

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y EDUCACIÓN
SUPERIOR DE ENSENADA, BAJA CALIFORNIA**



**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN ECOLOGÍA MARINA**

**Biomasa y producción fitoplanctónicas en el norte del Golfo
de California**

Tesis

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

Presenta:

Mario Rafael Ramírez León

Ensenada, Baja California, México
2014

Tesis defendida por
Mario Rafael Ramírez León
y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Saúl Álvarez Borrego
Director del Comité

Dra. Gisela Heckel Dziendzielewski
Miembro del Comité

Dr. Gilberto Gaxiola Castro
Miembro del Comité

Dr. Cuauhtémoc Turrent Thompson
Miembro del Comité

Dra. María Lucila del Carmen Lares Reyes
Coordinador
del Posgrado en Ecología Marina

Dr. Jesús Favela Vara
Director de Estudios de
Posgrado

Agosto, 2014

Resumen de la tesis de **Mario Rafael Ramírez León**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ecología Marina.

Biomasa y producción fitoplanctónicas en el norte del Golfo de California

Resumen aprobado por:

Dr. Saúl Álvarez Borrego
Director de tesis

El norte del Golfo de California (NGC) es una de las regiones más productivas del golfo. Su alta producción fitoplanctónica (PP) sustenta una gran diversidad biológica y pesquerías con capturas elevadas. En la parte noroccidental del NGC se encuentra el hábitat de la vaquita (*Phocoena sinus*), el cetáceo con el mayor peligro de extinción en el mundo debido a que su población es muy pequeña (pocos cientos de individuos). El objetivo de este estudio es demostrar que el NGC se ha mantenido como un sistema sano en el nivel de los productores primarios a pesar de la posible falta del aporte de nutrientes por el Río Colorado y que el tamaño pequeño de la población de la vaquita no se debe al colapso de su ecosistema pelágico. Con el propósito de explorar la posibilidad de una tendencia negativa de la biomasa y producción fitoplanctónicas en el NGC en las últimas décadas (~los últimos 35 años) se utilizó información generada por sensores orbitando en satélites (CZCS, SeaWiFS y MODIS-Aqua). Se analizó la variación temporal y espacial de la temperatura superficial del mar (TSM_{sat}), la concentración de clorofila (Chl_{sat}) y PP obtenida como productor estándar de la página web Ocean Productivity de Oregon State University. Se generaron series de tiempo para cuatro cuadrantes relativamente costeros en el NGC, dos en la parte occidental y dos en la parte oriental. El cuadrante noroccidental abarca aproximadamente el hábitat de la vaquita. La Chl_{sat} y PP presentaron valores más altos en el cuadrante noroccidental que en el resto de los cuadrantes en la época de “invierno”, y más claramente en verano. Esto puede deberse al efecto de advección de aguas turbias del Alto Golfo hacia el cuadrante NW que generan una sobreestimación de la Chl_{sat} por el contenido tan alto de detritus y materia orgánica disuelta de color (CDOM). Se presentaron cambios interanuales de Chl_{sat} y PP debido al impacto de la secuencia de eventos ENSO en la región. Sin embargo, la variación estacional fue la dominante en las cuatro localidades. Los máximos de TSM_{sat} se presentaron en agosto y septiembre (30-31°C) y los mínimos en enero y febrero (16-17 °C). Los máximos de Chl_{sat} y PP se presentaron en marzo y abril (2-3 mg m⁻³, 2-3 g C m⁻² día⁻¹) y los mínimos en agosto y septiembre (0.2-0.9 mg m⁻³, 0.5-1.1 g C m⁻² día⁻¹). Estos valores de Chl_{sat} y PP indican que el ecosistema pelágico del NGC es muy productivo con condiciones mesotróficas en “verano” y eutróficas en “invierno”.

Palabras clave: **biomasa fitoplancton, producción primaria, norte del Golfo de California.**

Abstract of the thesis presented by **Mario Rafael Ramírez León** as a partial requirement to obtain the Master in Science degree in Marine Ecology.

Phytoplankton biomass and production in the northern Gulf of California

Abstract approved by:

Dr. Saúl Álvarez Borrego

The northern Gulf of California (NGC) is one of the most productive regions of the gulf. Its high phytoplankton production (PP) supports a great biodiversity and fisheries with high yields. The habitat of the vaquita (*Phocoena sinus*), the cetacean with the highest risk of extinction in the world because of its very small population (few hundred individuals) is located in the northwestern part of the NGC. The objective of this study is to demonstrate that the NGC has remained as a healthy system at the level of primary producers in spite of the lack of input of freshwater and its nutrients from the Colorado River, and that the small size of the vaquita population is not due to the collapse of its pelagic ecosystem. With the objective of exploring the possibility of a negative tendency of phytoplankton biomass and production in the NGC during the latest decades (i.e., ~the last 35 years) information derived from remote sensors orbiting on satellites was used (CZCS, SeaWiFS and MODIS-Aqua). Temporal and spatial variation of sea surface temperature (TSM_{sat}), chlorophyll concentration (Chl_{sat}) and PP (obtained as standar product from website Ocean Productivity of Oregon State University) were analyzed. Times series for four coastal quadrants were generated, two in the western part and two in the eastern part of the NGC. The northwestern (NW) quadrant covers the vaquita habitat. The NW quadrant had higher Chl_{sat} and PP values than the others in winter and especially in the summer. This may be due to the effect of advection of Upper Gulf turbid waters into the NW quadrant, generating an overestimation of Chl_{sat} because the high concentration of detritus and colored dissolved organic matter (CDOM). Interannual changes of Chl_{sat} and PP occurred because of the impact of the sequence of ENSO events in the region. However, the seasonal variation was dominant in the whole region. Maxima TSM_{sat} occurred in August and September (30 - 31 °C) and minima in January and February (16 - 17 °C). Highest Chl_{sat} and PP were recorded in March and April (2-3 mg m⁻³, 2-3 g C m⁻² day⁻¹) and minima in August and September (0.2-0.9 mg m⁻³, 0.5-1.1 g C m⁻² day⁻¹). These values indicate that the pelagic ecosystem of the NGC is very productive with mesotrophic in “summer” and eutrophic in “winter” conditions.

Keywords: **phytoplankton biomass, primary production, northern Gulf of California.**

*Para mis papas
Para Alessandra
Para Alejandrino*

Agradecimientos

A CONACYT por el apoyo económico brindado para poder realizar esta tesis y mis estudios de maestría con el N° de beca: 12222988.

Al Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, Baja California por la oportunidad de realizar mis estudios de maestría y contribuir a mi formación personal y académica.

A mi director de tesis, maestro y amigo Dr. Saúl Álvarez Borrego, por compartir tu conocimiento y trabajar conmigo, guiarme y aconsejarme en el proceso de este trabajo de tesis. Gracias por confiarme este estudio.

A mi comité de tesis Dra. Gisela Heckel, Dr. Cuauhtémoc Turrent y Dr. Gilberto Gaxiola por sus asesorías, comentarios y apoyo para el desarrollo de esta tesis.

Al personal administrativo y docente de CICESE gracias por su ayuda, especialmente a los profesores con los que tuve la fortuna de convivir: Elizabeth Farias, Tim Baugartner, Lyda Ladah, Elena Solana, Bertha Lavaniegos, Oscar Sosa, Sharon Herzka. Gracias por su ayuda y conocimientos que me aportaron durante estos dos años.

A mis papas Sandra y Jesús por su apoyo incondicional, por alentarme a seguir a delante, por su amor, cariño y educación que me han dado a lo largo de mi vida. Gracias a ustedes he llegado hasta donde he querido. Los amo.

A mi hermanita Alessandra por tu cariño y por los momentos que hemos pasado, aun que digas que no me quieres. Te quiero.

A toda mi familia gracias por el amor y cariño que me han brindado a lo largo de mi vida. A mi Tata Mario, mis tías Ana, Nora y Nidia, mis tíos Sergio, Ricardo, Rene, Juan y Carlos. A mis primos Ana Gabriela, Elian, Luisana, Sergio, Jairo, Jesús. Y sobre todo a mis hermanos Daniel, Gabriela y Anya. Gracias a ustedes por todo.

A mis hermanos Gerardo, Oscar, Gioberti y Carlos, carnales gracias por estar en las buenas y en las malas, por más que pasen los años ahí siguen y seguiremos para apoyarnos.

Al cubo 409-2 Fernanda, Cecy, Aidee, Juanma, Jerry, gracias por los momentos que pasamos, aunque no las llevábamos tonteando, cuando nos tocaba trabajar nos apoyábamos y motivábamos.

A mis roomies Monty y Vla por las experiencias que he vivido y aprendido con ustedes en el último año, gracias carnales por su amistad y apoyo.

A mis compañeros y amigos de CICESE, Rubén, Edgar, Luis, Luz, Karen, Laura, Victor, Laurica, Anto, Paula, Celia, Anita, Karen, Emiliano, Gemma, Luz, Yama, Elena, Erick, Kena, Carolina. Gracias por su amistad y apoyo en estos dos años.

A mis compañeros de basquetbol, Kentaro, Chavira, Roger, Adolfo, Takao, Adrian, Ángel. Gracias Zona 50.

A mis mejores amigos Sergio, Carolina, Franco, Ángel, Miguel, Anibal, Ezequiel. Aun que a pesar de la distancia seguimos en contacto. Gracias por su amistad y apoyo.

A Andrea muchas gracias mi niña por dejarme vivir tantas experiencias en tan poco tiempo y compartir juntos los triunfos de ambos. Te quiero.

A esas personas que directa o indirectamente ayudaron en el desarrollo de este trabajo de tesis. Muchas gracias a mis maestros, familiares y amigos que me brindaron su apoyo.

Contenido

	Página
Resumen en español	ii
Resumen en inglés	iii
Dedicatorias	iv
Agradecimientos	v
Lista de Figuras	viii
Lista de Tablas	xi
Capítulo 1 - Introducción	
1.1 Introducción.....	1
1.1.1 Fitoplancton y la producción primaria global.....	1
1.1.2 Generalidades y condiciones físicas del Golfo de California...	2
1.1.3 Producción fitoplanctónica del Golfo de California.....	7
1.1.4 Norte del Golfo de California.....	8
1.1.5 Norte del Golfo de California: vaquita y pesquerías.....	10
1.2 Antecedentes.....	14
1.3 Justificación.....	18
1.4 Hipótesis.....	19
1.5 Objetivos.....	20
1.5.1 Objetivo general.....	20
1.5.2 Objetivos particulares.....	20
Capítulo 2 - Materiales y métodos	
2.1 Área de estudio.....	21
2.2 Métodos.....	24
2.3 Análisis estadístico.....	33
Capítulo 3 - Resultados	
3.1 Temperatura superficial del mar (TSM).....	35
3.2 Concentración de clorofila (Chl _{sat}).....	40
3.3 Producción primaria (PP).....	56
Capítulo 4 - Discusiones	
4.1 Biomasa y producción del norte del Golfo de California.....	64
4.2 Variación estacional y climatología.....	67
4.3 Variación espacial.....	73
Capítulo 5 - Conclusiones	76
Lista de referencias	78
Anexo 1	87
Anexo 2	101

Lista de figuras

Figura		Página
1	Ubicación geográfica del Golfo de California.	4
2	Estacionalidad del Golfo de California donde se muestra la biomasa fitoplanctónica en “invierno” y en “verano” (modificado de Lluch-Cota <i>et al.</i> 2007).	9
3	Vaquita (<i>Phocoena sinus</i>) y su cría.	11
4	Distribución aproximada de la vaquita, donde se muestra los encuentros visual y acústicamente confirmados (modificado de Rojas-Bracho <i>et al.</i> 2006).	12
5	Ubicación del área de estudio: Norte del Golfo de California, desde la región de las Islas Grandes hasta el Delta del Río Colorado.	23
6	Posición geográfica los cuatro cuadrantes de muestreo en el norte del Golfo de California, así como uno más en la Cuenca de Guaymas.	27
7	Perfil vertical hipotético de clorofila, donde se muestra el máximo subsuperficial de clorofila de la curva Gaussiana (modificado de Hidalgo-González y Álvarez-Borrego (2001).	30
8	Series de tiempo de la media mensual de la TSM de los cuadrantes a) NW, b) NE, c) SW, y d) SE, en el norte del Golfo de California. Para el período 2002-2013, el error estándar es menor al tamaño de los puntos.	36
9	Año promedio de la TSM para para los cuadrantes en el norte del Golfo de California: a) NW, b) NE, c) SW, y d) SE.	38
10	Densidad espectral de la TSM para el cuadrante NW. La línea continua es el promedio del valor de la densidad espectral y la discontinua marca los límites de confianza al 95%.	39
11	Estacionalidad de Chl _{sat} en el norte del Golfo de California: a) “verano” (julio de 2006, SeaWiFS) y b) “invierno” (marzo de 2006, SeaWiFS).	40
12	Series de tiempo de la media mensual de la Chl _{sat} para los cuadrantes, para el período 1978-186: a) NW, b) NE, c) SW, y d) SE. Las barras verticales muestran el error estándar.	41

Lista de figuras (continuación)

13	Series de tiempo de la media mensual de la Chl_{sat} para el norte del Golfo de California para los cuadrantes: a) NW, b) NE, c) SW, y d) SE. Para el periodo de tiempo de 1997-2013, en color azul los datos del sensor SeaWiFS y en color rojo los del sensor MODIS Aqua, las barras verticales muestran el error estándar.	45
14	Regresiones lineales entre los datos de los cuatro cuadrantes de la Chl_{sat} del sensor SeaWiFS y Chl_{sat} del sensor MODIS Aqua: a) con todos los datos, b) con datos de aguas caso I, c) con los datos de aguas caso II.	46
15	Diagrama de caja para los datos de los sensores SeaWiFS y MODIS Aqua para aguas caso II.	47
16	Año promedio de la Chl_{sat} de los cuadrantes para el norte del Golfo de California y Cuenca de Guaymas: a) NW, b) NE, c) SW, d) SE y e) CG de color azul los datos del sensor MODIS Aqua, de verde los del CZCS y de rojo los del SeaWiFS.	52
17	Regresión lineal entre la concentración de Chl_{sat} del cuadrante NW y el tiempo (años): a) del período del CZCS; b) del período del SeaWiFS; y c) del período del MODIS Aqua.	54
18	Densidad espectral de la Chl_{sat} para el cuadrante NW: a) para los datos del SeaWiFS; y b) para los del MODIS Aqua, la línea continua muestra el valor promedio de la densidad espectral y la discontinua los límites de confianza al 95%.	55
19	Series de tiempo de la media mensual de PP de los datos de la página de OSU, para los cuadrantes: a) NW, b) NE, c) SW, y d) SE en el norte del Golfo de California, para el periodo de tiempo de 2002-2013. Las barras verticales muestran el error estándar.	57
20	Año promedio de la PP para los cuadrantes para el norte del Golfo de California: a) NW, b) NE, c) SW y d) SE.	60
21	Regresión lineal entre la PP y el tiempo (años) del periodo 2002-2013 para el cuadrante NW.	61
22	Densidad espectral de la PP para el cuadrante NW, en línea continua se muestra el valor promedio de la densidad espectral y la línea discontinua los límites de confianza al 95%.	61

Lista de figuras (continuación)

23	Regresión lineal entre PP_{OSU} y los cálculos con el modelo de Platt <i>et al.</i> (1991) para: a) aguas caso I y b) aguas caso II.	63
24	Espectro de absorción total y espectros de absorción de los componentes ópticos del agua: Agua, Detritus, Fitoplancton y CDOM (modificado de Kirk 1994).	74

Lista de tablas

Tabla		Página
1	Resumen de los estudios con sensores remotos del color del océano en el Golfo de California, donde se presenta el periodo de estudio y la escala espacial.	15
2	Sensores remotos y los productos utilizados, mostrándose el periodo de estudio y el tamaño de pixel.	25
3	Coordenadas geográficas de los cuadrantes de estudio en el norte del Golfo de California y otro más para la Cuenca de Guaymas.	26
4	Fechas de los datos utilizados en el modelo de producción primaria de Platt <i>et al.</i> (1991).	28
5	Valores promedio de Chl_o , h , σ y Z_m utilizados para generar los perfiles de Chl_z del norte del Golfo de California (tomados de Hidalgo-González y Álvarez-Borrego 2001).	32
6	Parámetros fotosintéticos $P_{m(z)}^*$ y $\alpha_{PAR(z)}^*$ utilizados para la parte norte del Golfo de California (tomados de Valdez-Holguín <i>et al.</i> 1999).	32
7	TSM promedio (μ) y error estándar (ee) por cada época del año ($^{\circ}C$) para los cuatro cuadrantes en el norte del Golfo de California para el período 2002-2013.	37
8	Media mensual (μ) y error estándar (ee) de la TSM ($^{\circ}C$) para los cuatro cuadrantes de la parte norte del Golfo de California (aproximación a su climatología).	39
9	Chl_{sat} promedio (μ) y error estándar (ee) para cada época del año ($mg\ m^{-3}$) para los cuatro cuadrantes del norte del Golfo de California para el período de 1978-1986 (CZCS).	43
10	Chl_{sat} promedio (μ) y error (ee) estándar para cada época del año ($mg\ m^{-3}$) para los cuatro cuadrantes de la parte norte del Golfo de California para el período de 1997-2010 (SeaWiFS).	48
11	Chl_{sat} promedio (μ) y error estándar (ee) para cada época del año ($mg\ m^{-3}$) para los cuatro cuadrantes de la parte norte del Golfo de California para el período 2002-2013 (MODIS Aqua).	49

Lista de Tablas (continuación)

12	Media mensual (μ) y error estándar (ee) de la Chl_{sat} del sensor CZCS ($mg\ m^{-3}$) para los cuatro cuadrantes del norte del Golfo de California (aproximación a su climatología).	50
13	Media mensual (μ) y error estándar (ee) de la Chl_{sat} del sensor SeaWiFS ($mg\ m^{-3}$) para los cuatro cuadrantes del norte del Golfo de California (aproximación a su climatología).	51
14	Media mensual (μ) y error estándar (ee) de la Chl_{sat} del sensor MODIS Aqua ($mg\ m^{-3}$) para los cuatro cuadrantes del norte del Golfo de California (aproximación a su climatología).	53
15	PP promedio (μ) y error estándar (ee) para cada época del año ($g\ C\ m^{-2}\ día^{-1}$) de los datos de la página de OSU, para los cuatro cuadrantes del norte del Golfo de California, para el período 2002-2013.	58
16	Media mensual (μ) y error estándar (ee) de la PP ($g\ C\ m^{-2}\ día^{-1}$) de los datos de la página de OSU, para los cuatro cuadrantes del norte del Golfo de California (aproximación a su climatología).	59
17	Fecha de los datos de PP_{OSU} , PP_{GGAB} (mes, año), los datos mismos ($g\ C\ m^{-2}\ día^{-1}$) y la razón PP_{OSU}/PP_{GGAB} para aguas caso I.	62
18	Fecha de los datos de PP_{OSU} , PP_{PS} (mes, año), los datos mismos ($g\ C\ m^{-2}\ día^{-1}$) y la razón PP_{OSU}/PP_{PS} para aguas caso II.	63

Capítulo 1 - Introducción

1.1 Introducción

1.1.1 Fitoplancton y la producción primaria global

Los organismos que forman parte del fitoplancton son los principales productores primarios de los ecosistemas marinos y son la entrada más importante de energía en estos ecosistemas. A través del proceso de fotosíntesis, el fitoplancton transforma la energía luminosa proveniente del sol a compuestos orgánicos altos en energía química (carbohidratos, lípidos, proteínas, etc.). El fitoplancton es la base de las redes tróficas de los ecosistemas marinos.

La transferencia de los compuestos orgánicos entre los productores primarios y consumidores primarios y posteriormente a niveles tróficos más altos, promueve el flujo de energía en los ecosistemas. Debido a esto, el fitoplancton es parte fundamental en el ciclo biogeoquímico del carbono a nivel global (Álvarez-Borrego 2007). ¿Pero, qué tan importante es el flujo de energía en los ecosistemas marinos? Como se sabe, el fitoplancton capta CO₂ atmosférico y se deposita en forma de carbono particulado en el sedimento en el fondo oceánico. Este fenómeno se conoce como bomba biológica y se estima que el fitoplancton secuestra alrededor de 0.1×10^9 Pg C año⁻¹ (un Pg, petagramo, es igual a 10^{15} gramos, o una gigatonelada) (Post *et al.* 1990; Álvarez-Borrego 2007). Por lo anterior, se aprecia que la bomba biológica es muy eficiente en la escala geológica, pero no en la escala de siglos o menos, esto se debe a que el océano en algunas regiones actúa como sumidero de carbono y en otras como fuente de carbono hacia la atmósfera (Post *et al.* 1990).

Uno de los grandes retos de la oceanografía biológica en las últimas décadas es determinar la productividad de los ecosistemas marinos (Gaxiola-Castro *et al.* 2010). Las estimaciones de los pigmentos fotosintéticos (casi exclusivamente clorofila *a*), mediante el uso de mediciones *in situ* y sensoría remota, dan una primera aproximación a la realidad de la producción fitoplanctónica en una región determinada, lo cual permite

la identificación de lugares y momentos de una alta producción y fertilidad del océano (Gaxiola-Castro *et al.* 2008; Pérez-Arvizu *et al.* 2013).

Se calcula que la producción primaria a nivel global (biósfera) es de 104.9 Pg C año⁻¹ aproximadamente, de los cuales los ecosistemas terrestres son responsables de 56.4 Pg C año⁻¹ (54%) y los ecosistemas marinos de 48.5 PG C año⁻¹ (46%) (Field *et al.* 1998). El fitoplancton es el responsable del 95% de la producción primaria en los ecosistemas marinos y sólo representa alrededor de 1 Pg de su biomasa. Esto se debe a que el material orgánico que se produce con la fotosíntesis, se hunde hacia profundidades por debajo de la zona eufótica (bomba biológica) (Post *et al.* 1990; Field *et al.* 1998; Carr *et al.* 2006) o se utiliza por otros organismos dentro de la trama trófica marina.

Las variaciones en la biomasa y producción fitoplanctónicas dependen del acoplamiento que existe entre los factores bióticos y físicos característicos de cada región oceanográfica. Por ejemplo la disponibilidad de luz y nutrientes (principalmente nitratos y hierro) juegan un papel fundamental para el desarrollo del fitoplancton, asimismo la temperatura puede ser un factor limitante (v. g.: estratificación de la columna del agua), mientras que la composición taxonómica (diatomeas, dinoflagelados, etc.), la actividad bacteriana (reciclado de nutriente) y la interacción con otros grupos de organismos (v. g.: pastoreo por zooplancton), son los factores bióticos más importantes (Field *et al.* 1998). Por lo tanto en los océanos se pueden encontrar ecosistemas naturalmente eutróficos (concentraciones de clorofila *a* >1 mg m⁻³), es decir, muy productivos, ecosistemas mesotróficos (concentraciones de clorofila entre 0.2 y 1 mg m⁻³) y ecosistemas oligotróficos (concentraciones de clorofila <0.2 mg m⁻³) (Espinosa-Carreón *et al.* 2004).

1.1.2 Generalidades y condiciones físicas del Golfo de California

El Golfo de California o Mar de Cortés es un mar marginal con una posición única, ubicado entre la Península de Baja California al oeste y las costas de Sonora, Sinaloa y Nayarit al este. Se conecta en su parte sureña con el Océano Pacífico y colinda en la

en la parte norte con la desembocadura del Río Colorado (20°-32° N y 105.5°-114.4° W) (Figura 1). Tiene una longitud de 1,100 km y 80 - 209 km de ancho aproximadamente. La boca del Golfo de California abarca 220 km de ancho y va desde Cabo San Lucas, Baja California Sur hasta Cabo Corrientes en Jalisco, México (Álvarez-Borrego 1983; Espinosa-Carreón y Valdez-Holguín 2007; Lluch-Cota *et al.* 2007).

El Mar de Cortés se separa en dos áreas diferenciadas por las Islas Grandes que se encuentran en la parte central: Isla Ángel de la Guarda e Isla Tiburón. Topográficamente se divide en una serie de cuencas y trincheras las cuales aumentan de profundidad hacia el sur (hasta más de 3000 m de profundidad) y están divididas por cordilleras oceánicas (Álvarez-Borrego 1983).

El clima es más continental que oceánico, lo cual contribuye a que se observe un amplio rango de temperaturas a lo largo del año. Esto se debe a que el Golfo de California se encuentra climáticamente aislado de la influencia del Océano Pacífico por una serie de cadenas montañosas (1000 - 2000 m de altitud) que se extienden casi continuamente a lo largo de la Península de Baja California (Álvarez-Borrego 2010). En la parte norte del golfo el clima es seco y desértico con una precipitación anual menor a 100 mm (lluvias principalmente durante invierno). En la parte sur el clima es semitropical con una precipitación anual promedio de hasta >700 mm (lluvias principalmente durante verano debido al Monzón de América del Norte) (Douglas *et al.* 1993).

La estacionalidad en el Golfo de California está bien definida, distinguiéndose dos épocas: la época de “invierno” que abarca de diciembre a mayo y la época de “verano” de julio a octubre, con junio y noviembre como meses de transición (Hidalgo-González y Álvarez-Borrego 2004). La temperatura superficial del mar tiene una variación estacional muy marcada. En general las temperaturas mayores se encuentran en la parte norte y en la parte de la boca durante la época de verano (30 °C - 31 °C), mientras que las temperaturas menores se presentan en la región de las Islas Grandes durante todo el año (Soto-Mardones *et al.* 1999; Álvarez-Borrego 2010). Sin embargo, las temperaturas mínima y máxima se han registrado en las aguas someras al occidente de Isla Montague, en el Alto Golfo, con 8.25 °C en diciembre y 32.58 °C en agosto (Álvarez-Borrego *et al.* 1975).

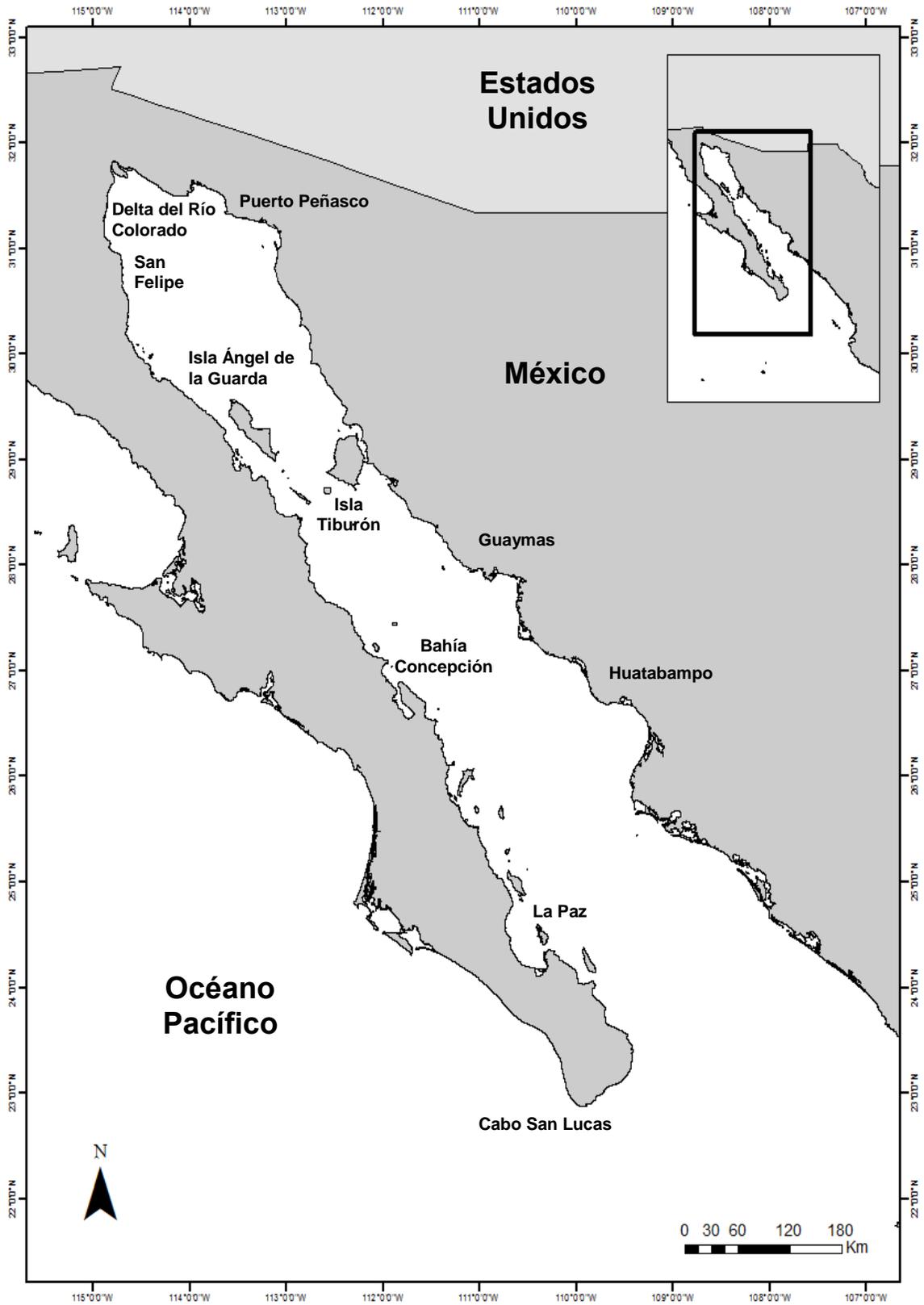


Figura 1. Ubicación geográfica del Golfo de California.

Los sistemas de vientos que predominan en el Golfo de California presentan una amplia variabilidad y son de carácter monzónico. Durante “invierno” soplan vientos secos con dirección noroeste (NW), mientras que durante “verano” los vientos son húmedos y soplan con dirección sureste (SE) (Badan-Dangon *et al.* 1991). Los eventos de surgencias son comunes en el Golfo de California, sobre todo durante “invierno” (Roden 1964). Esto se debe al efecto directo que tienen los vientos sobre la superficie del mar, al generar un transporte neto de agua (transporte de Ekman) en dirección perpendicular a la del viento. Cuando la costa se encuentra a la izquierda de la dirección del viento, el transporte de Ekman tiene una desviación de 90° hacia la derecha (Hemisferio Norte) debido al efecto Coriolis, por lo que el agua se mueve hacia fuera de la costa, dejando un “vacío” el cual genera una advección vertical con aguas profundas moviéndose hacia la superficie, con temperaturas bajas, contenido de oxígeno disuelto y pH bajos y contenido de nutrientes y carbono inorgánico disuelto altos. En cambio, durante “verano” las surgencias ocurren a lo largo de la costa occidental (Santamaría-del-Ángel *et al.* 1999; Lluch-Cota 2000).

Los eventos de surgencias en el Golfo de California tienen un papel fundamental sobre las comunidades fitoplanctónicas, sobre todo las que ocurren en la costa oriental, ya que las concentraciones altas de nutrientes inorgánicos promueven el crecimiento del fitoplancton. Se han reportado concentraciones de más de 10 mg m⁻³ en algunas regiones del golfo, y gracias a la circulación de giros de mesoescala estas altas concentraciones se extienden a lo ancho de todo el golfo (Santamaría-del-Ángel *et al.* 1994b). Por otro lado, las surgencias de “verano” no son biológicamente importantes. Durante verano existe una fuerte estratificación originada por las altas temperaturas y al apilamiento de agua ocasionado por la circulación superficial, por lo tanto no hay un incremento significativo en la biomasa fitoplanctónica (0.5 mg m⁻³). Otro factor importante, para que estas surgencias tengan un efecto débil, es la dirección a la que sopla el viento la cual está en dirección de sur a norte y la del flujo superficial es de norte a sur (Santamaría-del-Ángel *et al.* 1999; Lluch-Cota 2000).

El sistema de mareas en el golfo se produce por una co-oscilación con el Océano Pacífico (Lavín y Marinone 2003). La componente semidiurna, lunar principal, es el más importante de las mareas y la circulación por corriente de mareas varia

fundamentalmente acorde a ésta. La amplitud de las mareas es cuatro veces mayor en la parte norte que en la parte sur, con rangos mayores a 7 metros en el Alto Golfo de California, mientras que en la parte de las Islas Grandes el rango de marea es de 4 metros aproximadamente (Filloux 1973).

En general, la circulación superficial en la boca del Golfo de California es anticiclónica durante la época de “invierno”, es decir, el agua entra por la parte occidental y sale por la parte oriental. En cambio en la época de “verano” la circulación es ciclónica, el agua entra por la parte oriental y sale por la parte occidental de la boca (Beier 1997; Marinone 2003). Sin embargo, la circulación ciclónica y anticiclónica no está claramente diferenciada en algunas partes del año y existe una gran variabilidad en la circulación superficial en el golfo (Beier 1997).

Parte de lo que causa que la circulación del golfo sea muy complicada es la presencia de giros de mesoescala a lo largo del golfo. Por medio de boyas se describió un giro ciclónico durante “verano” cerca del margen occidental, con una velocidad de más de 55 cm s^{-1} en su periferia, aproximadamente (Emilsson y Alatorre 1997). A través del uso de imágenes del color del océano se detectaron una serie de jets, frentes y giros a lo largo de todo el golfo (Pegau *et al.* 2002). Estructuras de mesoescala similares se detectaron en la cuenca de Guaymas. Se observó un giro a finales de octubre con una velocidad de 50 cm s^{-1} en su periferia, aproximadamente (Navarro-Olache *et al.* 2004). En el norte del Golfo de California se ha reportado un giro que cambia de dirección dependiendo de la época del año: dirección ciclónica durante verano y dirección anticiclónica durante invierno (Lavín *et al.* 1997; Beier y Ripa 1999; Palacios-Hernández *et al.* 2002). La conexión que existe entre la parte norte y sur del Golfo de California se debe a la presencia de corrientes superficiales muy fuertes en la región de las Islas Grandes y la circulación superficial del agua va hacia el sur durante el invierno y hacia el norte durante el verano (Marinone 2003).

El Golfo de California es la única cuenca de evaporación que se encuentra en el Océano Pacífico. A pesar de la pérdida de calor por la alta tasa de evaporación, el golfo tiene una ganancia neta de calor (Bray 1988; Lavín y Organista 1988). Este flujo de calor atmosfera-océano es mayor a 100 W m^{-2} , en promedio. Este calor que gana el golfo es exportado hacia el Pacífico adyacente, de lo contrario la temperatura del golfo

estaría aumentando continuamente (Lavín *et al.* 1997). Por esto existe un intercambio de agua entre el Golfo de California y el Océano Pacífico, donde sale agua cálida en los primeros 200 m y entra agua fría rica en nutrientes entre 200 y 600 m de profundidad. Este flujo se ha calculado que es de 0.23 Sv (un Sverdrup, 1 Sv, es $10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) (Álvarez-Borrego y Giles-Guzmán 2012). Esto representa el mecanismo natural de fertilización del golfo más importante (Álvarez-Borrego 2012).

1.1.3. Producción fitoplanctónica del Golfo de California

El Golfo de California es uno de los ecosistemas marinos más productivos del planeta (mg m^{-2}) (Zeitzschel 1969; Álvarez-Borrego y Lara-Lara 1991; Álvarez-Borrego 2012). Esta alta productividad fitoplanctónica se debe a las condiciones climatológicas y oceanográficas que imperan en el Golfo de California.

El golfo es un sistema eutrófico con una productividad fitoplanctónica que alcanza valores mayores a 1 g C día^{-1} y en algunos lugares mayores a 4 g C día^{-1} (Álvarez-Borrego y Lara-Lara 1991). La producción primaria integrada promedio para todo el golfo es de $300 \text{ g C m}^{-2} \text{ año}^{-1}$, aproximadamente (Escalante-Almazán *et al.* 2013). Esta alta productividad es ocasionada por lo somero que se encuentran las isogramas de nutrientes (como NO_3 y PO_4), cuya profundidad es de 100 a 200 m. Estas aguas de altos nutrientes llegan a la zona eufótica por la dinámica física del golfo, principalmente surgencias y mezcla por corrientes de marea. Se han reportado concentraciones superficiales de fosfatos (PO_4) mayores a $0.4 \mu\text{M}$, de nitratos (NO_3) mayores a $0.1 \mu\text{M}$ y de ácido silícico (H_4SiO_4) mayores a $1 \mu\text{M}$ (Álvarez-Borrego *et al.* 1978).

El Golfo de California tiene distintos mecanismos naturales de fertilización. Los principales son el intercambio de agua con el Pacífico (como se mencionó antes), las surgencias a lo largo de la costa oriental y la mezcla debida a las corrientes de marea (Álvarez-Borrego y Giles-Guzmán 2012). Existen otros fenómenos como los meandros, y remolinos de mesoescala que también aportan nutrientes a la zona eufótica, pero su efecto es más local.

El intercambio de agua con el Pacífico tiene un papel fundamental en la fertilización de las aguas del Golfo de California. De una manera prácticamente continua, una gran cantidad de nutrientes inorgánicos entran al golfo. Se estima que el total de NO_3 que entran al año es de $116.6 \times 10^9 \text{ mol año}^{-1}$ en promedio y estos llegan con facilidad hacia la capa de mezcla por medio de fenómenos como surgencias, mezcla por mareas, etc. (Álvarez-Borrego y Giles-Guzmán 2012). Este aporte tiene una importancia mucho mayor que el aporte de nutrientes por parte de los ríos. Éste último es casi nulo por la construcción de presas, y en su caso sólo tiene efectos locales (Álvarez-Borrego 2010). El Río Yaqui contribuye, aproximadamente sólo con el 0.04% del 1% de lo que aporta anualmente de NO_3 el Océano Pacífico. Este río es uno de los principales dentro del golfo. La suma del aporte de nutrientes de los demás ríos que desembocan en el golfo, también es muy baja, en comparación con el aporte del Océano Pacífico (Álvarez-Borrego 2012) .

El ciclo estacional tiene una fuerte influencia en la variación de la biomasa y producción fitoplanctónicas en el Golfo de California (Hidalgo-González y Álvarez-Borrego 2004; Kahru *et al.* 2004). Esto se debe principalmente al efecto que tienen las surgencias de “invierno” sobre las comunidades fitoplanctónicas, que es más importante que las surgencias de “verano”, como ya se mencionó anteriormente (Figura 2).

