

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, B. C.**



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

**Variación espacial y temporal de la biomasa y producción
fitoplanctónicas frente a Cabo San Lázaro y Cabo San
Lucas, B. C. S.**

Tesis

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

Presenta:

José Carlos Ortiz Ahumada

Ensenada, Baja California, México
2015

Tesis defendida por
José Carlos Ortiz Ahumada
y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Saúl Álvarez Borrego
Director del Comité

Dr. Luis Eduardo Calderón Aguilera

Dr. José Gómez Valdés



Dr. David Alberto Rivas Camargo
Coordinador del Posgrado en Ecología Marina

Dr. Jesús Favela Vara
Director de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis de **José Carlos Ortiz Ahumada**, como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ecología Marina.

Variación espacial y temporal de la biomasa y producción fitoplanctónicas frente a Cabo San Lázaro y Cabo San Lucas, B. C. S.

Resumen aprobado por:

Dr. Saúl Álvarez Borrego
Director de tesis

El objetivo fue caracterizar la variación espacial y temporal de la temperatura superficial del mar (TSM), la concentración de clorofila *a* (Chl_{sat}) y la producción primaria (PP) en transectos de 300 km en la parte sur del Sistema de la Corriente de California (SCC), frente a cabo San Lázaro (CSLA) y Cabo San Lucas (CSLU); y se generaron series de tiempo para cuadrantes costeros frente a estos dos lugares. Con la comparación se pudieron inferir los agentes forzantes de las variaciones de estas propiedades. Se utilizaron composiciones mensuales satelitales de TSM y Chl_{sat} , del sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer a bordo del satélite Aqua (Aqua-MODIS); y de PP calculada con base en las anteriores, para el período 2002-2014. Se generó un año promedio para cada transecto como aproximación a la climatología. Los resultados de ésta muestran Chl_{sat} y PP con valores más altos en la zona costera (de la costa hasta ~110 km mar adentro), 4.0 mg m^{-3} y $4.5 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, respectivamente para CSLA, y 1.4 mg m^{-3} y $1.8 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, respectivamente para CSLU, disminuyendo en la zona oceánica hasta $\sim 0.1 \text{ mg m}^{-3}$ y $0.4 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, en ambos transectos. Mientras que la TSM presentó, en general, valores mínimos en la zona costera ($\sim 17.0 \text{ }^\circ\text{C}$) y máximos mar adentro (hasta $29.4 \text{ }^\circ\text{C}$). TSM presentó a menudo mínimos y máximos que sugieren fenómenos de mesoescala como meandros y remolinos. En general, se observó que en la zona costera de CSLA se presentaron valores más altos de Chl_{sat} que en la de CSLU, pero en la zona oceánica los valores a menudo fueron mayores en CSLU que en CSLA debido a la separación de la Corriente de California de la península, cerca de cabo San Lucas. La variación estacional fue dominante en ambos lugares, lo que indica la influencia grande de las surgencias. Por ello, en términos de Chl_{sat} y PP el año se dividió en dos épocas: en CSLA una primera época de febrero a agosto; y en CSLU de febrero a julio. Esto 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. Esta variación estacional es muy marcada en la parte más sureña del SCC y no mantiene a lo largo del año la producción fitoplanctónica alta que caracteriza al SCC en la mayor parte de su extensión. El análisis espectral muestra que la variación de TSM, Chl_{sat} y PP de año a año de ambos lugares tuvo componentes claros estacionales e interanuales, mucho más marcados para cabo San Lázaro que para cabo San Lucas, y con la mayor variación en el ciclo anual. En CSLU se tuvo un impacto significativo de dos El Niño de tipo Pacífico central (2004-2005 y 2009-2010) y un El Niño de tipo Pacífico oriental (2014-). El evento de 2010 fue el único que causó que en la primera época Chl_{sat} bajara a valores $< 1 \text{ mg m}^{-3}$ y lo hizo en la zona costera de CSLU. Éste fue el único evento con impacto significativo en CSLA. La dinámica costera en el SCC varía espacialmente y esto hace que los impactos de eventos como El Niño sean diferentes en lugares geográficos diferentes.

Palabras clave: Sur del Sistema de la Corriente de California, Datos satelitales, Biomasa y producción fitoplanctónicas, Variación espacio-temporal.

Abstract of the thesis presented by **José Carlos Ortiz-Ahumada** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Marine Ecology.

Spatial and temporal variation of phytoplankton biomass and production off Cabo San Lázaro and Cabo San Lucas, B. C. S.

Abstract approved by:

Dr. Saúl Álvarez-Borrego

The objective was to characterize the spatial and temporal variation of sea surface temperature (SST), chlorophyll a concentration (Chl_{sat}), and primary production (PP) for 300 km transects in the southern California Current System (CCS), off Cabo San Lázaro (CSLA), and off Cabo San Lucas (CSLU); and time series were generated for quadrants off these two localities. Comparing these two areas an inference was made on the forcing agents causing variations of seawater properties. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer on board the satellite Aqua (Aqua-MODIS) monthly composites of SST and Chl_{sat} , and those of PP calculated based on the former two, for 2002–2014, were used. An “average year” was generated for each transect and each variable, as an approximation to the climatology. Results show that Chl_{sat} and PP were higher in the coastal zone (from the coast to ~110 km offshore) than in the oceanic zone furthest offshore: 4.0 mg m^{-3} and $4.5 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, respectively for CSLA, and 1.4 mg m^{-3} and $1.8 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, respectively for CSLU, in the coastal zone, compared to $\sim 0.1 \text{ mg m}^{-3}$ and $0.4 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, in the oceanic zone of both transects. While, SST in general presented lower values inshore (down to $\sim 17.0 \text{ }^\circ\text{C}$) than offshore (up to $29.4 \text{ }^\circ\text{C}$). Often, SST presented minima and maxima suggesting mesoscale phenomena such as meanders and eddies. In general, the coastal zone of CSLA had higher Chl_{sat} values than in CSLU, because of more intense upwelling events at CSLA. But in the oceanic zone often Chl_{sat} values were higher at CSLU than at CSLA because of the separation of the California Current from the peninsula, near Cabo San Lucas, carrying relatively high Chl_{sat} values into the oceanic zone. The seasonal variation was dominant at both transects, which indicates the strong influence of upwelling on these properties. Because of this, in terms of Chl_{sat} and PP the year was divided in two periods: at CSLA a first period was from February through August; and at CSLU from February through July. This has a close relation to the CCS dynamics. The flux of the California Current and coastal upwelling intensify in spring and the beginning of summer, generating a strong seasonal biological signal. This seasonal signal is well defined at the southernmost part of the CCS, and it does not maintain during the whole year the high phytoplankton production that characterizes the CCS throughout most of its geographic distribution. Spectral analysis shows that the year-to-year variation of SST, Chl_{sat} and PP, at both places, had clear seasonal and interannual components, much larger for CSLA than for CSLU, and with the greatest variation in the annual cycle. There was a significant impact of two central Pacific type El Niño (2004-2005 and 2009-2010) and of one eastern Pacific type El Niño (2014-) at CSLU. The 2010 event was the only one causing Chl_{sat} values $< 1 \text{ mg m}^{-3}$, during the first period of the coastal zone of CSLU. This was the only event with significant impact on CSLA. Coastal dynamics in the CCS has spatial variations and this may cause different effects of El Niño events at different locations.

Key words: Southern California Current System, Satellite data, Phytoplankton biomass and production, Spatial and temporal variation.

Dedicatoria

*A mis dos ángeles en el cielo, Mi Güera y la Chamacona
María Graciela Cervantes Ruelas y Adriana Carolina Ahumada Carlos,
por ustedes y para ustedes.*

*A los seres que me dieron la vida, saben que este logro es más suyo que
mío, los amo papás.*

A mi familia.

Agradecimientos

A CONACYT por el apoyo económico con el N° de beca 298168 para mis estudios de maestría y la elaboración de ésta tesis.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B. C., por aceptarme como parte de éste durante mis estudios.

A la Administración Nacional de la Atmósfera y del Espacio (NASA, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos, por poner a la disposición de la comunidad científica internacional las imágenes y datos que generan sus sensores orbitando en satélites.

A mi director de tesis, mentor y gran amigo el Dr. Saúl Álvarez Borrego, gracias por el apoyo brindado desde que fue mi profesor hasta el día de hoy, por compartir todos sus conocimientos así como brindarme sabias palabras de aliento en los momentos más difíciles.

A los miembros de mi comité de tesis, al Dr. Luis Eduardo Calderón Aguilera y al Dr. José Gómez Valdés, sinceramente gracias por todo su apoyo y comentarios brindados durante la elaboración del presente trabajo.

A mis profesores: Vicente Ferreira, Elena Solana, Juan Carlos Herguera, Lucila Lares, Jorge Rosales, Sharon Herzka, Ernesto García, Helmut Maske, Bertha Lavaniegos, sinceramente gracias por aportar sus conocimientos conmigo.

A Elizabeth Farías Barajas, gracias Eli por el apoyo brindado siempre, esto no hubiera sido lo mismo sin tus sabios consejos y palabras de aliento.

A mi "batigrupo:" Fer, Yai y Anely, saben que ustedes es algo de lo mejor que me pudo pasar durante estos dos años, me llevo grandes recuerdos y momentos a su lado, las quiero chicas.

A mis compañeros de maestría: Tati (la hermosa), Uriel, Magda (iuuu oiga), Bárbara (mujer), Amparo (mujercilla), Maite, Jorge Eduardo, José (chileno), Schery, Iván, Bea, Zyanya gracias chic@s saben que siempre tendré un gran recuerdo de ustedes, los quiero.

A toda mi familia: abuelos, tías, tíos, primos, sobrinos, en fin saben todo lo que significan para mí, pero necesito dos hojas para nombrarlos a todos y para que nadie se quede sentido, muchas pero muchas gracias.

A mis amigos patasaladas y facimareños: Nez (marrana), Ame (gorda), Oscar (cabezón), Anabel (mongui), Eduardo (Cienfuegos), Martín (mujerzuela), Anayeli (bruja), Luis (mochis), Michael (bombón), Marilú (vaca mastuda), Martha (martuchis), Rosy, Estela (amiguís), Gildardo (Yuli), José Antonio (Toni).

A todos aquellos que directa o indirectamente se vieron involucrados en mi tesis muchísimas, muchísimas gracias estaré eternamente agradecido de verdad.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español	ii
Resumen en inglés	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Lista de figuras	vii
Lista de tablas	viii
Capítulo 1 - Introducción	
1.1 Introducción general.....	1
1.2 El Sistema de la Corriente de California.....	2
1.3 Justificación.....	3
1.4 Hipótesis.....	3
1.5 Objetivos.....	4
1.5.1 Objetivo general.....	4
1.5.2 Objetivos particulares.....	4
Capítulo 2 - Materiales y métodos	
2.1 Área de estudio.....	5
2.2 Obtención de datos.....	5
2.3 Análisis estadístico.....	7
Capítulo 3 – Resultados	
3.1 Aproximación a la climatología.....	9
3.2 Variación año a año.....	15
Capítulo 4 - Discusiones	27
Capítulo 5 – Conclusiones	35
Lista de referencias bibliográficas	37

Lista de figuras

Figura		Página
1	Zonas de estudio: transectos frente a cabo San Lázaro (CSLA) y frente a cabo San Lucas (CSLU).....	6
2	Año promedio de TSM, Chl _{sat} y PP para el transecto frente a cabo San Lázaro (CSLA) y frente a cabo San Lucas (CSLU).....	11
3	Diagrama Hovmöller de TSM para el transecto frente a cabo San Lázaro.....	16
4	Diagrama Hovmöller de TSM para el transecto frente a cabo San Lucas.....	16
5	Ejemplos de distribuciones espaciales de TSM con máximos y mínimos: a) para el transecto frente a cabo San Lázaro (CSLA) (rojo noviembre 2001, verde septiembre 2010, azul mayo 2006); b) para el transecto frente a cabo San Lucas (CSLU) (rojo agosto 2009, verde diciembre 2014, azul junio 2004).....	20
6	Diagrama Hovmöller de Chl _{sat} para el transecto frente a cabo San Lázaro.....	21
7	Diagrama Hovmöller de Chl _{sat} para el transecto frente a cabo San Lázaro.....	21
8	Series de tiempo de TSM °C para los cuadrantes de 18x18 km ² frente a cabo San Lázaro (azul) y frente a cabo San Lucas (rojo), respectivamente.....	23
9	Series de tiempo de Chl _{sat} (verde, mg m ⁻³) y PP (naranja, g C m ⁻² d ⁻¹) para el cuadrante de 18x18 km ² frente a cabo San Lázaro.....	23
10	Series de tiempo de Chl _{sat} (verde, mg m ⁻³) y PP (naranja, g C m ⁻² d ⁻¹) para el cuadrante de 18x18 km ² frente a cabo San Lucas....	23
11	Análisis espectral de TSM, Chl _{sat} y PP. A) Frente a cabo San Lázaro: a) TSM; b) Chl _{sat} ; c) PP. B) Frente a cabo San Lucas: a) TSM; b) Chl _{sat} ; c) PP. En el eje vertical EDP significa Espectro de Potencia o espectro de varianza normalizada, y las unidades son las de la variable al cuadrado dividida por la unidad de frecuencia [por ejemplo: (mg m ⁻³) ² (ciclos por día) ⁻¹ para Chl _{sat}].....	26
12	Ejemplo de imagen mostrando la Corriente de California separándose de la península y acarreando valores relativamente altos de Chl _{sat} hacía aguas oceánicas: a) Junio 2007 y b) Junio 2009.....	28
13	El índice multivariado del El Niño MEI (NOOA).....	32

Lista de tablas

Tabla		Página
1	Valores máximos y mínimos de TSM ($^{\circ}\text{C}$), para cada año, de la zona costera y la zona oceánica para el transecto frente a cabo San Lázaro (CSLA) y para el transecto frente a cabo San Lucas (CSLU) (ZC = Zona Costera y ZO = Zona Oceánica).....	17
2	Valores máximos y mínimos de Chl_{sat} (mg m^{-3}), para cada año, de la zona costera y la zona oceánica para el transecto frente a cabo San Lázaro (CSLA) y para el transecto frente a cabo San Lucas (CSLU) (ZC = Zona Costera y ZO = Zona Oceánica).....	19
3	Valores máximos y mínimos de PP ($\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$), para cada año, de la zona costera y la zona oceánica para el transecto frente a cabo San Lázaro (CSLA) y para el transecto frente a cabo San Lucas (CSLU) (ZC = Zona Costera y ZO = Zona Oceánica).....	22
4	Resultados de las pruebas de Mann-Whitney comparando conjuntos de datos pareados de Chl_{sat} , según se indica (C = costera; O = Oceánica).....	24

Capítulo 1- Introducción

1.1- Introducción general

La producción primaria (PP) y la biomasa fitoplanctónicas son conocidas como las variables a tomar en cuenta para determinar la fertilidad de los océanos y el efecto que tienen en el ciclo del carbono (Gómez y Chanut, 1993). A pesar de que la biomasa fitoplanctónica oceánica representa solo el 1-3% de la biomasa vegetal sobre el planeta, estos organismos se encargan de fijar casi la misma cantidad de carbono que los vegetales terrestres, alrededor del 50% de la producción primaria (Sakshaug *et al.*, 1997) correspondiente a $\sim 45 \times 10^9$ ton C año⁻¹ (Falkowski *et al.*, 1998).

La cantidad y distribución del fitoplancton están influenciadas directamente por la tasa fotosintética de una determinada zona geográfica. La concentración de clorofila (Chl) se utiliza para representar la biomasa fitoplanctónica por la facilidad relativa con la que se determina. El proceso fotosintético depende principalmente de los pigmentos que absorben la luz, siendo la clorofila *a* el pigmento central en este proceso, pues se encuentra en casi todo los tipos de algas, con la excepción de algunas proclorofitas marinas (Cullen, 1982; Falkowski y Raven, 1997).

