



**UNIVERSIDAD DE SONORA**

**DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD  
DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y  
TECNOLÓGICAS**

**POSGRADO EN BIOCENCIAS**

**VARIACIÓN TEMPORAL DE TEMPERATURA  
SUPERFICIAL DEL MAR, CLOROFILA A Y  
PRODUCTIVIDAD PRIMARIA A NIVEL  
REGIONAL Y GLOBAL DEL GOLFO DE  
CALIFORNIA: COMPARACIÓN ENTRE  
ÉPOCAS FRÍAS Y CÁLIDAS**

**TESIS**

**que para obtener el grado de:**

**MAESTRO EN BIOCENCIAS**

**presenta:**

**FÁTIMA IVONNE ESCALANTE ALMAZÁN**

**Hermosillo, Sonora, México.**

**Octubre de 2011.**

# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

Variación Temporal de Temperatura Superficial del Mar, Clorofila *a* y Productividad  
Primaria a Nivel Regional y Global del Golfo de California: Comparación entre Épocas Frías  
y Cálidas

TESIS

que para obtener el grado de:  
MAESTRO EN BIOCIENCIAS

presenta:

FÁTIMA IVONNE ESCALANTE ALMAZÁN

Hermosillo, Sonora, México.

Octubre de 2011.

## APROBACIÓN

Los miembros del comité designado para revisar la tesis titulada “Variación Temporal de Temperatura Superficial del Mar, Clorofila *a* y Productividad Primaria a Nivel Regional y Global del Golfo de California: Comparación entre Épocas Frías y Cálidas” presentada por Fátima Ivonne Escalante Almazán, la han encontrado satisfactoria y recomiendan que sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Biociencias.



---

Dr. José Eduardo Valdez Holguín

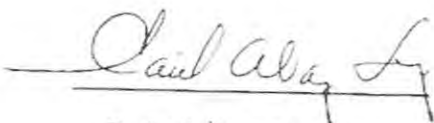
Asesor



---

Dr. José Antonio López Elfas

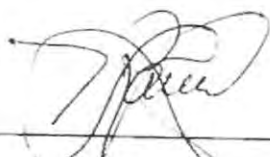
Sinodal



---

Dr. Saúl Álvarez Borrego

Sinodal



---

Dr. José Rubén Lara Lara

Sinodal

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas y al Posgrado en Biociencias de la Universidad de Sonora.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo recibido a través de una beca de posgrado y del proyecto Flujos de Carbono en el Golfo de California Segunda Parte (FLUCARCOCCII) Clave 84944.

Agradecimientos al NOAA CoastWatch Program, NOAA NESDIS Office of Satellite Data Processing and Distribution, NASA's Goddard Space Flight Center y OceanColor Web por la información de satélite.

Al comité de tesis por las enseñanzas y el compromiso adquirido para la culminación del trabajo.

## ÍNDICE GENERAL

Índice	iii
Índice de figuras	vii
Índice de tablas	ix
Resumen	xi
Abstract	xii
I. Introducción	1
II. Antecedentes bibliográficos	
2.1 Funcionamiento y productividad de los ecosistemas marinos	5
2.1.1 Fotosíntesis pelágica	5
2.1.2 Productividad primaria oceánica	6
2.1.3 Factores de variabilidad en la productividad primaria	6
2.1.3.1 Luz	7
2.1.3.2 Nutrientes	7
2.1.3.3 Temperatura	8
2.1.3.4 Forzamiento físico e interacciones atmósfera-océano	9
2.1.3.4.1 El Niño y La Niña	9
2.1.3.4.2 Efectos sobre el fitoplancton	10
2.2 Técnicas de medición de la productividad primaria oceánica	10
2.3 Los océanos en el ciclo de carbono	11
2.3.1 Química del ciclo de carbono oceánico	12
2.3.2 Bomba biológica de carbono	13
2.4 El Golfo de California	13
2.4.1 Masas de agua y circulación	14

2.4.2 Mareas	14
2.4.3 Temperatura	15
2.4.4 Vientos y surgencias	15
2.4.5 Productividad primaria	16
2.4.5.1 Productividad nueva y regenerada	17
III. Hipótesis	18
IV. Objetivos	
4.1 Objetivo general	19
4.2 Objetivos particulares	19
V. Materiales y Métodos	20
5.1 Regionalización	20
5.2 Especificaciones de los sensores y descarga de datos satelitales	20
5.2.1 Temperatura superficial del agua	23
5.2.2 Concentración de clorofila	26
5.2.3 Productividad primaria	28
5.3 Procesamiento de la información	30
5.3.1 Diseño experimental	30
5.3.2 Análisis estadístico multitemporal y multiespacial	32
5.3.3 Correlación de variables	32
5.3.4 Estimación de carbono fijado	32
VI. Resultados	33
6.1 Resultados regionales	
6.1.1 Climatología, clorofila y productividad primaria anual	
6.1.1.1 Islas	33

6.1.1.2 Centro	33
6.1.1.3 Boca	36
6.1.1.4 Diferencias entre regiones	37
6.1.2 Variabilidad interanual (panorama general)	41
6.1.3 Variabilidad estacional (panorama general)	43
6.1.4 Variabilidad interanual y estacional a detalle	
6.1.4.1 Islas	47
6.1.4.2 Centro	47
6.1.4.3 Boca	50
6.1.4.5 Diferencia entre eventos El Niño	51
6.1.4.6 Diferencia entre eventos La Niña	51
6.2 Resultados globales	
6.2.1 Climatología, clorofila y productividad primaria anual	57
6.2.2 Variabilidad interanual	57
6.2.2.1 Temperatura superficial del mar	57
6.2.2.2 Clorofila superficial	63
6.2.2.3 Productividad primaria	63
6.2.3 Variabilidad estacional	63
6.2.3.1 Temperatura superficial del mar	63
6.2.3.1.1 Invierno	64
6.2.3.1.2 Primavera, verano y otoño	64
6.2.3.2 Clorofila superficial	64
6.2.3.2.1 Invierno	66
6.2.3.2.2 Primavera	66



6.2.3.2.3 Verano	72
6.2.3.2.4 Otoño	72
6.2.3.3 Productividad primaria	72
6.2.3.3.1 Invierno	72
6.2.3.3.2 Primavera	73
6.2.3.3.3 Verano y otoño	73
6.2.4 Anomalías estacionales	73
6.3 Correlación de variables	75
6.3.1 Correlación interanual	76
6.3.2 Correlación estacional	77
6.3.3 Correlación interanual & estacional	77
6.4 Producción nueva y regenerada	
6.4.1 Total	80
6.4.2 Estacional	80
VII. Discusión	90
VIII. Conclusiones	103
IX. Recomendaciones	104
X. Referencias	106
XI. Apéndice A: pruebas estadísticas	
10.1 Diferencia de Medias para Observaciones Pareadas y correlación línea: Chl SeaWiFS vs. Chl MODIS en el Golfo de California.	117
10.2 Comparación de Dunnett para la señal interanual a escala regional en el Golfo de California.	118
XII. Apéndice B: tablas	119
XIII. Apéndice C: figuras	126

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA		PÁGINA
1	Golfo de California.	22
2	TSM. Media anual en tres regiones del Golfo de California.	35
3	Chl. Misma leyenda que figura 2.	35
4	PP. Misma leyenda que figura 2.	36
5	TSM, Chl y PP en tres regiones del Golfo de California.	40
6	TSM según la condición climatológica para tres regiones del Golfo de California.	42
7	Chl. Misma leyenda que figura 6.	42
8	PP. Misma leyenda que figura 6.	43
9	TSM según la estación del año y la región del Golfo de California.	44
10	Chl. Misma leyenda que figura 9.	46
11	PP. Misma leyenda que figura 9.	46
12	TSM según la estación del año y condición climatológica en tres regiones del Golfo de California.	49
13	Chl. Misma leyenda que figura 12.	49
14	PP. Misma leyenda que fig. 12.	50
15	TSM, Chl y PP según el evento El Niño en tres regiones del Golfo de California.	55
16	La Niña. Misma leyenda que figura 15.	55
17	TSM, Chl y PP en el Golfo de California.	59
18	TSM, Chl y PP según la condición climatológica en el Golfo de California.	59

FIGURA		PÁGINA
19	TSM, Chl y PP según el evento El Niño en el Golfo de California.	61
20	La Niña. Misma leyenda que figura 22.	62
21	TSM, Chl y PP según la estación del año en el Golfo de California.	65
22	TSM, Chl y PP según la estación del año y condición climatológica en el Golfo de California.	65
23	Invierno. TSM, Chl y PP según el período estacional de 1997 a 2010 en el Golfo de California.	68
24	Primavera, Verano y Otoño. Misma leyenda que figura 23.	68
25	Anomalías de TSM, Chl y PP en el Golfo de California.	75
26	Chl en función de la TSM en el Golfo de California.	79
27	PP. Misma leyenda que figura 26.	79
28	PP en función de la Chl en el Golfo de California.	79
29	Producción nueva y regenerada en el Golfo de California.	82
30	Estacional, regional. Misma leyenda que figura 29.	82
31	Estacional, global. Misma leyenda que figura 29.	89
(APÉNDICE DE FIGURAS)		
32	PP (normalizada). Misma leyenda que figura 2.	126
33	Islas. Misma leyenda que figura 25.	127
34	Centro. Misma leyenda que figura 25.	127
35	Boca. Misma leyenda que figura 25.	128

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA		PÁGINA
1	Especificaciones de las áreas de estudio en el Golfo de California.	21
2	Eventos El Niño y La Niña de 1997 a 2020 y su intensidad según información de la NOAA.	31
3	Factores fijos utilizados para el análisis de varianza a escala regional y global.	32
4	Islas. TSM, Chl y PP anual.	34
5	Centro. Misma leyenda que tabla 4.	38
6	Boca. Misma leyenda que tabla 4.	39
7	TSM, Chl y PP para tres regiones del Golfo de California.	40
8	Islas. TSM, Chl y PP estacional e interanual.	48
9	Centro. Misma leyenda que tabla 8.	52
10	Boca. Misma leyenda que tabla 8.	53
11	El Niño. Misma leyenda que tabla 7.	54
12	La Niña. Misma leyenda que tabla 7.	56
13	Golfo de California. Misma leyenda que tabla 4.	58
14	Golfo de California. Misma leyenda que tabla 8.	60
15	Golfo de California. TSM, Chl y PP de cinco eventos El Niño.	61
16	Golfo de California. TSM, Chl y PP de cuatro eventos La Niña.	62
17	Invierno. TSM, Chl y PP según el período estacional de 1997 a 2010 en el Golfo de California.	67
18	Primavera. Misma leyenda que tabla 15.	69

TABLA		PÁGINA
19	Verano. Misma leyenda que tabla 15.	70
20	Otoño. Misma leyenda que tabla 15.	71
21	Media climatológica y anomalías negativa y positiva máximas de TSM, Chl y PP en el Golfo de California.	74
22	Correlación entre TSM, Chl y PP del Golfo de California.	76
23	Interanual. Misma leyenda que tabla 22.	77
24	Estacional. Misma leyenda que tabla 23.	78
25	Producción nueva y regenerada en el Golfo de California.	81
26	Islas, estacional. Misma leyenda que tabla 25.	83
27	Centro, estacional. Misma leyenda que tabla 25.	85
28	Boca, estacional. Misma leyenda que tabla 25.	86
29	Golfo de California, estacional, SeaWiFS y Pathfinder. Misma leyenda que tabla 25.	87
30	Golfo de California, estacional, SeaWiFS, MODIS y Pathfinder. Misma leyenda que tabla 25.	88
(APÉNDICE DE TABLAS)		
31	Chl anual en el Golfo de California (sensores remotos).	119
32	Chl superficial en las islas del Golfo de California.	120
33	Centro. Misma leyenda que tabla 32.	121
34	Boca. Misma leyenda que tabla 33.	122
35	PP total, producción nueva, producción regenerada y producción neta (PPN) en el Golfo de California.	123
36	Producción regenerada en el Golfo de California.	125

## RESUMEN

Con datos satelitales de 1997-2010 se describe la variación de temperatura superficial del mar (TSM), clorofila *a* (Chl) y productividad primaria (PP) a diferentes escalas temporales y espaciales en tres regiones del Golfo de California: boca, centro y grandes islas. Las señales interanuales El Niño (EN) y La Niña (LN) fueron más evidentes en la boca del golfo. Existió una respuesta desfasada de tres a seis meses para el restablecimiento de las condiciones “normales” de la actividad fitoplanctónica una vez que cesaba un evento EN o LN. La respuesta fitoplanctónica ante las mayores concentraciones de nutrientes que supone el evento LN no fue inmediata. En la escala regional la condición EN redujo significativamente el promedio de Chl respecto a condiciones “normales” en la boca, centro e islas. Sin embargo, PP bajo la condición EN sólo se redujo significativamente en la boca. El incremento de Chl y PP por LN con relación a condiciones “normales” sólo fue significativo en la boca. Se confirma que la señal anual de TSM, Chl y PP es la componente mayor de la variación, sobre todo para las regiones de la boca y centro. Sin embargo, en la región de las islas grandes PP de “invierno” ( $1.96 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) no fue significativamente diferente a la de “verano” ( $1.62 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ). La PP más alta se encontró en las regiones de las islas y centro, en donde las inferencias de producción nueva se calcularon en más del 60% de PP. En la boca del golfo PP fue principalmente atribuible a la producción regenerada, particularmente durante verano y otoño.

## ABSTRACT

Using satellite derived data from 1997-2010 sea surface temperature (SST), chlorophyll *a* (Chl) and primary productivity (PP) variations are described at different temporal and spatial scales in three regions of the Gulf of California: entrance, central part, and midriff islands. Interannual signals from El Niño (EN) and La Niña (LN) were more evident at the entrance of the gulf. Once EN or LN was over, phytoplankton activity showed an out of phase response with the reestablishment of “normal” conditions up to three to six months later. Phytoplanktonic response to high concentrations of nutrients due to LN was not immediate. At regional scale, EN decreased significantly the Chl mean with regard to “normal” conditions at the entrance, central gulf and midriff islands regions. However, PP under EN condition decreased significantly only at the entrance. The increase of Chl and PP due to LN compared to those of “normal” conditions was significant only for the entrance region. TSM, Chl and PP annual signals are the main source of variation, particularly for the central and entrance regions. However, at the midriff islands region “winter” PP ( $1.96 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) was not significantly different from that of “summer” ( $1.62 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ). Highest PP was found at the central and midriff islands regions, where inferences on new production were estimated in more than 60% of PP. At the entrance of the gulf PP was mainly composed of regenerated production, particularly during summer and autumn.

## I. INTRODUCCIÓN

El Golfo de California, región oceánica situada dentro de los mares marginales del Océano Pacífico, se caracteriza por ser un mar altamente productivo (Álvarez-Borrego, 2010b). Tal característica en sus aguas obedece a la dinámica de la región asociada a mecanismos naturales de fertilización, siendo uno de ellos la presencia de cambios estacionales de dirección en los vientos que acarrear nutrientes del fondo oceánico en un proceso denominado surgencias (Álvarez-Borrego, 2010b; Lavín y Marinone, 2003). En adición a lo anterior, en algunas regiones del golfo el aporte de nutrientes está favorecido por la mezcla por mareas y vientos, así como por una nutriclina superficial que disminuye los requerimientos de una mezcla intensa y profunda. Finalmente, el intercambio con el Pacífico adyacente, que implica la entrada de aguas profundas, ricas en nutrientes y bióxido de carbono (y la salida de aguas pobres en nutrientes), propician la productividad de la región (Álvarez-Borrego, 2010). Estos mecanismos favorecen a las poblaciones fitoplanctónicas, las que a su vez, por ser la base de la cadena alimenticia marina, propician la existencia de gran diversidad de especies, así como un número considerable de endemismos en la región, calificándola como uno de los mayores capitales naturales del país (Luque y Robles, 2006; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT] 2000, 2006).

En función de las condiciones oceanográficas físicas y biológicas el Golfo de California se ha dividido en: la región Norte, caracterizada por masas de alta salinidad ( $S > 35$ ) o Agua del Golfo de California (AGC); la zona de las Islas, con una mezcla de marea intensa; la zona central, con una dinámica de corrientes de marea, viento, surgencias y elevado calentamiento solar; y la región Sur, con masas de agua de características similares a las del Pacífico adyacente (Álvarez-Borrego, 2010b; Lavín y Marinone, 2003; Ripa y Marinone, 1989).

Las variaciones interanuales y estacionales de PP, biomasa, concentración de clorofila *a* y temperatura superficial del mar para la región están ampliamente documentadas (Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991; Espinosa-Carreón y Valdez-Holguín, 2007; Lara-Lara *et al.*, 1993; Lavín *et al.*, 2003; Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1994).



En la escala interanual la variación de mayor relevancia en el Golfo de California es la causada por las interacciones océano-atmósfera inestables a las que se les refiere como el fenómeno El Niño (Soto-Mardones *et al.*, 1999). Durante este evento, cuyo origen se sitúa en el Pacífico Ecuatorial, se registra un incremento anormal en la temperatura superficial que se conjuga con fluctuaciones no estacionales en el nivel del mar y cambios de la presión atmosférica asociados a la Oscilación del Sur (razón por la que los eventos son referidos con el nombre conjunto de ENSO). Estas condiciones inciden notablemente sobre la circulación oceánica y alteran a las comunidades marinas a causa del hundimiento de la termoclina y la capa de mezcla, disminución de las surgencias costeras y un nivel del mar relativamente alto. Estos procesos limitan al fitoplancton que depende de la irradiancia y de la disponibilidad de nutrientes para realizar las funciones fisiológicas básicas: fotosíntesis y crecimiento (Dajoz, 2002; López-Sandoval *et al.*, 2009). Como consecuencia al decremento del fitoplancton, base de la cadena trófica marina, algunas formas de vida marina pueden migrar o colapsar, alterándose la distribución y abundancia de los organismos (Cruz-Gómez *et al.*, 2008).

El efecto climático contrario, denominado La Niña, implica un enfriamiento en las aguas oceánicas superficiales, un aumento de las surgencias costeras, nivel del mar relativamente bajo, y el levantamiento de la termoclina, procesos que incrementan la PP (Sosa-Ávalos, 2007), al acarrear nutrientes a la superficie.

La importancia de estudiar el grado de afectación o modificación de los procesos biológicos oceánicos ante la presencia de estos fenómenos climatológicos radica en que fenómenos como El Niño conllevan un decremento de la producción primaria a causa del hundimiento de la termoclina, mientras que La Niña representa condiciones favorables para el proceso (Dajoz, 2002). Al hundirse la termoclina y elevarse el nivel del mar en la zona costera durante un evento El Niño, la temperatura en la capa superficial se incrementa, por lo que durante ese período se transporta agua cálida y con baja concentración de nutrientes hacia la superficie, impidiendo el florecimiento de fitoplancton (Espinosa-Carreón y Valdez-Holguín, 2007), con consecuencias relevantes en la actividad pesquera.

En la escala estacional la variabilidad en la productividad está determinada por factores físicos como procesos horizontales y verticales, la mezcla, surgencias, transporte, disponibilidad y concentración de nutrientes por el viento, los metales traza disponibles, la penetración de luz en la columna de agua y la temperatura del agua; y por procesos biológicos

como la biomasa autotrófica por sí misma, el pastoreo, la tasa de hundimiento, la historia de vida y la estructura taxonómica del fitoplancton (Espinosa-Carreón y Valdez-Holguín, 2007; Platt y Sathyendranath, 1999, Sosa-Ávalos *et al.*, 2007). Variables como la temperatura del agua, además de estar en función de la alternancia de las estaciones por efecto de la inclinación solar, pueden llegar a variar en el transcurso del mismo día al depender de la acción del viento, las corrientes, la nubosidad y en general de todos los factores climáticos que interfieren en la irradiación solar (Cognetti *et al.*, 2001; Dajoz, 2002). En función de los factores mencionados con anterioridad el fitoplancton responde fisiológicamente, variando la tasa de crecimiento y fotosíntesis, según las condiciones ambientales presentes (Platt y Sathyendranath, 1999).

Las herramientas de percepción remota como los radiómetros y sensores infrarrojos han permitido medir la radiancia a determinadas longitudes de onda de luz visible y la temperatura superficial de los océanos (Aguirre-Gómez, 2002). Con la radiancia medida se pueden relacionar de forma cuantitativa elementos presentes en la columna de agua, como la clorofila, que interactúan con la luz visible. Las estimaciones de clorofila a partir de las radiancias medidas ofrecen la posibilidad de calcular el carbono producido por fotosíntesis (Aguirre-Gómez, 2002). A su vez, las estimaciones satelitales de clorofila *a* y PP generan información indirecta en torno a los cambios en el flujo de carbono en la columna de agua. La descripción temporal y espacial de la variabilidad de la producción fitoplanctónica nueva puede dar un estimado de la variabilidad del flujo vertical de materia orgánica (Hidalgo-González y Álvarez-Borrego, 2004). Finalmente, las mediciones de temperatura superficial permiten hacer un seguimiento de la misma y describir los cambios en el tiempo (Aguirre-Gómez, 2002).

En el Golfo de California la distribución espaciotemporal de temperatura está en función de flujos estacionales de calor, las mezclas intensas por marea, el régimen de los vientos y el forzamiento del Océano Pacífico. El Golfo es una cuenca de evaporación que gana calor a través de su superficie (Lavín y Organista, 1988), produciendo una importante modulación estacional (Ripa y Marinone, 1989). El régimen de vientos dentro del golfo es variable: de noviembre a mayo prevalecen las condiciones de invierno con vientos provenientes del noroeste, el resto del año prevalecen las condiciones de verano con vientos procedentes del sureste que introducen aire húmedo y producen condiciones climáticas de tipo

tropical (Merrifield y Winant, 1989). Se ha sugerido que bajo ciertos regímenes de viento algunas regiones del golfo, como la boca, son más susceptibles a ser afectadas por fenómenos como El Niño entrecruzando los efectos de eventos climatológicos interanuales con las condiciones estacionales regionales (Beier y Ripa, 1998; Carrillo *et al.*, 2002; Leal y Lavín, 2002; Soto-Mardones *et al.*, 1999).

El objetivo del presente trabajo fue describir la variabilidad espaciotemporal de la temperatura superficial del mar, clorofila *a* y PP en el Golfo de California, a fin de determinar las condiciones interanuales y estacionales bajo las cuales la clorofila *a* y PP alcanzan los valores máximos y mínimos en las grandes islas, el centro y la boca del Golfo de California.

## II. ANTECEDENTES

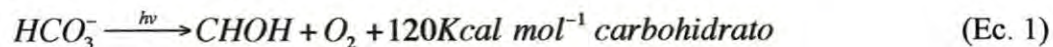
### 2.1 Productividad en los ecosistemas marinos

Los océanos son responsables del ~50% de la producción biológica a escala global (Williams *et al.*, 2002). Los procesos oceanográficos físicos, químicos, biológicos y geológicos implicados en esta cifra varían en una amplia gama de escalas y niveles. Dentro de los procesos biológicos la fotosíntesis y la respiración son los moduladores principales de la biosfera marina (Cognetti *et al.*, 2001). El ecosistema pelágico es clave de la fotosíntesis por la foto-regeneración de material orgánico, constituyendo el inicio de la cadena trófica (Williams *et al.*, 2002).

El estudio de la fotosíntesis y respiración marina está asociado al papel de los océanos en el clima y flujos globales de elementos activos como el carbono (Berger y Herguera, 1992); así como a aplicaciones potenciales sobre la variabilidad, abundancia, distribución y disponibilidad de poblaciones marinas de interés comercial y ecológico (Enríquez-Hernández *et al.*, 2007; McClennen, 2003).

#### 2.1.1 Fotosíntesis pelágica

La síntesis de moléculas orgánicas en el océano ocurre por tres procesos. El proceso más frecuente es la reacción de fotosíntesis (Ecuación 1), la cual es dependiente de la energía luminosa e involucra la introducción de hidrógeno a la molécula de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). La fijación fotosintética de carbono utiliza al agua como donador de hidrógeno para la síntesis de materiales orgánicos a partir de sustancias inorgánicas. La reacción dispone del carbono provisto por el ión HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> disuelto en el agua, y el material orgánico inmediato producido es la glucosa con la consecuente liberación de oxígeno (Garrison, 2009; Williams *et al.*, 2002).



En donde  $hv$  es la energía del fotón ( $h$  es la constante de Planck y  $\nu$  la frecuencia de la luz).

En aguas pobres en oxígeno los organismos quimiosintéticos, bacterias y archaea (organismos primitivos unicelulares), utilizan como fuente de energía la oxidación de moléculas inorgánicas como el gas hidrógeno, sulfuro de hidrógeno o metano, que actúan como donadores de hidrógeno, convirtiendo así moléculas sencillas de carbono en materia orgánica (carbohidratos). Este segundo proceso es denominado quimiosíntesis, y en él no se libera oxígeno ni se requiere una fuente luminosa. Finalmente, cuando los compuestos orgánicos disueltos y simples (como la glucosa) se encuentran en abundancia por una actividad fotosintética previa, éstos son transformados en sustancias más complejas a través de la foto-asimilación, la cual reemplaza al CO<sub>2</sub> como fuente de carbono con glucosa, acetato, etcétera. La energía que se acumula por estos tres procesos es referida con el término de producción primaria (Barnes y Hughes, 1999; Fujita y DuBois, 2005).

### 2.1.2 Productividad primaria oceánica

La productividad primaria (PP) en el océano se define como la tasa a la que la energía es almacenada en la porción orgánica de los organismos fotosintéticos o quimiosintéticos por unidad de área por unidad de tiempo. Se expresa en gramos de carbono transformados a materia orgánica por metro cuadrado por área por año ( $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$ ) (Fahey y Knapp, 2007).

El fitoplancton, grupo diverso de organismos fotosintéticos, generalmente unicelulares e incapaces de superar con movimientos propios los movimientos del mar, produce entre el 90 % y el 96 % de los carbohidratos de la superficie oceánica. Los organismos quimiosintéticos son responsables de un ~2 % a un 5 % (Garrison, 2009). Aunque las tasas varían ampliamente, se estima que los rangos de productividad total oceánica varían de 75 a 150 gramos de carbono convertido a carbohidratos por metro cuadrado de superficie oceánica por año (75 a 150  $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$ ). Se ha sugerido que la productividad global neta en los ecosistemas marinos es de 35 a 50 gigatoneladas de carbono ( $10^9$  toneladas) fijadas como carbohidratos por año (Cognetti *et al.*, 2001; Falkowski *et al.*, 2003; Garrison, 2009).

### 2.1.3 Factores que intervienen en la productividad primaria

Los factores involucrados en la productividad biológica están íntimamente relacionados entre sí, a la vez que cada uno posee un espectro muy amplio de escalas temporales y espaciales (Barnes y Hughes, 1999; Williams y Follows, 2003).

### 2.1.3.1 Luz

La luz disminuye conforme se desciende en la columna de agua, estableciéndose así tres zonas: eufótica, de compensación y afótica. La entrada de luz restringe la fotosíntesis a la zona eufótica, en donde la productividad alcanza sus valores máximos. Por debajo de los 100 metros la fotosíntesis se reduce considerablemente. No se conocen organismos fotosintetizadores funcionales por debajo de los ~268 metros, en donde la penetración de la luz solar es prácticamente nula (afótica). Demasiada luz, por el contrario, puede dañar la química fotosintética de algunos organismos como las diatomeas (Contreras, 1994; Garrison, 2007).

### 2.1.3.2 Nutrientes

Entre las sustancias que regulan el crecimiento del fitoplancton, los nutrientes de nitrógeno (N), fósforo (P) y silicio (Si) constituyen un factor limitante por su escasa concentración en el mar. El N está disponible en forma de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) y nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) (Cognetti *et al.*, 2001). El P se asimila como ortofosfatos, y los silicatos disueltos, utilizados para formar esqueletos y estructuras duras, en forma de ácido silícico. Otros compuestos o elementos indispensables para el metabolismo del fitoplancton se hallan en abundancia y de forma inmediata, por ejemplo:  $\text{CO}_2$ , iones sodio, potasio, magnesio y calcio. Los elementos que se hallan en concentraciones muy bajas y que pueden constituir una condición limitante son conocidos como metales traza (hierro, manganeso, cadmio, selenio, zinc, cobre y cobalto), y son necesarios para procesos enzimáticos. Algunos grupos de fitoplancton como las diatomeas y los dinoflagelados requieren vitaminas como la  $\text{B}^{12}$  y  $\text{B}^1$ , respectivamente (Garrison, 2009; Mann, 2000; Redden *et al.*, 2009).

El N oxidado es puesto a disposición del fitoplancton mediante movimientos de divergencia y de mezcla que lo transportan desde las capas profundas a la superficie. El N reducido procede de excreciones de organismos y de las bacterias que lo producen mediante la descomposición de organismos muertos y detritus. La producción primaria atribuible al  $\text{NO}_3^-$  es la producción nueva (PN), mientras que la atribuible al  $\text{NH}_4^+$  es la producción regenerada (PR) (Dugdale y Goering, 1967; Garrison, 2009).

Los elementos químicos son utilizados a una tasa estequiométrica (Ecuación 2) que puede considerarse casi constante en todos los océanos (Redfield *et al.* 1963) y que son conocidos como las razones de Redfield.



Con algunas excepciones, la distribución del fitoplancton corresponde a la distribución de los macronutrientes. Debido a las surgencias costeras y a los aportes continentales los niveles de nutrientes suelen aumentar cerca de los continentes. Las aguas superficiales de mar abierto reciben gran cantidad de luz, pero no de nutrientes, con excepción de la gran zona del Pacífico ecuatorial oriental que tiene la surgencia oceánica más importante. La escasez de nutrientes en mar abierto es más pronunciada en aguas tropicales, las cuales tienen un nivel de estratificación elevado entre una capa caliente y menos densa por encima de una capa fría y densa que evitan el intercambio de nutrientes. En estas áreas de baja productividad, la mayor parte del crecimiento fitoplanctónico se mantiene a través de la remineralización de materia orgánica (Contreras, 1994; Garrison, 2007; Karleskint *et al.*, 2010).

#### 2.1.3.3 Temperatura

La temperatura oceánica varía con la profundidad y la latitud. El agua más cálida se encuentra en las áreas superficiales en los océanos tropicales, y en comunidades quimiosintéticas profundas y cálidas. Las capas superficiales por término medio son más cálidas que las aguas inferiores y ejercen una fuerte influencia sobre el clima, mitigando la temperatura del aire. La distribución de la temperatura con la profundidad depende de la morfología de las cuencas oceánicas y la circulación profunda (Cognetti *et al.*, 2001; Garrison, 2009; Mann y Lazier, 2006).

La influencia de la temperatura deja notar su efecto sobre la distribución del fitoplancton en los océanos de forma directa, al incidir sobre la tasa metabólica (temperaturas cálidas incrementan la tasa a la que ocurren las reacciones químicas), e indirecta, por la estratificación de la columna de agua (Cognetti *et al.*, 2001; Garrison, 2009; Mann y Lazier, 2006).

#### 2.1.3.4 Interacciones atmósfera-océano

Existe una marcada variabilidad interanual y de largo plazo en el forzamiento físico y la respuesta biogeoquímica en el océano que puede involucrar interacciones conjuntas atmósfera-océano como es el caso de El Niño-Oscilación del Sur (Williams y Follows, 2003).

##### 2.1.3.4.1 El Niño y La Niña

El Niño (EN) es un evento climatológico recurrente y de aparición casi periódica caracterizado por 1) el debilitamiento de los vientos alisios (que soplan desde los trópicos – altas presiones subtropicales- hacia el ecuador –bajas presiones ecuatoriales- en forma más o menos constante en verano y menos constante en invierno) y 2) por el calentamiento de la capa superficial en el Océano Pacífico ecuatorial central y oriental. EN es acompañado por cambios de la oscilación sureña (SO): una oscilación interanual en la presión atmosférica entre el sudeste y el sudoeste de las aguas tropicales del Pacífico. La SO está asociada con fluctuaciones en la intensidad y la posición de zonas de aire húmedo. Estos dos procesos naturales reciben el nombre ENSO (Glantz, 2006; Gudmundson, 2006; NOAA, 2006; Philander, 1990).

La frecuencia con la que se presenta el evento es variable. Se ha sugerido que un evento El Niño menor (aquél en donde el incremento en la temperatura superficial es de unos pocos grados centígrados sobre un área relativamente pequeña) se presenta cada 2 o 3 años, y un evento mayor (acompañado por un incremento mayor en la temperatura superficial y una dispersión extensa) cada 8 a 11 años. La duración típica del evento es de 12 a 18 meses (Glantz, 2001, 2006; Gudmundson, 2006; NOAA, 2006).

En condiciones normales los vientos alisios impulsan aguas cálidas superficiales a la altura del ecuador hacia el occidente, lo que provoca el afloramiento de aguas profundas en las costas de Sudamérica y un aumento del nivel del Pacífico Occidental. Cuando se presenta El Niño la diferencia de presiones es tan modesta que los vientos alisios pueden invertir su dirección y el agua cálida vuelve a desplazarse hacia oriente, lo que provoca el calentamiento de las aguas superficiales, el hundimiento de la termoclina a lo largo de las costas sudamericanas y obliteración de afloramientos (Cognetti *et al.*, 2001).

Cuando los vientos alisios se intensifican y se incrementa la diferencia de presión entre los extremos del Pacífico ecuatorial, se desarrolla la condición La Niña (LN), la cual está



asociada con la aparición de aguas relativamente frías a lo largo del ecuador oriental (NOAA, 2006).

El Índice Oceánico El Niño (ONI: Oceanic Niño Index) ha sido el estándar de facto por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) para identificar y clasificar al evento según la intensidad con la que se presenta. Anomalías positivas en la temperatura superficial del mar en los rangos: 0.5-0.9 °C corresponden a un evento débil; 1.0-1.4 °C a un evento moderado; y mayor a 1.5 °C a un evento fuerte. Para ser considerados como episodios completamente desarrollados las anomalías han de perdurar un período mínimo de cinco meses consecutivos sobreponiéndose en trimestres estacionales (NOAA, 2010). La clasificación de la NOAA para La Niña sigue el mismo patrón pero con base en anomalías negativas de temperatura. Los eventos también se clasifican de acuerdo a su grado de afectación, duración, intensidad máxima y persistencia (Trasmonte y Silva, 2008; NOAA, 2010, 2011).

#### 2.1.3.4.2 Efectos sobre el fitoplancton

Ante la presencia de El Niño la termoclina se hunde (abate) en el Pacífico oriental (En la región occidental del Pacífico la termoclina experimenta un ascenso), y las surgencias a lo largo de las costas sudamericanas no son capaces de emerger como masas de aguas frías y ricas en nutrientes, reduciendo el suministro de los mismos hacia la zona eufótica y limitando la actividad del fitoplancton (Dajoz, 2002). Otra característica de El Niño la compone el incremento de las lluvias a lo largo de la costa sudamericana, lo que resulta en aguas más turbias y menos salinas por el incremento de sedimentos y de agua dulce provenientes de las descargas de ríos (Clarke, 2008).

Durante La Niña se favorecen los procesos biológicos por el levantamiento de la termoclina, colocándola más cerca de la superficie del mar en el Pacífico tropical oriental. El enfriamiento de las aguas disminuye la profundidad de la capa de mezcla y permite la aparición de aguas ricas en nutrientes (NOAA, 2005).