1.1.4. Norte del Golfo de California

El Golfo de California ha sido dividido geográficamente en función de sus características físicas y biológicas (Gilbert y Allen 1943; Round 1967; Santamaría-del-Angel *et al.* 1994b; Lluch-Cota 2000; Hidalgo-González y Álvarez-Borrego 2004; Espinosa-Carreón y Valdez-Holguín 2007). Una de las principales regiones es la parte norte del Golfo de California que se extiende desde el norte de las Islas Grandes hasta el Delta del Río Colorado.

La parte norte del Golfo de California se caracteriza por ser la región más somera con una profundidad promedio de 200 m, aproximadamente (Morales-Zárate *et al.* 2004; Lercari *et al.* 2007). Es una de las regiones más productivas de todo el golfo, con concentraciones de clorofila (Chl) de hasta 40 mg m^{-3} según mediciones con base en

muestreos *in situ* y $>10 \text{ mg m}^{-3}$ estimadas por sensores remotos (Gendrop-Funes *et al.* 1978; Santamaría-del-Angel *et al.* 1994b). Los datos *in situ* de producción primaria (PP) son escasos pero arrojan valores altos, $1.1 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ (Álvarez-Borrego y Lara-Lara 1991). Hidalgo-González y Álvarez-Borrego (2004) reportaron una PP calculada con base en datos de satélite de $1.61 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ en promedio para “invierno” y de $0.43 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ para “verano”.

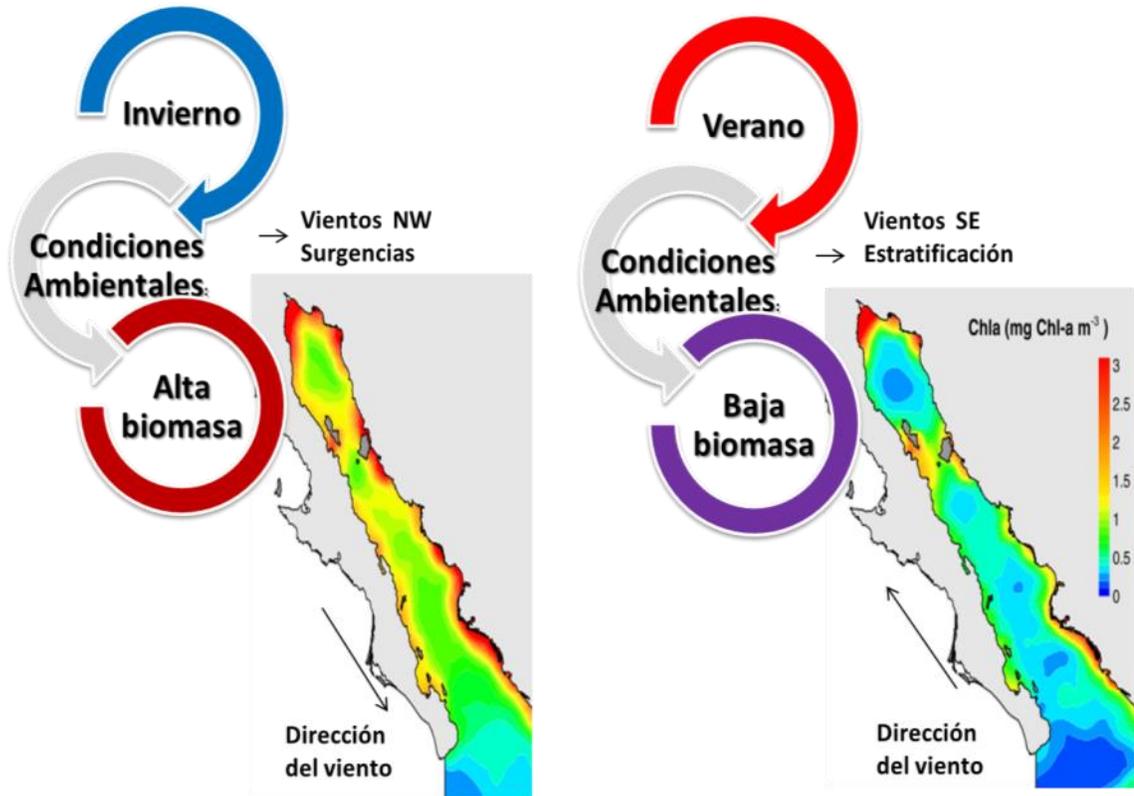


Figura 2. Estacionalidad del Golfo de California, donde se muestra la biomasa fitoplanctónica en “invierno” y en “verano” (modificado de Lluch-Cota *et al.* 2007).

Esta región sirve como lugar de reproducción y crianza de muchas especies de invertebrados, peces, mamíferos marinos y aves. Su alta productividad fitoplanctónica sustenta una gran diversidad biológica con 544 especies de vertebrados y 2258 especies de invertebrados, de las cuales alrededor de 147 son especies endémicas; en conjunto estas especies representan el 47% de la diversidad de todo el Golfo de California (Brusca *et al.* 2005).

Esta alta productividad es sustento de grandes recursos pesqueros por lo que es una de las principales regiones pesqueras de México. Entre los principales recursos se encuentran la corvina, la sardina y distintas especies de camarón. La pesquería de arrastre del camarón, es una de las más remunerables dentro del Golfo de California y de todo México (Lluch-Cota *et al.* 2007; Cisneros-Mata 2010). Sin embargo, su actividad ha llevado a varias especies al límite de su carga y actualmente se encuentran sobreexplotadas. Esto se debe a que la fauna acompañante del camarón o “bycatch” es 10 toneladas a 1 tonelada de camarón capturado, la cual incluye principalmente juveniles de otras especies. Además, las comunidades bentónicas y demersales, son afectadas por esta pesquería, al disminuir la biodiversidad de éstas y modificar la estructura del sustrato (Morales-Zárte *et al.* 2004; Brusca *et al.* 2005; Carvajal *et al.* 2010).

La Reserva de la Biosfera del Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado (RBAGCDRC) se estableció por decreto federal en 1993 y es el área marina protegida más grande de esta región, la cual tiene como objetivo proteger las especies que aquí habitan. Son más de 1,048 especies de invertebrados (43 especies endémicas), 230 especies de peces, 15 especies de mamíferos marinos (43% de la diversidad de todo el golfo). Además, es hábitat de dos especies en peligro de extinción, la vaquita marina (*Phocoena sinus*) y la totoaba (*Totoaba macdonaldi*) (Álvarez-Borrego 2003; Rojas-Bracho *et al.* 2006; Lercari *et al.* 2007; Lluch-Cota *et al.* 2007).

1.1.5 Norte del Golfo de California: vaquita y pesquerías

La vaquita, también conocida como marsopa del Golfo de California, es una especie de delfín pequeño, mide 1.50 m y pesa 50 kg, en promedio (Figura 3) (Rojas-Bracho *et al.* 2006). Es endémica del Alto Golfo de California y se encuentra en la lista de especies en peligro extinción bajo la NOM 059 y desde 1978 entró a la lista roja como especie vulnerable y a partir de 2006 se cambió a en peligro crítico (IUCN, 1978; IUCN, 2006; SEMARNAT, 2008). La Comisión Ballenera Internacional (IWC por sus siglas en inglés) considera a la vaquita como el mamífero marino con la más alta prioridad para su conservación en el mundo (Carvajal *et al.* 2010).

La distribución de la vaquita se restringe a 4000 km² en la parte noroeste del Alto Golfo de California (alrededor de 30°45' N y 114°20' W), pero se agregan principalmente alrededor de la región de Rocas Consag, a 40 km al este de San Felipe (Figura 4). Esta área de agregación abarca una extensión de 2235 km² (Gerrodette *et al.* 1995; Rojas-Bracho *et al.* 2006). A partir de 2005 por decreto federal se designó el Refugio del Hábitat de la Vaquita, que tiene un área de 1263.77 km² de los cuales sólo 900 km² se encuentran dentro de la RBAGCDRC. La vaquita marina se alimenta principalmente de peces demersales y bentónicos y de calamares pequeños (su dieta consiste de alrededor de 20 especies), mientras que sus principales depredadores son especies de tiburones grandes y orcas (Rojas-Bracho *et al.* 2006).



Figura 3. Vaquita (*Phocoena sinus*) y su cría.

La primera estimación de la población de este mamífero marino arrojó que había 567 individuos (el intervalo al 95% de nivel de confianza era 177 a 1073) y se concluyó que ésta era pequeña, aislada y en peligro de extinción (Jaramillo-Legorreta *et al.* 1999). Casi una década después el número de vaquitas calculado fue un 57% menor y se estimó que existían 245 individuos (intervalo de confianza de 68 a 884), con una tasa promedio de decremento de 7.6% año⁻¹ (D'agrosa *et al.* 2000; Gerrodette *et al.* 2011).

Las causas de la disminución de la población de la vaquita son tema de debate y se han planteado diversas hipótesis para explicarlas.

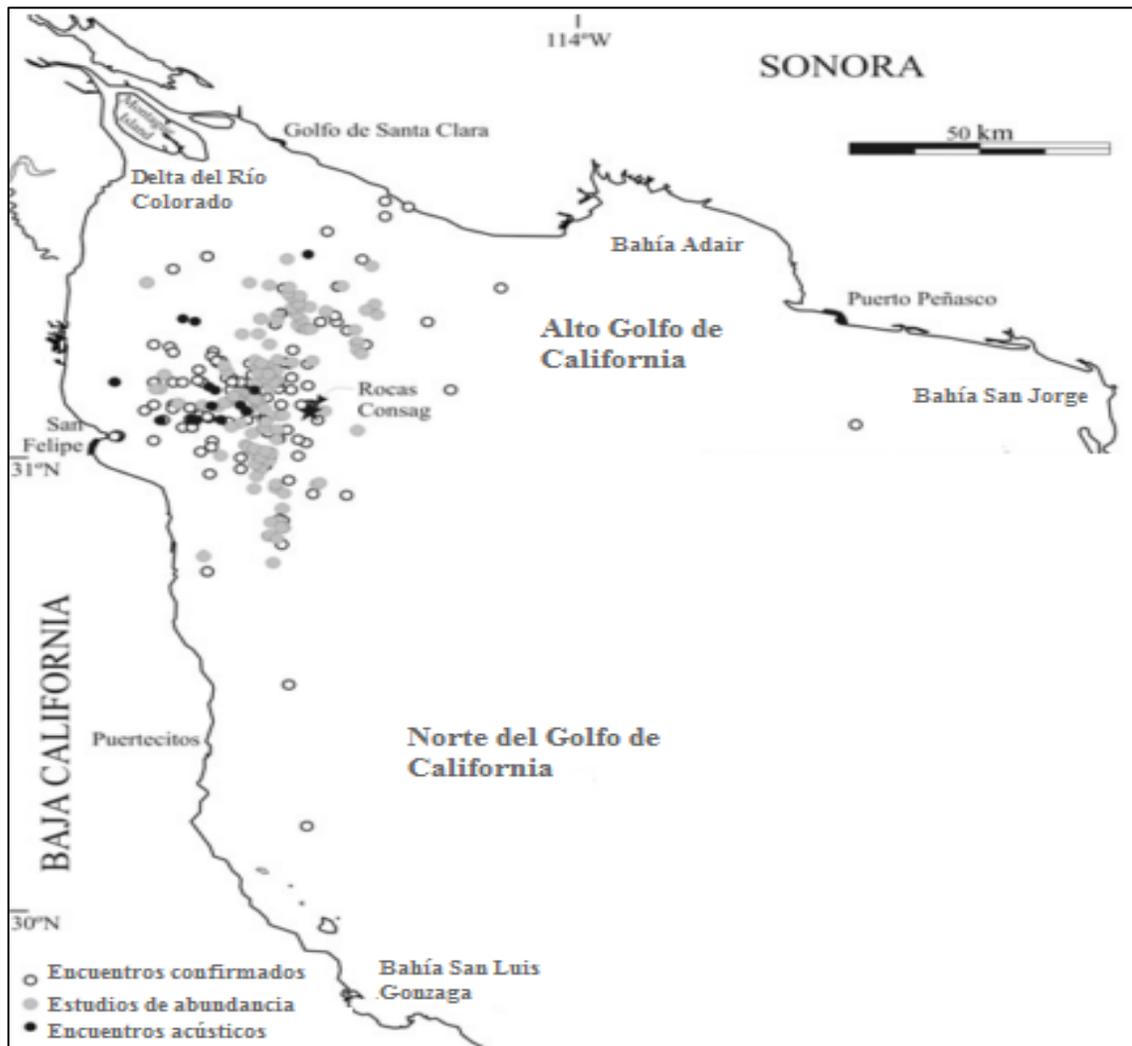


Figura 4. Distribución aproximada de la vaquita, donde se muestra los encuentros visual y acústicamente confirmados (modificado de Rojas-Bracho *et al.* 2006).

Durante las últimas décadas ha habido una controversia en torno al manejo y conservación de esta especie de mamífero marino, entre los sectores pesqueros y de la conservación, por los problemas ecológicos y ambientales que la actividad pesquera ha generado en esta región (Morales-Zárate *et al.* 2004; Brusca *et al.* 2005; Lercari *et al.* 2007; Lluch-Cota *et al.* 2007). Dentro del sector pesquero se maneja la hipótesis de que la población de la vaquita ha disminuido debido a la alteración del ecosistema del Alto Golfo de California y sus alrededores a causa del cese del aporte de agua dulce del Río

Colorado.(Riofrío-Lazo *et al.* 2012). La hipótesis establece que al no existir este aporte, no entran nutrientes al norte del golfo, por lo tanto la producción del fitoplancton ha bajado y esto ha ocasionado que el sistema pelágico se haya colapsado (Galindo-Bect *et al.* 2000). Sin embargo, no se ha demostrado que los niveles de nutrientes en la parte norte del Golfo de California hayan disminuido significativamente, ni que la productividad de este ecosistema haya sufrido un decremento y aparentemente no es un factor de riesgo para la vaquita a corto plazo (Rojas-Bracho y Taylor 1999; Brusca y Hendrickx 2010).

Por otra parte, se ha documentado que la disminución de la población de la vaquita es causada principalmente por la actividad pesquera en esta región (Rojas-Bracho y Taylor 1999; D'agrosa *et al.* 2000; Riofrío-Lazo *et al.* 2012). Los organismos de esta especie son sumamente vulnerables a las artes de pesca. Éstos quedan atrapados en las redes agalleras y de arrastre con una gran facilidad. Al estar atrapados ya no pueden salir a respirar, por lo tanto se ahogan y mueren (Rojas-Bracho *et al.* 2006). Se ha calculado que la tasa de mortalidad por redes es de 58 organismos año⁻¹ (D'agrosa *et al.* 2000).

Sin embargo, al existir un conflicto de intereses (sobre todo del sector pesquero) no se han implementado las medidas necesarias para la conservación de esta especie, como la prohibición de las artes de pesca que causan esta tasa de mortalidad tan alta, así como un buen monitoreo de la vaquita en el Refugio del Hábitat de la Vaquita. Por tanto, este trabajo pretende demostrar que el hábitat de la vaquita marina y todo el norte del Golfo de California son ecosistemas sanos, es decir naturalmente eutróficos (Chl a >1 mg m⁻³) y que no existe un colapso en el ecosistema pelágico por la falta del aporte de nutrientes que provenían del agua del Río Colorado.

1.2 Antecedentes

Los primeros datos de producción primaria para el Golfo de California fueron reportados por Zeitzschel (1969), quien con un número limitado de estaciones de muestreo concluyó que el Golfo de California es un ecosistema altamente productivo, incluso comparándose con ecosistemas de corrientes con frontera oriental (ej. Corriente de California, Corriente de Perú-Chile, Corriente de Benguela, etc.). Álvarez-Borrego y Lara-Lara (1991) establecieron que los estudios de la producción fitoplanctónica para el Golfo de California son escasos y puntuales, por lo que se necesita generar un mayor número de datos para caracterizar de una manera mejor la variabilidad espacio-temporal de la producción primaria.

Los datos de sensores remotos, sumados a modelos que estiman la PP, han resultado ser una herramienta poderosa que ha revolucionado el estudio de la oceanografía biológica (Gaxiola-Castro *et al.* 2010). Permiten un estudio sinóptico de regiones grandes del océano y son un método rápido y eficaz para estudiar la variabilidad espacio-temporal de la biomasa y producción fitoplanctónicas (Zuria-Jordan *et al.* 1995; Barocio-León *et al.* 2007).

El primer sensor que fue puesto en órbita fue el Coastal Zone Color Scanner (CZCS) a bordo del Nimbus 7 y estuvo funcional desde octubre de 1978 a junio de 1986 (Zuria-Jordan *et al.* 1995). Desde entonces se han puesto en órbita otros sensores, los cuales tienen como objetivo generar información para un entendimiento mejor de los procesos biológicos que ocurren en los océanos. Por medio de la obtención de distintos productos como la concentración de clorofila (Chl_{sat}), la radiación fotosintéticamente activa (PAR), el coeficiente de atenuación a 490 nm (K_{d490}), etc. De estos sensores destacan dos, por el tiempo que han permanecido en órbita: el Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) que entró en órbita en septiembre de 1997 y dejó de funcionar en diciembre de 2010 y el Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS Aqua) que está en operación desde julio de 2002 hasta la actualidad.

Generalmente, en el Golfo de California son predominantes los días soleados con cielos despejados durante todo el año. Estas condiciones climatológicas hacen que éste sea un lugar ideal para la calibración de sensores remotos (Álvarez-Borrego 2012).

Por lo tanto desde que se puso en órbita el CZCS existen datos del color del océano para el golfo. En la Tabla 1, se observan algunos de los estudios que utilizaron datos del color del océano en el golfo, y abarcan diversas escalas de tiempo y espacio. Sin embargo son pocos los trabajos que detallen la variación espacio-temporal en la parte norte del Golfo de California con series de tiempo largas.

Tabla 1. Resumen de los estudios con sensores remotos del color del océano en el Golfo de California, donde se presenta el periodo de estudio y la escala espacial.

Estudio	Sensor Remoto	Periodo de Estudio	Área de Estudio
Santamaría-del-Ángel <i>et al.</i> (1994b)	CZCS	1978-1986	Todo el golfo
Santamaría-del-Ángel <i>et al.</i> (1994a)	CZCS	1978-1986	Todo el golfo
Santamaría-del-Ángel <i>et al.</i> (1999)	CZCS	1978-1986	Todo el golfo
Pegau <i>et al.</i> (2002)	SeaWiFS	1997-2001	Todo el golfo
Hidalgo-González y Álvarez-Borrego (2004)	SeaWiFS	1997-2002	Todo el golfo
Kahru <i>et al.</i> (2004)	OCT	1997-2003	Todo el golfo
	SeaWiFS		
	MODIS Aqua		
Espinosa-Carreón y Valdez-Holguín (2007)	SeaWiFS	1997-2002	Todo el golfo
Herrera-Cervantes <i>et al.</i> (2010)	SeaWiFS	1997-2006	Todo el golfo
Álvarez-Molina <i>et al.</i> (2013)	SeaWiFS	2005-2006	Parte central
Escalante-Almazán <i>et al.</i> (2013)	SeaWiFS	1997-2010	Parte central e Islas Grandes
Pérez-Arvizu <i>et al.</i> (2013)	OCTS	1997-2010	Parte norte
	SeaWiFS		

Los primeros trabajos con sensores remotos en el Golfo de California son los publicados por Santamaría-del-Ángel *et al.* (1994a; 1994b). Dichos autores dividieron el golfo en 14 regiones diferentes, a partir de composiciones semanales de Chl_{sat} del CZCS. Reportaron que las regiones más norteñas presentaron concentraciones de clorofila altas, de hasta 10 mg m^{-3} durante “invierno”. De igual manera en estas regiones

no se aprecian los efectos del evento El Niño del 1982-83 y no hubo diferencias en la concentración de pigmentos con los años no Niño.

Varios trabajos basados en datos de sensores remotos han descrito la variación espacio-temporal de la biomasa fitoplanctónica del Golfo de California (Santamaría-del-Angel *et al.* 1994a; Hidalgo-González y Álvarez-Borrego 2004; Kahru *et al.* 2004; Espinosa-Carreón y Valdez-Holguín 2007; Herrera-Cervantes *et al.* 2010). A grandes rasgos, se ha reportado que las concentraciones mayores de clorofila se encuentran durante la época de “invierno” en la mayor parte del golfo, principalmente en la parte oriental.

A partir de datos obtenidos por imágenes de satélite del SeaWiFS, Pegau *et al.* (2002) reportaron una serie de remolinos de mesoescala a lo largo del Golfo de California. Para la parte norte se encontró un remolino con circulación ciclónica para los meses de “verano”. Este remolino de mesoescala ya había sido descrito por Lavín *et al.* (1997) (como se mencionó anteriormente) por medio de boyas a la deriva y coincide con la circulación ciclónica durante el verano.

Kahru *et al.* (2004) realizaron un estudio de series de tiempo con datos del OCTS y del SeaWiFS, y concluyeron que la frecuencia principal de variación de la parte norte del Golfo de California es el ciclo estacional, al igual que la mayor parte de todo el golfo, excepto la zona de las Islas Grandes que también presentó una frecuencia semianual.

A partir de datos de Chl_{sat} del SeaWiFS, Hidalgo-González y Álvarez-Borrego (2004) obtuvieron datos de producción primaria total (PP_T) y producción primaria nueva (PP_{Nueva}) y observaron que los datos mayores se presentan durante la época de “invierno” ($1.16 - 1.91 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$). La parte norte del golfo (incluyendo las Islas Grandes) fue una de las más productivas con más de $1.33 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ en promedio. Además, los efectos del evento El Niño 1997-98 no afectaron a esta región.

Con base en composiciones mensuales de Chl_{sat} obtenidas del SeaWiFS, Espinosa-Carreón y Valdez-Holguín (2007) reportaron que la zona norte del Golfo de California es un ecosistema eutrófico ($Chl > 1 \text{ mg m}^{-3}$). Para esta región el efecto del evento El Niño 1997-98 fue casi nulo. Además, la frecuencia principal de variación que

encontraron para la mayor parte del golfo es el ciclo estacional (excluyendo la zona de las Islas Grandes), como lo reportado por otros autores. Pérez-Arvizu *et al.* (2013) obtuvieron resultados similares utilizando composiciones mensuales de Chl_{sat} del SeaWiFS de la zona norte del Golfo de California. Estos últimos autores concluyeron que este ecosistema es eutrófico y su frecuencia principal de variación es el ciclo estacional, encontrándose las concentraciones mayores de Chl_{sat} durante la época de “invierno”.

1.3 Justificación

Tener un mejor conocimiento de la oceanografía biológica del ecosistema pelágico del norte Golfo de California, ayudará a mejorar los planes de conservación y manejo. Esta región tiene un gran interés ecológico, biológico y económico, principalmente el área de la Reserva de la Biosfera del Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado, así como el polígono del Refugio del Hábitat de la Vaquita.

En la actualidad existe una problemática entorno al manejo y conservación de estas áreas naturales protegidas y sus especies en peligro de extinción, como la vaquita, debido a los efectos que causan las actividades pesqueras y el posible efecto negativo de la falta de aporte de agua del Río Colorado.

No existen estudios que detallen la variabilidad espacio-temporal de la biomasa y producción fitoplanctónicas a grandes escalas de tiempo y espacio, para esta región. Este trabajo pretende establecer el estado del ecosistema pelágico del norte del Golfo de California. La pregunta fundamental a responder es si el ecosistema pelágico del norte del golfo es saludable con base en sus niveles de biomasa y producción fitoplanctónicas, o si han disminuido significativamente como para establecer que la región no tiene la capacidad de sostener poblaciones de mamíferos marinos como la vaquita.

1.4 Hipótesis

La falta de aporte de agua dulce del Río Colorado, y los nutrientes que éste acarrea consigo, no han afectado la biomasa y productividad fitoplanctónicas del ecosistema pelágico del norte del Golfo de California. Esto se debe a que existen otros medios naturales de fertilización, como surgencias, mezcla ocasionada por corrientes de marea, entre otros.

Por lo tanto, se espera observar valores relativamente elevados de Chl_{sat} y PP en esta región en las últimas tres décadas, similares a otras regiones del golfo, y no encontrar tendencias temporales que indiquen un colapso del ecosistema.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo Principal

Demostrar que el ecosistema pelágico del norte del Golfo de California es un sistema productivo (eutrófico), incluyendo el área del Refugio del Hábitat de la Vaquita.

1.5.2 Objetivos Particulares.

Caracterizar la variación temporal de Chl_{sat} , PP y TSM en el norte del Golfo de California a través de series de tiempo construidas con datos de composiciones mensuales.

Caracterizar la variación espacial de Chl_{sat} , PP y TSM con cuatro cuadrantes en el norte del Golfo de California, incluyendo uno en el hábitat de la vaquita.

Describir una primera aproximación de una climatología para Chl_{sat} , PP y TSM del norte del Golfo de California.

Identificar las frecuencias dominantes de la variabilidad temporal durante el período de estudio en el norte del Golfo de California.

Comparar Chl_{sat} y PP del hábitat del refugio de la vaquita con otras zonas del norte del Golfo de California.

Comparar los datos del norte del Golfo de California con otra región de alta biomasa y producción fitoplanctónicas como la cuenca de Guaymas, con el fin de explicar posibles diferencias de Chl_{sat} y PP entre los datos de sensores diferentes.

Capítulo 2 - Materiales y Métodos

2.1 Área de Estudio

El norte del Golfo de California se delimita geográficamente entre las coordenadas 29°-32°N y 112°-115°W, desde la parte norte de las Islas Ángel de la Guarda y Tiburón hasta el Delta del Río Colorado y abarca una extensión de aproximadamente 36,000 km² (Figura 5). Esta región tiene características únicas y contrastantes con el resto del golfo (Riofrío-Lazo *et al.* 2012). El norte del Golfo de California es la región más somera de todo el golfo, se caracteriza por tener una profundidad promedio de 200 m y un régimen de mareas con rangos de hasta 7 m. El clima es continental, seco y desértico, con una precipitación anual menor a los 100 mm (Álvarez-Borrego 1983).

La temperatura superficial del mar oscila entre 10 °C durante “invierno” y 32 °C durante “verano” y presenta una alta variabilidad espacial, asociada a la formación de núcleos “cálidos” en invierno y núcleos “fríos” en verano, debido a la circulación anticiclónica y ciclónica de cada época respectivamente (Soto-Mardones *et al.* 1999). La salinidad promedio es de 36 durante “invierno” y más de 38 durante “verano”, incluso con valores que superan los 40 en la parte más norteña (Álvarez-Borrego 1983). Estos valores altos de salinidad, son indicativos de que la evaporación es mayor que la precipitación ya que el aporte de agua dulce por ríos es nulo la mayor parte del tiempo. La variación temporal de temperatura y salinidad se determina por la estacionalidad de los flujos de calor. Lavín y Organista (1988) reportaron que la tasa de evaporación promedio es de 0.9 m año⁻¹, a pesar de la cual hay una ganancia neta de calor que como promedio anual es de 69 W m⁻² cerca de la costa y de 83 W m⁻² en la zona oceánica.

En esta región el régimen de mareas genera corrientes fuertes (Stock 1976), lo cual ocasiona que los nutrientes que se encuentran por debajo de la termoclina, lleguen a la zona eufótica por transporte turbulento. Se han reportado concentraciones superficiales de NO₃ de 0.2 - 4.0 µM, PO₄ de 0.8 - 1.0 µM y SiO₂ de 6.1 - 18 µM, en abril y mayo (Álvarez-Borrego *et al.* 1978). Esta alta disponibilidad de nutrientes da como resultado que esta región sea altamente productiva, con una PP promedio de

1.61 g C m⁻² día⁻¹, con concentraciones de clorofila medidas *in situ* de hasta 30 mg m⁻³ y derivadas de sensores remotos hasta más de 10 mg m⁻³ y con una concentración de diatomeas de más de 100,000 células l⁻¹ (Gilbert y Allen 1943; Gendrop-Funes *et al.* 1978; Santamaría-del-Angel *et al.* 1994b; Hidalgo-González y Álvarez-Borrego 2004).

El Alto Golfo de California (>31°N) es la parte más norteña y más somera de todo el golfo y tiene características oceanográficas únicas, que lo distinguen del resto de la parte norte del golfo. En promedio tiene una profundidad menor a los 30 m, siendo la parte frente a Baja California la más somera (Álvarez-Borrego 2003). El rango de mareas es de hasta 7 m, y las corrientes de marea tienen velocidades de hasta 1 m s⁻¹. La tasa de disipación de energía del componente M₂ de la marea es de hasta más de 0.5 W m⁻² (Argote *et al.* 1995).

Desde la construcción de presas a lo largo del cauce del Río Colorado (Hoover en 1936 y Glen Canyon en 1966), el aporte de agua dulce al Golfo de California por parte de este río ha disminuido hasta ser casi nulo (Álvarez-Borrego 2003). Por lo tanto el ecosistema del Delta del Río Colorado pasó a ser de un estuario natural a un estuario inverso, donde la salinidad aumenta hacia la cabeza del delta (Lavín *et al.* 1998). Se han registrado salinidades mayores a 40 y temperaturas mayores a 32 °C en verano (Álvarez-Borrego *et al.* 1975).

Los nutrientes inorgánicos en el Delta del Río Colorado son abundantes. Se han reportado concentraciones de NO₃ de 3.3 - 18.3 µM y PO₄ de 0.3 - 3.1 µM (Hernández-Ayón *et al.* 1993). Estas concentraciones altas son ocasionadas por la descarga de aguas residuales y de campos agrícolas ricas en estos compuestos. En la última década estas concentraciones de nutrientes han disminuido drásticamente, hasta en un 88% los silicatos y en un 40% los nitratos (Galindo-Bect *et al.* 2013). Lavín y Sánchez (1999) reportaron que la lengüeta de agua del Río Colorado llegó hasta ~70 km al sur del delta (frente a San Felipe), cuando el río fluyó hasta el mar en 1993, debido a las precipitaciones altas y deshielos anómalos en la parte alta de su cuenca. Rodríguez *et al.* (2001) utilizaron un isótopo estable de oxígeno (¹⁸O) en conchas de un bivalvo endémico del alto golfo (*Mulinia coloradoensis*), para reconstruir la zona de influencia del Río Colorado antes de la construcción de las presas. Esta zona se extendía hasta

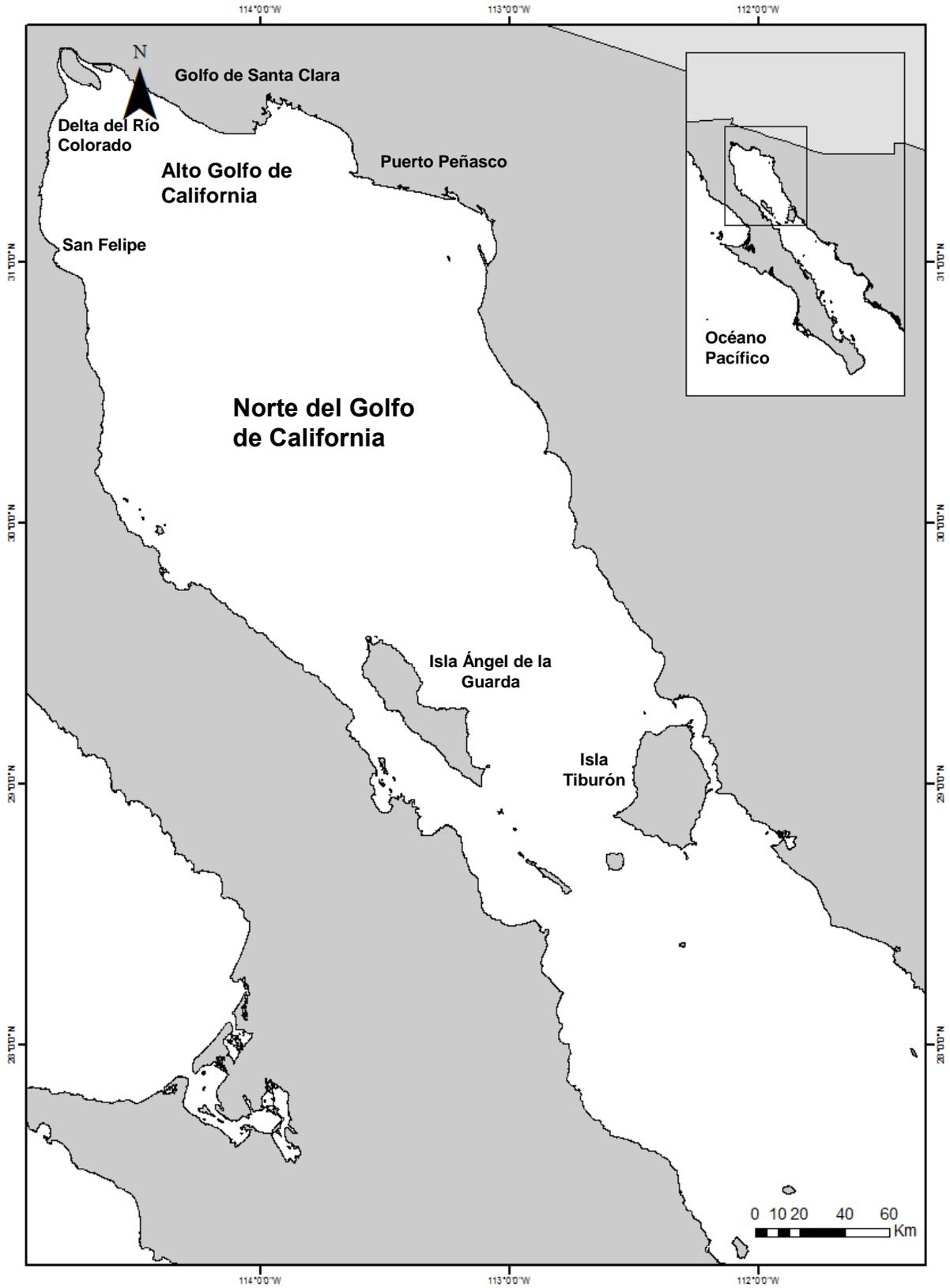


Figura 5. Ubicación del área de estudio: Norte del Golfo de California, desde la región de las Islas Grandes hasta el Delta del Río Colorado.

65 km al sur de la desembocadura, lo cual coincide con lo reportado por Lavín y Sánchez (1999).

2.2 Métodos

Se utilizaron composiciones mensuales de imágenes (se realizó un promedio de 25 píxeles por mes) de sensores remotos que orbitan en satélites para analizar la variabilidad de la temperatura superficial del mar (TSM), Chl_{sat} y PP. Las composiciones mensuales de la TSM y Chl_{sat} se obtuvieron a partir de las imágenes de satélite de la página web del Ocean Color de la NASA (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>), nivel 3 de procesamiento (L3), el cual tiene información en bytes-formato valor, posición geográfica y filtros para remover la información no útil. Por otro lado las imágenes de PP se adquirieron como producto del sitio web del Ocean Net Primary Productivity de Oregon State University (<http://www.science.oregonstate.edu/ocean.productivity/index.php>). Las imágenes se descargaron en formato .hdf (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 grados centígrados ($^{\circ}\text{C}$). 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 (debido a que la luz decae exponencialmente con la profundidad 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 una quinta parte de la columna eufótica). Las radiancias ascendentes de longitudes de onda dentro del espectro visible se convierten a Chl_{sat} mediante algoritmos empíricos (Kirk 1994).

Las imágenes con datos de PP son productos derivados de los datos de Chl_{sat} del sensor MODIS Aqua. PP se calcula por el grupo de Oregon State University (OSU) a partir del modelo propuesto por Behrenfeld y Falkowski (1997) (modelo vertical generalizado: VGPM por sus siglas en inglés) y se expresan como $\text{g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. La aplicación del VGPM toma en cuenta la Chl_{sat} , la TSM y la Radiación Fotosintéticamente Activa en la superficie del Mar (PAR_0 por sus siglas en inglés) (Ecuación 1):

$$PP = P_{opt}^b f(PAR_0) (DL) Chl_{sat} Z_{eu}, \quad (1)$$

donde P_{opt}^b es la razón fotosintética (fotosíntesis por unidad de Chl_{sat}) en el nivel óptimo de la PAR de la columna del agua y se expresa como $mg\ C\ (mg\ Chl^{-1})\ h^{-1}$ (se calcula a partir de la irradiancia máxima, la irradiancia a cierta profundidad y la pendiente inicial). La $f(PAR_0)$ es la función que representa el efecto de la variación de la luz en toda la zona eufótica a lo largo del día. La DL es la longitud del día, tomando en cuenta la latitud y fecha y se expresa en horas. La Z_{eu} es la profundidad de la zona eufótica, calculada a partir de la Chl_{sat} de acuerdo a Morel y Berthon (1989) y se expresa en metros. Este modelo no toma en cuenta la variación de la distribución espectral de PAR con la profundidad. Además, no toma en cuenta la variación vertical de la biomasa del fitoplancton (no toma en cuenta el máximo subsuperficial de Chl) ya que está integrado verticalmente. Por lo anterior, es una primera aproximación a la realidad que podría mejorarse con un conocimiento más detallado de las variaciones mencionadas.

Los sensores utilizados fueron el Coastal Zone Color Scanner (CZCS), el Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) y el Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer on Aqua (MODIS Aqua) (Tabla 2). Las imágenes de satélite fueron procesadas con el software Sea WiFS Data Analysis System (SeaDAS 7.0.2) proporcionado por el sitio web del Ocean Color de la NASA (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/seadas/>).

Tabla 2. Sensores remotos y los productos utilizados, mostrándose el periodo de estudio y el tamaño de pixel.

Sensor	Producto	Periodo	Tamaño de Pixel
CZCS	Chl_{sat}	1978-1986	9x9 Km ²
SeaWiFS	Chl_{sat}	1997-2002	9x9 Km ²
MODIS Aqua	Chl_{sat}	2002-2013	9x9 Km ²
	TSM	2002-2013	9x9 Km ²

Para estudiar posibles diferencias espaciales de las propiedades (TSM, Chl_{sat} , y PP) se escogieron cuatro cuadrantes en el norte del golfo, dos en la parte occidental y dos en la oriental. Estos cuadrantes tienen un área de 2025 km² (5 pixeles de 9x9 km por lado), cada uno. Para el cuadrante de la zona NW se trató que coincidiera geográficamente lo más posible con el Refugio del Hábitat de la Vaquita (RHV). Además se escogió un cuadrante en la Cuenca de Guaymas (CG), donde no se espera el efecto de la falta de aporte de aguas de ríos y sus nutrientes, para fines comparativos del comportamiento de las series de tiempo de los tres sensores (Tabla 3 y Figura 6).

