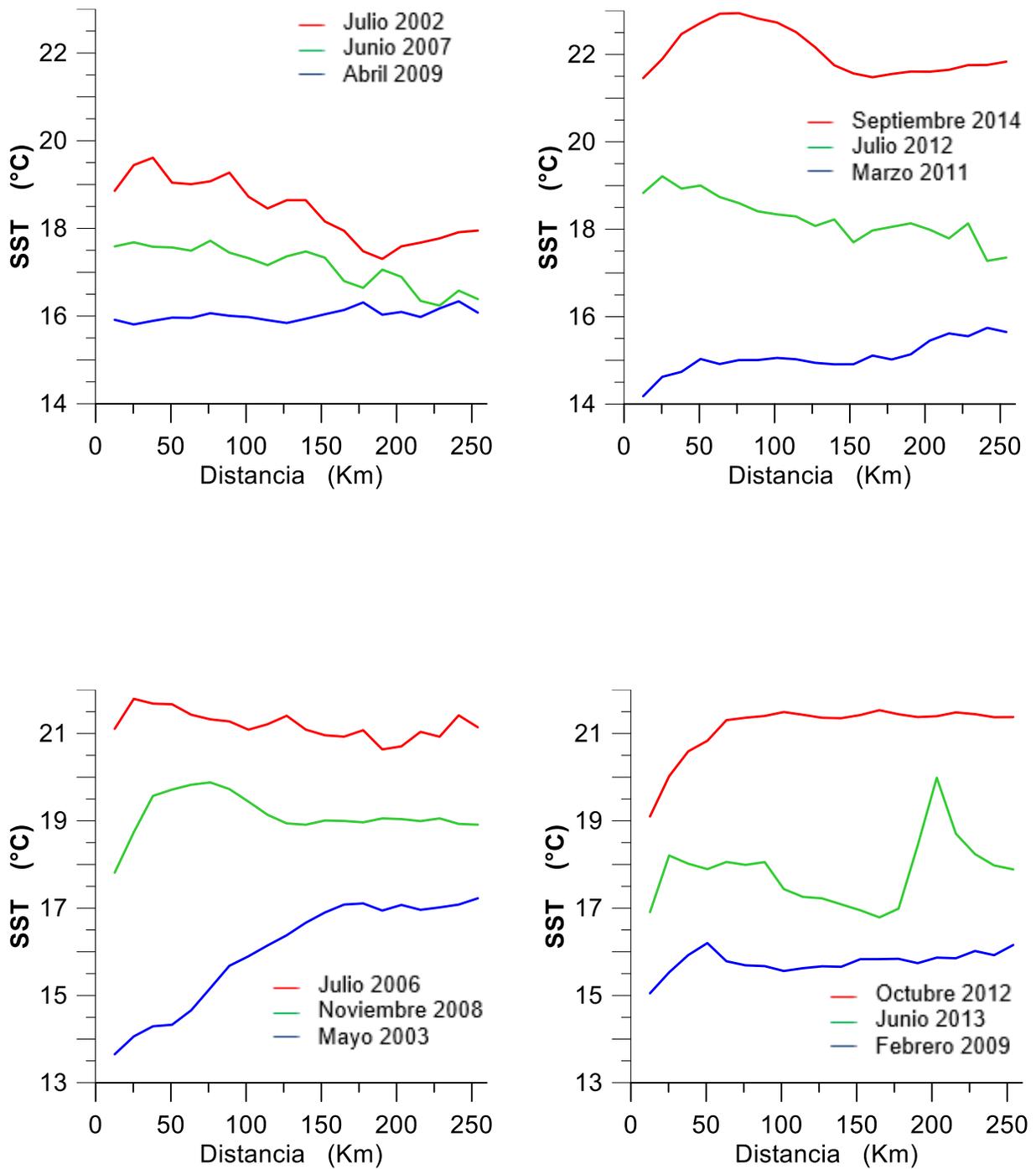


Figura 4. Ejemplos de SST para diferentes meses de distintos años a la izquierda el transecto FLJ y a la derecha el transecto FBSQ.

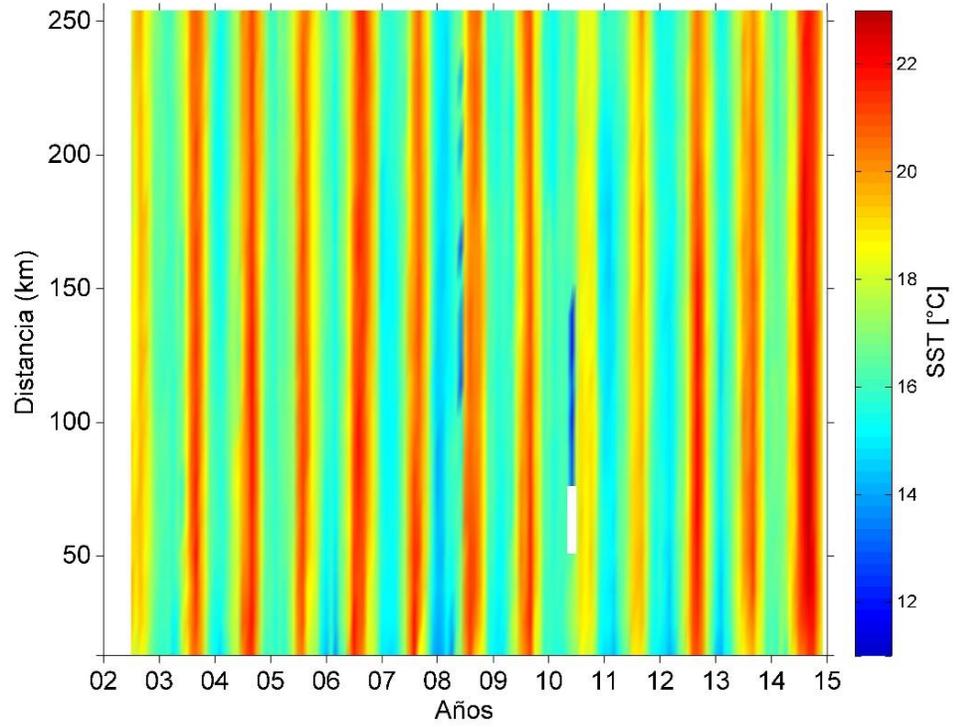


Figura 5. Diagrama Hovmöller para SST en el transecto frente a La Jolla.

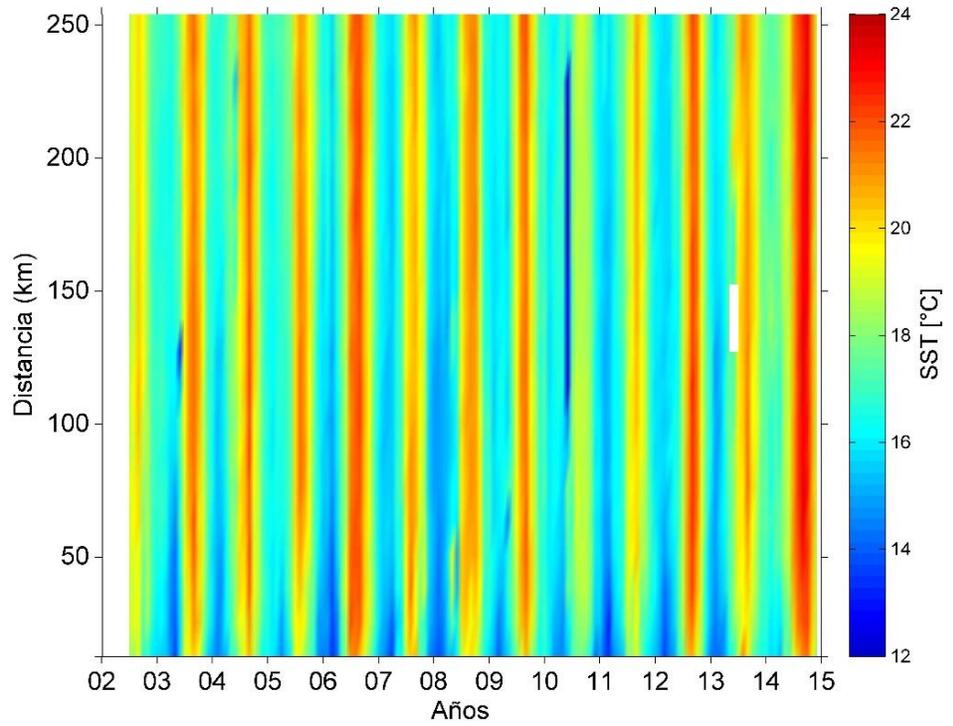


Figura 6. Diagrama Hovmöller para SST en el transecto frente a Bahía San Quintín.

Los diagramas Hovmöller para Chl_{sat} de ambos transectos muestran una mayor variación espacial y temporal que las de SST (Figs. 5, 6, 7 y 8). De nuevo se pierde mucho detalle de las diferencias relativamente pequeñas, pero se aprecia como en el caso de SST las variaciones estacionales e interanuales, pero con mayor contraste para Chl_{sat} que para SST. También se aprecia los valores más elevados en FBSQ que en FLJ. En el caso del diagrama para FLJ se aprecian los valores relativamente elevados en la zona oceánica, principalmente en 2005, 2006 y 2011 (Fig. 7). En la variación interanual, 2004 y 2014 fueron años con valores relativamente bajos de Chl_{sat} en la zona costera de ambos transectos (Fig. 7 y 8).