Para diferentes zonas oceánicas, los nutrientes, tales como nitratos, fosfatos y silicatos, estimulan el crecimiento del fitoplancton. Dichos nutrientes son muy abundantes en las zonas costeras ya que son aportados por las desembocaduras de ríos y las surgencias costeras, ocasionando así una producción elevada de biomasa fitoplanctónica. En la península de Baja California no hay ríos por lo que las surgencias costeras son el fenómeno principal que fertiliza la zona eufótica. Sin embargo, en estas zonas también se encuentran grandes cantidades de zooplancton, controlando así de cierta manera los grandes florecimientos fitoplanctónicos a través del pastoreo (Hartline, 1980). El fitoplancton es la base de la trama trófica en los ecosistemas acuáticos. Cuando la concentración de dichos organismos es muy elevada en un lugar determinado se considera una zona eutrófica, lo que permite el desarrollo de los siguientes niveles de la trama trófica creando así el sitio ideal para la proliferación de grandes comunidades de peces, mamíferos, aves e invertebrados. Además, esto permite el desarrollo pesquero de la región.

1.2- El Sistema de la Corriente de California

El Sistema de la Corriente de California (SCC) es una de las áreas marinas mejor conocidas y más estudiadas del mundo. Es un área transicional muy grande, que forma la frontera oriental del giro del Pacífico norte. Básicamente, consiste de una corriente superficial (hasta 300 m de profundidad) muy ancha (~500 km), que transporta agua de la divergencia sub-ártica que proviene del oeste y frente a América gira hacia el sur. Agua Ecuatorial del Pacífico penetra a través del límite sur del SCC en la forma de una contracorriente sub-superficial cerca de la costa (200 m de profundidad). Hasta hace poco se pensaba que esta contracorriente se manifestaba en la superficie como un flujo costero estrecho hacia el polo en otoño e invierno (Lynn y Simpson, 1987), pero recientemente se tiene evidencia de que las contracorrientes subsuperficial y superficial son fenómenos independientes (R. Durazo, UABC, comunicación personal). El SCC se caracteriza por una gran cantidad de meandros, remolinos, filamentos, frentes y estructuras de mesoescala que se extienden de decenas a cientos de kilómetros hacia fuera de la costa y con duración de días a meses (Espinosa-Carreón, 2005; Barocio-León *et al.*, 2007). Los eventos de surgencia, que son generados por el viento y tienen variabilidad estacional, incorporan aguas frías y ricas en nutrientes a lo largo de la costa, de Washington a Baja California (Huyer, 1983).

El área frente a Cabo San Lázaro (CSLA) es el límite sur del Centro de Actividad Biológica (CAB) del Golfo de Ulloa (Lluch-Belda, 2000). Para esta área se han reportado valores de PP y Chl superficial derivada de satélite (Chl_{sat}) de $0.31 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Martínez-López y Verdugo-Díaz, 2000) y hasta de 4.5 mg m^{-3} (Zuria-Jordán *et al.*, 1995), respectivamente. Dichos valores son causados por eventos de surgencia intensos, ya que se ha observado que una vez que las surgencias se relajan y llega el efecto de la contracorriente superficial los valores de PP y Chl disminuyen a valores por debajo de $0.08 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ y 0.36 mg m^{-3} , respectivamente (Martínez-López y Verdugo-Díaz, 2000; Zuria-Jordán *et al.*, 1995). Al sur de la península, para el área frente a Cabo San Lucas se han reportado valores de clorofila de 0.32 mg m^{-3} y de productividad primaria de $0.16 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, la clorofila se estimó con muestras de agua y la PP por inoculación de ^{14}C , durante un crucero oceanográfico realizado en 1999 (Lara-Lara y Bazán-Guzmán, 2005).

1.3- Justificación

Se requiere generar conocimiento sobre la zona de estudio ya que se considera de vital importancia por ser una zona de transición con influencia de varias masas de agua, además de que la fisiografía y batimetría locales convierten ciertos puntos en zonas de surgencias intensas, como la zona frente a Cabo San Lázaro, en contraparte con lo que se presenta en la zona frente a Cabo San Lucas (CSLU) con valores de Chl_{sat} y PP mucho menores que en Cabo San Lázaro. Se tiene muy poca información de PP y Chl_{sat} que detalle la variabilidad temporal, con escalas de meses a años, y la espacial de decenas a centenas de kilómetros, en estas dos zonas, y su relación con la dinámica física. Esto incluye las variaciones estacionales e interanuales, y los forzantes físicos en estas escalas.

1.4- Hipótesis

- Los valores de Chl_{sat} de la zona costera, de la época con surgencias intensas, comprendida de febrero a julio (primera época), son mayores que los de la época con surgencias débiles, comprendida de agosto a enero (segunda época), en ambos transectos.
- Los valores de Chl_{sat} de la zona oceánica, de la primera época son afectados por la dinámica costera y por lo tanto son mayores que los de la segunda época en ambos transectos.
- Los valores de Chl_{sat} de la zona costera son afectados por una dinámica más intensa que en la zona oceánica y por lo tanto son mayores que los de esta última en ambos transectos, en la primera y en la segunda épocas.
- Los valores de Chl_{sat} son más afectados por el flujo de la Corriente de California y por surgencias más intensas frente a Cabo San Lázaro que frente a Cabo San Lucas, y por lo tanto son mayores frente al primero, tanto en la zona costera como en la zona oceánica, en cada una de las dos épocas.
- Existen cambios interanuales significativos de TSM, Chl_{sat} y PP, en ambos transectos.

1.5- Objetivos

1.5.1- Objetivo General

- Describir y cuantificar las variaciones de la biomasa y producción fitoplanctónicas de la costa occidental de Baja California Sur frente a Cabo San Lázaro y Cabo San Lucas, en las escalas estacional e interanual, explicando los posibles agentes forzantes de estas variaciones.

1.5.2- Objetivos específicos:

- Describir la variación estacional e interanual de la temperatura superficial del mar (TSM), Chl_{sat} y PP, en transectos de 300 km de largo frente a Cabo San Lázaro y Cabo San Lucas.
- Comparar los resultados obtenidos entre las dos zonas, así como otras frente a la península de Baja California que hayan sido estudiadas, con el fin explicar sus posibles diferencias en función de los agentes forzantes.
- Establecer aproximaciones a las medias climatológicas de estas variables.

Capítulo 2- Materiales y métodos

2.1- Área de estudio

La zona oceánica frente a Bahía Magdalena ha sido considerada hidrodinámicamente compleja ya que muestra una alta variabilidad estacional e interanual, los patrones de circulación generan una alternancia entre condiciones eutróficas y oligotróficas (Longhurst *et al.*, 1967; Walsh *et al.*, 1997). Las condiciones eutróficas ocurren entre marzo y junio y están asociadas directamente con los vientos fuertes del noroeste, con la Corriente de California bien desarrollada y con los índices máximos de surgencias (Bakun y Nelson 1977). Las condiciones oligotróficas se presentan entre septiembre y diciembre y están vinculadas con la presencia de masas de agua con alta salinidad, transportadas por la contracorriente costera superficial, y la relajación de los eventos de surgencias. Julio, agosto, enero y febrero son considerados como meses de transición (Bakun y Nelson 1977).

Para la zona frente a cabo San Lucas se han descrito frentes oceánicos. Dichos frentes se manifiestan hasta 120 m de profundidad y se deben al encuentro de diferentes masas de agua entre las que destacan la del golfo de California, la de la Corriente de California y la del Pacífico subtropical nororiental (Griffiths, 1953). Walsh *et al.* (1973) identificaron una cuarta masa de agua que también puede influir en la formación de frentes, el agua subtropical subsuperficial, entre los 50 y 200 m de profundidad. El frente de cabo San Lucas es persistente la mayor parte del año, aunque existen meses que se observa cierto debilitamiento como consecuencia de la disminución del efecto de la Corriente de California en la zona. El patrón de circulación del frente presenta una distribución del agua cálida proveniente del golfo, que se mueve hacia el oeste cerca de la costa y el agua fría de la Corriente de California es transportada hacia el oeste fuera de la costa (Álvarez-Arellano y Molina-Cruz, 1984).

2.2- Obtención de datos

Se utilizaron composiciones mensuales de TSM y de concentración de clorofila (Chl_{sat}) del sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer a bordo del satélite Aqua (EOS PM) (Aqua-MODIS), del periodo 2002-2014. Estas composiciones se obtuvieron de la página de la NASA (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>), con nivel 3 de

procesamiento, con tamaño de pixel de $9 \times 9 \text{ km}^2$. También se obtuvieron imágenes de PP del sitio web del Ocean Net Primary Productivity de Oregon State University (<http://www.science.oregonstate.edu/ocean.productivity/index.php>). Las imágenes se

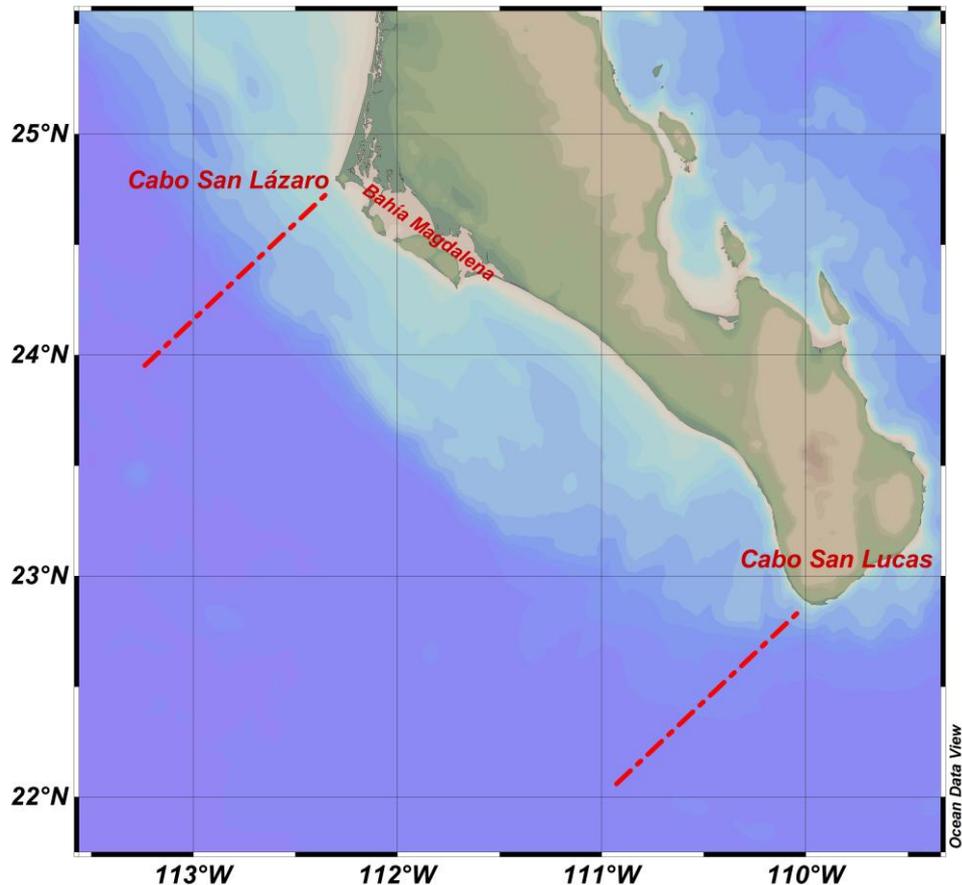


Figura 1. Zonas de estudio: transectos frente a cabo San Lázaro (CSLA) y frente a cabo San Lucas (CSLU).

descargaron en formato .hdr (Hierarchical Data Format). PP es proporcionada como un producto estándar (ya está calculada) que se calcula a partir de Chl_{sat} , TSM, la duración del día solar y la radiación fotosintéticamente activa (PAR_0), usando el modelo generalizado verticalmente integrado de producción primaria de Behrenfeld y Falkowsky (1997) (VGPM, por sus siglas en inglés): $\text{PP} = P^{\text{b}_{\text{opt}}} f(\text{PAR}_0) (\text{DL}) \text{Chl}_{\text{sat}} Z_{\text{eu}}$ $\text{g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, donde $P^{\text{b}_{\text{opt}}}$ es la razón fotosintética normalizada (fotosíntesis por unidad de clorofila) en el nivel óptimo de PAR de la columna de agua [$\text{mg C (mg Chl)}^{-1} \text{ h}^{-1}$], $f(\text{PAR}_0)$ es una función que representa el efecto de la luz en toda la zona eufótica y a través de todo el día, DL (day length) es la longitud del día en horas (de acuerdo a la latitud y la fecha), y Z_{eu} es la profundidad de la zona eufótica (m) calculada a partir de Chl_{sat} de acuerdo con Morel y Berthon (1989). El VGPM es un modelo no-espectral, con

distribución vertical homogénea de la biomasa, con la producción verticalmente integrada. Los pixeles de PP fueron de $18 \times 18 \text{ km}^2$.

Las imágenes de satélite se procesaron con programática de la NASA SeaDAS Versión 7.1 obtenida del sitio web (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/seadas/>). Para describir la variación espacial y temporal de TSM, Chl_{sat} y PP se muestrearon dos transectos de las composiciones mensuales (Fig. 1), uno frente a cabo San Lázaro (CSLA) y otro frente a cabo San Lucas (CSLU); y para describir la variación temporal más en detalle se generaron dos series de tiempo de los promedios mensuales de dos cuadrantes: uno ubicado frente a cabo San Lázaro y otro frente a cabo San Lucas; de 2×2 pixeles ($18 \times 18 \text{ km}^2$) para TSM y Chl_{sat} , y de un pixel para PP.

Como una primera aproximación a la climatología, se generó un “año promedio” para cada variable y para cada transecto. Para hacer esto, se promediaron todos los datos de los eneros para obtener el “enero promedio”, y así sucesivamente con el resto de los meses, para cada variable y para cada transecto. Para generar una climatología verdadera se requieren datos de por lo menos 30 años.

2.3- Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se utilizó el software STATISTICA v.7.0.2 y el R. Las distribuciones de Chl_{sat} 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 interanuales significativas en cada transecto. Al encontrar diferencias significativas se realizaron pruebas post hoc para encontrar cuales años tenían diferencias con otros.

Se construyeron diagramas Hovmöller con los datos de TSM y Chl_{sat} de todos los años. Los diagramas Hovmöller son series bidimensionales de tiempo y espacio que permiten visualizar las variaciones de la propiedad usando tonos de grises o colores.

Se aplicó análisis espectral de las series de tiempo de las tres variables, de cada cuadrante costero, con el fin de caracterizar en cuáles frecuencias hubo la mayor variación.

Capítulo 3- Resultados

3.1- Aproximación a la climatología

En términos generales el año promedio presentó una variación espacial muy clara para las dos zonas de estudio, en CSLA y CSLU. En ambos transectos la TSM tuvo una distribución monótonica en la primera mitad del año, la cual mostró una variación muy marcada con valores bajos en la zona costera y valores elevados en la zona oceánica. En CSLA, a partir de agosto se presentaron máximos y mínimos. Sin embargo, en CSLU este fenómeno se presentó en junio, julio y diciembre. En CSLA, en agosto hubo tres mínimos, uno cerca de la costa, otro en ~160 km de la costa, y uno más en la parte más oceánica; y dos máximos, uno en ~80 km y otro en ~270 km. Entre septiembre y noviembre sólo se presentó un máximo, entre 50 y 100 km, después del cual la temperatura disminuyó hacia mar adentro. En diciembre TSM varió espacialmente sólo ~0.4 °C, con los valores más bajos cerca de la costa y en la parte más oceánica. En CSLU la variación espacial de TSM de agosto a noviembre tuvo nuevamente una variación monótonica pero con reversión del gradiente, con valores descendiendo de valores relativamente altos cerca de la costa hacia mar adentro. En general, el “año promedio” para ambos transectos se dividió en dos “épocas”: de enero a junio, con temperaturas relativamente bajas (<23 °C) aún en la zona alejada de la costa; y de julio a diciembre, con temperaturas relativamente altas (>23 °C, hasta ~29 °C), con excepción de CSLA en diciembre que tuvo valores entre 22.0 y 23.0 °C (Fig. 2).