Tabla 3. Coordenadas geográficas de los cuadrantes de estudio en el norte del Golfo de California y otro más para la Cuenca de Guaymas.

Cuadrante	Coordenadas	Área
NW (RHV)	31.3°, 30.9° N -114.6°, -114.2° W	2025 km ²
SW	30.3°, 29.9° N -114.3°, -113.9° W	2025 km ²
NE	31.05°, 30.7° N -113.8°, -113.4° W	2025 km ²
SE	30.2°, 29.75° N -113.4°, -113.0° W	2025 km ²
CG	28.05°, 28.5° N -112.2°, -111.8° W	2025 km ²

La variación temporal de la TSM, Chl_{sat} y PP en el norte del Golfo de California se caracterizó mediante el uso de series de tiempo de los promedios de estas propiedades para cada uno de los cuadrantes (25 valores por composición mensual, por cuadrante). El periodo de estudio para la TSM fue de julio de 2002 a junio de 2013 y se utilizó el sensor MODIS Aqua. Para la Chl_{sat} el periodo de estudio se dividió en tres partes: de noviembre de 1978 a junio de 1986 (CZCS), de septiembre de 1997 a diciembre de 2010 (SeaWiFS) y de julio de 2002 a junio de 2013 (MODIS Aqua). Por último, para la PP el periodo de estudio fue de julio de 2002 a junio de 2013.

Para identificar cuáles fueron las frecuencias principales de variación de la TSM, Chl_{sat} y PP en el norte del Golfo de California se realizó un análisis espectral de las series de tiempo, mediante el método de periodogramas de Welch. Dicho análisis consiste en calcular la densidad del poder espectral de la variable de estudio y se expresa en unidades de la variable al cuadrado por ciclos por segundo ((unidades de la

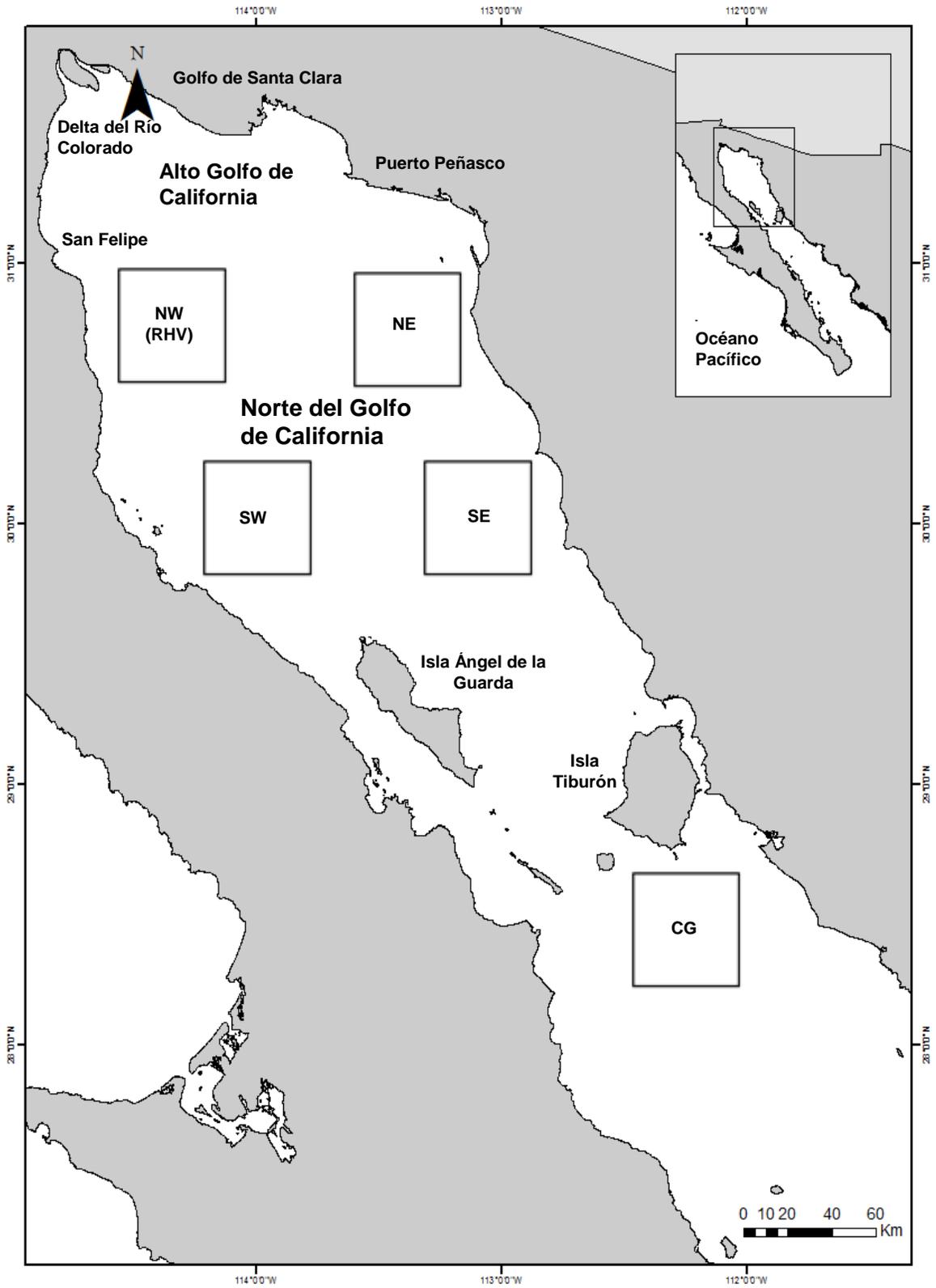


Figura 6. Posición geográfica de los cuatro cuadrantes de muestreo en el norte del Golfo de California, así como uno más en la Cuenca de Guaymas (CG). RHV = Reserva del Hábitat de la Vaquita.

variable)² Hz⁻¹). Las bajas frecuencias (variación interanual) se eliminaron de las series de tiempo para quitar la tendencia que estas frecuencias generan en la serie de tiempo y así tener un mejor resultado. Se utilizó el programa Signal de licencia libre, que maneja el lenguaje de programación Octave.

Una primera aproximación a la climatología de la región se describió mediante la generación de un año promedio para las tres variables. 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.

Kahru *et al.* (2009) y Álvarez-Molina *et al.* (2013) encontraron que los datos derivados del VGPM (datos de la página de Ocean Productivity de Oregon State University) sobreestiman la PP hasta en un 50% en el Golfo de California. Con el propósito de corroborar esto, se eligieron cuarenta datos de Chl_{sat} al azar (10 por cada cuadrante) del sensor MODIS Aqua entre los años 2002-2013 (Tabla 4) y se realizaron cálculos independientes de los datos de PP de la página de OSU para hacer comparaciones. Para hacer estos cálculos se siguió el método utilizado por Hidalgo-González y Álvarez-Borrego (2004) para calcular la PP a partir del modelo propuesto por Platt *et al.* (1991).

Tabla 4. Fechas de los datos utilizados en el modelo de producción primaria de Platt *et al.* (1991).

Cuadrante	Mes	Cuadrante	Mes	Cuadrante	Mes	Cuadrante	Mes
NW	jul-02	NE	feb-03	SW	dic-02	SE	ene-03
NW	may-03	NE	sep-04	SW	nov-04	SE	jul-04
NW	ago-03	NE	may-06	SW	may-05	SE	ago-04
NW	abr-05	NE	oct-06	SW	jul-05	SE	abr-05
NW	feb-07	NE	ene-07	SW	ago-06	SE	abr-06
NW	nov-08	NE	jun-09	SW	sep-06	SE	sep-08
NW	ene-09	NE	ago-09	SW	dic-07	SE	dic-08
NW	may-09	NE	dic-09	SW	abr-09	SE	feb-09
NW	feb-10	NE	ene-10	SW	jun-12	SE	jun-10
NW	jun-11	NE	may-10	SW	sep-12	SE	mar-12

Este es un modelo no espectral y maneja un perfil de clorofila no homogéneo. Es decir, se toma en cuenta el máximo subsuperficial de clorofila. El perfil vertical de clorofila se representa por medio de un ajuste de una curva Gaussiana. Hidalgo-González y Álvarez-Borrego (2004) aplicaron este modelo de dos formas diferentes de acuerdo a la clasificación de las aguas. Las aguas se clasifican en aguas caso I y aguas caso II, dependiendo de sus propiedades ópticas inherentes (Morel y Prieur 1977). Las aguas caso I son aquellas donde la concentración de Chl es menor a 1.5 mg m^{-3} y el detritus y las partículas orgánicas disueltas de color (CDOM) co-varían con la clorofila. En cambio las aguas caso II se caracterizan por presentar concentraciones de Chl mayores a 1.5 mg m^{-3} y no tienen una covariancia de la clorofila con el detritus y el CDOM (Gordon *et al.* 1983).

Para aguas caso II se utilizó el modelo no espectral con un perfil de clorofila no homogéneo, propuesto por Platt *et al.* (1991), el cual estima la PP para cada profundidad sin tomar en cuenta el cambio de la calidad de la luz con la profundidad (Ecuación 2):

$$PP_{(z)} = \left[P_{m(z)}^* Chl_z \alpha_{PAR(z)}^* PAR_z \right] \times \left[\left(P_{m(z)}^* \right)^2 + \left(PAR_z \alpha_{PAR(z)}^* \right)^2 \right]^{-0.5}, \quad (2)$$

donde $P_{m(z)}^*$ es la razón fotosintética máxima normalizada por unidad de clorofila y se expresa en $\text{mg C mg Chl}^{-1} \text{ h}^{-1}$, $\alpha_{PAR(z)}^*$ es la pendiente inicial expresada en $\text{mg C mg Chl}^{-1} \text{ h}^{-1} (\mu\text{mol cuanta m}^{-2} \text{ s}^{-1})^{-1}$.

Hidalgo-González y Álvarez-Borrego (2004) aplicaron el modelo de Platt *et al.* (1991) para aguas caso I, con la modificación para utilizar la expresión sugerida por Giles-Guzmán y Álvarez-Borrego (2000) para el coeficiente de atenuación de luz difusa. Esta modificación corrige la pendiente inicial de la relación fotosíntesis-irradiancia (curvas P-E) por la forma de la distribución espectral de la PAR escalar *in situ* y por el efecto de paquete (Ecuación 3), y se utiliza $43.2 \phi_{max} \bar{a}_{ph(z,chl)}^*$ en lugar de la pendiente inicial. El factor 43.2 convierte los mol C a mg C, segundos a horas y mol cuanta a μmol

cuanta (Giles-Guzmán y Álvarez-Borrego 2000), y ϕ_{max} es el rendimiento cuántico máximo de la fotosíntesis a baja irradiancia y se expresa en mol C (mol cuanta)⁻¹.

$$PP_{(z)} = \left[P_{m(z)}^* Chl_z \bar{a}_{ph(z,chl)}^* \phi_{max} PAR_z \right] x \left[\left(0.02315 P_{m(z)}^* \right)^2 + \left(PAR_z \bar{a}_{ph(z,chl)}^* \phi_{max} \right)^2 \right]^{-0.5}, \quad (3)$$

donde $\bar{a}_{ph(z,chl)}^*$ es el coeficiente específico de absorción de luz por el fitoplancton expresado en m² mg Chl⁻¹. El coeficiente específico de absorción del fitoplancton ponderado por la distribución espectral *in situ* de la PAR $\bar{a}_{ph(z,chl)}^*$ se calculó de acuerdo a Giles-Guzmán y Álvarez-Borrego (2000). Esta expresión muestra que para calcular la PP se necesita todo un perfil vertical de Chl y PAR y no solamente los valores superficiales (Hidalgo-González y Álvarez-Borrego 2004).

Los perfiles verticales de clorofila ($Chl_{(z)}$) se obtuvieron a partir de los valores de Chl_{sat} (Figura 7) propuesto por Platt *et al.* (1988) con los parámetros de ajuste obtenidos por Hidalgo-González y Álvarez-Borrego (2001) para el norte del golfo (su región IV de “invierno” y 2 de “verano”) (Tabla 5).

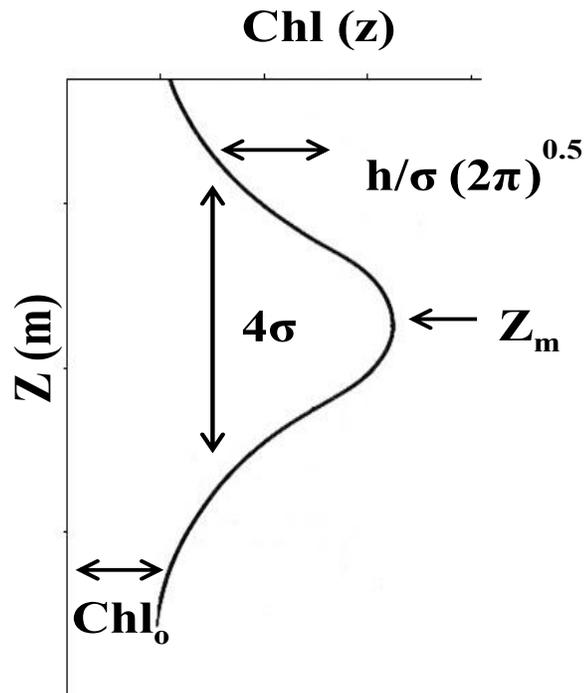


Figura 7. Perfil vertical hipotético de clorofila, donde se muestra el máximo subsuperficial de clorofila de la curva Gaussiana (modificado de Hidalgo-González y Álvarez-Borrego 2001).

Se utilizaron las composiciones mensuales de PAR superficial (PAR_0) del sensor MODIS Aqua para el período de 2002 - 2013. Esta PAR_0 es un promedio para todo el día (horas luz) y se expresa como Einsteins $m^{-2} \text{ día}^{-1}$ (un Einstein es un mol de fotones, el número de Avogadro $=6.022 \times 10^{23}$). Para transformar estos valores a $\mu\text{mol cuanta } m^{-2} \text{ s}^{-1}$ se multiplicó por 1×10^6 y se dividió entre la duración del día en segundos para cada mes respectivo.

Para obtener los perfiles verticales de PAR ($PAR_{(z)}$) se siguieron dos métodos diferentes. Para aguas caso I se utilizó el propuesto por Giles-Guzmán y Álvarez-Borrego (2000). Mientras que para aguas caso II se calculó una K_{PAR} promedio para toda la zona eufótica, la cual se obtuvo a partir del modelo de regresión lineal planteado por Cervantes-Duarte *et al.* (2000) para aguas del Golfo de California con concentraciones de Chl altas, para el cálculo de profundidad de la zona eufótica (Ecuación 4).

$$Z_{1\%} = A + B (1/K_{490}) \quad (4)$$

donde $Z_{1\%}$ es la profundidad de la zona eufótica, A y B son parámetros obtenidos empíricamente y K_{490} es el coeficiente de atenuación de luz difusa de la longitud de onda de 490 nm. Los datos de K_{490} se obtienen como producto estándar de las imágenes del sensor MODIS Aqua. De Cervantes-Duarte *et al.* (2000), A es igual a 3.76 y B es igual a 3.27, para la región norte del Golfo de California. Con $Z_{1\%}$ y la ley de Lambert-Beer (Ecuación 5) se obtuvo una K_{PAR} promedio para toda la zona eufótica, que se usó para estimar los perfiles de $PAR_{(z)}$, como una primera aproximación a la realidad.

$$K_{PAR} = 4.6 / Z_{PAR1\%} \quad (5)$$

Tabla 5. Valores promedio de Chl_o , h , σ y Z_m utilizados para generar los perfiles de Chl_z del norte del Golfo de California, (tomados de Hidalgo-González y Álvarez-Borrego 2001).

Región	Chl_o	h	σ	Z_m
IV	0.1 ± 0.02	236.0 ± 1.0	17.5 ± 0.2	11.3 ± 1.0
2	0.3 ± 0.03	167.1 ± 12.4	24.2 ± 1.9	19.8 ± 3.2

Los valores de los parámetros fotosintéticos ($P_{m(z)}^*$ y $\alpha_{PAR(z)}^*$) que se utilizaron son los propuestos por Valdez-Holguín *et al.* (1999) para todo el Golfo de California, para cada época del año (Tabla 6). Los valores de la tabla 6 se interpolaron linealmente entre las profundidades mencionadas para obtener los parámetros para cada profundidad, de acuerdo a Valdez-Holguín *et al.* (1999).

Tabla 6. Parámetros fotosintéticos $P_{m(z)}^*$ y $\alpha_{PAR(z)}^*$ utilizados para la parte norte del Golfo de California (tomados de Valdez-Holguín *et al.* 1999).

Parámetro Fotosintético	Invierno	Verano
$P_{m(z)}^*$	9.6 ± 2.4 mg C mg Chl^{-1} h^{-1} superficial.	3.7 ± 0.3 mg C mg Chl^{-1} h^{-1} superficial.
	3.7 ± 0.3 mg C mg Chl^{-1} h^{-1} en la mitad de la zona eufótica.	1.5 ± 0.2 mg C mg Chl^{-1} h^{-1} en la mitad de la zona eufótica.
		0.4 ± 0.1 mg C mg Chl^{-1} h^{-1} en el fondo de la zona eufótica.
$\alpha_{PAR(z)}^*$	0.029 ± 0.004 mg C mg Chl^{-1} h^{-1} (μmol cuanta m^{-2} s^{-1}) $^{-1}$ para todo la columna.	0.013 ± 0.001 mg C mg Chl^{-1} h^{-1} (μmol cuanta m^{-2} s^{-1}) $^{-1}$ superficial.
		0.001 mg C mg Chl^{-1} h^{-1} (μmol cuanta m^{-2} s^{-1}) $^{-1}$ en el fondo de la zona eufótica.

Para establecer qué tanto se sobreestima la producción primaria con el VGMP se realizó una razón de los datos de los meses de la producción primaria obtenida del servidor de la página de “ocean productivity de Oregon State University” (PP_{OSU}) y la producción primaria calculada a partir del modelo ya mencionado anteriormente para aguas caso I (PP_{GGAB}) y aguas caso II (PP_{PS}).

2.3 Análisis Estadístico

Para el análisis estadístico de los resultados se utilizó el software STATISTICA v. 7.0. Primero se realizó una prueba de normalidad para las diferentes variables Chl_{sat} , PP y TSM, para decidir sobre hacer pruebas paramétricas o no paramétricas. Las tres variables no presentaron una distribución normal, por lo que se hicieron pruebas no paramétricas.

Para la variación temporal se realizó una prueba de U de Mann-Whitney para dos variables independientes. Se hizo una para hacer comparaciones entre “estaciones” del año, para lo cual se dividió el año en dos épocas: “invierno” y “verano”. Para explorar variaciones interanuales, se compararon promedios de valores de “invierno” de todos los años mediante la prueba de Kruskal-Wallis para variables múltiples independientes, y se hizo lo mismo para promedios de “verano”. Además, se realizó una prueba *a posteriori* para establecer cuáles “inviernos” y cuáles “veranos” presentan diferencias significativas con los otros.

Para explorar variaciones espaciales se hicieron comparaciones entre cuadrantes mediante la prueba de Kruskal-Wallis para múltiples variables independientes; separadamente, con el promedio de los meses de “invierno” de cada cuadrante y con los de “verano”. Además, se realizó una prueba *a posteriori* para establecer cuáles de los cuadrantes presentan diferencias significativas con los otros.

Para establecer si hubo una tendencia temporal negativa de Chl_{sat} se realizaron análisis de regresión lineal con los datos de Chl_{sat} de cada mes de los “inviernos” como variable dependiente y los años como variable independiente, separadamente para cada uno de los sensores. Se hizo lo mismo para PP_{OSU} .

Se realizó un análisis de regresión lineal entre los datos de Chl_{sat} de los años que se traslapan de los sensores SeaWiFS y MODIS Aqua, de julio de 2002 a diciembre de 2010, con la finalidad de observar si hay inter-consistencia entre sensores para tomar los datos como una sola serie de tiempo. Además, se hicieron análisis de regresión lineal entre los datos de PP_{OSU} y los de PP_{GGAB} ; y entre los datos de PP_{OSU} y los de PP_{PS} .

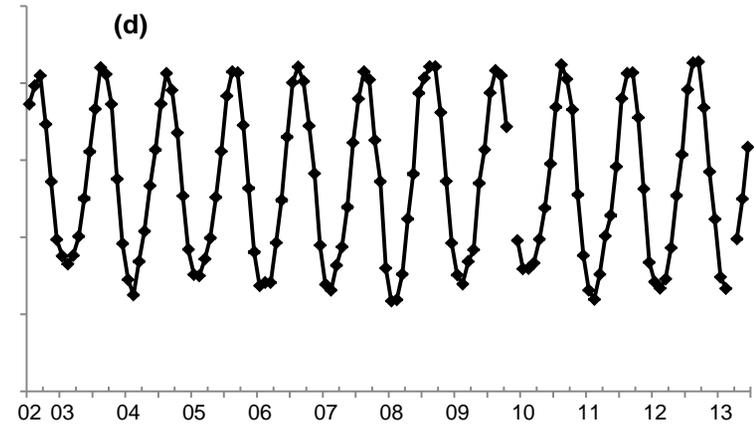
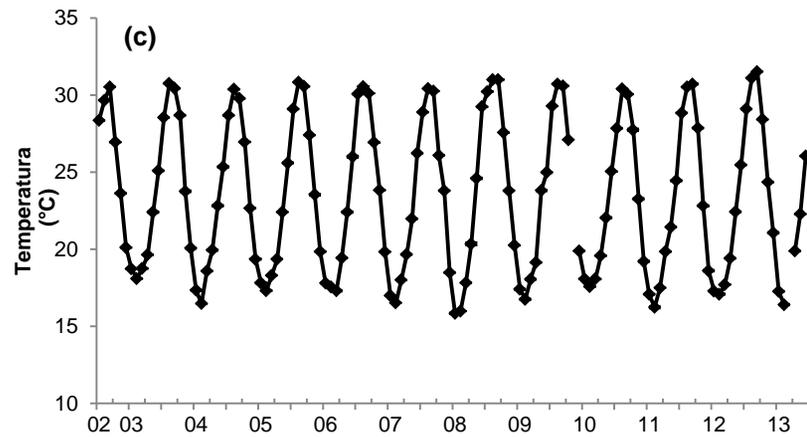
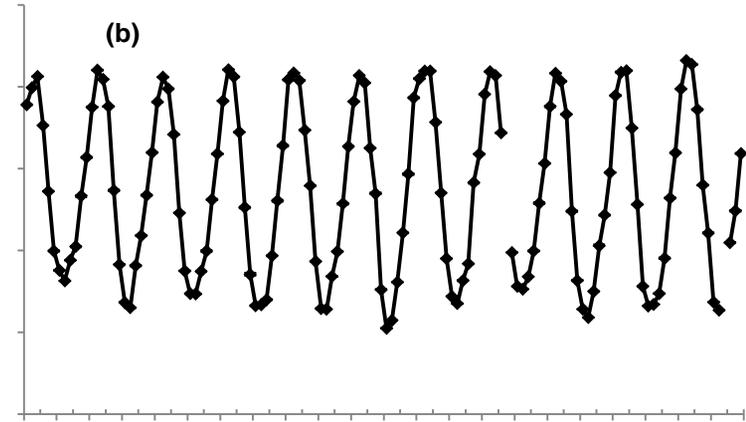
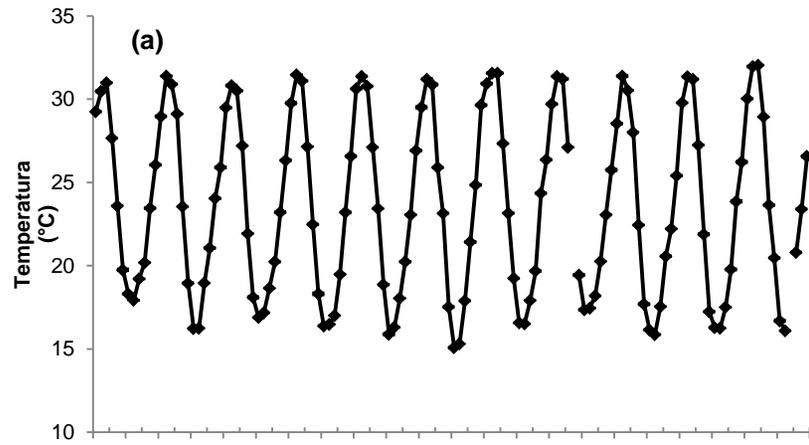
Capítulo 3 - Resultados

3.1 Temperatura Superficial del Mar (TSM)

La TSM en el norte del Golfo de California presentó una oscilación anual muy marcada. Las series de tiempo de los cuatro cuadrantes mostraron valores de TSM muy similares. Hubo una variación entre meses muy marcada. Se observa una variación estacional (15 °C a 31 °C), con mínimos en febrero y marzo, y máximos en agosto y septiembre (Figura 8). Se presentaron diferencias significativas en la TSM entre la época de “invierno” y la época de “verano” (prueba U de Mann-Whitney: $n = 436$, $z = -17.72$, $p = 0.00$).

La TSM promedio para la época de “invierno” en los cuatro cuadrantes fue de 19.03 ± 0.06 °C (en éste y todos los casos siguientes, cuando se presenta un número después de \pm se trata del error estándar, $s/n^{0.5}$), para toda la serie de tiempo. Las TSMs más altas se observaron para “invierno” de 2002-03 con 19.8 ± 0.82 °C, 19.62 ± 0.63 °C, 19.98 ± 0.75 °C y 19.71 ± 0.63 °C para los cuadrantes NW, NE, SW y SE, respectivamente. En cambio, el “invierno” de 2010-11 fue el que presentó las TSMs más bajas con 18.49 ± 1.04 °C en el cuadrante NW, 18.76 ± 0.82 °C en el NE, 18.54 ± 1.03 °C en el SW y 18.4 ± 0.86 °C en el SE. Por otro lado, la TSM promedio para “verano” y para todos los cuadrantes fue 29.6 ± 0.06 °C. Las TSMs más bajas de “verano” se presentaron en 2002 con 28.87 ± 0.78 °C en el cuadrante NE, con valores mayores en los otros cuadrantes. El “verano” de 2012 fue el más cálido con 30.75 ± 0.76 °C (NW), 30.03 ± 0.76 °C (NE), 30.36 ± 0.7 °C (SW) y 30.16 ± 0.72 °C (SE) (Tabla 7).

La TSM anual promedio no presentó una variación interanual bien definida (Figura 8). La diferencia entre el “invierno” más “cálido” y el más “frío” fue <1 °C, aproximadamente. Esta diferencia entre el “verano” con la TSM más alta y el de la más baja fue de un poco >1 °C. La TSM no presentó diferencias estadísticas significativas entre los meses de los “inviernos” (prueba de Kruskal-Wallis: $n = 260$, $H = 13.41$, $p = 0.20$). Las TSMs de los meses de “verano” tampoco tuvieron diferencias estadísticas significativas entre años (prueba de Kruskal-Wallis: $n = 176$, $H = 14.09$, $p = 0.16$).



Años

Años

Figura 8. Series de tiempo de la media mensual de la TSM de los cuadrantes a) NW, b) NE, c) SW, y d) SE, en el norte del Golfo de California. Para el período 2002-2013, el error estándar es menor al tamaño de los puntos.

Tabla 7. TSM promedio (μ) y error estándar (ee) para cada época del año ($^{\circ}\text{C}$) para los cuatro cuadrantes en el norte del Golfo de California, para el período 2002-2013.

Época	Años	NW		NE		SW		SE	
		μ	ee	μ	ee	μ	ee	μ	ee
Invierno	2002-03	19.80	0.81	19.62	0.63	19.98	0.75	19.71	0.63
	2003-04	19.25	1.22	19.21	0.93	19.30	1.06	19.21	1.03
	2004-05	19.04	0.97	19.09	0.75	19.21	0.88	19.23	0.78
	2005-06	18.48	1.07	19.06	0.80	18.59	1.02	18.68	0.89
	2006-07	18.73	1.09	18.83	0.84	18.90	0.99	18.75	0.81
	2007-08	18.68	1.55	18.85	1.34	18.74	1.46	18.78	1.33
	2008-09	19.05	1.19	19.24	1.05	19.16	1.09	19.21	0.95
	2009-10	19.29	0.89	19.20	0.68	19.43	0.81	19.30	0.63
	2010-11	18.34	1.04	18.55	0.80	18.41	0.98	18.40	0.86
	2011-12	18.49	1.20	18.76	0.82	18.54	1.03	18.58	0.92
	2012-13	19.49	1.25	19.38	1.02	19.43	1.10	19.52	1.01
Promedio		18.97	0.14	19.07	0.09	19.06	0.14	19.03	0.13
Verano	2002	29.59	0.74	28.87	0.78	29.28	0.65	29.07	0.69
	2003	30.09	0.61	29.60	0.58	29.75	0.58	29.63	0.68
	2004	29.51	0.82	28.95	0.75	29.15	0.76	28.90	0.82
	2005	29.87	0.98	29.47	0.79	29.50	0.86	29.45	0.81
	2006	29.97	0.97	29.41	0.84	29.75	0.81	29.60	0.83
	2007	29.37	1.21	28.91	1.00	29.06	1.00	29.05	0.99
	2008	30.35	1.01	29.94	0.82	30.07	0.75	30.13	0.70
	2009	29.86	0.99	29.42	0.84	29.58	0.85	29.45	0.82
	2010	29.62	0.80	29.01	0.71	29.57	0.60	29.54	0.71
	2011	29.90	0.95	29.48	0.68	29.70	0.82	29.51	0.70
	2012	30.75	0.76	30.03	0.76	30.36	0.70	30.16	0.72
Promedio		29.90	0.12	29.37	0.11	29.62	0.12	29.50	0.12

Con relación a la aproximación a la climatología, las TSMs promedio de todos los febreros fueron las más bajas con 16.51 ± 0.23 $^{\circ}\text{C}$, 16.91 ± 0.20 $^{\circ}\text{C}$, 16.74 ± 0.22 $^{\circ}\text{C}$ y 16.9 ± 0.23 $^{\circ}\text{C}$ en los cuadrantes NW, NE, SW y SE, respectivamente. En cambio, las TSMs más altas se encontraron para el agosto promedio con 31.31 ± 0.12 $^{\circ}\text{C}$ (NW), 30.57 ± 0.12 $^{\circ}\text{C}$ (NE), 30.85 ± 0.12 $^{\circ}\text{C}$ (SW) y 30.81 ± 0.12 $^{\circ}\text{C}$ (SE) (Tabla 8 y Figura 9). Estadísticamente no hubo diferencias significativas entre cuadrantes en ambas épocas del año (prueba de Kruskal-Wallis: $n = 260$, $H = 0.56$, $p = 0.90$ para “invierno” y $n = 176$, $H = 5.74$, $p = 0.12$ para “verano”).

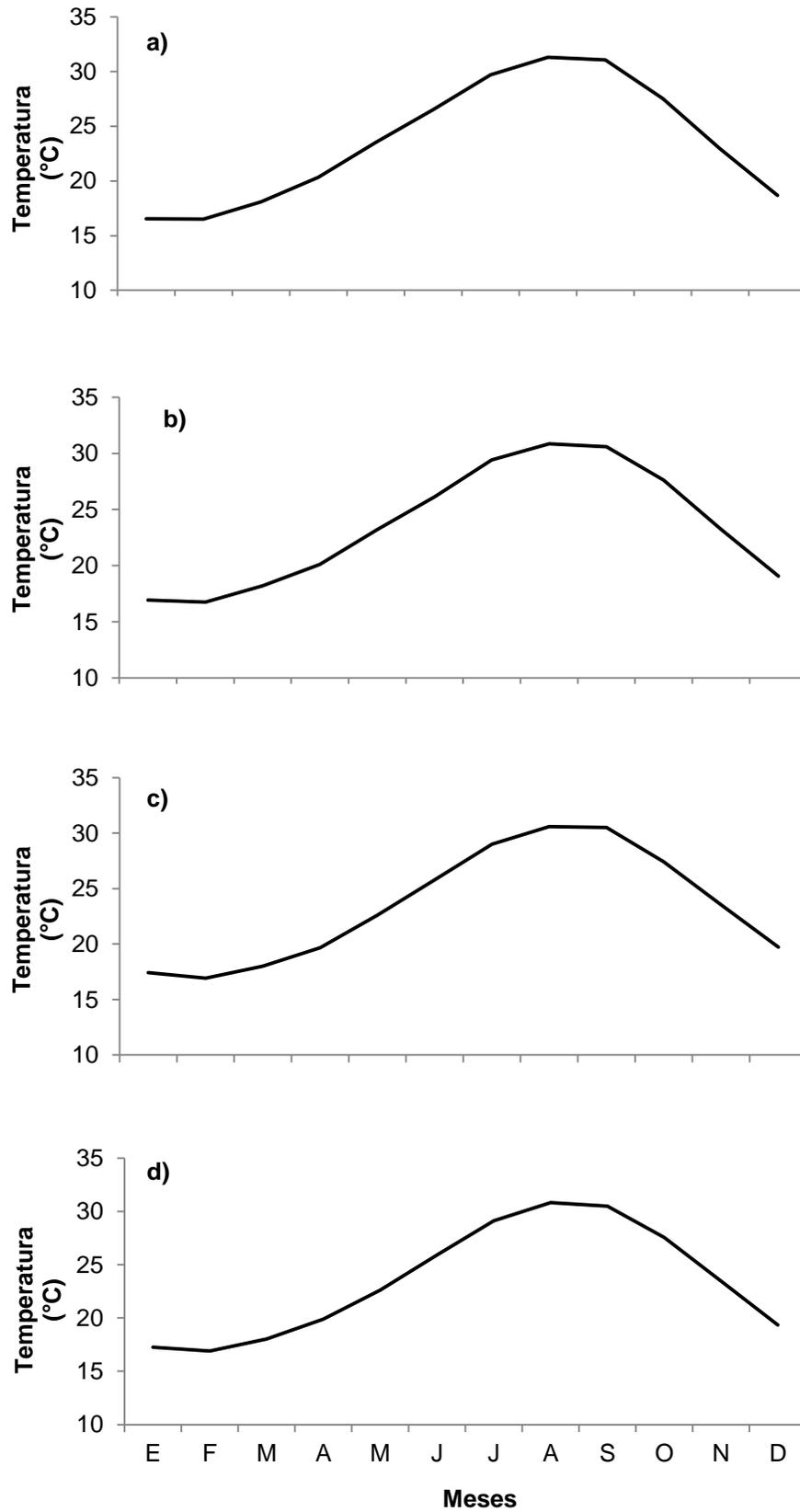


Figura 9. Año promedio de TSM para los cuadrantes en el norte del Golfo de California: a) NW, b) NE, c) SW, y d) SE.

Tabla 8. Media mensual (μ) y error estándar (ee) de la TSM ($^{\circ}\text{C}$) para los cuatro cuadrantes en el norte del Golfo de California (aproximación a su climatología).

Mes	NW		NE		SW		SE	
	μ	ee	μ	ee	μ	ee	μ	ee
Enero	16.53	0.25	17.42	0.22	16.92	0.27	17.26	0.23
Febrero	16.51	0.23	16.91	0.20	16.74	0.22	16.90	0.23
Marzo	18.09	0.22	18.01	0.14	18.21	0.24	18.03	0.19
Abril	20.34	0.18	19.66	0.10	20.12	0.17	19.90	0.17
Mayo	23.52	0.22	22.60	0.27	23.20	0.21	22.63	0.23
Junio	26.52	0.34	25.77	0.38	26.14	0.35	25.90	0.38
Julio	29.69	0.21	28.99	0.21	29.41	0.19	29.13	0.19
Agosto	31.31	0.12	30.57	0.12	30.85	0.12	30.81	0.12
Septiembre	31.07	0.14	30.50	0.14	30.59	0.12	30.49	0.15
Octubre	27.53	0.27	27.42	0.22	27.61	0.22	27.56	0.22
Noviembre	22.93	0.22	23.54	0.16	23.24	0.20	23.47	0.17
Diciembre	18.69	0.31	19.70	0.23	19.07	0.31	19.35	0.25

El análisis espectral arrojó que la señal del ciclo estacional (anual) es la que explica la mayor parte de la variabilidad de la TSM en la parte norte del Golfo de California para todos los cuadrantes. Esta señal fue la única significativa. En la figura 10 se muestra el ejemplo para la serie de tiempo del cuadrante NW, los espectros de los otros cuadrantes son muy similares. Nótese que en la figura 10 hay un máximo muy pequeño en la frecuencia semianual pero no fue estadísticamente significativo.

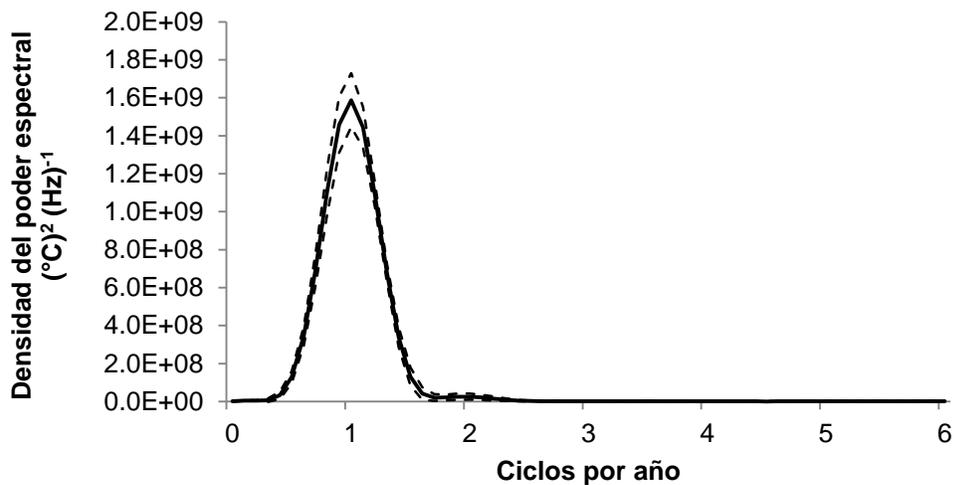


Figura 10. Densidad espectral de la TSM para el cuadrante NW. La línea continua es el promedio del valor de la densidad espectral y la discontinua marca los límites de confianza al 95%.