En FBSQ no se apreció una correspondencia entre la distribución espacial irregular de SST con las de Chl_{sat} y PP, pero en las de FLJ a menudo se presentó una correspondencia clara entre las variaciones espaciales de estas propiedades, con valores de Chl_{sat} y PP relativamente bajos correspondiendo con valores relativamente altos de SST, y viceversa (Fig. 9).

En las pruebas Mann-Whitney para comparar Chl_{sat} entre las dos “épocas”, entre las dos zonas, y entre transectos, en todos los casos las diferencias fueron significativas, con excepción de los valores de Chl_{sat} de la zona costera de ambos transectos, para la segunda época, que no fueron significativamente diferentes entre transectos (Tabla 4). Estas pruebas indican que en general los valores de Chl_{sat} fueron mayores en la primera época que en la segunda para las dos zonas de los dos transectos, respectivamente; que los valores de Chl_{sat} de la zona costera fueron mayores que los de la zona oceánica, en ambas épocas y para los dos transectos, respectivamente; y que los valores de FBSQ fueron mayores que los de FLJ para la zona costera en la primera época. Para la zona oceánica los valores de Chl_{sat} de FLJ fueron mayores que los de FBSQ en ambas épocas.

Mediante pruebas Kruskal-Wallis post hoc se determinó cuáles pares de años tuvieron diferencias significativas de Chl_{sat} para la primera época de la zona costera. Para el caso de FLJ, los años que tuvieron diferencias significativas con el mayor número de años fueron 2008 (con valores de Chl_{sat} más altos que en 2004, 2010 y 2014) y 2014 (con valores más bajos que 2008, 2011 y 2012), seguidos de 2004 (con valores más bajos que 2008 y 2012) (2004-2008, 2004-2012, 2008-2010, 2008-2014, 2011-2014 y 2012-2014).

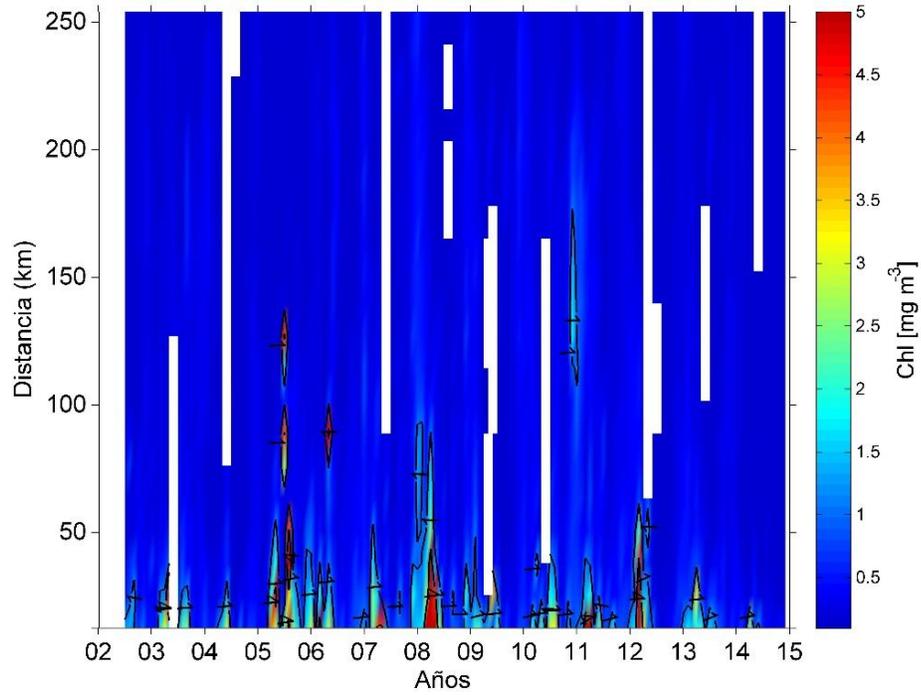


Figura 7. Diagrama Hovmöller para Chl_{sat} en el transecto frente a La Jolla.

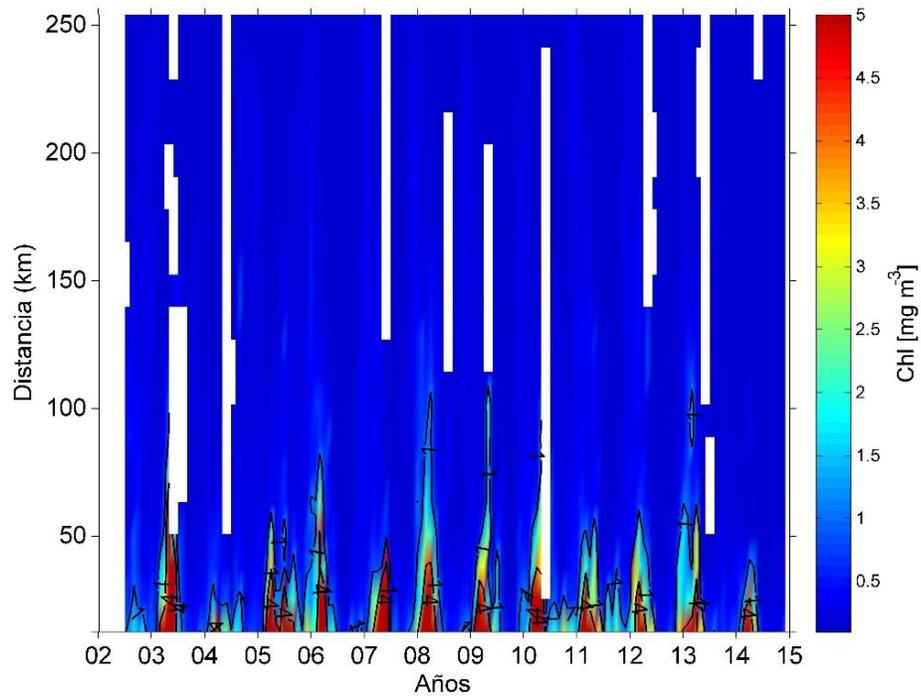


Figura 8. Diagrama Hovmöller para Chl_{sat} en el transecto frente a Bahía San Quintín.

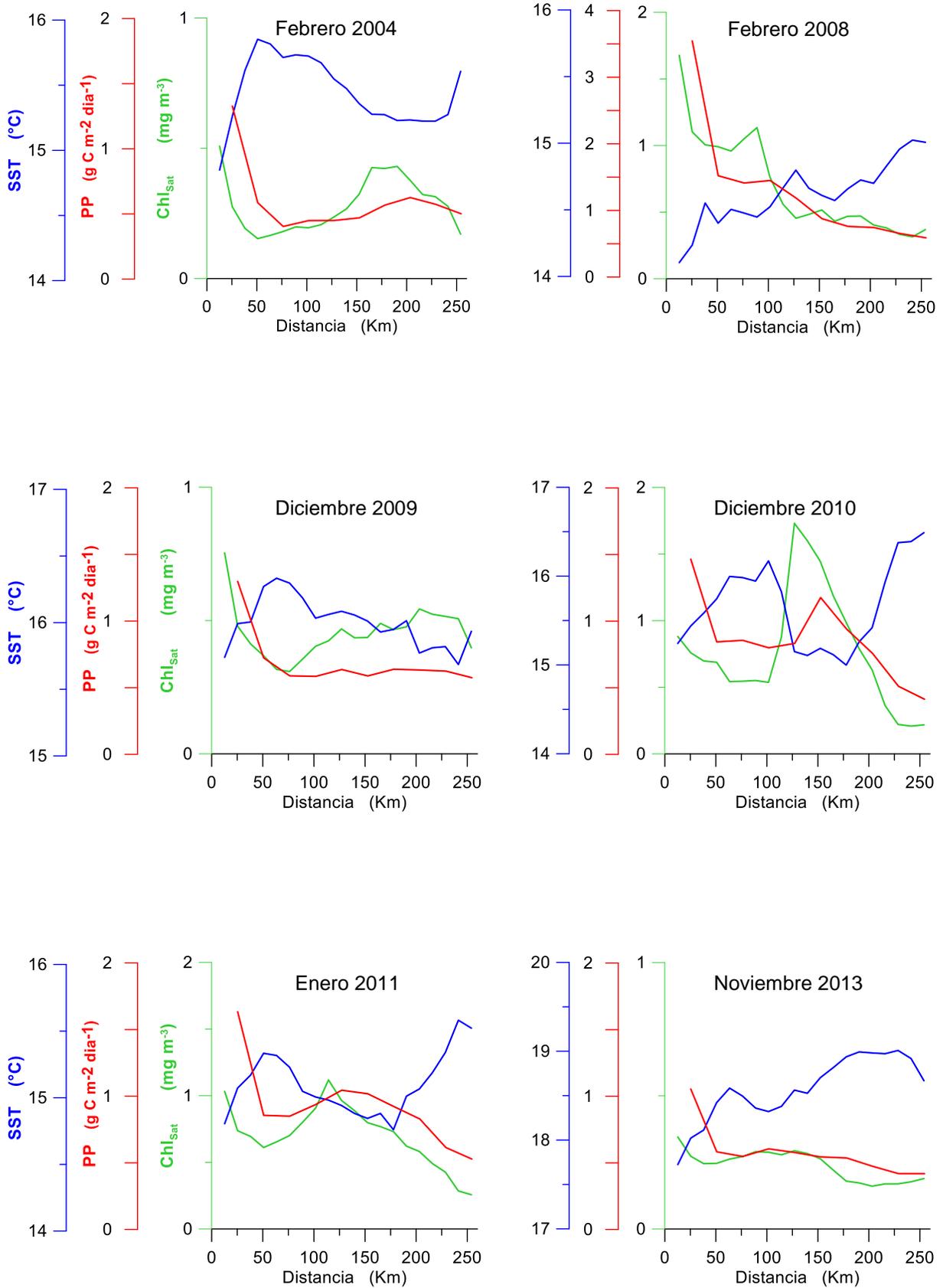


Figura 9. Ejemplos de transectos de FLJ con la distribución espacial de SST, Chl_{sat} y PP.