#### 2.2 Técnicas de medición de la PP oceánica

El entendimiento de la PP en los sistemas acuáticos se fundamentó en las mediciones directas de fijación de carbono catorce ( $^{14}\text{C}$ ). Posterior a esta técnica se fueron desarrollando

técnicas ópticas y biofísicas, como la percepción remota, que han extendido la cobertura espacial y temporal de las observaciones (Aguirre-Gómez, 2002), y han eliminado la desventaja que representa el intentar muestrear repetidas veces y en diferentes ocasiones sobre la misma masa de agua desde un barco o una locación específica (Williams *et al.*, 2002).

La percepción remota permite detectar y adquirir información de un objeto que se encuentra a cierta distancia y profundidad sin interactuar con éste. La tecnología satelital es un ejemplo de percepción remota que permite, entre otras cosas, realizar mediciones de las propiedades físicas del océano y estimar parámetros biológicos como la producción primaria basándose en los pigmentos fitoplanctónicos y algoritmos ópticos. A pesar de las ventajas que ofrece la percepción remota, los algoritmos ópticos se calibran contra mediciones de  $^{14}\text{C}$ , de modo que ambas técnicas se complementan (Aguirre-Gómez, 2002; Williams *et al.*, 2002).

### 2.3 Los océanos en el ciclo de carbono

Cerca de la superficie del océano las diferencias de presión parcial entre la atmósfera y el agua provocan la sustracción de  $\text{CO}_2$  atmosférico por el océano (en el caso de que la presión parcial del océano sea menor a la de la atmósfera) o la difusión de  $\text{CO}_2$  hacia la atmósfera (si la presión parcial de bióxido de carbono es mayor en el océano) (Álvarez-Borrego, 2007a).

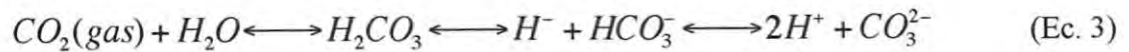
La composición de la atmósfera global actual sugiere que ha habido un efecto antropogénico sobre ésta con un incremento de  $\text{CO}_2$  (entre otros gases), con el consecuente aumento de ~110 ppm en la presión parcial atmosférica. El hombre ha contribuido con ~400 petagramos ( $10^{15}$  gramos) de carbono en forma de  $\text{CO}_2$  en un período de 200 años, de los cuales aproximadamente entre 118 y 137 petagramos de carbono han sido absorbidos por los océanos, de modo que 30% de las emisiones de carbono han sido transportadas al océano (Álvarez-Borrego, 2007a; Sabine *et al.*, 2004). En términos generales, el  $\text{CO}_2$  antropogénico en los océanos queda restringido a la capa de mezcla y globalmente sólo el 7% se encuentra por debajo de los 1500 m, siendo el Noratlántico el único lugar en donde penetra a profundidades medias y abisales (Prentice *et al.*, 2001, Sabine *et al.*, 2004).

El proceso que involucra el intercambio de  $\text{CO}_2$  atmosférico con el océano y su transportación hacia el interior del mismo ha adquirido gran relevancia por proponerse como un mecanismo natural que regula o mitiga las emisiones antropogénicas de  $\text{CO}_2$ , reduciendo el

impacto de este gas de efecto invernadero sobre los patrones del clima (Álvarez-Borrego, 2007b; Martínez-Gaxiola *et al.*, 2007).

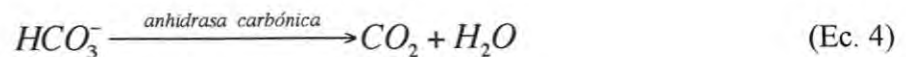
### 2.3.1 Química del ciclo de carbono oceánico

Una vez que el CO<sub>2</sub> se ha introducido por difusión molecular al agua, este queda en parte como CO<sub>2</sub> disuelto y en parte reacciona con el agua y forma ácido carbónico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), el cual se disocia para producir iones hidrógeno, bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y carbonato (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) (Ecuación 3). La distribución porcentual de estas especies varía con el pH, T °C y S, con bicarbonato como la especie más abundante, y CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> las menos abundantes (Álvarez-Borrego, 2007a; Denny, 2008).

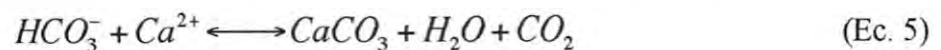


La suma de las concentraciones de todas las especies anteriores (especies químicas de CO<sub>2</sub> disuelto) se denomina CO<sub>2</sub> inorgánico total (simbolizado como TCO<sub>2</sub>, C<sub>T</sub> ó ΣCO<sub>2</sub>).

A nivel celular, la mayoría de los organismos fitoplanctónicos desprenden la molécula de agua del bicarbonato y producen CO<sub>2</sub> con la ayuda de la enzima anhidrasa carbónica (Ecuación 4). Como resultado de este proceso, los autótrofos marinos nunca se enfrentan a un problema de disponibilidad de CO<sub>2</sub> (Álvarez-Borrego, 2007a; Denny, 2008).



Los cocolitofóridos, componentes del fitoplancton, exhiben otro método para obtener CO<sub>2</sub> a partir del bicarbonato. Estos protistas construyen cocolitos calcáreos dentro de la célula, los cuales son exudados a la superficie celular (Denny, 2008). La reacción química por la que se forman los cocolitos implica la combinación del bicarbonato con un ion calcio para producir carbonato de calcio y liberar CO<sub>2</sub> para la fotosíntesis (Ecuación 5) (Denny, 2008).



### 2.3.2 Bomba biológica de carbono

Algunos organismos fitoplanctónicos como las diatomeas forman estructuras de sílice y consumen CO<sub>2</sub>; si los organismos no son consumidos por los herbívoros y son arrastrados hacia los fondos oceánicos, los océanos se comportan como sumideros de carbono en forma de materia orgánica depositada en el sedimento (la otra forma en que la que se secuestra el carbono es en forma de carbonatos inorgánicos) (Mann, 2000). Si los organismos son consumidos, el carbono pasa a otros niveles tróficos o eventualmente regresa a la atmósfera por respiración, actuando como fuente de carbono (Mann, 2000). Por ejemplo, en los mares marginales de los trópicos con formaciones de coral las aguas pueden liberar CO<sub>2</sub> a la atmósfera ya que la formación de estructuras de coral resulta en una presión parcial de bióxido de carbono ( $p\text{CO}_2$ ) más elevada. El crecimiento de cocolitofóridos también puede modificar considerablemente las tasas de carbono inorgánico y orgánico (Mann, 2000; Williams y Follows, 2003).

Los cambios en la química de los carbonatos y los procesos de eutrofización modifican la fisiología celular, la composición taxonómica y las tasas: metabólica (consumo de nutrientes), de producción primaria y calcificación (Borges y Gypens, 2010; Riebesell *et al.*, 2000; Yoshimura *et al.*, 2009). Por ejemplo, se ha sugerido que ante el incremento de CO<sub>2</sub> se reduce el estado de saturación del carbonato de calcio, lo que impacta sobre la formación de exoesqueletos en grupos de organismos planctónicos (y bentónicos), como ciertas especies de cocolitofóridos (Doney *et al.*, 2009; Iglesias-Rodríguez *et al.*, 2008; Riebesell *et al.*, 2000). En cuanto a la eutrofización, se ha encontrado que aún bajo concentraciones elevadas de CO<sub>2</sub>, la formación de estructuras y PP no se incrementa porque nutrientes como los compuestos de nitrógeno y el Fe son los limitantes (Gordillo *et al.*, 2003; Tortell, *et al.*, 2002; Schippers *et al.*, 2004).

### 2.4 El Golfo de California

El Golfo de California, o Mar de Cortés, ocupa una posición oceanográfica única dentro de los mares marginales del Océano Pacífico. Con aproximadamente ~1130 kilómetros de longitud y ~209-290 kilómetros de ancho en su parte más amplia (~80 km de ancho en la menos amplia), se sitúa como un ecosistema marino semi-cerrado y una cuenca de

evaporación entre la península de Baja California y los estados de Sonora y Sinaloa. Las características geográficas y físicas que describen a esta área, como la influencia de la circulación del Océano Pacífico, le han conferido características biológicas únicas (Álvarez-Borrego, 1983, 2007b; Heileman, 2009).

#### 2.4.1 Masas de agua y circulación

En la entrada del golfo hay tres tipos de agua superficial: 1) fría y de baja salinidad de la Corriente de California, la cual fluye en dirección sur a lo largo de la costa oeste de Baja California; 2) cálida de salinidad intermedia proveniente del Pacífico Tropical Oriental que fluye al área desde el sur; y 3) cálida de salinidad elevada propia del golfo. Existe una estacionalidad marcada en la distribución de estas masas de agua. Durante el invierno e inicios de la primavera el agua del Pacífico Tropical Oriental está presente sólo en la boca del golfo, mientras que a finales de la primavera y durante el verano y otoño esta agua invade hasta el sur de la isla Ángel de la Guarda (Álvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979; Lavín y Marinone, 2003; Roden y Groves, 1959). En invierno también hay movimientos de agua convectivos (transferencia de masa y calor entre fluidos) en la cabeza del golfo. Agua muy salina y fría se hunde de la superficie en la zona norte más extrema del golfo y se mueve en dirección sur en el fondo (Álvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979). Además de las masas de agua superficiales, en el Golfo de California se distinguen otras tres masas de agua: agua Subtropical Subsuperficial, agua Intermedia del Pacífico y agua Profunda del Pacífico, las dos últimas presentes únicamente al sur de las Islas Tiburón y Ángel de la Guarda (Álvarez-Borrego, 2010b).

#### 2.4.2 Mareas

Las mareas en el Golfo de California se producen por co-oscilación con el Océano Pacífico adyacente. La circulación del agua por corrientes de marea se debe a ciclos diurnos, semi-diurnos y quincenales. La onda de marea es progresiva viajando en dirección norte. La diferencia de tiempo de marea entre la entrada y la proximidad del Río Colorado es de aproximadamente 5.5 horas para mareas altas y 6 horas para mareas bajas, lo que genera que las mareas bajas en un extremo del golfo ocurran casi al mismo tiempo que las mareas altas en el otro extremo. El rango de mareas va de >7 metros en el alto golfo a >4 m en la región de las

islas centrales. La mezcla por mareas en esta última región produce una agitación intensa en la columna de agua hasta >500 m de profundidad con el consecuente afloramiento (por mezcla vertical intensa) de aguas frías y ricas en nutrientes (Simpson *et al.*, 1994), generando una situación ecológica parecida a las surgencias (Álvarez-Borrego, 2010b).

#### 2.4.3 Temperatura

La temperatura superficial en el golfo exhibe una estacionalidad sobresaliente. Las temperaturas más elevadas se registran en los meses de agosto y septiembre (30 – 31 °C) al sur del cinturón de las islas grandes. Entre octubre y noviembre la temperatura desciende hasta 20 °C en la región norte, y alrededor de 7 °C en las regiones centrales y sur. El rango anual promedio está descrito por la diferencia dada por 9 °C en la boca y 22 °C en la cabeza del golfo. La temperatura en el golfo es cálida de abril a septiembre-octubre (condición de verano) y fría durante el resto de los meses (condición de invierno) con noviembre como mes de transición (Álvarez-Borrego, 2010b).

#### 2.4.4 Vientos y surgencias

Los vientos en el golfo son extremadamente variables y de carácter monzón, soplando vientos fríos y secos desde el noroeste en el invierno, y vientos húmedos desde el sureste (con dirección norte) en verano. En las regiones alejadas de la costa prevalecen los vientos noroccidentales desde noviembre hasta mayo. Los vientos sudorientales prevalecen durante el resto del año (Álvarez-Borrego, 1983; Marinone *et al.*, 2004; Roden, 1964). La circulación y la estructura termohalina en la capa superficial tienen una variación estacional muy marcada debido al sistema de vientos, los flujos de calor y humedad y la influencia del Océano Pacífico. Estos elementos determinan que la circulación en el golfo sea vigorosa y que se presenten surgencias estacionales (Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991; Lavín y Marinone, 2003). A inicios de junio y hasta el mes de septiembre las aguas cálidas invaden las costas (este) de Sonora y Sinaloa y se presentan surgencias en la costa (oeste) de Baja California con vientos sudorientales (que soplan en condiciones de verano desde julio hasta octubre). Noviembre es el mes de transición y acontece la situación opuesta en las regiones central y norte, con temperaturas más altas en la costa de Baja California y surgencias en la costa este con vientos noroeste (soplan en condiciones de invierno de diciembre a mayo, siendo junio el

mes de cambio para invertir las condiciones). Las surgencias sobre la costa de Baja California tienen un efecto débil sobre la biomasa fitoplanctónica (Santamaría-Del-Ángel *et al.*, 1999; Álvarez-Borrego, 2010b). El efecto de las surgencias y la mezcla intensa por mareas mantiene mínimos de temperatura superficial y concentraciones máximas de nutrientes superficiales y carbono orgánico disuelto alrededor de las islas centrales todo el año, con efectos perceptibles sobre la comunidad fitoplanctónica (Álvarez-Borrego, 2010b).

#### 2.4.5 Productividad primaria

El Golfo de California tiene tres mecanismos de fertilización natural: las surgencias inducidas por los vientos, el patrón de mezcla por mareas, y el intercambio de agua con el Océano Pacífico (Álvarez-Borrego, 2010b). Cabe destacar que en algunas zonas del golfo otros factores como la hidrografía actúan a favor de una productividad elevada. Por ejemplo, las zonas del golfo con aguas pobres en oxígeno y ricas en nutrientes a profundidad somera, requieren poca energía para que estos nutrientes alcancen la zona eufótica. En otras regiones del golfo las condiciones topográficas y los procesos físicos propios de la región pueden generar que el agua (fría) permanezca “atrapada”. Otros factores moduladores de la productividad, aunque en una escala mucho menor, son los filamentos y lengüetas que parecen estar asociados con los giros en las cuencas, las surgencias y los frentes termales inducidos por la mezcla de mareas (Álvarez-Borrego, 2007b, 2010b; Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991; Lavín y Marinone, 2003).

En la escala de clasificación de los grandes ecosistemas marinos, el Golfo de California está considerado dentro de la Clase I, como un ecosistema altamente productivo ( $>300 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ), y como uno de los cinco ecosistemas marinos más productivos a escala global (Álvarez-Borrego, 1983, 2007b; Heileman, 2009). Existen variaciones a escala estacional (asociadas a las surgencias), que evidencian una PP más alta durante invierno (Lluch-Cota *et al.*, 2004). En referencia a la abundancia de fitoplancton, ésta tiende a incrementarse de la boca hacia el interior del golfo. La abundancia más grande se ha reportado en la cuenca de Guaymas (Álvarez-Borrego, 1983). Considerando la distribución promedio de fitoplancton y clorofila el golfo se ha dividido en tres regiones geográficas: la región sur y oligotrófica ( $25^\circ \text{ N}$ ), la región central y mesotrófica ( $25^\circ \text{ N}$  y  $27^\circ \text{ N}$ ), y la región norte y eutrófica (por encima de los  $27^\circ \text{ N}$ ) (Espinosa-Carreón y Valdez-Holguín, 2007).

Los fenómenos El Niño y La Niña (así como la Oscilación “Decadal” del Pacífico) constituyen una fuente de variabilidad interanual oceanográfica en el Golfo de California. Se han documentado cambios en el fitoplancton, escasos o nulos cambios en el zooplancton, y especies de interés pesquero (por ejemplo: calamar gigante, sardina, anchoveta), así como especies de mamíferos y aves marinas (Lluch-Cota *et al.*, 2004). En algunas regiones, como las islas y el centro del golfo, los procesos físicos que mantienen los nutrientes superficiales elevados sosiegan los efectos de El Niño sobre la biomasa fitoplanctónica y PP (Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991; Álvarez-Borrego, 2010b; Kahru, 2004; Santamaría del Ángel *et al.*, 1994a; Valdez-Holguín, 1986).

#### 2.4.5.1 Productividad nueva y regenerada

Mann y Lazier (2006) señalan que la distribución vertical de nitrato en aguas tropicales se mantiene más o menos constante y baja en la superficie durante todo el año, lo que hace que la PP sea atribuible principalmente a la producción regenerada, y no a la producción nueva relacionada con el suplemento de nitrato de aguas profundas. Por otro lado, en aguas templadas (como el Golfo de California) la estructura vertical cambia estacionalmente: la profundidad de la capa de mezcla disminuye de invierno a verano, y la difusión vertical de nitrato hacia la zona eufótica incrementa la PP durante la primavera; mientras que la estructura de finales de verano (agua cálida y persistentemente estratificada) de las zonas templadas tiene una apariencia muy similar a la estructura tropical con poco nitrato en la capa de mezcla asociado a una producción fitoplanctónica baja y limitada por el flujo vertical de nitrato (Mann y Lazier, 2006). La demanda fitoplanctónica de nitrógeno durante el verano en las cuencas centrales (Guaymas y Carmen) del Golfo de California es provista en un 35 % a 48 % por la fijación de nitrógeno realizada por organismos diazotófos que transforman el nitrógeno atmosférico a amonio, quedando evidenciando que un porcentaje considerable de la PP durante esta estación es atribuible a la producción regenerada (White *et al.*, 2007).

La información bibliográfica que documenta la presente investigación condujo a plantear la siguiente hipótesis y objetivos.



### III. HIPÓTESIS

El incremento de la temperatura superficial del mar durante condiciones interanuales El Niño y condiciones estacionales de verano y otoño, ocasionan un decremento en la productividad primaria en el Golfo de California, particularmente en las regiones centro y sur del golfo. El decremento de la temperatura superficial del mar durante condiciones interanuales La Niña y condiciones estacionales de invierno y primavera generan un incremento de productividad primaria.

## IV. OBJETIVOS

### 4.1 Objetivo general

Determinar las condiciones interanuales y estacionales bajo las cuales la clorofila *a* y productividad primaria alcanzan los valores máximos y mínimos en las grandes islas, el centro y la boca del Golfo de California.

### 4.2 Objetivos particulares

Describir la variabilidad temporal de la TSM, Chl y PP en función de las escalas: anual, estacional e interanual.

Describir la variabilidad espacial de la TSM, Chl y PP en función de las regiones: islas, centro y boca.

Identificar la relación entre la intensidad de los eventos El Niño y La Niña con las variaciones de TSM, Chl y PP.

Estimar el tiempo de incidencia de los eventos El Niño y La Niña a través de las anomalías estacionales de TSM, Chl y PP.

Calcular el porcentaje de variabilidad de Chl y de PP explicado por la TSM.

Estimar la producción nueva y producción regenerada a partir de los valores de PP.

## V. MATERIALES Y MÉTODOS

La variabilidad de la temperatura superficial del mar (TSM), clorofila  $a$  (Chl) y PP (PP) en el Golfo de California se analizó con herramientas de percepción remota.

### 5.1 Regionalización

Para el estudio regional se dividió al Golfo de California (fig. 1) en: 1) la región de las islas grandes (Tiburón y Ángel de la Guarda) (el término islas es aplicado en el resto de este trabajo para referirse a esta región), 2) la región central (referida de aquí en adelante también con el término centro), y 3) la región de la boca o entrada del golfo.

Para obtener la información geográfica (coordenadas y extensión) de cada región se utilizó la herramienta Google Earth (<http://www.google.com/earth/>). Cada extremo limitante de los rectángulos que definieron las regiones se ubicó cinco kilómetros fuera de la costa. Las coordenadas que limitaron las regiones se enlistan en la tabla 1 y se ilustran en la figura 1.

Las regiones fueron trazadas como polígonos irregulares de cuatro lados. Los polígonos fueron triangulados para calcular el área superficial (Tabla 1).

Al considerar que el Golfo de California tiene un área superficial aproximada de  $\sim 160,000 \text{ km}^2$ , las regiones en este trabajo cubrieron el 66.48 % de la superficie del golfo ( $106,371.5 \text{ km}^2$ ).

### 5.2 Especificaciones de los sensores y descarga de datos satelitales

Se determinó una escala temporal que va de otoño (septiembre) de 1997 a otoño (septiembre) de 2010 en la escala regional, y de otoño (octubre) de 1997 a la primavera (abril) de 2010 en la escala global. Para los trece años comprendidos en la serie de tiempo se obtuvo información de TSM, Chl y PP para la escala regional (exceptuando septiembre de 1997). La PP a escala global se trabajó únicamente para el período de otoño de 1997 a invierno (diciembre) de 2007 (10 años).

A escala regional se trabajó con datos satelitales obtenidos como matrices de datos en formato “archivo de texto” (.txt). A escala global se trabajó con datos satelitales obtenidos en dos formatos distintos: imágenes satelitales en formato .hdf (Hierarchical Data Format) y matrices de datos (.txt). Las matrices de datos, en todos los casos en las que fueron utilizadas para todo el golfo, se descargaron para el área limitada por los paralelos a 20° 34' 24.78" N y 31° 42' 57.46" N, y los meridianos a 105° 12' 41.04" W y 114° 44' 57.24" W. Las imágenes de satélite se delimitaron geográficamente por las costas, exceptuando la porción de la boca del golfo adyacente al Pacífico, la cual se delimitó de acuerdo a los paralelos 22° 49' 27.75" N y 20° 21' 1.70" N, y los meridianos 109° 55' 15.23" W y 105° 38.2' 5.02" W.

Tabla 1. Especificaciones de las áreas de estudio en el Golfo de California.

<i>Región</i>	<i>Longitudes del polígono (km)</i> <i>Coordenadas limitantes del polígono</i>	<i>Área superficial calculada</i>
Islas	199 km + 109 km + 197 km + 80 km 29°39'54.49" N – 113°55'37.55" W	17,856 km <sup>2</sup>
	28°14'48.24" N – 112°40'32.03" W	
	30°11'54.32" N – 112°56'45.37" W	
	28°37'55.27" N – 111°57'42.55" W	
Centro	125 km + 107 km + 125 km + 113 km 27°26'16.50" N – 112°09'58.86" W	12,665 km <sup>2</sup>
	26°34'49.51" N – 111°21'42.33" W	
	27°55'49.26" N – 111°15'08.39" W	
	27°05'24.52" N – 110°23'16.84" W	
Boca	486 km + 120 km + 336 km + 289 km 22°45'39.57" N – 109°49'27.89" W	75,850 km <sup>2</sup>
	20°30'11.14" N – 105°45'05.66" W	
	24°05'16.92" N – 107°22'36.87" W	
	21°34'15.84" N – 105°31'34.72" W	

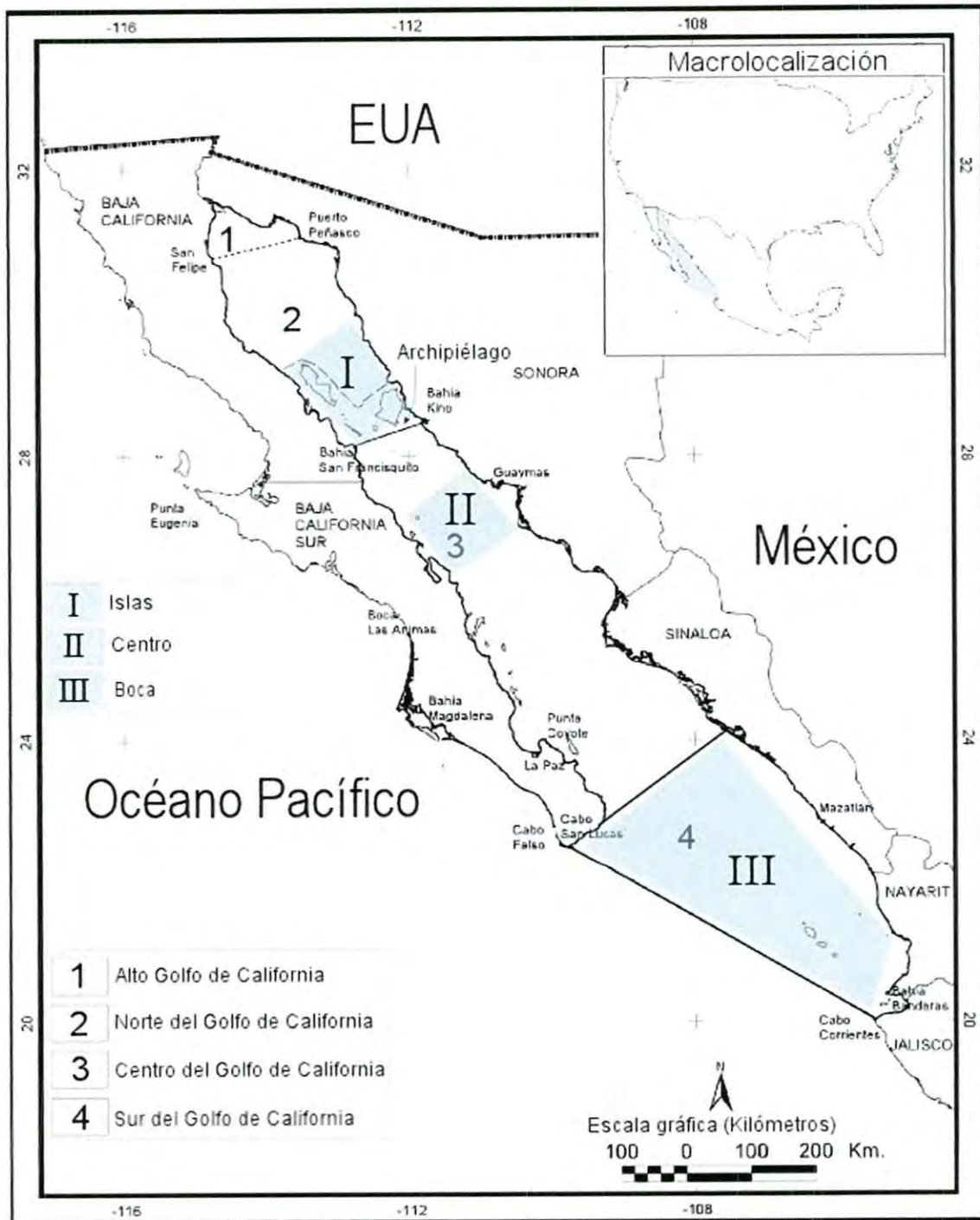


Figura 1. Golfo de California. En números romanos se señalan las regiones de estudio de este trabajo. En números arábigos se señala la regionalización hecha por Lavín y Marinone (2003).

### 5.2.1 Temperatura superficial del mar

Al acceder a la página Ocean Watch North Pacific Demonstration Project (<http://las.pfeg.noaa.gov/oceanWatch/>), un servidor de acceso directo que reúne información derivada de datos satelitales de diversos sensores, se descargaron las matrices mensuales de temperatura superficial del mar (TSM, o SST por sus siglas en inglés: *Sea Surface Temperature*) para cada región de estudio. Las composiciones mensuales se descargaron en formato de tablas o matrices de datos. Para acceder a las matrices, se introdujeron las coordenadas de las regiones en el servidor, se seleccionó el tipo de descarga “mapa de latitud” con formato de salida .txt, y finalmente se eligió el sensor según la cobertura global y la resolución, así como los parámetros de la variable (composiciones mensuales de temperatura diurna). La información se obtiene en unidades de grados centígrados. En el estudio regional se emplearon dos juegos de datos de sensores distintos.

En todas las regiones, para el período de septiembre de 1997 a diciembre de 2007, se utilizó información del sensor Radiómetro Avanzado de Resolución Muy Elevada (AVHRR: *Advanced Very High Resolution Radiometer*) de la NOAA, el cual está a bordo del satélite POES (*Polar Operational Environmental Satellite*). Las composiciones mensuales producto de este sensor tienen una resolución de 4 km (la mejor resolución posible a escala global) y una línea de cuadrícula espacial de coordenadas geográficas de 0.05 grados latitud por 0.05 grados longitud. La precisión de los datos obtenidos por este sensor, cuya cobertura temporal (disponible a la fecha de haber descargado la información para este trabajo) va de enero de 1985 a diciembre de 2007, es de  $\pm 0.3$  grados centígrados. El sensor posee cobertura de área global (GAC: *Global Area Coverage*).

Los datos que se obtienen de este sensor (*Pathfinder version 5.0 sea surface temperatura data set*) son considerados como los datos de temperatura superficial del mar de mejor calidad para muchas regiones del mundo y se recomienda sean utilizados para todas las aplicaciones y fines científicos, excepto para áreas costeras que requieren una cuadrícula espacial más fina. Estos datos son producidos por el Centro Oceanográfico Nacional de Datos (NODC: *National Oceanographic Data Center*) de la NOAA, la Universidad de Miami (UM) y el Jet Propulsion Laboratory en el Instituto de Tecnología de California. Los datos generados por estas instituciones científicas son composiciones de pases satelitales ascendentes y descendentes a las que se les ha aplicado correcciones de calidad conservadoras. Las

mediciones de radiancia del AVHRR son submuestreadas a bordo del satélite y descargadas en estaciones en donde el procesamiento Pathfinder utiliza el algoritmo no-lineal de la temperatura superficial del mar (NLSST) de Walton *et al.* (1998) (Ecuaciones 6 y 7) con modificaciones de Kilpatrick *et al.* (2001), en donde se incluyen corrección atmosférica mejorada, enmascaramiento de nubes y re-cálculo de coeficientes algorítmicos basados en los datos correspondientes a mediciones de temperatura superficial del mar *in situ* (boyas fijas y a la deriva) (Oesch, 2004). Los datos son mapeados en una cuadrícula de ángulos iguales utilizando una media aritmética simple para generar imágenes individuales y composiciones de duración semanal y mensual. Las composiciones mensuales se generan utilizando únicamente los píxeles de mejor calidad (NOAA *et al.*, 2011).

$$\text{NLSST} = A1T11) + A2 (T11-T12) (\text{MCSST}) + A3 (T11-T12) (\text{Secq} - 1) - A4 \quad (\text{Ec. 6})$$

$$\text{MCSST} = B1 (T11) + B2 (T11-T12) + B3 (T11-T12) (\text{Secq} - 1) - B4 \quad (\text{Ec. 7})$$

En donde T11 y T12 son los canales de temperatura AVHRR 11 y 12 en grados kelvin; Secq es la secante del ángulo q del satélite al zenit; NLSST y MCSST son los canales multi-canales SST no lineales y lineales, respectivamente, en grados centígrados; A1-A4 y B1-B4 son coeficientes constantes (<http://manati.wwb.noaa.gov/sst/coefficient.html>).

Las matrices de temperatura superficial del mar de las tres regiones para el período enero de 2008 a septiembre de 2010 se obtuvieron del juego de datos fusionados (por el programa NOAA CoastWatch) que derivan de sensores de infrarrojo sobre varias plataformas. Los instrumentos satelitales que emplean microondas pueden medir la temperatura del océano aún en la presencia de nubes, aunque la resolución es burda cuando se consideran las características típicas del ambiente costero. Estos datos se complementan y conjuntan con mediciones relativamente finas de los sensores infrarrojos. Los datos fusionados (BSST: *Blended Sea Surface Temperature*) tienen una resolución espacial moderada y aproximada de 11 km para el océano global y son mapeados con una línea de cuadrícula espacial de coordenadas geográficas de 0.05 grados latitud por 0.05 grados longitud. Se utilizan medias aritméticas para componer imágenes de cinco días de duración, semanales y mensuales. La cobertura temporal de los productos va de julio de 2002 a la fecha presente. Las

mediciones son realizadas por el Radiómetro Avanzado de barrido de Microondas-E de Japón (AMSR-E: *Japan's Advanced Microwave Scanning Radiometer*), un sensor de radiancia pasivo sobre el satélite Aqua de la Administración Nacional Aeronáutica y Espacial de EUA (NASA: *National Aeronautic and Space Administration*), AVHRR, el Radiómetro de Imágenes Imager a bordo de un Satélite Geoestacionario Operacional Ambiental (GOES: *Geostationary Operational Environmental Satellites*) y por el Espectroradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS: *Moderate Resolution Imaging Spectrometer*) sobre el satélite Aqua de la NASA (NOAA CoastWatch Program, *et al.*, 2011c).

A escala global, los datos de temperatura superficial del mar para el período febrero de 2000 a abril 2010 se obtuvieron descargando imágenes satelitales del sensor MODIS desde la página Ocean Color (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>). Estos productos están disponibles en tres niveles y son procesados (calibración y corrección atmosférica) y distribuidos por el GSFC (NASA, 2010).

Los productos globales para este estudio se descargaron del sensor MODIS, situado a bordo del satélite Terra de la NASA, con resolución de nivel L2 en formato HDF (el nivel L2 corresponde a una resolución de 9 km para este sensor). Los productos descargados fueron de cobertura local (LAC: *Local Area Coverage*) y resolución temporal diaria. Para cada mes del período se obtuvieron  $n$  imágenes diarias, en donde  $n$  correspondió al número de imágenes claras y completas del área de estudio disponibles para su descarga. Las imágenes se seleccionaron a través del catálogo de imágenes de la página Ocean Color (con dirección electrónica <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/browse.pl?sen=am>).

La información anterior a febrero de 2000 (octubre de 1997 a marzo de 2000) se descargó del sensor AVHRR como matrices de datos (.txt) mensuales de la página Ocean Watch North Pacific Demonstration Project bajo la metodología y las especificaciones previamente descritas y realizadas para la escala regional.

En total se descargaron 157 composiciones mensuales de temperatura superficial por región (de las cuales 134 fueron del AVHRR y 33 fueron BSST).

Para todo el golfo se descargaron 151 composiciones mensuales de temperatura superficial (121 de MODIS en formato .hdf y 30 de AVHRR en formato .txt).



### 5.2.2 Concentración de clorofila *a*

Los datos regionales de clorofila *a* (Chl) se obtuvieron ingresando a la página del Ocean Watch North Pacific Demonstration Project. Se descargaron las matrices mensuales de Chl para cada región de estudio desde septiembre de 1997 hasta septiembre de 2010. Para el acceso a las matrices se introdujeron las coordenadas de las regiones en el servidor, eligiendo el sensor según la cobertura global y la resolución, así como los parámetros de la variable (composiciones mensuales de Chl). Para el estudio regional de Chl se utilizaron juegos de datos complementarios de dos sensores. La información se obtiene en unidades de miligramos de clorofila por metro cúbico ( $\text{mg m}^{-3}$ ).

En todas las regiones, para el período de septiembre de 1997 a diciembre de 2010 (con excepción de los meses febrero, marzo y julio de 2008, y mayo, septiembre y octubre de 2009), se utilizó información del Sensor de Campo Visual Amplio del Mar (SeaWiFS: *Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor*), sensor de color del océano de ocho canales sobre el satélite SeaStar (también denominado GeoEye Orbview-2). Los datos son procesados de las radiancias de salida del agua normalizadas por unidad de Chl utilizando el algoritmo NASA/GSFC SeaWiFS Project OC4v4 (Ecuación 8), el cual emplea la reflectancia a las longitudes de onda central en las bandas de 490 nm y 550 nm correspondientes a las bandas espectrales tres y cinco del sensor SeaWiFS (Pan *et al.*, 2010).

La validación de los datos por la NOAA se hace por medio de comparaciones con mediciones *in situ* de Chl logradas por cruceros y boyas. Las validaciones de la NASA operan de forma similar. Los datos tienen una resolución temporal (diaria) que va de septiembre de 1997 al presente. La cobertura espacial es global (180 ° O a 180 ° E de longitud, 75 ° S a 75 ° N latitud). Los datos descargables por este método tienen una resolución de 10 km y son mapeados en una línea de cuadrícula de 0.1 grados latitud por 0.1 grados de longitud para el océano global. La precisión nominal es de  $\pm 30\%$  para las composiciones de duración semanal y mensual (NOAA CoastWatch Program *et al.*, 2011a).

$$\text{Log}_{10}(\text{Chl}) = a_0 + a_1R + a_2R^2 + a_3R^3 + a_4R^4 \quad (\text{Ec. 8})$$

$$a = [0.366, -3.067, 1.930, 0.649, -1.532] \quad R = \log_{10}(R_{rs\ 443} > R_{rs\ 490} > R_{rs\ 410} / R_{rs\ 555})$$

En donde  $a_0 - a_4$  son los coeficientes constantes de la ecuación y  $R^{rs}$  es la reflectancia remotamente sensada en las bandas espectrales visibles (443, 490, 510 y 555 nm).