3.2 Concentración de Clorofila (Chl_{sat})

En el norte del Golfo de California los datos de Chl_{sat} de los tres sensores mostraron una clara diferencia entre la época de “invierno” y la de “verano” (Figura 11a y 11b). Para el período 1978-1986 (CZCS), Chl_{sat} mostró una gran variabilidad estacional y entre años. A diferencia de los datos de los otros sensores, los del CZCS tuvieron muchos vacíos en las imágenes para el cuadrante NW (Figura 12). En general, el cuadrante NW fue el que presentó las concentraciones promedio más altas y el SE las más bajas en todos los años. Las series de tiempo de los cuatro cuadrantes presentaron una oscilación temporal muy marcada (0.4 a 5 mg m^{-3}) con mínimos en “verano” y máximos en “invierno” (Figura 12). Se presentaron diferencias de Chl_{sat} muy significativas entre la época de “invierno” y la de “verano” (prueba U de Mann-Whitney: $n = 256$, $z = 9.83$, $p = 0.00$). Además de las variaciones interanual y estacional, Chl_{sat} tuvo un componente semianual. Este otro máximo (máximo a manera del cálculo diferencial) se observó en las series de tiempo para los cuatro cuadrantes. Fue de menor magnitud que el máximo de “invierno” y se presentó en octubre, después de los meses de verano (Figura 12).

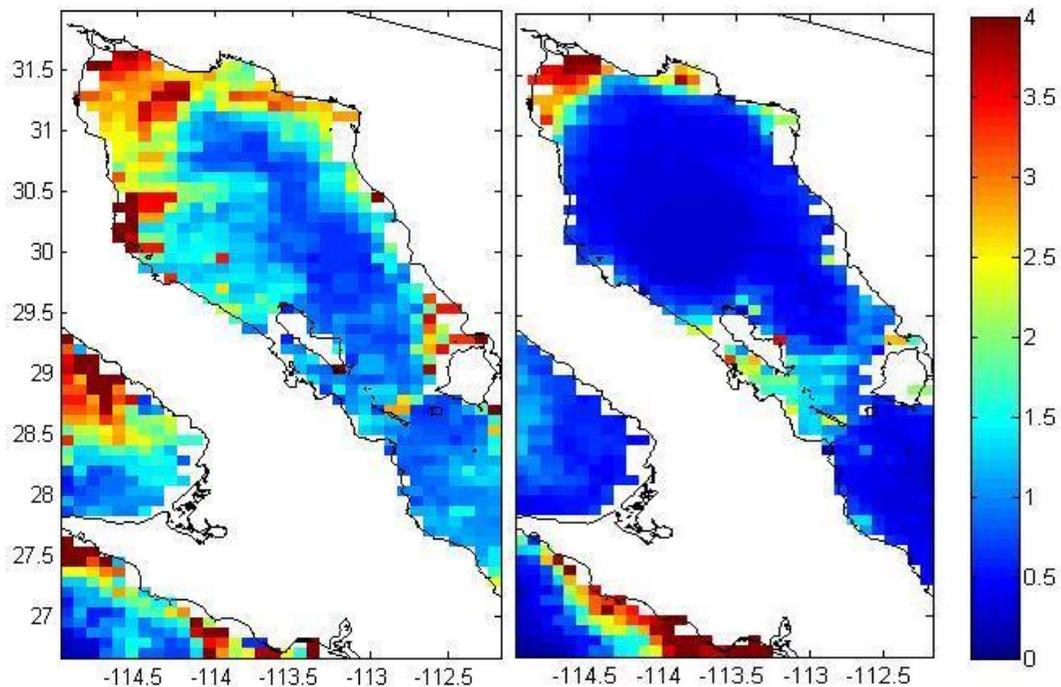


Figura 11. Ejemplos de Chl_{sat} en el norte del Golfo de California: a) “invierno” (marzo de 2006, SeaWiFS), b) “verano” (julio de 2006, SeaWiFS). La barra de colores indica Chl_{sat} (mg m^{-3}).

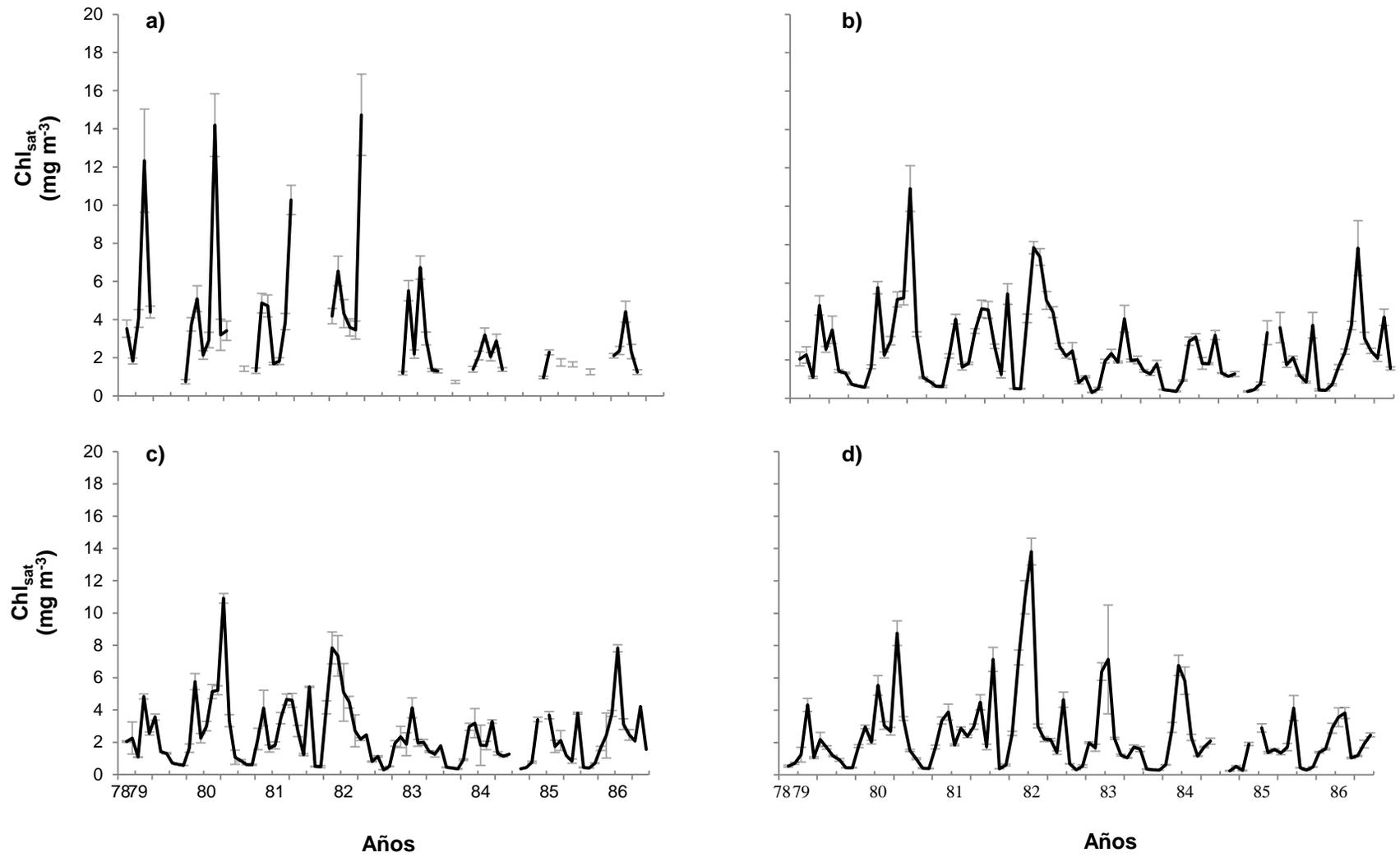


Figura 12. Series de tiempo de la media mensual de Chl_{sat} para los cuatro cuadrantes, para el período 1978-1986: a) NW, b) NE, c) SW, y d) SE. Las barras verticales muestran el error estándar.

La concentración promedio de Chl_{sat} del período 1978-1986, para “invierno”, fue $3.6 \pm 0.28 \text{ mg m}^{-3}$. En general, los promedios más altos se encontraron para “invierno” de 1981-82 con $6.52 \pm 2.74 \text{ mg m}^{-3}$ para el cuadrante NW, $8.46 \pm 2.95 \text{ mg m}^{-3}$ para el NE, $4.05 \pm 0.82 \text{ mg m}^{-3}$ para el SW y $5.6 \pm 2.19 \text{ mg m}^{-3}$ para el SE. En cambio, los más bajos se observaron para el “invierno” de 1984-85, con $1.7 \pm 0.04 \text{ mg m}^{-3}$ (NW), $2.36 \pm 0.39 \text{ mg m}^{-3}$ (NE), $1.91 \pm 0.49 \text{ mg m}^{-3}$ (SW) y $1.79 \pm 0.29 \text{ mg m}^{-3}$ (SE). Por otro lado, el promedio de Chl_{sat} del período 1978-1986, para “verano”, fue $1.1 \pm 0.15 \text{ mg m}^{-3}$. Los promedios más altos de Chl_{sat} de “verano” se observaron para 1981 con $1.47 \pm 1.01 \text{ mg m}^{-3}$ para el cuadrante NE, $2.65 \pm 1.27 \text{ mg m}^{-3}$ para el SW y $2.68 \pm 1.57 \text{ mg m}^{-3}$ para el SE. Por otro lado, los promedios más bajos se obtuvieron para “verano” de 1983 con $1.06 \pm 0.33 \text{ mg m}^{-3}$ para el cuadrante NW, $0.47 \pm 0.16 \text{ mg m}^{-3}$ para el NE, $0.53 \pm 0.15 \text{ mg m}^{-3}$ para el SW y $0.4 \pm 0.08 \text{ mg m}^{-3}$ para el SE (Tabla 9).

En 1978-1986, Chl_{sat} tuvo una variación interanual bien marcada. En “invierno” la diferencia entre la Chl_{sat} más alta y la más baja fue de 4 mg m^{-3} , aproximadamente. Mientras que esta diferencia para “verano” fue de $\sim 0.6 \text{ mg m}^{-3}$. Se encontraron diferencias interanuales significativas entre “inviernos” (prueba de Kruskal-Wallis: $n = 167$, $H = 31.66$, $p = 0.00$). Estas diferencias fueron entre los “inviernos” con los valores más altos de Chl_{sat} (1979-80 con un promedio para los cuatro cuadrantes de 4.79 mg m^{-3} y 1981-82 con 6.15 mg m^{-3}) y los de los valores más bajos (1978-79 con un promedio para los cuatro cuadrantes de 3.08 mg m^{-3} , 1983-84 con 1.94 mg m^{-3} y 1984-85 con 2.92 mg m^{-3}). Por otro lado, las diferencias interanuales no fueron significativas para “verano” (prueba de Kruskal-Wallis: $n = 89$, $H = 12.88$, p ligeramente mayor a 0.05).

En el período 1997-2013, Chl_{sat} se obtuvo de los sensores SeaWiFS (1997-2010) y MODIS Aqua (2002-2013), por lo que existe un traslapo en las series de tiempo entre los años 2002 y 2010. En ambas series de tiempo se observa una clara oscilación temporal, con máximos y mínimos ocasionados por el ciclo estacional, así como una variación interanual. Las diferencias de Chl_{sat} entre “invierno” y “verano” fueron muy significativas en ambas series de tiempo (prueba U de Mann-Whitney: $n = 505$, $z = 14.72$, $p = 0.00$ para datos del SeaWiFS y $n = 440$, $z = 16.25$, $p = 0.00$ para los del MODIS Aqua). Sin embargo, en el traslapo de los datos de ambos sensores, los valores altos de Chl_{sat} de “invierno” derivados del MODIS Aqua fueron mayores que los del

SeaWiFS, mientras que las Chl_{sat} bajas de “verano” tuvieron valores similares (Figura 13). Además, al igual que en las series de tiempo de los datos del CZCS, se presentó un componente semianual para ambas series de tiempo (la del SeaWiFS y la del MODIS Aqua).

Tabla 9. Chl_{sat} promedio (μ) y error estándar (ee) para cada época del año (mg m^{-3}) para los cuatro cuadrantes del norte del Golfo de California, para el período 1978-1986 (CZCS).

Época	Años	NW		NE		SW		SE	
		μ	ee	μ	ee	μ	ee	μ	ee
“Invierno”	1978-79	5.65	2.30	2.19	1.26	2.62	0.57	1.88	0.53
	1979-80	5.18	2.53	4.74	1.19	4.98	1.28	4.26	1.02
	1980-81	4.42	1.81	4.13	0.98	3.15	0.54	3.08	0.39
	1981-82	6.52	2.74	8.46	2.95	4.05	0.82	5.60	2.19
	1982-83	2.97	1.10	3.10	0.88	2.11	0.42	3.30	1.11
	1983-84	2.37	0.37	3.92	1.31	2.09	0.38	3.31	0.96
	1984-85	1.70	0.04	2.36	0.39	1.91	0.49	1.79	0.29
	1985-86	2.66	0.93	2.60	0.27	3.92	0.85	2.40	0.49
Promedio		3.93	0.62	3.94	0.72	3.10	0.40	3.20	0.45
“Verano”	1979	2.25	1.50	1.02	0.63	0.89	0.29	0.90	0.36
	1980	2.54	1.16	1.22	0.73	1.07	0.38	0.88	0.31
	1981			1.47	1.01	2.65	1.27	2.68	1.57
	1982			0.92	0.39	1.17	0.29	0.98	0.34
	1983	1.06	0.33	0.47	0.16	0.53	0.15	0.40	0.08
	1984					0.52	0.11	0.35	0.08
	1985			0.65	0.27	0.79	0.29	0.66	0.25
Promedio		1.95	0.45	0.96	0.15	1.09	0.28	0.98	0.30

Al tener este traslapo entre los datos del SeaWiFS y los del MODIS se realizó un análisis de regresión para saber si los datos de ambos sensores eran inter-consistentes y se podrían utilizar como una sola serie de tiempo. El cual dio como resultado una correlación entre los datos de los sensores SeaWiFS y MODIS Aqua fue significativa ($n = 380$, $F = 2691$, $p = 0.00$) con una pendiente de 0.73 ± 0.014 y $r^2 = 0.88$ (Figura 14). Sin embargo, se observa que los valores menores a 1.5 mg m^{-3} la relación es casi uno a uno y los valores mayores a 1.5 mg m^{-3} son más dispersos, perdiéndose esta relación. Se realizaron regresiones lineales entre los valores menores a 1.5 mg m^{-3} (aguas caso I) y los mayores a 1.5 mg m^{-3} (aguas caso I) de ambos sensores. Para aguas caso I la correlación fue muy significativa ($n = 267$, $F = 2322.8$ $p = 0.00$) con una pendiente de

0.86 ± 0.017 y una r^2 de 0.9, mientras que para aguas caso dos la correlación también fue significativa ($n = 80$, $F = 9.69$, $p = 0.002$). Sin embargo la pendiente fue de 0.21 ± 0.66 y $r^2 = 0.11$. Como se observa los datos del MODIS Aqua son más dispersos que los del SeaWiFS (Figura 15). Por lo tanto se decidió tratar por separado la información de ambos sensores.

El promedio de “invierno” de Chl_{sat} del SeaWiFS, para todos los cuadrantes, fue $1.58 \pm 0.06 \text{ mg m}^{-3}$. Los valores más altos de cada cuadrante no se encontraron en el mismo “invierno”. En general, las concentraciones más bajas de “invierno” se observaron en 1997-98 en los cuatro cuadrantes con $1.62 \pm 0.11 \text{ mg m}^{-3}$ (NW), $0.92 \pm 0.07 \text{ mg m}^{-3}$ (NE), $1.01 \pm 0.08 \text{ mg m}^{-3}$ (SW) y $0.76 \pm 0.06 \text{ mg m}^{-3}$ (SE). En cambio, “invierno” de 2001-02 fue el que presentó los valores más altos con $3.08 \pm 0.98 \text{ mg m}^{-3}$ para el cuadrante NW, $2.4 \pm 0.75 \text{ mg m}^{-3}$ para el NE, con $1.64 \pm 0.36 \text{ mg m}^{-3}$ para el SW y con $1.43 \pm 0.24 \text{ mg m}^{-3}$ para el SE (Tabla 10). La concentración de Chl_{sat} promedio para “verano” fue $0.65 \pm 0.04 \text{ mg m}^{-3}$. Las concentraciones más altas de “verano” se encontraron para 1997 en los cuatro cuadrantes: $1.5 \pm 0.24 \text{ mg m}^{-3}$ (NW), $0.73 \pm 0.2 \text{ mg m}^{-3}$ (NE), $0.76 \pm 0.17 \text{ mg m}^{-3}$ (SW) y $0.77 \pm 0.16 \text{ mg m}^{-3}$ (SE), mientras que las concentraciones más bajas de “verano” se encontraron para 2003 y 2004: 0.99 ± 0.07 y $0.95 \pm 0.10 \text{ mg m}^{-3}$ (NW), respectivamente; 0.36 ± 0.06 y $0.4 \pm 0.1 \text{ mg m}^{-3}$ (NE); 0.44 ± 0.09 y $0.48 \pm 0.1 \text{ mg m}^{-3}$ (SW); y 0.48 ± 0.08 y $0.41 \pm 0.08 \text{ mg m}^{-3}$ (SE) (Tabla 10).

El valor promedio de “invierno” de Chl_{sat} del MODIS Aqua fue $1.82 \pm 0.06 \text{ mg m}^{-3}$. En general, los valores más bajos de Chl_{sat} se observaron para los “inviernos” de 2003-04 y 2004-05 en todos los cuadrantes: 1.81 ± 0.24 y $2.07 \pm 0.27 \text{ mg m}^{-3}$ (NW); $1.46 \pm$ y $1.42 \pm 0.26 \text{ mg m}^{-3}$ (NE); 1.24 ± 0.21 y $1.33 \pm 0.4 \text{ mg m}^{-3}$ (SW); y 1.88 ± 0.4 y $1.09 \pm 0.22 \text{ mg m}^{-3}$ (SE). Por otro lado, los valores más altos se encontraron para “invierno” de 2010-11 en los cuatro cuadrantes: $2.6 \pm 0.64 \text{ mg m}^{-3}$ (NW), $2.96 \pm 1.21 \text{ mg m}^{-3}$ (NE), $1.99 \pm 0.73 \text{ mg m}^{-3}$ (SW) y $1.67 \pm 0.25 \text{ mg m}^{-3}$ (SE) (Tabla 11). Por otro lado, Chl_{sat} promedio para “verano” fue $0.65 \pm 0.05 \text{ mg m}^{-3}$. Los valores más bajos se obtuvieron para los “veranos” de 2003 y 2004: 1.03 ± 0.11 y $1.02 \pm 0.1 \text{ mg m}^{-3}$ (NW), 0.34 ± 0.04 y $0.4 \pm 0.1 \text{ mg m}^{-3}$ (NE), 0.39 ± 0.06 y $0.48 \pm 0.10 \text{ mg m}^{-3}$ (SW) y 0.42 ± 0.05 y $0.42 \pm 0.09 \text{ mg m}^{-3}$ (SE), mientras que los valores más altos se encontraron para “verano” de 2007

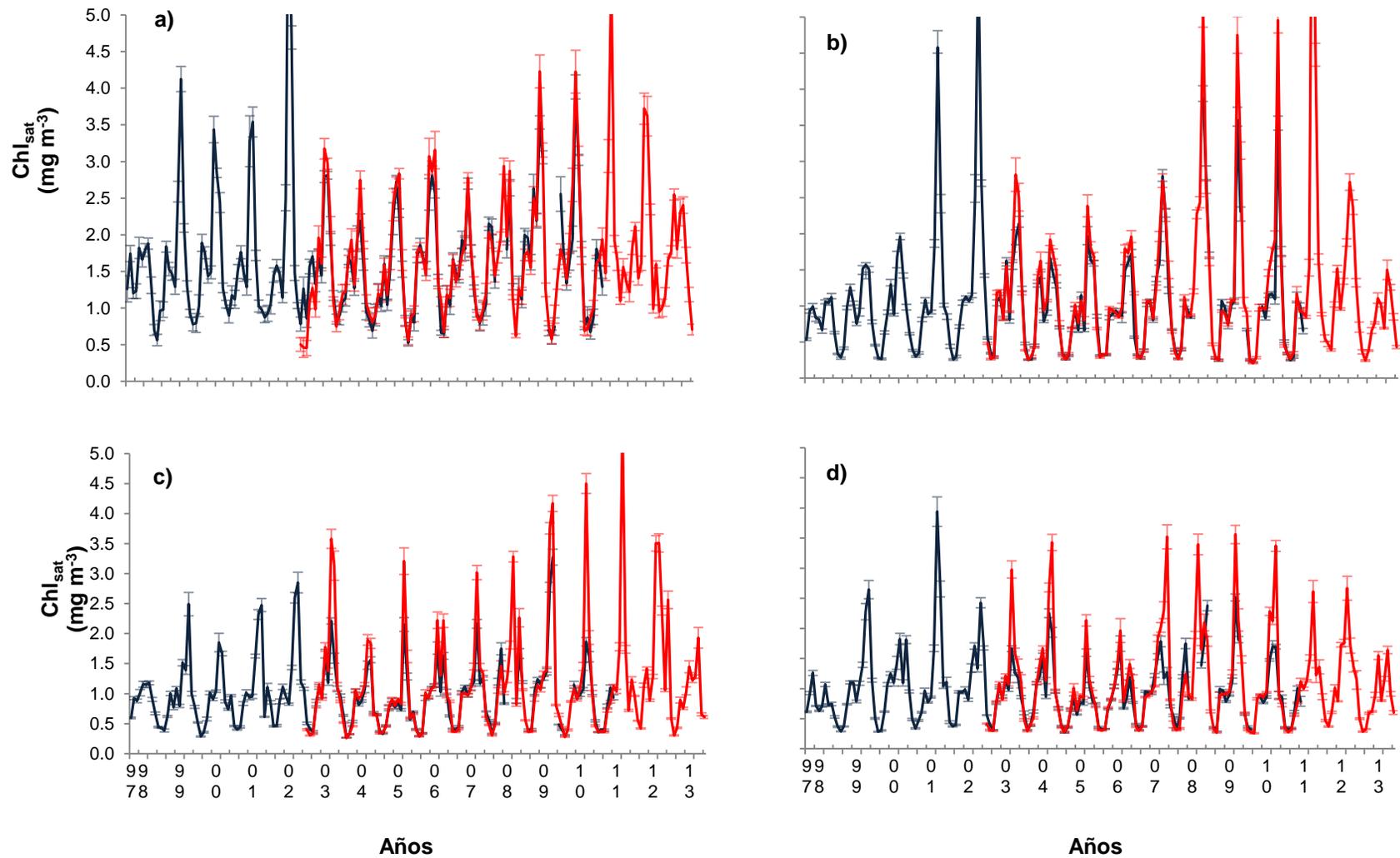


Figura 13. Series de tiempo de la media mensual de la Chl_{sat} para el norte del Golfo de California para los cuadrantes: a) NW, b) NE, c) SW, y d) SE. Para el período 1997-2013, en color azul los datos del sensor SeaWiFS y en color rojo los del sensor MODIS Aqua. Las barras verticales muestran el error estándar. Los años se leen de arriba hacia abajo.

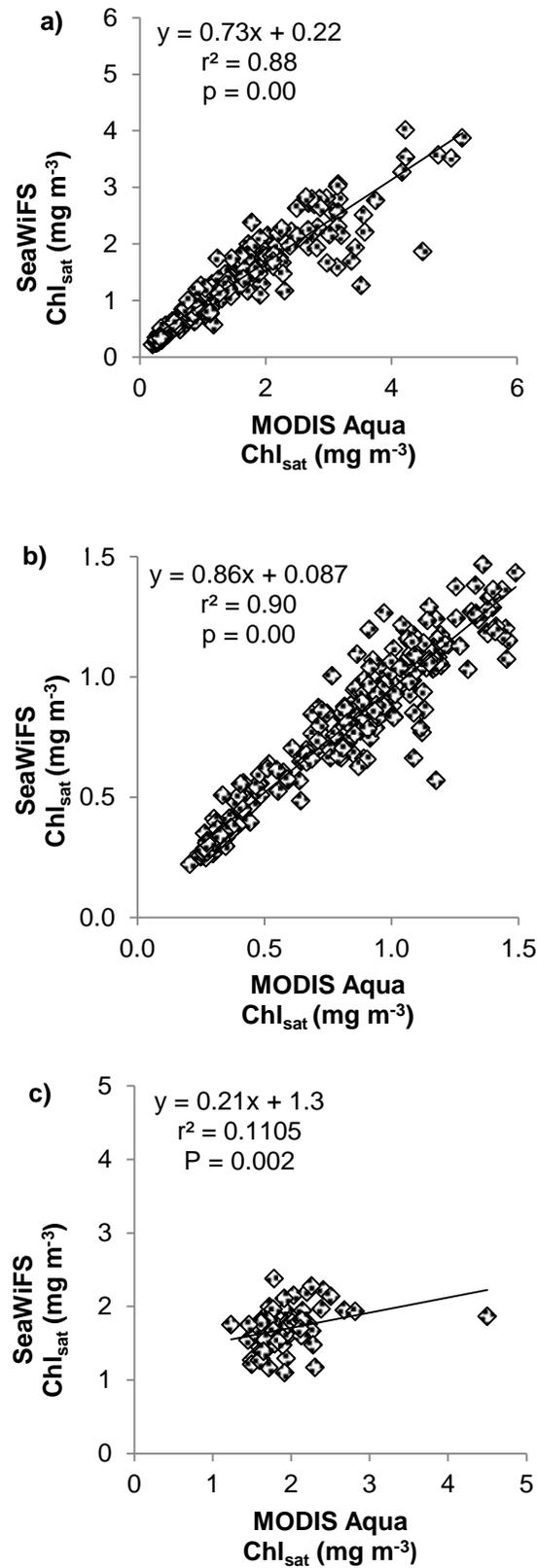


Figura 14. Regresiones lineales entre los datos de los cuatro cuadrantes de la Chl_{sat} del sensor SeaWiFS y Chl_{sat} del sensor MODIS Aqua: a) con todos los datos, b) con los datos de aguas caso I, c) con los datos de aguas caso II.

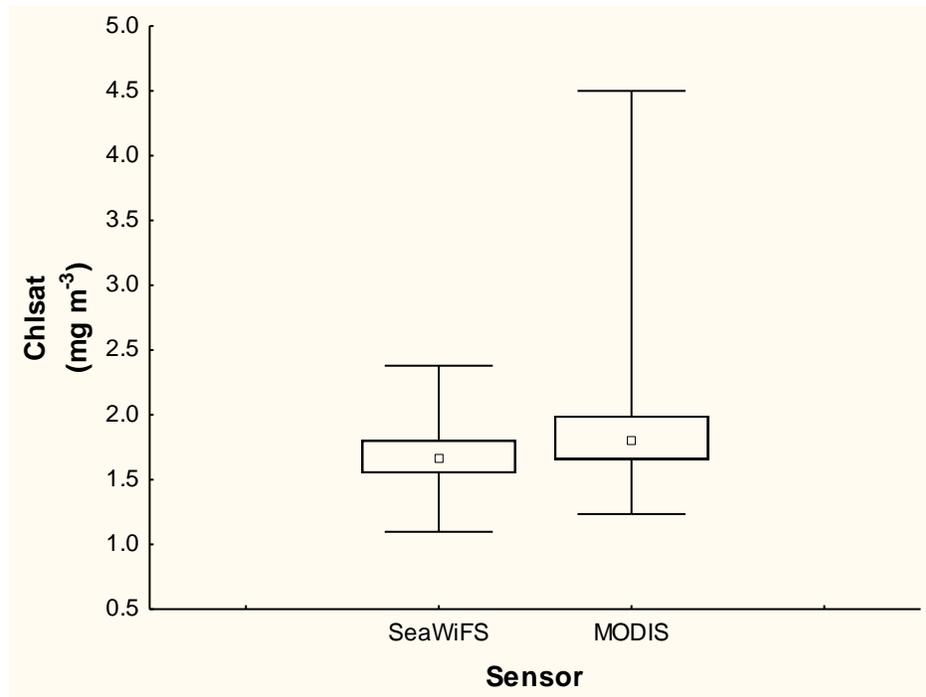


Figura 15. Diagrama de caja para los datos de los sensores SeaWiFS y MODIS Aqua para aguas caso II.

con $1.25 \pm 0.27 \text{ mg m}^{-3}$, $0.54 \pm 0.2 \text{ mg m}^{-3}$, $0.58 \pm 0.16 \text{ mg m}^{-3}$, $0.49 \pm 0.14 \text{ mg m}^{-3}$ para los cuadrantes NW, NE, SW y SE, respectivamente (Tabla 11).

En ambas series de tiempo (SeaWiFS y MODIS) Chl_{sat} tiene una variabilidad interanual bien definida. En la del SeaWiFS, la diferencia entre la Chl_{sat} más alta de “invierno” y la más baja fue $<1 \text{ mg m}^{-3}$; y para “verano” esta diferencia fue 0.5 mg m^{-3} , aproximadamente (Tabla 10). La variación interanual de “invierno” fue significativa para Chl_{sat} de este sensor (prueba de Kruskal-Wallis: $n = 300$, $H = 23.28$, $p = 0.02$). Estas diferencias significativas fueron entre el “invierno” de 1997-98 (con 1.07 mg m^{-3}) y los de 2001-02 y 2008-09 (con 2.13 mg m^{-3} y 1.93 mg m^{-3} , respectivamente). Estas diferencias no fueron significativas para “verano” (prueba de Kruskal-Wallis: $n = 205$, $H = 13.35$, $p = 0.42$).

A pesar de que en el caso de Chl_{sat} del MODIS Aqua, las diferencias entre los datos más bajos y los más altos de “invierno”, y los correspondientes de “verano”, fueron similares a las diferencias de los datos del SeaWiFS (Tabla 11), no se encontraron diferencias interanuales significativas para los datos de ambas épocas del

MODIS (prueba de Kruskal-Wallis: $n = 264$, $H = 12.80$, $p = 0.23$ para “invierno” y $n = 176$, $H = 9.26$, $p = 0.50$ para “verano”). De nuevo, esto indica que los datos del MODIS son más dispersos que los del SeaWiFS (Figura 15).

Tabla 10. Chl_{sat} promedio (μ) y error estándar (ee) para cada época del año (mg m^{-3}) para los cuatro cuadrantes del norte del Golfo de California para el periodo 1997-2010 (SeaWiFS).

Época	Años	NW		NE		SW		SE	
		μ	ee	μ	ee	μ	ee	μ	ee
“Invierno”	1997-98	1.62	0.11	0.92	0.07	1.01	0.08	0.76	0.06
	1998-99	2.14	0.45	1.22	0.15	1.38	0.25	1.55	0.30
	1999-00	2.15	0.36	1.37	0.17	1.18	0.19	1.42	0.14
	2000-01	2.05	0.44	1.94	0.59	1.49	0.32	1.82	0.51
	2001-02	3.08	0.98	2.40	0.75	1.64	0.36	1.43	0.24
	2002-03	2.00	0.27	1.48	0.23	1.45	0.19	1.18	0.11
	2003-04	1.59	0.18	1.25	0.14	1.08	0.15	1.46	0.23
	2004-05	1.89	0.26	1.28	0.22	1.06	0.24	1.03	0.25
	2005-06	2.09	0.25	1.25	0.16	1.28	0.13	1.14	0.15
	2006-07	1.82	0.21	1.68	0.30	1.31	0.18	1.30	0.18
	2007-08	1.93	0.38	2.51	0.89	1.13	0.27	1.34	0.28
	2008-09	2.61	0.33	1.74	0.53	1.97	0.44	1.42	0.33
2009-10	2.29	0.42	1.59	0.41	1.26	0.16	1.23	0.18	
Promedio		2.10	0.11	1.59	0.13	1.33	0.07	1.31	0.07
“Verano”	1997	1.50	0.24	0.73	0.20	0.76	0.17	0.77	0.16
	1998	1.09	0.27	0.51	0.16	0.61	0.14	0.44	0.10
	1999	1.12	0.26	0.41	0.09	0.44	0.07	0.43	0.08
	2000	1.17	0.12	0.46	0.12	0.53	0.10	0.48	0.05
	2001	1.08	0.13	0.43	0.11	0.66	0.12	0.54	0.14
	2002	1.12	0.18	0.57	0.17	0.53	0.11	0.51	0.10
	2003	0.99	0.07	0.36	0.06	0.44	0.09	0.48	0.08
	2004	0.95	0.10	0.40	0.10	0.48	0.10	0.41	0.08
	2005	0.98	0.25	0.45	0.13	0.49	0.15	0.49	0.15
	2006	1.13	0.21	0.50	0.18	0.57	0.15	0.51	0.15
	2007	1.23	0.31	0.53	0.18	0.65	0.19	0.65	0.19
	2008	1.46	0.27	0.54	0.27	0.61	0.21	0.54	0.22
2009	1.30	0.63	0.24	0.02	0.35	0.04	0.34	0.02	
2010	1.06	0.25	0.49	0.20	0.49	0.10	0.41	0.07	
Promedio		1.16	0.07	0.47	0.05	0.54	0.04	0.50	0.04

Comparando con Chl_{sat} de los otros cuadrantes, el cuadrante NW presentó los valores promedio más altos en todos los “inviernos”, así como en todos los “veranos” de las series de tiempo de los tres sensores. Las concentraciones más bajas fueron muy

similares entre los tres cuadrantes restantes. Esta diferencia entre el cuadrante NW y los otros tres se observa más claramente en los datos de “verano”. El valor mínimo de “verano” fue $>1 \text{ mg m}^{-3}$ para el cuadrante NW, mientras que en el resto de los cuadrantes fue $\sim 0.4 \text{ mg m}^{-3}$, aproximadamente, durante el período del CZCS. Las concentraciones mínimas de “verano” fueron $>0.9 \text{ mg m}^{-3}$ en el cuadrante NW durante los períodos del SeaWiFS y MODIS Aqua y las del resto de los cuadrantes fueron entre 0.3 mg m^{-3} y 0.4 mg m^{-3} .

Tabla 11. Chl_{sat} promedio (μ) y error estándar (ee) para cada época del año (mg m^{-3}) para los cuatro cuadrantes del norte del Golfo de California para el periodo 2002-2013 (MODIS Aqua).

Época	Años	NW		NE		SW		SE	
		μ	ee	μ	ee	μ	ee	μ	ee
“Invierno”	2002-03	2.21	0.30	1.72	0.33	1.98	0.45	1.51	0.31
	2003-04	1.81	0.24	1.46	0.16	1.24	0.21	1.88	0.40
	2004-05	2.07	0.27	1.42	0.26	1.33	0.40	1.09	0.22
	2005-06	2.26	0.35	1.37	0.21	1.48	0.24	1.28	0.17
	2006-07	1.83	0.21	1.76	0.28	1.55	0.30	1.94	0.38
	2007-08	2.15	0.25	2.43	0.61	1.74	0.38	1.79	0.38
	2008-09	2.48	0.45	1.97	0.66	2.09	0.60	1.72	0.41
	2009-10	2.51	0.43	2.10	0.59	1.81	0.56	1.74	0.42
	2010-11	2.60	0.64	2.96	1.21	1.99	0.73	1.43	0.25
	2011-12	2.28	0.47	1.76	0.28	2.11	0.49	1.67	0.25
	2012-13	2.00	0.21	1.07	0.12	1.26	0.17	1.16	0.15
Promedio		2.20	0.08	1.82	0.16	1.69	0.10	1.57	0.09
“Verano”	2002	1.04	0.18	0.56	0.22	0.46	0.12	0.45	0.11
	2003	1.03	0.11	0.34	0.04	0.39	0.06	0.42	0.05
	2004	1.02	0.10	0.40	0.10	0.48	0.10	0.42	0.09
	2005	1.03	0.26	0.48	0.16	0.51	0.17	0.41	0.09
	2006	1.16	0.20	0.50	0.19	0.54	0.16	0.47	0.13
	2007	1.25	0.27	0.54	0.20	0.58	0.16	0.49	0.14
	2008	1.19	0.23	0.48	0.16	0.55	0.13	0.53	0.14
	2009	1.17	0.27	0.43	0.18	0.50	0.13	0.42	0.14
	2010	1.05	0.20	0.53	0.21	0.46	0.09	0.37	0.06
	2011	1.49	0.13	0.61	0.14	0.77	0.17	0.58	0.11
	2012	1.19	0.16	0.41	0.09	0.55	0.13	0.43	0.07
Promedio		1.15	0.04	0.48	0.02	0.53	0.03	0.45	0.02

En general, la climatología de Chl_{sat} del norte del Golfo de California mostró una variabilidad entre meses muy marcada en los datos de los tres sensores (Figura 16, Tablas 12, 13 y 14). Las Chl_{sat} más elevadas se presentaron en marzo y abril para el

caso de los datos de SeaWiFS y MODIS, y en febrero, noviembre y diciembre para los datos del CZCS. En los tres casos se presentaron dos máximos, pero fue mucho más marcado en el caso de los datos del CZCS. Los valores mayores del CZCS fueron hasta más del doble que las de los otros sensores (Figura 16, Tablas 12, 13 y 14). Las Chl_{sat} más bajas se observaron en julio, agosto y septiembre y fueron iguales para los tres sensores. Para verificar que los datos altos del CZCS son un artificio del sensor y no un resultado de una disminución real de Chl_{sat} por la falta de los nutrientes del río, se presentan los resultados del cuadrante de la Cuenca de Guaymas para los tres sensores (Figura 16).

La sobreestimación por parte de los datos del CZCS se corrobora al hacer una comparación de los cuatro cuadrantes del norte del golfo con datos del cuadrante de la Cuenca de Guaymas, donde se observa que su climatología es similar a las de los del norte. También los valores grandes del CZCS de la Cuenca de Guaymas fueron hasta más del doble que las de los otros sensores durante la época de “invierno” (Figura 16).