En el caso de FBSQ sólo hubo diferencias significativas entre 2004 y 2008.

Las series de tiempo de las tres variables para los cuadrantes costeros frente a ambos lugares muestran variaciones estacionales e interanuales claras (Figs. 10 y 11).

En la serie de tiempo del cuadrante frente a BSQ, donde se tienen promedios para cuatro pixeles, no se presentaron los valores excepcionalmente altos de 2005, 2011 y 2012 que se observaron en el transecto. En la serie de tiempo del cuadrante frente a BSQ los valores más altos se presentaron en 2003, 2007 y 2008 y fueron de hasta 11.6 mg m^{-3} (Fig. 11). Se puede apreciar que el ciclo anual domina la variación de las tres propiedades. Los valores máximos de SST de ambas series se presentaron en otoño, y los mínimos en primavera. La diferencia estacional más grande para el cuadrante frente a La Jolla fue $\sim 7.8 \text{ }^\circ\text{C}$, y la del cuadrante frente a BSQ fue $\sim 8.8 \text{ }^\circ\text{C}$, ambas en 2006; mientras que la diferencia más grande entre máximos de años consecutivos fue $2.5 \text{ }^\circ\text{C}$ para el cuadrante frente a La Jolla y $2.9 \text{ }^\circ\text{C}$ para el cuadrante frente a BSQ, ambos entre 2009 y 2010. Los valores máximos de Chl_{sat} de ambas series se presentaron en invierno o en primavera, y los mínimos en verano u otoño. La diferencia estacional más grande para el cuadrante frente a La Jolla fue $\sim 7.9 \text{ mg m}^{-3}$, en 2008, y la del cuadrante frente a BSQ fue $\sim 11.2 \text{ mg m}^{-3}$, en 2003; mientras que la diferencia más grande entre máximos de años consecutivos fue 6.1 mg m^{-3} , entre 2008 y 2009, para el cuadrante frente a La Jolla, y 10.6 mg m^{-3} , entre 2003 y 2004, para el cuadrante frente a BSQ.

Para las series de tiempo de ambos cuadrantes, el análisis espectral de las tres variables confirma que la mayor parte de la variancia se presentó en el período anual (estacional, entre primera y segunda épocas) (Fig. 12). Las variancias espectrales de las series de SST fueron muy similares para ambos cuadrantes (Fig. 12 a y b). Pero en el caso de Chl_{sat} y PP, las variancias espectrales de las series del cuadrante frente a Bahía de San Quintín fueron mayores que las de las series de La Jolla (Fig. 12 c-f).

La variancia espectral de temperatura, para ambos cuadrantes, muestra muy poca variación intra-anual, mientras que los espectros de Chl_{sat} y PP muestran picos de variancia espectral en diferentes frecuencias intra-anales (semianual y otros), indicativos de variaciones con períodos de pocos meses.

Tabla 4.- Resultados de las pruebas de Mann-Whitney comparando conjuntos de datos pareados de Chl_{sat} , según se indica (FLJ = La Jolla; FBSQ = Bahía de San Quintín; C = costera; O = oceánica). Los valores significativos se marcaron en negritas.

FLJ	Época 1 C vs Época 2 C	n = 570	p <0.001
	Época 1 O vs Época 2 O	n = 2220	p <0.045
FBSQ	Época 1 C vs Época 2 C	n = 574	p <0.001
	Época 1 O vs Época 2 O	n = 2213	p <0.001
FLJ	Época 1 C vs Época 1 O	n = 1118	p <0.001
	Época 2 C vs Época 2 O	n = 1672	p <0.001
FBSQ	Época 1 C vs Época 1 O	n = 1118	p <0.001
	Época 2 C vs Época 2 O	n = 1665	p <0.001
C	Época 1 FLJ vs Época 1 FBSQ	n = 472	p <0.001
	Época 2 FLJ vs Época 2 FBSQ	n = 672	p <0.822
O	Época 1 FLJ vs Época 1 FBSQ	n = 1764	p <0.001
	Época 2 FLJ vs Época 2 FBSQ	n = 2665	p <0.001

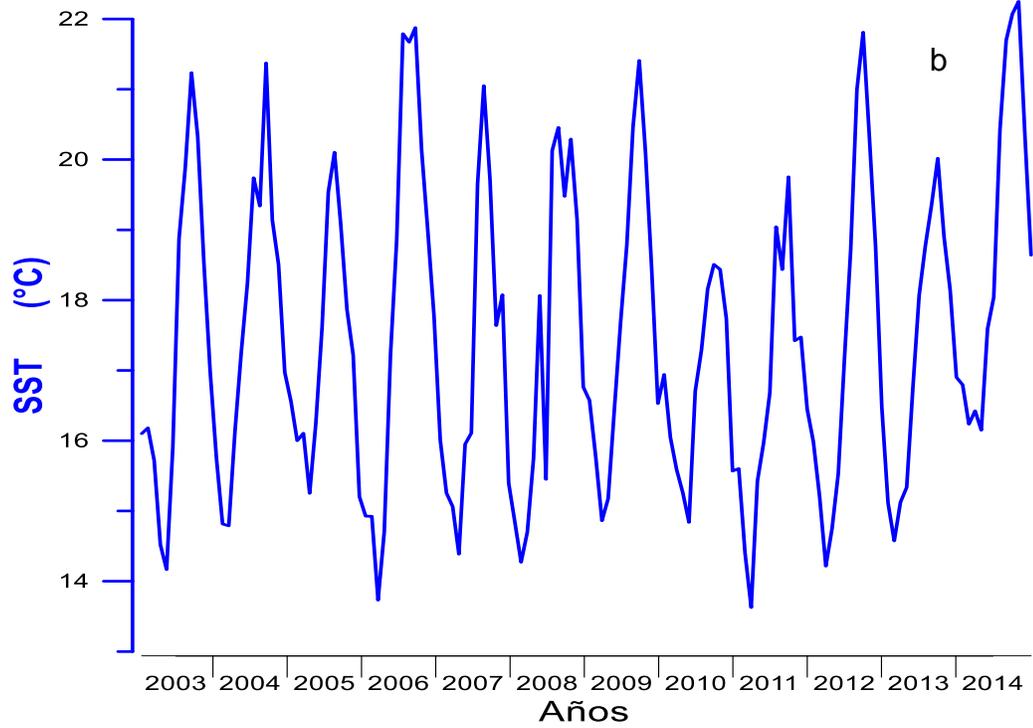
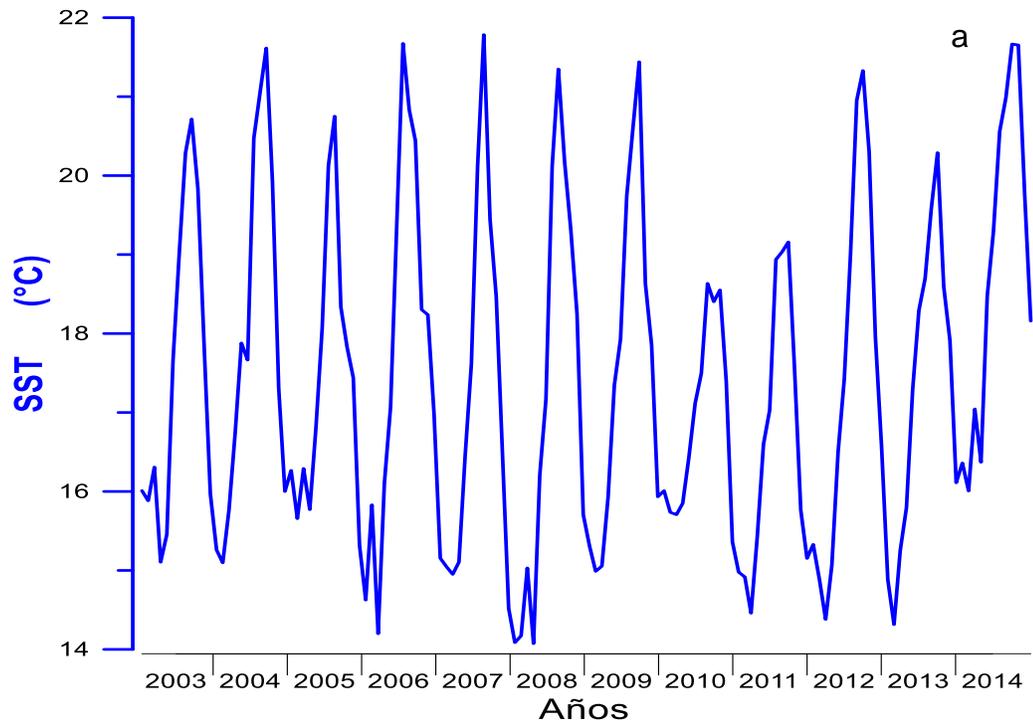


Figura 10. Series de tiempo de SST para el cuadrante frente a La Jolla (a) y frente a Bahía de San Quintín (b).