Los seis meses que no fueron cubiertos por las composiciones mensuales del SeaWiFS se descargaron del sensor MODIS para todas las regiones. El procesamiento de los datos de este sensor consta en aplicar correcciones atmosféricas a los mismos a fin de generar mediciones de las radiancias de salida emitidas por el agua. Estas radiancias son convertidas a Chl utilizando el algoritmo OC3M desarrollado por la NASA (Ecuación 9). El algoritmo es análogo al OC4v4, pero con ajustes a las bandas específicas disponibles en el sensor MODIS (Pan *et al.*, 2010).

La validación de los datos se hace por comparación con mediciones *in situ* realizadas a través de boyas como parte del Experimento de Caracterización Marina Óptica (MOCE: *Marine Optical Characterization Experiment*). La cobertura espacial del sensor es global y la cobertura espacial va de julio de 2002 a la fecha. Los datos de la cuenca del Pacífico poseen una resolución de 5.5 km. Los datos son mapeados en una línea de cuadrícula de 0.05 grados latitud por 0.05 grados longitud utilizando medias aritméticas simples a fin de generar composiciones semanales y mensuales, ambos tipos con una precisión de  $\pm 40\%$  (NOAA CoastWatch Program *et al.*, 2011b).

$$\begin{aligned} \text{Log}_{10}(\text{Chl}) &= a_0 + a_1R + a_2R^2 + a_3R^3 + a_4R^4 & (\text{Ec. 9}) \\ a &= [0.2830, -2.753, 1.457, 0.659, -1.403] \\ R &= \log_{10}(R_{rs\ 443} > R_{rs\ 488} / R_{rs\ 551}) \end{aligned}$$

En donde  $a_0 - a_4$  son los coeficientes constantes de la ecuación, y  $R_{rs}$  es la reflectancia remotamente sensada en las bandas espectrales visibles (443, 488 y 551 nm).

Cabe tener presente la observación de que a pesar de que el procesamiento por la NASA de los datos del sensor MODIS implica el uso del software Sistema de Análisis de Datos SeaWiFS (SeaDAS: *SeaWiFS Data Analysis System*) y de usar un algoritmo análogo al del SeaWiFS, si los datos son comparados con aquellos obtenidos por este último sensor, éstos pueden diferir entre ellos, a la vez que los datos de ambos sensores pueden diferir sustancialmente de mediciones *in situ* de alta calidad (NOAA CoastWatch Program *et al.*, 2011b).

A escala global, para el período de octubre 1997 a abril de 2010 (con excepción de algunos meses) se descargaron imágenes satelitales (.hdf) nivel L2 del sensor SeaWiFS desde la página Ocean Color. El nivel L2 corresponde a una resolución de 1 km para este sensor. Las imágenes descargadas fueron de cobertura local y resolución diaria. La selección y descarga de imágenes siguió la misma metodología y criterios descritos en la sección 4.2.1.

La información de los meses (enero, mayo y agosto de 2006; enero y febrero de 2007; marzo y julio de 2008; mayo, septiembre a diciembre de 2009; y enero a abril de 2010) de los cuales no se pudieron obtener productos claros y completos del SeaWiFS fue complementada con información del sensor MODIS (en formato hdf). A estos productos se les dio el mismo tratamiento que a TSM obtenidos de este mismo sensor en formato de imágenes satelitales (*ver sección 4.2.1*).

A escala regional se descargaron 157 composiciones mensuales por región (151 SeaWiFS y 6 MODIS, todas en formato .txt).

A escala global se descargaron 151 composiciones mensuales (135 de SeaWiFS y 16 de MODIS, todas en formato .hdf).

### 5.2.3 Productividad primaria

Las matrices mensuales de productividad primaria (PP) del período de noviembre de 1997 a septiembre de 2010 para la escala regional, y de noviembre de 1997 a diciembre de 2007 para la escala global, se descargaron siguiendo la metodología de acceso a la información satelital descrita para TSM y Chl.

Para el estudio regional de la PP se utilizaron juegos de datos complementarios de dos sensores distintos. Los datos se obtienen en unidades de mg de carbono por metro cuadrado por día ( $\text{mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ). Por conveniencia los valores en este estudio se convirtieron a gramos de carbono por metro cuadrado por día ( $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ).

Tanto para la escala regional, como para la escala global, para el período noviembre de 1997 a diciembre de 2007, se descargaron composiciones mensuales de PP derivadas de información de los sensores SeaWiFS-Pathfinder (SP). La cobertura de la información SP es global y la cobertura temporal va de 1997 a la fecha.

El programa NOAA Coast Watch provee las mediciones de PP como un producto estándar en la página Ocean Color, y es calculado de Chl y SST de MODIS, y PAR<sub>o</sub> de SeaWiFS (PAR<sub>o</sub> es la radiación fotosintéticamente activa, por sus siglas en inglés, incidente en la superficie del mar), usando el modelo de producción verticalmente generalizado (VGPM por sus siglas en inglés) de Behrenfeld y Falkowski (1997) (Ecuación 10).

$$PP = P_{opt}^b f(PAR_o) DL Chl_{sat} Z_{eu} \text{ mg C m}^{-2} \text{ día}^{-1}, \quad (\text{Ec. 10})$$

En donde  $P_{opt}^b$  es la razón fotosintética (fotosíntesis por unidad de Chl) en el óptimo de luz en la columna de agua ( $\text{mgC mgChl}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ),  $f(PAR_o)$  es una función que representa el efecto de la luz en toda la zona eufótica y a través de todo el día, DL es la longitud del día en horas (de acuerdo a la latitud y fecha), y  $Z_{eu}$  es la profundidad de la zona eufótica (m) calculada con Chl de acuerdo con Morel y Berthon (1989).

El VGPM es un modelo de producción no-espectral, con distribución vertical homogénea de biomasa fitoplanctónica, e integrado verticalmente (Forsythe *et al.*, 1995; Reynolds *et al.*, 2002).

En la escala regional y para el período enero de 2008 a septiembre de 2010 (con excepción de los meses de abril, octubre y diciembre de 2008, para los cuales, a la fecha de término de este estudio, no existían composiciones de PP en el servidor) se descargaron composiciones mensuales de PP construidas con información de los sensores MODIS y Pathfinder (MP).

Es importante tener en consideración que los datos de PP de la NOAA CoastWatch Program *et al.* (2011d, 2011e) aún están considerados en fase experimental y son distribuidos para su evaluación científica.

En total se descargaron 151 composiciones mensuales de PP por región (122 SeaWiFS-Pathfinder y 29 MODIS-Pathfinder).

A escala global se descargaron 122 matrices de PP para el período noviembre de 1997 a diciembre de 2007 (todas derivadas de información SeaWiFS-Pathfinder).

### 5.3 Procesamiento de la información

Una vez descargadas las composiciones mensuales (matrices de datos), de cualquiera de las variables y cualquiera de las escalas, los datos se colocaban en una hoja de trabajo de un paquete estadístico con un arreglo en columnas. Posterior al acomodo se procedió con el tratamiento estadístico básico e inferencial descrito a continuación. Para todos los análisis estadísticos se emplearon los programas Statistica (Versión 7) y NCSS (2007).

Los productos en formato .hdf (imágenes) fueron procesados en el programa Visat (Versión 4.7) (<http://www.brockmann-consult.de/cms/web/beam>), una herramienta de acceso libre desarrollada específicamente para la visualización, análisis y procesamiento de datos de sensores remotos. Con esta herramienta se obtuvo la matriz de datos diaria a partir de las imágenes georeferenciadas de los sensores SeaWiFS y MODIS. Para cada imagen descargada correspondió una matriz de datos que fue procesada con un filtro a fin de eliminar todos los valores que correspondían a contaminación atmosférica, nubes o porciones continentales (que el programa define como valores N/A). Los datos de las matrices diarias de un mes dado se fusionaron a fin de generar una única matriz mensual (composición mensual).

La metodología descrita en los siguientes apartados (5.3.1 y 5.3.2) fue aplicada en todas las variables (TSM, Chl y PP), repitiendo el procedimiento para cada una de las regiones, así como para la escala global.

#### 5.3.1 Diseño experimental

Los datos promedio mensuales se generaron introduciendo la información satelital de las matrices en los paquetes estadísticos y aplicando la función de estadística descriptiva. Los datos promedio también fueron obtenidos a escala estacional, anual e interanual (de condición El Niño, La Niña, y “normal”).

Para construir el promedio estacional de invierno se consideraron los meses de diciembre, enero y febrero; marzo, abril y mayo para primavera; junio, julio y agosto para verano; y septiembre, octubre y noviembre para otoño.

A partir de los promedios estacionales, obtenidos considerando los 14 años de la serie de tiempo, se calcularon las medias climatológicas ( $\mu_c$ ) estacionales: invierno ( $\mu_{ci}$ ), primavera ( $\mu_{cp}$ ), verano ( $\mu_{cv}$ ), y otoño ( $\mu_{co}$ ). El cálculo de las anomalías de cada estación considerados

con relación a su  $\mu_c$  (Ecuación 11) se realizó de acuerdo a la relación descrita en la metodología empleada por Aguirre-Gómez y Salmerón-García (2007). Las anomalías calculadas se emplearon para estimar los tiempos de recuperación de PP.

Para generar los promedios interanuales se consideraron todos los meses de la serie de tiempo descritos por condiciones El Niño y, por separado, todos los meses de la serie de tiempo bajo la condición La Niña. A su vez, se obtuvieron promedios interanuales para cada uno de los eventos abarcados en la serie de tiempo (Tabla 2).

$$AChl = Est_i - \mu_c \quad (\text{Ec. 11})$$

En donde AChl es la anomalía de Chl, Est representa la estación del año (pudiendo ser invierno, primavera, verano u otoño), el subíndice  $i$  varía de acuerdo al año considerado y  $\mu_c$  es la media climatológica de cada período estacional.

La última La Niña considerada en este estudio no se abarcó en su totalidad, incluyéndose únicamente los tres meses iniciales (julio, agosto y septiembre de 2010) en el caso de la escala regional, y excluyéndose por completo a escala global. Asimismo, en esta investigación no están incluidos los cuatro meses iniciales (mayo a agosto de 1997) del primer El Niño de la serie de tiempo analizada a escala regional, y se excluyen los cinco meses iniciales de este mismo evento en la escala global.

Tabla 2. Eventos El Niño y La Niña de 1997 a 2010 y su intensidad según información de la NOAA.

<i>El Niño</i>	<i>La Niña</i>
1997-1998 (fuerte)	1998-2000 (moderado)
2002-2003 (moderado)	2000-2001 (débil)
2004-2005 (débil)	2007-2008 (moderado)
2006-2007 (débil)	2010 (moderado – fuerte)
2009-2010 (fuerte)	

### 5.3.2 Análisis estadístico multitemporal y multiespacial

Para el análisis de los resultados se utilizó la prueba de análisis de varianza de una y dos vías utilizando los factores fijos especificados en la tabla 3. Para detectar diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) se empleó la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey-Kramer.

Tabla 3. Factores fijos utilizados para el análisis de varianza a escala regional y \*global.

<i>Factores para el análisis de una vía</i>	<i>Factores para el análisis de dos vías</i>
Año*	Estación del año vs. condición*
Estación del año*	Estación del año vs. región geográfica
Condición climatológica*	Condición vs. región geográfica
Región geográfica	

### 5.3.3. Correlación de variables

En adición al análisis de varianza se realizaron pruebas de correlación de Spearman con un nivel de significancia de  $p < 0.05$ . Las correlaciones se hicieron entre variables, así como entre variables vs. condición climatológica y/o estación del año. Se obtuvieron los coeficientes de correlación y determinación para todos los casos a escala regional y global.

### 5.3.4 Estimación de carbono fijado

Bajo las consideraciones de Mann y Lazier (2006) y White *et al.* (2007), se supuso que la PP en verano en el Golfo de California queda limitada a la producción basada en la regeneración de nutrientes. Para inferir los valores de producción primaria atribuibles a la producción regenerada y producción nueva se consideró: 1) a la media de PP de verano más baja promediada en la serie de tiempo para todo el golfo como el indicador de una producción primaria atribuible al 100% a la producción regenerada, y 2) que cualquier valor por encima del promedio más bajo de verano representa la producción atribuible a la producción nueva. Las inferencias de producción regenerada y nueva se hicieron utilizando los datos promedio obtenidos de acuerdo a la metodología previamente descrita, y fueron extrapoladas al área superficial abarcada en este estudio (Tabla 1) a fin de calcular las toneladas de carbono por año fijadas por región.

## VI. RESULTADOS

### 6.1 Resultados regionales

#### 6.1.1 Climatología y PP anual

##### 6.1.1.1 Islas

La temperatura superficial anual promedio en la región de las islas (Tabla 1, fig. 1) fue de 23.24 °C, sin haberse encontrado diferencias interanuales significativas de 1997 a 2010 (Tabla 4, fig. 2). La Chl promedio anual para esta misma región fue de 1.44 mg m<sup>-3</sup> (Tabla 4, fig. 3), mientras que PP promedió un valor de 2.15 g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (Tabla 4, fig. 4). Esta última variable sí evidenció diferencias significativas a lo largo de la serie de tiempo, sin embargo los resultados muestran que las diferencias están dadas únicamente por los últimos años de la serie.

El año de 1997 promedió los valores de PP más bajos (1.49 g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), al igual que el valor de Chl más bajo (1.03 mg m<sup>-3</sup>); por el contrario, la TSM promediada en este año (26.25 °C) fue la más elevada en la serie de tiempo. El 2008 promedió el valor más alto de Chl (1.82 mg m<sup>-3</sup>), el 2010 el más alto de PP (3.27 g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), y el año 1999 el de menor TSM (22.48 °C) (Tabla 4).

##### 6.1.1.2 Centro

La media anual de TSM y Chl en la región central (Tabla 1, fig. 1) fue de 24.63 °C y 0.836 mg m<sup>-3</sup>, respectivamente, sin haberse encontrado diferencias significativas entre los años del período analizado (Tabla 5, figs. 2 y 3). La PP anual promedio fue de 1.52 g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (Tabla 5, fig. 4). Las diferencias significativas de PP están dadas únicamente por los dos últimos años (Fig. 4). El 2009 destaca como uno de los años de mayor PP en la serie de tiempo, siendo significativamente diferente y alcanzando una media de 2.52 g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (Fig. 4).



Tabla 4. Media anual y desviación estándar de la TSM ( $^{\circ}\text{C}$ ), Chl ( $\text{mg m}^{-3}$ ) y PP ( $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) en la región de las islas del Golfo de California (1997 – 2010). Las casillas sombreadas muestran el valor normalizado según años anteriores (Ver apéndices: A, sección 10.1 y C, fig. 32).

Año	n	TSM		Chl		n	PP	
		$^{\circ}\text{C}$		$\text{mg m}^{-3}$			$\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$	
		$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$		$\mu$	$\sigma$
1997	4	26.25	4.319	1.03	0.231	2	1.49	0.272
1998	12	23.49	4.613	1.12	0.313	12	1.68	0.587
1999	12	22.48	5.664	1.45	0.517	12	1.90	0.814
2000	12	23.42	5.452	1.47	0.465	12	1.93	0.685
2001	12	23.66	5.767	1.69	0.755	12	2.07	0.929
2002	12	23.08	5.381	1.55	0.796	12	1.99	1.054
2003	12	23.55	4.991	1.45	0.573	12	1.90	0.775
2004	12	22.92	5.489	1.17	0.429	12	1.66	0.699
2005	12	23.26	5.195	1.34	0.539	12	1.74	0.678
2006	12	23.19	5.741	1.30	0.438	12	1.78	0.679
2007	12	23.04	5.362	1.61	0.631	12	2.10	0.892
2008	12	22.60	5.762	1.82	0.841	9	3.20	1.302
							1.42	0.579
2009	12	23.20	5.459	1.51	0.837	12	3.28	1.088
							1.45	0.484
2010	9	23.25	5.361	1.32	0.593	9	3.27	1.445
							1.45	0.643
Promedio	157	23.24	5.197	1.44	0.619	152	2.14	1.033
							1.78	0.749

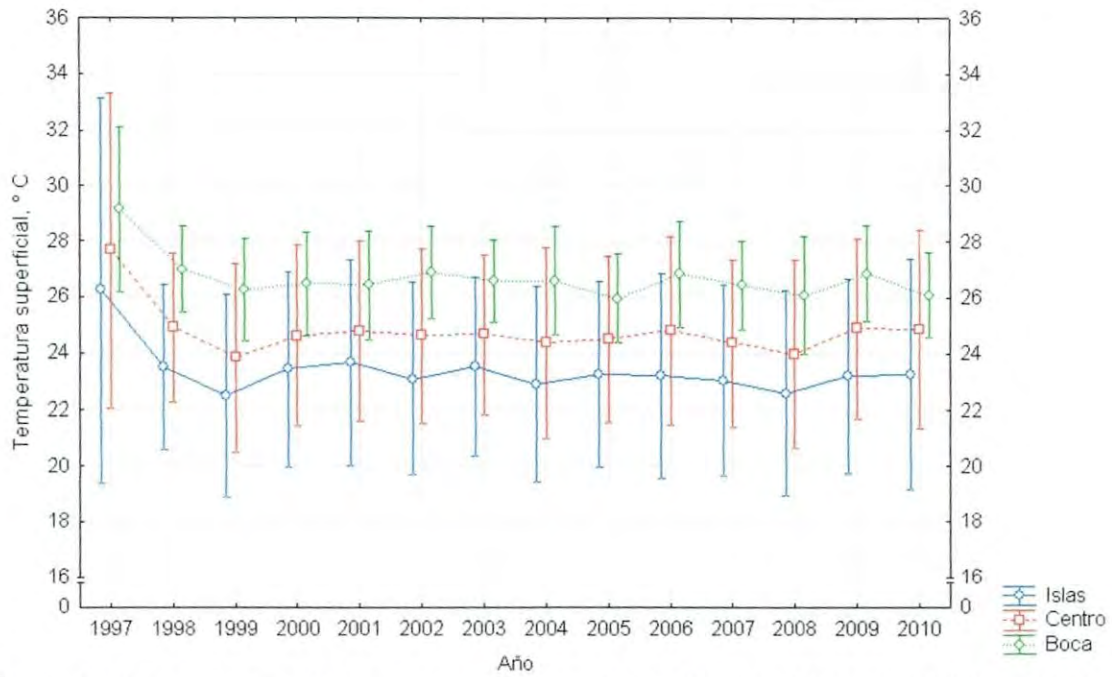


Figura 2. Media anual de TSM para tres regiones del Golfo de California (1997 – 2010). Las barras verticales denotan el intervalo de confianza (95%).

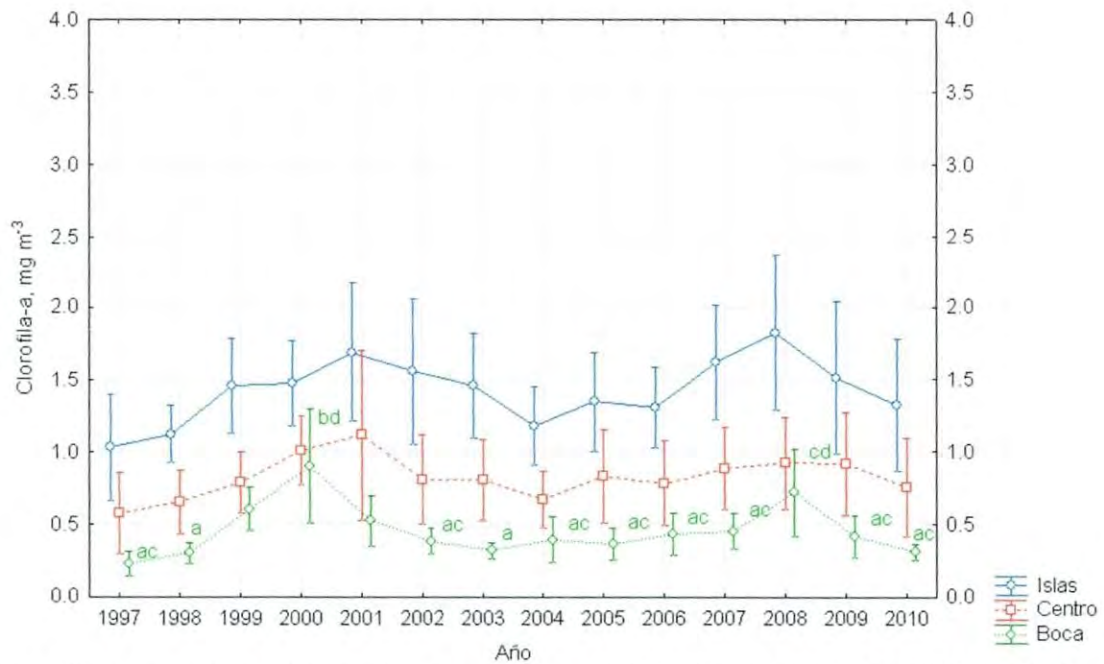


Figura 3. Media anual de Chl para las tres regiones del Golfo de California (1997 – 2010). Las barras verticales denotan el intervalo de confianza (95%). Las letras en minúscula y en color señalan las diferencias significativas.

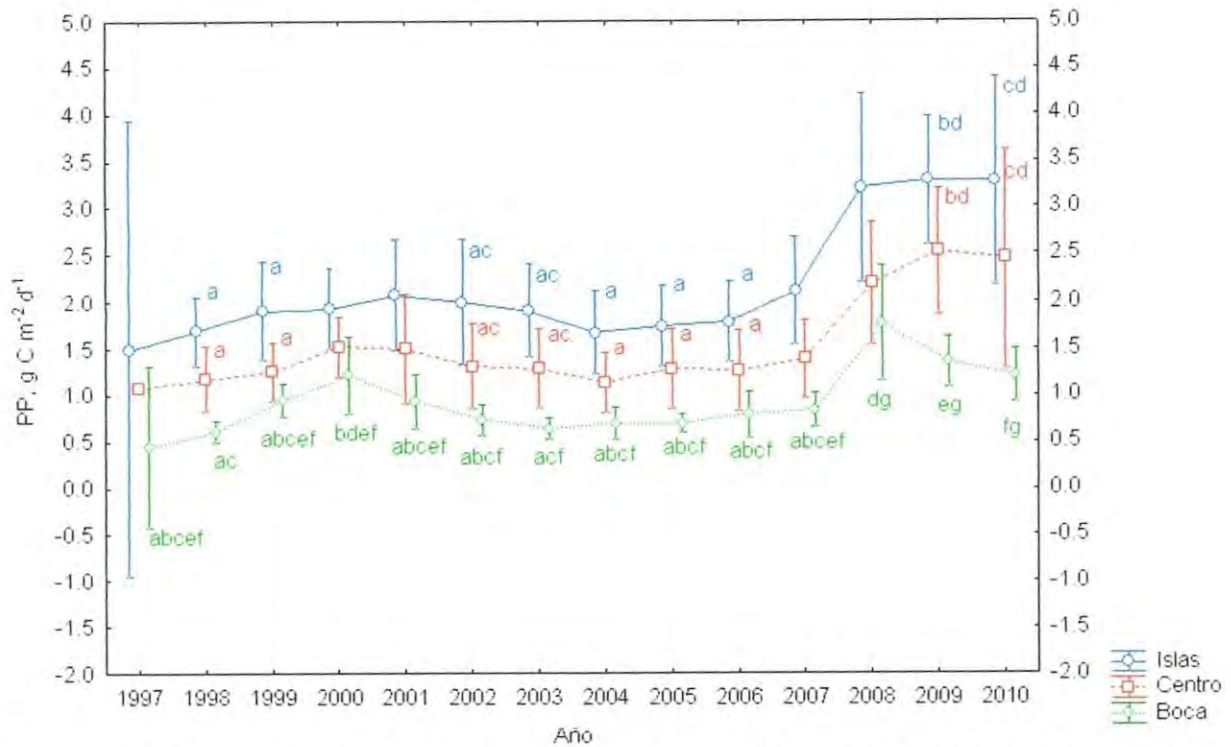


Figura 4. Medias anuales de PP para las tres regiones del Golfo de California (1997 – 2010) utilizando valores SeaWiFS & Pathfinder (SP). Las barras verticales denotan el intervalo de confianza (95%). Las letras en minúscula y en color señalan diferencias significativas en una misma región.

Al igual que en las islas, el año de 1997 presentó el máximo de TSM alcanzada en la serie de tiempo ( $27.70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), y en correspondencia con este valor existe un mínimo de Chl ( $0.57\text{ mg m}^{-3}$ ) y de PP ( $1.07\text{ g m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ ) en toda la serie de tiempo. La TSM más baja ( $23.84\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) promediada en la escala anual ocurrió en el año 1999, misma que se sitúa  $3.86\text{ }^{\circ}\text{C}$  por debajo del máximo promediado. El valor máximo de Chl ( $1.11\text{ mg m}^{-3}$ ) se obtuvo para el año 2001.

### 6.1.1.3 Boca

La TSM anual promedio para la boca del golfo (Tabla 1, fig. 1) fue de  $25.57\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La temperatura mínima promediada ( $25.96\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) se observó en el 2005, mientras la temperatura más alta ( $29.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) se promedió en el año de 1997, tal y como ocurrió en las regiones de las islas y centro (Tabla 6, fig. 2). No se encontraron diferencias significativas de temperatura entre años (Fig. 2).

El promedio anual de Chl fue de  $0.46 \text{ mg m}^{-3}$  y el de PP de  $0.92 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (Tabla 6, figs. 3 y 4).

A diferencia de la región de las islas y centro, la boca del golfo sí exhibió diferencias significativas en la escala anual para Chl (Fig. 3), siendo el 2000 uno de los años que determinó las diferencias significativas con valores de Chl significativamente mayores respecto al resto de los años, con excepción del 2008, año con Chl comparable a la del 2000. El resto de los años se mantuvieron sin diferencias marcadas entre ellos y los valores no son significativamente diferentes a los del 2008 en todos los casos, pero sí a los del 2000. El mínimo de Chl ( $0.22 \text{ mg m}^{-3}$ ) se promedió para 1997, mientras que el máximo ( $0.90 \text{ mg m}^{-3}$ ) se promedió en 2000 (Tabla 6, fig. 3).

La presencia de diferencias significativas en la PP de la boca del golfo, además de estar disparada por los últimos tres años de la serie, también estuvo determinada por el año 2000 que destaca por un incremento significativo (Figs. 4). El mínimo de PP ( $0.44 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) se promedió en 1997 y el máximo ( $1.7 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) en 2008 (Tabla 6).

#### 6.1.1.4 Diferencia entre regiones

Los resultados obtenidos mostraron un gradiente de TSM: la boca del golfo promedió la temperatura más elevada ( $25.57 \text{ }^\circ\text{C}$ ), la cual disminuyó  $0.94 \text{ }^\circ\text{C}$  en la región central ( $24.63 \text{ }^\circ\text{C}$ ); y  $2.33 \text{ }^\circ\text{C}$  en las islas ( $23.24 \text{ }^\circ\text{C}$ ) (Tabla 7, fig. 5). La diferencia entre la región central y la región de las islas fue de  $1.39 \text{ }^\circ\text{C}$ . Al gradiente regional de TSM le correspondió el gradiente opuesto de Chl y PP, variables que incrementaron en dirección sur a norte. La boca del golfo promedió los valores más bajos de Chl ( $0.46 \text{ mg m}^{-3}$ ) y PP ( $0.92 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ). La región central promedió  $0.83 \text{ mg m}^{-3}$  de Chl y  $1.52 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ;  $0.37 \text{ mg m}^{-3}$  de Chl y  $0.60 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de PP por encima de los valores de la boca. Las islas promediaron los valores más altos con  $1.44 \text{ mg m}^{-3}$  de Chl y  $2.14 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de PP;  $0.61 \text{ mg m}^{-3}$  y  $0.62 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  por encima de la Chl y PP de la región central, y  $0.98 \text{ mg m}^{-3}$  y  $1.49 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de la Chl y PP de la boca. Las diferencias de Chl y PP encontradas entre regiones fueron significativas (Tabla 7, fig. 5).

Tabla 5. Media anual y desviación estándar de TSM ( $^{\circ}\text{C}$ ), Chl ( $\text{mg m}^{-3}$ ) y PP ( $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) en la región centro del Golfo de California (1997 – 2010). Las casillas sombreadas muestran el valor normalizado según años anteriores (Ver apéndices: A, sección 10.1 y C, fig. 32).

Año	n	TSM		Chl		n	PP	
		$^{\circ}\text{C}$		$\text{mg m}^{-3}$			$\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$	
		$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$		$\mu$	$\sigma$
1997	4	27.70	3.544	0.57	0.175	2	1.07	0.003
1998	12	24.91	4.151	0.64	0.347	12	1.17	0.551
1999	12	23.84	5.298	0.78	0.335	12	1.25	0.489
2000	12	24.62	5.063	1.00	0.375	12	1.52	0.509
2001	12	24.80	5.058	1.11	0.930	12	1.50	0.932
2002	12	24.63	4.872	0.80	0.491	12	1.31	0.723
2003	12	24.68	4.457	0.80	0.441	12	1.28	0.667
2004	12	24.37	5.326	0.67	0.306	12	1.13	0.509
2005	12	24.50	4.658	0.82	0.509	12	1.28	0.680
2006	12	24.83	5.284	0.78	0.458	12	1.26	0.695
2007	12	24.36	4.654	0.88	0.446	12	1.38	0.646
2008	12	23.97	5.249	0.92	0.502	9	2.19	0.839
							0.97	0.371
2009	12	24.90	5.037	0.91	0.560	12	2.52	1.049
							1.11	0.467
2010	9	24.87	4.610	0.75	0.440	9	2.45	1.512
							1.09	0.672
Promedio	157	24.63	4.725	0.83	0.489	152	1.52	0.869
							1.26	0.616

Tabla 6. Media anual y desviación estándar de la TSM ( $^{\circ}\text{C}$ ), Chl ( $\text{mg m}^{-3}$ ) y PP ( $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) en la región de boca del Golfo de California (1997 – 2010). Las casillas sombreadas muestran el valor normalizado según años anteriores (Ver apéndices: A, sección 10.1 y C, fig. 32).

Año	n	TSM		Chl		n	PP	
		$^{\circ}\text{C}$		$\text{mg m}^{-3}$			$\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$	
		$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$		$\mu$	$\sigma$
1997	4	29.15	1.866	0.22	0.052	2	0.44	0.096
1998	12	26.99	2.413	0.30	0.109	12	0.60	0.179
1999	12	26.25	2.905	0.60	0.234	12	0.94	0.283
2000	12	26.48	2.921	0.90	0.616	12	1.21	0.663
2001	12	26.42	3.045	0.52	0.272	12	0.93	0.466
2002	12	26.87	2.580	0.38	0.137	12	0.73	0.216
2003	12	26.58	2.311	0.31	0.082	12	0.63	0.176
2004	12	26.58	3.032	0.39	0.247	12	0.69	0.276
2005	12	25.96	2.510	0.36	0.178	12	0.69	0.159
2006	12	26.83	2.982	0.43	0.229	12	0.79	0.397
2007	12	26.42	2.506	0.44	0.193	12	0.83	0.296
2008	12	26.08	3.279	0.71	0.470	9	0.76	0.788
							0.78	0.352
2009	12	26.85	2.703	0.41	0.228	12	1.36	0.434
							0.60	0.193
2010	9	26.08	1.960	0.30	0.071	9	1.21	0.374
							0.53	0.168
Promedio	157	25.57	2.661	0.46	0.317	152	0.92	0.492
							0.77	0.362

Tabla 7. Media y desviación estándar de la TSM ( $^{\circ}\text{C}$ ), Chl ( $\text{mg m}^{-3}$ ) y PP ( $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) para las tres regiones del Golfo de California (1997 – 2010).

	n	TSM		Chl		n	PP	
		$^{\circ}\text{C}$		$\text{mg m}^{-3}$			$\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$	
		$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$		$\mu$	$\sigma$
Islas	157	23.24	5.196	1.44	0.619	152	2.14	1.033
Centro	157	24.63	4.725	0.83	0.489	152	1.52	0.869
Boca	157	25.57	2.661	0.46	0.317	152	0.92	0.492
Promedio	471	24.81	4.537	0.91	0.634	456	1.53	0.966

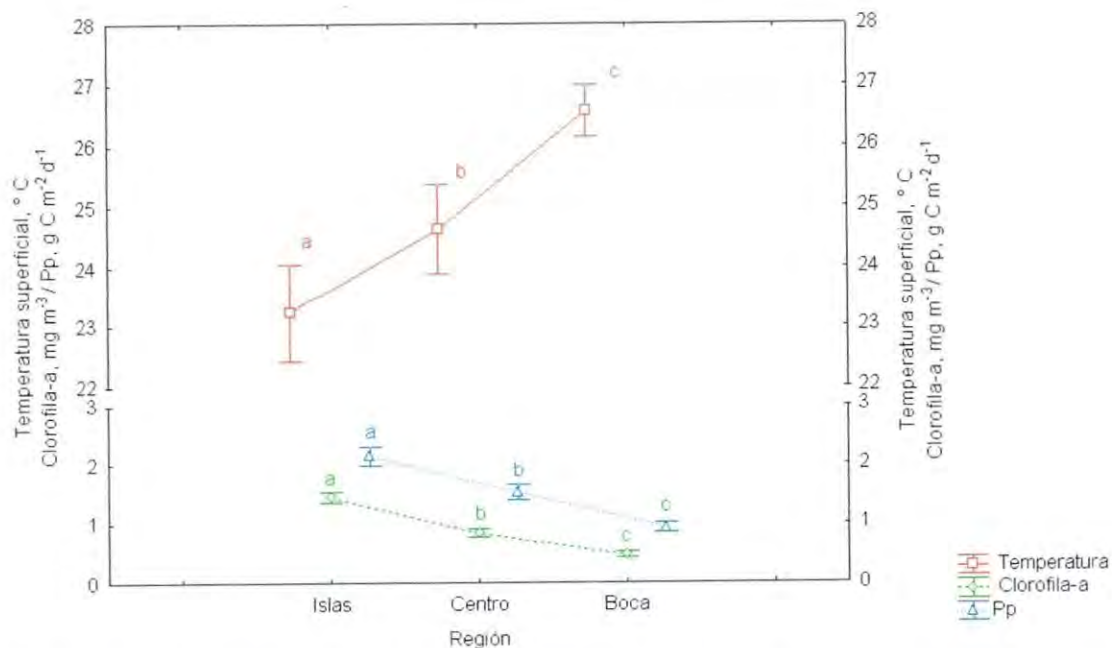


Figura 5. Media y desviación estándar de la TSM, Chl y PP para las tres regiones del Golfo de California (1997 – 2010). Las barras verticales denotan el intervalo de confianza (95%). Las letras en minúscula y en color señalan las diferencias significativas.

### 6.1.2 Variabilidad interanual (panorama general)

La señal interanual de TSM generada por El Niño y La Niña no fue perceptible a escala regional (fig. 6; ver apéndice A: sección 11.2), pero sí lo fue a escala global (Apartado 6.2.2.1).

En el apartado 6.1.1.4 se hizo mención a la diferencia significativa de TSM entre estas regiones (Fig. 5). Estas diferencias se vuelven no significativas para la región central si se consideran las tres condiciones climatológicas por separado (posiblemente debido al número de datos por condición climatológica, el cual es menor a la  $n$  total). Las diferencias entre las islas y la boca se mantuvieron durante las tres condiciones climatológicas (Fig. 6).