Tabla 12. Media mensual (μ) y error estándar (ee) de la Chl_{sat} del sensor CZCS ($mg\ m^{-3}$) para los cuatro cuadrantes del norte del Golfo de California (aproximación a su climatología).

Mes	NW		NE		SW		SE	
	μ	ee	μ	ee	μ	ee	μ	Ee
Enero	3.16	0.59	4.69	1.75	3.55	0.78	5.24	1.43
Febrero	5.86	1.95	2.87	0.28	3.32	0.53	2.89	0.35
Marzo	5.32	1.96	2.52	0.53	3.12	0.45	1.67	0.25
Abril	2.36	1.06	3.02	1.07	3.41	1.23	2.68	0.96
Mayo			4.59	1.79	2.17	0.46	2.31	0.41
Junio			1.64	1.02	1.60	0.35	2.47	0.52
Julio	1.08	0.35	0.49	0.08	1.50	0.79	1.76	1.08
Agosto			0.40	0.05	0.58	0.10	0.40	0.05
Septiembre	1.04	0.29	0.41	0.04	0.52	0.04	0.47	0.04
Octubre	2.63	0.61	2.19	0.52	1.89	0.43	1.48	0.30
Noviembre	4.02	0.60	4.60	1.15	3.86	0.71	2.78	0.72
Diciembre	2.82	0.44	6.66	1.70	3.19	0.75	4.81	1.33

La climatología muestra que en general, el cuadrante NW presentó la biomasa fitoplanctónica más elevada a lo largo del año en los tres sensores. Incluso, Chl_{sat} puede llegar hasta valores mayores a $1\ mg\ m^{-3}$, durante “verano”. Estas concentraciones solamente fueron menores a $1\ mg\ m^{-3}$ en junio, julio y agosto para los datos del SeaWiFS ($0.91\ mg\ m^{-3}$, $0.74\ mg\ m^{-3}$ y $0.97\ mg\ m^{-3}$, respectivamente).

Similarmente para los datos del MODIS Aqua, en los que sólo los meses de junio y julio presentaron valores menores a 1 mg m^{-3} (0.98 y 0.79 mg m^{-3} , respectivamente). Por otro lado, en los otros tres cuadrantes las Chl_{sat} mínimas fueron menores a 1 mg m^{-3} y muy similares, de 0.3 a 0.5 mg m^{-3} , en los datos de los tres sensores.

La Chl_{sat} mostró una variación espacial bien definida en el norte del Golfo de California. Esta variación fue más evidente en “verano”, Chl_{sat} presentó diferencias significativas entre el cuadrante NW y los dos cuadrantes de la parte sur (SW y SE) para el período 1978-86 (prueba de Kruskal-Wallis: $n = 89$, $H = 14.5$, $p = 0.0023$). El cuadrante NE presentó valores intermedios a los anteriores. En el período 1997-2010 hubo diferencias significativas entre Chl_{sat} del cuadrante NW y la de los demás cuadrantes (prueba de Kruskal-Wallis: $n = 205$, $H = 86.69$, $p = 0.00$). De una manera similar, para el período 2002-2013, Chl_{sat} del NW fue estadísticamente diferente a la de los demás cuadrantes (prueba de Kruskal-Wallis: $n = 176$, $H = 29.26$, $p = 0.00$). Esta variación espacial de la Chl_{sat} no fue tan evidente para “invierno”. La Chl_{sat} de los datos de los sensores CZCS y MODIS Aqua no mostraron diferencias significativas entre cuadrantes (prueba de Kruskal-Wallis: $n = 167$, $H = 2.46$, $p = 0.46$ y $n = 264$, $H = 6.4$, $p = 0.93$, respectivamente), mientras que para Chl_{sat} de los datos del sensor SeaWiFS se encontraron diferencias significativas entre la del NW y la de los demás cuadrantes (prueba de Kruskal-Wallis: $n = 300$, $H = 54.03$, $p = 0.00$).

Tabla 13. Media mensual (μ) y error estándar (ee) de la Chl_{sat} del sensor SeaWiFS (mg m^{-3}) para los cuatro cuadrantes del norte del Golfo de California (aproximación a su climatología).

Mes	NW		NE		SW		SE	
	μ	ee	μ	ee	μ	ee	μ	ee
Enero	1.60	0.12	1.03	0.07	1.05	0.07	0.99	0.07
Febrero	2.30	0.18	1.11	0.11	1.33	0.09	1.20	0.10
Marzo	3.35	0.40	2.15	0.31	1.90	0.16	1.92	0.24
Abril	2.44	0.23	2.37	0.37	1.74	0.22	1.50	0.15
Mayo	1.49	0.13	1.65	0.18	0.96	0.09	1.38	0.19
Junio	0.91	0.05	0.86	0.10	0.79	0.07	0.99	0.14
Julio	0.74	0.04	0.38	0.02	0.49	0.04	0.45	0.02
Agosto	0.97	0.05	0.28	0.01	0.36	0.02	0.32	0.01
Septiembre	1.04	0.04	0.34	0.02	0.44	0.03	0.39	0.03
Octubre	1.72	0.10	0.87	0.06	0.87	0.05	0.81	0.06
Noviembre	1.69	0.06	1.04	0.03	1.08	0.06	1.05	0.06
Diciembre	1.41	0.05	0.92	0.06	0.96	0.03	0.90	0.05

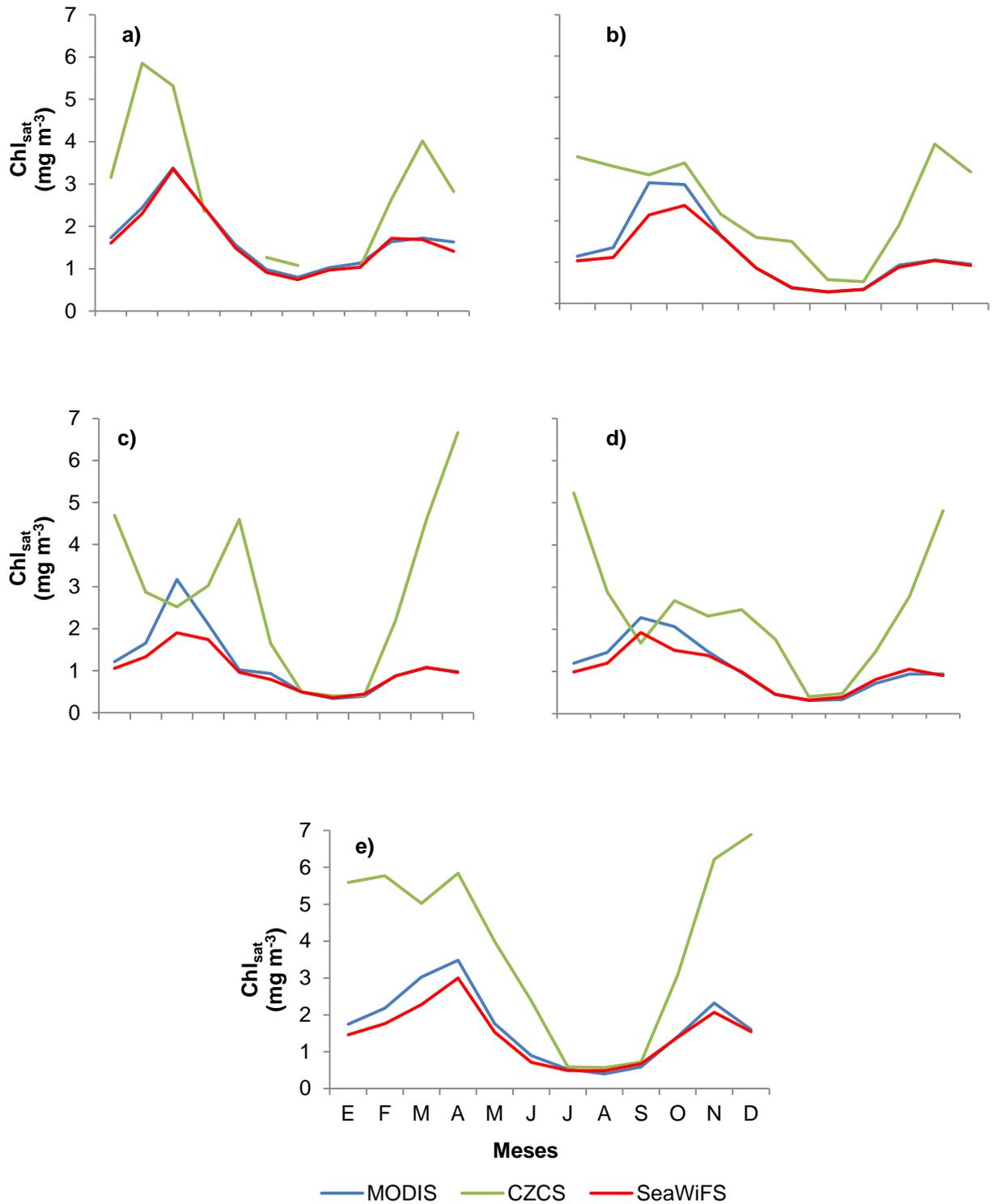


Figura 16. Año promedio de la Chl_{sat} de los cuadrantes para el norte del Golfo de California y Cuenca Guaymas: a) NW, b) NE, c) SW, d) SE y e) CG, de color azul los datos del sensor MODIS Aqua, de verde los del CZCS y de rojo los del SeaWiFS.

El análisis de regresión lineal para explorar la posibilidad de una tendencia temporal negativa de Chl_{sat} en el cuadrante NW arrojó que para el período 1978-1986 la pendiente de la recta es negativa, mientras que en los períodos 1997-2010 y 2002-2013 la pendiente es positiva. Sin embargo, en los tres casos el coeficiente de correlación es bajo y las pendientes no fueron estadísticamente significativas ($n = 31$, $F = 2.73$, $p = 0.109$, $n = 96$, $F = 0.35$, $p = 0.554$ y $n = 66$, $F = 1.10$, $p = 0.297$, respectivamente). Se obtuvo el mismo resultado para los datos de los otros tres cuadrantes (no ilustrados). Por lo tanto, se descarta la posibilidad de una tendencia temporal negativa significativa de Chl_{sat} en el ecosistema pelágico del norte del golfo en los datos de los tres sensores (Figura 17 a, b y c).

Tabla 14. Media mensual (μ) y error estándar (ee) de la Chl_{sat} del sensor MODIS Aqua ($mg\ m^{-3}$) para los cuatro cuadrantes del norte del Golfo de California (aproximación a su climatología).

Mes	NW		NE		SW		SE	
	μ	ee	μ	ee	μ	ee	μ	ee
Enero	1.74	0.10	1.15	0.07	1.21	0.08	1.20	0.10
Febrero	2.44	0.19	1.35	0.16	1.65	0.22	1.45	0.15
Marzo	3.38	0.29	2.93	0.61	3.17	0.39	2.27	0.27
Abril	2.44	0.18	2.88	0.42	2.11	0.27	2.06	0.24
Mayo	1.56	0.17	1.66	0.16	1.02	0.14	1.47	0.23
Junio	0.98	0.08	0.86	0.11	0.93	0.18	0.97	0.11
Julio	0.79	0.08	0.37	0.03	0.49	0.05	0.45	0.05
Agosto	1.02	0.05	0.29	0.02	0.34	0.02	0.31	0.02
Septiembre	1.13	0.04	0.34	0.02	0.39	0.02	0.33	0.01
Octubre	1.64	0.08	0.93	0.07	0.88	0.06	0.72	0.04
Noviembre	1.72	0.06	1.05	0.07	1.07	0.07	0.94	0.05
Diciembre	1.63	0.12	0.95	0.07	0.97	0.03	0.94	0.06

El análisis espectral arrojó que la señal del ciclo estacional es la que explica la mayor parte de la variabilidad de Chl_{sat} en el norte del Golfo de California para los datos de los cuatro cuadrantes y de los sensores SeaWiFS y MODIS Aqua (Figuras 18a y 18b). Igualmente, se puede observar que la Chl_{sat} responde también a una señal semianual (dos ciclos por año), pero en una medida menor. Además se detectó una señal que se repite cada 3 a 4 meses. Sin embargo, esta señal no fue significativa para ninguno de los cuadrantes.

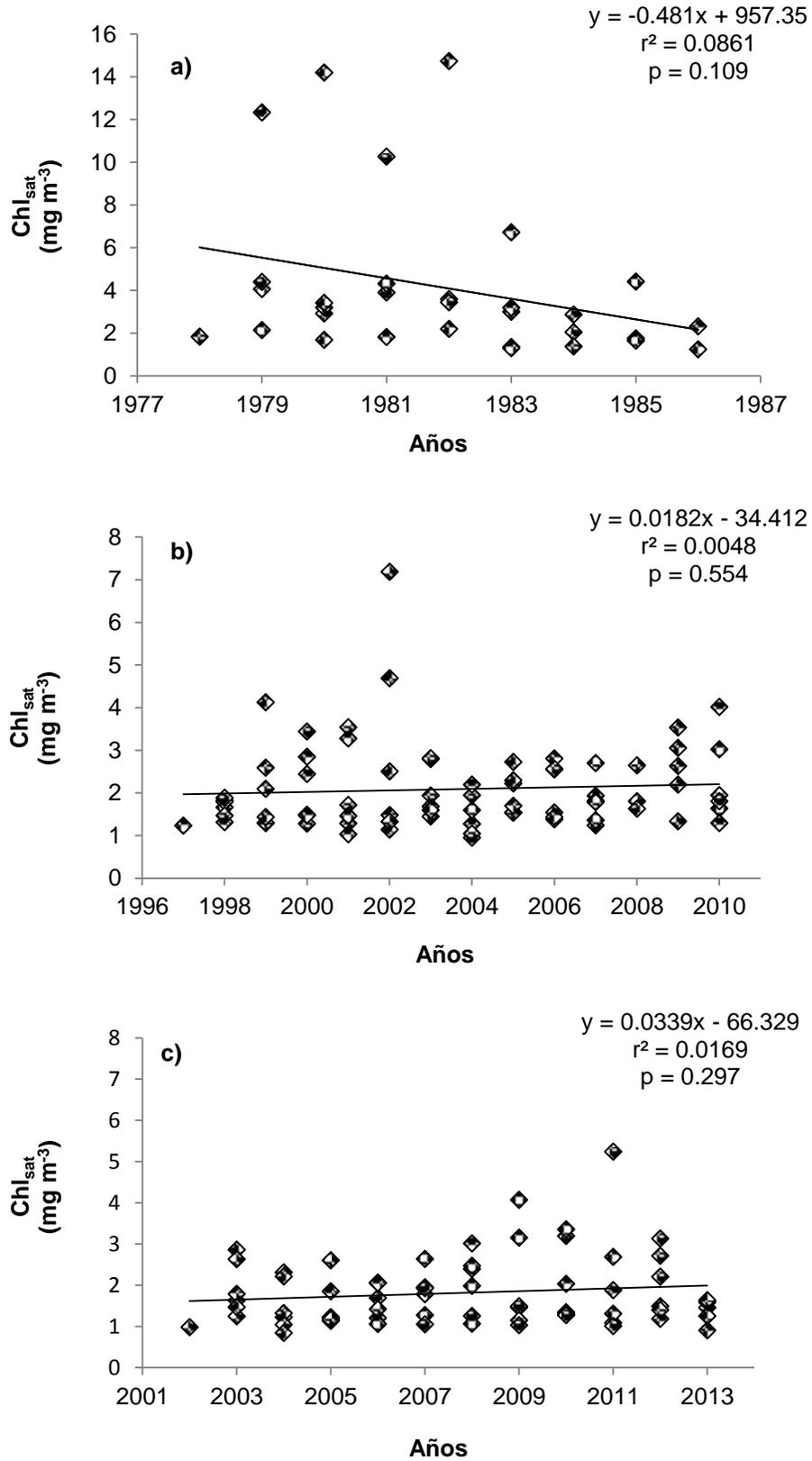


Figura 17. Regresión lineal entre la concentración de Chl_{sat} del cuadrante NW y el tiempo (años): a) período del CZCS; b) período del SeaWiFS; y c) período del MODIS Aqua.

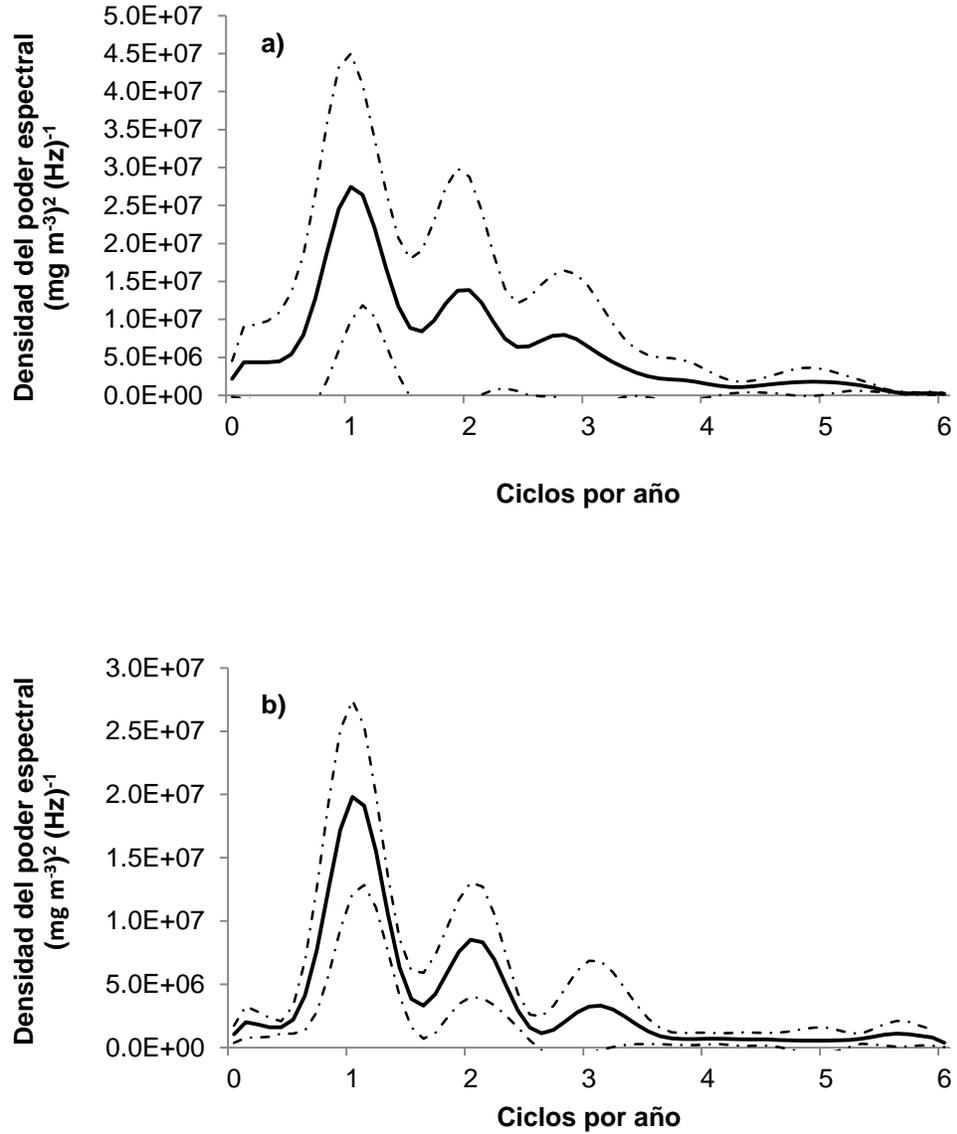


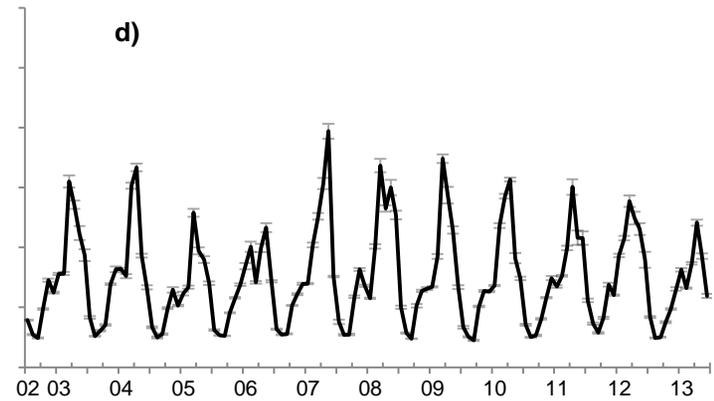
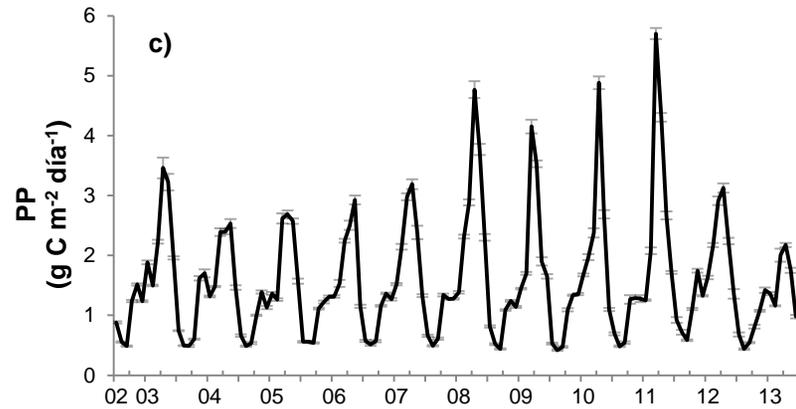
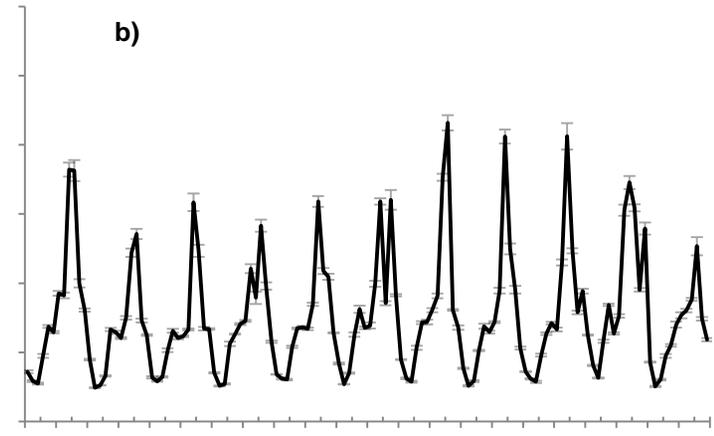
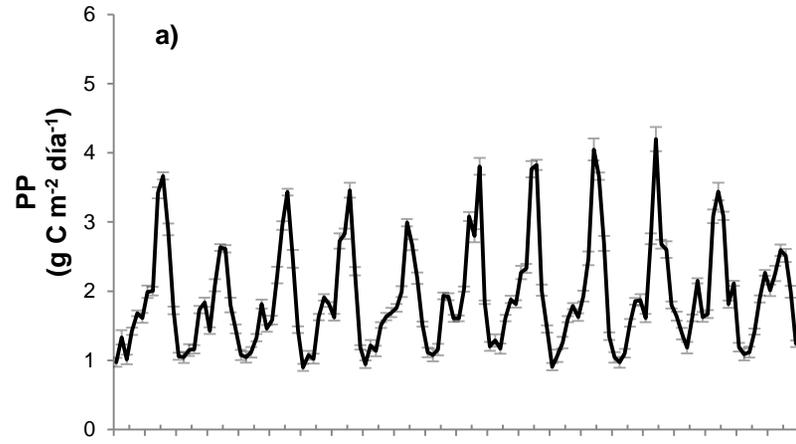
Figura 18. Densidad espectral de Chl_{sat} para el cuadrante NW: a) datos del SeaWiFS; y b) datos del MODIS Aqua. La línea continua muestra el valor promedio de la densidad espectral y las discontinuas los límites de confianza al 95%.

3.3 Producción Primaria (PP)

La PP del norte del Golfo de California presentó una variabilidad temporal y espacial similar a la de Chl_{sat} . En el norte del Golfo de California las series de tiempo mostraron una clara diferencia entre PP de la época de “invierno” y la de “verano” (Figura 19). Además hubo una variación entre años. En general, el cuadrante NW fue el que presentó la productividad promedio más alta y el SE la más baja. Las series de tiempo de todos los cuadrantes presentaron una oscilación estacional muy marcada (0.5 a $3 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) con mínimos durante julio, agosto y septiembre y máximos durante febrero, marzo y abril (Figura 19). Existen diferencias muy significativas en la PP entre la época de “invierno” y la época de “verano” (prueba U de Mann-Whitney: $n = 440$, $z = 16.95$, $p = 0.00$). Además de las variaciones interanual y estacional, la PP tuvo un componente semianual. Este otro máximo se observó en las series de tiempo de los cuatro cuadrantes. Fue de menor magnitud que el máximo de “invierno” y se presentó en octubre (Figura 19).

La PP promedio para todos los “inviernos” y de todos los cuadrantes fue $2.20 \pm 0.05 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. Los “inviernos” menos productivos fueron 2003-04 con $2.07 \pm 0.2 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ en el cuadrante NW, 2004-05 con $1.94 \pm 0.31 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ en el NE, 2012 con $1.77 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ para el SW y con $1.65 \pm 0.23 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ para el SE. Los valores promedios más altos de PP fueron en el “invierno” de 2009-10 con $2.74 \pm 0.39 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ (NW), en 2010-11 con 2.88 ± 0.73 (NE), en 2008-09 con 2.39 ± 0.5 (SW) y en 2006-07 con 2.39 ± 0.41 (SE) (Tabla 15). Por otro lado, la PP promedio para todos los “veranos” y de todos los cuadrantes fue $0.85 \pm 0.04 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. En general, los valores de PP más bajos se observaron durante “verano” de 2003 con $1.1 \pm 0.03 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ (NW), 0.58 ± 0.06 (NE), 0.64 ± 0.09 (SW) y 0.67 ± 0.07 (SE). El “verano” más productivo fue en 2011 con 1.46 ± 0.11 , 0.83 ± 0.11 , 0.96 ± 0.15 , y $0.81 \pm 0.11 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ para los cuadrantes NW, NE, SW y SE, respectivamente (Tabla 15).

La PP tuvo una variabilidad interanual bien marcada. La diferencia entre el “invierno” más productivo y el menos productivo fue $1 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, mientras que esta diferencia para “verano” fue $\sim 0.3 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ (Tabla 15). Sin embargo, estas variaciones interanuales no fueron significativas en ambas épocas del año (prueba de



Años

Años

Figura 19. Series de tiempo de la media mensual de PP de los datos de la página de OSU de los cuadrantes: a) NW, b) NE, c) SW, d) SE en el norte del Golfo de California, para el período 2002-2013. Las barras verticales muestran el error estándar.

Kruskal-Wallis: $n = 264$, $H = 11.67$, $p = 0.30$ para “invierno” y $n = 176$, $H = 9.27$, $p = 0.50$ para “verano”).

Tabla 15. PP promedio (μ) y error estándar (ee) para cada época del año ($\text{g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) de los datos de la página de OSU, para los cuatro cuadrantes del norte del Golfo de California, para el período 2002-2013.

Época	Años	NW		NE		SW		SE	
		μ	ee	μ	ee	μ	ee	μ	ee
“Invierno”	2002-03	2.60	0.35	2.26	0.37	2.37	0.41	2.07	0.30
	2003-04	2.07	0.20	1.97	0.22	1.77	0.26	2.17	0.33
	2004-05	2.36	0.31	1.94	0.31	1.79	0.34	1.65	0.23
	2005-06	2.46	0.28	1.97	0.28	1.94	0.22	1.80	0.15
	2006-07	2.22	0.21	2.25	0.31	1.97	0.28	2.39	0.41
	2007-08	2.49	0.36	2.73	0.56	2.14	0.35	2.26	0.37
	2008-09	2.67	0.37	2.31	0.50	2.39	0.50	2.19	0.35
	2009-10	2.74	0.39	2.49	0.52	2.19	0.42	2.13	0.32
	2010-11	2.62	0.37	2.88	0.73	2.20	0.43	1.92	0.25
	2011-12	2.45	0.34	2.24	0.29	2.38	0.38	2.13	0.22
	2012-13	2.27	0.10	1.65	0.16	1.72	0.17	1.71	0.17
	Promedio		2.45	0.07	2.24	0.13	2.08	0.07	2.04
“Verano”	2002	1.18	0.11	0.70	0.09	0.70	0.09	0.70	0.11
	2003	1.10	0.03	0.64	0.09	0.64	0.09	0.67	0.07
	2004	1.14	0.06	0.72	0.10	0.72	0.10	0.68	0.11
	2005	1.16	0.16	0.72	0.14	0.72	0.14	0.65	0.09
	2006	1.20	0.12	0.75	0.11	0.75	0.11	0.69	0.11
	2007	1.32	0.20	0.83	0.15	0.83	0.15	0.76	0.15
	2008	1.32	0.10	0.79	0.12	0.79	0.12	0.77	0.14
	2009	1.21	0.15	0.73	0.11	0.73	0.11	0.66	0.13
	2010	1.17	0.13	0.72	0.09	0.72	0.09	0.64	0.07
	2011	1.46	0.11	0.96	0.15	0.96	0.15	0.81	0.11
	2012	1.20	0.07	0.73	0.10	0.73	0.10	0.65	0.09
	Promedio		1.22	0.03	0.75	0.01	0.75	0.01	0.70

En la primera aproximación a la climatología marzo fue el mes más productivo con $3.27 \pm 0.17 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ y con $3.13 \pm 0.25 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ para los cuadrantes NW y SW, respectivamente y abril con $3.37 \pm 0.28 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ y con $2.69 \pm 0.14 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ para el NE y el SE, respectivamente. Por otro lado, en el cuadrante NW julio fue el menos productivo con $1.1 \pm 0.06 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, y agosto en el NE y el SW con $0.52 \pm$

0.02 g C m⁻² día⁻¹ y con 0.58 ± 0.03 g C m⁻² día⁻¹, respectivamente. En el SE septiembre presentó los valores más bajos con 0.53 ± 0.01 g C m⁻² día⁻¹ (Tabla 16 y Figura 20).

En general, el cuadrante NW presentó la productividad fitoplanctónica más elevada a lo largo del año, incluso durante “verano”; PP fue >1 g C m⁻² día⁻¹ (1.1 ± 0.06 g C m⁻² día⁻¹ en julio, 1.15 ± 0.04 en agosto y 1.13 ± 0.02 en septiembre). En cambio, en el resto de los cuadrantes los valores mínimos fueron muy similares, entre 0.5 y 0.6 g C m⁻² día⁻¹, aproximadamente. El cuadrante NW fue estadísticamente diferente al resto de los cuadrantes durante “verano” (prueba de Kruskal-Wallis: $n = 176$, $H = 74.31$, $p = 0.00$), mientras que durante “invierno” el cuadrante NW presentó diferencias significativas con los cuadrantes NE y SE (prueba de Kruskal-Wallis: $n = 264$, $H = 14.47$, $p = 0.0023$), pero no con el SW.

Tabla 16. Media mensual (μ) y error estándar (ee) de PP (g C m⁻² día⁻¹) de los datos de la página de OSU, para los cuatro cuadrantes del norte del Golfo de California (aproximación a su climatología).

Mes	NW		NE		SW		SE	
	μ	ee	μ	ee	μ	ee	μ	ee
Enero	1.77	0.08	1.47	0.06	1.45	0.06	1.47	0.07
Febrero	2.36	0.11	1.76	0.12	1.93	0.14	1.79	0.11
Marzo	3.27	0.17	2.95	0.33	3.13	0.25	2.62	0.20
Abril	3.13	0.15	3.37	0.28	2.77	0.21	2.69	0.14
Mayo	2.41	0.18	2.61	0.17	1.87	0.15	2.33	0.19
Junio	1.56	0.08	1.51	0.12	1.52	0.15	1.64	0.12
Julio	1.10	0.06	0.70	0.04	0.82	0.05	0.79	0.05
Agosto	1.15	0.04	0.52	0.02	0.58	0.03	0.54	0.02
Septiembre	1.13	0.02	0.53	0.02	0.60	0.02	0.53	0.01
Octubre	1.52	0.06	1.08	0.06	1.02	0.05	0.93	0.04
Noviembre	1.84	0.04	1.37	0.06	1.38	0.05	1.29	0.05
Diciembre	1.75	0.06	1.31	0.05	1.34	0.02	1.33	0.05

El análisis de regresión lineal para explorar la posibilidad de una tendencia temporal negativa en la PP presentó una pendiente ligeramente positiva con un índice de correlación muy bajo ($r^2 = 0.01$) (Figura 21). Sin embargo, el incremento de PP en el cuadrante del refugio del hábitat de la vaquita no fue estadísticamente significativo ($n = 66$, $F = 0.92$, $p = 0.339$).

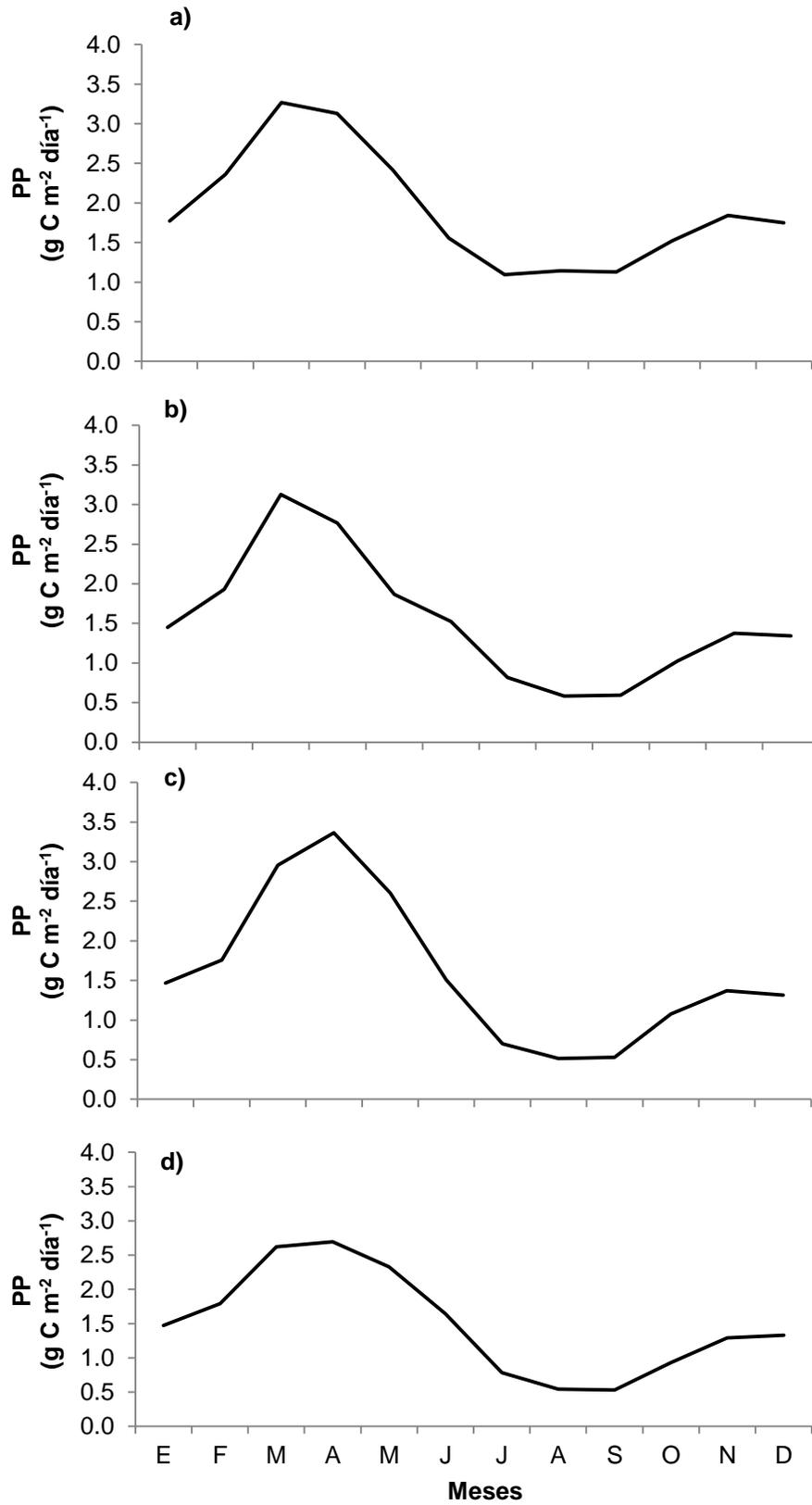


Figura 20. Año promedio de la PP para los cuadrantes del norte del Golfo de California: a) NW, b) NE, c) SW y d) SE.

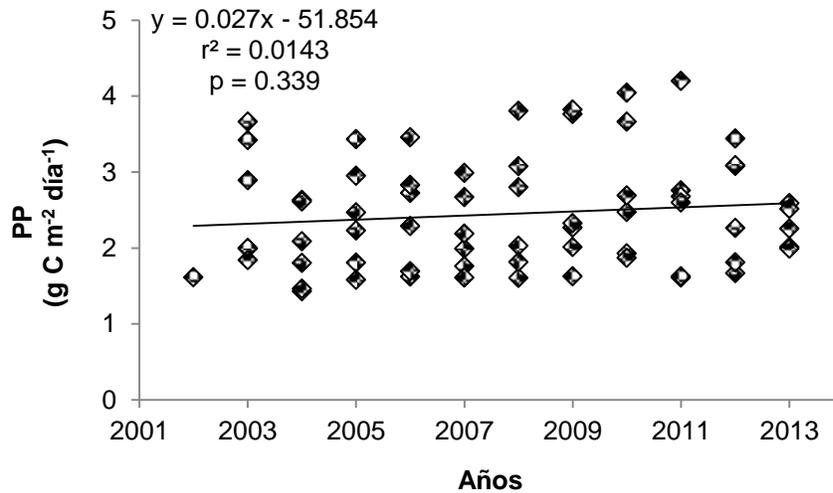


Figura 21. Regresión lineal entre PP y el tiempo (años) del período 2002-2013 para el cuadrante NW. Los puntos muestran los meses de cada año.

El análisis espectral muestra que solamente las señales anual y semianual fueron significativas en todos los cuadrantes. El ciclo estacional fue la fuente principal de variación de PP en el norte del Golfo de California. Además, se identificó una señal trimestral (Figura 22) que no fue significativa.