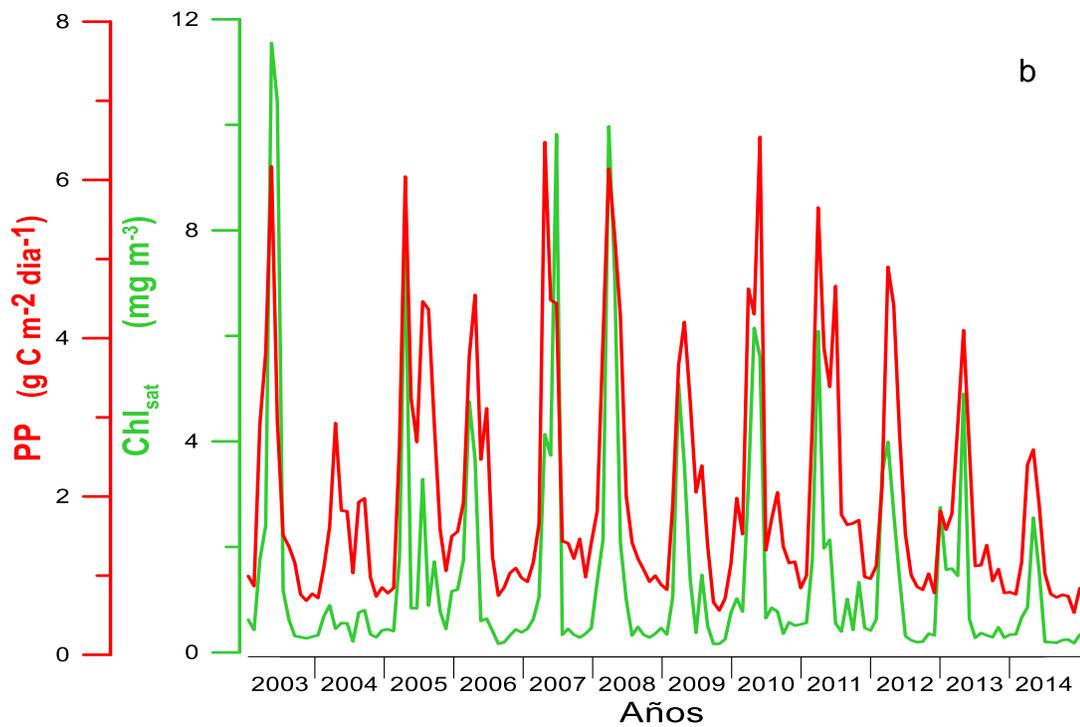
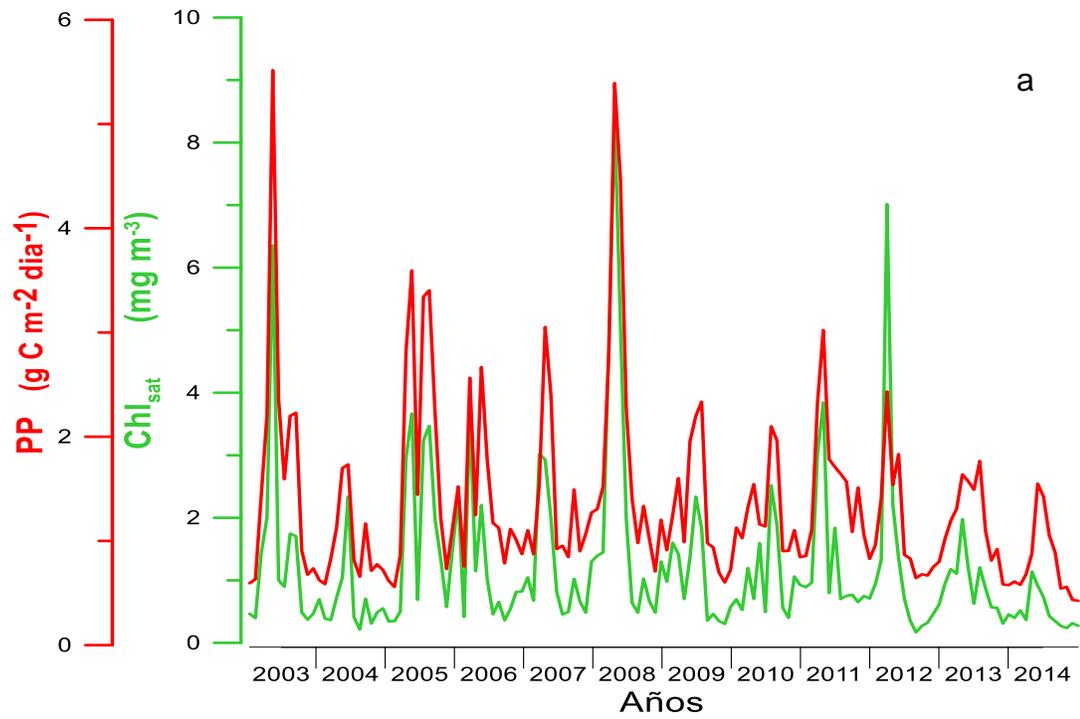


Figura 11. Series de tiempo de Chl_{sat} y PP para el cuadrante frente a La Jolla (a) y frente a Bahía de San Quintín (b).

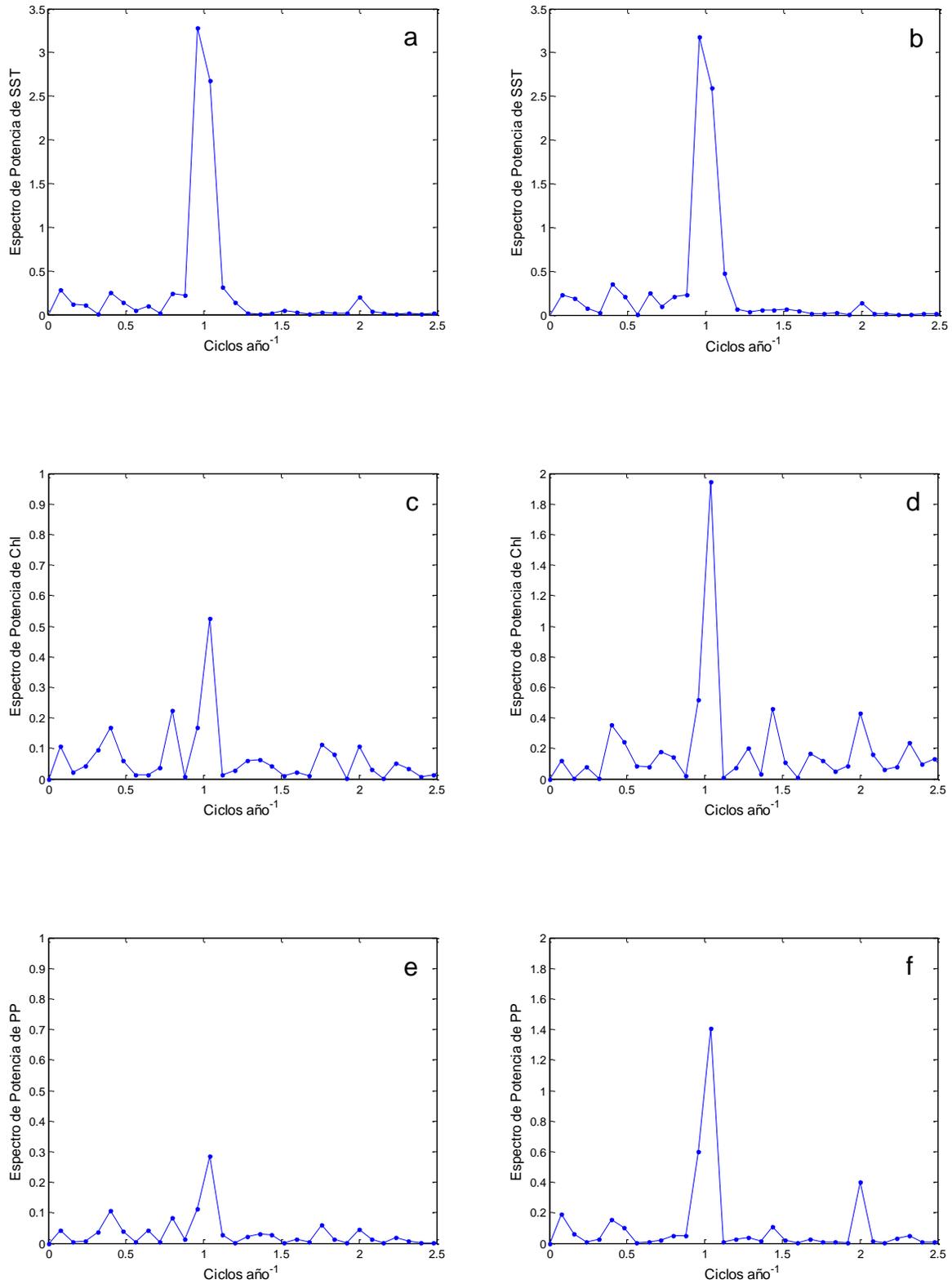


Figura 12. Densidad espectral de las series de tiempo de SST ($^{\circ}\text{C}$), Chl_{sat} (mg m^{-3}) y PP ($\text{g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), de los dos cuadrantes: a y b corresponden a SST; c y d corresponden a Chl_{sat} ; e y f corresponden a PP, para los cuadrantes frente a La Jolla y frente a Bahía San Quintín, respectivamente en cada caso. Nótese que las escalas de densidad espectral de Chl_{sat} y PP son diferentes para cada cuadrante.