En el “año promedio”, la TSM fue claramente mayor en CSLU que en CSLA, hasta ~4.5 °C en la zona costera y hasta 3.6 °C en la zona más alejada de la costa. El valor máximo presentado en CSLA fue 27.0 °C y el mínimo fue 17.3 °C; mientras que para CSLU el valor máximo fue 28.9 °C y el mínimo 20.9 °C. En ambos transectos los máximos y mínimos se presentaron en septiembre y abril, respectivamente; y en ambos casos fueron en la zona costera. La diferencia de TSM entre cerca de la costa y mar adentro es en general mayor que un grado, con valores de hasta ~3 °C, pero en verano fue tan pequeña como ~0.6 °C. Para la zona más oceánica los máximos y mínimos fueron 25.8 °C y 20.8 °C, respectivamente, para CSLA; y 27.5 °C y 22.8 °C respectivamente, para CSLU; en CSLA de nuevo se presentaron en septiembre y abril,

respectivamente; pero en CSLU se presentaron en septiembre y mayo, respectivamente (Fig. 2).

En función de la distribución espacial de Chl_{sat} , la zona costera se puede considerar desde la costa hasta ~ 100 km (sobre todo de mayo a julio) (Fig. 2). En general, la climatología en términos de Chl_{sat} y PP en CSLA mostró condiciones biológicas separadas en dos épocas: la primera que comprendió de febrero a agosto, siendo junio el mes cuando se presentó el valor más alto (6.6 mg m^{-3}) en la zona costera; la segunda época fue de septiembre a enero, en la cual se observaron valores bajos comparados con la época descrita anteriormente. En esta segunda época el valor más alto fue 1.0 mg m^{-3} y se presentó en enero en la zona costera. En todo el “año promedio” el valor más bajo fue $\sim 0.1 \text{ mg m}^{-3}$ y se presentó en la zona más alejada de la costa. Para CSLU también se observaron dos épocas bien marcadas: la primera de febrero a julio, siendo en junio donde se observó el valor más alto de Chl_{sat} (2.0 mg m^{-3} en la zona costera); la segunda época fue de agosto a enero, con valores en general más bajos en la zona costera que en la otra época ($< 1.0 \text{ mg m}^{-3}$, con excepción del pixel más costero de enero). Al igual que para CSLA, en todo el “año promedio” el valor más bajo de CSLU fue $\sim 0.1 \text{ mg m}^{-3}$ y se presentó en la zona más alejada de la costa (~ 250 a 300 km).

En el “año promedio”, las curvas de PP son 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 CSLA, el valor máximo de la primera época se presentó en junio ($4.0 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) y el de la segunda en enero ($0.9 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), en la zona costera. Los mínimos fueron $0.4 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para toda la primera época y $0.3 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para toda la segunda época (con excepción de enero que tuvo un mínimo de $0.4 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), y se presentaron en la zona más alejada de la costa. En CSLU, en la primera época se observó un máximo de PP en junio de $2.3 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, y en la segunda época fue $0.7 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ en enero, ambos en la zona costera. El valor mínimo de PP para CSLU, en toda la primera época también fue $0.4 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$; y en toda la segunda época fue $0.3 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (con excepción de enero que tuvo un mínimo de $0.4 \text{ g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), y ambos se presentaron en la zona más alejada de la costa.

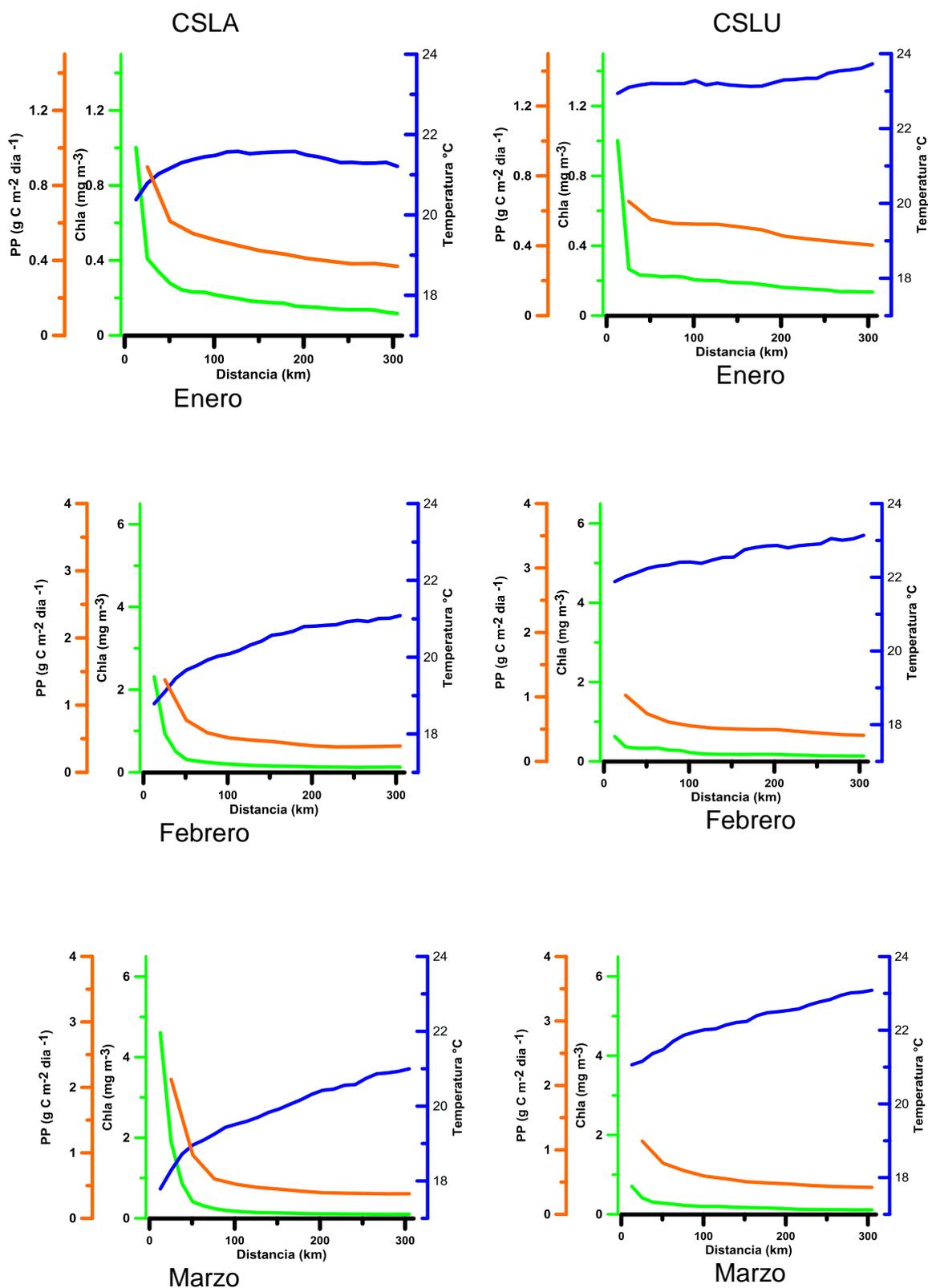


Figura 2. Año promedio de TSM, Chl_{sat} y PP para el transecto frente a cabo San Lázaro (CSLA) y frente a cabo San Lucas (CSLU).

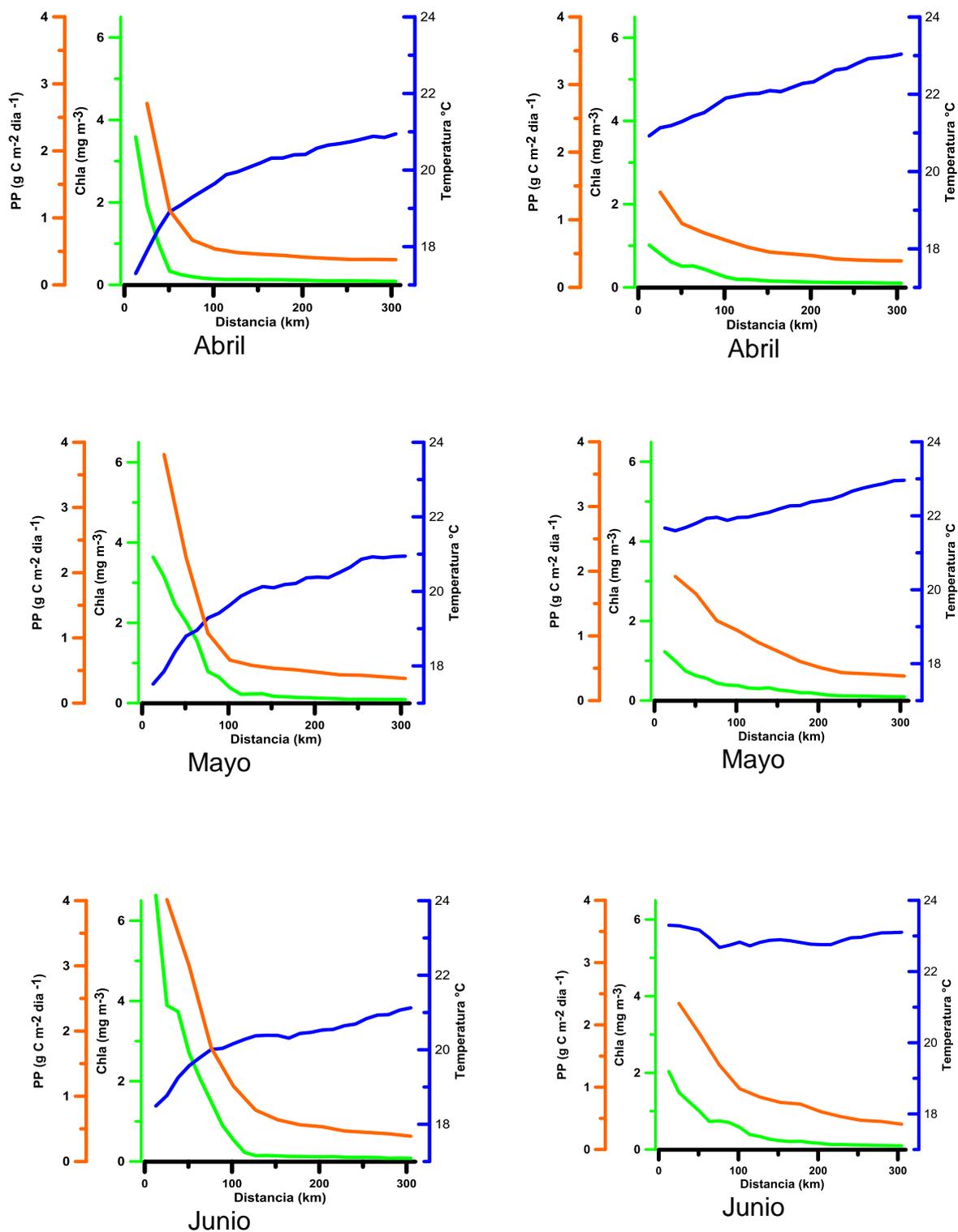


Figura 2. Continuación.

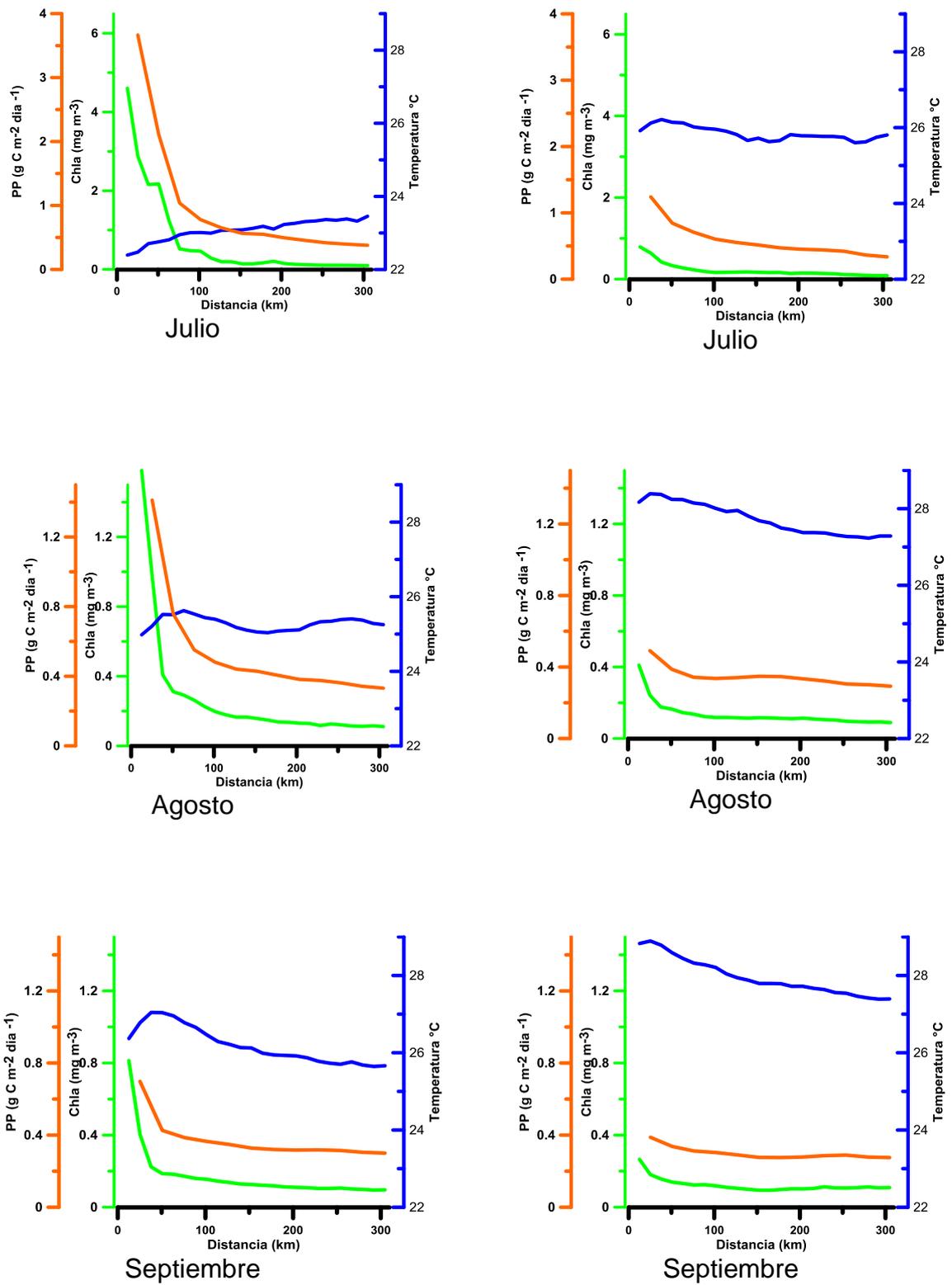


Figura 2. Continuación.