A pesar de no evidenciarse la condición climática en la TSM regional, en las islas y la boca los resultados sí mostraron diferencias significativas respecto a la Chl según la condición climatológica que prevalecía (Fig. 7). En la región de las islas la Chl fue significativamente menor bajo la condición El Niño respecto a los valores de Chl alcanzados bajo condiciones normales o La Niña, éstas últimas condiciones no presentaron diferencias significativas entre ellas, sugiriendo que en esta región las condiciones normales pueden generar las mismas concentraciones de Chl, e incluso superiores, que las que se generan bajo condiciones La Niña. En la región de la boca las diferencias de Chl fueron significativas entre las tres diferentes condiciones siendo la condición El Niño la que disminuyó la Chl y colocando a dicha concentración por debajo de las condiciones normales (y ésta por debajo de las condiciones La Niña). En la región central, al igual que para las islas, no se encontraron diferencias significativas que describan la presencia de La Niña, pero sí la de El Niño (Fig. 7).

Bajo condiciones normales las tres regiones mostraron diferencias significativas entre sí: la Chl fue mayor en las islas, promedió un valor intermedio en la región centro y fue menor en la boca del golfo. Bajo condiciones El Niño se conservó este gradiente. Bajo condiciones La Niña las islas continuaron promediando los valores más altos de Chl, sin embargo la boca del golfo promedió valores de Chl similares (no significativamente diferentes) a las de la región centro durante esta condición (Fig. 7).

No se encontraron diferencias significativas de PP según la condición climática que prevaleció en las islas y en el centro (Fig. 8). En la boca del golfo se encontraron diferencias significativas de PP entre las condiciones La Niña y El Niño, siendo los valores significativamente menores bajo esta última condición.



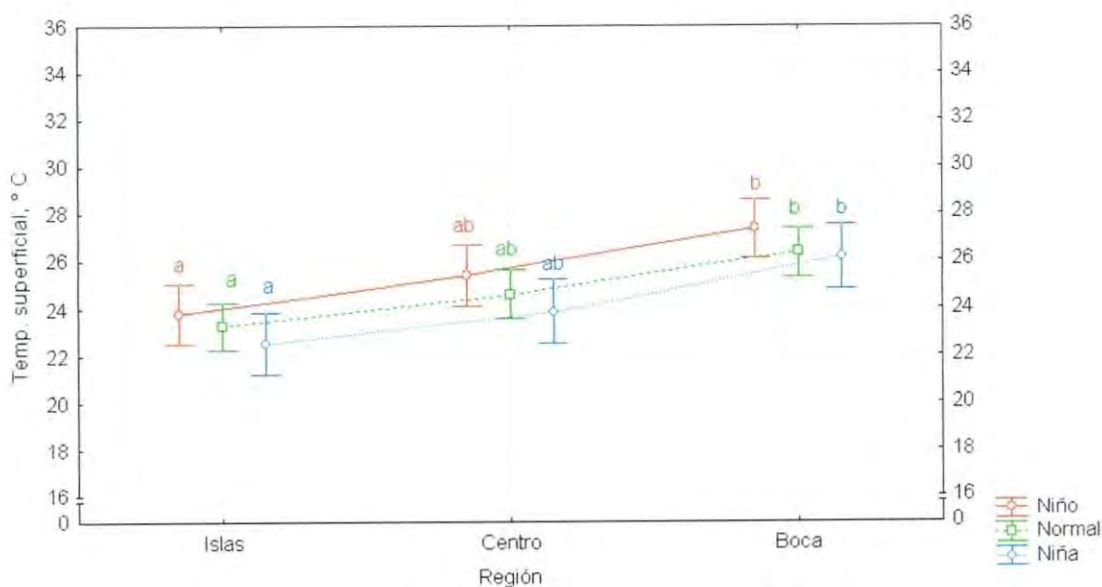


Figura 6. Media de TSM para tres regiones del Golfo de California según la condición climatológica (1997 – 2010). Las barras verticales denotan los intervalos de confianza (95%). Las letras señalan diferencias significativas entre regiones para una misma condición climatológica.

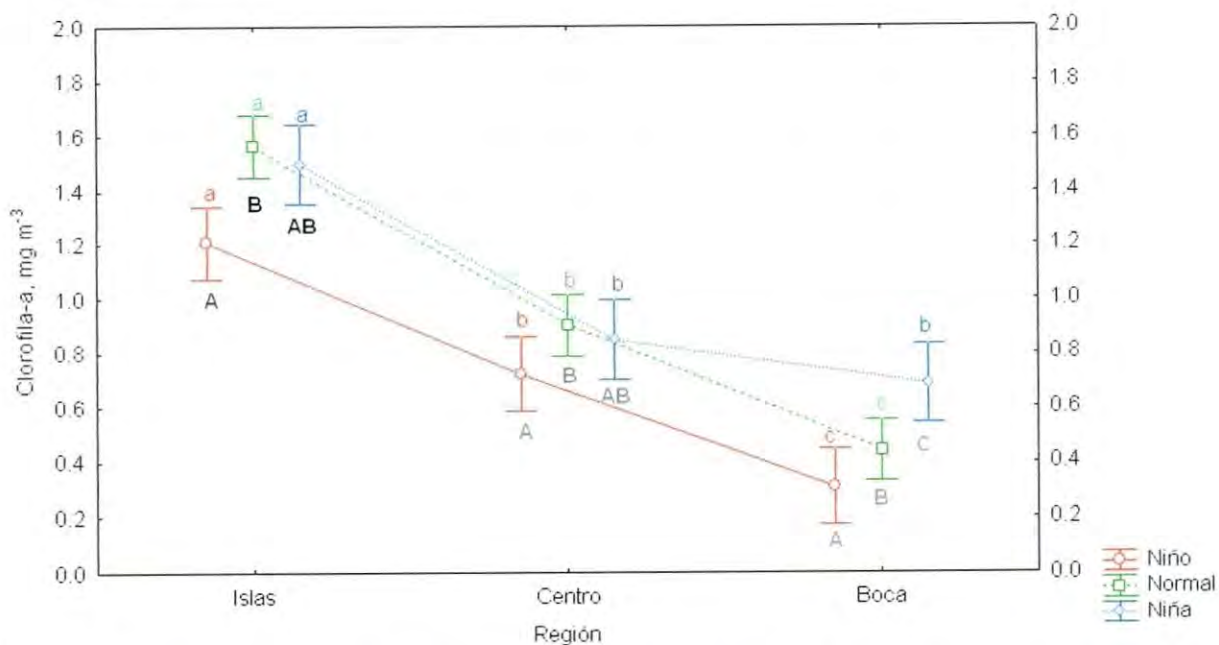


Figura 7. Media de Chl para las tres regiones del Golfo de California según la condición climatológica (1997 – 2010). Las barras verticales denotan los intervalos de confianza (95%). Las letras en minúscula y en color señalan diferencias significativas entre regiones para cada condición climatológica. Las mayúsculas señalan diferencias entre condiciones en una misma región (y la ausencia de éstas la ausencia de diferencias significativas).

Las condiciones normales en la boca del golfo no fueron significativamente diferentes a las dos condiciones anormales, estableciendo que bajo estas circunstancias climáticas se pudieron alcanzar valores tan altos como los promediados por La Niña o tan bajos como los promediados por El Niño en la región (Fig. 8).

Como en el caso de la Chl, la PP en cualquier condición promedió los valores más altos en las islas, valores intermedios en la región centro (excepto en condición La Niña), y los más bajos en la boca. Bajo condiciones La Niña la PP en la boca igualó los valores de la región centro, eliminándose las diferencias significativas que existían en las otras dos condiciones, pero conservando las diferencias respecto a las islas (Fig. 8).

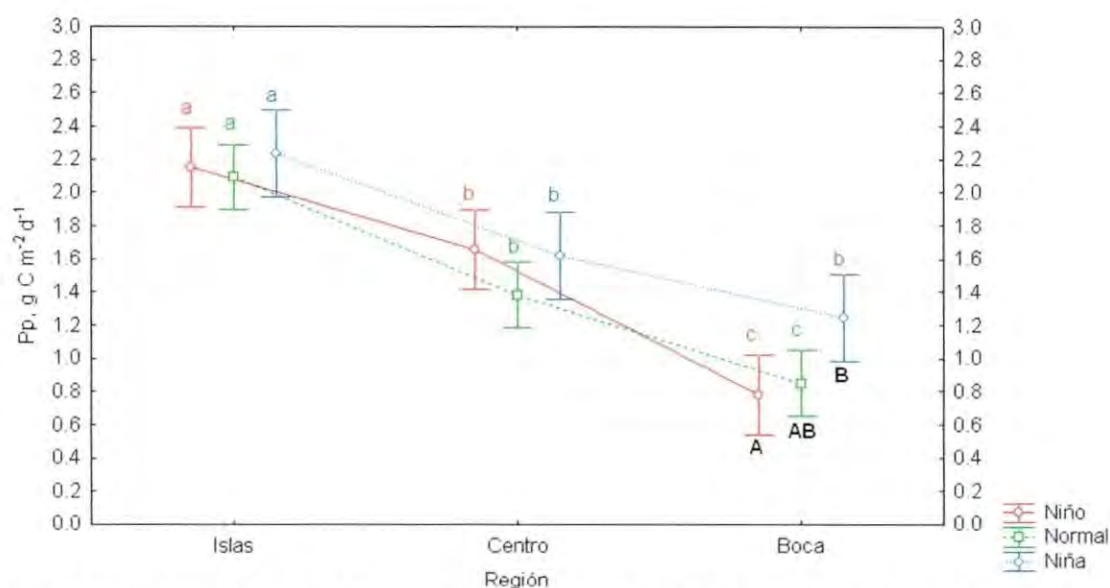


Figura 8. Media de PP para las tres regiones del Golfo de California según la condición climatológica (1997 – 2010). Las barras verticales denotan los intervalos de confianza (95%). Las letras en minúscula y en color señalan diferencias significativas entre regiones para cada condición climatológica. Las mayúsculas señalan diferencias entre condiciones en una misma región (y la ausencia de éstas la ausencia de diferencias significativas).

### 6.1.3 Variabilidad estacional (panorama general)

En la región de las islas las cuatro estaciones del año estuvieron marcadas por diferencias significativas de TSM, siendo el verano la estación que promedió la TSM más alta,

seguida del otoño, primavera y por último invierno, estación en la que se promediaron las TSM más bajas (Fig. 9).

En la región centro, verano y otoño se observaron como condiciones cálidas sin haber diferencias significativas entre ellas. En esta región la primavera representó las condiciones intermedias entre las cálidas del verano y otoño, y las más frías del invierno (Fig. 9).

En la boca las estaciones de otoño y verano se situaron con medias significativamente diferentes a las de invierno y primavera, sin haber diferencia entre ellas (ni entre éstas últimas) (Fig. 9).

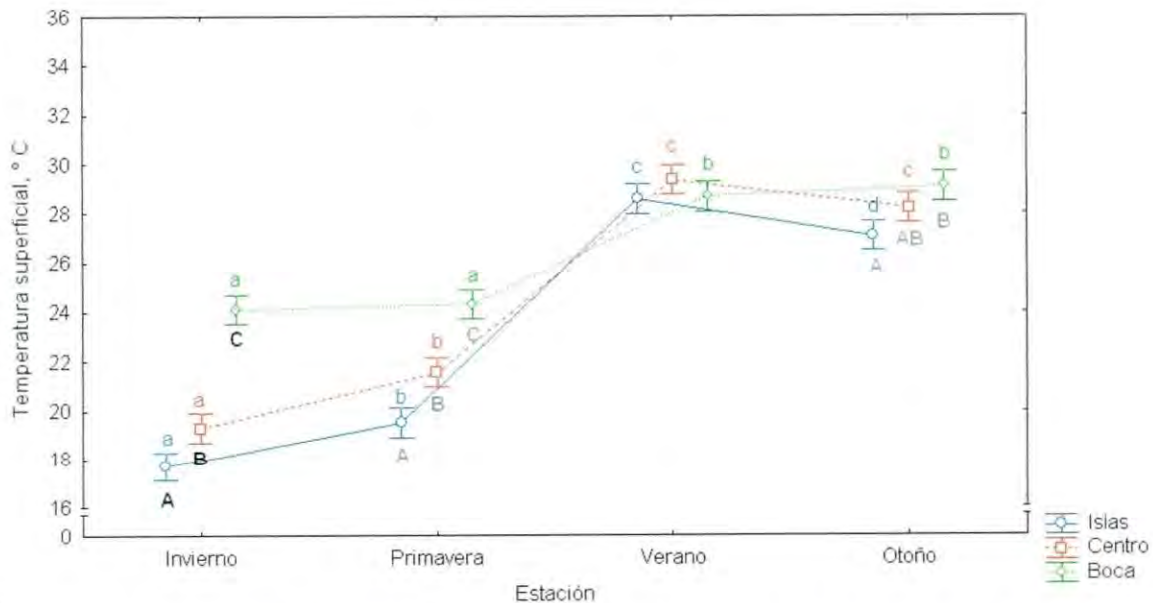


Figura 9. Media de TSM según la estación del año y la región del Golfo de California (1997 – 2010). Las barras verticales denotan los intervalos de confianza (95%). Las letras en minúscula y en color señalan diferencias significativas entre estaciones en una misma región. Las letras mayúsculas señalan diferencias entre regiones para una misma estación (y la ausencia de éstas la ausencia de diferencias significativas).

El verano promedió la TSM más alta en todas las regiones excepto en la boca (que promedió el valor más alto en otoño), sin haber diferencias significativas entre regiones durante esta estación. En otoño se distinguieron diferencias significativas entre las islas y la boca. La región centro no mostró diferencias significativas respecto a las islas ni a la boca en

el otoño. En invierno se encontraron diferencias significativas entre todas las regiones. Las islas promediaron la TSM más baja en invierno, con un aumento significativo hacia la región centro y con la temperatura más elevada en la boca. La misma situación aconteció durante primavera (Fig. 9).

Las diferencias estacionales de Chl en la boca del golfo se comportaron del mismo modo que la temperatura, con una condición cálida conformada por las estaciones de verano y otoño con valores más bajos respecto a la condición fría conformada por las estaciones de primavera y verano (Fig. 10). En la región centro se repitió este patrón, con baja Chl en las estaciones de verano y otoño. Invierno y primavera promediaron las Chl más altas, sin haber diferencias significativas entre ellas (Fig. 10), diferencias que no se evidenciaron en la temperatura (Fig. 9) como ya se mencionó anteriormente. En la región de las islas, con diferencias estacionales de temperatura marcadas (Fig. 9), se observaron diferencias significativas entre primavera, verano y otoño-invierno (sin haber diferencia entre éstas dos últimas estaciones). En las islas la Chl mayor se promedió en primavera, seguida de las estaciones de otoño e invierno. El valor promedio más bajo se observó en la estación de verano (Fig. 10).

La región de las islas presentó los valores más altos de Chl en todas las estaciones del año en comparación con las otras regiones. La región central presentó valores de Chl intermedios y la boca los más bajos, excepto en verano, estación en la que el centro no fue significativamente diferente de la boca (Fig. 10).

Con excepción de las islas, la PP presentó los valores más altos en las estaciones de primavera e invierno y los más bajos en verano y otoño. En las islas los valores más altos se presentaron en primavera y fueron estadísticamente diferentes a los de invierno, verano y otoño (Fig. 11).

Las islas promediaron los valores más altos de PP en comparación con el centro y la boca del golfo, excepto en invierno, estación en la que PP no fue significativamente diferente a la del centro. La boca promedió los valores más bajos de PP en todas las estaciones, excepto en verano, estación en la que la boca y el centro no fueron estadísticamente diferentes entre sí (Fig. 11).

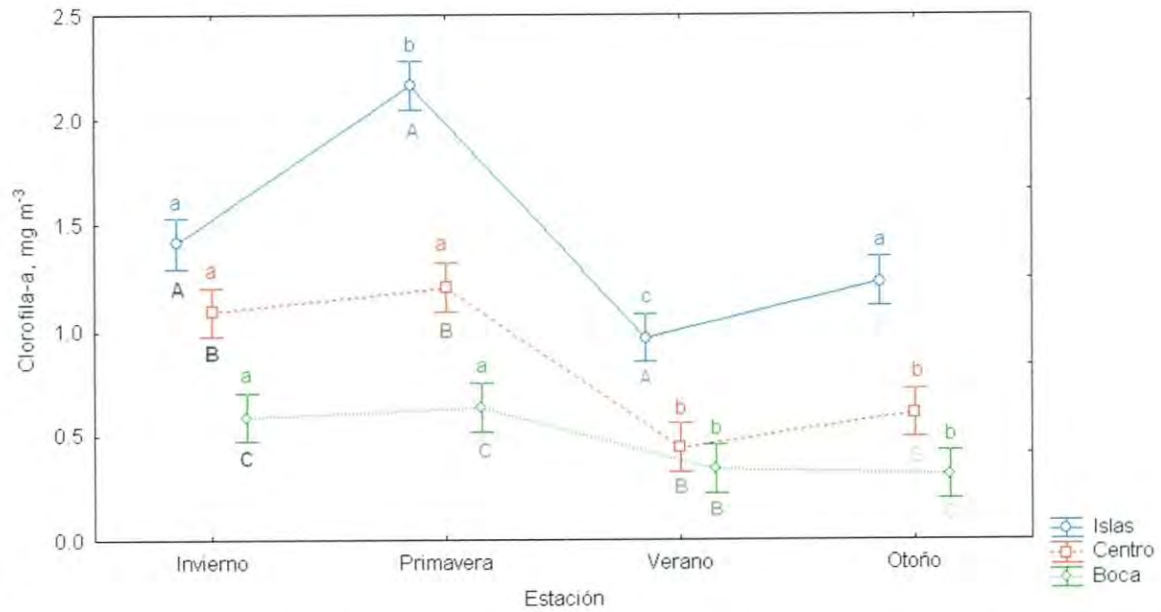


Figura 10. Media de Chl según la estación del año y la región del Golfo de California (1997 – 2010). Las barras verticales denotan los intervalos de confianza (95%). Las letras en minúscula y en color señalan diferencias significativas entre estaciones en una misma región. Las letras mayúsculas señalan diferencias entre regiones para una misma estación.

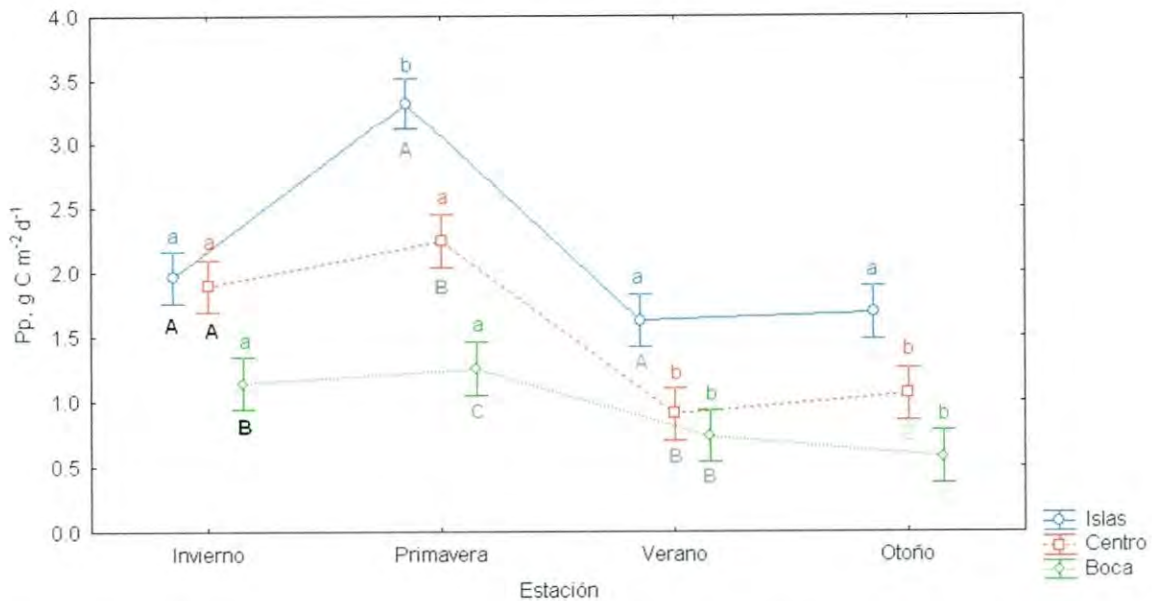


Figura 11. Media de PP según la estación del año y región del Golfo de California (1997 – 2010). Las barras verticales denotan los intervalos de confianza (95%). Las letras en minúscula y en color señalan diferencias significativas entre estaciones en una misma región. Las letras mayúsculas señalan diferencias entre regiones para una misma estación.

#### 6.1.4 Variabilidad interanual y estacional a detalle

##### 6.1.4.1 Islas

Las islas promediaron los valores más altos de Chl y PP durante las cuatro estaciones del año y las tres condiciones climatológicas. Las condiciones menos favorables en esta región se presentaron durante el verano en condición El Niño. En verano se promediaron  $0.96 \text{ mg m}^{-3}$  de Chl y  $1.62 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de PP con una temperatura de  $28.57^\circ \text{ C}$ , contra una primavera-La Niña que presentó las condiciones más favorables al promediar  $2.16 \text{ mg m}^{-3}$  de Chl y  $3.31 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de PP con una temperatura de  $19.53^\circ \text{ C}$  (Tabla 8, figs. 12-I, 13-I y 14-I).

Los promedios de las diferentes condiciones climatológicas difirieron entre ellos y se incrementaron o disminuyeron obedeciendo al efecto de estos fenómenos climáticos. Los valores promedio bajo condiciones “normales” fueron de  $23.28^\circ \text{ C}$ ,  $1.56 \text{ mg m}^{-3}$  y  $2.28 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (Tabla 8). TSM promedio se incrementó a  $23.80^\circ \text{ C}$  bajo condiciones El Niño, y ello conllevó la disminución a  $1.20 \text{ mg m}^{-3}$  y  $2.07 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Bajo condiciones La Niña, por el contrario, TSM disminuyó  $0.73^\circ \text{ C}$  por debajo de la media normal hasta un valor de  $22.55^\circ \text{ C}$ ; Chl no se incrementó respecto a la media normal, por el contrario, disminuyó  $0.07 \text{ mg m}^{-3}$  a un valor de  $1.49 \text{ mg m}^{-3}$  (Tabla 8, figs. 12-I, 13-I y 14-I). Esto mismo aconteció con PP, la cual disminuyó a  $0.29 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  en condiciones La Niña (Tabla 8), por lo que las diferencias entre condiciones “normales” y condiciones La Niña no fueron estadísticamente significativas (Fig. 6). A pesar de no haberse reflejado los efectos de temperatura de La Niña sobre Chl y PP respecto a las condiciones normales, sí existió un incremento en Chl respecto a las condiciones El Niño (Fig. 7), incrementándose  $0.29 \text{ mg m}^{-3}$  Chl, aunque no así de PP en donde el valor promedio de La Niña estuvo  $0.08 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  por debajo del promedio El Niño con  $1.99 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (Tabla 8, figs. 13-I y 14-I).

##### 6.1.4.2 Centro

La región centro bajo condiciones “normales” promedió  $24.59^\circ \text{ C}$ ,  $0.90 \text{ mg m}^{-3}$  y  $1.57 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Bajo El Niño la temperatura se incrementó  $0.79^\circ \text{ C}$  a  $25.38^\circ \text{ C}$ , reflejándose a su vez en una disminución de Chl a  $0.72 \text{ mg m}^{-3}$  y a  $1.54 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de PP (Tabla 9), aunque éstas disminuciones no fueron significativas (Fig. 6). Bajo condiciones La Niña TSM disminuyó de forma no significativa  $0.71^\circ \text{ C}$  a un valor de  $23.88^\circ \text{ C}$  (Tabla 9, figs. 7 y 8).

Tabla 8. Media ( $\mu$ ) y desviación estándar ( $\sigma$ ) de TSM ( $^{\circ}\text{C}$ ), Chl ( $\text{mg m}^{-3}$ ) y PP ( $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) según la estación del año y condición climatológica en la región de las islas del Golfo de California (1997 – 2010).

		N	TSM		Chl		n	PP		
			$^{\circ}\text{C}$		$\text{mg m}^{-3}$			$\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$		
			$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$		$\mu$	$\sigma$	
Condición climatológica vs. estación del año	Normal	Invierno	13	17.18	1.144	1.51	0.240	12	2.00	0.390
		Primavera	23	19.60	2.385	2.20	0.463	23	3.26	0.792
		Verano	21	28.43	2.170	1.06	0.572	21	1.72	0.985
		Otoño	13	27.56	2.936	1.29	0.528	12	1.65	0.812
	Niño	Invierno	14	18.84	1.305	1.23	0.262	14	2.00	0.815
		Primavera	7	19.76	1.637	1.86	0.556	7	3.47	1.332
		Verano	10	28.70	2.219	0.83	0.322	10	1.61	0.763
		Otoño	15	27.05	2.955	1.13	0.309	13	1.76	0.870
	Niña	Invierno	12	16.96	1.216	1.51	0.388	12	1.86	0.407
		Primavera	9	19.15	2.335	2.31	0.476	8	3.34	0.953
		Verano	8	28.80	2.213	0.87	0.325	8	1.37	0.503
		Otoño	12	26.53	3.196	1.28	0.413	12	1.63	0.449
Promedio estacional	Invierno	39	17.71	1.472	1.41	0.323	38	1.96	0.576	
	Primavera	39	19.53	2.216	2.16	0.494	38	3.31	0.916	
	Verano	39	28.57	2.139	0.96	0.478	39	1.62	0.844	
	Otoño	40	27.06	2.973	1.22	0.417	37	1.68	0.721	
Promedio interanual	Normal	70	23.28	5.287	1.56	0.668	68	2.28	1.068	
	Niño	46	23.80	4.858	1.20	0.460	44	2.07	1.086	
	Niña	41	22.55	5.448	1.49	0.627	40	1.99	0.901	

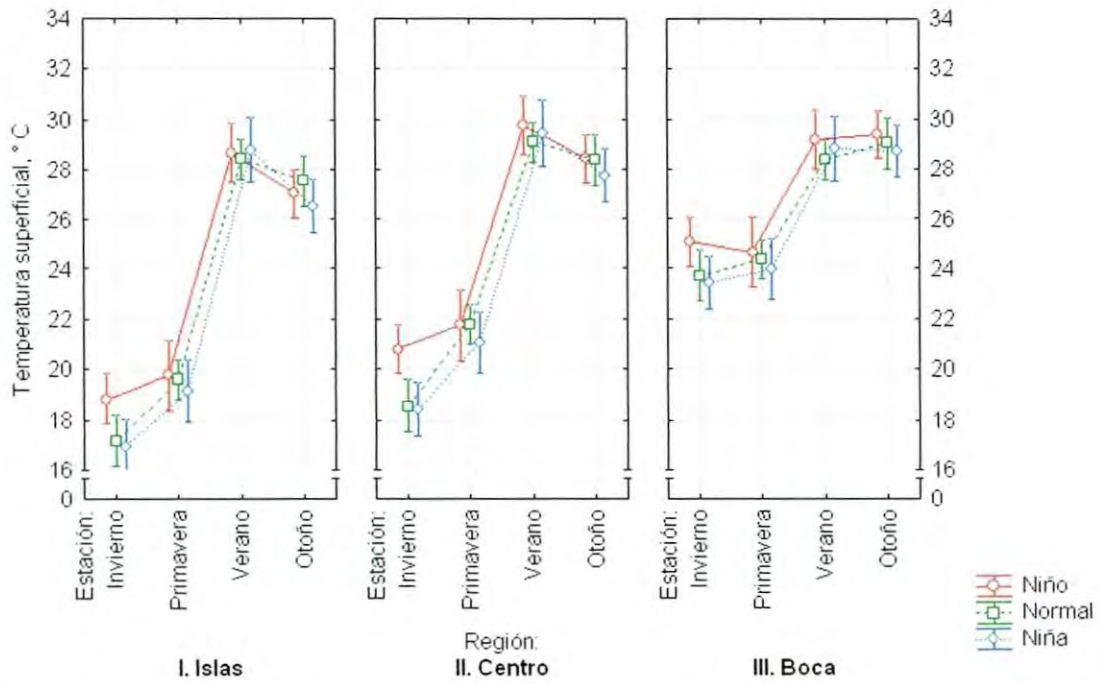


Figura 12. Media de TSM según la estación del año y condición climatológica para tres regiones del Golfo de California (1997 – 2010). Las barras verticales denotan los intervalos de confianza (95%).

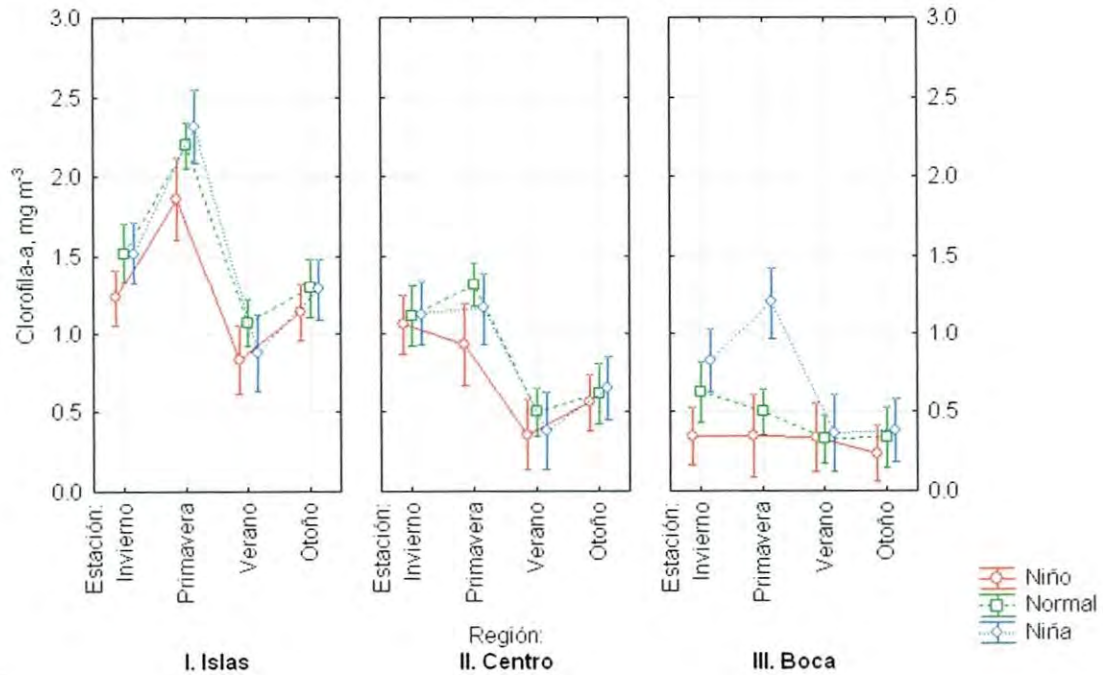


Figura 13. Media de Chl según la estación del año y condición climatológica para tres regiones del Golfo de California (1997 – 2010). Las barras verticales denotan los intervalos de confianza (95%).



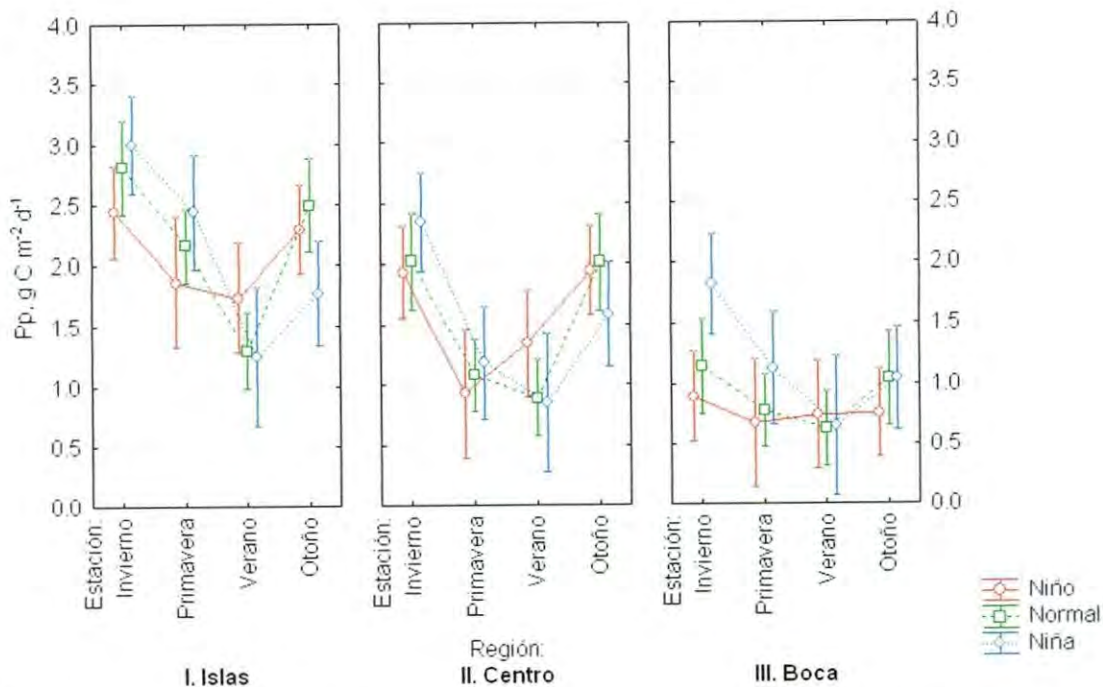


Figura 14. Media de PP según la estación del año y condición climatológica para tres regiones del Golfo de California (1997 – 2010). Las barras verticales denotan los intervalos de confianza (95%).

A escala estacional, verano y otoño representaron condiciones cálidas sin diferencias entre ambas estaciones. En verano y otoño se promediaron los valores más bajos de Chl con  $0.44 \text{ mg m}^{-3}$  y  $0.60 \text{ mg m}^{-3}$ , respectivamente, así como valores bajos de PP con  $0.90 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  y  $1.05 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (Tabla 9, figs. 13-II y 14-II).

Las diferencias significativas de TSM entre primavera e invierno,  $2.26 \text{ }^\circ\text{C}$ , no se reflejaron como diferencias significativas de Chl ni de PP. En el golfo central los promedios de primavera fueron de  $1.20 \text{ mg m}^{-3}$  y  $2.24 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  con  $21.57 \text{ }^\circ\text{C}$ , mientras que los de invierno fueron  $1.09 \text{ mg m}^{-3}$  y  $1.89 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  con temperatura promedio de  $19.31$  (Tabla 9, figs. 13-II y 14-II).

#### 6.1.4.3 Boca

En la boca del golfo no existieron diferencias significativas de temperatura entre condiciones climatológicas (Tabla 10 y fig. 6), pero sí de Chl y PP. Chl disminuyó bajo El Niño ( $0.30 \text{ mg m}^{-3}$ ) y se incrementó bajo La Niña ( $0.68 \text{ mg m}^{-3}$ ) respecto a las condiciones

normales ( $0.44 \text{ mg m}^{-3}$ ). PP fue mayor bajo La Niña ( $1.11 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) y menor bajo El Niño ( $0.75 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ), sin haber diferencias significativas de estas condiciones respecto a las normales ( $0.93 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) (Tabla 10, figs. 13-III y 14-III). El escenario más pobre de Chl y PP en esta región se dio bajo El Niño. En verano-El Niño con temperatura promedio de  $29.20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $0.81 \text{ }^{\circ}\text{C}$  por encima de un verano normal, se promediaron  $0.34 \text{ mg m}^{-3}$  y  $0.74 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . En otoño-El Niño los promedios fueron:  $0.23 \text{ mg m}^{-3}$ ,  $0.54 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , y  $29.39 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $0.35 \text{ }^{\circ}\text{C}$  por encima de la media de un otoño normal).