Capítulo 4- Discusiones

El ciclo estacional de SST, Chl_{sat} y PP en ambos transectos tiene relación con la dinámica del SCC. El flujo de la Corriente de California y las surgencias costeras se intensifican en primavera y principios de verano, promoviendo una señal biológica estacional fuerte, como la descrita por Espinosa-Carreón *et al.* (2004). Según Lynn y Simpson (1987) y Durazo *et al.* (2010), en invierno el flujo de la Corriente de California y las surgencias costeras son débiles, y cerca de la costa hay una contracorriente superficial. Esta contracorriente superficial costera de invierno claramente debería producir valores más altos de SST y más bajos de Chl_{sat} y PP a finales de otoño y principios de invierno que en primavera y verano. Como lo mencionaron Arroyo-Loranca *et al.* (2015), el efecto de Coriolis debería causar el que la contracorriente superficial inhibiese las surgencias costeras, porque tiende a acumular el agua cerca de la costa. Sin embargo, según los datos manejados en este estudio, en el período de debilitamiento de las surgencias costeras (segunda época) los valores costeros de Chl_{sat} alcanzaron a menudo $>1 \text{ mg m}^{-3}$ (Figs. 3, 9 y 11), lo cual indica una situación mesotrófica. Es decir, la variación estacional no implica una situación oligotrófica en invierno. Esto indica una variación estacional costera que no es tan marcada como en otras regiones oceánicas. Como una comparación, Santamaría-del-Ángel *et al.* (1999) usaron datos del sensor CZCS del golfo de California, para concluir que durante la estación sin surgencias Chl_{sat} se colapsa hasta valores $<0.1 \text{ mg m}^{-3}$.

Kahru y Mitchell (2000) propusieron una división de aguas superficiales del SCC con una zona eutrófica costera, una mesotrófica intermedia y una oligotrófica oceánica, con el criterio de que eutrófico significa $\text{Chl}_{\text{sat}} >1.0 \text{ mg m}^{-3}$, y mesotrófica de 0.25 a 1.0 mg m^{-3} . En el caso de los datos de Chl_{sat} de la zona costera de FLJ y FBSQ, para el propósito de la división temporal en dos épocas, en el presente trabajo se consideró más apropiado el que la división entre eutrófico y mesotrófico fuese Chl_{sat} igual a 2.0 mg m^{-3} , ya que la zona costera tiende a tener valores relativamente altos aún en la época sin surgencias intensas.

El giro ciclónico del Southern California Bight, producido por la dinámica del Frente Ensenada, genera también una circulación costera hacia el norte, al norte del frente,

como ya se dijo. Esto causa que las surgencias de primavera e inicio de verano sean menos fuertes en FLJ que en FBSQ, y esto a su vez causa los valores menores de Chl_{sat} en FLJ comparados con los de FBSQ (Fig. 3, 7, 8 y 11). Sin embargo, PP de FLJ fue a menudo mayor que el de FBSQ (Fig. 3). Esto se debe a que con valores menores de Chl_{sat} la profundidad calculada de la zona eufótica (z_{eu}) es mayor en FLJ y esto aumenta la integración de la producción fitoplanctónica ($P_{(z)}$) con la profundidad, como lo mostraron Lara-Lara *et al.* (1984) con datos *in situ* de Chl y de PP, con incubaciones con ^{14}C , del Golfo de California.

Las variaciones interanuales de SST, Chl_{sat} y PP en la zona costera de ambos transectos son un tanto irregulares (Figs. 5, 6, 7, 8, 10 y 11). Estas variaciones temporales irregulares cerca de la costa, y la presencia de varios mínimos y máximos en los transectos de SST, Ch_{sat} y PP (como los que se ilustran en la figuras 4 y 13), también sin un patrón temporal claro de variación, pueden indicar una influencia de fenómenos de mesoescala. Se ha reportado la presencia de remolinos ciclónicos y anticiclónicos frente a Baja California (Strub *et al.*, 1991; Soto-Mardones *et al.*, 2004). Durazo *et al.* (2005) reportaron remolinos y meandros para la región del SCC frente al norte y centro de la península. Estos fenómenos de mesoescala afectan la producción biológica del área de estudio, como se describió por Henson y Thomas (2007a, b), principalmente en FLJ (Fig. 9). Los valores oceánicos relativamente altos de Chl_{sat} en FLJ (Fig. 9), con valores $>1.5 \text{ mg m}^{-3}$, se deben a chorros de agua de surgencia costera que provienen de Point Conception, como se ilustra en la figura 13.

Las variaciones interanuales de SST, Chl_{sat} y PP, cerca de la costa, también pueden ser causadas por la secuencia de eventos ENSO. Hay dos tipos de eventos ENSO: el tipo de Pacífico oriental (EP, por sus siglas en inglés) que tiene un máximo de anomalías de SST centrado en la región de la lengüeta fría del Pacífico tropical oriental; y el tipo de Pacífico central (CP, por sus siglas en inglés) que tiene anomalías cerca de la línea del tiempo (Kao y Yu, 2009). El Niño CP también ha sido denominado como El Niño Modoki (que en japonés significa: parece pero no es) (Ashok *et al.*, 2007). La propagación de las anomalías de SST del Ecuador al Pacífico nororiental es más débil y menos clara en el ENSO del tipo CP que en el de tipo EP. Mientras que el ENSO EP está caracterizado por anomalías de temperatura subsuperficiales que se propagan a través

de la cuenca del Pacífico, el ENSO CP está más asociado con anomalías subsuperficiales de temperatura que se desarrollan in situ en el Pacífico central (Ashok *et al.*, 2007). El evento de 1997-1998 fue un El Niño del tipo EP y es hasta ahora que tenemos otro El Niño de tipo EP, como ya se mencionó.

Arroyo-Loranca *et al.* (2015) usaron datos de Chl_{sat} de los sensores SeaWiFS y Aqua-MODIS, para un transecto similar al de este trabajo, pero frente a Punta Eugenia, Baja California Sur, para concluir que con excepción de El Niño 1997-1998, que fue del tipo EP, sus datos de Chl_{sat} no mostraron ningún efecto significativo de eventos ENSO en su área de estudio. Sin embargo, ha habido efectos significativos de los eventos El Niño del siglo XXI en la biología del área de estudio, contrario a lo que reportaron Arroyo-Loranca *et al.* (2015) para la zona frente a Punta Eugenia. Los eventos El Niño de 2002-2003, 2004-2005 y 2009-2010 han sido del tipo CP, sólo el de 2014 fue del tipo EP (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/map/images/sst/sst.anom.month.gif>). Existe una tendencia de los eventos de tipo CP de ocurrir más a menudo en el siglo XXI (Lee y McPhaden, 2010; Índice Multivariado de El Niño, MEI por sus siglas en inglés, NOAA, 2015) (Fig. 14). El evento ENSO de 2014 (que continúa en el presente, agosto de 2015) tuvo un efecto muy claro en FLJ. Sin embargo, no tuvo un impacto fuerte en FBSQ (Figs. 7, 8 y 11). De nuevo, la dinámica costera, tales como chorros, remolinos y meandros, en FLJ y FBSQ hace que los impactos de eventos como El Niño sean diferentes.

El Niño 2009-2010 es uno de los eventos de tipo CP más fuertes que han ocurrido en las últimas décadas (Lee y McPhaden, 2010). Sin embargo, el impacto del evento de 2004-2005 fue más fuerte que el de 2009-2010 en el área de estudio, sobre todo en FBSQ (Figs. 7, 8 y 11). De cualquier forma, estos efectos de los eventos ENSO no fueron muy fuertes en el área de estudio ya que, a pesar de la disminución significativa de la biomasa y producción fitoplanctónicas, a menudo Chl_{sat} tuvo valores >1 y hasta >2 mg m^{-3} , durante un evento ENSO, es decir no hubo un colapso del ecosistema pelágico. Sólo en FBSQ, en 2004, Chl_{sat} bajó a valores <1 mg m^{-3} .