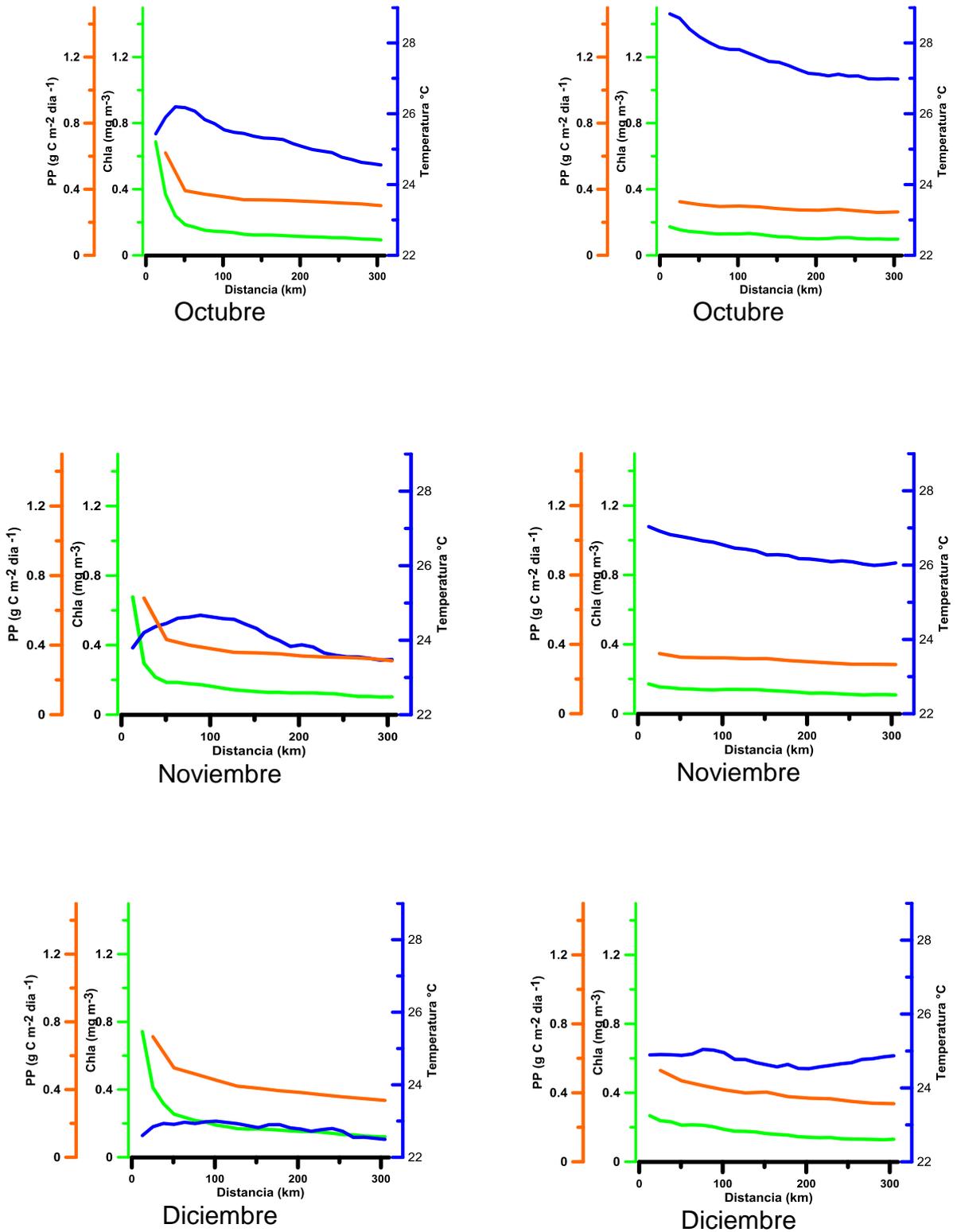


Figura 2. Continuación.

3.2- Variación de año a año

La variación de TSM de año a año de ambos transectos tuvo componentes claros estacionales e interanuales. En lo que sigue sólo se ilustrarán algunos transectos particulares como ejemplos. En la zona costera, para el período de estudio, el rango de TSM de CSLA fue de 15.8 °C a 29.1 °C, y en la zona oceánica fue de 19.1 °C a 27.6 °C; el de la zona costera de CSLU fue de 19.3 °C a 30.1 °C y el de la oceánica fue de 20.1 °C a 29.2 °C. Las diferencias más grandes de TSM entre ambos transectos, para el mismo año, fueron mayores en la zona costera que en la oceánica, de hasta 3.2 °C entre las máximas y hasta 3.8 °C entre las mínimas. Cerca de la costa la TSM mínima ocurrió principalmente en abril y mayo en ambos transectos; la TSM máxima ocurrió principalmente en septiembre en CSLA y entre septiembre y octubre en CSLU. Los valores mínimos de TSM en las aguas más oceánicas (250-300 km) se registraron en meses diversos, principalmente en invierno y primavera; y los máximos se registraron principalmente entre agosto y septiembre, en ambos transectos (Tabla I). Los diagramas Hovmöller (Figs. 3 y 4) 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. Se aprecia que en la primera época hay un gradiente espacial intenso de TSM 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. Por lo anterior, es claro que hay cambios estacionales de TSM no solo en la zona costera sino también en la oceánica, en ambos transectos (Figs. 3 y 4). En las primeras épocas de 2010 y de 2014, respectivamente, en la zona costera de ambos transectos se tuvieron valores bajos de TSM más elevados y de menor duración que en otros años, fenómeno que tuvo mayor claridad en CSLU. En 2010 esto fue seguido por una segunda época con valores altos de TSM menos elevados que en otros años, y en 2014 por una segunda época con valores altos más elevados que en otros años (Figs. 3 y 4). Es decir el calentamiento manifestado en 2010 en la primera época fue seguido por un enfriamiento, mientras que en 2014 fue seguido por más calentamiento, en ambos transectos. El enfriamiento de la segunda época de 2010 continuó en 2011, abarcando toda la extensión de ambos transectos. En CSLU esto fue más claro que en CSLA.

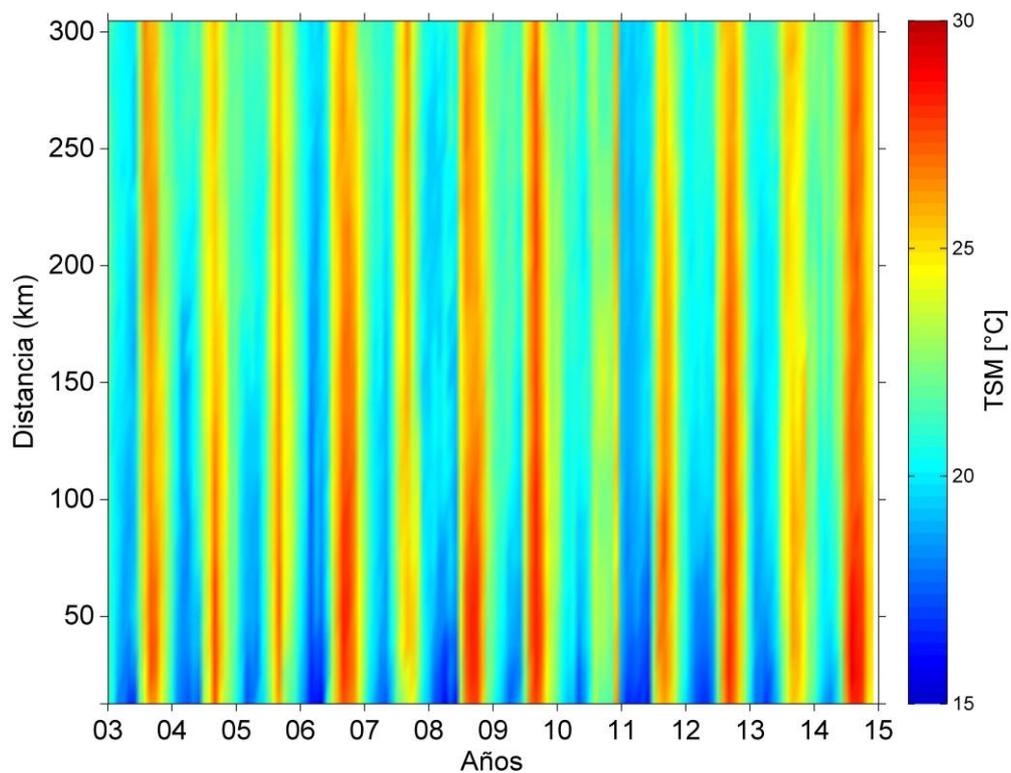


Figura 3.- Diagrama Hovmöller de TSM para el transecto frente a cabo San Lázaro.

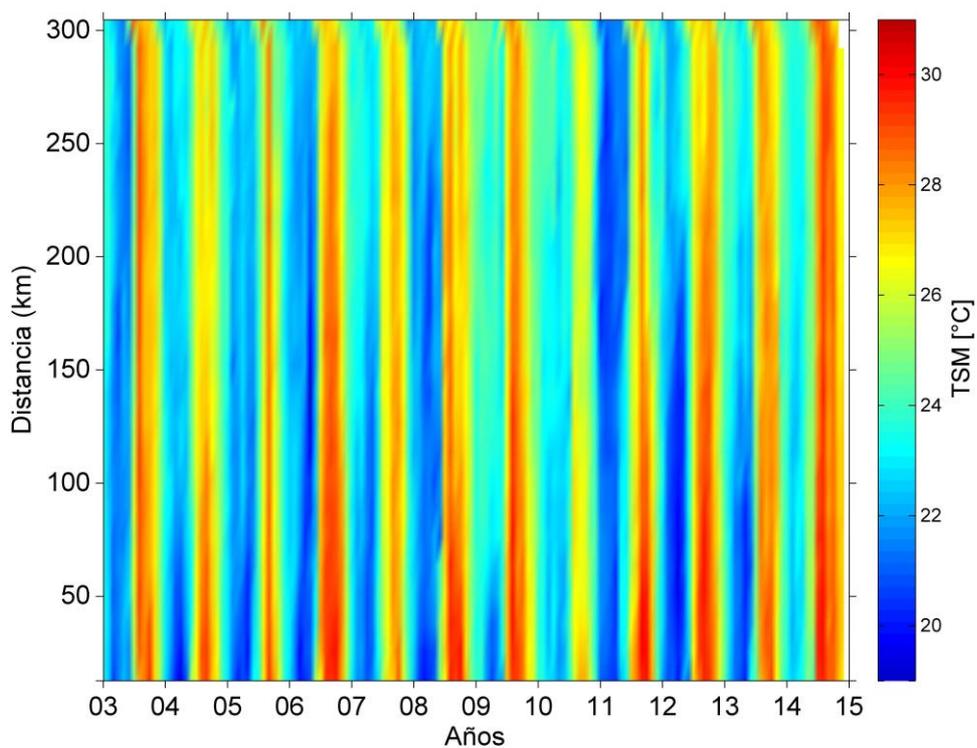


Figura 4.- Diagrama Hovmöller de TSM para el transecto frente a cabo San Lucas. Nótese que la paleta de colores es diferente a la anterior.

La reversión del gradiente de TSM para cambiar de aguas más frías a más cálidas en la zona costera, con relación a las de la zona oceánica, varió de año a año. El gradiente con las aguas más cálidas en la zona costera duró entre uno y cuatro

Tabla 1.- Valores máximos y mínimos de TSM (°C), para cada año, de la zona costera y la zona oceánica para el transecto frente a cabo San Lázaro (CSLA) y para el transecto frente a cabo San Lucas (CSLU) (ZC = Zona Costera y ZO = Zona Oceánica).

Años		03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14
ZC CSLA	Máx.	27.5	27.8	27.0	28.2	25.6	28.3	28.3	26	27.0	28.2	26	29.0
	Mes	Sep	Dic	Sep	Sep	Sep	Ago						
	Mín.	16.6	17.3	17.3	15.8	17.2	15.8	17.6	17.2	16.1	16.7	16.7	18.0
	Mes	May	Abr	Mar	May	May	Abr	Abr	May	Jun	Abr	Abr	Abr
ZO CSLA	Máx.	26.5	25.7	25.6	26.2	26.5	27	27.6	25.6	25.3	26.0	25.7	27.4
	Mes	Ago	Sep	Sep	Sep	Sep	Ago	Sep	Dic	Sep	Oct	Sep	Sep
	Mín.	19.5	20.7	21.0	19.0	20.3	19.4	20.9	20.3	19.1	20.2	20.4	21.6
	Mes	Jun	Feb	Abr	Abr	Dic	Feb	Jun	jun	Ene	Feb	Abr	Abr
ZC CSLU	Máx.	29.4	29.1	29.3	29.9	28.8	29.8	29.9	27.8	30.0	29.9	29.2	29.9
	Mes	Oct	Sep	Sep	Oct	Oct	Oct	Ago	Sep	Sep	Sep	Oct	Ago
	Mín.	20.6	19.3	19.9	19.7	20.7	19.9	20.6	21.7	20.3	19.6	20.0	22.1
	Mes	Mar	Abr	May	Mar	Abr	Mar	Abr	May	Abr	Abr	May	Feb
ZO CSLU	Máx.	29	27.4	28.4	28.0	27.8	28.0	28.3	25.6	27.8	27.8	28.2	29.2
	Mes	Ago	Oct	Sep	Sep	Sep	Ago	Sep	Sep	Sep	Oct	Ago	Ago
	Mín.	21.0	22.2	21.9	21.6	22.7	21.9	23	23.2	20.0	21.9	22.7	23.4
	Mes	Jun	Feb	Mar	May	May	Ene	Jun	May	Feb	Mar	May	Feb

meses en CSLA y entre uno y cinco meses en CSLU. En algunos casos la reversión del gradiente se presentó desde julio hasta diciembre, en otros casos desde septiembre. En ambos transectos hubo años sin reversión del gradiente; en estos casos se presentaron varios mínimos y máximos en el sentido espacial. Las diferencias de TSM entre las aguas cálidas de la zona costera y las de menor TSM de la zona oceánica fueron entre décimas de °C y ~3 °C, con las diferencias mayores en CSLU donde las aguas costeras alcanzaron valores de TSM mayores a los de CSLA (Tabla I).

En la variación espacial de año a año de TSM en los transectos, la presencia de varios mínimos y máximos no presentaron un patrón temporal claro. Algunos ejemplos se ilustran para mayo 2006, septiembre 2010 y noviembre 2011, para CSLA (Fig. 5a) (la diferencia más grande de TSM entre mínimos y máximos sucesivos fue

entre uno y ~ 1.7 °C); y junio 2008, agosto 2009 y diciembre 2014, para CSLU (Fig. 5b) (la diferencia más grande entre mínimos y máximos sucesivos fue entre ~ 0.8 °C y ~ 2.3 °C).

La variación de año a año de Chl_{sat} y PP de ambos transectos presentaron una zona costera con valores relativamente altos (≥ 1.0 mg m^{-3} y ≥ 1.0 $\text{g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) en finales de primavera e inicio de verano extendiéndose desde la costa hasta 110 km, muy a menudo solamente hasta 30-50 km. Esta zona costera tuvo variaciones de Chl_{sat} y PP con componentes estacionales e interanuales claros (Tabla 2). La prueba de Kruskal-Wallis para los datos de Chl_{sat} de la zona costera de ambos transectos, de la primera época, tuvo como resultado una variación interanual significativa (CSLA: $H = 29.4$, $n = 648$, $p = 0.002$; CSLU: $H = 192.8$, $n = 648$, $p < 0.001$). En la zona costera los rangos de Chl_{sat} y PP para el período de estudio fueron: 0.1 a 9.8 mg m^{-3} para CSLA y 0.1 a 6.5 mg m^{-3} para CSLU; y 0.2 a 7.3 $\text{g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ para CSLA y 0.2 a 4.5 $\text{g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ para CSLU, respectivamente. Algunas veces, el máximo de Chl_{sat} no estuvo adyacente a la costa sino entre 10 y 40 km. En CSLU algunas veces se presentaron máximos (en el sentido del cálculo diferencial) de Chl_{sat} (~ 1.0 mg m^{-3}) entre 80 y 180 km de la costa. En la zona costera, los años 2011 y 2012 en CSLA, y 2008 y 2011 en CSLU tuvieron valores de Chl_{sat} y PP excepcionalmente altos (Tabla 2).