Las medias de verano y otoño normales fueron:  $0.32 \text{ mg m}^{-3}$  y  $0.74 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , y  $0.33 \text{ mg m}^{-3}$  y  $0.61 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , respectivamente. Las condiciones de empobrecimiento que representan el verano y otoño se compensaron bajo condiciones La Niña con un incremento significativo de Chl en la región. En un verano-La Niña con temperatura promedio de  $28.82 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , el promedio fue  $0.36 \text{ mg m}^{-3}$ , mientras que en otoño fue  $0.38 \text{ mg m}^{-3}$ . Los valores de PP bajo La Niña no se incrementaron en el otoño ( $0.58 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) ni en el verano ( $0.70 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) respecto a la media normal; por el contrario, se situaron por debajo del promedio normal, y con valores cercanos a los promediados en condiciones de verano-El Niño y otoño-El Niño (Tabla 10, figs. 13-III y 14-III).

Las condiciones más favorables de Chl y PP en la boca se presentaron en invierno y primavera bajo condición La Niña. En un invierno-La Niña, con temperatura promedio de  $23.43 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , Chl promedió un valor de  $0.82 \text{ mg m}^{-3}$  y  $1.42 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  de PP. En primavera-La Niña, con temperatura promedio de  $23.96 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , los promedios fueron  $1.19 \text{ mg m}^{-3}$  y  $1.84 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (Tabla 10, figs. 13-III y 14-III).

#### 6.1.4.5 Diferencias entre eventos El Niño

Los resultados no mostraron diferencias significativas de TSM ni de Chl entre los cinco eventos El Niño considerados en la serie de tiempo en ninguna de las regiones. La PP del último evento El Niño (2009-2010) que abarca la serie de tiempo sí mostró diferencias significativas respecto a los cuatro eventos que le antecedieron.

#### 6.1.4.6 Diferencias entre eventos La Niña

Al comparar los cuatro eventos La Niña no se encontraron diferencias significativas de temperatura ni de PP en ninguna de las regiones (Tabla 12, fig. 16-I).

Tabla 9. Media ( $\mu$ ) y desviación estándar ( $\sigma$ ) de temperatura superficial ( $^{\circ}\text{C}$ ), clorofila *a* ( $\text{mg m}^{-3}$ ) y PP ( $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) según la estación del año y condición climatológica en la región central del Golfo de California (1997 – 2010).

		n	Temperatura superficial		Clorofila <i>a</i>		n	PP		
			$^{\circ}\text{C}$		$\text{mg m}^{-3}$			$\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$		
			$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$		$\mu$	$\sigma$	
Condición climatológica vs. estación del año	Normal	Invierno	13	18.55	1.134	1.11	0.185	12	1.90	0.605
		Primavera	23	21.74	2.441	1.31	0.704	23	2.24	0.815
		Verano	21	29.11	1.595	0.50	0.316	21	0.94	0.439
		Otoño	13	28.37	2.667	0.61	0.359	12	1.05	0.744
	Niño	Invierno	14	20.78	1.358	1.05	0.239	14	2.01	0.966
		Primavera	7	21.72	1.754	0.93	0.291	7	2.34	1.265
		Verano	10	29.78	1.448	0.35	0.114	10	0.89	0.400
		Otoño	15	28.44	2.299	0.56	0.245	13	1.09	0.742
	Niña	Invierno	12	18.43	1.236	1.12	0.219	12	1.74	0.343
		Primavera	9	21.03	2.385	1.16	0.394	8	2.16	0.727
		Verano	8	29.44	1.607	0.38	0.152	8	0.80	0.246
		Otoño	12	27.75	2.682	0.65	0.296	12	1.01	0.387
Promedio estacional	Invierno	39	19.31	1.648	1.09	0.213	38	1.89	0.696	
	Primavera	39	21.57	2.286	1.20	0.595	38	2.24	0.870	
	Verano	39	29.35	1.574	0.44	0.254	39	0.90	0.392	
	Otoño	40	28.21	2.492	0.60	0.296	37	1.05	0.632	
Promedio interanual	Normal	70	24.59	4.753	0.90	0.586	68	1.57	0.878	
	Niño	46	25.38	4.370	0.72	0.358	44	1.54	1.013	
	Niña	41	23.88	5.039	0.84	0.415	40	1.42	0.674	

Tabla 10. Media ( $\mu$ ) y desviación estándar ( $\sigma$ ) de temperatura superficial ( $^{\circ}$  C), clorofila *a* ( $\text{mg m}^{-3}$ ) y PP ( $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) según la estación del año y condición climatológica en la boca del Golfo de California (1997 – 2010).

		n	Temperatura superficial		Clorofila <i>a</i>		n	PP		
			$^{\circ}$ C		$\text{mg m}^{-3}$			$\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$		
			$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$		$\mu$	$\sigma$	
Condición climatológica vs. estación del año	Normal	Invierno	13	23.70	0.991	0.62	0.131	12	1.21	0.412
		Primavera	23	24.37	1.163	0.50	0.182	23	1.12	0.329
		Verano	21	28.39	1.564	0.32	0.187	21	0.74	0.391
		Otoño	13	29.04	1.001	0.33	0.162	12	0.61	0.209
	Niño	Invierno	14	25.08	1.030	0.34	0.073	14	0.84	0.405
		Primavera	7	24.65	1.296	0.34	0.050	7	0.99	0.354
		Verano	10	29.20	1.339	0.34	0.256	10	0.74	0.257
		Otoño	15	29.39	1.069	0.23	0.055	13	0.54	0.250
	Niña	Invierno	12	23.43	1.371	0.82	0.309	12	1.42	0.632
		Primavera	9	23.96	1.392	1.19	0.515	8	1.84	0.499
		Verano	8	28.82	1.199	0.36	0.211	8	0.70	0.221
		Otoño	12	28.74	0.979	0.38	0.272	12	0.58	0.155
Promedio estacional	Invierno	39	24.11	1.330	0.58	0.273	38	1.14	0.537	
	Primavera	39	24.32	1.229	0.63	0.419	38	1.25	0.479	
	Verano	39	28.69	1.449	0.33	0.205	39	0.73	0.325	
	Otoño	40	29.08	1.030	0.31	0.185	37	0.57	0.206	
Promedio interanual	Normal	70	26.32	2.597	0.44	0.204	68	0.93	0.417	
	Niño	46	27.32	2.474	0.30	0.136	44	0.75	0.352	
	Niña	41	26.15	2.859	0.68	0.469	40	1.11	0.658	

Tabla 11. Media ( $\mu$ ) y desviación estándar ( $\sigma$ ) de TSM ( $^{\circ}\text{C}$ ), Chl ( $\text{mg m}^{-3}$ ) y PP ( $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) para cada evento El Niño y para cada región del Golfo de California (1997 – 2010).

Niño	Región	N	TSM		Chl $\text{mg m}^{-3}$		n	PP	
			$^{\circ}\text{C}$					$\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$	
			$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$		$\mu$	$\sigma$
1997-1998	Islas	9	22.78	4.296	1.17	0.255	7	1.93	0.531
	Centro	9	24.44	3.876	0.73	0.222	7	1.46	0.318
	Boca	9	26.72	2.667	0.29	0.077	7	0.67	0.173
2002-2003	Islas	11	23.96	4.804	1.40	0.634	11	1.87	0.902
	Centro	11	25.46	4.214	1.74	0.419	11	1.20	0.600
	Boca	11	27.23	2.419	0.32	0.086	11	0.63	0.164
2004-2005	Islas	9	24.38	5.269	1.01	0.270	9	1.33	0.295
	Centro	9	25.86	4.910	0.64	0.321	9	0.99	0.442
	Boca	9	27.63	2.613	0.32	0.258	9	0.55	0.159
2006-2007	Islas	6	24.51	5.822	1.13	0.378	6	1.42	0.455
	Centro	6	25.99	5.260	0.68	0.428	6	1.01	0.566
	Boca	6	28.24	2.533	0.29	0.136	6	0.53	0.224
2009-2010	Islas	11	26.62	5.254	1.26	0.532	11	3.36	1.129
	Centro	11	25.35	4.668	0.79	0.418	11	2.69	1.290
	Boca	11	27.15	2.527	0.29	0.088	11	1.23	0.315
Promedio Niños		138	25.50	4.256	0.74	0.503	132	1.45	1.030

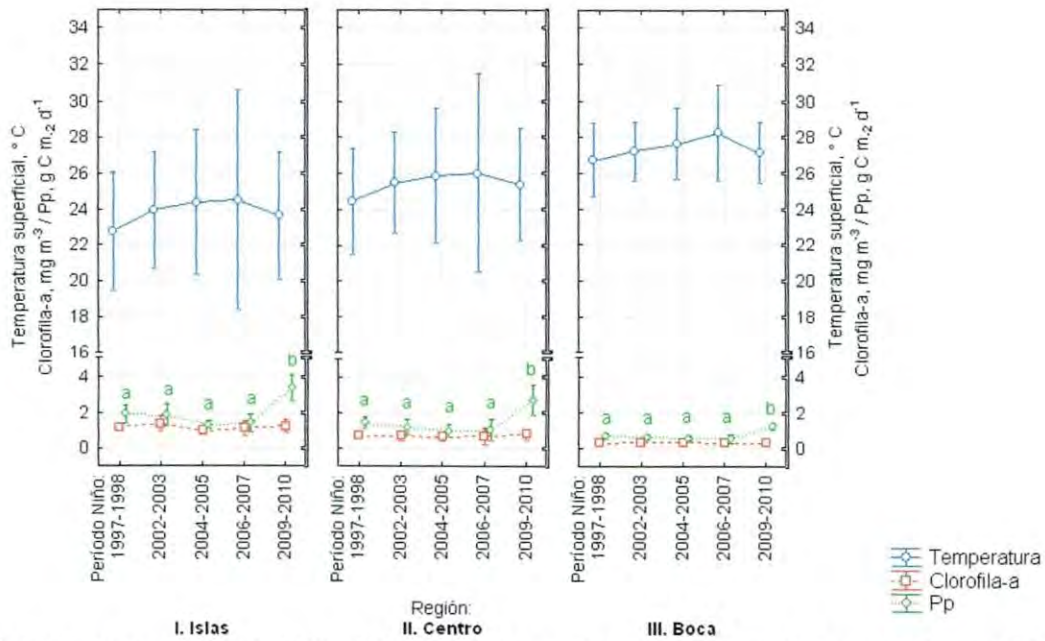


Figura 15. Medias de TSM, Chl y PP para cada período El Niño en las tres regiones del Golfo de California (1997 – 2010). Las barras verticales denotan los intervalos de confianza (95%). Las letras en minúscula y en color señalan diferencias significativas entre eventos (y la ausencia de letras, la ausencia de diferencias estadísticamente significativas).

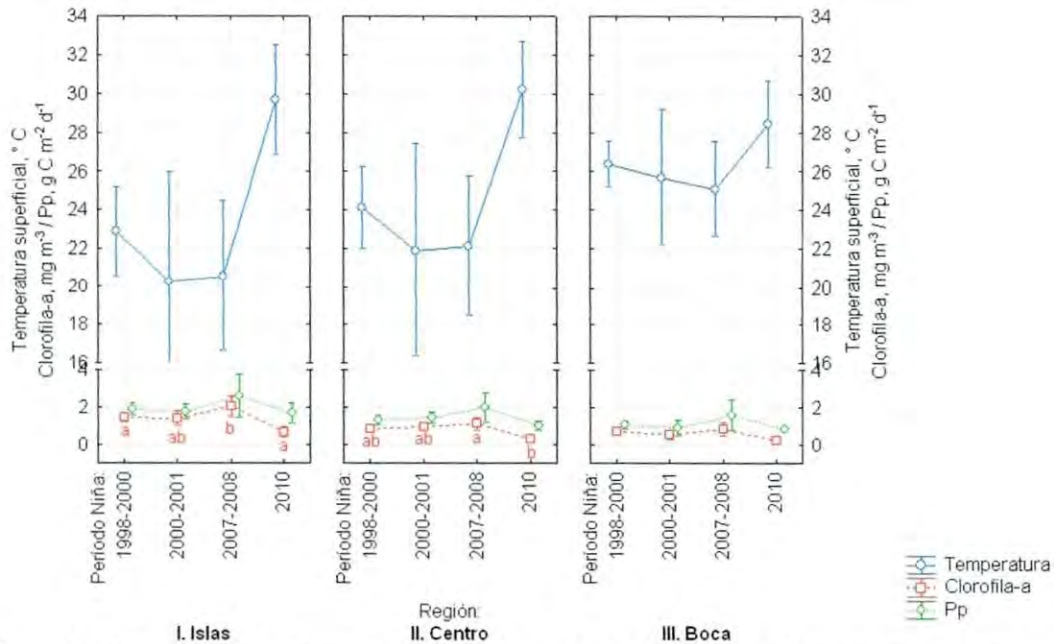


Figura 16. Media de TSM, Chl y PP para cada período La Niña en las tres regiones del Golfo de California (1997 – 2010). Las barras verticales denotan los intervalos de confianza (95%). Las letras en minúscula y en color señalan diferencias significativas entre eventos.

Tabla 12. Media ( $\mu$ ) y desviación estándar ( $\sigma$ ) de TSM, Chl y PP para cada evento La Niña y para la región centro del Golfo de California (1997 – 2010).

Niña	Región	N	TSM		Chl		n	PP	
			°C		mg m <sup>-3</sup>			g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	
			$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$		$\mu$	$\sigma$
1998-2000	Islas	24	22.88	5.422	1.43	0.518	24	1.88	0.772
	Centro	24	24.16	5.037	0.80	0.398	24	1.29	0.586
	Boca	24	26.36	2.819	0.72	0.507	24	1.04	0.557
2000-2001	Islas	5	20.29	4.593	1.39	0.311	5	1.76	0.334
	Centro	5	21.91	4.473	0.92	0.143	5	1.44	0.262
	Boca	5	25.69	2.819	0.51	0.191	5	0.88	0.350
2007-2008	Islas	9	20.58	5.105	2.04	0.734	8	2.60	1.390
	Centro	9	22.13	4.748	1.12	0.431	8	1.96	0.951
	Boca	9	25.11	3.218	0.84	0.467	8	1.57	0.997
2010	Islas	3	29.69	1.135	0.67	0.101	3	1.67	0.221
	Centro	3	30.23	0.994	0.29	0.037	3	1.00	0.094
	Boca	3	28.46	0.907	0.24	0.045	3	0.84	0.022
Promedio Niñas		123	24.19	4.792	1.01	0.618	120	1.50	0.831

La Chl del evento La Niña 2007-2008, el cual tuvo una duración de nueve meses, fue significativamente mayor a los eventos de 1998-2000 y del 2010 con un valor promedio de  $2.04 \text{ mg m}^{-3}$  y  $1.12 \text{ mg m}^{-3}$  en las islas y en la región centro, respectivamente (Tabla 12, figs. 16-I y 16-II). En la boca del golfo no se observaron diferencias significativas para ninguna de las variables entre los diferentes eventos La Niña (Tabla 12, fig. 16-III). Los valores promedio de esta condición en la boca fueron  $26.15 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $0.68 \text{ mg m}^{-3}$  y  $1.11 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (Tabla 12).

## 6.2 Resultados globales

### 6.2.1 Climatología, clorofila y PP anual

La TSM para todo el Golfo de California promedió un valor de  $24.72 \text{ }^\circ\text{C}$ . El promedio se generó considerando el período desde octubre de 1997 a abril de 2010, sin haberse encontrado diferencias significativas entre los años a lo largo de la serie de tiempo (Tabla 13, fig. 17). La Chl promedio para todo el golfo fue de  $2.70 \text{ mg m}^{-3}$ . A escala anual la Chl presentó diferencias significativas, particularmente en años La Niña (1999, 2000, 2001 y 2008), los cuales fueron distintos respecto a años bajo condiciones “normales” o El Niño (Tabla 13, fig. 17). La PP promedio de 1997 a 2007 para la región fue de  $1.08 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Se encontraron diferencias significativas marcadas por La Niña 2000, año en el que PP fue significativamente mayor (Tabla 13, fig. 17).

### 6.2.2 Variabilidad interanual

TSM, Chl y PP mostraron diferencias significativas a escala interanual.

#### 6.2.2.1 Temperatura superficial del agua

Las TSM del Golfo de California son estadísticamente diferentes entre El Niño y La Niña pero no distintas respecto a las condiciones “normales” (Fig. 18). El Golfo de California en condiciones El Niño se calentó en promedio  $0.48 \text{ }^\circ\text{C}$  respecto a la temperatura normal ( $24.71 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Aunque este incremento no fue significativamente diferente de las condiciones normales, cabe destacar que se considera que un incremento de  $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$  durante un mínimo de un trimestre (y bajo condiciones atmosféricas constantes e igualmente anormales) es un indicador de la llegada de El Niño.



Tabla 13. Media anual y desviación estándar de TSM ( $^{\circ}\text{C}$ ), Chl ( $\text{mg m}^{-3}$ ) y PP ( $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) en todo el Golfo de California (1997 – 2010).

Año	N	TSM		Chl		n	PP	
		$^{\circ}\text{C}$		$\text{mg m}^{-3}$			$\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$	
		$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$		$\mu$	$\sigma$
1997	3	27.45	2.203	2.09	0.118	2	0.77	0.110
1998	12	26.20	3.055	2.04	0.400	12	0.93	0.271
1999	12	25.36	3.723	3.25	0.598	12	1.39	0.475
2000	12	24.20	3.779	3.81	1.350	12	1.59	0.886
2001	12	23.79	3.642	3.26	1.194	12	1.28	0.621
2002	12	24.58	3.392	2.44	0.516	12	1.03	0.323
2003	12	25.09	3.229	2.49	0.555	12	0.82	0.285
2004	12	24.65	3.561	2.17	0.487	12	0.87	0.379
2005	12	24.18	2.650	2.37	0.458	12	0.96	0.247
2006	12	25.10	3.435	2.59	0.957	12	0.91	0.371
2007	12	24.15	3.116	2.72	0.520	12	1.00	0.381
2008	12	24.47	3.691	3.43	1.173			
2009	12	25.00	2.891	2.37	0.823			
2010	4	22.36	0.592	1.57	0.193			
Promedio	151	24.72	3.274	2.70	0.952	122	1.07	0.504

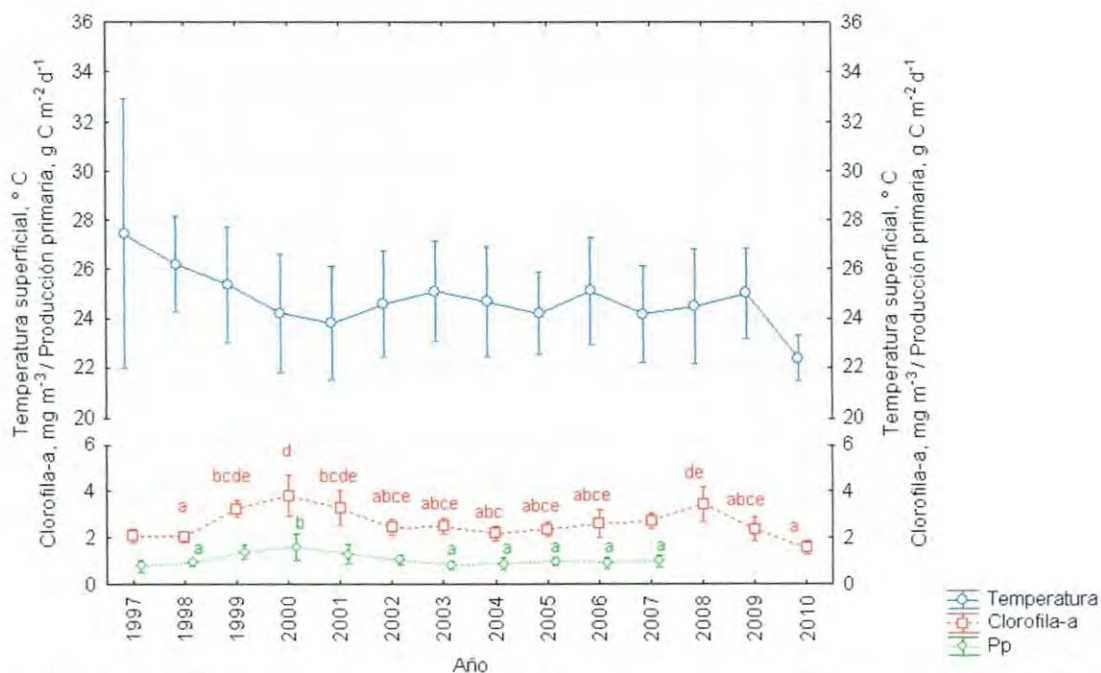


Figura 17. Media y desviación estándar de TSM, Chl y PP en el Golfo de California (1997 – 2010). Las barras verticales denotan los intervalos de confianza (95%). Las letras en minúscula y en color señalan diferencias significativas entre años.

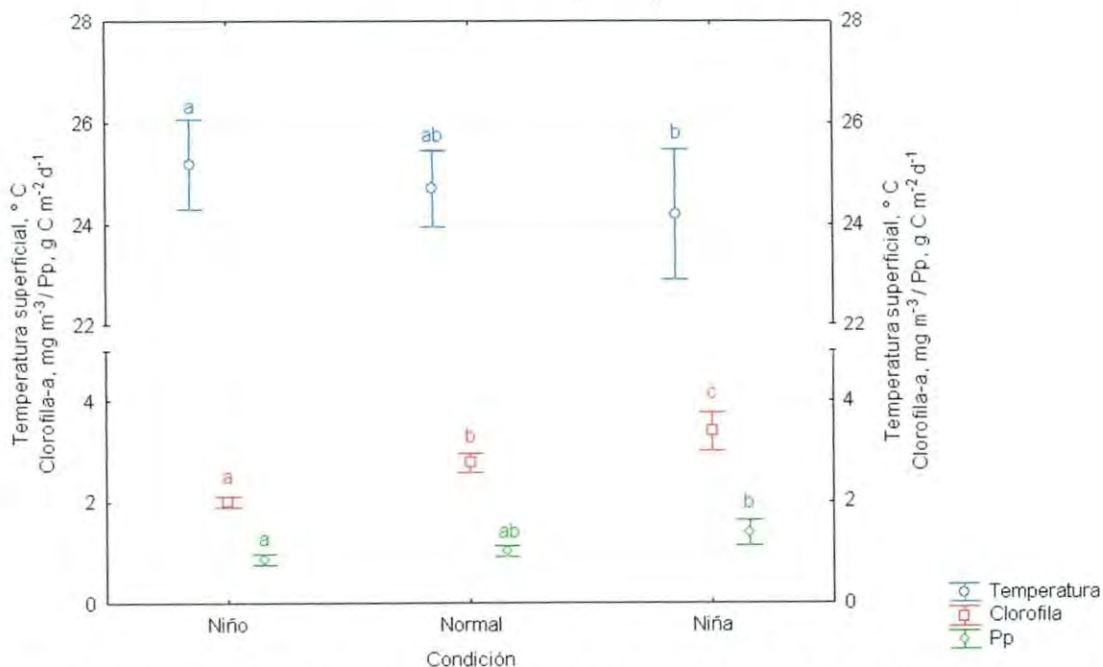


Figura 18. Media y desviación estándar de TSM, Chl y PP según la condición climatológica en el Golfo de California (1997 – 2010). Las barras verticales denotan los intervalos de confianza (95%). Las letras en minúscula y en color señalan diferencias significativas entre condiciones.

Tabla 14. Media ( $\mu$ ) y desviación estándar de TSM, Chl ( $\text{mg m}^{-3}$ ) y PP ( $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) según la estación del año y condición climatológica en el Golfo de California (1997 – 2010).

		N	TSM		Chl		n	PP		
			°C		$\text{mg m}^{-3}$			$\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$		
			$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$		$\mu$	$\sigma$	
Condición climatológica vs. estación del año	Normal	Invierno	13	21.43	1.409	3.24	0.530	10	1.27	0.225
		Primavera	22	22.81	1.966	3.08	0.921	19	1.25	0.412
		Verano	20	27.18	1.662	2.17	0.571	17	0.75	0.184
		Otoño	13	27.40	1.901	2.75	0.333	10	0.79	0.287
	Niño	Invierno	14	22.08	1.549	2.06	0.353	11	0.98	0.236
		Primavera	7	23.40	1.786	2.11	0.528	5	1.21	0.285
		Verano	10	27.79	1.352	1.76	0.393	7	0.80	0.306
		Otoño	14	27.33	1.496	2.05	0.219	11	0.63	0.201
	Niña	Invierno	12	20.16	1.633	3.56	0.612	11	1.79	0.540
		Primavera	9	22.75	1.894	4.73	1.161	9	2.03	0.720
		Verano	6	28.83	1.732	2.28	0.659	6	0.76	0.159
		Otoño	11	27.26	2.165	2.72	0.509	11	1.03	0.424
Promedio estacional	Invierno	39	21.27	1.691	2.91	0.820	30	1.32	0.476	
	Primavera	38	22.90	1.882	3.29	1.268	30	1.40	0.556	
	Verano	36	27.63	1.663	2.07	0.566	30	0.76	0.207	
	Otoño	38	27.33	1.797	2.48	0.485	32	0.81	0.351	
Promedio interanual	Normal	68	24.71	3.028	2.78	0.782	56	1.02	0.387	
	Niño	45	25.19	2.959	2.00	0.371	33	0.86	0.313	
	Niña	38	24.20	3.912	3.39	1.144	33	1.38	0.686	
Promedio		151	24.72	3.274	2.70	0.952	122	1.07	0.504	

Tabla 15. Media ( $\mu$ ) y desviación estándar de TSM ( $^{\circ}\text{C}$ ), Chl ( $\text{mg m}^{-3}$ ) y PP ( $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) según evento El Niño para todo el Golfo de California (1997 – 2010).

Niño	n	TSM $^{\circ}\text{C}$		Chl $\text{mg m}^{-3}$		n	PP $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$	
		$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$		$\mu$	$\sigma$
1997-1998	8	25.02	2.499	2.02	0.255	7	1.01	0.235
2002-2003	11	25.08	3.102	2.21	0.634	11	0.95	0.290
2004-2005	9	25.31	3.647	1.92	0.419	9	0.71	0.256
2006-2007	6	25.84	3.215	2.18	0.086	6	0.66	0.251
2009-2010	11	24.95	2.889	1.74	0.270			

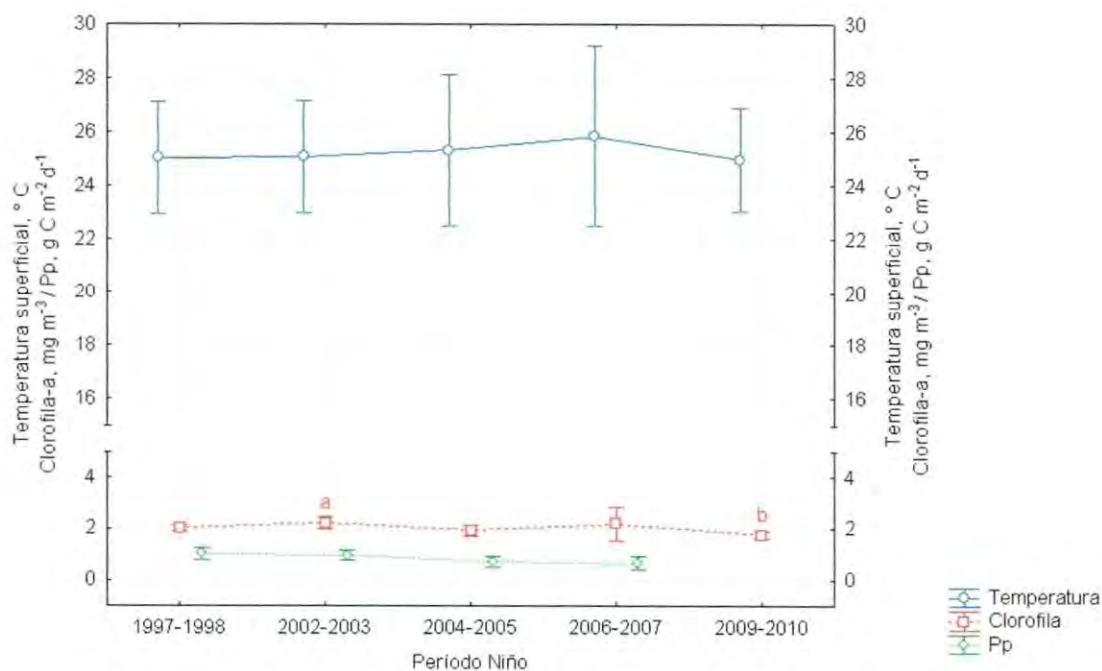


Figura 19. Media de TSM, Chl ( $\text{mg m}^{-3}$ ) y PP según el período El Niño en el Golfo de California (1997 – 2010). Las barras verticales denotan los intervalos de confianza (95%). Las letras en minúscula y en color señalan diferencias significativas entre eventos.

Tabla 16. Media ( $\mu$ ) y desviación estándar de TSM ( $^{\circ}\text{C}$ ), Chl ( $\text{mg m}^{-3}$ ) y PP ( $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) según evento La Niña para todo el Golfo de California (1997 – 2010).

Niña	n	TSM $^{\circ}\text{C}$		Chl $\text{mg m}^{-3}$		n	PP $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$	
		$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$		$\mu$	$\sigma$
1998-2000	24	25.32	3.819	3.30	1.254	24	1.44	0.741
2000-2001	5	21.38	3.653	3.19	0.486	5	1.07	0.393
2007-2008	9	22.78	3.345	3.73	1.114	9	0.77	0.438

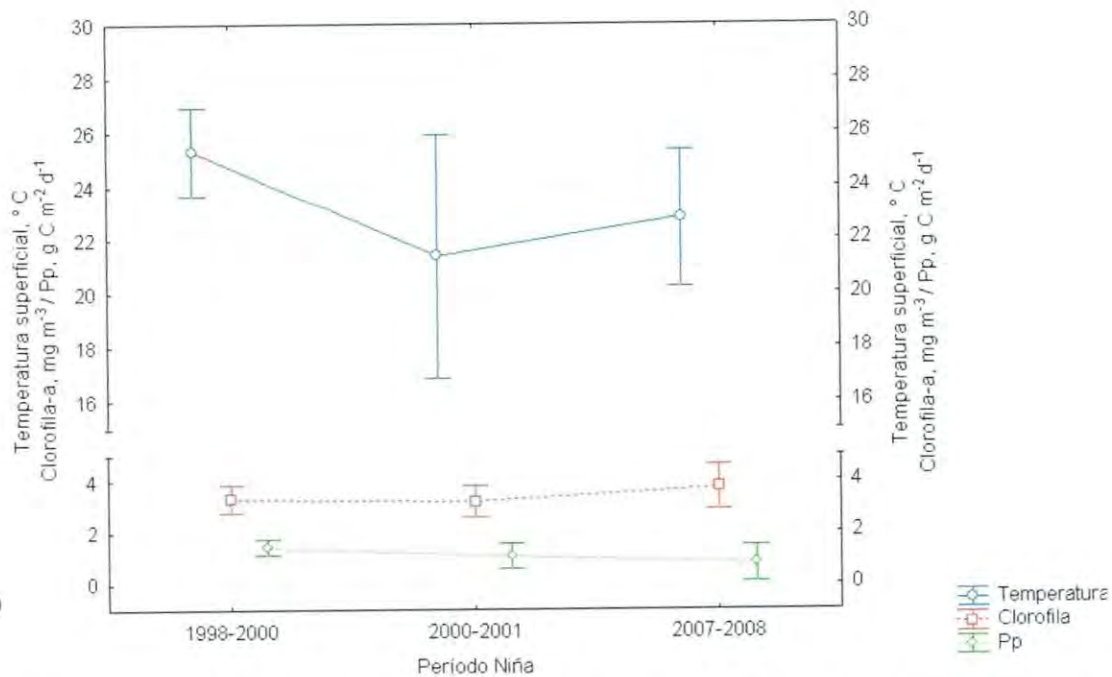


Figura 20. Media de TSM, Chl y PP según el periodo La Niña en el Golfo de California (1997 – 2010). Las barras verticales denotan los intervalos de confianza (95%). Las letras en minúscula y en color señalan diferencias significativas entre eventos (y la ausencia de letras, la ausencia de diferencias estadísticamente significativas).

El enfriamiento del golfo en condiciones La Niña estuvo dado por  $-0.51\text{ }^{\circ}\text{C}$  por debajo del promedio de condiciones “normales” (Tabla 14, fig. 18). No se encontraron diferencias significativas entre eventos El Niño (Tabla 15, fig. 19) ni entre eventos La Niña (Tabla 16, fig. 20) que acontecieron a lo largo de la serie de tiempo.

#### 6.2.2.2 Concentración de clorofila *a*

Al comparar condiciones “normales”, El Niño y La Niña se encontraron diferencias significativas de Chl. Chl promedio bajo condiciones normales fue de  $2.78\text{ mg m}^{-3}$ , durante El Niño disminuyó a  $2.00\text{ mg m}^{-3}$ , y bajo condiciones La Niña se incrementó a un valor de  $3.39\text{ mg m}^{-3}$ . El Niño redujo un 28% la Chl respecto a las condiciones normales, mientras que La Niña la incrementó en un 22% (Tabla 14, fig. 18).

Los eventos El Niño 2002-2003 y 2009-2010 resultaron significativamente diferentes respecto a otros eventos, el primero de ellos con un incremento significativo respecto al segundo (Tabla 15, fig. 19). Entre eventos La Niña no se encontraron diferencias significativas de Chl (Tabla 16, fig. 20).

#### 6.2.2.3 Productividad primaria

Los valores de PP entre condiciones El Niño y La Niña fueron significativamente diferentes. El Niño promedió  $0.86\text{ g C m}^{-2}\text{ d}^{-1}$  y La Niña  $1.38\text{ g C m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ . Las condiciones normales, con promedio de  $1.02\text{ g C m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ , no resultaron significativamente diferentes a las anómalas representadas por El Niño o La Niña (Tabla 14, fig. 18). No se encontraron diferencias significativas entre eventos El Niño (Tabla 15, fig. 19) ni entre eventos La Niña (Tabla 16, fig. 20).

#### 6.2.3 Variabilidad estacional

La temperatura superficial, clorofila *a* y PP de todo el golfo mostraron diferencias significativas a escala estacional.

##### 6.2.3.1 Temperatura superficial del mar

La TSM promedio para invierno fue  $21.27\text{ }^{\circ}\text{C}$ , con un máximo de  $25.32\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La temperatura mensual más baja ( $17.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) de toda la serie de tiempo se registró en esta misma

estación. La media invernal fue significativamente diferente a la de verano (27.63 °C) y otoño (27.33 °C), estaciones entre las que no existieron diferencias significativas. La media de primavera (22.90 °C) fue significativamente diferente a la de otoño y verano. El valor máximo (30.37 °C) de temperatura en toda la serie de tiempo se situó en la estación de verano (Tabla 14, fig. 21).

En invierno fue posible distinguir con claridad el efecto de El Niño y La Niña, como un aumento o una disminución de TSM, respectivamente. En primavera los efectos de estos eventos no fueron perceptibles con claridad. En verano, con La Niña la temperatura se incrementó a valores incluso por encima de los alcanzados cuando se presentó la condición El Niño. En otoño no se distinguieron claramente los eventos El Niño y La Niña (Fig. 22).