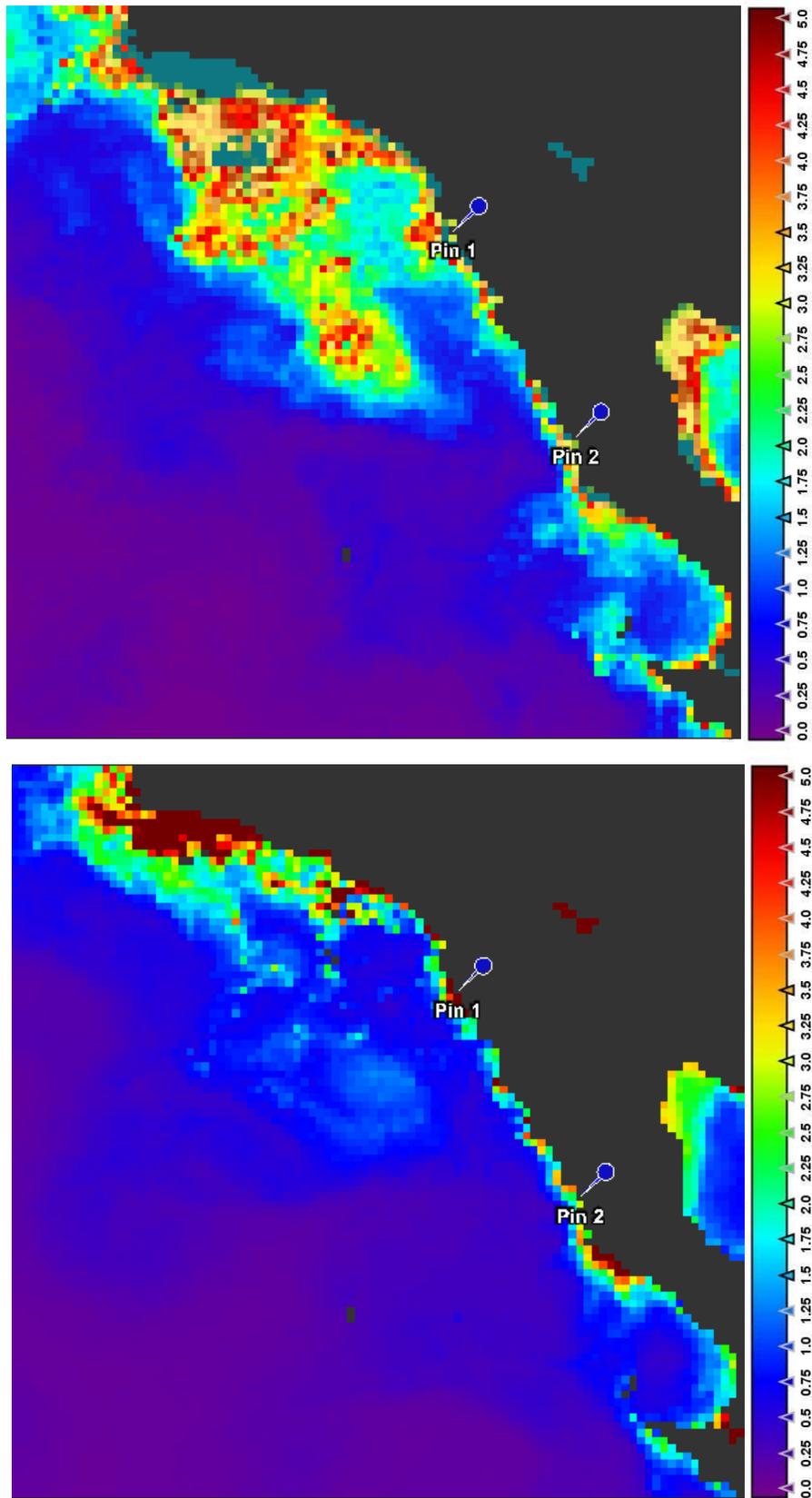


Figura 13. Imágenes bidimensionales de Chl_{sat} del área de estudio para diciembre de 2010 (arriba) y enero de 2011 (abajo). El pin 1 muestra la ubicación de La Jolla y el pin 2 la de Bahía de San Quintín. Las unidades de la escala de colores son $mg\ m^{-3}$.

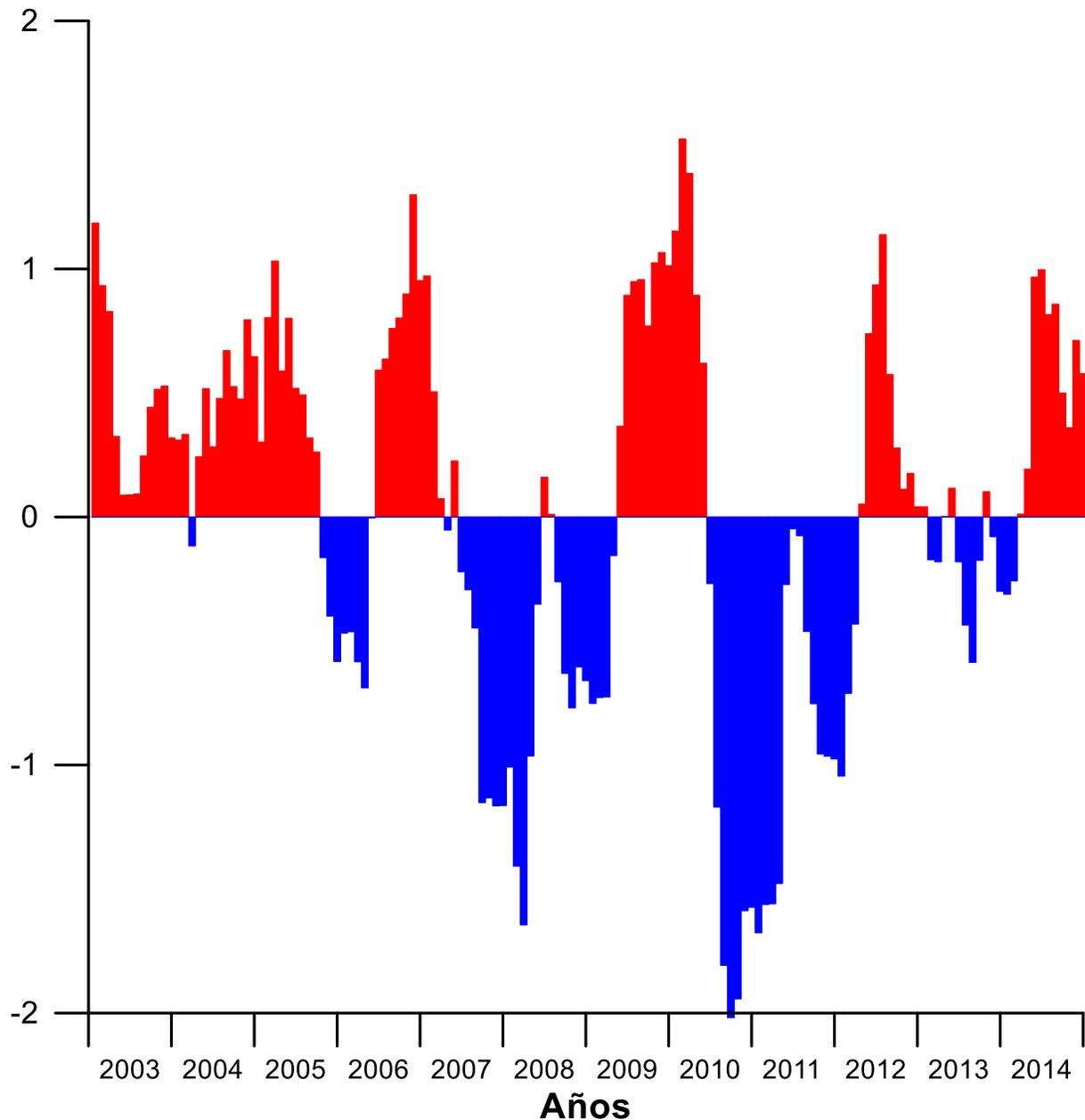


Figura 14. El índice multivariado de El Niño MEI (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/table.html>).

En el transecto de Arroyo-Loranca *et al.* (2015) frente a Punta Eugenia, los mínimos de SST y máximos de Chl_{sat} y PP para la zona costera fueron $\sim 13^\circ\text{C}$, 26 mg m^{-3} y $8.7 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, un poco menor en el caso de los valores mínimos de SST de FLJ y FBSQ ($\sim 0.5^\circ\text{C}$), entre el doble (comparado con FLJ) y dos tercios (comparado con el de FBSQ) para Chl_{sat} , y similar (en el caso de FLJ) o hasta un 34% mayor que en FBSQ para PP. Ortiz Ahumada (2015) realizó un estudio similar al presente trabajo para dos transectos, frente a cabo San Lázaro (CSLA) y cabo San Lucas (CSLU), Baja California

Sur, con datos del Aqua-MODIS del mismo período del presente estudio, y reportó valores mínimos de SST para su zona costera hasta 2.5 °C mayores para CSLA, y hasta ~6 °C mayores para CSLU, que los de FLJ y FBSQ. Los valores máximos de Chl_{sat} y PP de Ortiz Ahumada (2015), en la zona costera, fueron hasta 9.8 mg m⁻³ y 7.3 g C m⁻² d⁻¹ para CSLA, y hasta 6.5 mg m⁻³ y 11 g C m⁻² d⁻¹ para CSLU, los cuales son similares a los valores para FLJ.

Lara-Lara *et al.* (1980) muestrearon en la boca de Bahía de San Quintín, cada hora durante 18 días en junio-julio de 1977, y reportaron un valor mínimo de SST de ~11.5 °C, y valores máximos de Chl (medida en muestras de agua) de hasta 15 mg m⁻³ (un pico aislado), pero a menudo con valores de solamente ~6 mg m⁻³, y con un promedio de ~8 mg m⁻³ (para aguas con marea subiendo, es decir de agua de la zona oceánica adyacente) para todo su período de muestreo. Millán-Núñez *et al.* (1982) realizaron un muestreo similar durante diez días, también en junio-julio pero de 1979, y reportaron valores mínimos de SST de hasta 13 °C y máximos de Chl de hasta 38 mg m⁻³ (un pico aislado), con un promedio de ~9 mg m⁻³ (también con marea subiendo). Lo anterior indica que los valores máximos costeros de Chl_{sat} de FBSQ, obtenido de composiciones o promedios mensuales (hasta ~38 mg m⁻³, Tabla 3), son exageradamente altos ya que algunos valores diarios (dentro de ese mes) de satélite tendrían que ser todavía mucho mayores.