Los valores mínimos de Chl_{sat} de cada año, de las aguas más oceánicas de CSLA, fluctuaron entre 0.03 y 0.8 mg m^{-3} , y para CSLU fluctuaron entre 0.04 y 0.6 mg m^{-3} ; mientras que los mínimos de PP para ambos transectos fluctuaron entre 0.02 y 0.3 $\text{g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. En estas aguas, los máximos de Chl_{sat} fluctuaron entre 0.1 y 0.4 mg m^{-3} en CSLA, y entre 0.1 y 0.3 mg m^{-3} en CSLU; mientras que el rango de los máximos de PP fue de 0.4 a 0.7 $\text{g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, en ambos transectos. No hubo una tendencia para la ocurrencia de estos valores extremos en períodos particulares del año (Tabla 2). En la variación espacial de Chl_{sat} y PP de ambos transectos no se presentaron irregularidades con mínimos y máximos, ni reversiones del gradiente. La variación espacial siempre fue monótonica, con los valores más altos cerca de la costa y los más bajos en la parte más oceánica.

Los diagramas Hovmöller para Chl_{sat} de ambos transectos muestran una mayor variación espacial y temporal que las de TSM para la zona costera, pero con muy poca variación para la oceánica. La variación estacional e interanual de Chl_{sat} en la zona costera es muy clara, pero estos cambios no se aprecian en la zona oceánica (Figs.

3, 4, 6 y 7). De nuevo, se pierde mucho detalle de las diferencias relativamente pequeñas. También se aprecian los valores más elevados de Chl_{sat} , y con mayor duración, en CSLA que en CSLU. En la zona costera de CSLA Chl_{sat} fue claramente

Tabla 2.- Valores máximos y mínimos de Chl_{sat} (mg m^{-3}), para cada año, de la zona costera y la zona oceánica para los transectos frente a cabo San Lázaro (CSLA) y para el transecto frente a cabo San Lucas (CSLU) (ZC = Zona Costera y ZO = Zona Oceánica).

Años		03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14
ZC CSLA	Máx.	5.1	5.0	5.1	8.1	5.5	9.8	8.0	5.7	8.9	8.6	9.4	4.0
	Mes	Jun	Jun	Jun	Mar	Abr	Jun	Jul	Jul	Jun	Jun	Jun	Mar
	Mín.	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	Mes	Oct	Dic	Oct	Nov	Ago	Sep	Nov	Dic	Sep	Sep	Nov	Ago
ZO CSLA	Máx.	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1
	Mes	Feb	Ene	Feb	Jun	Ene	Dic	Feb	Feb	Ago	Ago	Jul	Dic
	Mín.	0.03	0.1	0.03	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.1	0.1	0.7	0.05
	Mes	Jun	Abr	Jun	Jun	Nov	Jun	May	Ago	Jun	Jun	May	Ago
ZC CSLU	Máx	1.4	2	1.2	3.7	1.8	3.3	2.0	1.1	6.4	4.3	3.6	2
	Mes	Jun	Abr	Jul	Jun	Ago	Jun	May	Jul	Jun	Jun	Jun	Jun
	Mín.	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.05
	Mes	Nov	Sep	Sep	Sep	Nov	Oct	Sep	May	Ago	Oct	Nov	Ago
ZO CSLU	Máx.	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2
	Mes	Jul	Sep	Feb	Jul	Dic	Nov	Ene	Feb	Feb	Ene	Feb	Sep
	Mín.	0.1	0.1	0.05	0.1	0.1	0.1	0.04	0.1	0.05	0.1	0.1	0.1
	Mes	Abr	Ago	Sep	Sep	Sep	Sep	Sep	Jul	Jun	Jul	Ago	Mar

más baja en 2014 que en los otros años, y en la de CSLU fue más baja en 2005, 2010 y 2014 (Fig. 6 y 7).

Las series de tiempo de TSM para los cuadrantes frente a ambos cabos muestran variaciones estacionales e interanuales claras, aunque mucho más marcadas para CSLA que para CSLU (Fig. 8). Se puede apreciar que el ciclo anual (estacional) domina la variación de TSM. Los valores máximos de TSM de ambas series se presentaron en otoño, y los mínimos en primavera. La diferencia estacional más grande para CSLA fue ~ 12.8 °C, y la de CSLU fue 9.6 °C, ambas en 2006; mientras que la diferencia más grande entre máximos de años consecutivos fue 5.5 °C para CSLA entre 2006 y 2007, y 1.9 °C para CSLU entre 2010 y 2011.

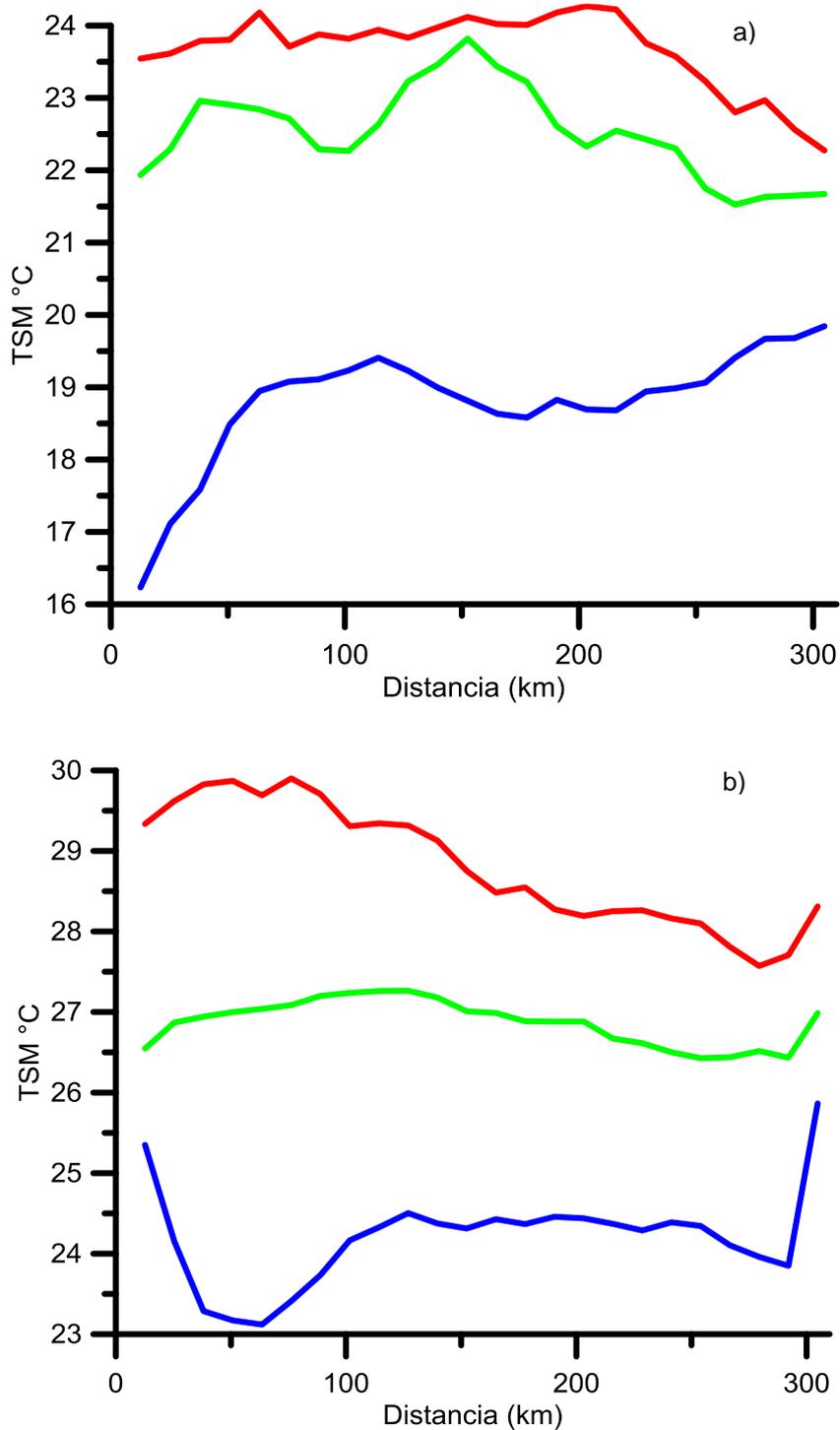


Figura 5.- Ejemplos de distribuciones espaciales de TSM con máximos y mínimos: a) para el transecto frente a cabo San Lázaro (rojo noviembre 2011, verde septiembre 2010, azul mayo 2006); b) para el transecto frente a cabo San Lucas (rojo agosto 2009, verde diciembre 2014, azul junio 2004).

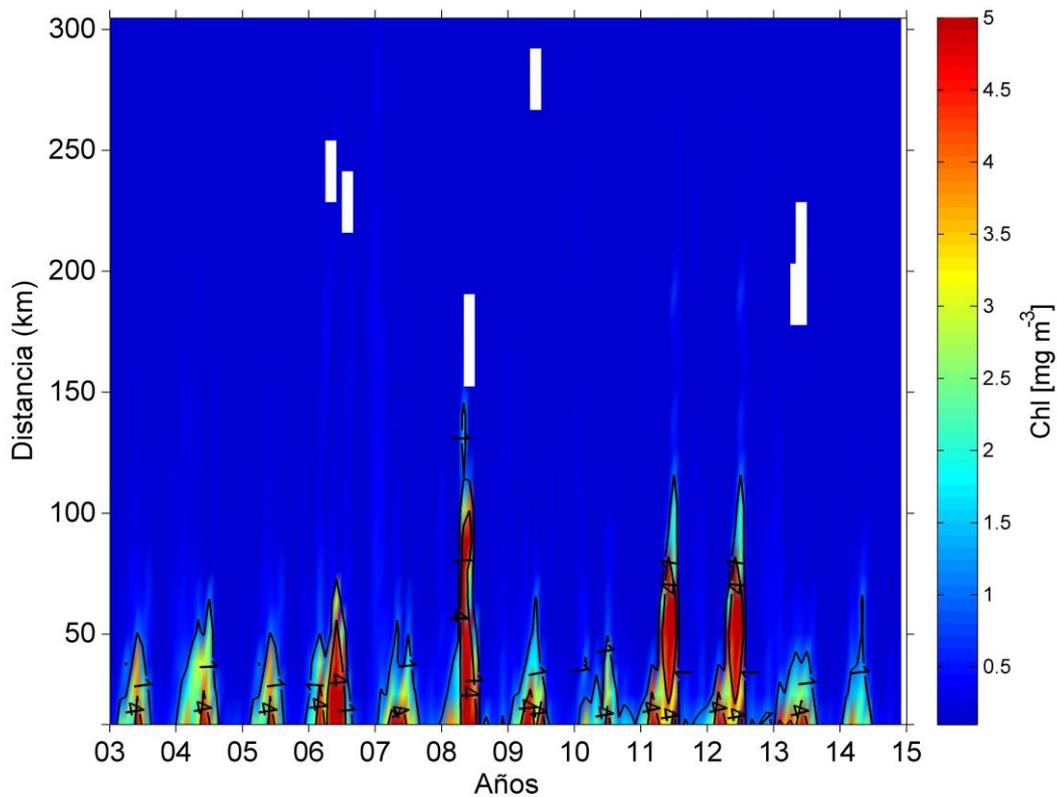


Figura 6.- Diagrama Hovmöller de Chl_{sat} para el transecto frente a cabo San Lázaro.

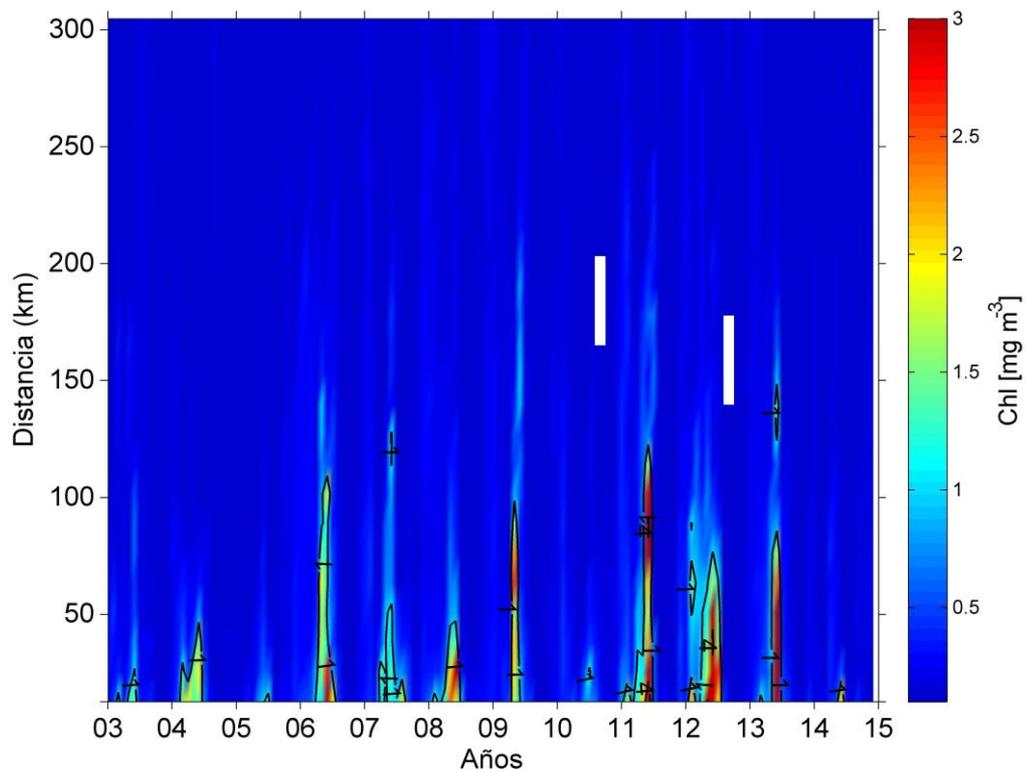


Figura 7.- Diagrama Hovmöller de Chl_{sat} para el transecto frente a cabo San Lucas. Nótese que la paleta de colores es diferente a la anterior.

Tabla 3.- Valores máximos y mínimos de PP (g C m⁻² d⁻¹), para cada año, de la zona costera y la zona oceánica para los transectos frente a cabo San Lázaro (CSLA) y para el transecto frente a cabo San Lucas (CSLU) en (ZC = Zona Costera y ZO = Zona Oceánica).