#### 6.2.3.1.1 Invierno

La temperatura fue significativamente menor durante los inviernos (La Niña) 2000-2001 y 2007-2008 respecto al invierno (El Niño) de 1997-1998. El resto de los inviernos abarcados en la serie de tiempo no presentaron diferencias significativas respecto a estos tres eventos ni entre ellos (Tabla 17, Fig. 23).

#### 6.2.3.1.2 Primavera, verano y otoño

La temperatura entre las primaveras, veranos y otoños abarcados de 1998 al 2010 fueron estadísticamente iguales (Tablas 18 a 20, fig. 24).

#### 6.2.3.2 Clorofila *a*

Las medias estacionales de Chl fueron significativamente mayores en invierno (2.91 mg m<sup>-3</sup>) y primavera (3.29 mg m<sup>-3</sup>), sin haber diferencias entre éstas, respecto a las medias de verano (2.07 mg m<sup>-3</sup>) y otoño (2.48 mg m<sup>-3</sup>), mismas que tampoco fueron estadísticamente diferente entre ellas (Tabla 14, fig. 21).

Las variaciones de Chl fueron menos abruptas en verano y en otoño, estaciones que no exhibieron diferencias significativas entre los períodos estacionales abarcados en la serie de tiempo (Fig. 21).

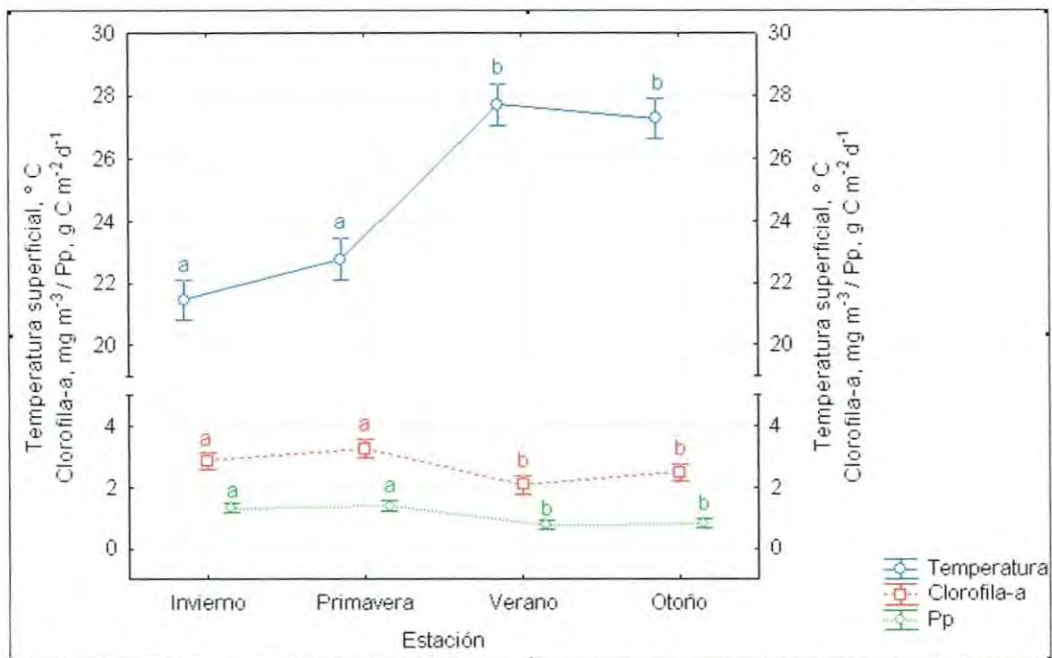


Figura 21. Media de TSM, Chl y PP según la estación del año en el Golfo de California (1997 – 2010). Las barras verticales denotan los intervalos de confianza (95%). Las letras en minúscula y en color señalan diferencias significativas entre estaciones.

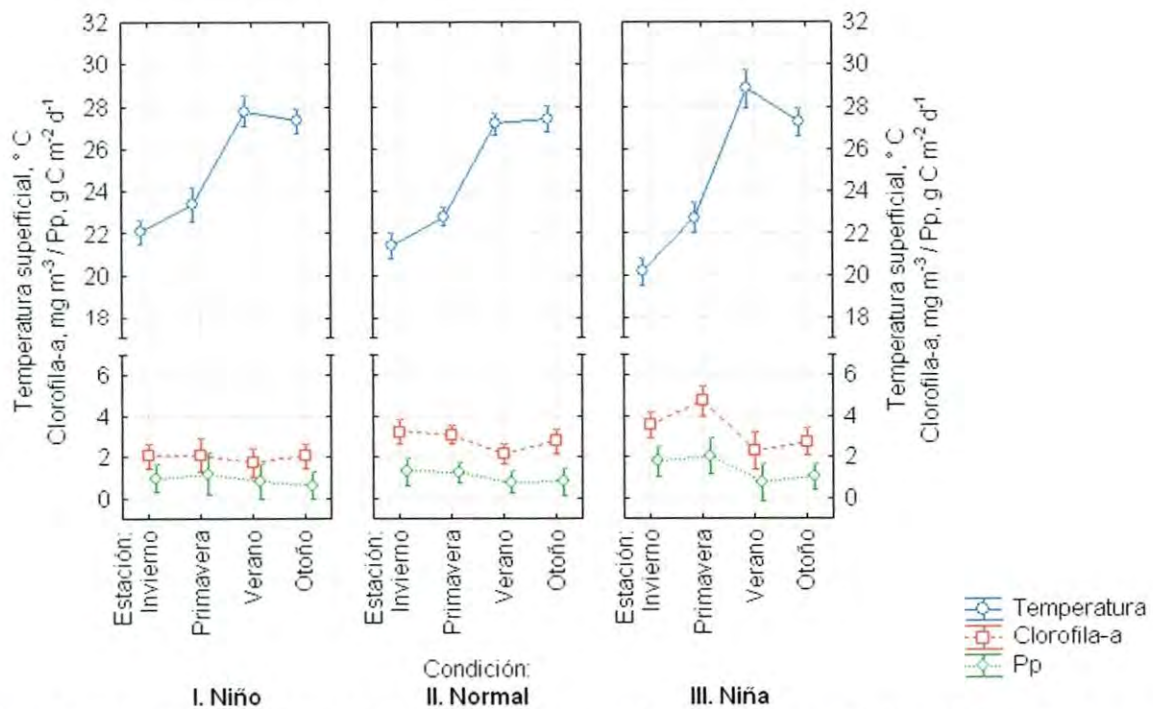


Figura 22. Media de TSM, Chl y PP según la estación del año y condición climatológica en el Golfo de California (1997 – 2010). Las barras verticales denotan los intervalos de confianza (95%).



Las condiciones favorables para valores de Chl teóricamente elevados durante primavera e invierno, se suprimieron bajo la condición El Niño. Este evento redujo la concentración de clorofila en todas las estaciones, mientras que el evento La Niña no se reflejó como un aumento significativo respecto a las condiciones normales en todas las estaciones, particularmente en verano y otoño (Fig. 22).

En las estaciones de verano y otoño bajo condiciones El Niño se presentó la concentración de Chl más baja ( $1.76 \text{ mg m}^{-3}$  para verano y  $2.05 \text{ mg m}^{-3}$  para otoño). La concentración más alta se presentó en condiciones La Niña y primavera ( $4.73 \text{ mg m}^{-3}$ ) (Tabla 14).

#### 6.2.3.2.1 Invierno

El análisis de varianza mostró diferencias significativas entre los inviernos comprendidos en los años de 1997 a 2009, siendo los inviernos de 1997-98 ( $1.98 \text{ mg m}^{-3}$ ), 2002-03 ( $2.12 \text{ mg m}^{-3}$ ), 2004-05 ( $2.11 \text{ mg m}^{-3}$ ) y 2006-07 ( $2.81 \text{ mg m}^{-3}$ ) los de valores más bajos de Chl, mismos que coinciden con la presencia de El Niño. Las concentraciones promedio de dichos inviernos los colocó con valores cercanos a la medias de verano ( $2.07 \text{ mg m}^{-3}$ ) e incluso por debajo de la misma. Existieron cuatro inviernos que se desarrollaron bajo condiciones completamente “normales”: 2001-2002, 2003-2004, 2005-2006 y 2008-2009, siendo estos dos últimos significativamente diferentes a los inviernos caracterizados por la presencia de El Niño (Tabla 17, fig. 23).

La concentración de clorofila más baja durante un invierno se promedió para el período 1997-1998 (período en el que aconteció un El Niño de magnitud fuerte), sin mostrar diferencias significativas respecto a los eventos El Niño 2002-2003, 2004-2005 y 2006-07, estos dos últimos clasificados como débiles y el primero como moderado (Tabla 17, fig. 23).

#### 6.2.3.2.2 Primavera

En los diferentes períodos primaverales comprendidos en la serie de tiempo se encontraron diferencias significativas. Destaca el decremento en la concentración de clorofila de las primaveras de 1998 (bajo los efectos de un El Niño fuerte) y el aumento en las primaveras de 1999, 2000 y 2008 (caracterizadas por la presencia de La Niña).

Tabla 17. Media ( $\mu$ ) y desviación estándar ( $\sigma$ ) de TSM ( $^{\circ}$  C), Chl ( $\text{mg m}^{-3}$ ) y PP ( $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) según el invierno para todo el Golfo de California (1997 – 2010). En todos los casos  $n = 3$  (meses), excepto en donde se señala con •, en donde  $n = 1$ .

	Año	TSM $^{\circ}$ C		Chl $\text{mg m}^{-3}$		PP $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$	
		$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
Invierno	1997-1998	24.11	1.424	1.98	0.184	0.91	0.265
	1998-1999	21.72	1.204	3.07	0.322	1.28	0.263
	1999-2000	20.90	1.756	4.09	0.573	1.81	0.105
	2000-2001	19.13	1.272	3.19	0.687	1.21	0.321
	2001-2002	21.41	1.348	3.14	0.219	1.29	0.094
	2002-2003	21.50	0.742	2.12	0.208	1.03	0.021
	2003-2004	20.95	2.282	2.88	0.123	0.99	0.447
	2004-2005	21.01	1.445	2.11	0.164	0.62	0.157
	2005-2006	22.22	1.664	3.46	0.936	1.32	0.263
	2006-2007	21.64	1.632	2.81	0.246	1.02	0.420
	2007-2008	18.90	0.276	3.88	0.118	1.40•	
	2008-2009	21.35	0.792	3.51	0.581		
	2009-2010	21.71	0.487	1.64	0.254		

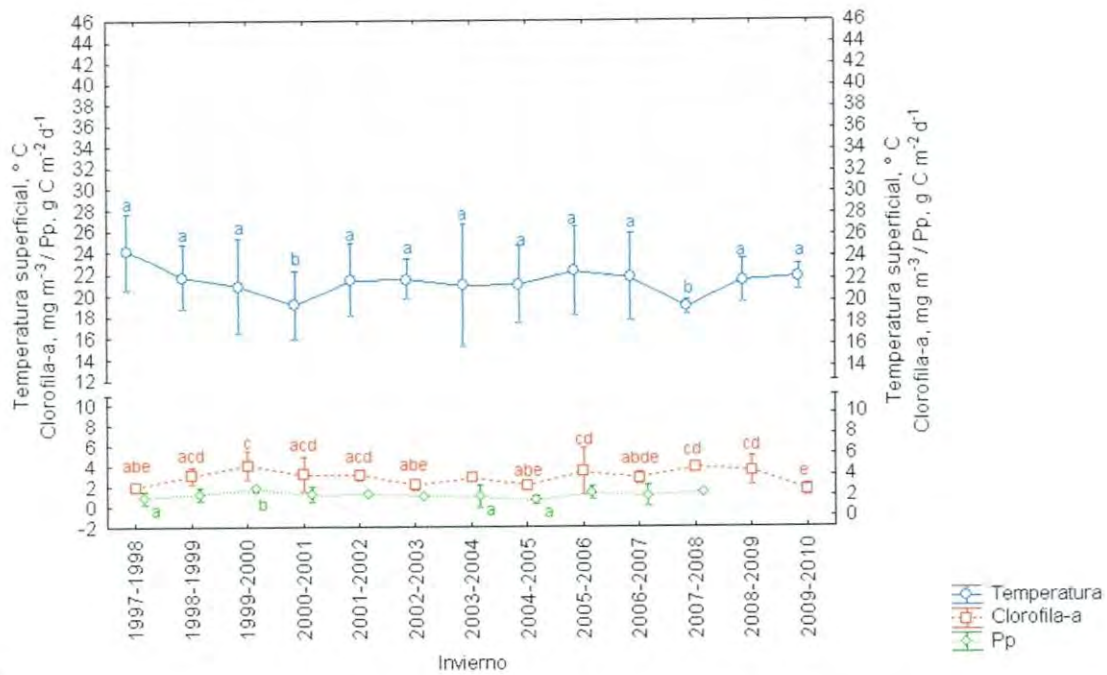


Figura 23. Media de TSM, Chl y PP según el período invernal en el Golfo de California (1997 – 2010). Las barras verticales denotan los intervalos de confianza (95%). Las letras en minúscula y en color señalan diferencias significativas entre eventos (y la ausencia de letras, la ausencia de diferencias estadísticamente significativas).

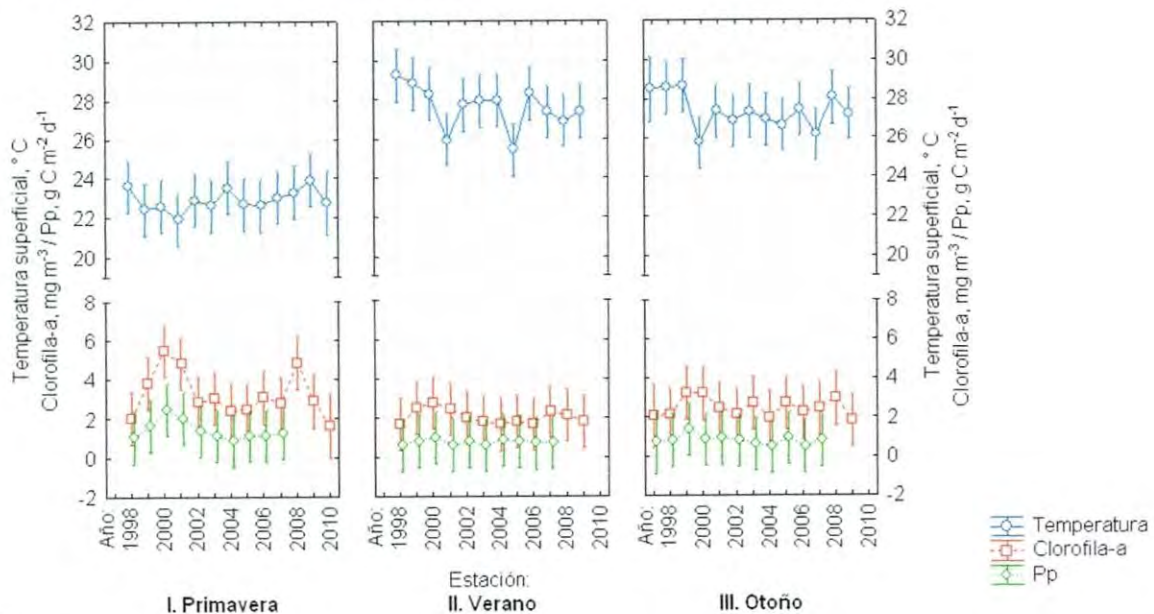


Figura 24. Media de TSM ( $^{\circ}\text{C}$ ), Chl ( $\text{mg m}^{-3}$ ) y PP ( $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) según el período y la estación en el Golfo de California (1997 – 2010). Las barras verticales denotan los intervalos de confianza (95%).

Tabla 18. Media ( $\mu$ ) y desviación estándar ( $\sigma$ ) de TSM ( $^{\circ}$  C), Chl ( $\text{mg m}^{-3}$ ) y PP ( $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) según la primavera para todo el Golfo de California (1997 – 2010). En todos los casos  $n = 3$  (meses), excepto en donde se señala con \*, en donde  $n = 2$ .

	Año	TSM $^{\circ}$ C		Chl $\text{mg m}^{-3}$		PP $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$	
		$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
Primavera	1998	23.61	1.399	2.03	0.107	1.97	0.069
	1999	22.41	1.325	3.82	0.474	1.87	0.200
	2000	22.57	2.883	5.49	1.597	2.92	0.195
	2001	21.90	2.071	4.83	0.879	2.09	0.140
	2002	22.89	3.085	2.84	0.471	1.24	0.178
	2003	22.60	2.447	3.07	0.256	1.07	0.314
	2004	23.51	1.932	2.44	0.243	1.10	0.397
	2005	22.66	1.438	2.46	0.231	1.04	0.364
	2006	22.59	3.604	3.09	1.001	1.22	0.203
	2007	23.01	0.678	2.81	0.488	1.32	0.223
	2008	23.25	1.917	4.87	0.692		
	2009	23.91	2.273	2.89	0.880		
	2010	22.75*	0.629	1.64	0.299		

Tabla 19. Media ( $\mu$ ) y desviación estándar ( $\sigma$ ) de TSM ( $^{\circ}$  C), Chl ( $\text{mg m}^{-3}$ ) y PP ( $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) según el verano para todo el Golfo de California (1997 – 2010). En todos los casos  $n = 3$ .

	Año	TSM $^{\circ}$ C		Chl $\text{mg m}^{-3}$		PP $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$	
		$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
Verano	1998	29.26	1.499	1.70	0.356	0.67	0.085
	1999	28.82	1.597	2.53	0.391	0.87	0.213
	2000	28.30	1.754	2.78	0.549	1.14	0.437
	2001	25.96	1.667	2.45	1.000	1.05	0.650
	2002	27.77	1.526	2.04	0.304	1.12	0.387
	2003	27.94	1.777	1.84	0.260	0.71	0.281
	2004	27.98	1.657	1.68	0.390	0.87	0.361
	2005	25.43	2.200	1.82	0.045	0.81	0.211
	2006	28.32	0.520	1.72	0.633	0.85	0.092
	2007	27.40	1.044	2.36	0.177	0.84	0.076
	2008	26.93	0.658	2.15	0.958		
	2009	27.41	1.628	1.81	0.138		

Tabla 20. Media ( $\mu$ ) y desviación estándar ( $\sigma$ ) de TSM ( $^{\circ}$  C), Chl ( $\text{mg m}^{-3}$ ) y PP ( $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) según el otoño para todo el Golfo de California (1997 – 2010). En todos los casos  $n = 3$ , excepto en donde se señala con \*, en donde  $n = 2$ , y con • en donde  $n = 1$ .

	TSM		Chl		PP	
	$^{\circ}\text{C}$		$\text{mg m}^{-3}$		$\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$	
Año	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
1997	28.51*	1.707	2.09*	0.167	0.78•	
1998	28.59	1.177	2.17	0.322	0.70	0.090
1999	28.68	1.26	3.22	0.072	1.11	0.360
2000	25.74	3.022	3.21	0.021	0.95	0.396
2001	27.28	2.296	2.47	0.171	0.65	0.102
2002	26.88	1.286	2.13	0.169	0.63	0.160
2003	27.37	2.680	2.71	0.330	0.66	0.276
2004	26.94	2.449	1.99	0.013	0.65	0.231
2005	26.66	1.955	2.71	0.371	0.95	0.137
2006	27.48	1.457	2.25	0.254	0.51	0.182
2007	26.19	0.776	2.44	0.087	0.56	0.165
2008	28.07	1.958	2.95	0.292		
2009	27.21	1.159	1.82	0.214		

Otoño

A pesar de la disminución de clorofila de la primavera de 1998, ésta no mostró diferencias significativas respecto a las primaveras de los años 2002 y 2003 (bajo condiciones El Niño de magnitud moderada) ni del resto de las primaveras que se desarrollaron bajo condiciones “normales” (Tabla 18, fig. 24-I).

#### 6.2.3.2.3 Verano

Al comparar los veranos considerados en la serie de tiempo no se encontraron diferencias significativas (Tabla 19, fig. 24-II).

#### 6.2.3.2.4 Otoño

Existieron diferencias significativas entre los otoños comprendidos en la serie de tiempo. Los otoños de los años 1999, 2000 y 2008 (años Niña) se distinguieron por un incremento de clorofila respecto a otros años (Tabla 20, fig. 24-III).

#### 6.2.3.3 Productividad primaria

Las medias de PP fueron las siguientes:  $1.32 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  en invierno,  $1.40 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  en primavera,  $0.76 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  en verano y  $0.81 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  en otoño. Las medias de primavera e invierno no fueron significativamente diferentes entre sí, pero sí lo fueron respecto a las medias de verano y otoño (Tabla 14, fig. 21).

El Niño disminuyó los valores de PP en todas las estaciones, mientras que La Niña aumentó los valores, aunque sus efectos pudieron verse enmascarados, particularmente durante el verano, estación en la que bajo condiciones “normales” promediaron  $0.75 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  y bajo condiciones La Niña promediaron  $0.76 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (Tabla 14, fig. 22).

##### 6.2.3.3.1 Invierno

La PP de los inviernos comprendidos en la serie de tiempo mostró diferencias significativas. Los inviernos El Niño 1997-1998 y 2004-2005, así como el invierno 2003-2004, fueron estadísticamente distintos al de La Niña 1999-2000 (Tabla 17, fig. 23).

#### 6.2.3.3.2 Primavera

La PP entre periodos primaverales fue significativamente diferente. Destacó el incremento en los valores de PP en las primaveras de 2000 y 2001 (años La Niña) (Tabla 18, fig. 24-I).

#### 6.2.3.3.3 Verano y otoño

La PP de los veranos y los otoños considerados en la serie de tiempo no evidenciaron diferencias significativas (Tablas 19 y 20, figs. 24-II y 24-III).

#### 6.2.4 Anomalías estacionales

La primer señal de El Niño que se registró en el Golfo de California estuvo conformada por las anomalías positivas de temperatura superficial. Los efectos del incremento de TSM sobre los valores de Chl y PP se registraron de forma inmediata o con un desfase aproximado de 3 meses. Tras este periodo, Chl y PP disminuyeron en el golfo (los decrementos estuvieron descritos por anomalías negativas máximas de -1.66 para clorofila y -0.53 para PP) (Tabla 21, fig. 25). Los valores absolutos de las anomalías máximas se registraron en las islas (Ver apéndice C: figuras 33 a 35).

Cuando aconteció un El Niño la respuesta negativa de PP respecto a un decremento de Chl pudo: 1) haber estado descrita por un periodo de desfase que no excedió los tres meses, o 2) no existir un rezago en la señal y el decremento de PP ocurrir a la par del decremento de Chl. Esto último aconteció la mayoría de las veces.

Al concluir las anomalías positivas de TSM características de un evento El Niño, la señal sobre las anomalías negativas de Chl y PP persistieron por 9 meses más como máximo, 3 meses como mínimo y 6 meses como promedio. Lo anterior aconteció aún si a un El Niño le sucedió La Niña, lo que habría supuesto condiciones óptimas para el restablecimiento inmediato de los valores normales (o superiores) de Chl y PP.

La transición hacia anomalías positivas en la Chl y PP, una vez que se registra el inicio de la señal de La Niña en la TSM, ocurrió hasta 9 meses después de haberse iniciado el evento (o después de 3 meses como mínimo). Las condiciones favorables que representa La Niña para la Chl y PP se extendieron de 3 a 6 meses más, aún cuando las anomalías negativas de TSM habían cesado y habían cedido el lugar a condiciones “normales”.



Una respuesta positiva de Chl y/o PP de forma inmediata (o menor a los 3 meses) ante La Niña sólo se presentó cuando el evento fue antecedido por condiciones “normales”. En este trabajo no se encontró una relación clara entre la intensidad o la duración de eventos El Niño y La Niña, y la duración de los efectos sobre la Chl y PP.

Tabla 21. Media climatológica ( $\mu_{cl}$ ) y anomalías negativas (A-) y positivas (A+) máximas de TSM ( $^{\circ}\text{C}$ ), Chl ( $\text{mg m}^{-3}$ ) y PP ( $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) en el Golfo de California (1997 – 2010).

Estación	TSM			Chl			PP		
	$\mu_{cl}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$\mu_{cl}$	$\text{mg m}^{-3}$	$\text{mg m}^{-3}$	$\mu_{cl}$	$\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$	$\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$
Invierno	21.27	-2.30	2.91	2.91	-1.27	1.18	1.32	-0.53	0.65
Primavera	22.90	-1.00	1.00	3.29	-1.66	2.20	1.40	-0.47	1.41
Verano	27.63	-2.20	1.63	2.07	-0.40	0.71	0.76	-0.22	0.24
Otoño	27.33	-1.58	1.35	2.48	-0.67	0.74	0.81	-0.17	0.54

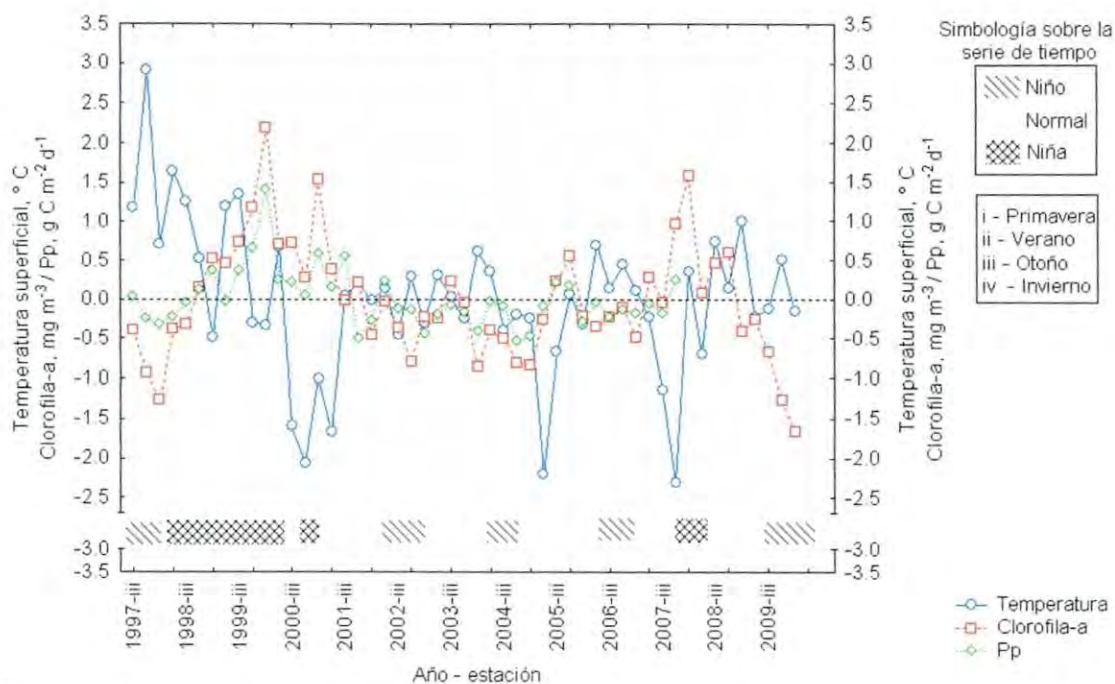


Figura 25. Anomalías de TSM, Chl y PP en el Golfo de California (1997 – 2010).

### 6.3 Correlación de variables

Las correlaciones TSM vs. Chl y TSM vs. PP resultaron significativas en todos los casos (Tabla 22). La temperatura superficial a escala global explicó el 22% y 32% de variabilidad de Chl (Tabla 22, fig. 26) y PP (Tabla 22, fig. 27), respectivamente. El porcentaje más alto de variabilidad de Chl explicado por la TSM observó en la región central con un valor de 51% y el menor en la boca del golfo con 26%. A pesar del porcentaje de Chl explicada por la temperatura en la región central, el porcentaje de PP explicado por esta misma variable fue del 4% y la relación entre Chl y PP no fue significativa en esta región (no así en las islas y en la boca, en donde la correlación resultó significativa). El porcentaje más alto de PP explicado por la TSM se observó en las islas con un coeficiente de determinación de 0.16.

A escala global el 57% de PP fue explicada por Chl (Tabla 22, fig. 28). A escala regional este porcentaje disminuyó; el coeficiente de determinación más alto entre Chl y PP se encontró para la boca del golfo (14%).

Tabla 22. Matriz de correlación entre TSM, Chl y PP en el Golfo de California a escala global y regional. Coeficientes de correlación de Pearson ( $r$ ) y coeficientes de determinación ( $r^2$ ) marcados en rojo indican ser significativos a un valor de  $p < 0.05$ .

		<b>Golfo de California</b>	<b>Islas</b>	<b>Centro</b>	<b>Boca</b>
N		151	157	157	157
TSM vs. Chl	$r(X,Y)$	-0.474	-0.602	-0.717	-0.513
	$r^2$	0.224	0.362	0.514	0.263
	p	0.000	0.000	0.000	0.000
TSM vs. PP	$r(X,Y)$	-0.570	-0.407	-0.221	-0.360
	$r^2$	0.324	0.166	0.049	0.130
	p	0.000	0.000	0.006	0.000
N		122	152	152	152
Chl vs. PP	$r(X,Y)$	0.758	0.197	0.129	0.375
	$r^2$	0.575	0.039	0.016	0.141
	p	0.000	0.014	0.111	0.000

### 6.3.1 Correlación interanual

A escala global la condición interanual (El Niño, La Niña o “normal”) explicó el 29% de la variabilidad de Chl, mientras que el porcentaje se redujo a 14% al explicar la variabilidad de PP (Tabla 23). A escala regional los coeficientes de correlación fueron cercanos a cero y no hubo relación significativa (o resultó despreciable, como en el caso de las islas  $p = 0.042$ ), excepto en la boca del golfo, en donde si bien el coeficiente de correlación se mantuvo cercano a cero, la correlación entre la temperatura interanual y la Chl y/o PP fue significativa, apoyando los resultados anteriormente obtenidos que sugerían que la señal de la condición interanual a escala regional es más evidente en la boca del golfo, y débil en la región de las islas y el centro, aunque no lo fue a escala global.

Tabla 23. Matriz de correlación entre Chl o PP vs. temperatura interanual (condición climatológica) en el Golfo de California a escala global y regional. Coeficientes de correlación de Pearson ( $r$ ) y coeficientes de determinación ( $r^2$ ) marcados en rojo indican ser significativos a un valor de  $p < 0.05$ .

		<b>Golfo de California</b>	<b>Islas</b>	<b>Centro</b>	<b>Boca</b>
Chl vs. TSM	N	151	157	157	157
	$r(X,Y)$	-0.543	-0.161	-0.103	-0.371
	$r^2$	0.295	0.026	0.010	0.138
	p	0.000	0.042	0.195	0.000
PP vs. TSM	N	122	152	152	152
	$r(X,Y)$	-0.377	-0.032	0.032	-0.241
	$r^2$	0.142	0.001	0.001	0.058
	p	0.000	0.687	0.694	0.002

### 6.3.2 Correlación estacional

La Chl y PP regional y global mostraron correlación significativa en la escala estacional. En la escala global, la TSM estacional explicó el 15% de la variabilidad de Chl y el 29% de PP (Tabla 24). A escala regional e los porcentajes más altos de variabilidad de Chl y PP explicados por la temperatura estacional se encontraron en la región central (39%) y en las islas (12%), respectivamente (Tabla 24).

### 6.3.3 Correlación interanual & estacional

La Chl y PP correlacionaron negativamente con TSM en la escala estacional e interanual (Tablas 23 y 24), es decir Chl y/o PP disminuyeron ante un incremento en TSM, ya sea que este incremento se deba a cambios estacionales o a la presencia de un evento climatológico como El Niño. La correlación se transforma a positiva si se considera la condición a la inversa, en donde una disminución de temperatura genera un incremento de Chl y/o PP.

Tabla 24. Matriz de correlación entre Chl o PP vs. TSM estacional en el Golfo de California a escala global y regional. Coeficientes de correlación de Pearson (r) y coeficientes de determinación ( $r^2$ ) marcados en rojo indican ser significativos a un valor de  $p < 0.05$ .

		<b>Golfo de California</b>	<b>Islas</b>	<b>Centro</b>	<b>Boca</b>
	n	151	157	157	157
Chl vs. TSM estacional	r (X,Y)	-0.396	-0.508	-0.624	-0.449
	$r^2$	0.156	0.258	0.390	0.202
	p	0.000	0.000	0.000	0.020
	N	122	152	152	152
PP vs. TSM estacional	r (X,Y)	-0.546	-0.358	-0.188	-0.255
	$r^2$	0.298	0.128	0.035	0.065
	p	0.000	0.000	0.000	0.001

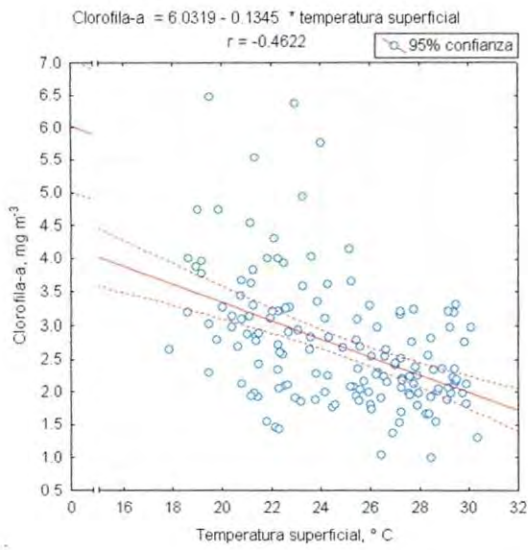


Figura 26. Chl vs. TSM en el Golfo de California.

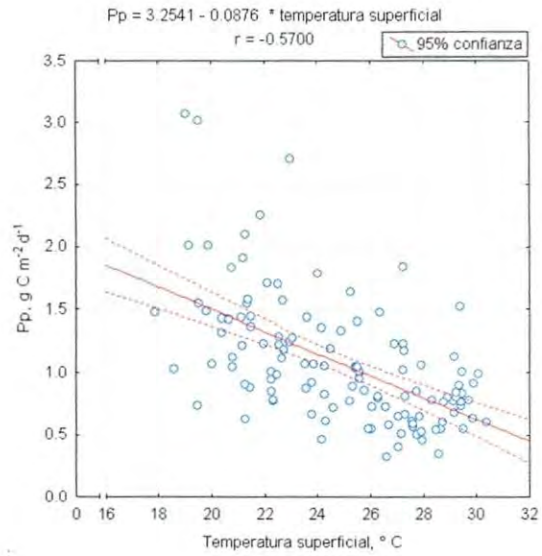


Figura 27. PP vs. TSM en el Golfo de California.

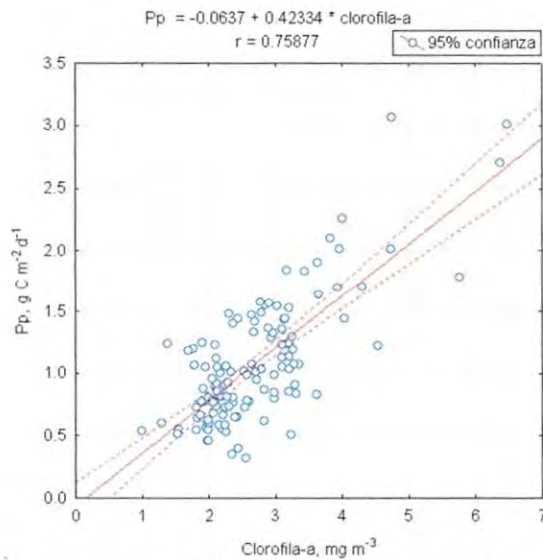


Figura 28. PP vs. Chl en el Golfo de California.