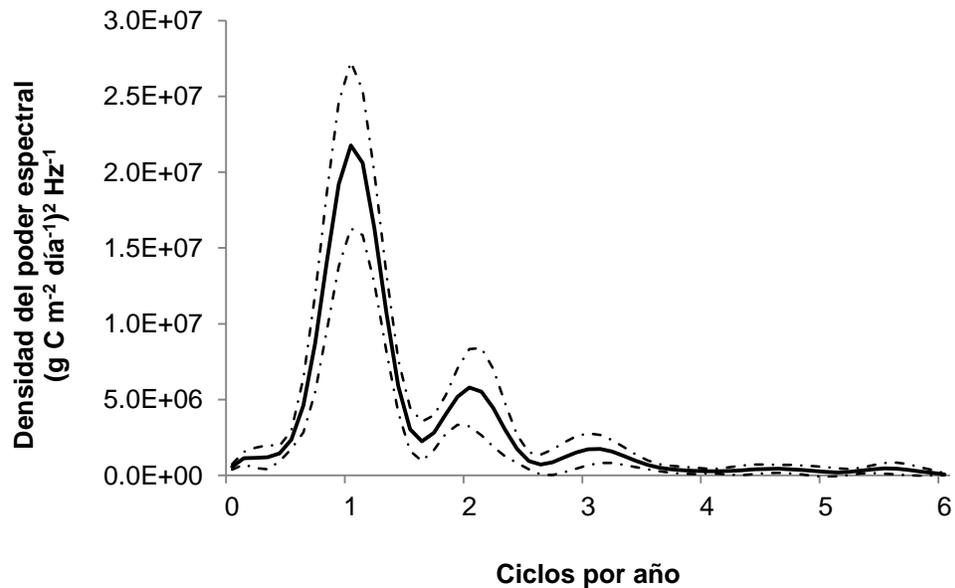


Figura 22. Densidad espectral de PP para el cuadrante NW. La línea continua muestra el valor promedio de la densidad espectral y la línea discontinua los límites de confianza al 95%.

De los cuarenta datos que se eligieron para calcular la producción primaria a partir del modelo de Platt *et al.* (1991), veintiocho de ellos fueron para aguas caso I, de los cuales cinco fueron del cuadrante NW, seis del NE, ocho del SW y nueve del SE (Tabla 17). Los doce datos restantes fueron para aguas caso II, cinco del NW, cuatro del NE, dos del SW y uno del SE (Tabla 18).

Tabla 17. Fechas de los datos de PP_{OSU} , PP_{GGAB} (mes-año), los datos mismos ($g\ C\ m^{-2}\ día^{-1}$), y la razón PP_{OSU}/PP_{GGAB} para aguas caso I.

Cuadrante	Mes	PP_{OSU}	PP_{GGAB}	PP_{OSU}/PP_{GGAB}
NW	may-09	2.01	0.80	2.52
NW	jun-11	1.80	0.55	3.27
NW	jul-02	0.97	0.40	2.43
NW	ago-03	1.05	0.36	2.90
NW	nov-08	1.88	0.35	5.39
NE	ene-07	1.52	0.44	3.45
NE	feb-03	1.50	0.46	3.26
NE	jun-09	1.65	0.51	3.23
NE	ago-09	0.42	0.23	1.83
NE	sep-04	0.54	0.30	1.79
NE	oct-06	1.16	0.38	3.05
SW	may-05	1.34	0.64	2.10
SW	jul-05	0.70	0.37	1.90
SW	ago-06	0.62	0.34	1.82
SW	sep-06	0.61	0.32	1.90
SW	sep-12	0.61	0.32	1.90
SW	nov-04	1.31	0.31	4.24
SW	dic-02	1.29	0.36	3.59
SW	dic-07	1.35	0.39	3.47
SE	ene-03	1.56	0.46	3.39
SE	feb-09	1.85	0.53	3.49
SE	abr-05	1.94	0.74	2.62
SE	abr-06	1.99	0.73	2.73
SE	jun-10	1.48	0.47	3.16
SE	jul-04	0.67	0.35	1.91
SE	ago-04	0.50	0.28	1.78
SE	sep-08	0.48	0.27	1.76
SE	dic-08	1.31	0.37	3.55

Para aguas caso I la razón PP_{OSU}/PP_{GGAB} promedio fue 2.8 ± 0.32 , es decir el valor de PP_{OSU} fue hasta 3 veces mayor que el valor obtenido de PP_{GGAB} . El análisis de regresión fue estadísticamente significativo ($n = 28$, $F = 43.27$, $p = 0.00$) y además, se obtuvo una correlación relativamente elevada ($r = 0.78$) entre los datos de PP_{OSU} y PP_{GGAB} (Figura 23a).

En aguas caso II la razón PP_{OSU}/PP_{PS} promedio fue 0.89 ± 0.09 , es decir el valor de PP_{OSU} fue menor que el valor calculado de PP_{PS} y solamente en dos casos el valor de PP_{OSU} fue mayor. Sin embargo el análisis de regresión no fue estadísticamente significativo ($n = 12$, $F = 4.46$, $p = 0.06$) y se obtuvo una correlación baja ($r = 0.28$) entre los datos de PP_{OSU} y PP_{PS} (Figura 23b).

Tabla 18. Fechas de los datos de PP_{OSU} , PP_{PS} (mes-año), los datos mismos ($g C m^{-2} día^{-1}$), y la razón PP_{OSU}/PP_{PS} para aguas caso II.

Cuadrante	Mes	PP_{OSU}	PP_{PS}	PP_{OSU}/PP_{PS}
NW	ene-09	2.27	1.49	1.52
NW	feb-07	1.99	2.49	0.80
NW	feb-10	2.47	2.05	1.21
NW	abr-05	3.43	2.80	1.23
NW	may-03	2.89	3.07	0.94
NE	ene-10	1.68	2.19	0.77
NE	may-06	2.93	3.91	0.75
NE	may-10	2.69	3.52	0.76
NE	dic-09	1.35	3.25	0.42
SW	abr-09	4.32	4.62	0.93
SW	jun-12	2.79	4.53	0.62
SE	mar-12	2.77	3.70	0.75

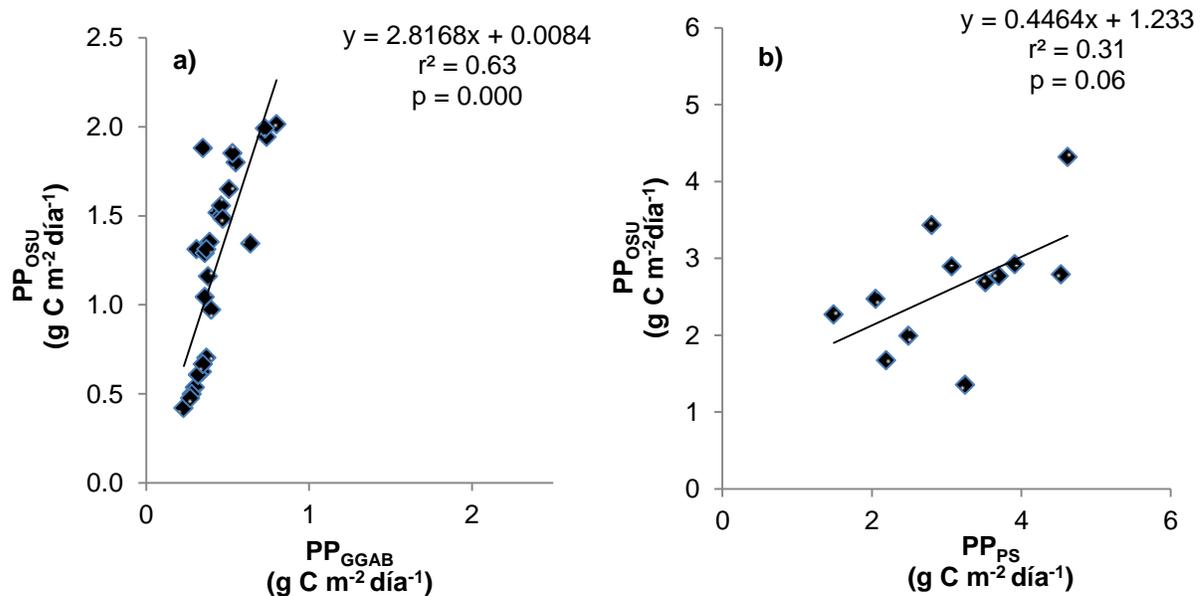


Figura 23. Regresión lineal entre PP_{OSU} y los cálculos con el modelo de Platt et al. (1991) para: a) aguas caso I y b) aguas caso II.

Capítulo 4 - Discusiones

4.1 Biomasa y producción del norte del Golfo de California

El ecosistema pelágico del norte del Golfo de California es un sistema saludable, con condiciones naturales ocasionalmente eutróficas ($\text{Chl}_{\text{sat}} > 1 \text{ mg m}^{-3}$) sobre todo durante la época de “invierno”. En el cuadrante NW que coincide con el Refugio del Hábitat de la Vaquita y se encuentra cerca del Alto Golfo de California, esta situación eutrófica se presenta a lo largo del año, ya que incluso en los meses de “verano” se observaron $\text{Chl}_{\text{sat}} > 1 \text{ mg m}^{-3}$.

La falta de nutrientes que aportaba el agua del Río Colorado posiblemente no ha afecta la productividad fitoplanctónica del norte del Golfo de California. Inclusive, si el Río Colorado fluyera libremente, su influencia se restringiría solamente a unas decenas de kilómetros al suroeste de su desembocadura y no en todo el norte del golfo (Lavín y Sánchez 1999). Se ha reportado que el agua con menor salinidad (32-33) llegaba solamente hasta el sur de San Felipe, en Baja California. Lavín y Sánchez (1999) reportaron que la lengüeta de agua de Río Colorado sólo llegó hasta ~70 km al sur de la boca del río, cuando fluyó hasta el mar en 1993, debido a las precipitaciones altas y deshielos anómalos en la cuenca alta del río. Rodríguez *et al.* (2001) utilizaron un isotopo estable de oxígeno (^{18}O) en conchas de un bivalvo endémico del Alto Golfo (*Mulinia coloradoensis*), para reconstruir la zona de influencia del Río Colorado antes de la construcción de las presas. Esta zona se extendía hasta 65 km al sur de la desembocadura. Además, Nieto-García (1998) comparó la concentración de nutrientes en el Alto Golfo para la primavera de 1993 cuando el río llegó hasta el golfo, con las de la primavera de 1996, cuando no hubo aporte de agua del Río Colorado. Las concentraciones de NO_3 y PO_4 fueron menores cuando el río fluyó y solamente los silicatos fueron más altos. Esto indica que la influencia del aporte del agua del Río Colorado tiene efectos locales en el Alto Golfo. Procesos como la mezcla ocasionada por corrientes de marea y las surgencias costeras son los causantes de que el norte del Golfo de California sea un ecosistema productivo, ya que promueven la fertilización de la zona eufótica y con ello el crecimiento del fitoplancton.

¿Pero, qué se considera como un ecosistema saludable? Rapport *et al.* (1998) propusieron que para que un ecosistema sea considerado como naturalmente sano se deben de cumplir los siguientes puntos: el vigor o la energía de éste, es decir qué tan productivo es el sistema, medido por su actividad metabólica o su productividad primaria; la organización del ecosistema, la cual se calcula por medio de la diversidad biológica y funcional de los organismos que habitan en el mismo, así como las interacciones que existen entre ellos; su resiliencia que se evalúa en términos de cómo el ecosistema es capaz de recuperar su estructura después de estar bajo condiciones de estrés.

En general, el norte del Golfo de California ha sido considerado como una región altamente productiva. Se han reportado valores altos de Chl_{sat} de “invierno” entre 1 mg m^{-3} y $>5 \text{ mg m}^{-3}$ (Santamaría-del-Angel *et al.* (1994b). Estrictamente no es apropiado comparar datos de concentración de clorofila y de PP derivados de satélite con datos de cruceros oceanográficos, porque las escalas temporales y espaciales de los dos tipos de muestreo son muy diferentes. Los datos de cruceros son instantáneos y puntuales y los de satélite son promedios mensuales, en este caso, y cientos de miles de kilómetros cuadrados. Sin embargo, de cualquier forma es interesante hacer las comparaciones. Los valores promedio de “invierno” de concentración de clorofila obtenidos de cruceros oceanográficos también oscilaron entre 1 y $>5 \text{ mg m}^{-3}$, con valores puntuales de hasta 20 mg m^{-3} (Gendrop-Funes *et al.* 1978; Álvarez-Borrego y Gaxiola-Castro 1988; Gaxiola-Castro *et al.* 1995; Valdez-Holguín *et al.* 1995). Los valores promedio de este estudio fueron en “invierno” de Chl_{sat} de 3.54 mg m^{-3} para el período 1978-1986 (CZCS), 1.58 mg m^{-3} para 1997-2010 (SeaWiFS) y 1.82 mg m^{-3} para 2002-2013 (MODIS Aqua), coincidiendo con los datos de los autores mencionados anteriormente.

En general, hay pocos trabajos sobre la producción fitoplanctónica en el norte del Golfo de California, tanto para datos tomados *in situ*, como datos derivados de sensores remotos. Álvarez-Borrego y Lara-Lara (1991) publicaron un resumen de datos de PP obtenidos con incubaciones con ^{14}C , de los cuales algunos son del norte del Golfo de California. Por ejemplo, Zeitzschel (1969) realizó incubaciones para sólo dos estaciones relativamente oceánicas en el norte del golfo, ocupadas en noviembre-diciembre de

1968, y reportó valores de PP de 0.76 y 0.58 g C m⁻² día⁻¹ (una para la región de surgencias costeras entre los cuadrantes NE y SE, y la otra para la parte al norte de las Islas Grandes). El primer valor es similar a los calculados con el modelo PP_{GGAB} (Figura 23a). Gaxiola-Castro y Álvarez-Borrego (1986) reportaron valores entre 0.75 y 2.25 g C m⁻² día⁻¹ para diciembre de 1981 y junio de 1982, también dentro del rango mostrado en la figura 23. Hasta antes de 1991 estos eran los únicos datos obtenidos con ¹⁴C. Valdez-Holguín *et al.* (1995) realizaron incubaciones con ¹⁴C para mayo de 1992 y obtuvieron valores de 0.54, 0.82 g C m⁻² día⁻¹ para sus estaciones oceánicas (cerca del cuadrante SE), 3.55 y 3.85 g C m⁻² día⁻¹ para la costa de Baja California (cerca del cuadrante SW). Hidalgo-González y Álvarez-Borrego (2004) usaron el modelo de Platt *et al.* (1991) para obtener datos de PP para regiones del golfo, a partir de datos de Chl_{sat} derivados del sensor SeaWiFS, y concluyeron que la parte norte del golfo (su región IV de “invierno” y 2 de “verano”), incluyendo la región de las Islas Grandes, fue una de las más productivas con hasta >1.33 g C m⁻² día⁻¹ en promedio para “invierno” y para “verano” 0.43 g C m⁻² día⁻¹. Kahru *et al.* (2004) usaron el modelo VGPM para obtener PP para regiones del golfo, a partir de las medianas de Chl_{sat} derivados de los sensores OCTS y SeaWiFS, y reportaron valores para “invierno” de hasta >5 g C m⁻² día⁻¹, aproximadamente, y valores para “verano” <1 g C m⁻² día⁻¹ (sus regiones 1-3). Comparado con los promedios de todos los cuadrantes para “invierno” y “verano”, los cuales fueron de 2.20 ± 0.05 y 0.85 ± 0.04 g C m⁻² día⁻¹, respectivamente, obtenidos en este estudio con el VGPM. Estos valores son muy similares a los reportados por otros autores mencionados anteriormente.

Como se mencionó anteriormente, el norte del Golfo de California es un ecosistema con una gran diversidad biológica, aquí se encuentra el 47% de la biodiversidad total de todo el golfo (Brusca *et al.* 2004). Asimismo la diversidad funcional también es alta, Morales-Zarate *et al.* (2004) utilizó 29 grupos funcionales en su modelo trófico para esta región, mientras que Díaz-Uribe *et al.* (2012) manejaron un total de 166 grupos funcionales para el norte y centro del golfo para su modelo trófico. Asimismo, estos mismos autores reportan que las interacciones entre los diferentes grupos funcionales es diversa y compleja. En general, esta región produce una biomasa de 6633 toneladas km⁻² año⁻¹ y existe un control de “cintura de avispa”, donde los

niveles tróficos medios controlan a los eslabones bajos y altos (Morales-Zarate *et al.* 2004; Riofrío-Lazo *et al.* 2007).

A pesar de que el norte del Golfo de California ha estado bajo una presión antropogénica constante, ya sea por la alteración del ecosistema como el cambio de la condición natural de estuario del Delta del Río Colorado a una condición de estuario inverso, así como la sobreexplotación de los recursos por parte de las pesquerías, esta región se ha considerado como un sistema maduro y con una resiliencia alta con la capacidad de sostener poblaciones grandes de mamíferos marinos y otros organismos (Álvarez-Borrego, 2003; Morales-Zarate *et al.* 2004; Díaz-Uribe *et al.* 2012). Además, los ejemplares de vaquitas hallados en las redes de pesca se han encontrado bien alimentados sin mostrar signos de inanición, por lo que su muerte fue posiblemente por asfixia a causa de estar atrapados en las redes (Rojas-Bracho, comunicación personal).

Bajo los puntos propuestos por Rapport *et al.* (1998), el norte del Golfo de California es un ecosistema saludable. Los resultados de este trabajo refuerzan el primer punto, al demostrar que el ecosistema pelágico de esta región se ha mantenido productivo (eutrófico) en los últimos treinta y cinco años.

4.2 Variación temporal y climatología

La Chl_{sat} y PP del norte del Golfo de California presentaron variaciones interanuales y estacionales, y en menor medida una variación semianual. La principal fuente de variación interanual en el Golfo de California es debida a la influencia de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) (Baumgartner y Christensen 1985). Por otro lado, la variación temporal corresponde a la estacionalidad que existe en el golfo entre la época de “invierno” y “verano” (mencionada anteriormente). Por otro lado, la variación semianual se puede deber a la secuencia de condiciones de estratificación intensa y de mezcla turbulenta ocasionadas por los procesos de mesoescala que ocurren en esta región, como la circulación ciclónica y anticiclónica estacional reversible (Lavín *et al.* 1997; Palacios-Hernández *et al.* 2002).

Durante el período 1978-1986, se presentó el evento El Niño de 1982-83, el cual fue uno de los más fuertes que se hayan registrado (Álvarez-Borrego 2012). La diferencia entre el “invierno” con el valor más alto de Chl_{sat} (1981-82 con 6.15 mg m^{-3}) y el “invierno” 1983-84 con el valor más bajo (1.94 mg m^{-3}) puede deberse a la presencia del evento ENSO 1982-83 cuyo efecto se extendió hasta 1984 (Santamaría-del-Ángel *et al.* 1994a). Sin embargo, a pesar de este decremento los valores de Chl_{sat} de 1983-84 fueron relativamente altos. Esta disminución no fue lo suficientemente fuerte para causar un colapso de la Chl_{sat} en el norte del Golfo de California. Santamaría-del-Ángel *et al.* (1994a) utilizaron datos del mismo periodo (1978 - 1986) para describir los efectos del evento El Niño 1982-83 sobre la Chl_{sat} del CZCS en el Golfo de California, y observaron un decremento de la concentración de Chl_{sat} durante los “inviernos” de 1982-83 y 1983-1984 con respecto al de 1981-1982. Sin embargo, este fenómeno no tuvo el mismo impacto en todo del golfo. Estos últimos autores reportaron que en las regiones de las Islas Grandes y norte del golfo, las diferencias de Chl_{sat} no fueron significativas entre los años El Niño y los No-El Niño, en comparación, en las estaciones más sureñas sí se observó una diferencia más marcada, sobretodo en la región de la boca. Esta reducción en el efecto del evento El Niño se debe a procesos físicos que ocurren localmente en esta parte del golfo como los procesos de mezcla ocasionados por las corrientes de mareas (Santamaría-del-Ángel *et al.* 1994a).

Para el periodo del SeaWiFS (1997-2010) se presentó el evento ENSO de 1997-98, que también tuvo un gran impacto en los ecosistemas pelágicos del Océano Pacífico Oriental Tropical (incluyendo al Golfo de California) (Álvarez-Borrego 2012), así como otros eventos El Niño/La Niña de menor fuerza (Espinosa-Carreón y Valdez-Holguín 2007; Almazán-Escalante *et al.* 2013). La disminución entre los “inviernos” con las Chl_{sat} más altas (2001-02 con 2.13 mg m^{-3} y 2008-09 con 1.93 mg m^{-3}) con el “invierno con el valor más bajo (1997-98 con 1.07 mg m^{-3}) fue de ~50% y de ~45%, respectivamente. Esto indica un efecto fuerte del evento El Niño 1997-98 en la Chl_{sat} para el norte del golfo. Pérez-Arvizu *et al.* (2013) también observaron anomalías negativas en la biomasa fitoplanctónica durante El Niño 1997-98. Estas anomalías se observaron solamente durante febrero y marzo (“invierno”). A pesar de que la Chl_{sat} más baja se presentó durante el evento fuerte El Niño de 1997-1998, no fue suficiente para causar un colapso de Chl_{sat} en el norte del Golfo de California. Varios autores han

reportado que los efectos del evento El Niño de 1997-98 fueron menos evidentes o casi nulos para la parte norte del Golfo de California y las Islas Grandes (Hidalgo-González y Álvarez-Borrego 2004; Kahru *et al.* 2004; Espinosa-Carreón y Valdez-Holguín 2007).

Durante el periodo del MODIS Aqua (2002-2013) se presentaron varios eventos El Niño/La Niña, pero ninguno de gran impacto como los de 1982-83 y 1997-98 (Almazán-Escalante *et al.* 2013). En general, no hubo diferencias interanuales de TSM, Chl_{sat} y PP entre “inviernos”, que sugieran algún tipo de impacto por la secuencia de eventos ENSO en este período. Sin embargo, como ya se mencionó, los efectos de los eventos ENSO en el norte del Golfo de California no son muy evidentes (Hidalgo-González y Álvarez-Borrego 2004; Kahru *et al.* 2004; Espinosa-Carreón y Valdez-Holguín 2007). No obstante, algunos estudios han reportado una influencia de los eventos El Niño/La Niña en la parte norte del Golfo de California. Herrera-Cervantes *et al.* (2010) reportaron que la influencia del evento 1997-98 no fue homogénea en todo el golfo y que las partes suroriental y noroccidental (donde se encuentra el cuadrante NW) fueron las que presentaron una mayor variabilidad. Los resultados del presente análisis no muestran los efectos de los eventos ENSO de una manera particular en el cuadrante NW.

En general, se esperaría que durante la presencia de un evento El Niño hubiera anomalías negativas de la biomasa fitoplanctónica. Debido a que durante el evento El Niño hay una fuerte intrusión de agua cálida del Pacífico Ecuatorial, lo que contribuye a que haya una fuerte estratificación y un apilamiento de masas de agua hacia la costa por lo que hunde la termoclina, lo que da como resultado que no haya aporte de nutrientes de aguas por debajo de la zona eufótica, limitando el crecimiento del fitoplancton (Espinosa-Carreón y Valdez-Holguín 2007). Sin embargo, la respuesta de las comunidades fitoplanctónicas a estos fenómenos no es clara. Valdéz-Holguín y Lara-Lara (1987) reportaron que en la Cuenca de Guaymas los máximos de clorofila integrada y producción primaria se encontraron en marzo durante la influencia máxima del evento El Niño de 1982-83. Posiblemente existen otros factores que influyen en la variabilidad interanual de Chl_{sat} y PP, como: variaciones en la fuerza y dirección de los vientos (que afectan la intensidad de las surgencias), el intercambio de calor océano-

atmósfera (Santamaría-del-Ángel *et al.* 1994) y la oscilación decadal del Pacífico (NOAA 2012).

Anteriormente no se había descrito una variación semianual de Chl_{sat} y PP para el norte del Golfo de California. Kahru *et al.* (2004) reportaron que Chl_{sat} para todo el Golfo de California responde principalmente a la variación estacional y solamente en la región de las Islas Grandes y un poco al sur hay una variación semianual de la Chl_{sat} . Asimismo, Álvarez-Molina *et al.* (2013) observaron esta misma variación semianual para la región de las Islas Grandes y un poco al sur de la misma. Estos últimos autores atribuyeron los máximos observados en primavera y otoño a que durante esta parte del año la estratificación no es tan fuerte, lo cual permite un flujo de nutrientes a la zona eufótica, promoviendo el crecimiento del fitoplancton. En contraste durante verano la estratificación es muy alta y durante invierno la mezcla turbulenta es tan alta que lleva al fitoplancton por debajo de la zona eufótica limitando su crecimiento. Para el norte del Golfo de California este máximo se observó en octubre y puede deberse a la mezcla turbulenta ocasionada por los procesos de mesoescala que ocurren en esta región cuando la temperatura superficial no es tan elevada como en verano (Figura 9). Lavín *et al.* (1997) reportaron remolinos en el norte del golfo con circulación ciclónica durante “verano” y con circulación anticiclónica durante “invierno”. La circulación ciclónica dura cuatro meses de junio a septiembre, mientras que la circulación anticiclónica dura seis meses de noviembre a abril. El cambio de régimen ciclónico a anticiclónico comienza en octubre y su duración es de tres semanas, aproximadamente (Palacios-Hernández *et al.* 2002; Palacios-Hernández *et al.* 2006). Este cambio de régimen puede ocasionar procesos de mezcla en la columna de agua que rompan la estratificación tan alta que ocurre durante “verano” y así promover la fertilización de la zona eufótica.

La variación estacional muy marcada de TSM en el norte del Golfo de California también se presenta en todo el golfo. Soto-Mardones *et al.* (1999) reportaron que la TSM presenta una variabilidad más amplia en la parte norte del golfo, en comparación con la parte sur, y que el ciclo estacional fue el dominante. Asimismo, estos mismos autores encontraron las temperaturas máximas en agosto y septiembre, las cuales fueron de 30 °C aproximadamente. En cambio, las temperaturas mínimas en enero y febrero fueron alrededor de 16 °C. La climatología del golfo es tal que se enfría en ~4

meses y se calienta en ~ 7 (Soto-Mardones *et al.* 1999). La Chl_{sat} y la PP también tuvieron una variación estacional muy marcada. Esta variabilidad ha sido reportada por otros trabajos para el norte del Golfo de California. Se han reportado los valores más altos de Chl_{sat} y PP para marzo-mayo (“invierno”), mientras que los mínimos para julio-septiembre (“verano”). (Santamaría-del-Ángel *et al.* 1994; Hidalgo-González y Álvarez-Borrego 2004; Kahru *et al.* 2004; Espinosa-Carreón y Valdez-Holguín 2007; Pérez-Arvizu *et al.* 2013). Hidalgo-González y Álvarez-Borrego (2004) reportaron una fuerte variación estacional para la PP en todo el Golfo de California, con valores entre 1.52 y $1.68 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ para “invierno” y entre 0.42 y $0.45 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ para verano, para sus regiones más norteñas. Todos estos autores reportaron que el ciclo estacional es el que causa la mayor parte de la variabilidad de Chl_{sat} y PP en el norte del Golfo de California. Esta misma variación estacional ha sido reportada con muestreos *in situ* en esta región. Gendrop-Funes *et al.* (1978) reportaron concentraciones altas, entre 2.5 y 10 mg m^{-3} , para marzo de 1973. Álvarez-Borrego y Gaxiola-Castro (1988) obtuvieron valores superficiales de Chl de 1.88 y 3.96 mg m^{-3} para el invierno de 1981, y de 0.53 y 1.06 mg m^{-3} para el verano de 1982, para sus estaciones más norteñas.

Esta respuesta de la Chl_{sat} y PP al ciclo estacional está fuertemente influenciada por los eventos de surgencias que ocurren a lo largo de las costas del continente durante “invierno”. Asimismo, la magnitud de estas surgencias está establecida por la intensidad de los vientos, la batimetría, etc. (Álvarez-Borrego y Lara-Lara 1991). Los máximos de biomasa fitoplanctónica ocurren principalmente entre marzo y abril, debido a que durante estos meses la disponibilidad de nutrientes sigue siendo alta, y para mayo comienza una limitación por nutrientes que da como resultado valores menores de Chl y tasas de producción primaria (Zeitzschel 1969).

Los valores mayores de Chl_{sat} del CZCS fueron los más altos de los tres sensores. Por lo tanto, se podría inferir que los valores más altos del período 1978-1986 que los del período 1997-2013 indican una disminución de la biomasa fitoplanctónica entre los mismos, por el deterioro del ecosistema pelágico del norte del golfo debido a la falta del aporte de nutrientes del Río Colorado. Sin embargo, estas diferencias de Chl_{sat} entre sensores se pueden deber a las diferencias en el diseño óptico de cada sensor y no a las condiciones ambientales del norte del Golfo de California. Kahru *et al.*

(2012) reportan diferencias en los valores de diferentes sensores (OCTS, SeaWiFS, MODIS Aqua y MERIS) para la Corriente de California, además de las diferencias ópticas de cada sensor ellos atribuyen esta variación a los algoritmos utilizados para cada sensor en particular. Esto se pudo comprobar con los datos de Chl_{sat} tomados para la Cuenca de Guaymas y para la cual los datos del CZCS también muestran valores más altos que los de los otros dos sensores. Antoine *et al.* (2005) reportaron que los datos de Chl_{sat} global del CZCS (1978-1986) son del orden de 13-15% mayor que los datos tomados *in situ*, mientras que los datos del SeaWiFS sobreestiman Chl_{sat} solamente del orden de 4-5%. En cambio, se ha reportado que para los sensores SeaWiFS y MODIS Aqua existe una alta correlación entre los datos de satélite y datos *in situ*, Kahru *et al.* (2012) obtuvieron una $r^2 = 0.79$ para el SeaWiFS ($n = 1075$) y $r^2 = 0.79$ para el MODIS Aqua ($n = 650$), para la Corriente de California en el período de 1996-2010.

No obstante que los resultados de la variación temporal a largo plazo de la Chl_{sat} y PP no fueron significativos, se observa una influencia de la variación interanual en las series de tiempo. Con relación a los datos de Chl_{sat} de los primeros años de la serie del CZCS se presentó una disminución de los valores debido a la influencia del evento ENSO de 1982-83. Mientras que para los datos de Chl_{sat} del SeaWiFS y MODIS Aqua, y los de PP se observa una tendencia positiva. Gregg *et al.* (2005) reportaron que Chl_{sat} global incrementó un 4%, y hasta >30%, para el Pacífico Oriental (incluido el Golfo de California) durante el periodo de 1998-2002 (SeaWiFS). Usar series de tiempo tan cortas (menores a 10 años) no son lo suficiente como para observar tendencias de largo plazo en Chl_{sat} , debido a que la variación interanual de Chl_{sat} y PP tiene una influencia muy fuerte y se requieren series de tiempo de más de ~20 años para captar tendencias en estas variables (Martinez *et al.* 2009; Henson *et al.* 2010). Los estudios comparativos entre sensores son muy escasos y muestran resultados inconsistentes (Henson *et al.* 2010). Gregg y Conkright (2002) reportaron una disminución de Chl_{sat} a nivel global de hasta más del 6% desde principio de los 1980s, al comparar datos reprocesados del CZCS y SeaWiFS. Asimismo, Gregg *et al.* (2003) observaron esta misma tendencia para la producción primaria global, derivada de datos del CZCS y SeaWiFS. Por otro lado, Antoine *et al.* (2005) reportaron un incremento de Chl_{sat} de hasta un 22% del periodo del CZCS al del SeaWiFS en las regiones intertropicales.

4.3 Variación espacial

A pesar de que no se presentó una variación espacial significativa de TSM en el norte del golfo, la Chl_{sat} y PP presentaron diferencias significativas entre cuadrantes. En general, los valores más altos de estas dos propiedades se observaron para el cuadrante NW, mientras que los valores más bajos se presentaron para el cuadrante SE. Esta diferencia se observa más claramente durante “verano”, donde los valores de Chl_{sat} y PP del cuadrante NW son mucho más altos que los del resto de los cuadrantes. Mientras que estas diferencias son menos evidentes durante “invierno”.

La diferencia de Chl_{sat} entre el cuadrante NW y los otros cuadrantes durante “verano” se podría deber a la mayor cantidad de materia orgánica que se encuentra en la columna de agua, ya sea como detritus o materia orgánica disuelta de color (CDOM por sus siglas en ingles), en el cuadrante NW que en los otros. Estos componentes ópticos del agua absorben principalmente en longitudes de onda corta (azules). Existe un traslapeo en los espectros de absorción de luz del detritus, CDOM y fitoplancton (Figura 24), y los distintos sensores están captando la suma de las señales de estos componentes ópticos del agua.

En el caso de existir una cantidad grande de detritus y CDOM podría interpretarse en las lecturas de radiancias de los sensores como una mayor Chl_{sat} . El Alto Golfo se caracteriza por presentar una concentración alta de materia orgánica (detritus, CDOM), la cual se origina principalmente por la erosión de los sedimentos debido a la naturaleza de estuario inverso de esta región (Álvarez y Jones 2002; Carriquiry *et al.* 2011). La cantidad de materia en suspensión en la columna de agua es controlada por el régimen de mareas y se ha calculado que el flujo máximo de esta materia ocurre durante las mareas vivas en el reflujos y su magnitud fue entre $-21.5 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y $-24.9 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Álvarez y Jones 2004). La concentración mayor de detritus y CDOM en el cuadrante NW podría deberse a la circulación ciclónica que predomina en “verano” en esta región (Lavín *et al.* 1997; Palacios-Hernández *et al.* 2002), y que transporta materiales del Alto Golfo hacia el sur, en el oeste del norte del golfo. Lercari *et al.* (2007) reportaron un campo de advección que en general sigue la circulación del norte del golfo, con un transporte de parcelas de agua del Alto Golfo hacia el sur.

Además, se ha observado que la parte noroeste de la zona de estudio presenta un tiempo de residencia alto de las partículas en suspensión ocasionada por la circulación de esta región (Marinone 2012). Por lo tanto hay una sobreestimación de la Chl_{sat} del cuadrante NW durante “verano”. López-Calderón *et al.* (2008) obtuvieron los valores más altos de Chl_{sat} para el Alto Golfo y la zona costera del norte del Golfo de California pero no describieron las diferencias entre el noroeste y el noreste.

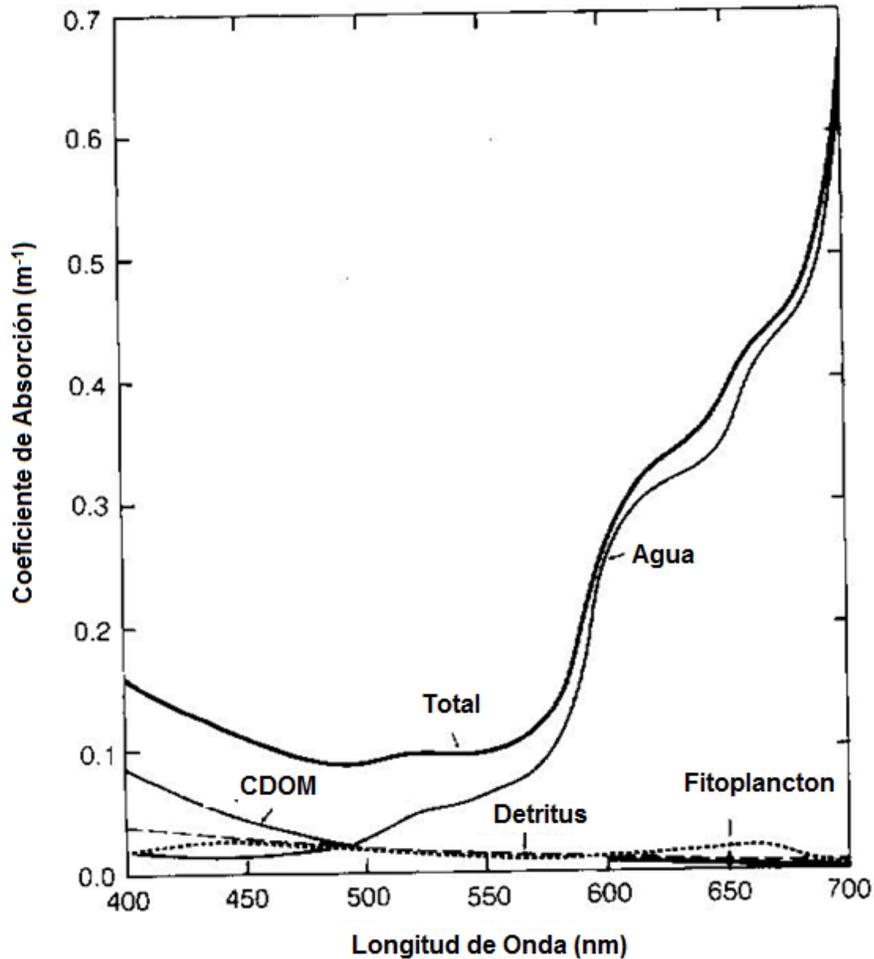


Figura 24. Espectro de absorción total y espectros de absorción de los componentes ópticos del agua: Agua, Detritus, Fitoplancton y CDOM (modificado de Kirk 1994).

Para los cuadrantes NE y SE se observa la influencia de las surgencias que ocurren a lo largo de la costa de Sonora durante “invierno” (Figura 11a). Santamaría-del-Ángel *et al.* (1994) reportaron que las máximas Chl_{sat} se obtuvieron en la parte oriental del norte del golfo, donde ocurren estos eventos de surgencias. Sin embargo, la

Chl_{sat} de “invierno” de los cuadrantes orientales (NE y SE) no mostró diferencias significativas con la de los cuadrantes occidentales (NW y SW). Esto se puede deber a que los patrones de circulación que imperan en esta región llevan parcelas de agua de una costa a otra, fertilizando así la costa occidental del golfo. Además, esta región es la más angosta de todo el golfo, una parcela de agua tardaría ~10 días en llegar de una costa a la otra. López-Calderón *et al.* (2008) reportaron que la Chl_{sat} de ambas costas del norte del Golfo de California presentó valores altos, los cuales fueron muy similares.