Años		03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14
ZC CSLA	Máx	4.4	4.5	4.5	4.4	5.0	5.5	4.2	3.1	7.3	7.3	4.5	2.9
	Mes	Jul	May	May	Jul	Jun	Jun	May	Jul	Jun	Jun	Jun	May
	Mín	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4	0.4	0.2	0.4	0.03
	Mes	Oct	Sep	Sep	Nov	Oct	Sep	Oct	Dic	Sep	Sep	Oct	Dic
ZC CSLA	Máx	0.4	0.5	0.4	0.6	0.7	0.4	0.5	0.4	0.5	0.4	0.4	0.3
	Mes	Ene	Ene	May	Jun	Ene	Jun	Feb	Feb	Jun	Jul	Feb	Abr
	Mín	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.02
	Mes	Sep	Sep	Sep	Feb	Dic	Sep	Nov	Sep	Oct	Dic	Nov	Nov
ZC CSLU	Máx	1.9	2.8	1.9	2.8	2.4	4.8	2.8	1.4	2.4	4.5	3.6	1.4
	Mes	Jun	Jun	May	Jun	Abr	May	May	Jun	Jun	Jun	Jun	Jun
	Mín	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.03
	Mes	Nov	Sep	Sep	Oct	Nov	Oct	Sep	Oct	Sep	Nov	Oct	Nov
ZO CSLU	Máx	0.5	0.5	0.4	0.5	0.5	0.6	0.7	0.4	0.5	0.6	0.5	0.4
	Mes	May	Jun	Jun	Abr	Feb	Jun	Jun	Feb	Feb	Ene	Mar	Jun
	Mín	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.02
	Mes	Oct	Oct	Sep	Sep	Sep	Sep	Sep	Ago	Oct	Nov	Nov	Nov

Las series de tiempo de Chl_{sat} y PP también muestran el dominio de la variación estacional (ciclo anual), además de un componente interanual (Figs. 9 y 10). A diferencia de las series de TSM, las de Chl_{sat} y PP presentaron más de un máximo en algunos años. En el caso de Chl_{sat} hubo nueve años con dos máximos y tres con uno, en CSLA, y en CSLU hubo cinco años con dos máximos y siete con uno. PP no presentó todos los máximos dobles correspondientes a los de Chl_{sat}, sólo fueron tres en CSLA y cuatro en CSLU (uno de estos últimos tuvo tres máximos el mismo año). Se presentó un contraste muy claro entre CSLA y CSLU, con los valores grandes (primera época) de ambas variables mayores en CSLA que en CSLU (Figs. 9 y 10; tabla 4). En general, las gráficas de PP tienden a ser paralelas a las de Chl_{sat}. Los valores más altos de “primavera-verano” de Chl_{sat} se presentaron en 2012 en CSLA, y en 2011 y 2012 en CSLU (9.0 mg m⁻³ en CSLA; y 4.2 y 3.8 mg m⁻³, respectivamente, en CSLU). Los valores más altos de PP se presentaron en ambos lugares en 2012 y fueron 7.3 y 4.5 g C m⁻² d⁻¹, para CSLA y CSLU respectivamente.

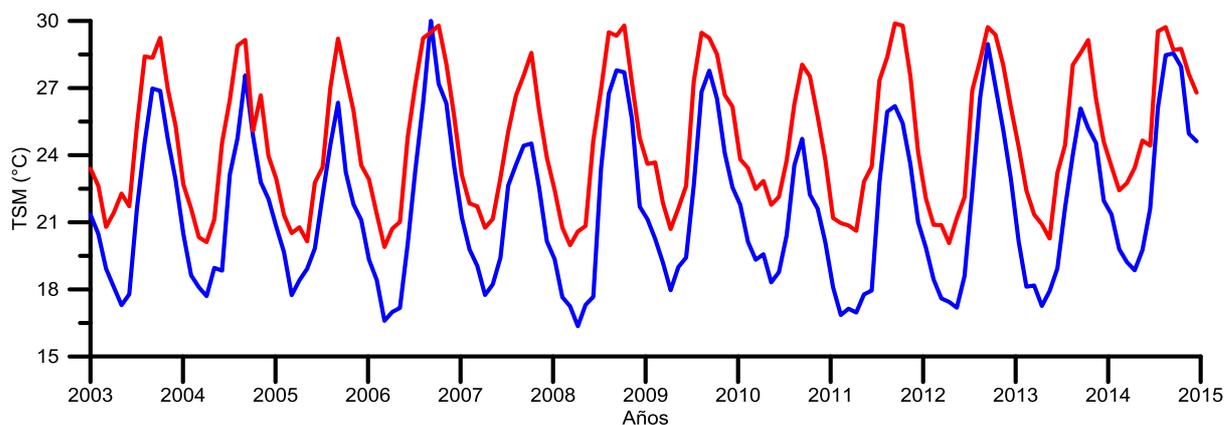


Figura 8.- Series de tiempo de TSM °C para los cuadrantes de 18×18 km² frente a cabo San Lázaro (azul) y frente a cabo San Lucas (rojo), respectivamente. Las marcas del eje horizontal son el inicio del año.

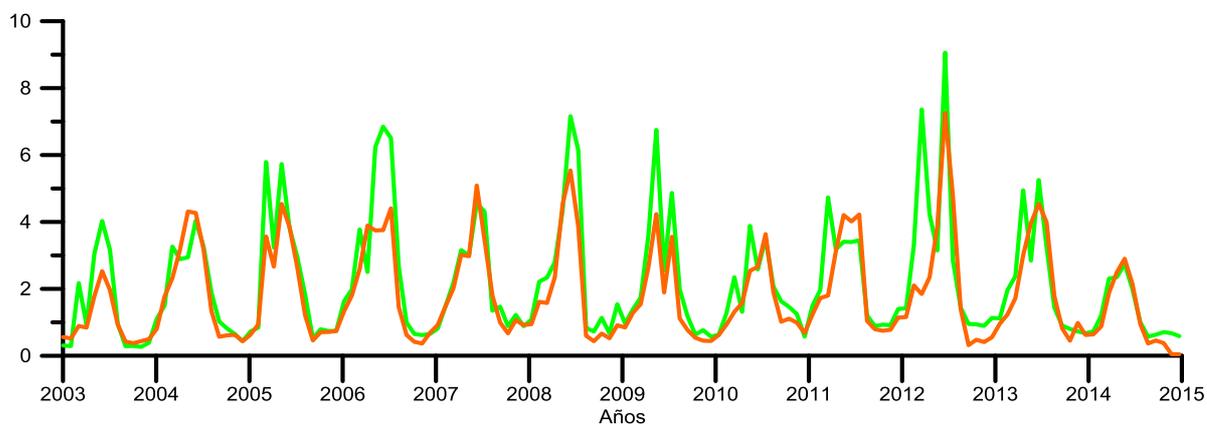


Figura 9.- Series de tiempo de Chl_{sat} (verde, mg m⁻³) y PP (naranja, g C m⁻² d⁻¹) para el cuadrante de 18×18 km² frente a cabo San Lázaro. Las marcas del eje horizontal son el inicio del año.

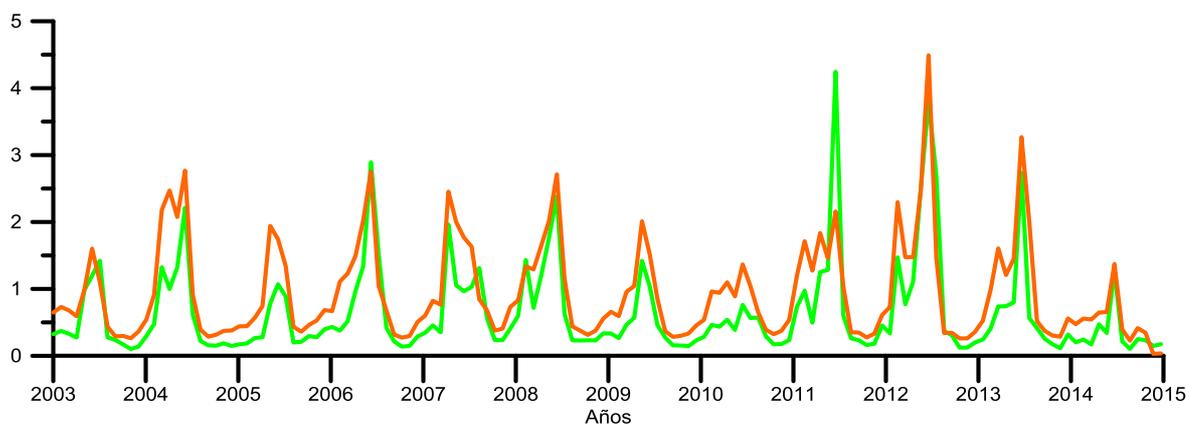


Figura 10.- Series de tiempo de Chl_{sat} (verde, mg m⁻³) y PP (naranja, g C m⁻² d⁻¹) para el cuadrante de 18×18 km² frente a cabo San Lucas. Las marcas del eje horizontal son el inicio del año.

Se hicieron pruebas Mann-Whitney para comparar Chl_{sat} entre las dos “épocas” para la zona costera (0-110 km) y para la zona oceánica (110-300 km), separadamente, para cada transecto. También se hicieron el mismo tipo de pruebas para comparar la zona costera con la zona oceánica de cada transecto, para cada época; y se compararon el mismo tipo de zona entre transectos, para cada época. En todos los casos las diferencias fueron significativas, con excepción de los valores de Chl_{sat} de la zona oceánica 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 CSLA fueron mayores

Tabla 4.- Resultados de las pruebas de Mann-Whitney comparando conjuntos de datos pareados de Chl_{sat} , según se indica (C = costera; O = oceánica).

CSLA	Época 1 C vs Época 2 C	n=1296	p <0.001
	Época 1 O vs Época 2 O	n=2154	p <0.001
CSLU	Época 1 C vs Época 2 C	n=1296	p <0.001
	Época 1 O vs Época 2 O	n=2156	p <0.001
CSLA	Época 1 C vs Época 1 O	n=1723	p <0.001
	Época 2 C vs Época 2 O	n=1727	p <0.001
CSLU	Época 1 C vs Época 1 O	n=1728	p <0.001
	Época 2 C vs Época 2 O	n=1724	p <0.001
C	Época 1 CSLA vs Época 1 CSLU	n=1296	p <0.001
	Época 2 CSLA vs Época 2 CSLU	n=1296	p <0.001
O	Época 1 CSLA vs Época 1 CSLU	n=2155	p <0.001
	Época 2 CSLA vs Época 2 CSLU	n=2155	p = 0.61

que los del CSLU para la zona costera en las dos épocas, y fueron mayores en CSLA que en CSLU en la zona oceánica en la primera época, sin diferencia significativa para la segunda época. 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. En el caso de CSLA sólo hubo diferencias significativas entre 2008 y 2010. Para el caso de CSLU, los años que tuvieron diferencias significativas con el mayor número de años fueron 2005 (con valores de Chl_{sat} más bajos que en 2006, 2007, 2008, 2009, 2011, 2012 y 2013) y 2012 (con valores de Chl_{sat} más altos que 2004, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010 y 2014), seguidos de 2004 (con valores más altos que 2005 y 2014; y más bajos que 2006, 2011 y 2012), 2010 (con valores más bajos que 2006, 2007, 2011, 2012 y 2013), 2011 (con valores de Chl_{sat} más altos que 2003, 2004, 2005, 2010 y 2014), 2013 (con valores de Chl_{sat} más altos que 2003 y 2014).

Para la serie de tiempo del cuadrante frente a cabo San Lázaro, el análisis espectral de las tres variables confirma que la mayor parte de la variancia se presentó en los períodos semianual, anual e interanual (Fig. 11Aa-c). Estos componentes estuvieron por encima del valor 10^2 de la variancia normalizada (variancia por unidad de frecuencia) y el mayor correspondió al ciclo anual (estacional, primera y segunda épocas), como se aprecia en las figuras 8, 9 y 10. Para la serie de tiempo del cuadrante frente a cabo San Lucas, el análisis también muestra el período anual como dominante de la variación (Fig. 11Ba-c) pero con valores menores de variancia normalizada que los de la serie de tiempo del cuadrante frente a cabo San Lázaro, lo cual se puede apreciar visualmente al comparar las gráficas de las series de tiempo de las tres variables, para los dos cuadrantes (Figs. 8, 9 y 10). En la serie de tiempo del cuadrante frente a cabo San Lucas, los períodos semianual e interanual no tienen picos claros de variancia elevada, con excepción del semianual de TSM (Fig. 11B).

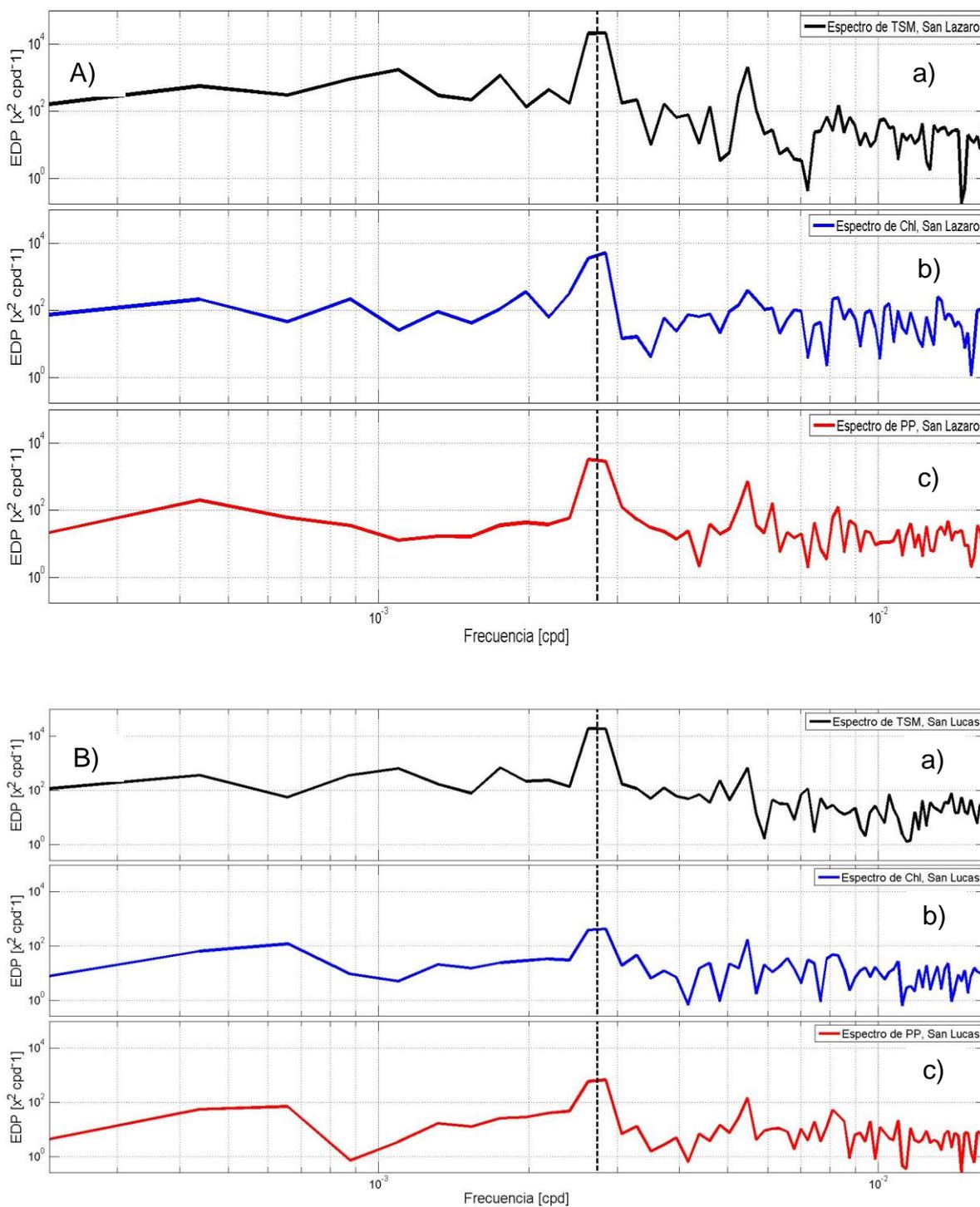


Figura 11.- Análisis espectral de TSM, Chl_{sat} y PP. A) Frente a cabo San Lázaro: a) TSM; b) Chl_{sat}; c) PP. B) Frente a cabo San Lucas: a) TSM; b) Chl_{sat}; c) PP. En el eje vertical EDP significa Espectro de Potencia o espectro de varianza normalizada, y las unidades son las de la variable al cuadrado dividida por la unidad de frecuencia [por ejemplo: (mg m⁻³)² (ciclos por día)⁻¹ para Chl_{sat}].