## 6.4 Producción nueva y regenerada

### 6.4.1 Total

Los resultados indican que PP en el Golfo de California, considerando el total del área superficial ( $\sim 160,000 \text{ km}^2$ ), fue  $62.56\text{E}^6$  toneladas de carbono al año. De estas toneladas,  $32.72\text{E}^6$  fueron atribuibles a la producción nueva, es decir, que la razón de producción regenerada y producción nueva fue de 1:1.09 (Tabla 25, fig. 29). Considerando un área superficial menor,  $\sim 106,372 \text{ km}^2$ , la razón de producción regenerada y producción nueva fue de 1:1.78 (Tabla 25, fig. 29).

A escala regional la PP atribuible a la producción nueva fue mayor en la región de las islas con un porcentaje de 74%. En la región central el porcentaje debido a la producción nueva fue 64%, mientras que en la boca del golfo este porcentaje fue 40% (Tabla 25, fig. 29).

### 6.4.2 Estacional

En la región de las islas el porcentaje de producción atribuible a la producción nueva durante el invierno y la primavera fue 72% y 83% respectivamente, mientras que el porcentaje de verano y otoño fue 66 % y 67 %, respectivamente. La razón PR:PN fue 1:2.6 en invierno, 1:5 en primavera, 1:2 en verano y 1:2 en otoño (Tabla 26, fig. 30). La misma situación ocurrió en la región central, con porcentajes atribuibles a la producción nueva altos y similares durante invierno y primavera, 71% y 75%, respectivamente. En verano en esta misma región la producción regenerada (61 %) rebasó a la producción nueva. En otoño, estación de condiciones similares al verano, la producción nueva también fue superada, aunque por menos del 5%. La razón PR:PN fue 1:2.4 en invierno, 1:3 en primavera, 1:0.6 en verano y 1:0.9 en otoño (Tabla 27, fig. 30).

En la boca la producción nueva fue 52% de PP en invierno y 56% en primavera. En esta región el porcentaje de producción regenerada rebasó a la producción nueva en verano y otoño (como no ocurrió en las islas). En verano PN fue 25% de PP, con una razón de producción regenerada y producción nueva de 1:0.33. En otoño el porcentaje de producción regenerada fue el más alto, 96%. La razón de producción regenerada a producción nueva en esta región en condiciones de otoño fue de 1:0.04 (Tabla 28, fig. 30).

Tabla 25. PP, producción nueva, razón PR:PN y producción integrada de toda el área de estudio en el Golfo de California (SeaWiFS, MODIS y Pathfinder (SMP); SeaWiFS y Pathfinder (SP)).

		Región <sup>+</sup>			Golfo	
		Islas	Centro	Boca	SP	SMP
~Área superficial abarcada (km <sup>2</sup> )		17,856	12,666	75,850	160,000	106,372
	g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	2.14	1.52	0.92	1.07	1.53
PP	g C m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>	781	555	336	391	558
	Ton C m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>	7.81E <sup>-4</sup>	5.55E <sup>-4</sup>	3.36E <sup>-4</sup>	3.91E <sup>-4</sup>	5.58E <sup>-4</sup>
P-Regenerada*	%	26	36	60	48	36
	g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	0.55	0.55	0.55	0.51	0.55
P-Nueva	%	74	64	40	52	64
	g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	1.58	0.97	0.37	0.56	0.98
	g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	1 : 2.87	1 : 1.76	1 : 0.67	1 : 1.09	1 : 1.78
P-R:P-N	Ton C m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>	3.65E <sup>-4</sup> : 1.04E <sup>-3</sup>	3.65E <sup>-4</sup> : 6.42E <sup>-4</sup>	3.65E <sup>-4</sup> : 2.44E <sup>-4</sup>	3.65E <sup>-4</sup> : 4.01E <sup>-4</sup>	3.65E <sup>-4</sup> : 6.50E <sup>-4</sup>
	Ton C a <sup>-1</sup>	6.51E <sup>6</sup> : 18.57E <sup>6</sup>	4.62E <sup>6</sup> : 8.13E <sup>6</sup>	27.68E <sup>6</sup> : 18.50E <sup>6</sup>	58.40E <sup>6</sup> : 64.16E <sup>6</sup>	38.82E <sup>6</sup> : 69.14E <sup>6</sup>
Producción anual de C integrada (al área abarcada) en toneladas	PP	13.94E <sup>6</sup>	7.02E <sup>6</sup>	25.48E <sup>6</sup>	62.56E <sup>6</sup>	59.35E <sup>6</sup>
	PR	3.62E <sup>6</sup>	2.52E <sup>6</sup>	15.28E <sup>6</sup>	29.78E <sup>6</sup>	21.35E <sup>6</sup>
	PN	10.31E <sup>6</sup>	4.49E <sup>6</sup>	10.19E <sup>6</sup>	32.72E <sup>6</sup>	38.02E <sup>6</sup>



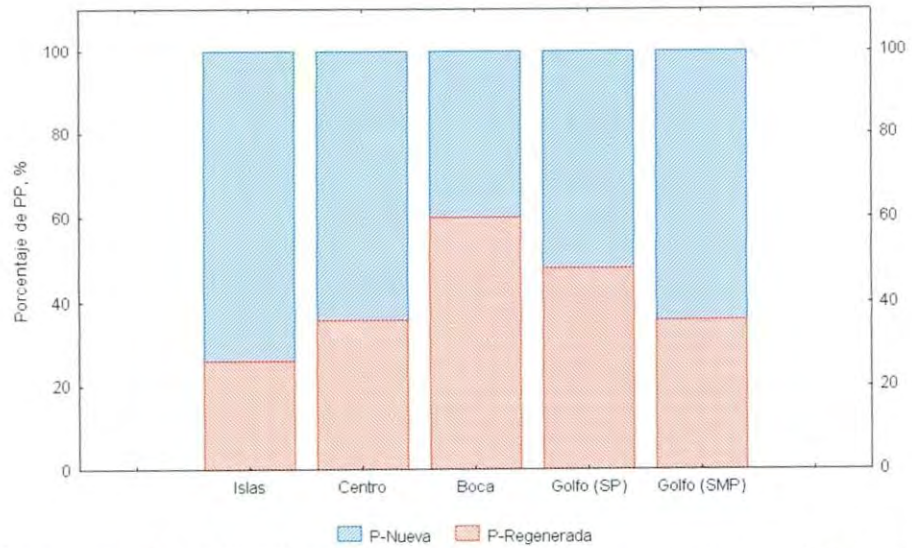


Figura 29. Porcentaje de producción nueva y producción regenerada en el Golfo de California (1997 – 2010) (SeaWiFS, MODIS y Pathfinder (SMP); SeaWiFS y Pathfinder (SP)).

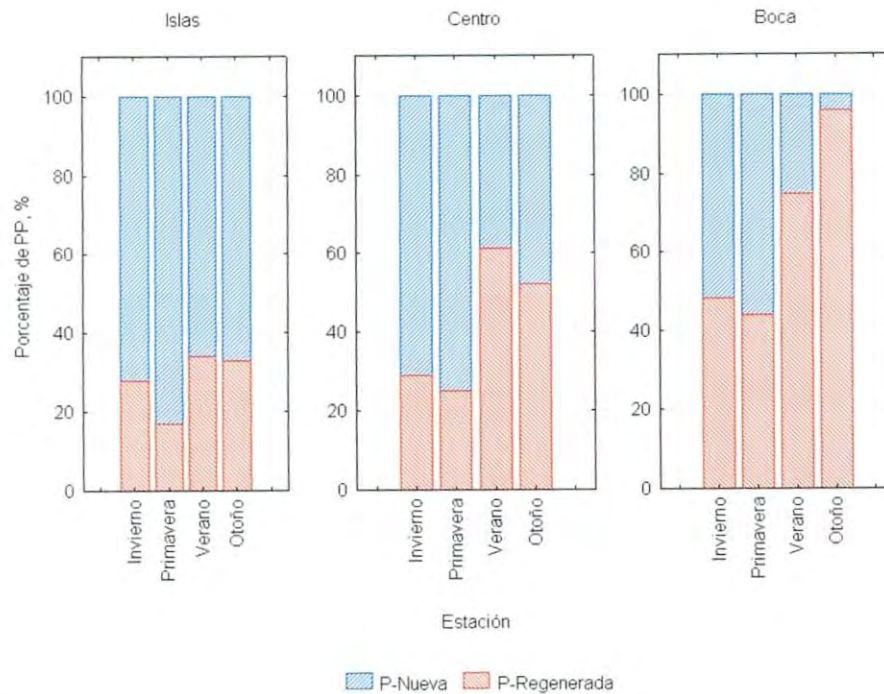


Figura 30. Porcentaje de producción nueva y producción regenerada según la estación del año en las tres regiones del Golfo de California (1997 – 2010). (SeaWiFS, MODIS y Pathfinder (SMP); SeaWiFS y Pathfinder (SP)).

Tabla 26. PP, producción nueva, producción regenerada, razón PR:PN y producción integrada al área superficial de las islas (~17,856 km<sup>2</sup>).

		Estación			
		Invierno	Primavera	Verano	Otoño
PP	g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	1.96	3.31	1.62	1.68
	g C m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>	715	1,208	591	613
	Ton C m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>	7.15E <sup>-4</sup>	1.20E <sup>-3</sup>	5.91E <sup>-4</sup>	6.13E <sup>-4</sup>
	Ton C m <sup>-2</sup> est <sup>-1</sup>	1.78E <sup>-4</sup>	3.02E <sup>-4</sup>	1.47E <sup>-4</sup>	1.53E <sup>-4</sup>
% de P-Regenerada *(MVG = 0.55g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )		28	17	34	33
P-Nueva	%	72	83	66	67
	g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	1.41	2.74	1.06	1.12
	g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	1 : 2.56	1 : 4.98	1 : 1.92	1 : 2.03
	Ton C m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>	3.65E <sup>-4</sup> : 9.34E <sup>-4</sup>	3.65E <sup>-4</sup> : 1.81E <sup>-3</sup>	3.65E <sup>-4</sup> : 7.00E <sup>-4</sup>	3.65E <sup>-4</sup> : 7.43E <sup>-4</sup>
P-R : P-N	Ton C m <sup>-2</sup> est <sup>-1</sup>	9.12E <sup>-5</sup> : 2.33E <sup>-4</sup>	9.12E <sup>-5</sup> : 4.52E <sup>-4</sup>	9.12E <sup>-5</sup> : 1.75E <sup>-4</sup>	9.12E <sup>-5</sup> : 1.85E <sup>-4</sup>
	Ton C a <sup>-1</sup>	6.51E <sup>6</sup> : 16.67E <sup>6</sup>	6.51E <sup>6</sup> : 32.31E <sup>6</sup>	6.51E <sup>6</sup> : 12.49E <sup>6</sup>	6.51E <sup>6</sup> : 13.26E <sup>6</sup>
	Ton C est <sup>-1</sup>	1.62E <sup>6</sup> : 4.16E <sup>6</sup>	1.62E <sup>6</sup> : 8.07E <sup>6</sup>	1.62E <sup>6</sup> : 3.12E <sup>6</sup>	1.62E <sup>6</sup> : 3.31E <sup>6</sup>
Producción estacional de C integrada (al área abarcada) en toneladas	PP	3.17E <sup>6</sup>	5.39E <sup>6</sup>	2.62E <sup>6</sup>	2.73E <sup>6</sup>
	PR	8.89E <sup>5</sup>	9.16E <sup>5</sup>	8.90E <sup>5</sup>	9.00E <sup>5</sup>
	PN	2.28E <sup>6</sup>	4.47E <sup>6</sup>	1.72E <sup>6</sup>	1.82E <sup>6</sup>

A escala global también quedaron evidenciadas las condiciones de invierno y primavera sobre el porcentaje de producción primaria que es atribuible a la producción nueva, el cual fue mayor al porcentaje atribuible a la producción regenerada. Con valores SP (SeaWiFS y Pathfinder), el porcentaje de producción nueva fue 61% en invierno y 64% en primavera (Tabla 29, fig. 31). Con valores SMP (SeaWiFS, MODIS y Pathfinder (SMP)) estos porcentajes fueron 67% en invierno y 76% en primavera (Tabla 30, fig. 31).

En condiciones de verano y otoño, con información SP, se obtuvo que la producción regenerada rebasó a la producción nueva: la producción nueva en verano fue 33% de PP y en otoño 37% (Tabla 29, fig. 31). Con información SMP la razón producción regenerada a producción nueva fue 1:0.96 en verano y 1:1 en otoño (Tabla 30, fig. 31).

Tabla 27. PP, producción nueva, producción regenerada, razón PR:PN y producción integrada al área superficial de la región centro (~12,666 km<sup>2</sup>).

		Estación			
		Invierno	Primavera	Verano	Otoño
PP	g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	1.89	2.24	0.90	1.05
	g C m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>	690	818	329	383
	Ton C m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>	6.90E <sup>-4</sup>	8.18E <sup>-4</sup>	3.29E <sup>-4</sup>	3.83E <sup>-4</sup>
	Ton C m <sup>-2</sup> est <sup>-1</sup>	1.72E <sup>-4</sup>	2.04E <sup>-4</sup>	8.22E <sup>-5</sup>	9.57E <sup>-5</sup>
% de P-Regenerada *(MGV = 0.55 g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )		29	25	61	52
P-Nueva	%	71	75	39	48
	g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	1.34	1.68	0.35	0.50
	g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	1 : 2.43	1 : 3.05	1 : 0.63	1 : 0.90
	Ton C m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>	3.65E <sup>-4</sup> : 8.86E <sup>-4</sup>	3.65E <sup>-4</sup> : 1.11E <sup>-3</sup>	3.65E <sup>-4</sup> : 2.29E <sup>-4</sup>	3.65E <sup>-4</sup> : 3.28E <sup>-4</sup>
P-R : P-N	Ton C m <sup>-2</sup> est <sup>-1</sup>	9.12E <sup>-5</sup> : 2.21E <sup>-4</sup>	9.12E <sup>-5</sup> : 2.77E <sup>-4</sup>	9.12E <sup>-5</sup> : 5.72E <sup>-5</sup>	9.12E <sup>-5</sup> : 8.20E <sup>-5</sup>
	Ton C a <sup>-1</sup>	4.62E <sup>6</sup> : 11.22E <sup>6</sup>	4.62E <sup>6</sup> : 14.05E <sup>6</sup>	4.62E <sup>6</sup> : 2.90E <sup>6</sup>	4.62E <sup>6</sup> : 4.15E <sup>6</sup>
	Ton C est <sup>-1</sup>	1.15E <sup>6</sup> : 2.79E <sup>6</sup>	1.15E <sup>6</sup> : 3.50E <sup>6</sup>	1.15E <sup>6</sup> : 7.24E <sup>5</sup>	1.15E <sup>6</sup> : 1.03E <sup>6</sup>
Producción estacional de C integrada (al área abarcada) en toneladas	PP	2.17E <sup>6</sup>	2.58E <sup>6</sup>	1.04E <sup>6</sup>	1.21E <sup>6</sup>
	PR	6.29E <sup>5</sup>	6.45E <sup>5</sup>	6.34E <sup>5</sup>	6.29E <sup>5</sup>
	PN	1.54E <sup>6</sup>	1.93E <sup>6</sup>	4.05E <sup>5</sup>	5.80E <sup>5</sup>

Tabla 28. PP, producción nueva, producción regenerada, razón PR:PN y producción integrada al área superficial de la boca (~75,850 km<sup>2</sup>).

		Estación			
		Invierno	Primavera	Verano	Otoño
PP	g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	1.14	1.25	0.73	0.57
	g C m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>	416	456	266	208
	Ton C m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>	4.16E <sup>-4</sup>	4.56E <sup>-4</sup>	2.66E <sup>-4</sup>	2.08E <sup>-4</sup>
	Ton C m <sup>-2</sup> est <sup>-1</sup>	1.04E <sup>-4</sup>	1.14E <sup>-4</sup>	6.65E <sup>-5</sup>	5.20E <sup>-5</sup>
% de P-Regenerada *(MVG = 0.55 g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )		48	44	75	96
P-Nueva	%	52	56	25	4
	g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	0.59	0.70	0.18	0.02
	g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	1 : 1.07	1 : 1.27	1 : 0.32	1 : 0.03
	Ton C m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>	3.65E <sup>-4</sup> : 3.90E <sup>-4</sup>	3.65E <sup>-4</sup> : 4.63E <sup>-4</sup>	3.65E <sup>-4</sup> : 1.16E <sup>-4</sup>	3.65E <sup>-4</sup> : 1.09E <sup>-5</sup>
P-R : P-N	Ton C m <sup>-2</sup> est <sup>-1</sup>	9.12E <sup>-5</sup> : 9.75E <sup>-5</sup>	9.12E <sup>-5</sup> : 1.15E <sup>-4</sup>	9.12E <sup>-5</sup> : 2.92E <sup>-5</sup>	9.12E <sup>-5</sup> : 2.73E <sup>-6</sup>
	Ton C a <sup>-1</sup>	27.68E <sup>6</sup> : 29.58E <sup>6</sup>	27.68E <sup>6</sup> : 35.11E <sup>6</sup>	27.68E <sup>6</sup> : 8.79E <sup>6</sup>	27.68E <sup>6</sup> : 8.2E <sup>5</sup>
	Ton C est <sup>-1</sup>	6.91E <sup>6</sup> : 7.39E <sup>6</sup>	6.91E <sup>6</sup> : 8.77E <sup>6</sup>	6.91E <sup>6</sup> : 2.19E <sup>6</sup>	6.91E <sup>6</sup> : 2.06E <sup>5</sup>
Producción estacional de C integrada (al área abarcada) en toneladas	PP	7.88E <sup>6</sup>	8.64E <sup>6</sup>	5.04E <sup>6</sup>	3.94E <sup>6</sup>
	PR	3.78E <sup>6</sup>	3.80E <sup>6</sup>	3.78E <sup>6</sup>	3.78E <sup>6</sup>
	PN	4.09E <sup>6</sup>	4.83E <sup>6</sup>	1.26E <sup>6</sup>	1.57E <sup>5</sup>

Tabla 29. PP, producción nueva, producción regenerada, razón PR:PN y producción integrada al área superficial del Golfo de California (~160,000,000 km<sup>2</sup>).

		Estación			
		Invierno	Primavera	Verano	Otoño
PP	g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	1.32	1.40	0.76	0.81
	g C m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>	482	511	277	296
	Ton C m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>	4.82E <sup>-4</sup>	5.11E <sup>-4</sup>	2.77E <sup>-4</sup>	2.96E <sup>-4</sup>
	Ton C m <sup>-2</sup> est <sup>-1</sup>	1.20E <sup>-4</sup>	1.27E <sup>-4</sup>	6.93E <sup>-5</sup>	7.39E <sup>-5</sup>
% de P-Regenerada *(MVG1= 0.51 g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )		39	36	67	63
P-Nueva	%	61	64	33	37
	g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	0.81	0.89	0.25	0.30
	g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	1 : 1.58	1 : 1.74	1 : 0.49	1 : 0.58
	Ton C m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>	3.65E <sup>-4</sup> : 5.76E <sup>-4</sup>	3.65E <sup>-4</sup> : 6.35E <sup>-4</sup>	3.65E <sup>-4</sup> : 1.78E <sup>-4</sup>	3.65E <sup>-4</sup> : 2.11E <sup>-4</sup>
P-R : P-N	Ton C m <sup>-2</sup> est <sup>-1</sup>	9.12E <sup>-5</sup> : 1.44E <sup>-4</sup>	9.12E <sup>-5</sup> : 1.58E <sup>-4</sup>	9.12E <sup>-5</sup> : 4.47E <sup>-5</sup>	9.12E <sup>-5</sup> : 5.29E <sup>-5</sup>
	Ton C a <sup>-1</sup>	58.40E <sup>6</sup> : 92.16.E <sup>6</sup>	58.40E <sup>6</sup> : 101.60E <sup>6</sup>	58.40E <sup>6</sup> : 28.48E <sup>6</sup>	58.40E <sup>6</sup> : 33.76E <sup>6</sup>
	Ton C est <sup>-1</sup>	14.59E <sup>6</sup> : 23.04E <sup>6</sup>	14.59E <sup>6</sup> : 25.28E <sup>6</sup>	14.59E <sup>6</sup> : 7.15E <sup>6</sup>	14.59E <sup>6</sup> : 8.46E <sup>6</sup>
Producción estacional de C integrada (al área abarcada) en toneladas	PP	19.20E <sup>6</sup>	20.32E <sup>6</sup>	11.08E <sup>6</sup>	11.82E <sup>6</sup>
	PR	7.49E <sup>6</sup>	7.32E <sup>6</sup>	7.42E <sup>6</sup>	7.45E <sup>6</sup>
	PN	11.71E <sup>6</sup>	13.00E <sup>6</sup>	3.66E <sup>6</sup>	4.37E <sup>6</sup>

Tabla 30. PP, producción nueva, producción regenerada, razón PR:PN y producción integrada al área superficial del Golfo de California (~160,000,000 km<sup>2</sup>).

		Estación			
		Invierno	Primavera	Verano	Otoño
PP	g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	1.66	2.26	1.08	1.10
	g C m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>	606	825	394	402
	Ton C m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>	6.60E <sup>-4</sup>	8.25E <sup>-4</sup>	3.94E <sup>-4</sup>	4.02E <sup>-4</sup>
	Ton C m <sup>-2</sup> est <sup>-1</sup>	1.51E <sup>-4</sup>	2.06E <sup>-4</sup>	9.85E <sup>-5</sup>	1.00E <sup>-4</sup>
% de P-Regenerada *(MVG2= 0.55 g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )		33	24	51	50
P-Nueva	%	67	76	49	50
	g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	1.11	1.71	0.53	0.55
	g C m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	1 : 2.01	1 : 3.10	1 : 0.96	1 : 1
	Ton C m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>	3.65E <sup>-4</sup> : 7.33E <sup>-4</sup>	3.65E <sup>-4</sup> : 1.13E <sup>-3</sup>	3.65E <sup>-4</sup> : 3.50E <sup>-4</sup>	3.65E <sup>-4</sup> : 3.65E <sup>-4</sup>
P-R : P-N	Ton C m <sup>-2</sup> est <sup>-1</sup>	9.12E <sup>-5</sup> : 1.83E <sup>-4</sup>	9.12E <sup>-5</sup> : 2.82E <sup>-4</sup>	9.12E <sup>-5</sup> : 8.76E <sup>-5</sup>	9.12E <sup>-5</sup> : 9.12E <sup>-5</sup>
	Ton C a <sup>-1</sup>	38.82E <sup>6</sup> : 77.97E <sup>6</sup>	38.82E <sup>6</sup> : 120.20E <sup>6</sup>	38.82E <sup>6</sup> : 37.23E <sup>6</sup>	38.82E <sup>6</sup> : 38.82E <sup>6</sup>
	Ton C est <sup>-1</sup>	9.70E <sup>6</sup> : 19.46E <sup>6</sup>	9.70E <sup>6</sup> : 30.05E <sup>6</sup>	9.70E <sup>6</sup> : 9.30E <sup>6</sup>	9.70E <sup>6</sup> : 9.70E <sup>6</sup>
Producción estacional de C integrada (al área abarcada) en toneladas	PP	16.06E <sup>6</sup>	21.91E <sup>6</sup>	10.47E <sup>6</sup>	10.63E <sup>6</sup>
	PR	5.29E <sup>6</sup>	5.25E <sup>6</sup>	5.33E <sup>6</sup>	5.31E <sup>6</sup>
	PN	10.77E <sup>6</sup>	16.66E <sup>6</sup>	5.14E <sup>6</sup>	5.31E <sup>6</sup>

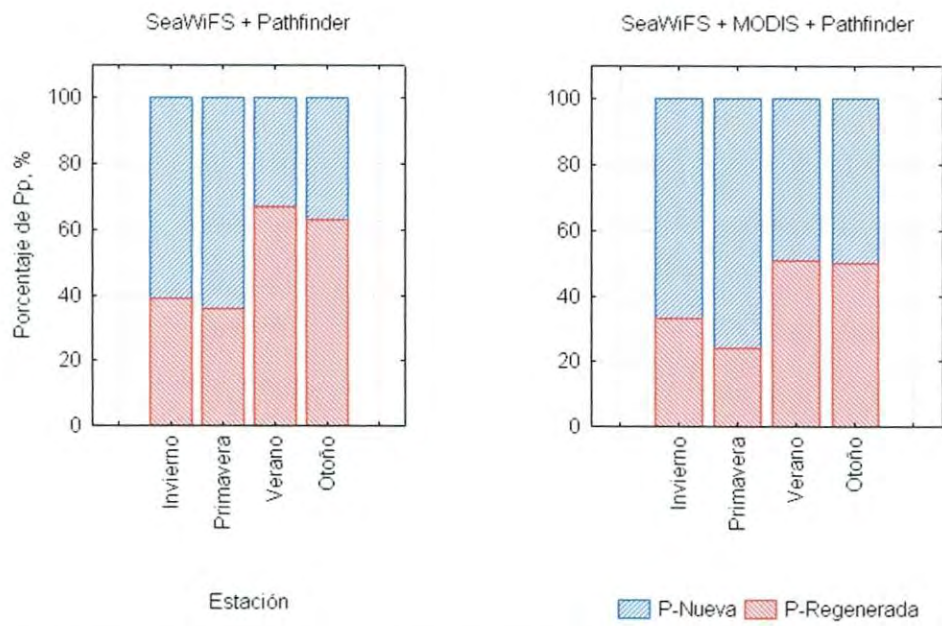


Figura 31. Porcentaje de producción primaria nueva y producción regenerada según la estación del año en el Golfo de California.



## VII. DISCUSIÓN

La señal anual de temperatura superficial del mar obtenida en este trabajo permitió distinguir el incremento de la misma en dirección sur, como ha sido descrito por diversos autores con anterioridad (Lavín *et al.*, 2003; Soto-Mardones, 1999). Las islas promediaron la temperatura más baja debido a la dinámica de marea intensa que acontece en la región (Álvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979), seguidas de la región central y por último de la boca, región cuyas características oceanográficas están determinadas en gran parte por la comunicación directa con el Océano Pacífico Tropical (Álvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979; Bray y Robles, 1991; Roden, 1964, 1972; Roden y Groves, 1959; Wyrski, 1966). La temperatura superficial anual en el Golfo de California está en función de forzantes como el viento, las mareas, la influencia del Pacífico y el efecto térmico del calentamiento (modificaciones por efecto de evaporación, irradiancia incidente, transporte de calor por flujos de agua, etc.), mismos que son responsables de una circulación vigorosa en el golfo (Álvarez-Borrego, 2010b; Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1994a).

Los resultados obtenidos en este trabajo mostraron que la señal interanual de temperatura superficial del mar generada por El Niño (EN) en el Golfo de California fue evidente a escala global y regional. En ésta última la señal en la boca se distinguió con un 95% de confianza. En la región central y en la islas la señal fue perceptible al 85 o 75% de confianza, respectivamente. Por otro lado, los resultados también mostraron que las anomalías de temperatura debidas a la presencia de EN fueron más intensas (3 °C por encima de la media) en las islas y en el centro del golfo. Soto-Mardones *et al.* (1999) sugiere que existen dos tipos de comportamiento en la evolución de las anomalías interanuales en el Golfo de California, siendo el primero de ellos la invasión de aguas cálidas de la boca hasta la región central, y el segundo, un calentamiento en la región de la boca e islas por la invasión de aguas cálidas hasta la región norte. El segundo mecanismo explicaría la presencia de las anomalías

de temperatura positivas y más intensas en las islas, particularmente en el evento mayor de 1997-1998, ya que la región de las islas intensifica los eventos fríos o calientes en la escala interanual, además de ser la zona más fría en general (Soto-Mardones *et al.*, 1999). El primer mecanismo propuesto por Soto-Mardones *et al.* (1999) sería explicativo de que a escala regional sea en la boca en donde se detecten diferencias de temperatura a un nivel de significancia alto para la mayoría de los eventos. Debido a la diferencia regional en los niveles de significancia a los que se detectan los efectos en la temperatura de EN y la secuencia de anomalías, se sugiere que en el Golfo de California los eventos EN que han sucedido al del período 1997-1998, (clasificados de menor intensidad a éste), a la fecha presente, han actuado conforme al primer mecanismo, con una invasión de aguas cálidas en la boca y su posterior llegada a las regiones centrales e isleñas.

Los resultados de la variación interanual de temperatura superficial obtenidos para la condición EN se presentaron con este mismo patrón para condiciones La Niña (LN) las cuales implican el efecto contrario: la entrada de agua fría al Golfo de California. Bajo esta condición se observó que en las islas se registraron las anomalías negativas más intensas (por ser una región normalmente fría), respecto a la boca, intensificando la señal interanual LN, particularmente durante LN de 1998-2000. Bajo los comportamientos ya descritos referentes a la evolución de las anomalías regionales, este evento (1998-2000) considerado como moderado habría actuado de modo que el golfo se cubrió de agua fría permitiendo la intensificación de las anomalías en las islas pero no en la boca, mientras que LN, igualmente moderada pero de menor duración, del período 2007-2008 invadió primero a la boca, resultando en anomalías negativas similares entre regiones (no intensificadas en las islas ni en el centro respecto a la boca). Los niveles de significancia a los que se distinguieron los efectos regionales de LN sobre la temperatura fueron los mismos a los que se distinguieron los efectos EN, sugiriendo en general y para la mayoría de los eventos una mayor repercusión sobre la boca del golfo por la invasión inmediata de agua fría proveniente del Pacífico adyacente.

Los forzantes antes mencionados, como los vientos y la tasa de evaporación, actúan a predominancias (por ejemplo: los vientos de verano prevalecen la mitad del año y generan condiciones climáticas de tipo tropical (Ripa y Marinone, 1989)) e intensidades (por ejemplo: tasa de evaporación elevada en la región norte (Ripa y Marinone, 1989)) distintas en las islas, el centro y la boca del golfo, generando un gradiente de temperatura en la señal anual. Los

resultados mostraron que este gradiente se conserva en la escala estacional, excepto en el verano, estación en la que el golfo promedió valores regionales de temperatura no diferentes entre sí, impidiendo distinguir el gradiente de temperatura. Existe un incremento de temperatura superficial inherente a las condiciones de verano, sin embargo la homogeneización de temperatura en todo el golfo puede ser explicada en función de la penetración de agua superficial del Pacífico Oriental Tropical. En verano el agua caliente y oligotrófica superficial proveniente del Pacífico penetra en el golfo hasta la región de las islas, mientras que en invierno esta masa de agua invade solamente la región de la boca (Álvarez-Borrego, 2010b). La profundidad horizontal a la que penetra esta agua en verano y en invierno explica que el gradiente en los resultados fuera mucho más marcado en esta última estación (con una diferencia de  $\sim 4$  °C entre la región central y la boca) que en el verano, estación en la que las regiones centrales e isleñas también reciben aguas cálidas y oligotróficas. El forzante principal que actúa en el verano sobre el gradiente de temperatura es la entrada de agua cálida desde el Pacífico hasta las islas, con vientos cálidos y húmedos soplando en dirección norte (vientos de verano: de junio a octubre) (Roden, 1964). En invierno, además de quedar el agua caliente del Pacífico restringida a la boca (la circulación superficial de invierno describe más bien la salida de agua del golfo) (Granados-Gallegos y Schwartzlose, 1974), actúan vientos secos y fríos de invierno que soplan (de noviembre a mayo) del noroeste sobre la capa superficial en la región central (Roden, 1964) favoreciendo el flujo de calor (pérdida de calor). En primavera las diferencias en el gradiente de temperatura regional fueron de  $\sim 3$  grados centígrados entre regiones adyacentes y el doble entre los extremos opuestos (islas y boca). Durante esta estación la circulación superficial en el golfo también genera que salga agua (invierno y primavera tienen condiciones de “invierno” con vientos del noroeste) (Granados-Gallegos y Schwartzlose, 1974; Thorade, 1909; US Hydrographic Office, 1947), sin embargo el efecto sobre el gradiente regional de temperatura no es tan pronunciado como en el verano para que éste se pierda. En otoño, estación en la que la circulación superficial en el golfo marca la entrada de agua (verano y otoño tienen condiciones de “verano” con vientos del sureste) (Thorade, 1909; US Hydrographic Office, 1947), el gradiente fue visible en los resultados aunque las diferencias entre regiones adyacentes fueron determinadas por  $\sim 1$  grado centígrado y por  $\sim 2$  entre regiones extremas. En resumen, en verano la temperatura superficial

de la región norte del golfo se asemeja con la de la región sur debido a que todo el golfo se baña de agua cálida proveniente del Pacífico.

La señal anual de Chl obedeció a los patrones de temperatura regionales mostrando un gradiente de respuesta contrario: temperaturas altas son indicadores de una estratificación en la columna de agua, misma que restringe el aporte de nutrientes a la superficie y limita la actividad fotosintética (Cognetti *et al.*, 2001); por el contrario, temperaturas bajas favorecen la actividad fotosintética en una capa homoterma (Cognetti *et al.*, 2001). Lo anterior es debido a que, como en todos los océanos, en el Golfo de California la actividad fotosintética está influida, en grado diverso, directa e indirectamente por la temperatura. El desarrollo de las especies fitoplanctónicas está en relación a un óptico térmico dependiente de las adaptaciones genéticas, en virtud de las cuales un organismo no crecerá por encima o por debajo del umbral de temperatura que tolera (Cognetti *et al.*, 2001). La condición por medio de la cual la temperatura influye indirectamente sobre la producción primaria es la homotermia de los estratos superficiales, que favorece, mediante movimientos turbulentos, el transporte y distribución uniforme del fitoplancton en la columna de agua. Asimismo, la producción primaria disminuye con la profundidad, análogamente a como lo hace la intensidad luminosa. Las adaptaciones asociadas a la intensidad luminosa y sus distintas longitudes de onda están dadas por la diversificación de los pigmentos fotosintéticos (Cognetti *et al.*, 2001). Las adaptaciones lumínicas y termales inciden en la respuesta fotosintética y en las dimensiones de dichos parámetros (foto-aclimatación), por ejemplo: bajas intensidades de luz conducen a una tasa de carbono:clorofila baja (Wang *et al.*, 2008). En el Golfo de California se han observado decrementos de clorofila *a* y asimilación de carbono debidos al régimen de irradiancia del fitoplancton y la influencia del transporte vertical sobre ésta tasa (Gaxiola-Castro *et al.*, 2002).

De este modo, se encontró una temperatura anual baja en las islas aunada a una mayor concentración de clorofila ( $1.44 \text{ mg m}^{-3}$ ), misma que decreció en la región central ( $0.83 \text{ mg m}^{-3}$ ) y fue significativamente menor en la boca ( $0.46 \text{ mg m}^{-3}$ ), región asociada al valor de temperatura superficial más alto promediado y que le confirió características oligotróficas (respecto a las islas): zona eufótica con bajas concentraciones de nutrientes debido a la dinámica que ejerce el océano Pacífico sobre la boca (Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991). Las estimaciones de clorofila *a*, con valores más altos en las islas, coincidieron con los trabajos previamente realizados (Álvarez-Borrego y Gaxiola-Castro, 1988; Bazán-Guzmán,

1990; Gendrop-Funes *et al.*, 1978,; Santamaría-del-Ángel, 1994a; Valdez-Holguín, 1986). En relación a la abundancia, es sabido que la boca se caracteriza por tener la menor abundancia de fitoplancton en todo el golfo ( $\sim 0.2-1.0$  y  $0.4 \text{ mg m}^{-3}$  a una profundidades de 0 y 10 m), la región central tiene abundancias mayores que las de la boca ( $\sim 0.3-5.2$  y  $\sim 0.9-1.6 \text{ mg m}^{-3}$  a profundidades de 0 y 10 m), pero comparativamente bajas respecto al norte del golfo ( $\sim 3-5$  y  $48 \text{ mg m}^{-3}$  a profundidades de 0 y 10 m), en donde se reportan las abundancias máximas (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1994a).