Se ha reportado que existe una variación espacial de la TSM en el norte del Golfo de California y que está relacionada a la formación de núcleos cálidos en invierno, asociados con giros anticiclónicos, y núcleos fríos en verano, asociados con giros ciclónicos (Soto-Mardones *et al.* 1999). Sin embargo, la TSM no mostró una variación significativa entre cuadrantes, lo cual se puede deber a que éstos se ubicaron en la periferia de los giros de mesoescala reportados por Lavín *et al.* (1997).

Capítulo 5 - Conclusiones

La TSM, Chl_{sat} del MODIS Aqua y PP no presentaron una variación interanual muy marcada. En cambio, Chl_{sat} del CZCS y del SeaWiFS sí presentó una variabilidad entre años bien definida.

Para los períodos 1978-1986 (CZCS) y 1997-2010 (SeaWiFS) las secuencias de los eventos ENSO tuvieron un efecto negativo en la Chl_{sat} . El evento ENSO 1982-83 se presentó para los datos del CZCS y el de 1997-98 para los del SeaWiFS. Sin embargo, ninguno de los dos eventos causó un colapso total de la Chl_{sat} (Chl_{sat} se mantuvo arriba de 1 mg m^{-3}).

El ciclo estacional fue la señal dominante para TSM, Chl_{sat} y PP. Además se detectó una señal semianual significativa que causó variación en Chl_{sat} y PP. Ésta se presentó como un segundo máximo de Chl_{sat} y PP en octubre, pero de menor intensidad que el máximo de “invierno”.

En general, la primera aproximación a la climatología presentó valores altos de Chl_{sat} y PP en marzo y abril ($2 - 3 \text{ mg m}^{-3}$, $2 - 3 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), y bajas temperaturas en enero y febrero ($16 - 17 \text{ °C}$) durante “invierno”. Durante la época de “verano” se observaron valores mínimos de biomasa y producción fitoplanctónicas ($0.2 - 0.9 \text{ mg m}^{-3}$, $0.5 - 1.1 \text{ g C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) y temperaturas máximas ($30 - 31 \text{ °C}$), ambas en agosto y septiembre. Esta climatología de TSM, Chl_{sat} y PP responde fuertemente a la estacionalidad marcada que ocurre en el norte del Golfo de California.

Los datos de Chl_{sat} obtenidos del CZCS sobreestiman los valores invernales de Chl_{sat} en comparación a los datos del sensor SeaWiFS y los del sensor MODIS Aqua.

Los datos de PP derivados del VGMP para aguas caso I son hasta tres veces más altos que los obtenidos por el modelo de Platt *et al.* (1991) con la modificación propuesta por Giles-Guzmán y Álvarez-Borrego (2000).

La TSM no presentó una variación espacial significativa entre cuadrantes, en cambio para Chl_{sat} de los tres sensores y PP sí se presentaron diferencias significativas

entre los cuadrantes de esta región. Esta variación se observa más claramente durante “verano”. En general, el cuadrante NW presentó los valores de Chl_{sat} y PP más altos, mientras que los valores más bajos se observaron en el cuadrante SE.

El ecosistema pelágico del norte del Golfo de California presentó condiciones eutróficas ($\text{Chl}_{\text{sat}} > 1 \text{ mg m}^{-3}$) durante “invierno” y mesotróficas ($\text{Chl}_{\text{sat}} > 0.2 \text{ mg m}^{-3}$ y $< 1 \text{ mg m}^{-3}$) durante “verano”.

El ecosistema pelágico del norte del Golfo de California se ha mantenido saludable, al no encontrarse tendencias temporales negativas para Chl_{sat} y PP. Por lo tanto este ecosistema se ha mantenido productivo a pesar de la operación de las presas en el Río Colorado que no permiten el aporte continuo de agua dulce y sus nutrientes al norte del golfo.

Lista de referencias

- Álvarez-Borrego, S. (1983). Gulf of California. *In* K. BH, editor. Estuaries and Enclosed Seas Elsevier Amsterdam. 427-449 pp.
- Álvarez-Borrego, S. (2003). Physical and biological linkages between the upper and lower Colorado delta. *In* D. J. Rapport, W. L. Lasley, D. E. Rolston, N. O. Nielsen, C. O. Qualset, y A. B. Damania, editors. Managing for healthy ecosystems. Lewis Publishers London. 1077-1089 pp.
- Álvarez-Borrego, S. (2007). Principios generales del ciclo del carbono en el océano. *In* G. Gaxiola-Castro y H. B, editors. Carbono en ecosistemas acuáticos de México. Instituto Nacional de Ecología México 11-28 pp.
- Álvarez-Borrego, S. (2010). Physical, chemical, and biological oceanography of the Gulf of California. *In* R. C. Brusca, editor. The Gulf of California: biodiversity and conservation. University Arizona Press, Tucson. 24-48 pp.
- Álvarez-Borrego, S. (2012). Phytoplankton biomass and production in the Gulf of California: a review. *Botanica Marina* **55**(2):119-128.
- Álvarez-Borrego, S., B. Flores-Báez, y L. Galindo-Bect. (1975). Hidrología del Alto Golfo de California II. Condiciones durante invierno, primavera y verano. *Ciencias Marinas* **2**(1):21-36.
- Álvarez-Borrego, S. y G. Gaxiola-Castro. (1988). Photosynthetic parameters of northern Gulf of California phytoplankton. *Continental Shelf Research* **8**(1):37-47.
- Álvarez-Borrego, S. y A. D. Giles-Guzmán. (2012). Opal in Gulf of California sediments as a tool to estimate the vertical component of water exchange between the Gulf and the Pacific Ocean. *Botanica Marina* **55**(2):161-168.
- Álvarez-Borrego, S. y J. R. Lara-Lara. (1991). The physical environment and primary productivity of the Gulf of California. *In* J. P. Dauphin y B. Simoneit, editors. The gulf and peninsular province of the Californias. American Association of Petroleum Geologists, Tulsa. 555-567 pp.
- Álvarez-Borrego, S., J. A. Rivera, G. Gaxiola-Castro, M. d. J. Acosta-Ruíz, y R. A. Schwartzlose. (1978). Nutrientes en el Golfo de California. *Ciencias Marinas* **5**(2):53-71.
- Álvarez-Molina, L. L., S. Álvarez-Borrego, J. R. Lara-Lara, y S. Marinone-Moschetto. (2013). Annual and semiannual variations of phytoplankton biomass and production in the central Gulf of California estimated from satellite data. *Ciencias Marinas* **39**(2):217-230.
- Álvarez, L. y S. Jones. (2002). Factors influencing suspended sediment flux in the Upper Gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **54**(4):747-759.

- Álvarez, L. G. y S. E. Jones. (2004). Short-term observations of suspended particulate matter in a macro-tidal inverse estuary: The Upper Gulf of California. *Journal of Coastal Research* **20**(3):645-654.
- Antoine, D., A. Morel, H. R. Gordon, V. F. Banzon, y R. H. Evans. (2005). Bridging ocean color observations of the 1980s and 2000s in search of long-term trends. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)* **110**(C6009):1-24.
- Argote, M. L., A. Amador, M. Lavín, y J. R. Hunter. (1995). Tidal dissipation and stratification in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)* **100**(C8):16103-16118.
- Badan-Dangon, A., D. C.E., M. M.A, y W. C.D. (1991). The lower atmosphere over the Gulf of California *Journal of geophysical research* **96**(C9):16,877-816,896.
- Barocio-León, O., R. Millán-Núñez, E. Santamaría-del-Ángel, y A. González-Silvera. (2007). Productividad primaria del fitoplancton en la zona eufótica del Sistema de la Corriente de California estimada mediante imágenes del CZCS *Phytoplankton primary productivity in the euphotic zone of the California Current System estimated from CZCS imagery. Ciencias Marinas* **33**(1):59-72.
- Baumgartner, T. R. y N. Christensen. (1985). Coupling of the Gulf of California to large-scale interannual climatic variability. *Journal of Marine Research* **43**(4):825-848.
- Behrenfeld, M. J. y P. G. Falkowski. (1997). Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnology and oceanography* **42**(1):1-20.
- Beier, E. (1997). A numerical investigation of the annual variability in the Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography* **27**(5):615-632.
- Beier, E. y P. Ripa. (1999). Seasonal gyres in the northern Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography* **29**(2):305-311.
- Bray, N. (1988). Thermohaline circulation in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)* **93**(C5):4993-5020.
- Brusca, R. y M. Hendrickx. (2010). Invertebrate biodiversity and conservation in the Gulf of California. *In* R. Brusca, editor. *The Gulf of California Biodiversity and Conservation*. The University of Arizona Press Tucson, Az. 72-95 pp.
- Brusca, R. C., L. T. Findley, P. A. Hastings, M. E. Hendrickx, J. T. Cosio, y A. M. Van der Heiden. (2005). Macrofaunal diversity in the Gulf of California. *In* J. L. E. Cartron, G. Ceballos, y R. Felger, editors. *Biodiversity, ecosystems, and conservation in Northern Mexico*. Oxford University Press, New York. 179-203 pp.
- Carr, M.-E., M. A. Friedrichs, M. Schmeltz, M. Noguchi Aita, D. Antoine, K. R. Arrigo, I. Asanuma, O. Aumont, R. Barber, y M. Behrenfeld. (2006). A comparison of global estimates of marine primary production from ocean color. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* **53**(5):741-770.

- Carriquiry, J. D., J. A. Villaescusa, V. Camacho-Ibar, L. W. Daesslé, y P. G. Castro-Castro. (2011). The effects of damming on the materials flux in the Colorado River delta. *Environmental Earth Sciences* **62**(7):1407-1418.
- Carvajal, M., A. Robles, y E. Ezcurra. (2010). Ecological conservation in the Gulf of California. *In* R. C. Brusca, editor. *The Gulf of California Biodiversity and Conservation* The University of Arizona Press Tucson, Az. 219-250 pp.
- Cervantes-Duarte, R., J. Mueller, C. Trees, H. Maske, S. Álvarez-Borrego, y R. Lara-Lara. (2000). Euphotic depth, irradiance attenuation and remote sensing K490 in bio-optical provinces of the Gulf of California. *Ciencias Marinas* **26**(4):533-560.
- Cisneros-Mata, M. (2010). The importance of fisheries in the Gulf of California and ecosystem-based sustainable co-management for conservation. *In* R. C. Brusca, editor. *The Gulf of California. Biodiversity and Conservation*. University Arizona Press, Tucson. 119-134 pp.
- D'agrosa, C., C. E. Lennert-Cody, y O. Vidal. (2000). Vaquita bycatch in Mexico's artisanal gillnet fisheries: driving a small population to extinction. *Conservation Biology* **14**(4):1110-1119.
- Díaz-Uribe, J. G., F. Arreguín-Sánchez, D. Lercari-Bernier, V. H. Cruz-Escalona, M. J. Zetina-Rejón, P. del-Monte-Luna, y S. Martínez-Aguilar. (2012). An integrated ecosystem trophic model for the North and Central Gulf of California: An alternative view for endemic species conservation. *Ecological Modelling* **230**(1):73-91.
- Douglas, M. W., R. A. Maddox, K. Howard, y S. Reyes. (1993). The mexican monsoon. *Journal of Climate* **6**(8):1665-1677.
- Emilsson, I. y M. Alatorre. (1997). Evidencias de un remolino ciclónico de mesoescala en la parte sur del Golfo de California. *Contribuciones a la oceanografía física en México. Unión Geofísica Mexicana. Monografía* **3**(1):173-182.
- Escalante-Almazán, F. I., J. E. Valdez-Holguín, S. Álvarez-Borrego, y J. R. Lara-Lara. (2013). Temporal and spatial variation of sea surface temperature, chlorophyll a, and primary productivity in the Gulf of California. *Ciencias Marinas* **39**(2):203-215.
- Espinosa-Carreón, T. L. y J. E. Valdez-Holguín. (2007). Variabilidad interanual de clorofila en el Golfo de California Gulf of California interannual chlorophyll variability. *Ecología Aplicada* **6**(1-2):83-92.
- Espinosa-Carreón, T. L., P. T. Strub, E. Beier, F. Ocampo-Torres, y G. Gaxiola-Castro. (2004). Seasonal and interannual variability of satellite-derived chlorophyll pigment, surface height, and temperature off Baja California. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012) **109**(C3039):1-20.
- Field, C. B., M. J. Behrenfeld, J. T. Randerson, y P. Falkowski. (1998). Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science* **281**(5374):237-240.

- Filloux, J. (1973). Tidal patterns and energy balance in the Gulf of California. *Nature* **243**(1):217-221.
- Galindo-Bect, M. S., E. P. Glenn, H. M. Page, K. Fitzsimmons, L. A. Galindo-Bect, J. M. Hernández-Ayon, R. L. Petty, J. Garcia-Hernández, y D. Moore. (2000). Penaeid shrimp landings in the upper Gulf of California in relation to Colorado River freshwater discharge. *Fishery Bulletin* **98**(1):222-225.
- Galindo-Bect, M. S., A. S. Ríos, J. M. H. Ayón, M. A. Huerta-Díaz, y F. Delgadillo-Hinojosa. (2013). The use of urban wastewater for the Colorado River delta restoration. *Procedia Environmental Sciences* **18**(1):829-835.
- Gaxiola-Castro, G. y S. Álvarez-Borrego. (1986). Productividad primaria del Pacífico mexicano. *Ciencias Marinas* **12**(3):26-33.
- Gaxiola-Castro, G., J. Cepeda-Morales, S. Nájera-Martínez, T. Espinosa-Carreón, M. De la Cruz-Orozco, R. Sosa-Avalos, E. Aguirre-Hernández, y J. Cantú-Ontiveros. (2010). Biomasa y producción del fitoplancton. In G. Gaxiola Castro y R. Durazo, editors. *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California 1997-2007*. SEMARNAT, México. 59-85 pp.
- Gaxiola-Castro, G., R. Durazo, B. Lavaniegos, M. De La Cruz-Orozco, E. Millán-Núñez, L. Soto-Mardones, y J. Cepeda-Morales. (2008). Respuesta del ecosistema pelágico a la variabilidad interanual del océano frente a Baja California. *Ciencias Marinas* **34**(2):263–270.
- Gaxiola-Castro, G., J. Garcia-Cordova, J. Eduardo Valdez-Holguin, y M. Botello-Ruvalcaba. (1995). Spatial distribution of chlorophyll α and primary productivity in relation to winter physical structure in the Gulf of California. *Continental Shelf Research* **15**(9):1043-1059.
- Gendrop-Funes, V., M. Acosta-Ruiz, y R. A. Schwartzlose. (1978). Distribución horizontal de "Clorofila" a durante la Primavera en la Parte Norte del Golfo de California. *Ciencias Marinas* **5**(1):71-89.
- Gerrodette, T., L. A. Fleischer, H. Perez-Cortes, y B. Villa-Ramírez. (1995). Distribution of the vaquita, *Phocoena sinus*, based on sightings from systematic surveys. Report of the International Whaling Commission (Special Issue) **16**(1):273-281.
- Gerrodette, T., B. L. Taylor, R. Swift, S. Rankin, A. M. Jaramillo-Legorreta, y L. Rojas-Bracho. (2011). A combined visual and acoustic estimate of 2008 abundance, and change in abundance since 1997, for the vaquita, *Phocoena sinus*. *Marine Mammal Science* **27**(2):E79-E100.
- Gilbert, J. y W. Allen. (1943). The phytoplankton of the Gulf of California obtained by the EW Scripps in 1939 and 1940. *J. mar. Res* **5**(2):89-110.
- Giles-Guzmán, A. D. y S. Álvarez-Borrego. (2000). Vertical attenuation coefficient of photosynthetically active radiation as a function of chlorophyll concentration and depth in case 1 waters. *Applied Optics* **39**(9):1351-1358.

- Gordon, H. R., D. K. Clark, J. W. Brown, O. B. Brown, R. H. Evans, y 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.
- Gregg, W. W., N. W. Casey, y C. R. McClain. (2005). Recent trends in global ocean chlorophyll. *Geophysical Research Letters* **32**(L03606):1-5.
- Gregg, W. W. y M. E. Conkright. (2002). Decadal changes in global ocean chlorophyll. *Geophysical Research Letters* **29**(15):20-21-20-24.
- Gregg, W. W., M. E. Conkright, P. Ginoux, J. E. O'Reilly, y N. W. Casey. (2003). Ocean primary production and climate: Global decadal changes. *Geophysical Research Letters* **30**(15):3-1 3-4.
- Henson, S. A., J. L. Sarmiento, J. P. Dunne, L. Bopp, I. D. Lima, S. C. Doney, J. John, y C. Beaulieu. (2010). Detection of anthropogenic climate change in satellite records of ocean chlorophyll and productivity. *Biogeosciences* **7**(1):621-640.
- Hernández-Ayón, J. M. n., M. S. Galindo-Bect, B. P. Flores-Báez, y S. Álvarez-Borrego. (1993). Nutrient concentrations are high in the turbid waters of the Colorado River Delta. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **37**(6):593-602.
- Herrera-Cervantes, H., S. Lluch-Cota, D. Lluch-Cota, S. Gutierrez-de-Velasco, y D. Lluch-Belda. (2010). ENSO influence on satellite-derived chlorophyll trends in the Gulf of California. *Atmósfera* **23**(3):253-262.
- Hidalgo-González, R. M. y S. Álvarez-Borrego. (2001). Chlorophyll profiles and the water column structure in the Gulf of California. *Oceanologica acta* **24**(1):19-28.
- Hidalgo-González, R. M. y S. Álvarez-Borrego. (2004). Total and new production in the Gulf of California estimated from ocean color data from the satellite sensor SeaWiFS. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* **51**(6):739-752.
- IUCN. 1978. Red Data Book. International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, Morges, Switzerland. Recuperado en: <http://www.iucnredlist.org/amazing-species>.
- IUCN. 2006. Red Data Book. International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, Morges, Switzerland. Recuperado en: <http://www.iucnredlist.org/amazing-species>.
- Jaramillo-Legorreta, A. M., L. Rojas-Bracho, y T. Gerrodette. (1999). A new abundance estimate for vaquitas: first step for recovery *Marine Mammal Science* **15**(4):957-973.
- Kahru, M., R. Kudela, M. Manzano-Sarabia, y B. G. Mitchell. (2009). Trends in primary production in the California Current detected with satellite data. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012) **114**(C02004):1-7.

- Kahru, M., R. M. Kudela, M. Manzano-Sarabia, y B. Greg Mitchell. (2012). Trends in the surface chlorophyll of the California Current: Merging data from multiple ocean color satellites. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* **77**(1):89-98.
- Kahru, M., S. Marinone, S. Lluch-Cota, A. Parés-Sierra, y B. Greg Mitchell. (2004). Ocean-color variability in the Gulf of California: scales from days to ENSO. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* **51**(1):139-146.
- Kirk, J. T. O. (1994). *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. Cambridge university press. 491 pp.
- Lavín, M., R. Durazo, E. Palacios, M. Argote, y L. Carrillo. (1997). Lagrangian observations of the circulation in the northern Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography* **27**(10):2298-2305.
- Lavín, M., V. Godínez, y L. Álvarez. (1998). Inverse-estuarine features of the Upper Gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **47**(6):769-795.
- Lavín, M. y S. Marinone. (2003). An overview of the physical oceanography of the Gulf of California. *Nonlinear processes in geophysical fluid dynamics*. Springer 173-204
- Lavín, M. y S. Organista. (1988). Surface heat flux in the northern Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)* **93**(C11):14033-14038.
- Lavín, M. y S. Sánchez. (1999). On how the Colorado River affected the hydrography of the Upper Gulf of California. *Continental Shelf Research* **19**(12):1545-1560.
- Lercari, D., F. Arreguín-Sánchez, y W. Le Quesne. (2007). An ecosystem simulation model of the northern Gulf of California. *INCOFISH ecosystem models: transiting from Ecopath to Ecospace*. *Fisheries Centre Research Reports* **15**(6):100-113.
- Lluch-Cota, S.-E. (2000). Coastal upwelling in the eastern Gulf of California. *Oceanologica acta* **23**(6):731-740.
- Lluch-Cota, S. E., E. A. Aragon-Noriega, F. Arreguín-Sánchez, D. Aurióles-Gamboa, J. Jesús Bautista-Romero, R. C. Brusca, R. Cervantes-Duarte, R. Cortés-Altamirano, P. Del-Monte-Luna, y A. Esquivel-Herrera. (2007). The Gulf of California: Review of ecosystem status and sustainability challenges. *Progress in Oceanography* **73**(1):1-26.
- Marinone, S. (2003). A three-dimensional model of the mean and seasonal circulation of the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)* **108**(C10):23-21-23-27.
- Marinone, S. (2012). Seasonal surface connectivity in the Gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **100**(1):133-141.

- Martinez, E., D. Antoine, F. D'Ortenzio, y B. Gentili. (2009). Climate-driven basin-scale decadal oscillations of oceanic phytoplankton. *Science* **326**(5957):1253-1256.
- Morales-Zárate, M., F. Arreguin-Sánchez, J. López-Martínez, y S. E. Lluch-Cota. (2004). Ecosystem trophic structure and energy flux in the Northern Gulf of California, México. *Ecological Modelling* **174**(4):331-345.
- Morel, A. y J.-F. Berthon. (1989). Surface pigments, algal biomass profiles, and potential production of the euphotic layer: Relationships reinvestigated in view of remote-sensing applications. *Limnol. Oceanogr* **34**(8):1545-1562.
- Morel, A. y L. Prieur. (1977). Analysis of variations in ocean color. *Limnol. Oceanogr.* **22**(4):709-722.
- Navarro-Olache, L. F., M. Lavín, L. G. Álvarez-Sánchez, y A. Zirino. (2004). Internal structure of SST features in the central Gulf of California. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* **51**(6):673-687.
- Nieto-García, E. (1998). Nutrientes en el norte del golfo de California durante condiciones estuarinas y antiestuarinas. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- NOAA. 2012. Índice de la Oscilación Decadal del Pacífico. Recuperado en: <http://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/pdo.php>.
- Palacios-Hernández, E., E. Beier, M. Lavín, y P. Ripa. (2002). The effect of the seasonal variation of stratification on the circulation of the northern Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography* **32**(3):705-728.
- Palacios-Hernández, E., L. Carrillo, M. Lavín, L. Zamudio, y A. García-Sandoval. (2006). Hydrography and circulation in the Northern Gulf of California during winter of 1994–1995. *Continental Shelf Research* **26**(1):82-103.
- Pegau, W. S., E. Boss, y A. Martínez. (2002). Ocean color observations of eddies during the summer in the Gulf of California. *Geophysical Research Letters* **29**(9):6-1-6-3.
- Pérez-Arvizu, E. M., E. A. Aragón-Noriega, y T. L. Espinosa-Carreón. (2013). Variabilidad estacional de la clorofila a y su respuesta a condiciones El Niño y La Niña en el Norte del Golfo de California. *Rev. biol. mar. oceanogr* **48**(1):131-141.
- Platt, T., C. Caverhill, y S. Sathyendranath. (1991). Basin-scale estimates of oceanic primary production by remote sensing: The North Atlantic. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012) **96**(C8):15147-15159.
- Platt, T., S. Sathyendranath, C. M. Caverhill, y M. R. Lewis. (1988). Ocean primary production and available light: further algorithms for remote sensing. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers* **35**(6):855-879.
- Post, W. M., T.-H. Peng, W. R. Emanuel, A. W. King, V. H. Dale, y D. L. DeAngelis. (1990). The global carbon cycle. *American scientist* **78**(4):310-326.

- Rapport, D. J., R. Costanza, y A. J. McMichael. (1998). Assessing ecosystem health. *Trends in Ecology & Evolution* **13**(10):397-402.
- Riofrío-Lazo, M., F. Arreguín-Sánchez, M. Zetina-Rejón, y F. Escobar-Toledo. (2012). The Ecological Role of the Vaquita, *Phocoena sinus*, in the Ecosystem of the Northern Gulf of California. *Ecosystems*:1-18.
- Roden, G. I. (1964). Oceanographic aspects of Gulf of California. *In* V. A. T. H. y S. J. G. G., editors. *Marine Geology of the Gulf of California: A Symposium*. Mem. Am. Assoc. Pet. Geol., 3 30-58 pp.
- Rodriguez, C. A., K. W. Flessa, M. A. Téllez-Duarte, D. L. Dettman, y G. A. Ávila-Serrano. (2001). Macrofaunal and isotopic estimates of the former extent of the Colorado River estuary, Upper Gulf of California, México. *Journal of Arid Environments* **49**(1):183-193.
- Rojas-Bracho, L., R. R. Reeves, y A. Jaramillo-Legorreta. (2006). Conservation of the vaquita *Phocoena sinus*. *Mammal Review* **36**(3):179-216.
- Rojas-Bracho, L. y B. L. Taylor. (1999). Risk factors affecting the vaquita (*Phocoena sinus*). *Marine Mammal Science* **15**(4):974-989.
- Round, F. (1967). The phytoplankton of the Gulf of California. Part I. Its composition, distribution and contribution to the sediments. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **1**(1):76-97.
- Santamaría-del-Angel, E., S. Álvarez-Borrego, R. Millán-Nuñez, y F. Müller-Karger. (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-Angel, E., S. Álvarez-Borrego, y F. Müller-Karger. (1994a). The 1982-1984 El Niño in the Gulf of California as seen in coastal zone color scanner imagery: Ocean color from space: a coastal zone color scanner retrospective. *Journal of geophysical research* **99**(C4):7423-7431.
- Santamaría-del-Angel, E., S. Álvarez-Borrego, y F. E. Müller-Karger. (1994b). Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012) **99**(C4):7411-7421.
- SERMANAT. 2008. Programa de Acción para la Conservación de la Especie: Vaquita (*Phocoena sinus*). Estrategia integral para el manejo sustentable de los recursos marinos y costeros en el Alto Golfo de California. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 73 pp.
- Soto-Mardones, L., S. Marinone, y A. Parés-Sierra. (1999). Variabilidad espaciotemporal de la temperatura superficial del mar en el Golfo de California. *Ciencias Marinas* **25**(1):1-30.

- Stock, G. G. (1976). Modeling of tides and tidal dissipation in the Gulf of California. PhD Thesis University of California, San Diego, La Jolla, California
- Valdez-Holguín, J., S. Álvarez-Borrego, y C. C. Trees. (1999). Caracterización estacional y espacial de los parámetros fotosintéticos del fitoplancton del Golfo de California. *Ciencias Marinas* **25**(4):445-467.
- Valdez-Holguín, J. E., G. Gaxiola-Castro, y R. Cervantes-Duarte. (1995). Primary productivity in the Gulf of California, calculated from the relationship between superficial irradiance and chlorophyll in the euphotic zone. *Ciencias Marinas* **21**(3):311-329.
- Valdéz-Holguín, J. E. y J. R. Lara-Lara. (1987). Primary Productivity In The Gulf Of California Effects Of El Niño 1982-1983 Event. *Ciencias Marinas* **13**(2):34-50.
- Zeitzschel, B. (1969). Primary productivity in the Gulf of California. *Marine Biology* **3**(3):201-207.
- Zuria-Jordan, I., S. Álvarez-Borrego, E. Santamaría-del-Angel, y F. Müller-Karger. (1995). Satellite-derived estimates of phytoplankton biomass off southern Baja California. *Ciencias Marinas* **21**(3):265-280.

Anexo 1 - Obtención y procesamiento de datos de imágenes de satélite de la página web Ocean Color de la NASA

1. Sitio web y programación de la plataforma Ocean Color.

Entrar al sitio web del Ocean Color de la NASA: (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>).

La programación utilizada por esta plataforma es el Sea WiFS Data Analysis System (SeaDAS 7.0.2). Para descargar el Software hay que dirigirse a la parte superior derecha de la pantalla donde dice **Support Services** y dar clic en la pestaña donde dice **SeaDAS** (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/seadas/>).

Dependiendo del sistema operativo del ordenador y la resolución de la pantalla, descargar el instalador del software y proseguir con la instalación.

SeaDAS Visualization Installers

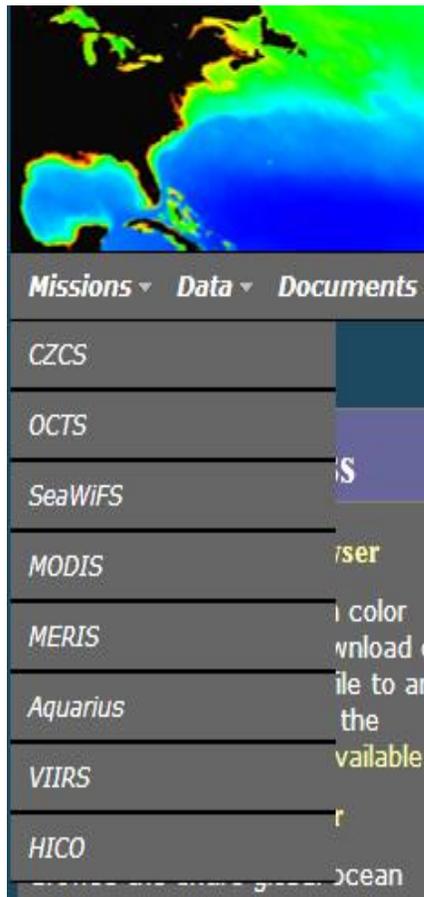
Filename	Version	Size
seadas_7.0.2_win32_installer.exe	7.0.2	150.31 MB
seadas_7.0.2_win64_installer.exe	7.0.2	152.04 MB
seadas_7.0.2_macos_installer.dmg	7.0.2	123.91 MB
seadas_7.0.2_linux32_installer.sh	7.0.2	123.26 MB
seadas_7.0.2_linux64_installer.sh	7.0.2	123.26 MB

Nota: Se recomienda utilizar los navegadores Google Chrome o Mozilla Firefox. Algunos navegadores como “Internet Explorer” no funcionan apropiadamente.

2. Productos y sensores disponibles

Antes de comenzar a utilizar el programa SeaDAS se describirán brevemente los distintos sensores, productos y niveles de procesamiento que maneja la plataforma del Ocean Color.

Para saber cuáles son los distintos sensores, en la página original del Ocean Color (primera lámina), dar clic en la pestaña que dice “**Missions**” en la esquina izquierda del menú superior de la página de inicio. A continuación se despliega una lista de sensores. Para tener mayor información de cada sensor dar clic en cada uno en particular. La información que se maneja es el objetivo de la misión, el tiempo que estuvo en funcionamiento y los diferentes productos que maneja cada sensor.

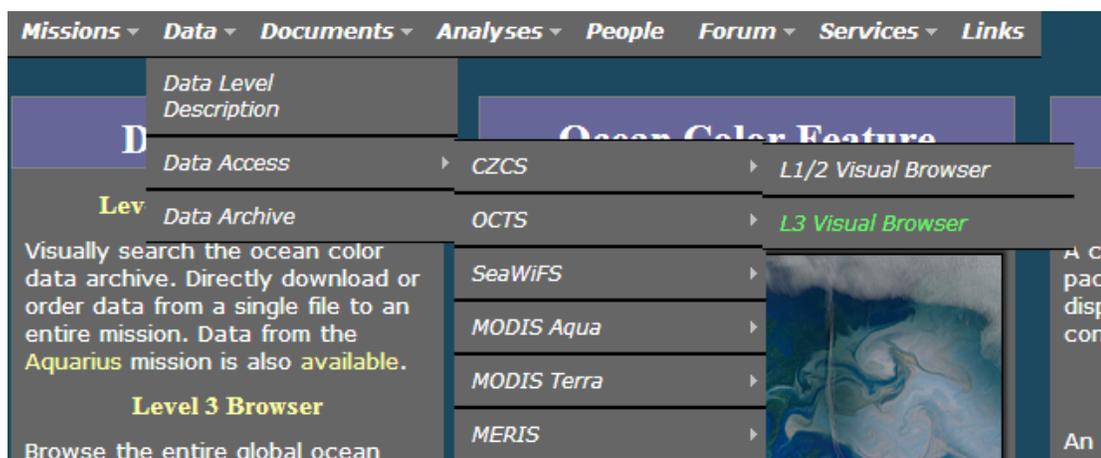


Cada sensor tiene productos estándares diferentes, los cuales están disponibles para los usuarios. Entre estos productos se encuentran: concentración de clorofila (Chl_{sat}), temperatura superficial del mar (SST_{sat}), radiación fotosintéticamente activa (PAR_{sat}), coeficiente de atenuación de luz difusa a 490 nanómetros (K_{d490}), entre otros.

Cada uno de estos productos estándares tiene niveles de procesamiento diferentes, los cuales dependen de qué tantas correcciones tengan. Estos niveles son L1, L2, y L3. Se sugiere que se utilicen los productos con procesamiento nivel L3, los cuales tienen información en bytes-formato valor, posición geográfica y filtros para remover la información no útil.

3. Descarga de los productos

Para descargar los distintos productos, en la misma primera lámina poner el cursor en la pestaña donde dice “**Data**”, en la esquina superior izquierda del menú principal. Se desplegará un menú secundario donde se debe seleccionar “**Data Access**”, con lo que se desplegará otro menú con los nombres de los diferentes sensores. Elegir con el cursor el sensor que se utilizará y seleccionar el nivel de procesamiento con un “clic”. En el caso de que la pestaña “**Data**” no funcione, en el menú de la izquierda de la página inicial escoger “**Level 3 Browser**” el cual despliega una página con imágenes globales de uno de los productos (generalmente Chl_{sat}). En la parte superior de esta página se puede escoger el sensor y las escalas de tiempo y espacio.

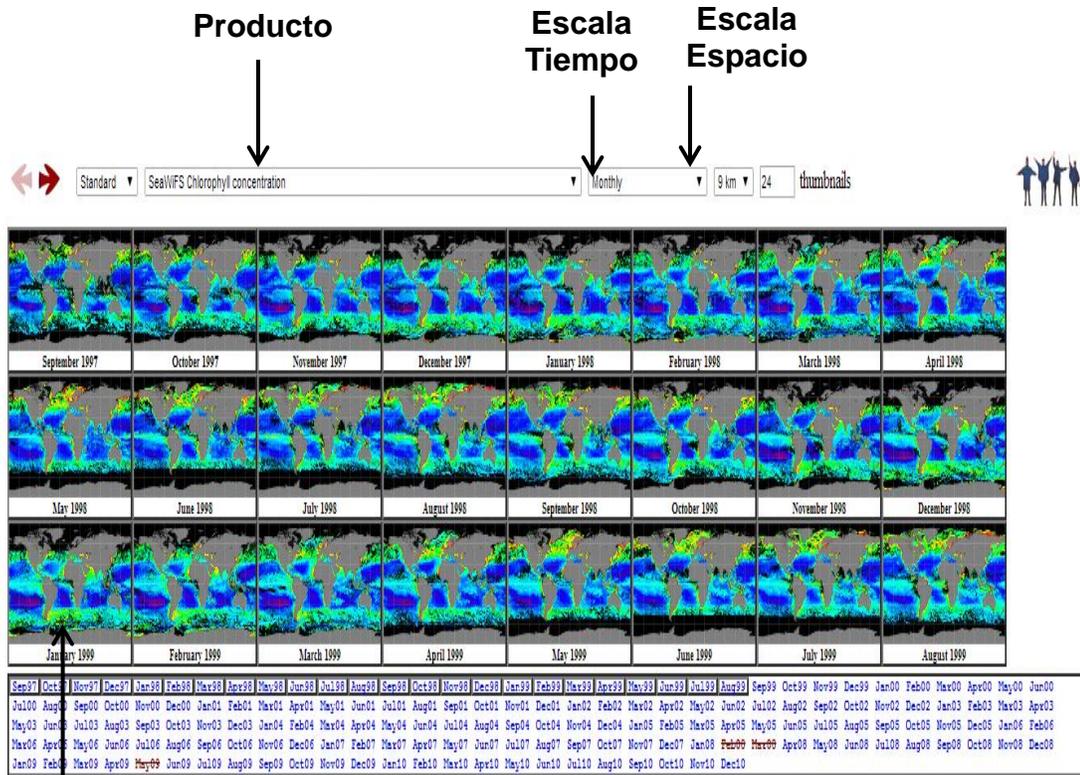


Ya que se seleccionó el sensor y nivel de procesamiento, hay que elegir el producto, las escalas de tiempo y espacio con las cuales se trabajará. Estas pueden ser: diaria, semanal, mensual etc., para la temporal, y 4 km y 9 km para la espacial. Ya que se seleccionó el producto y las escalas temporal y espacial, se eligen las imágenes una a una (de acuerdo con la fecha deseada) con las cuales se trabajará. Para descargar una imagen se debe poner el cursor en la esquina inferior izquierda de la misma, aparecerá un recuadro pequeño que dice **SMI**, dar clic y te pedirá decidir cómo y dónde guardarla. Se sugiere usar “save as” para hacerlo en una carpeta para estas imágenes. Guardar las imágenes de un mismo sensor y año en una misma carpeta, para que a la hora de seleccionarlas sea más fácil ubicarlas.

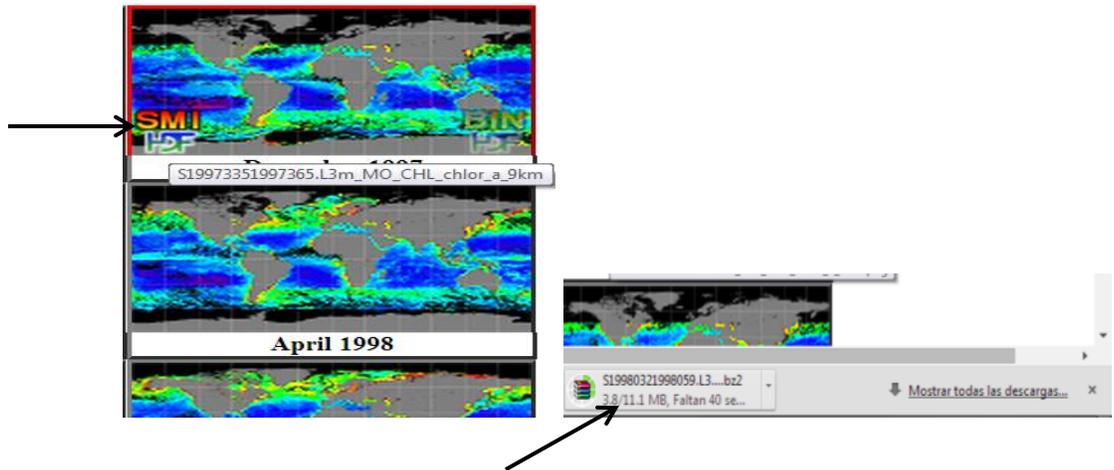
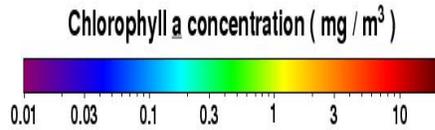
“Nota: Al momento de descargarlas, las imágenes se encuentran comprimidas en formato .zip, por lo que se recomienda tener un software para descomprimir archivos.”