Capítulo 4- Discusiones

El ciclo estacional de TSM, Chl_{sat} y PP en ambos transectos (Fig. 2, 3, 4, 6 y 7) tiene relación con la dinámica del SCC. Zuria-Jordán *et al.* (1995) reportaron valores de Chl_{sat} , derivados del sensor Coastal Zone Color Scanner (CZCS) para la zona frente a cabo San Lázaro, de febrero a julio (mi primera época) mayores que en el resto del año, coincidiendo con lo reportado en el presente estudio. 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 TSM 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 que la contracorriente superficial inhibiese las surgencias costeras, porque tiende a acumular el agua cerca de la costa. Debido a esto en el período de debilitamiento de las surgencias costeras (segunda época) los valores de Chl_{sat} alcanzan a menudo $<0.2 \text{ mg m}^{-3}$ (Figs. 2, 9 y 10), lo cual indica una situación oligotrófica en invierno. Esto indica una variación estacional muy marcada. 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 $<0.1 \text{ mg m}^{-3}$, lo cual ocurrió algunas pocas veces en la zona costera de CSLU. En contraste, Arroyo-Loranca *et al.* (2015) y Mirabal-Gómez (2015) reportaron que para transectos frente a Punta Eugenia, y frente al norte de Baja California y La Jolla, California, respectivamente, los valores más bajos de Chl_{sat} fueron $>0.1 \text{ mg m}^{-3}$, en la época sin surgencias. Esto indica que la parte más sureña del SCC no mantiene a lo largo del año la producción fitoplanctónica alta que la caracteriza en la mayor parte de su extensión.

El que Chl_{sat} sea hasta cuatro veces mayor en CSLA que en CSLU, en la zona costera, indica la influencia mayor de los eventos de surgencia en CSLA que en CSLU, en la primera época. Además, en la segunda época, la tendencia hacia las condiciones oligotróficas causada por el efecto de la contracorriente superficial costera es más

fuerte en CSLU que en CSLA. Sin embargo, en la zona oceánica algunas veces Chl_{sat} fue mucho mayor en CSLU que en CSLA (~ 10 veces). Esto se debe a la circulación que separa la Corriente de California de la península semejando chorros con Chl_{sat}

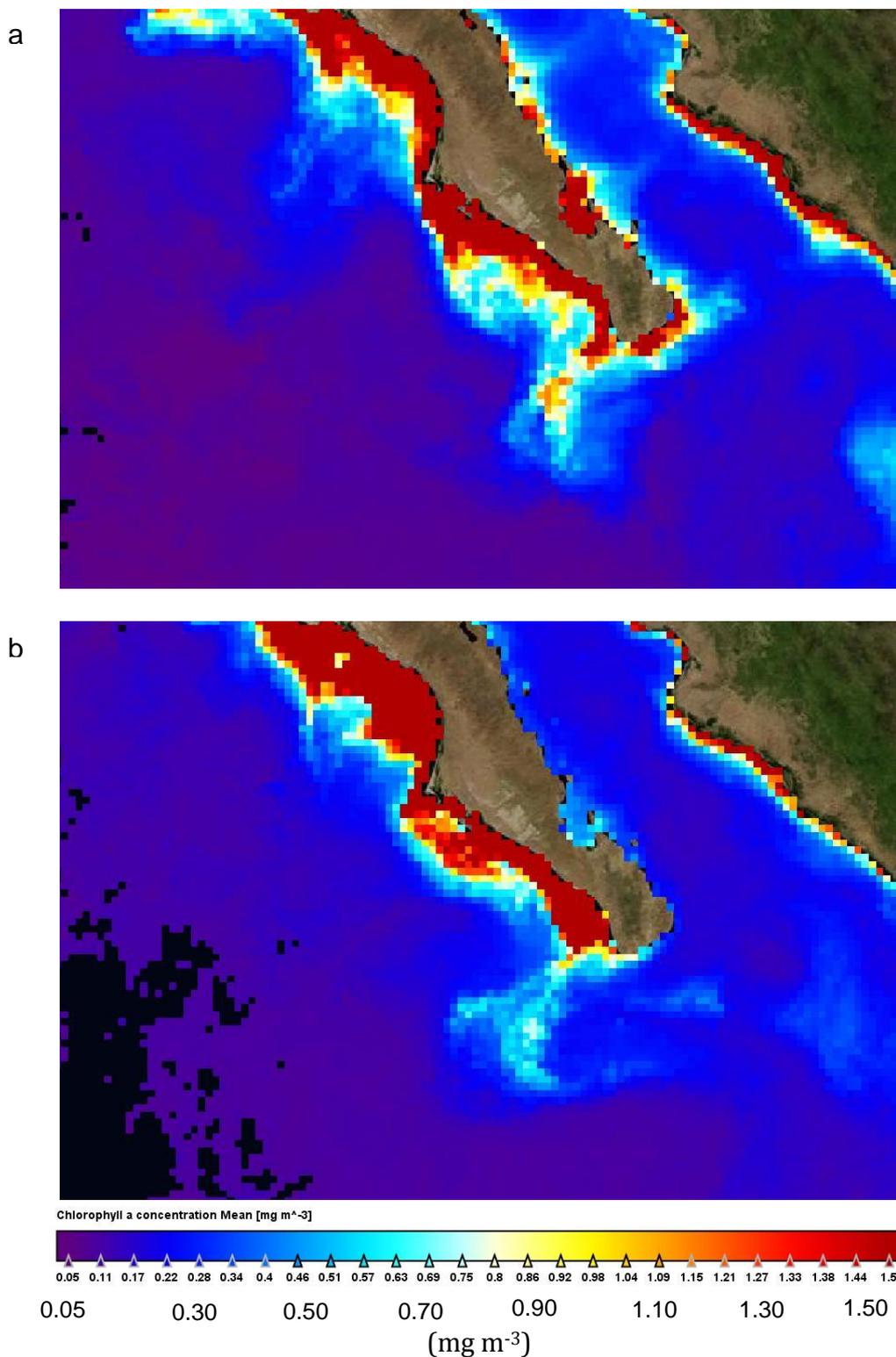


Figura 12. Ejemplo de imagen mostrando la Corriente de California separándose de la península y acarreando valores relativamente altos de Chl_{sat} hacia aguas oceánicas: a) Junio 2007 y b) Junio 2009.

relativamente altas mar adentro (hasta ~300 km) en la zona cercana a cabo San Lucas (Fig. 12). Las imágenes correspondientes de TSM para estos meses de 2007 y 2009 de la figura 12 no muestran estos chorros con la claridad con la que lo hacen las imágenes de Chl_{sat} . Ya se ha demostrado que cuando no hay contraste apropiado en las imágenes satelitales de TSM, las de Chl_{sat} pueden ser de gran ayuda para estudiar la dinámica del mar (v. g.: Pegau *et al.*, 2002).

Las imágenes de satélite muestran la estructura rica de la distribución de pigmentos fotosintéticos desde la costa hasta cientos de kilómetros mar adentro, como lo reportó Traganza (1985). La distribución en forma de manchas se debe a una combinación de factores físicos, químicos y biológicos que afectan al fitoplancton, como surgencias, movimientos de masas de agua, fenómenos de mesoescala y submesoescala, mezcla por vientos (incluyendo tormentas) o por fenómenos asociados a las mareas, distribución en forma de manchas de nutrientes, reproducción diferencial del fitoplancton y pastoreo diferencial (Yentsch, 1981). Este tipo de fenómenos posiblemente fueron la causa de los máximos múltiples que presentaron Chl_{sat} y PP en las series de tiempo de las localidades costeras (Figs. 9 y 10). El número menor de máximos múltiples de PP comparados con los de Chl_{sat} se debe al proceso de integración con la profundidad para el cálculo de la primera, el cual suaviza su variación temporal.

Los datos de satélite de TSM y Chl_{sat} se basan en datos de radiación electromagnética, lo cual los hace una aproximación a la realidad. En el caso de TSM 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 TSM 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 $\text{Chl} \leq 1.5 \text{ mg m}^{-3}$), 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 $\text{Chl} \geq 1.5 \text{ mg m}^{-3}$) (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 de acuerdo a 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, Sea Viewing Wide Field of View (SeaWIFS) y Aqua-MODIS, y encontraron que tienden a ser similares cuando son bajos pero difieren cuando son altos. El sensor CZCS operó de 1978 a 1986, el SeaWIFS produjo datos de 1997 a 2010, el Aqua-MODIS se puso en órbita en 2002 y todavía está en operación.

Las variaciones temporales irregulares de TSM cerca de la costa, y la presencia de varios mínimos y máximos en los transectos de TSM (Figs. 2 y 5), también sin un patrón temporal claro de variación, puede indicar una influencia de fenómenos de mesoescala tales como remolinos y meandros, como los reportados por Durazo *et al.* (2010) para la región del SCC frente al norte y centro de la península. Estos fenómenos de mesoescala pueden afectar la producción biológica de nuestra área de estudio, como se describió por Henson y Thomas (2007a, b).

Las variaciones interanuales de TSM, 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 TSM 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 TSM 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, que se manifiesta en los datos de 2014 (Figs. 3, 4, 6, 7, 9 y 10).

Arroyo-Loranca *et al.* (2015) usaron datos de Chl_{sat} de los sensores SeaWiFS y Aqua-MODIS, para un transecto similar a los aquí estudiados 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 de CSLA y CSLU, 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. 13). El evento ENSO de 2014 (que continúa en el presente, septiembre de 2015) tuvo un efecto significativo en CSLU. Sin embargo, no tuvo un impacto significativo en CSLA (resultado de la prueba post hoc) aunque en el diagrama Hovmöller (Fig. 6) se aprecia la disminución de Chl_{sat} con relación a años anteriores. El Niño de tipo CP de 2009-2010 fue el único que tuvo un impacto significativo en CSLA (prueba post hoc), con valores más bajos de Chl_{sat} en 2010 que en 2008 (véase también la figura 6). En CSLU se tuvo impacto significativo (prueba post hoc) de los eventos ENSO de 2004-2005, 2009-2010 y 2014 (muy claro en la figura 7). Pero también hubo diferencias significativas entre otros años. De nuevo, la dinámica costera tales como las corrientes costeras, los chorros, remolinos y meandros en CSLA y CSLU causan variación interanual y hacen que los impactos de eventos como El Niño sean diferentes. La corriente costera puede tener una variación interanual y puede incidir en las variables aquí consideradas, pero los otros fenómenos podrían ser más bien aleatorios. Aquí hay una ventana de oportunidad para un trabajo futuro donde se puede considerar el uso de imágenes satelitales de altimetría para describir apropiadamente ésta fenomenología. 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) y en efecto esto se aprecia en los resultados para ambos transectos, CSLA y CSLU.

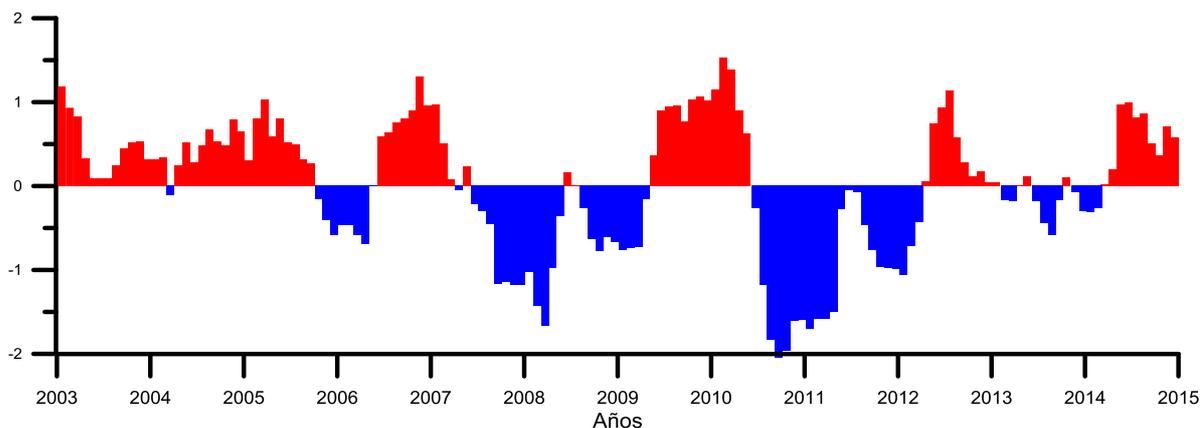


Figura 13. El índice multivariado de El Niño MEI (NOOA) (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/table.html>).

De cualquier forma, estos efectos de los eventos ENSO no fueron muy fuertes en CSLA y CSLU ya que, a pesar de la disminución significativa de la biomasa y producción fitoplanctónicas, a menudo Chl_{sat} tuvo valores $>1 \text{ mg m}^{-3}$, durante un evento ENSO, es decir no hubo un colapso del ecosistema pelágico. Sólo en la zona costera de CSLU, en 2010, Chl_{sat} bajó a valores $<1 \text{ mg m}^{-3}$ (Fig. 10).

En la zona costera del transecto frente a Punta Eugenia, los mínimos de TSM y máximos de Chl_{sat} y PP fueron $\sim 13 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 26 mg m^{-3} y $8.7 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Arroyo-Loranca *et al.*, 2015), $\sim 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ menor que en el caso de los valores mínimos de TSM de CSLA y $\sim 6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ menor que los de CSLU, entre más del doble (comparado con CSLA) y cuatro veces (comparado con el de CSLU) para Chl_{sat} , y similar (en el caso de CSLA) o hasta el doble que en CSLU para PP. Mirabal Gómez (2015) realizó un estudio similar al presente para dos transectos, frente a La Jolla, California (FLJ) y Bahía de San Quintín, Baja California (FBSQ), con datos del Aqua-MODIS del mismo período del presente estudio, y reportó valores mínimos de TSM para su zona costera hasta $2.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ menores que los de CSLA, y hasta $\sim 6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ menores que los de CSLU, en sus dos transectos. Los valores máximos de Chl_{sat} y PP de Mirabal Gómez (2015), en la zona costera de FLJ, fueron similares a los valores de CSLA y CSLU; y sus valores del FBSQ son del orden del doble y similares, respectivamente, a los de CSLA y CSLU. Lo anterior significa que en el área del presente estudio el efecto de las surgencias costeras es significativamente más débil que frente a Bahía de San Quintín y Punta Eugenia y es similar al del área frente a La Jolla.

Zuria-Jordán *et al.* (1995) estudiaron la variación de Chl_{sat} , derivada del CZCS, a lo largo de un transecto que incluye una parte paralela a la costa de la península (de

punta San Hipólito a cabo San Lucas). En la parte cercana a cabo San Lázaro su transecto fue muy cercano a la costa, pero frente a cabo San Lucas estuvo alejado pasando por la zona oceánica. En la zona cercana a cabo San Lázaro, sus valores de Chl_{sat} mostraron la misma estacionalidad de los valores para CSLA. Estos autores reportaron valores de Chl_{sat} de hasta $>8 \text{ mg m}^{-3}$ para junio del año promedio del período 1978-1986, comparado con hasta 6.5 mg m^{-3} para junio de la climatología de CSLA. Tratándose de dos sensores diferentes es muy interesante que hay una correspondencia de temporalidad para los valores máximos en los “años promedio”, además de que los valores absolutos son muy cercanos. Zuria-Jordán *et al.* (1995) reportaron que la zona cercana a cabo San Lázaro fue de las más ricas biológicamente de su transecto. También reportaron el impacto fuerte de El Niño de tipo EP de 1982-83 en la zona de cabo San Lázaro, y expresaron que su efecto duró hasta 1985. La comparación de datos promedio derivados del CZCS (Zuria-Jordán *et al.*, 1995) y los presentados en este trabajo, derivados del Aqua-MODIS para CSLA, resultó que los últimos fueron ~25% menores que los primeros.

Las gráficas de PP tienden a ser paralelas a las de Chl_{sat} . Chl_{sat} dominó la variabilidad de PP a pesar de que los cálculos de PP también dependen de TSM, la radiación fotosintéticamente activa y la longitud del día, como también fue reportado por Álvarez-Molina *et al.* (2013) para el golfo de California. Los datos de PP tienen menos variabilidad que los de Chl_{sat} porque PP se integra para toda la zona eufótica y Chl_{sat} sólo es para la primera profundidad óptica (el 22% superficial de la zona eufótica). Cuando Chl_{sat} es baja la zona eufótica es más profunda y la integración con la profundidad aumenta PP.