Los datos de satélite de SST y Chl_{sat} se basan en datos de radiación electromagnética, lo cual los hace una aproximación a la realidad. En el caso de SST la aproximación es mucho mejor porque la radiación infraroja solamente debe ser corregida para evitar la contaminación por nubes y por absorción atmosférica, principalmente por vapor de agua. El sensor de infrarojo del MODIS (11 μm) es una herencia del sensor Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) con la precisión mejorada. Los sensores de SST generan datos muy similares (McClain *et al.*, 1985; Armstrong *et al.*, 2012). En el caso de Chl_{sat} , los algoritmos que se aplican a los datos de radiancias proveen una muy buena aproximación a la concentración de clorofila *in situ* cuando los valores son bajos (aguas caso I con $\text{Chl} \leq 1.5$ mg m⁻³), pero las comparaciones entre valores de clorofila derivados de satélites y los valores *in situ* no son muy buenas cuando los valores son altos (aguas caso II con $\text{Chl} > 1.5$ mg m⁻³) (Gordon *et al.*, 1983). Se debe

ser precavido con los valores absolutos cuando los datos sean de aguas caso II, poniendo más atención a las tendencias de cambios espaciales y temporales. Sin embargo, las series de tiempo son muy consistentes, sus ciclos estacionales y su variación espacial se comportan muy de acuerdo a lo esperado por el impacto de la fenomenología física tales como el movimiento de masas de agua y la secuencia de eventos de surgencia (Santamaría-Del-Ángel *et al.*, 1994). Ramírez-León *et al.* (2015) compararon datos de Chl_{sat} del Golfo de California de los sensores CZCS, SeaWIFS y Aqua-MODIS, y encontraron que tienden a ser similares cuando son bajos pero difieren cuando son altos. Los datos de Chl_{sat} de aguas caso II del golfo del CZCS fueron hasta tres veces los valores del SeaWIFS y del Aqua-MODIS. Chl_{sat} de estos últimos dos sensores coincidieron bastante en la mayoría de los casos, pero con $\text{Chl}_{\text{sat}} > 2 \text{ mg m}^{-3}$ algunas veces los del Aqua-MODIS fueron mayores que los del SeaWIFS hasta en un 30%. El sensor CZCS operó de 1978 a 1986, el SeaWIFS produjo datos de 1997 a 2010 y el Aqua-MODIS se puso en órbita en 2002 y todavía está en operación.

La variación espacial del fitoplancton en forma de manchas de diferentes tamaños, conocida desde hace muchos años (*v. g.*: Lara-Lara *et al.*, 1980; Millán-Núñez *et al.*, 1982), hace que Chl y PP presenten mucha mayor variación en el espacio y tiempo que SST, por lo que, a pesar de estar tratando con composiciones mensuales, los espectros de variancia de Chl_{sat} y PP son más ricos en componentes intra-anales que los de SST (Fig. 12).

Capítulo 5- Conclusiones

En general, el “año promedio” presentó una variación espacial muy clara de Chl_{sat} y PP de la costa hacia mar adentro, con valores más altos en la zona cercana a la costa. En cambio, en general SST mostró una variación espacial diferente con valores menores en la costa que en mar adentro frente a las dos zonas, sobre todo en FBSQ. El gradiente de SST se invirtió de junio a agosto en FLJ, con valores mayores cerca de la costa que en mar adentro.

En función de la distribución espacial de Chl_{sat} , la zona costera se puede considerar desde la costa hasta ~50 km en ambos transectos, y la zona oceánica de ahí a mar adentro.

En general, la climatología en términos de Chl_{sat} y PP frente a ambos transectos mostró condiciones biológicas separadas en dos épocas: una primera época que comprendió de marzo a junio en FLJ, y de febrero a junio en FBSQ; y la segunda época de julio a febrero en FLJ y de julio a enero en FBSQ. En la primera época se presentaron valores mayores que en la segunda. Esto tiene relación con la dinámica del SCC y la estacionalidad de las surgencias costeras. Esta variación estacional no es tan marcada como en otras regiones oceánicas, no implica una situación oligotrófica en invierno.

Las variaciones de SST, Chl_{sat} y PP de año a año de ambos transectos, y en los cuadrantes costeros, tuvieron componentes claros estacionales e interanuales, con la mayor variación en el componente estacional (un ciclo por año). El análisis espectral mostró que la variación de Chl_{sat} y PP en el cuadrante frente a Bahía de San Quintín fue mayor que la de las series de La Jolla.

Contrario a lo reportado para un transecto frente a Punta Eugenia, en el área del presente estudio hubo impactos significativos de los eventos El Niño de tipo CP del siglo XXI (2002-2003, 2004-2005 y 2009-2010). El impacto del evento ENSO de 2004-2005 fue más fuerte que el de 2009-2010 en el área de estudio, sobre todo en FBSQ, donde Chl_{sat} bajó a valores $<1 \text{ mg m}^{-3}$. El evento ENSO de 2014 de tipo EP (que continúa en el presente) tuvo un efecto muy claro en FLJ, sin embargo no tuvo un impacto fuerte en

FBSQ. La dinámica costera, tales como chorros, remolinos y meandros, en FLJ y FBSQ y en otras áreas frente a la península de Baja California, hace que los impactos de eventos como El Niño sean diferentes.

Los valores de Chl_{sat} fueron mayores en la primera época que en la segunda para las dos zonas de los dos transectos, respectivamente; los valores de Chl_{sat} de la zona costera fueron mayores que los de la zona oceánica, en ambas épocas y para los dos transectos, respectivamente; los valores de Chl_{sat} de FBSQ fueron mayores que los de FLJ para la zona costera en la primera época. Para la zona oceánica los valores de Chl_{sat} de FLJ fueron mayores que los de FBSQ en ambas épocas. El giro ciclónico del Southern California Bight causa que las surgencias de primavera e inicio de verano sean menos intensas en FLJ que en FBSQ.

En FLJ, en primavera y verano, en ocasiones hay valores altos de Chl_{sat} y PP en mar adentro (70-160 km) por los chorros provenientes de la zona de surgencias de Point Conception.

Se debe ser precavido con los valores absolutos de Chl_{sat} cuando los datos sean de aguas caso II, poniendo más atención a las tendencias de cambios espaciales y temporales. Las series de tiempo son muy consistentes; sus ciclos estacionales y su variación espacial se comportan muy de acuerdo a lo esperado por el impacto de la fenomenología física.

Lista de referencias bibliográficas

- Aguilar-Rosas, R., M. López-Carillo y L. E. Aguilar-Rosas. (2005). Macroalgas marinas de la bahía de San Quintín, Baja California México. *Polibotánica*, 19:19-38.
- Aguirre-Hernández, E., G. Gaxiola-Castro, S. Nájera-Martínez, T. Baumgartner, M. Kahru, and B. G. Mitchell. (2004). Phytoplankton absorption, photosynthetic parameters, and primary production off Baja California: summer and autumn 1998. *Deep-Sea Research. Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51(6): 799–816.
- Álvarez-Borrego, J., and S. Álvarez-Borrego. (1982). Temporal and spatial variability of temperature in two coastal lagoons. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports*, 23: 188-197.
- Álvarez-Borrego, S. (2004). Dinámica de nutrientes y fitoplancton en una laguna costera fuertemente afectada por surgencias costeras. *Ciencias Marinas*, 30(A): 1-19.
- Arévalo-Martínez, D. L. y A. Franco-Herrera. (2008). Características oceanográficas de la surgencia frente a la Ensenada de Gaira, Departamento de Magdalena, época seca menor de 2006. *Boletín de investigaciones marinas y costeras*, 37(2): 131-162.
- Armstrong, E. M., G. Wagner, J. Vázquez-Cuervo, and T. M. Chin. (2012). Comparisons of regional satellite sea surface temperature gradients derived from MODIS and AVHRR sensors. *International Journal of Remote Sensing*, 33 (21): 6639-6651.
- Arroyo-Loranca, R. G., S. Álvarez-Borrego, M. Ortiz-Figueroa, and L. E. Calderón-Aguilera. (2015). Spatial and temporal variation of satellite derived phytoplankton biomass and production in the California Current System off Punta Eugenia, during 1997-2012. *Hidrobiológica* (in press).
- Ashok, K., S. K. Behera, S. A. Rao, H. Weng, and T. Yamagata. (2007). El Niño Modoki and its possible teleconnection. *Journal of Geophysical Research*, 112(C11).
- Barocio-León, O. A., R. Millán-Núñez, E. Santamaría-Del-Ángel, and A. González-Silvera. (2007). Phytoplankton primary productivity in the euphotic zone of the California Current System estimated from CZCS imagery. *Ciencias Marinas*, 33(1): 59–72.
- Behrenfeld, M. J., and P. G. Falkowski. (1997). Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnology & oceanography*, 42(1): 1-20.
- Cerdeira-Estrada, S., and G. López-Saldaña. (2011). A novel satellite-based ocean monitoring system for Mexico. *Ciencias Marinas*, 37(2): 237-247.