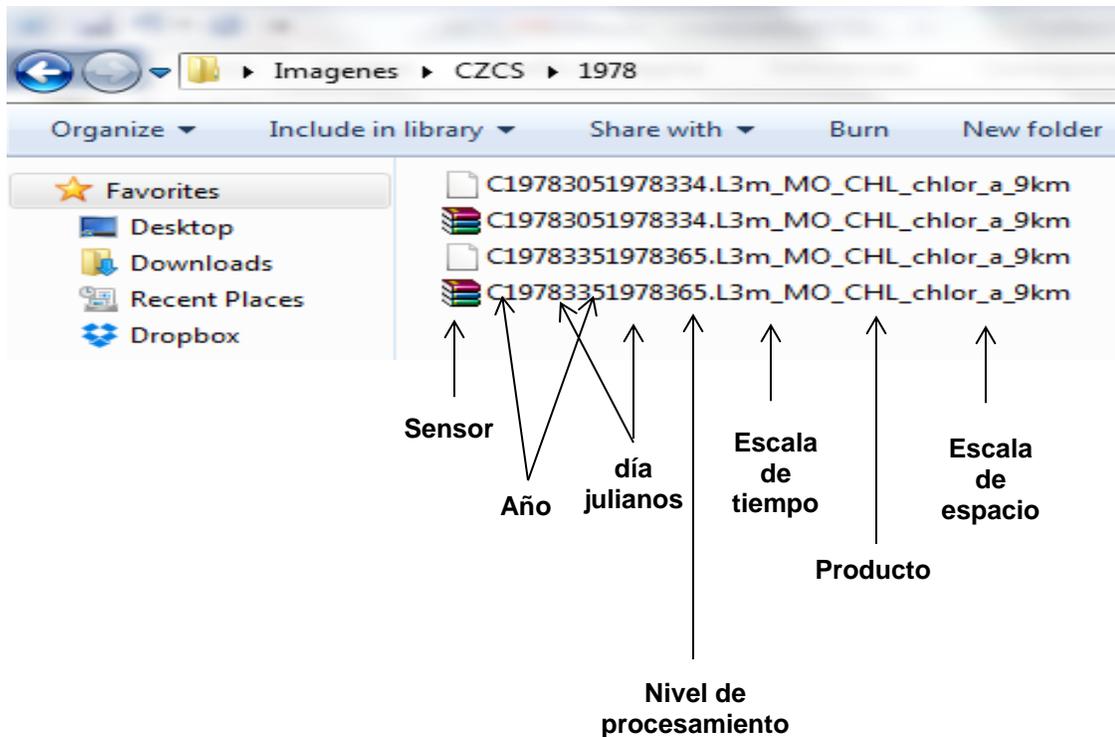
Se sugiere descargar primero todas las imágenes que se van a utilizar y después hacer la descompresión. Para obtener el descompresor, poner WinRAR en un buscador y descargarlo. Cuando se va a descargar, da la opción de abrir (run) el instalador directamente, o guardar (save), se escoge “abrir” y se instala. Para descomprimir las imágenes se seleccionan y se da clic derecho y se selecciona “extraer aquí” lo cual las descomprime. El nombre del archivo comprimido tiene la terminación .bz2 que no aparece en el descomprimido. Una vez descomprimidas las imágenes se encuentran en formato .hdf (Hierarchical Data Format).

El nombre de cada archivo contiene información sobre el sensor, año, mes (en días Julianos), producto y las escalas de tiempo y espacio que se seleccionaron para trabajar. La letra C indica CZCS, S es SeaWIFS, A es MODIS Aqua, T es MODIS Terra, etc., luego sigue el año y el primer día Juliano del periodo de la composición y el año y el último día Juliano de la composición, luego la escala de la composición (por ejemplo MO significa monthly), el producto y la escala de tamaño del pixel.



Imágenes en este caso mensuales





4. Uso del SeaDAS

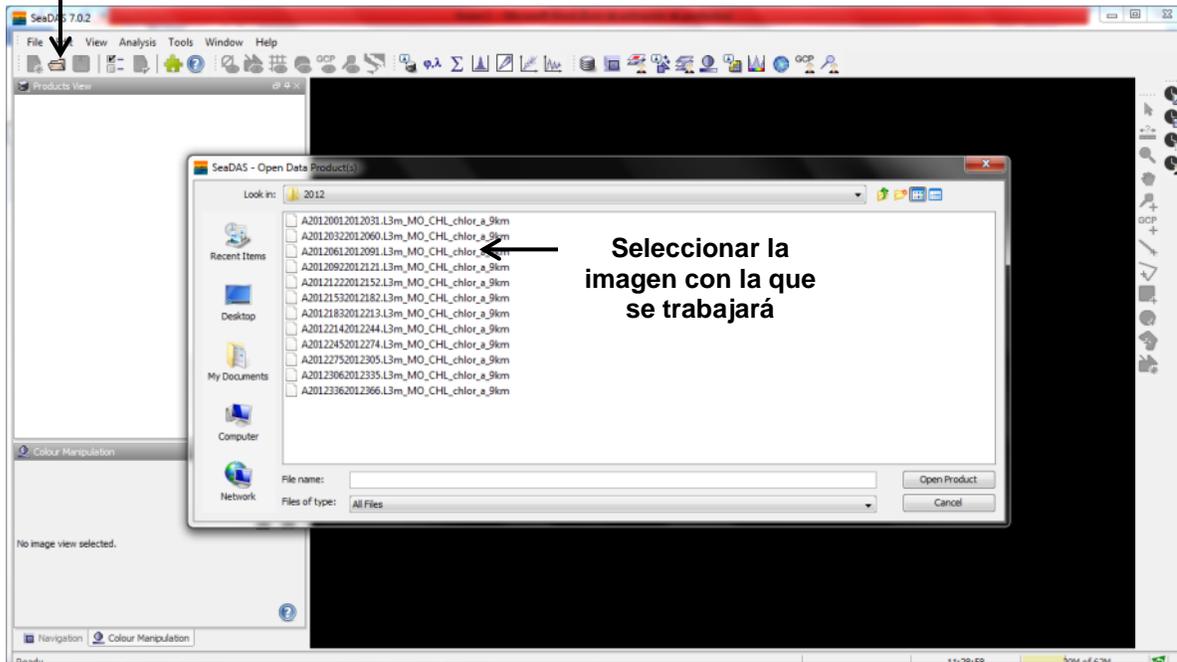
Con este software se puede trabajar con los datos del producto deseado ya sea en escala global, regional, de unos cuantos píxeles, hasta sólo un píxel (dependiendo de la escala espacial que se eligió para trabajar). Antes de describir cómo obtener la información de las imágenes, se introducirán algunas herramientas muy útiles para quien comienza a utilizar el SeaDAS.



- **Selección de imágenes**

Abrir el programa SeaDAS. Abrir la imagen deseada, para lo cual se debe ir a la barra de herramientas en la parte superior izquierda de la ventana y dar clic en el icono “open” (folder abierto). Abrir la carpeta donde se guardaron las imágenes y finalmente abrir la imagen deseada.

Abrir



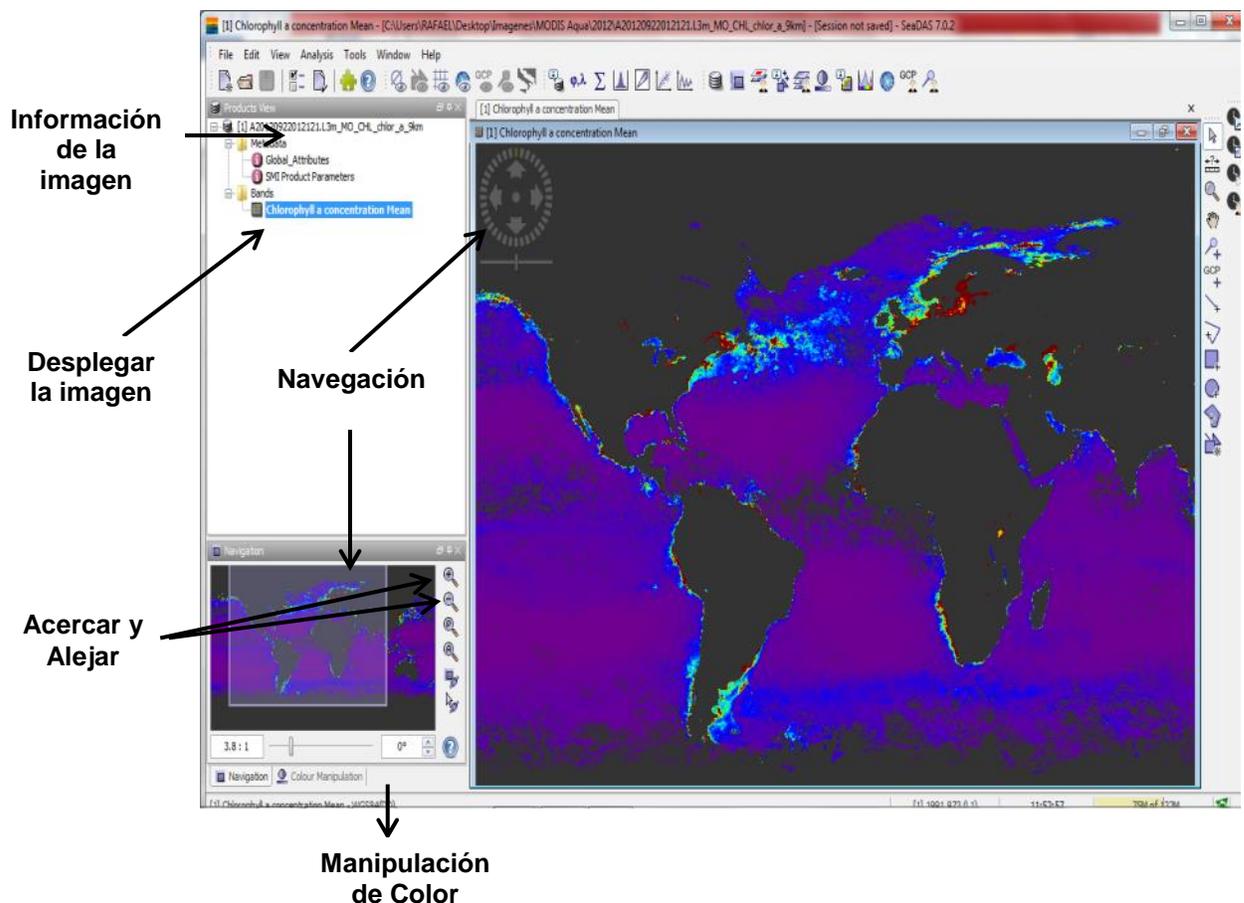
- **Información general de la imagen y navegación**

La imagen seleccionada tiene la información global del producto con el cual se trabajará. En la parte donde dice “**product view**”, en la esquina superior izquierda, se puede ver la información general de la imagen. Dando clic en el símbolo + a la izquierda de la pestaña de “metadata” se despliega un menú pequeño. Se requiere dar doble clic en “global attributes” para visualizar la información contenida en la imagen después de lo cual se cierra (no es necesario hacer este paso cada vez que se habrá una imàgen). Para ver la imagen hay que dirigirse a la misma sección de “product view” y dar clic al símbolo + a la izquierda de la pestaña “bands” y se desplegara el producto seleccionado, al dar doble clic en este, la imagen se mostrará en la parte derecha de la ventana.

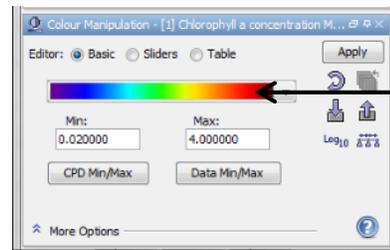
Para navegar por la imagen hay dos opciones: directamente en la ventana donde se muestra la imagen, en la parte superior izquierda, donde se puede rotar arrastrando el círculo con el ratón, desplazarse en cualquier dirección con las flechas, hacer acercamientos o alejamientos arrastrando la barra perpendicular a la barra más grande bajo el círculo; la otra manera es desde el panel de navegación que se encuentra en la

parte inferior del lado izquierdo, donde se puede realizar las mismas acciones que la opción anterior, arrastrando el cuadro pequeño para desplazar la figura o usando los íconos de zoom (lupas).

Otro factor importante que hay que considerar es que las imágenes no tienen color. Para obtener los datos no se requiere el color. Pero se les puede aplicar desde el panel de “manipulación de color” que se encuentra en la parte inferior izquierda de la ventana. Aquí se pueden seleccionar los colores que indiquen los máximos y mínimos del producto a criterio personal. Se recomienda utilizar una escala de 0.02 mg m^{-3} como mínimo y 4 mg m^{-3} como máximo para tener un detalle mejor de la imagen. Arriba de las ventanitas para poner los valores máximo y mínimo hay una barra de grises, darle clic y aparecen varias barras de colores o paletas. Se pone el cursor en cada paleta y se indica el tipo de escala de colores. Los colores de la paleta a escoger deben ser los que dice “Chl standar”, donde se da doble clic.



Manipulación del color

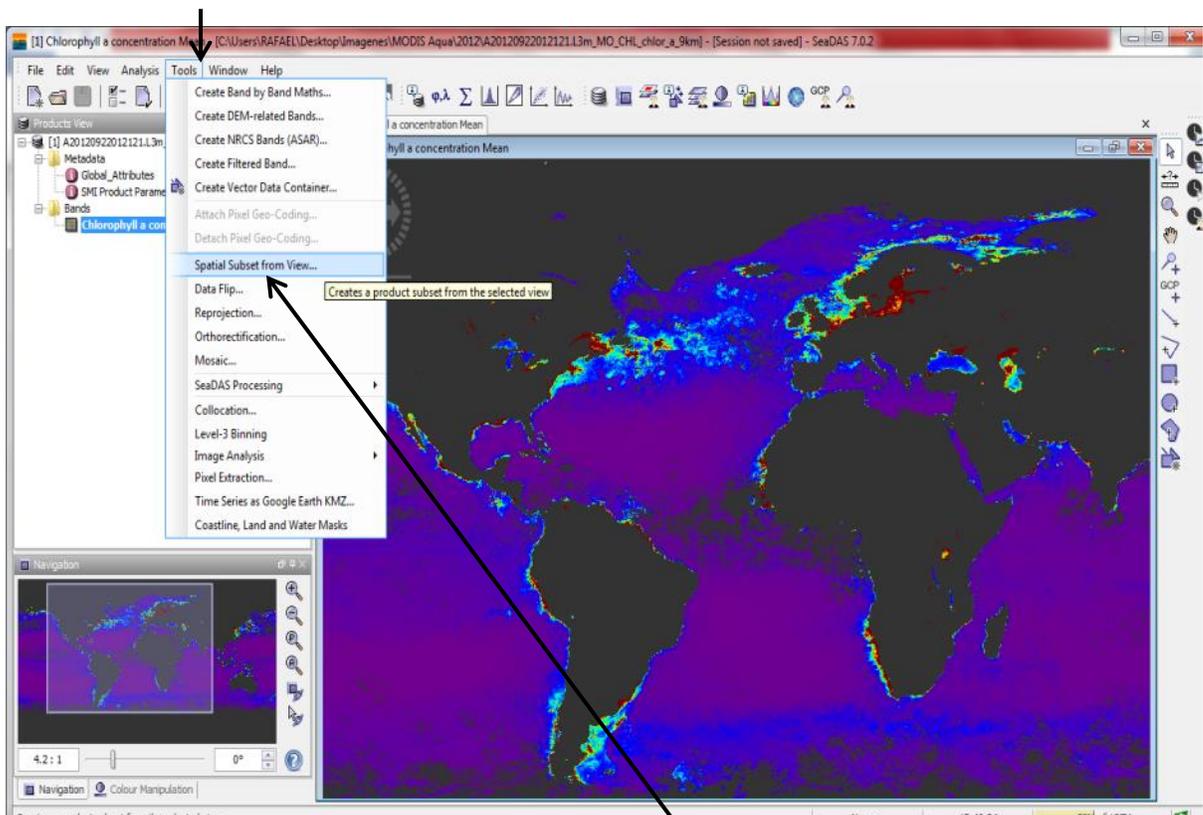


Paleta de colores

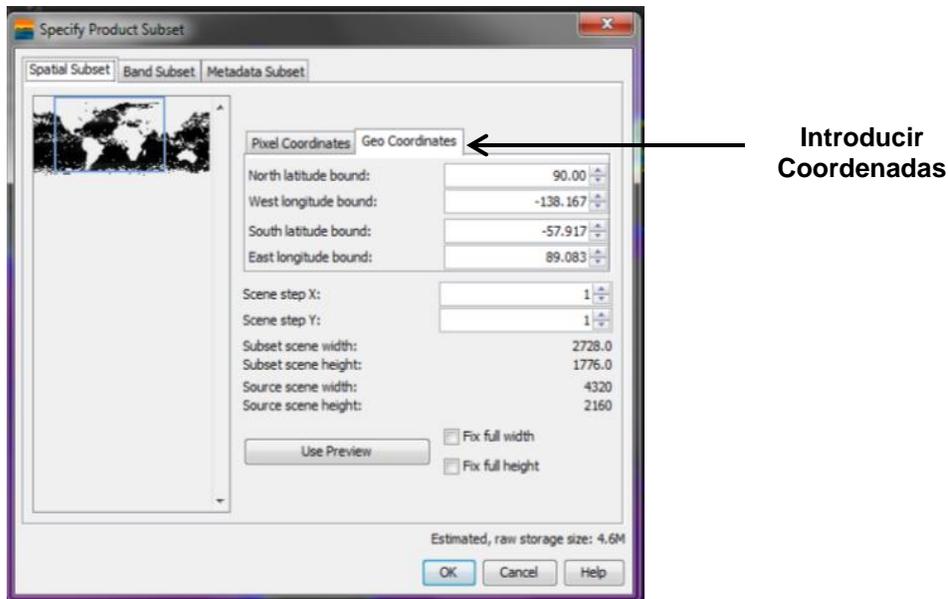
- **Recorte de las imágenes**

Si se trabaja a una escala regional, se necesita recortar la imagen global a la región deseada, para lo cual se dirige al menú principal y selecciona “tools” donde se desplegara un menú secundario. Dar clic en “spatial subset from view” y se abrirá una ventana con la pestaña de “spatial subset” marcada. En esta pestaña en la parte superior hay que elegir “Geo Coordinates” e introducir las coordenadas de la región con la cual se trabajará (límites norte y sur y este y oeste). Deje los otros cuadros como están y de clic en OK.

Herramientas



Herramienta para hacer un subset de datos

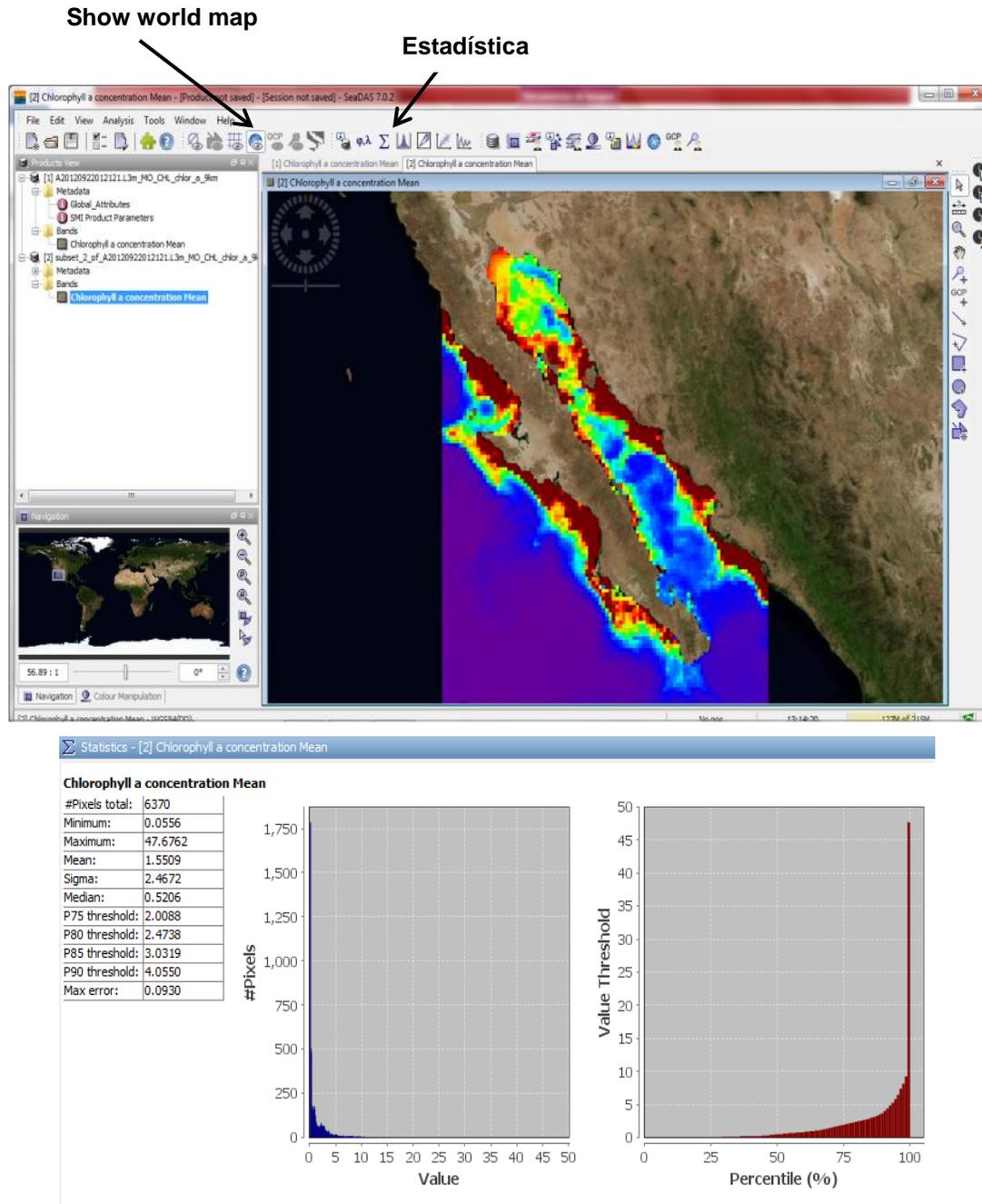


Al igual que en la imagen global, para la navegación del “subset” de la imagen se utilizan las mismas herramientas. Para poner los colores se repite el procedimiento ya descrito. Para poner los márgenes continentales hay que dar clic en el icono “show world map” en la barra de herramientas (en la izquierda, de la esquina a un cuarto de barra). Para saber la estadística básica del “subset” de la imagen dar clic en el icono “estadística” en la barra de herramienta. Aquí se muestra el número de pixeles que tiene **toda** la imagen, la media, mediana, desviación estándar de los valores, etc., del producto que se eligió trabajar. Si se requiriese pasar estos datos a una hoja de cálculo, se copian y se pegan en la hoja. En el caso de requerir guardar las imágenes recortadas para posibles trabajos futuros, hacer clic en “file” y en “save as”, después de lo cual aparecerá un recuadro que indica la necesidad de reconversión de formato, se hace clic en “yes” y se crea la carpeta para guardar imágenes recortadas. Además, las imágenes se pueden exportar, esto se logra dando clic derecho y seleccionando la opción “Export View as Image”, así como la paleta de colores que se utilizó para dicha imagen, dando clic derecho y se selecciona “Export Colour Legend as Image”.

- **Trazado de cuadrantes, polígonos, etc.**

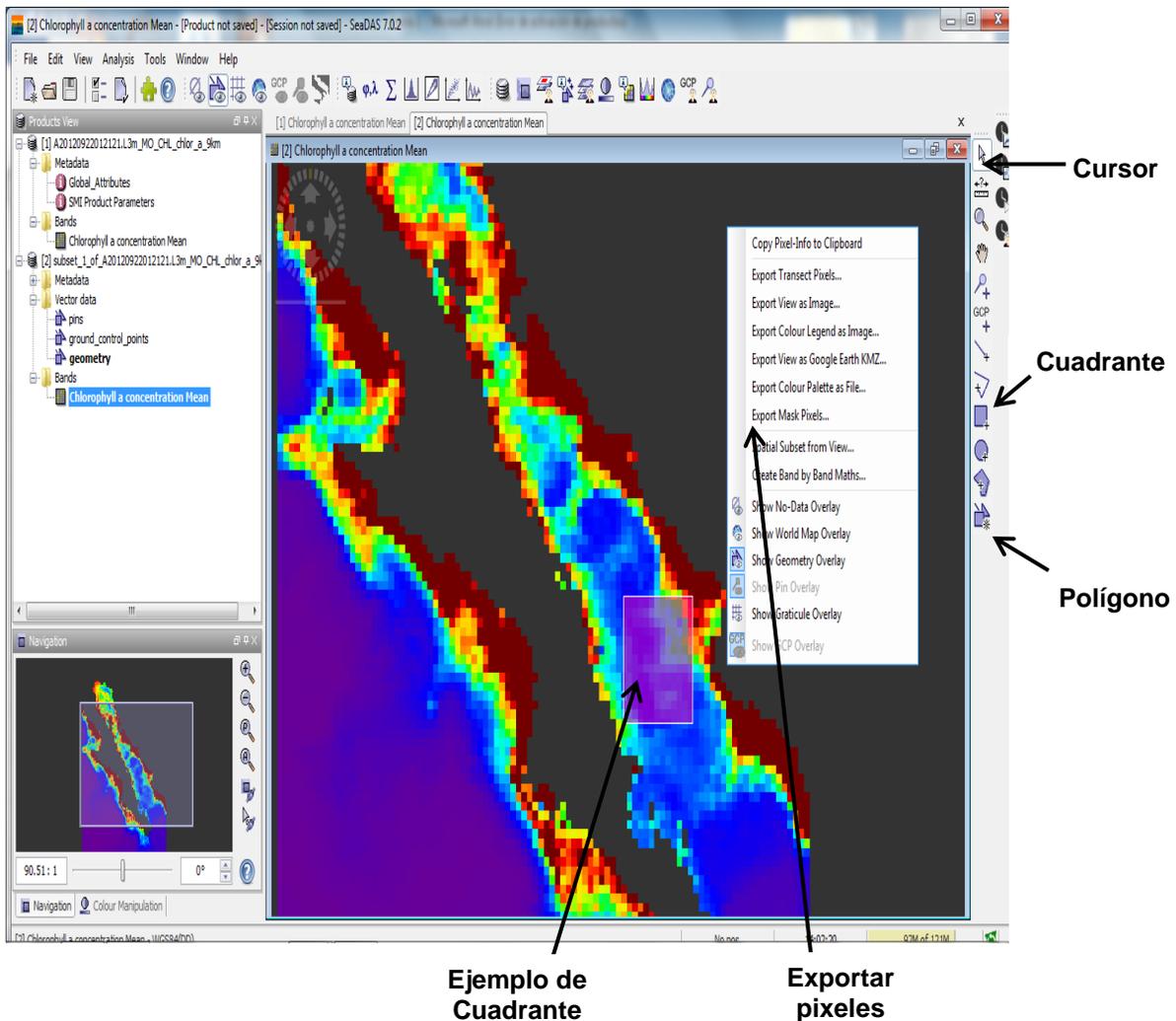
En el caso de que se trabaje con una escala de espacio más fina, el programa SeaDAS tiene herramientas para trazar cualquier tipo de polígonos, cuadrantes, elipses, etc. Para trazar cualquiera de estos objetos hay que dirigirse a la barra vertical de herramientas que se encuentra en el extremo a la derecha de la imagen y dar clic en el icono ya sea de polígono, cuadrante, etc. Al seleccionar cualquiera de estas herramientas, trazar el objeto sobre la imagen

en la localidad geográfica deseada. Al realizar esta acción se sombrearán los píxeles dentro de este objeto.



Para obtener la información de estos objetos se da clic derecho sobre los píxeles sombreados y se selecciona la opción “export mask pixels”, donde se da la opción de copiar la información (se hace clic en “Copy to Clipboard”) y pegarla (“paste”) en una hoja de cálculo.

Si lo que se requiere es hacer series de tiempo, donde se necesite el mismo cuadrante o la misma figura para una serie de imágenes, lo que se tiene que hacer es obtener las coordenadas de la figura con la que se vaya a trabajar y con estas crear los “subsets” de cada imagen (v.g.: composición mensual). Para esto, dirigirse a la barra de herramientas y buscar el icono de “Display detailed pixel information in a table view” (quinto icono desde la derecha), que se desplegará a la izquierda de la imagen para mostrar las coordenadas y los valores del producto al seleccionar los pixeles con el cursor. Se anotan las coordenadas de los cuatro pixeles que se encuentran en los extremos del cuadrante (o figura elegida). Con estas coordenadas se crean los “subsets” de acuerdo al procedimiento anteriormente descrito. Con esto último se pueden construir bases de datos del producto elegido, al pasar la información a una hoja de cálculo.



Display detailed pixel information in a table view

Coordenadas

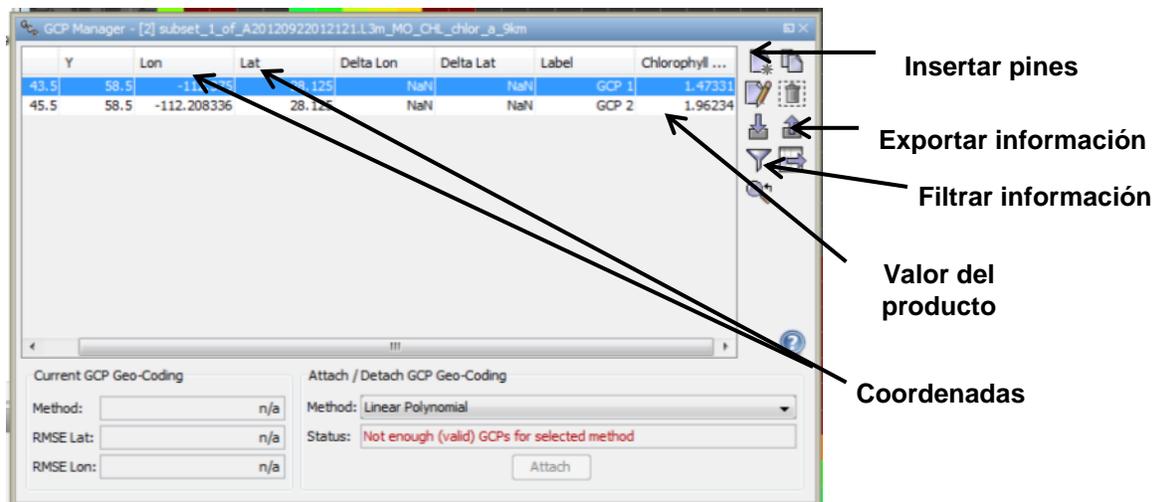
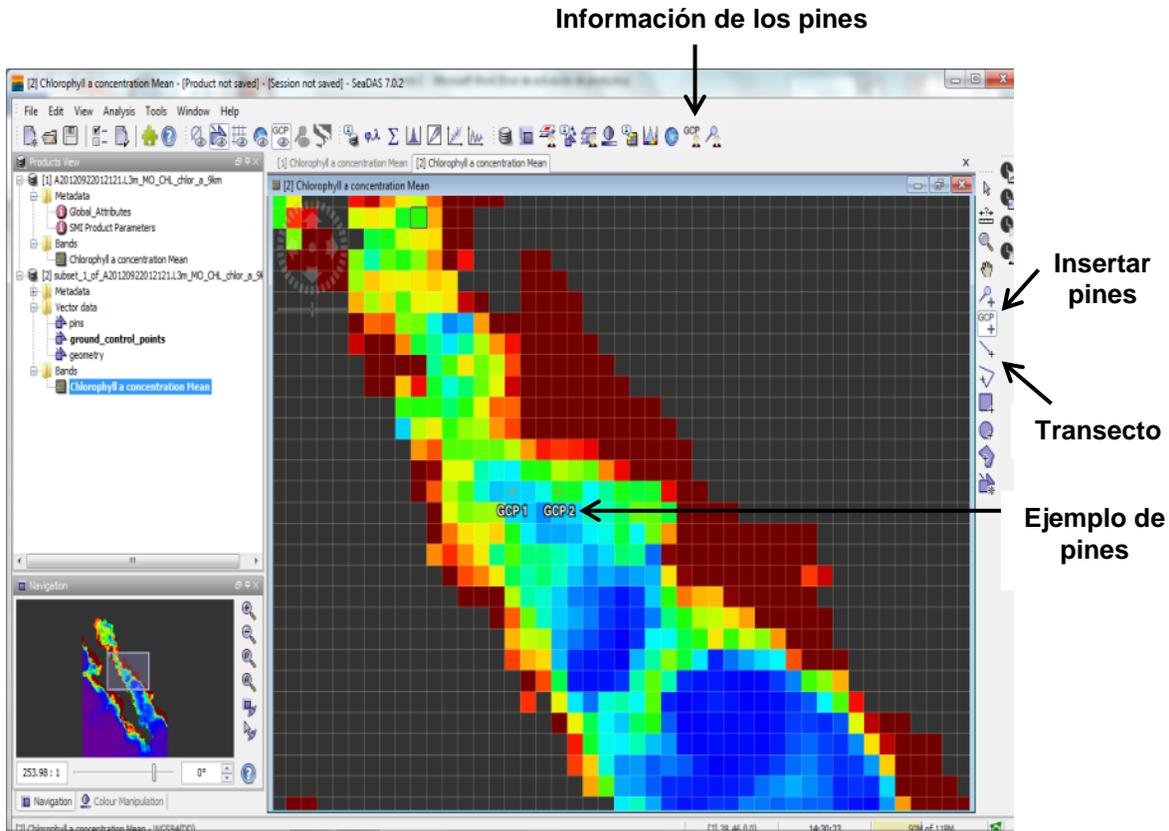
Valor del producto

Field	Value	Unit
Image-X	17	pixel
Image-Y	23	pixel
Longitude	114°22'30" W	degree
Latitude	31°02'30" N	degree
Map-X	-114.54166666666666	°
Map-Y	31.041666666666668	°
Chlorophyll a conc.	2.67317	mg m ⁻³

Si lo que se requiere es información más puntual, se pueden insertar pines, los cuales proporcionan la información de un pixel ya sea de 4x4 km o de 9x9 km, de acuerdo a la imagen escogida. Para lo cual hay que dirigirse a la barra vertical de herramientas que se encuentra al lado derecho de la imagen y dar clic en el icono GCP. Con esta herramienta se pueden realizar transectos (muestrear en líneas) con el número de pines deseados. Para lo cual hay que elegir el icono de transecto en la barra de herramientas en la parte derecha de la pantalla (“line drawing tool”). Al tener el transecto trazado se le puede agregar el número de pines deseados. Para obtener la información de los pines hay que dirigirse a la barra de herramientas en la parte superior de la ventana y dar clic en el icono (GCP) de “manage ground control points of data product” (segundo desde la derecha) y se desplegará una tabla donde se encuentran las coordenadas de los pines insertados, para obtener el valor de estos hay que dar clic en el icono que dice filtro de información (pequeño embudo a la derecha casi hasta abajo). Además desde aquí se pueden insertar más pines y exportar la información (icono de la extrema derecha,

segundo de abajo a arriba, con forma de flecha vertical) a hojas de cálculo para crear las bases de datos. Para crear pines nuevos se hace clic en el icono de la parte superior derecha (hoja con asterisco) y en el recuadro que aparece se le ponen las coordenadas nuevas.

Nota: el procedimiento que se acaba de explicar, sirve para todos los productos disponibles (Chl_{sat} , SST, PAR, etc.) en la plataforma del Ocean Color.



Anexo 2 - Obtención de los datos de PAR para calcular PP

Para obtener los datos de PAR se debe entrar al sitio web del Ocean Color y descargar los productos de PAR y proseguir con los pasos descritos en el Anexo 1. Ya que se tienen los valores de PAR lo primero es hacer una transformación, ya que los valores que maneja este sitio web están en Einsteins $\text{m}^{-2} \text{día}^{-1}$ (1 Einstein es igual a 1 mol de fotones = 1 mol cuanta = Número de Avogadro fotones). Para convertir de moles a micro-moles se multiplica por 1,000,000. Antes de calcular la Irradiancia para cada hora se tiene que saber las horas luz que dura un día en la región que se eligió para trabajar. Ya que se tiene esta información, se pasa de horas a segundos.

Al tener la información de la duración del día y la irradiancia total por día (también conocida como insolación Q), se calcula la irradiancia para mediodía (E_m ò irradiancia máxima), lo cual se hace mediante la ecuación propuesta por Kirk (1994):

$$Q = \frac{2N E_m}{\pi}$$

donde Q es la irradiancia total expresada en moles cuanta $\text{m}^{-2} \text{día}^{-1}$ (o para este caso en μmoles), N es la duración total del día en segundos y E_m es la irradiancia que incide a mediodía. Como se tiene Q, N, y π es una constante, se despeja E_m :

$$E_m = \frac{Q\pi}{2N}$$

Lo siguiente es obtener la irradiancia para cada hora en particular del día. Se supone que son el mismo número de horas antes y después de mediodía (se ignora la hora local y se sitúa el mediodía en coincidencia con E_m). Para ello se obtienen las irradiancias solo para las horas de la mañana y con ellas se calcula PP para cada hora y la suma de la mañana se multiplica por dos para obtener PP de todo el día (se supone simetría de la irradiancia del día). Para obtener estos valores se sigue la ecuación propuesta por Kirk (1994):

$$E_{(t)} = E_m \sin(\pi t / N)$$

donde $E(t)$ es la irradiancia a la mitad de cada hora de la mañana y se expresa en micromoles cuanta $m^{-2} s^{-1}$, t es el tiempo en cierto punto del día y se expresa en segundos a partir del amanecer.