Posiblemente los valores de PP de marzo a julio (primera época), para las aguas de la zona costera, son sobre-estimaciones porque el modelo VGPM supone una zona eufótica bien mezclada con una distribución vertical homogénea de clorofila. En aguas costeras ricas en nutrientes el máximo de clorofila está en la superficie con los valores decreciendo con la profundidad, y el suponer que no hay cambios verticales de clorofila produce sobre-estimaciones de PP. Los valores de PP mayores que $4 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ no son realistas y deben ser tomados con precaución, considerando solamente las tendencias de cambio espacial y temporal, sin considerar los valores absolutos. Álvarez-Molina *et al.* (2013) utilizaron los valores de PP de la página de Oregon State University para reportar resultados de la región central del golfo de

California y expresaron que posiblemente sus valores más altos de la zona de surgencias intensas de la cuenca de Guaymas (con hasta $7.8 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) fueron sobre-estimaciones de hasta $>50\%$. Sin embargo, estos autores expresaron que las tendencias de cambio de sus datos de PP fueron correctas, con valores altos durante la estación de surgencias y muy bajos en verano. Las tendencias de mis datos de PP también son correctas, con valores más altos en enero-junio, que es el período de surgencias, que en julio-diciembre.

Los datos de PP obtenidos mediante el muestreo de agua y las incubaciones con ^{14}C son muy escasos y es muy difícil hacer comparaciones con datos derivados de satélites. En sentido estricto, la comparación entre los datos derivados del VGPM y las estimaciones con ^{14}C no es apropiada porque los dos conjuntos de datos tienen escalas temporales y espaciales totalmente diferentes: los datos del VGPM son promedios para áreas de $18 \times 18 \text{ km}^2$ y para un mes, mientras que los datos de ^{14}C son mediciones instantáneas y puntuales.

Capítulo 5- Conclusiones

Los resultados muestran Chl_{sat} y PP con valores altos en la zona costera (de la costa hasta 110 km, muy a menudo solamente hasta 30-50 km) y disminuyendo hacia la zona oceánica en ambos transectos. Mientras que la TSM presentó, en general, valores mínimos en la zona costera y máximos mar adentro, aunque en algunos meses este gradiente se revirtió.

La reversión del gradiente de TSM para cambiar de aguas más frías a más cálidas en la zona costera, con relación a las de la zona oceánica, varió de año a año. El gradiente con las aguas más cálidas en la zona costera duró entre uno y cuatro meses en CSLA y entre uno y cinco meses en CSLU.

En general, el “año promedio” para ambos transectos se dividió en dos “épocas”: de enero a junio, con temperaturas relativamente bajas ($<23\text{ }^{\circ}\text{C}$) aún en la zona alejada de la costa; y de julio a diciembre, con temperaturas relativamente altas ($>23\text{ }^{\circ}\text{C}$, hasta $\sim 29\text{ }^{\circ}\text{C}$), con excepción de CSLA en diciembre que tuvo valores entre 22.0 y $23.0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mientras que en términos de Chl_{sat} y PP, en CSLA mostró una primera época de febrero a agosto y en CSLU de febrero a julio. Esto 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.

La contracorriente superficial y las surgencias costeras tienden a inhibirse una a la otra, porque la contracorriente superficial es contraria a la dirección del viento. Si la contracorriente superficial es suficientemente fuerte para manifestarse, tiende a acumular agua cerca de la costa. Debido a esto, en el período de debilitamiento de las surgencias costeras (segunda época) los valores de Chl_{sat} alcanzan a menudo $<0.2\text{ mg m}^{-3}$, lo cual indica una situación oligotrófica en invierno. Esto indica una variación estacional muy marcada en la parte más sureña del SCC que no mantiene a lo largo del año la producción fitoplanctónica alta que caracteriza al sistema en la mayor parte de su extensión.

En general, en la zona costera Chl_{sat} fue hasta cuatro veces mayor en CSLA que en CSLU, lo cual indica la influencia mayor de los eventos de surgencia en CSLA que en CSLU, en la primera época. Además, en la segunda época, la tendencia hacia

las condiciones oligotróficas causada por el efecto de la contracorriente superficial costera es más fuerte en CSLU que en CSLA.

Sin embargo, en la zona oceánica algunas veces Chl_{sat} fue mucho mayor en CSLU que en CSLA (~10 veces). Esto se debe a la circulación que separa la Corriente de California de la península semejando chorros con Chl_{sat} relativamente alta mar adentro (hasta ~300 km) en la zona cercana a cabo San Lucas

El análisis espectral muestra que la variación de TSM, Chl_{sat} y PP de año a año de ambos lugares tuvo componentes claros estacionales e interanuales, mucho más marcadas para cabo San Lázaro que para cabo San Lucas, y con la mayor variación en el ciclo anual.

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; 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 los valores de CSLA fueron mayores que los del CSLU para la zona costera en las dos épocas, y fueron mayores en CSLA que en CSLU en la zona oceánica en la primera época, sin diferencia significativa para la segunda época.

Con relación a la variación interanual, en el caso de CSLA sólo hubo diferencias significativas entre 2008 y 2010. Para el caso de CSLU, los años que tuvieron Chl_{sat} significativamente más bajas que otros fueron: 2005 (más bajas que en 2006, 2007, 2008, 2009, 2011, 2012 y 2013); 2004 (que en 2006, 2011 y 2012); 2010 (que 2006, 2007, 2011, 2012 y 2013); y 2014 (que 2004, 2011, 2012 y 2013). Lo cual indica un impacto significativo de dos El Niño de tipo CP (2004-2005 y 2009-2010) y un El Niño de tipo EP (2014-). El único evento El Niño que causó que en la primera época Chl_{sat} bajara a valores $<1 \text{ mg m}^{-3}$ fue el de 2010 y lo hizo en la zona costera de CSLU.

Las imágenes del Aqua-MODIS permitieron describir variaciones estacionales e interanuales fuertes de TSM y Chl_{sat} en el área de estudio. La variación estacional se debió principalmente a surgencias, y la variación interanual se debió a El Niño y posiblemente otros fenómenos asociados a la dinámica costera.

Lista de referencias bibliográficas

- Aguirre Hernández, E. (1999). Producción primaria en la región sur de la corriente de California: Mediciones “*in situ*” y modelos bio-ópticos. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B. C., México: 77 p.
- Álvarez Arellano, A. y Molina Cruz, A. (1984). Aspectos paleoceanográficos cuaternarios del golfo de California, evidenciados por conjuntos de radiolarios. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*, Contribución 475.
- Álvarez-Molina, L. L., Álvarez-Borrego, S., Lara-Lara, J. R., and Marinone, S. G. (2013). Annual and semiannual variations of phytoplankton biomass and production in the central Gulf of California estimated from satellite data. *Ciencias Marinas*, 39, 217–230.
- Armstrong, E. M., Wagner, G., Vazquez-Cuervo, J., and Chin, T. M. (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., Álvarez-Borrego, S., Ortiz-Figueroa, M., and Calderón-Aguilera, L. E. (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., Behera, S. K., Rao, S., Weng, A. H., and Yamagata, T. (2007). El Niño Modoki and its possible teleconnection, *Journal Geophysical Research*, 112, C11007, doi:10.1029/2006JC003798.
- Bakun, A., and Nelson, C. S. (1977). Climatology of upwelling related processes off Baja California. *CalCOFI Reports*, 19, 107-127.
- Behrenfeld, M. J., and Falkowsky, P. G. (1997). Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnology & Oceanography*, 42(1), 1-20.
- Barocio-León, O. A., Millán-Nuñez, R., Santamaría-del-Ángel, E., and González-Silvera, A. (2007). Phytoplankton primary productivity in the euphotic zone of the California Current System estimated by CZCS imagery. *Ciencias Marinas*, 33, 59-72.
- Cullen, J. (1982). The Deep Chlorophyll Maximum: Comparing Vertical Profiles of Chlorophyll a. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 39(5), 791-803.
- Durazo, R., Ramírez-Manguilar, A. M., Miranda, L. E. y Soto-Mardones, L. A. (2010). Climatología de variables hidrográficas. En: *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California 1997-2007*. Durazo, R. y Gaxiola-Castro, G. (Eds.). (pp. 25-57). SEMARNAT-INE-CICESE-UABC. México, D. F.
- Espinosa-Carreón, L. T., Strub, P. T., Beier, E., Ocampo-Torres, F., and Gaxiola-Castro, G. (2004). Seasonal and interannual variability of satellite-derived

chlorophyll pigment, surface height, and temperature off Baja California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C3039), 1-20.

Espinosa Carreón, L. T. (2005). Producción primaria en relación a procesos físicos de mesoescala en la región sur de la Corriente de California. Tesis de Doctorado en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B. C., México: 170 p.

Falkowski, P. G., and Raven, J. A. (1997). *Aquatic photosynthesis*. (375 pp). Blackwell Science.

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

Gaxiola-Castro, G., Cepeda-Morales, J., Nájera-Martínez, S., Espinosa-Carreón, L. T., De-La-Cruz-Orozco, M. E., Sosa-Avalos, R., Aguirre-Hernández, E. y Cantú-Ontiveros, J. P. (2010). Biomasa y producción del fitoplancton. En: G. Gaxiola-Castro y R. Durazo (Eds.). *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California, 1997-2007*. (pp. 59-85). SEMARNAT-INE-CICESE-UABC. México, D. F.

Gómez, A. y Chanut, I. (1993). Hidrografía producción y abundancia planctónica A de la isla de Margarita. Venezuela. *Boletín del Instituto de Oceanografía de Venezuela, Universidad de Oriente*, 32(1-2): 27-44.

Gordon, H. R., Clark, D. K., Brown, J. W., Brown, O. B., Evans, R. H., and Broenkow, W. W. (1983). Phytoplankton pigment concentrations in the Middle Atlantic Bight: Comparison of ship determinations and CZCS estimates. *Applied Optics*, 22, 20-35.

Griffiths, R. C. (1963). Studies of oceanic fronts in the mouth of the Gulf of California, an area of tuna migrations. *F.A.O. Fisheries Reports*, 6(3), 1583-1609.

Hartline, B. K. (1980). Coastal upwelling: physical factors feed fish. *Science*, 208(4439), 38-40.

Henson, S. A., and Thomas, A. C. (2007a). Phytoplankton scales of variability in the California Current System: 2. Latitudinal variability. *Journal of Geophysical Research*, 112, C7.

Henson, S. A., and Thomas, A. C. (2007b). Interannual variability in timing of bloom initiation in the California Current System. *Journal of Geophysical Research*, 112, C08007.

Huyer, A. (1983). Coastal Upwelling in the California Current System. *Progress in Oceanography*, 12(13), 259–284.

Kao, H.-Y., and Yu, J.-Y. (2009). Contrasting eastern-Pacific and central-Pacific types of ENSO, *Journal of Climate*, 22, 615–632, doi:10.1175/2008JCLI2309.1.

Lara-Lara, R. y Bazán-Guzmán, C. (2005). Distribución de clorofila y producción primaria por clases de tamaño en la costa del Pacífico mexicano. *Ciencias Marinas*, 31(1), 11-21.

- Lee, T., and McPhaden, M. J. (2010). Increasing intensity of El Niño in the central-equatorial Pacific. *Geophysical Research Letters*, 37, L14603, doi: 10.1029/2010GL044007.
- Longhurst, A. D., Lorenzen, C. J., and Thomas W. H. (1967). The role of pelagic crabs in the grazing of phytoplankton off Baja California. *Ecology*, 48, 190-200.
- Lluch-Belda, D. (2000). Centros de Actividad Biológica en la costa occidental de Baja California. En: Lluch-Belda, D., Lluch-Cota, S. E., Elorduy, J. y Ponce, G. (Eds.) *CAB: Centros de Actividad Biológica del Pacífico Mexicano*. (pp. 49–64). CIBNOR, La Paz.
- Lynn, R. J., and Simpson, J. J. (1987). The California Current System: The seasonal variability of its physical characteristics. *Journal Geophysical Research*, 92(C12), 12,947–12,966.
- McClain, E. P., Pichel, W. G., and Walton, C. C. (1985). Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperature. *Journal of Geophysical Research*, 90, 11587-11601.
- Martínez-López A. y Verdugo-Díaz, G. (2000). Composición y dinámica del fitoplancton en el BAC de Bahía Magdalena, B. C. S. En: Lluch-Belda, D., Lluch-Cota, S. E., Elorduy, J. y Ponce, G. (Eds.). *CAB: Centros de Actividad Biológica del Pacífico Mexicano*. (pp. 125-142). CIBNOR, La Paz.
- Mirabal Gómez, U. (2015). Variabilidad espacio-temporal de la biomasa y producción fitoplanctónicas frente al sur de California y norte de Baja California. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B. C., México: 55 p.
- Morel, A., and Berthon, J. F. (1989). Surface pigments, algal biomass profiles, and potential production of the euphotic layer: Relationships reinvestigated in view of remote-sensing applications. *Limnology & Oceanography*, 34(8), 1545-1562.
- NASA (2014). *National Aeronautics and Space Administration*. Recuperado el 25 de octubre de 2014, de <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/l3>.
- NOAA (2015). *National Oceanic and Atmospheric Administration*. Recuperado el 20 de julio de 2015, de <http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/table.html>.
- Pegau, W. S., Boss, E., and Martínez, A. (2002). Ocean color observations of eddies during the summer in the Gulf of California. *Geophysical Research Letters*, 29(9), 6-1.
- Ramírez-León, M. R., Álvarez-Borrego, S., Turrent-Thompson, C., Gaxiola-Castro, G., and Heckel-Dziendzielewski, G. (2015). Nutrient input from the Colorado River water to the northern Gulf of California is not required to maintain its pelagic ecosystem productive. *Ciencias Marinas*, 41, 169–188.
- Sakshaug, E., Bricaud, A., Dandonneau, Y., Falkowski, P. G., Kiefer, D. A., Legendre, L., Morel, A., Parslow, J., and Takahashi, M. (1997). Parameters of photosynthesis: definitions, theory and interpretation of results. *Journal of Plankton Research*, 19, 1637-1670.

- Santamaría del Ángel, E., Álvarez Borrego, S., Millán Nuñez R. y Müller-Karger, F. E. (1999). Sobre el efecto débil de las surgencias de verano en la biomasa fitoplanctónica del Golfo de California. *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural*, 49(1), 207-212.
- Santamaría-del-Ángel, E., Álvarez-Borrego, S., and Müller-Karger, F. E. (1994). Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery. *Journal of Geophysical Research*, 99(C4), 7411-7421.
- Traganza, E. D. (1985). Application of satellites to chemical oceanography. In: A. Zirino (ed.). *Mapping Strategies in Chemical Oceanography*. (pp. 373-392). American Chemical Society, Advances in Chemistry Series 209, Washington D. C.
- Walsh, J. J., Whitley, E., Kelly, J. C., Hunstman, S. A., and Pillsbury, R. D. (1977). Further transition states of Baja California upwelling ecosystem. *Limnology & Oceanography*, 22(2), 44-60.
- Walsh, C. E., Walsh, K. L., and Staley, R. C. (1973). Nutrients and water masses at the mouth of the Gulf of California. *Deep-Sea Research*, 20(6), 561-570.
- Yentsch, C. S. (1981). Phytoplankton growth in the sea, a coalescence of disciplines. In: P.G. Falkowski (Ed.). *Primary Productivity in the Sea*. (pp. 17-32). Plenum Press, New York.
- Zuria-Jordán, I. L., Álvarez-Borrego, S., Santamaría-del-Ángel, E. y Müller-Karger, F. E. (1995). Estimación de la biomasa fitoplanctónica, derivada de datos de satélite, frente a Baja California Sur. *Ciencias Marinas*, 21(3), 265-280.