- Durazo, R., A. R. Ramírez-Manguilar, L. E. Miranda y L. A. Soto-Mardones. (2010). Climatología de variables hidrográficas. En: G. Gaxiola-Castro, R. Durazo (Eds.), *Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California, 1997-2007. Diez años de investigaciones mexicanas de la Corriente de California* (pp. 25-58). México, D. F. SEMARNAT-INE-CICESE-UABC.
- Durazo, R., G. Gaxiola-Castro, B. Lavaniegos, R. Castro-Valdez, J. Gómez-Valdés, and A. D. S. Mascarenhas Jr. (2005). Oceanographic conditions west of the Baja California coast, 2002–2003: A weak El Niño and subarctic water enhancement. *Ciencias Marinas*, 31: 537–552.
- Ekman, V. W. (1905). On the influence of the Earth's rotation on ocean currents. *Arkiv för Matematik, Astronomi och Fysik*, 2: 1-53.
- Espinoza-Carreón T. L., J. Cepeda-Morales y G. Gaxiola-Castro. (2007). Influencia de los procesos físicos en la producción de carbono orgánico frente a Baja California. En: Benigno Hernández de la Torre y Gilberto Gaxiola Castro (Eds.), *Carbono en Ecosistemas Acuáticos de México* (pp. 293-304). México, D. F. SEMARNAT-INE-CICESE.
- Espinoza-Carreón, T. L., P. T. Strub, E. Beier, F. Ocampo-Torres, and G. Gaxiola-Castro. (2004). Seasonal and interannual variability of satellite derived chlorophyll pigment, surface height, and temperature off Baja California. *Journal of Geophysical Research*, 109(C3): 1978-2012.
- Fargion, G. S., J. A. McGowan, and R. H. Stewart. (1993). Seasonality of chlorophyll concentrations in the California Current: A comparison of two methods. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports*, 34: 35-50.
- Gaardner, T., and H. H. Gran. (1927). Investigations of the production of plankton in the Oslo Fjord. *Journal du Conseil Permanent pour l'exploration de la Mer*, 42:1-48.
- Gaxiola-Castro, G., and S. Álvarez Borrego. (1986). Photosynthesis-irradiance relationship for winter phytoplankton in Pacific waters off Mexico. *Oceanologica Acta*, 9(4): 497-501.
- Gaxiola-Castro, G., and S. Álvarez-Borrego. (1991). Relative assimilation numbers of phytoplankton across a seasonally recurring front in the California Current off Ensenada. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports*, 32: 91-96.
- Gaxiola-Castro G., J. Cepeda-Morales, S. Nájera-Martínez, T. L. Espinoza-Carreón, M. E. De-la-Cruz-Orozco, R. Sosa-Avalos, E. Aguirre-Hernández y J. P. Cantú-Ontiveros. (2010). Biomasa y producción de fitoplancton. En: G. Gaxiola-Castro, R. Durazo (Eds.), *Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California, 1997-*

2007. *Diez años de investigaciones mexicanas de la Corriente de California* (pp. 59-86). México, D. F. SEMARNAT-INE-CICESE-UABC.

- Gordon, H. R., D. K. Clark, J. W. Brown, O. B. Brown, R. H. Evans, and W. W. Broenkow. (1983). Phytoplankton pigment concentrations in the Middle Atlantic Bight: Comparison of ship determinations and CZCS estimates. *Applied Optics*, 22(1): 20-36.
- Haurly, L. R., E. Venrick, C. L. Fey, J. A. McGowan, and P. P. Neil. (1993). The Ensenada front: July 1985. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports*, 34: 69–88.
- Henson, S. A., and A. C. Thomas. (2007a). Phytoplankton scales of variability in the California Current System: 2. Latitudinal variability. *Journal of Geophysical Research*, 112(C7): 1978-2012.
- Henson, S. A., and A. C. Thomas. (2007b). Interannual variability in timing of bloom initiation in the California Current System. *Journal of Geophysical Research*, 112(C8): 1978-2012.
- Hernández-De-la-Torre, B., G. Gaxiola-Castro, S. Álvarez-Borrego, J. Gómez-Valdés, and S. Nájera-Martínez. (2003). Interannual variability of new production in the southern region of the California Current. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 50(14): 2423-2430.
- Hernández-De-la-Torre, B., G. Gaxiola-Castro, and S. Nájera-Martínez. (2004). ENSO effects on primary production off Baja California. *Ciencias Marinas*, 30(3): 427–441.
- Kahru, M., and B. G. Mitchell. (2000). Influence of the 1997-98 El Niño on the surface chlorophyll in the California Current. *Geophysical Research Letters*, 27: 2937-2940.
- Kahru, M., and B. G. Mitchell. (2002). Influence of the El Niño–La Niña cycle on satellite-derived primary production in the California Current. *Geophysical Research Letters*, 29(17): 27.
- Kao, H. Y., and J. Y. YU. (2009). Contrasting Eastern-Pacific and Central-Pacific Types of ENSO. *Journal of Climate*, 22(3): 615-632.
- Kiefer, D. A., N. S. Chamberlin, and C. R. Booth. (1989). Natural fluorescence of chlorophyll *a*: Relationship to photosynthesis and chlorophyll concentration in the western south Pacific gyre. *Limnology & Oceanography*, 34(5): 868-881.
- Kirk, J. T. O. (1994). *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. Cambridge University Press, New York. 509 p.

- Lara-Lara, J. R., J. E. Valdéz-Holguín, and L. C. Jiménez-Pérez. (1984). Plankton studies in the Gulf of California during the 1982-1983 El Niño. *Tropical Ocean-Atmosphere News-Letter*, 28: 16-17.
- Lara-Lara, J. R., S. Álvarez-Borrego, and L. F. Small. (1980). Variability and tidal exchange of ecological properties in a costal lagoon. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 11(6): 613-637.
- Lee, T., and M. J. McPhaden. (2010). Increasing intensity of El Niño in the central-equatorial Pacific. *Geophysical Research Letters*, 37(14). L14603.
- Lynn, R. J., and J. J. Simpson. (1987). The California Currents System: The seasonal variability of its physical characteristics. *Journal of Geophysical Research*, 92(12): 947-966.
- Martínez-Gaxiola, M. D., R. Durazo, and G. Gaxiola-Castro. (2010). Influence of the geostrophic transport of phosphates on primary production off Baja California Mexico. *Ciencias Marinas*, 36(2): 135 -145.
- McClain, E. P., W. G. Pichel, and C. C. Walton. (1985). Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperature. *Journal of Geophysical Research*, 90(C6): 11587-11601.
- Millán-Nuñez, R., S. Álvarez-Borrego, and D. M. Nelson. (1982). Effects of physical phenomena on the distribution of nutrients and phytoplankton productivity in a coastal lagoon. *Estuarine, Coastal, and Shelf Science*, 15(3): 317-335.
- NOAA (2015). National Oceanic and Atmospheric Administration. Recuperado 15 de Julio de 2015 <http://www.esrl.noaa.gov/psd/map/images/sst/sst.anom.month.gif>.
- NOAA (2015). National Oceanic and Atmospheric Administration. Recuperado 28 de Junio de 2015. <http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/table.html>.
- Ortiz Ahumada, J. C. (2015). *Variación espacial y temporal de la biomasa y producción fitoplanctónicas frente a Cabo San Lázaro y Cabo San Lucas*, B. C. S. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B. C. 47 p.
- Peláez, J., and J. A. McGowan. (1986). Phytoplankton pigment patterns in the California Current as determined by satellite. *Limnology & Oceanography*, 31(5): 927-950.
- Platt, T., C. Caverhill, and S. Sathyendranath. (1991). Basin-scale estimates of oceanic primary production by remote sensing: The North Atlantic. *Journal of Geophysical Research*, 96(C8): 15147-15159.

- Quinn, W. H., D. O. Zopf, K. S. Short, and R. T. W. Kuo–Yang. (1978). Historical trends and statistics of the Southern Oscillation, El Niño and Indonesian droughts. *Fisheries Bulletin*, 76: 663-678.
- Ramírez-León, M. R., S. Álvarez-Borrego, C. Turrent-Thompson, G. Gaxiola-Castro, and G. Heckel-Dziendzielewski. (2015). Nutrient input from the Colorado River to the northern Gulf of California is not required to maintain a productive pelagic ecosystem. *Ciencias Marinas*, 41(2): 169-188.
- Reid, J. L. (1988). Physical Oceanography. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports*, 29: 42-65.
- Reyes-Salinas, A., R. Cervantes-Duarte, R. A. Morales-Pérez y J. E. Valdéz-Olguín. (2003). Variabilidad estacional de la productividad primaria y su relación con la estratificación vertical en la Bahía de la Paz, B. C. S. *Hidrobiologica*, 13(2): 103-110.
- Rosales-Casián, J. (1996). Ictiofauna de la Bahía de San Quintín Baja California, México y su costa adyacente. *Ciencias Marinas*, 22(4): 443-458.
- Santamaría-del-Ángel, E., R. Millán-Núñez, A. González-Silvera, and F. Muller-Karger. (2002). The color signature of the Ensenada Front and its seasonal and interannual variability. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports*, 43: 155–161.
- Santamaría-del-Ángel, E., S. Álvarez-Borrego, and F. E. Müller-Karger. (1994). Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery. *Journal of Geophysical Research*, 99(C4): 7411-7421.
- Santamaría-del-Ángel, E., S. Álvarez-Borrego, R. Millán-Núñez y F. E. Müller-Karger. (1999). Sobre el efecto de las surgencias de verano en la biomasa fitoplanctónica del Golfo de California. *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural*, 49: 207-212.
- Schneider, N. E., D. Lorenzo, and P. P. Niller. (2005). Salinity variations in the Southern California Current. *American Meteorological society*, 35(8): 1421-1436.
- Sosa-Avalos, R., G. Gaxiola-Castro, B. G. Mitchell y J. Cepeda-Morales. (2010). Parámetros fotosintéticos y producción primaria estimada a partir de sensores remotos durante 1999. En: G. Gaxiola-Castro, R. Durazo (Eds.), *Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California, 1997-2007. Diez años de investigaciones mexicanas de la Corriente de California* (pp. 319–332). México, D. F. SEMARNAT-INE-CICESE-UABC.
- Soto-Mardones, L., A. Parés-Sierra, J. García, R. Durazo, and S. Hormazabal. (2004). Analysis of the mesoscale structure in the IMECOCAL region (off Baja California)

from hydrographic, ADCP and altimetry data. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51(6): 785–798.

Steemann-Nielsen, E. (1952). The use of radioactive carbon (C^{14}) for measuring organic production in the sea. *Journal du Conseil Permanent pour l'exploration de la Mer*, 18(2): 117-140.

Strub, P.T., P. M. Kosro, and A. Huyer. (1991). The nature of the cold filaments in the California Current System. *Journal of Geophysical Research*, 96(C8): 14743-14768.