Los promedios anuales de clorofila *a* del período 1997 a 2002 aquí obtenidos, se asemejaron a los obtenidos por Espinosa-Carreón y Valdez-Holguín (2007), en una relación casi 1:1. Por otro lado, los datos promedio anuales obtenidos con productos de 1 km de resolución de los sensores SeaWiFS y MODIS, también en este trabajo, estuvieron por encima de los primeros (de resolución 10 km) y a los reportados por Espinosa-Carreón y Valdez-Holguín (2007).

Las diferencias regionales de clorofila *a* en la escala interanual fueron claras a escala global. Ante un evento EN (llegada de agua caliente) la termoclina se abate, dejando a los nutrientes a una profundidad mayor a la normal por efecto de una capa caliente de agua que inhibe el aporte de nutrientes a la zona eufótica (Dajoz, 2002; Glantz, 2006). Esta característica impide que la actividad fotosintética ocurra a la tasa a la que ocurre bajo condiciones normales (Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991), esto es: en este trabajo bajo EN promedió un valor de clorofila *a* superficial  $\sim 1.0 \text{ mg m}^{-3}$  por debajo del promedio “normal”. El efecto contrario se percibió con LN (llegada de agua fría), en donde la actividad fotosintética se incrementó, promediando un valor  $\sim 0.5 \text{ mg m}^{-3}$  por encima del promedio normal.

En la escala regional la señal EN sobre la clorofila *a* fue significativa en las islas, el centro y la boca. El efecto de EN se enmascaró ligeramente en la región central durante el invierno. Se sugiere que este enmascaramiento sea debido a procesos físicos y efectos locales de la región central como, por ejemplo, la presencia de filamentos y chorros de agua fría provenientes del norte del golfo, corrientes de marea, viento y surgencias (Ripa y Marinone, 1989). Este enmascaramiento debido a la dinámica central puede ser responsable, junto con la dinámica oligotrófica de la boca, de que los efectos EN fueran visibles o mayores en la región

sur del golfo, como fue observado por Espinosa-Carreón y Valdez-Holguín (2007), Santamaría-del-Ángel *et al.* (1994b) y Valdez-Holguín y Lara-Lara (1987). El efecto EN sobre la clorofila *a* fue evidente en todas las regiones, aunque no así sus efectos sobre la temperatura superficial, variable en la que se apreció que EN incide con mayor intensidad en la boca, como ya fue discutido.

La señal LN a escala regional sólo fue evidente en la boca. El incremento significativo de la actividad fotosintética bajo condición LN en la boca (y no así en el centro), generó que el gradiente de clorofila *a* se atenuara entre la boca y la región central. El comportamiento interanual que implica que el agua fría proveniente del Pacífico llegue primero a la boca y se desplace posteriormente hacia el centro y las islas, podría explicar el por qué la señal LN fue evidente sólo en la boca como un incremento significativo. La abundancia de fitoplancton es menor en la boca del golfo (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1994a) y el 75 % de la asimilación de carbono está asociada a nanofitoplancton en el sur del golfo (Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991; Berman, 1975); esta situación (células pequeñas que generalmente dominan en ambientes estables respecto a células grandes (Lara-Lara *et al.*, 1993)) conduce a un crecimiento más acelerado de las poblaciones de fitoplancton como respuesta adaptativa al medio (Sun *et al.*, 2007), de forma que la respuesta ante la disponibilidad de nutrientes propiciada por LN es tal y se da a tal velocidad que permite que se duplique la actividad fotosintética en la boca; mientras que en el centro y las islas, la abundancia de fitoplancton (microfitoplancton predominantemente) es normalmente considerable (3 millones de células por litro en la cuenca de Guaymas y más de 100,00 células por litro en la región norte (Gilbert y Allen, 1943)), y un aporte de nutrientes por LN no incrementa significativamente la actividad fotosintética, pudiendo incluso verse enmascarado el efecto LN en condiciones de verano y/o primavera en estas regiones. Este enmascaramiento estaría explicado por la marcada estratificación en la columna de agua durante verano, y que las aguas frías de LN lleguen y residan primero en la boca del golfo. También podría estar ocurriendo que en las islas y centro las condiciones frías LN no se reflejan como un incremento de biomasa fitoplanctónica (ni fijación de carbono) debido a: 1) una baja tasa fotosintética producida por la alta dinámica física del sistema que involucra la mezcla vertical intensa y vientos fuertes en las regiones que transportan al fitoplancton a lo largo de la columna de agua (arriba y abajo) y condicionan al fitoplancton superficial (a irradiancias variables) (Álvarez-Borrego y Lara-

Lara, 1991), como lo sugirieron diversos autores para LN 1998-1999 (Espinosa-Carreón y Valdez-Holguín; 2007; Gaxiola-Castro *et al.*, 1995; Valdez-Holguín *et al.* 1999). 2) Al efecto por el pastoreo, que no permite que se incremente la actividad fotosintética a tasas significativas (durante LN) por ser la unión directa entre el primer y segundo nivel trófico (Cognetti, 2001), y modular parte de la pérdida o mortalidad de fitoplancton en estas regiones (García-Pámanes y Lara-Lara, 2001; Lara-Lara *et al.*, 2007). Por ejemplo, se ha encontrado que existe gran abundancia de copépodos sobre la región central del golfo (Guaymas) (Jiménez-Pérez y Lara-Lara, 1988). También ha de considerarse que el zooplancton en áreas oceánicas poco estables puede emplear estrategias de racionalización de recursos que involucran un pastoreo más rápido y preferente sobre las especies de fitoplancton de crecimiento bajo y biomasa-baja (nanofitoplancton) (Sun *et al.*, 2007). Y finalmente, 3) a las tasas de hundimiento de fitoplancton, y 4) la velocidad de respuesta de algunos grupos de fitoplancton después de períodos prolongados de privación de nutrientes escasos (El Niño).

La señal estacional de clorofila *a* a escala global fue acorde con el patrón de temperatura superficial: condiciones cálidas conformadas por el verano y el otoño, y condiciones frías conformadas por el invierno y la primavera. En condiciones cálidas la clorofila *a* promedió valores más bajos que en condiciones frías debido a la reducción de la actividad fotosintética posiblemente como respuesta a la estratificación en la columna de agua en verano y en otoño.

A escala regional la diferencia entre condiciones cálidas y frías fue visible en la región central y en la boca del golfo: la clorofila *a* superficial fue menor en condiciones de verano y otoño, respecto a las condiciones de invierno y primavera. En las islas los resultados mostraron que sólo en el verano se redujo, en un ~40%, significativamente la clorofila *a* respecto a la primavera y al invierno, mientras que en el otoño la actividad fotosintética ( $1.2 \text{ mg m}^{-3}$ ) fue equiparable a la de invierno ( $1.41 \text{ mg m}^{-3}$ ), pero no así a la de primavera ( $2.16 \text{ mg m}^{-3}$ ) probablemente debido a 1) procesos locales tales como la mezcla de marea intensa en el norte del golfo, principalmente en la región de las islas Tiburón y Ángel de la Guarda (Álvarez-Borrego, 1983) asociados a una dinámica caracterizada por ondas internas generadas por los amplios rangos de marea (Fu y Holt, 1984), fenómeno de consideración para las estimaciones de clorofila *a* y PP (Gaxiola-Castro *et al.*, 2002); y/o 2) efectos de la secuencia estacional otoño-invierno que generan un promedio de invierno menor al esperado: el valor

promedio de invierno de nuestro estudio es ~30 % menor al calculado para un mes de diciembre (1981) por Santamaría-del-Ángel *et al.* (1994a) para esta misma región utilizando imágenes de satélite.

La dinámica estacional del golfo central está determinada por las corrientes de marea, el esfuerzo del viento, las surgencias costeras y el calentamiento intenso, lo que a su vez genera cambios estacionales marcados de temperatura, salinidad, corrientes y nivel del mar (Álvarez-Borrego, 1983, 2010b). Los vientos de invierno en esta región generan surgencias con origen en la costa oriental (Roden, 1964), pero la circulación en forma de remolinos que acarrea agua de surgencia, así como la presencia de chorros y filamentos térmicos conduce a que los máximos de clorofila de invierno (y los mínimos de verano) también sean perceptibles aún en la costa occidental (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1994a). Las surgencias de verano ocurren en la costa occidental, pero son menos desarrolladas y se extienden sobre una distancia menor que las de invierno (Robinson, 1973; Roden, 1964).

Aunque los vientos de verano son de magnitud similar a los de invierno, el agua está mucho más estratificada en el verano, y en la región central y sur del golfo estas condiciones generan requerimientos de energía (cinco a quince veces) superiores para mover una parcela de agua a 100 metros de la superficie que en invierno, estación en la que el índice de estratificación en la columna de agua es de ~15 a 30 J m<sup>-3</sup> en la parte central del golfo y de ~40 a 60 J m<sup>-3</sup> en la parte sur (en verano es de ~260 a 310 J m<sup>-3</sup> en ambas regiones) (Cortés-Lara *et al.*, 1999). La estratificación del agua en verano genera que las surgencias sean más débiles (comparadas con las surgencias intensas propiciadas por los vientos de invierno) y que provengan de profundidades mucho menores que las aguas de surgencia de invierno (Santamaría Del Ángel *et al.* 1999).

Estas condiciones explican que en invierno y primavera la clorofila *a* superficial haya promediado valores altos en la región central, mientras que en verano y otoño se promediaron valores significativamente menores de clorofila *a* superficial. En la boca, región más oceánica y oligotrófica, también se encontraron diferencias significativas en condiciones de invierno y primavera, sin embargo los incrementos son mínimos y mantuvieron las diferencias regionales. Santamaría-del-Ángel *et al.* (1994a) sugieren que los máximos de invierno son bajos y muy breves en esta región. Los promedios estacionales de clorofila *a* superficial



obtenidos en este trabajo para la región central y para la boca del golfo fueron similares a los reportados previamente por Valdez-Holguín (1986), Álvarez-Borrego y Gaxiola-Castro (1988), Bazán-Guzmán, (1990); Lara-Lara *et al.* (1993) y Santamaría-del-Ángel *et al.* (1994a).

La señal anual de PP (promediada en  $1.07 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) de los resultados globales de este estudio evidenciaron la correlación de la variable con la temperatura superficial del mar (32%), particularmente sobre el año LN 2000 que promedió un valor de PP ( $1.59 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) significativamente superior respecto a otros años. A escala regional la señal anual permitió evidenciar el gradiente de PP, confiriéndole a las islas valores ( $2.14 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) por encima del centro ( $1.52 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ), y a éste, a su vez, por encima de la boca ( $0.92 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ). Esta señal evidenció cómo la PP está siendo sustentada principalmente por la dinámica, ya referida, que ocurre en las islas y en la región central.

A escala global las señales EN y LN sobre la PP fueron evidentes, aunque no necesariamente generaron diferencias significativas respecto a las condiciones normales. A escala regional el efecto de estas condiciones interanuales sobre la PP sólo fue evidente en la boca del golfo. En este contexto, existió una correlación directa entre clorofila *a* y PP (del 57%), de modo que la señal EN no redujo la PP en el Golfo de California, particularmente en el norte, por las mismas razones por las que no forzosamente ante EN se registran decrementos de clorofila *a*; por otro lado, EN redujo la biomasa fitoplanctónica (en un 32%) y la PP (en un 19%) en la región sur, en donde las condiciones hidrográficas son similares a las del Océano Pacífico (Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991).

Finalmente, en la región central la señal EN fue evidente sobre la clorofila *a*, pero no así sobre la PP probablemente debido a que la supresión de máximos de clorofila *a* no es lo suficientemente fuerte como para causar que colapse la PP, como fue sugerido por Santamaría-del-Ángel *et al.* (1994b) para EN 1982-1983, o para causar que la señal EN sobre la PP se haga visible en la región. Asimismo cabe tener presente que: 1) los algoritmos de PP están calibrados con estimaciones basadas en técnicas de  $^{14}\text{C}$  que tienen por sí mismas cierto grado de error (Campbell *et al.*, 2002); 2) se ha visto en otras regiones que los modelos de PP basados en mediciones satelitales de clorofila *a* subestiman la productividad (~20-50%) (Barbini *et al.*, 2005), particularmente en aguas mesotróficas y oligotróficas, mientras que en aguas eutróficas la sobreestiman, como consecuencia de una sobreestimación satelital de la

verdadera concentración de clorofila *a* (Balch *et al.*, 1992); y, 3) las estimaciones representan un estimado de la concentración de clorofila (y PP) cercana a la superficie (primera profundidad óptica: que puede variar entre 20 m en aguas oceánicas, y 1-2 m en aguas costeras o con altas concentraciones de sedimento) (Aguirre-Gómez, 2002), por lo que en regiones en donde la zona eufótica es profunda (como en la boca del golfo), las estimaciones de PP por sensores remotos podrían resultar inciertas.

Los resultados de este trabajo indicaron que la señal LN sobre la PP puede enmascarse en verano y otoño en todas las regiones, haciéndose más evidente en condiciones de primavera e invierno, particularmente sobre la boca del golfo: resultado del comportamiento de la señal (la entrada de agua fría en la boca, y su sucesiva llegada al centro y las islas). Por el contrario, la señal LN en verano y otoño enmascaró sus efectos en todas las regiones. De modo que los efectos de la señal LN (y EN) estarían en función de la estación en la que acontece dicho evento, más aún si se considera que en los resultados los eventos EN y LN de intensidades variables, abarcados en la serie de tiempo, no mostraron diferencias de PP (ni de temperatura superficial ni de clorofila *a*) que pudieran estar asociados a la intensidad del evento y por ende al alcance regional de los mismos.

La señal estacional de PP está en función de la estacionalidad de los vientos antes referida. Dicha señal quedó evidenciada en los porcentajes de producción primaria atribuible a la producción regenerada y producción primaria atribuible a la producción nueva: 1) las condiciones de estratificación en la columna de agua durante verano y otoño generan un ambiente poco propicio para que el fitoplancton mantenga una alta tasa fotosintética, con lo que la PP total queda limitada a la producción basada en la regeneración de nutrientes (Mann y Lazier, 2006; White *et al.*, 2007) por la fijación de  $N_2$ ; mientras que 2) condiciones de invierno y primavera propician la actividad fotosintética por el aporte de nutrientes, lo que genera que la producción primaria sea atribuible en mayor porcentaje a la producción nueva. Los resultados evidenciaron estas dos situaciones a escala global y regional. Las condiciones de verano y otoño, que restringen en gran medida la producción primaria a la producción regenerada, fueron más marcados en la boca en donde la producción regenerada representó hasta el 75 % de la producción primaria en verano y el 96 % en otoño, mientras que en el centro y las islas bajo estas mismas condiciones la razón de producción regenerada y producción nueva fue muy cercana a 1:1 o 1:2, respectivamente, evidenciando, nuevamente, la

dinámica de estas regiones: vientos fuertes y persistentes de invierno rompen la estratificación de la columna generando surgencias en invierno y primavera, llevando nutrientes nuevos a la zona eufótica e incrementando la productividad total por la adición de producción nueva; por su parte, las condiciones de estratificación de verano y otoño limitan el aporte de nutrientes nuevos, condicionando al fitoplancton a una producción regenerada con menor variabilidad (la estratificación de la columna en la boca del golfo no permite esta fertilización). Considerando que gran parte de la PP se debe a los nutrientes regenerados (Mann y Lazier, 2006), si se eliminara el efecto de las surgencias de invierno y primavera, posiblemente en estas estaciones se tendría una razón 1:1. de producción regenerada y nueva tanto en las islas como en la boca, en donde el porcentaje de producción nueva fue del ~70%, mientras que en la boca y a escala global fue de ~50%.

Álvarez-Borrego (2010c) sugiere que el aporte anual de fosfato y de nitratos desde el Pacífico hacia el golfo son consumidos por la producción primaria nueva anual en todo el golfo, de modo que el nitrato requerido para la producción nueva anual para todo el golfo tiene que ser compensado por una exportación de formas inorgánicas de nitrógeno reducido, nitrógeno orgánico disuelto y nitrógeno orgánico particulado desde el golfo hacia el Pacífico, haciendo que el intercambio en el Golfo de California esté constituido por la importación de nutrientes inorgánicos oxidados disueltos y exportación principalmente de materia orgánica (el agua que entra es rica en nutrientes y el agua que sale es pobre).

Los resultados indicaron que la fracción de producción nueva, soportada por el aporte de nutrientes desde fuera de la zona eufótica, en el Golfo de California fue mayor respecto a la producción regenerada en las islas y en el centro. En estas regiones el nitrógeno (forma oxidada) es puesto a disposición del fitoplancton mediante los procesos de divergencia y de mezcla, que lo transportan a la superficie, con un aporte menor de formas reducidas procedentes de la excreción de zooplancton y bacterias (forma reducida) (Cognetti *et al.*, 2001). En primera instancia podría sugerirse que éstas regiones actúan secuestrando carbono a través de la bomba biológica (por la utilización de aguas frías, ricas en nutrientes, y la incorporación, transformación y posterior sedimentación de CO<sub>2</sub> de origen antropogénico que ha penetrado en una zona de convergencia), pero al mismo tiempo actuar como una fuente de CO<sub>2</sub> hacia la atmósfera (si bien el CO<sub>2</sub> no representa una limitante en el océano, al abastecerse

T-160180

otros nutrientes se propicia la bomba biológica de CO<sub>2</sub>). Las aguas ricas en nutrientes son también ricas en CO<sub>2</sub> disuelto, y de hecho este CO<sub>2</sub> disuelto está en exceso con relación a nutrientes como los nitratos. En la entrada del golfo y a escala global, la producción regenerada dominó sobre la producción nueva. Álvarez-Borrego (2010a) concluyó que el Golfo de California, bajo el escenario en el que el aporte de nutrientes del Pacífico al golfo está en balance con el consumo dentro del golfo, es una fuente de bióxido de carbono hacia la atmósfera ya que las aguas del Pacífico y el golfo tienen valores de carbono inorgánico disuelto total (TCO<sub>2</sub>) que exceden a los estimados a partir de la concentración de nitrato y de la razón de Redfield. Álvarez-Borrego (2010a) concluyó que la producción nueva sólo consume una parte del CO<sub>2</sub> importado desde el Pacífico y por ello el golfo actúa como una fuente de carbono porque el CO<sub>2</sub> no se consume en su totalidad y no puede estarse acumulando en la columna de agua.

Los valores de PP obtenidos en este trabajo provinieron de una serie de datos considerados en fase experimental y se asemejaron a aquellos obtenidos en trabajos que antecedieron a este estudio, que en su mayoría son estimaciones obtenidas a partir de información *in situ* (Ej. Álvarez-Borrego *et al.*, 1987; Lara-Lara *et al.*, 1984; Lara-Lara *et al.*, 1993; Zeitzchel, 1969). Por ejemplo, el rango de PP reportado en este trabajo para otoño fue 296-402 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>; Lara-Lara *et al.* (1984) reportó un valor de 657 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> para esta misma estación. El valor de PP reportado en este trabajo para primavera fue 383 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> y Valdez-Holguín *et al.* (1995) reportaron 292 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>, y Álvarez-Borrego *et al.* (1987) reportaron 474-1606 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>.

Las estimaciones de producción regenerada, producción nueva y PP (total) de este trabajo se asemejaron más a aquellas realizadas por percepción remota (Ej.: Hidalgo-González y Álvarez-Borrego, 2004; Kahru *et al.*, 2004; Lluch-Cota *et al.*, 2004), pero se conservaron dentro de los rangos de las estimaciones *in situ* (Ej. Zeitzchel, 1969). White *et al.* (2007) estimaron la producción regenerada para cuatro regiones del golfo (Fig. 1) en condiciones de verano. Utilizando el valor de producción regenerada de estos autores para la región central (única región de White *et al.* (2007) homóloga con las regiones de este estudio), se obtuvo una producción regenerada de 32% de PP, similar a la obtenida en los resultados de este trabajo utilizando la media más baja de verano del golfo (36%) y de la región central (29%).

Al considerar las diferencias halladas entre información derivada de percepción remota e información *in situ*, habrá que tomar en cuenta la amplia cobertura temporal y espacial de la primera, contra las estimaciones puntuales e instantáneas de la segunda. En el caso de la clorofila, se ha reportado una buena correlación entre datos *in situ* y datos de satélite (Pérez-Marrero *et al.*, 2001), particularmente en las cuencas oceanográficas del Pacífico (Gregg y Casey, 2004).

## VIII. CONCLUSIONES

La concentración de clorofila y PP en el Golfo de California disminuyeron durante las estaciones de verano y otoño, estaciones en las que la temperatura superficial del agua se incrementó respecto a las estaciones de primavera e invierno.

La concentración de clorofila y PP fue mayor en la región de las islas. En esta región los efectos de El Niño y La Niña sobre la clorofila y PP no fueron significativos como en la boca, región en donde El Niño (La Niña) disminuyó (incrementó) significativamente la concentración de clorofila y PP.

Las variaciones de clorofila y PP no evidenciaron un decremento (o aumento) que estuviera en relación a la intensidad de los eventos El Niño (La Niña) que se presentaron de otoño de 1997 a otoño de 2010.

Se sugirió que la velocidad de respuesta de la señal de clorofila y PP a las anomalías negativas (positivas) de temperatura superficial ante las condiciones interanuales El Niño (La Niña) fue explicada por la secuencia y alternancia de eventos anormales con períodos normales que permitieron el restablecimiento de las anomalías (positivas) de clorofila *a* y PP.

Las inferencias de PP nueva sugirieron que en el Golfo de California es poco más de la mitad de PP (52-64%) y el resto producción regenerada (48-36%).

Las inferencias de la PP nueva sugirieron que en la región de las islas y la región central supera a la producción regenerada, mientras que en la boca ésta última rebasa a la producción nueva.

El Niño (La Niña) incrementa (disminuye) la temperatura superficial del mar y disminuye (incrementa) la concentración de clorofila y la PP con lo que se acepta la hipótesis planteada en este trabajo.

## IX. RECOMENDACIONES

El conocimiento de la PP *per se* en cualquier región oceanográfica resulta relevante para la ciencia y el hombre, debido a la dependencia que éste tiene de los recursos marinos (ej.: pesquerías), más aún si se trata de una región tan productiva como el Golfo de California, por ello es recomendable continuar con el estudio de esta área, particularmente enriquecer el conocimiento que ya se ha generado con información procedente de sensores remotos que generalmente posee una cobertura (temporal y espacial) ventajosa. Actualmente existen disponibles datos satelitales referentes a los vientos oceánicos superficiales, las corrientes oceánicas, la altura de la superficie oceánica y frentes de temperatura, con los cuales se podrían complementar estudios como el aquí presentado y aportar información en torno a cómo estos procesos están relacionados con la PP (ej. manchones (sub)superficiales de fitoplancton generados por frentes de temperatura, distribución de fitoplancton por mareas).

La percepción remota también permite evaluar la modificación de los ecosistemas (marinos y terrestres) ante situaciones ecológicas graves (ej. procesos de eutrofización y enturbamiento marino, seguimiento de derrames y contaminantes en la superficie oceánica), y en escenarios pasados o futuros a través de la implementación de modelos de predicción (ej. respuesta del fitoplancton ante: cargas de nutrientes externas, fertilización, incrementos de CO<sub>2</sub> o temperatura, etcétera). Por esta razón, se recomienda el uso de las herramientas de satélite para responder satisfactoriamente algunas de las incógnitas actuales del ecosistema marino (ej. ¿se está beneficiando el fitoplancton de los incrementos de CO<sub>2</sub> en la atmósfera?, ¿puede la capacidad de absorción de CO<sub>2</sub> de los océanos predecir y modificar los escenarios climáticos?).

Por otra parte, se recomienda que la información de PP generada por el programa CoastWatch de la NOAA sea evaluada en otras regiones y a diferentes escalas, a fin de hallar la combinación o combinaciones de sensores que están dando información acorde a los

registros históricos o a las mediciones que se obtengan por observaciones directas. Además de ser explorados en otras regiones, debe continuarse el análisis en el Golfo de California para discernir las diferencias entre sensores y valorar el comportamiento de la producción primaria en la región, pieza fundamental del ecosistema marino. También se recomienda emplear un algoritmo para calcular la PP en el Golfo de California a fin de comparar los resultados proporcionados por el programa de la NOAA.

Finalmente, se sugiere que estudios posteriores consideren: 1) complementar la información procedente de sensores remotos con mediciones directas a fin de que los estudios sean re-validados y enriquecidos (ej.: tomar en cuenta el efecto del pastoreo y tasas de hundimiento como moduladores de la PP); 2) dar seguimiento a los estudios ya que los fenómenos naturales, como EN y LN, se seguirán presentando; 3) realizar un análisis estadístico minucioso (ej.: análisis de frecuencias para estimar el ciclo anual, períodos de dominancia, recurrencia, y características del fitoplancton); y 4) complementar los estudios con modelos que permitan integrar la información a ciertas profundidades de la columna de agua, y algoritmos (ej.: Padín y Navarro, 2007) que relacionen variables estimadas mediante satélite (ej.: variabilidad espacio-temporal de los productores primarios y temperatura) con la fugacidad de carbono para estimar el flujo de carbono superficial (océano-atmósfera) y con ello identificar regiones oceánicas como fuentes o sumideros de carbono.

A medida que se considere lo anteriormente expuesto, los procesos oceánicos estarán al alcance de un mejor entendimiento.



## X. REFERENCIAS

- Aguirre-Gómez, R. 2002. *Los Mares Mexicanos a través de la Percepción Remota*. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México. 85 pp. Álvarez-Borrego, S. 1983. *Gulf of California*. Capítulo 17, pp. 427-449. En: Ketchum, H.B. (ed.), *Estuaries and Enclosed Seas*. Elsevier Science. Amsterdam.
- Aguirre-Gómez, R. y Salmerón-García, O. 2007. *Análisis Estacional de la Variación en la Clorofila en el Pacífico Sur Mexicano Mediante Imágenes SeaWiFS de 1998 a 2004*. Capítulo 18, pp. 267-278. En: Hernández-de-la-Torre, B. y Gaxiola-Castro, G. (eds.), *Carbono en Ecosistemas Acuáticos de México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- Álvarez-Borrego, S. 1983. *Gulf of California*. Capítulo 17, pp. 427-449. En: Ketchum, B.H. (ed.), *Estuaries and Enclosed Seas*. Elsevier. Amsterdam.
- Álvarez-Borrego, S. 2007a. *Principios Generales del Ciclo del Carbono en el Océano*. Capítulo 1, pp. 11-28. En: Hernández-de-la-Torre, B. y Gaxiola-Castro, G. (eds.), *Carbono en Ecosistemas Acuáticos de México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- Álvarez-Borrego, S. 2007b. *Flujos de Carbono en los Golfos de California y México*. Capítulo 23, pp. 337-354. En: Hernández-de-la-Torre, B. y Gaxiola-Castro, G. (eds.), *Carbono en Ecosistemas Acuáticos de México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- Álvarez-Borrego, S. 2010a. *New Phytoplankton and Biogenic Silica as Tools to Estimate Net Water Nutrients and Co<sub>2</sub> Exchange between the Gulf of California and the Pacific*. En prensa (Ciencias Marinas).
- Álvarez-Borrego, S. 2010b. *Physical, Chemical, and Biological Oceanography of the Gulf of California*. Capítulo 2, pp. 24-48. En: Brusca, G.C. (ed.). *The Gulf of California: Biodiversity and Conservation*. The University of Arizona Press. USA.
- Álvarez-Borrego, S. 2010c. *Producción Nueva e Intercambio entre Golfo de California y Pacífico*. En prensa (Ciencias Marinas).
- Álvarez-Borrego, S., y Gaxiola-Castro, G. 1988. *Photosynthetic Parameters of Northern Gulf of California Phytoplankton*. *Continental Shelf Research*. 8:37-47.
- Álvarez-Borrego, S., Gaxiola-Castro, G. y Hernández-Becerril, D.U. 1987. *The Relationship between Photosynthesis and Irradiance for Gulf of California Phytoplankton*. *Pacific Science*. 4(1-4): 79-89.
- Álvarez-Borrego, S. y Lara-Lara, J.R. 1991. *The Physical Environment and Primary Productivity on the Gulf Of California*. Capítulo 26, pp. 555-567. En: Dauphin, J.P. y

- Simoneit, B. (eds.). *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 47, Tulsa, Oklahoma.
- Álvarez-Borrego, S. y Schwartzlose, R.A. 1979. *Water Masses of the Gulf of California*. *Ciencias Marinas*. 6:43-63.
- Balch, W., Evans, R., Brown, J., Feldman, G., McClain, C. y Esaias, W. 1992. *The Remote Sensing of Ocean Primary Productivity: Use of a New Data Compilation to Test Satellite Algorithms*. *Journal of Geophysical Research*. 97(C2):2279-2293
- Barbini, R., Colao, F., Fantoni, R., Fiorani, L., Okladnikov, I.G. y Palucci, A. 2005. *Lidar Calibrated Satellite Sensed Primary Production in the Southern Ocean*. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. 7(2):1091-1101.
- Barnes, K.S.R. y Hughes, N.R. 1999. *An Introduction to Marine Ecology*. Third Edition. Blackwell Science. Gran Bretaña. 296 pp.
- Bazán-Guzmán, M. C. 1990. *PP en la Parte Sur y Central del Golfo de California durante Noviembre-Diciembre de 1984*. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California, México. 70 pp.
- Behrenfeld, J.M. y Falkowski, G.P. 1997. *A Consumer's Guide to Phytoplankton Primary Productivity Models*. *Limnology and Oceanography*. 42(7):1479-1491.
- Beier, E. y Ripa, P. 1998. *Seasonal Gyres in the Northern Gulf of California*. *Journal of Physical Oceanography*. 29:305-311.
- Berger, H.W. y Hergera, C.J. 1992. *Reading the Sedimentary Record of the Ocean's Productivity*. pp. 455-486. En: Falkowski, G.P. y Woodhead, D.A. *Primary Productivity and Biogeochemical Cycles in the Sea*. Plenum Press. USA.
- Berman, T. 1975. *Size Fractionation of Natural Aquatic Populations Associated with Autotrophic and Heterotrophic Carbon Uptake*. *Marine Biology*. 3:215-220.
- Borges, VA. y Gypens, N. 2010. *Carbonate Chemistry on the Coastal Zone Responds More Strongly to Eutrophication than to Ocean Acidification*. *Limnol. Oceanogr.* 55(1):346-353.
- Bray, N.A. y Robles, J.M. 1991. *Physical Oceanography of the Gulf of California*. Capítulo 25, pp. 511-553. En: Douphin, J.P y Simoneit, B.R. (eds.). *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 47, Tulsa, Oklahoma.
- Campbell, J., Antoine, D., Armstrong, R., Arrigo, K., Blach, W., Barber, R., Behrenfeld, M., Bidigare R., Bishop, J., Carr, M.E., Wsaias, W., Falkwoski, P., Hoepffner, N., Iverson, R., Kiefer, D., Lohrenz, S., Marra, J., Morel, A., Ryan, J., Vedernikov, V., Waters, K., Yentsch, C. y Yoder, J. 2002. *Comparison of Algorithms for Estimating Ocean Primary Production from Surface Chlorophyll, Temperature, and Irradiance*. 16(3):1035-1050.
- Carrillo, L., Lavín, M.F. y Palacios-Hernández, E. 2002. *Seasonal Evolution of the Geostrophic Circulation in the Northern Gulf of California*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 54:157-173.

- Clarke, J.A. 2008. *An Introduction to the Dynamics of El Niño & the Southern Oscillation*. Cambridge University Press. USA. 389 pp.
- Cognetti, G., Sará, M. y Magazzú, G. 2001. *Biología Marina*. Ariel Ciencia. España. 617 pp.
- Contreras, E.F. 1994. *Manual de Técnicas Hidrológicas*. Trillas. México 141 pp.
- Cortés-Lara, M.C., Álvarez-Borrego, S. y Giles-Guzmán, A.D. 1999. *Efecto de la Mezcla Vertical sobre la Distribución de Nutrientes y Fitoplancton en Dos Regiones del Golfo de California, en Verano*. Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural. 49:193-206.
- Cruz-Gómez, R.C., Monreal-Gómez, M.A. y Nicolaevich, B.S. 2008. *Efectos de los Vórtices en Sistemas Acuáticos y su relación con la Química, Biología y Geología*. Interciencia. 33(10):741-746.
- Dajoz, R. 2002. *Tratado de Ecología*. Segunda edición. Mundi-Prensa. España. 600 pp.
- Denny, M. 2008. *How the Ocean Works: An Introduction to Oceanography*. Princeton University Press. USA. 344 pp.
- Doney, C.S., Fabry, J.V., Feely, A.R. y Kleypas, A.J. 2009. *Ocean Acidification: The Other CO2 Problem*. Annu. Rev. Mar. Sci. 1:169-192.
- Dugdale R.C y Goering J.J. 1967. *Uptake of New and Regenerated forms of Nitrogen in Primary Productivity*. Limnol. Oceanogr. 12: 196-206.
- Enríquez-Hernández, G., Hernández-de-la-Torre, B. y Gaxiola-Castro, G. 2007. *El Uso Potencial de la Producción de Carbono Orgánico en el Manejo Oceánico*. Capítulo 30, pp. 439-450. En: Hernández-de-la-Torre, B. y Gaxiola-Castro, G. (eds.) Carbono en Ecosistemas Acuáticos de México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- Espinosa-Carreón, L.T. y Valdez-Holguín, J.E. 2007. *Variabilidad Interanual de Clorofila en el Golfo de California*. Ecología aplicada 6(1,2):81-92.
- Fahey, J.K. and Knapp, A.K. 2007. *Primary Production: Guiding Principles and Standards for Measurement*. Capítulo 1, pp. 3-11. En: Fahey, J.K. and Knapp, A.K. Principles and Standards for Measuring Primary Production. Oxford University Press. USA.
- Falkowski, G.P., Laws, A.E., Barber, T.B. y Murray, W.J. 2003. *Phytoplankton and their Role in Primary, New and Export Production*. Capítulo 4., pp. 99-115. En: Fasham, J.R.M (ed.). Ocean Biogeochemistry: a Synthesis of the Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS). Springer. Alemania.
- Forsythe, W.C., Erykiel, E.J., Stahl, R.S., Wu, H. y Schoolfield, R.M. 1995. *A Model Comparison for Daylength as a Function of Latitude and Day of Year*. Ecological Modelling. 80:87-95.
- Fu, L.L., y Holt, B. 1984. *Internal Waves in the Gulf of California: Observations from a Spaceborne Radar*. Geophysical Research. 89(C2):2053-2060.

- Fujita, E. y DuBois, L.D. 2005. *Carbon Dioxide Fixation*. Capítulo 11. En: Archer, M.D. y Nozik, A.J. (eds.) *Photochemical and Photoelectrochemical Approaches to Solar Energy Conversion*. Imperial College Press. UK.
- García-Pámanes, J. y Lara-Lara, J.R. 2001. *Pastoreo por el Microzooplancton en el Golfo de California*. *Ciencias Marinas*. 27(001):73-90.
- Garrison, T. 2007. *Oceanography. An Invitation to Marine Science*. Sexta edición. Thomson Brooks / Cole CENGAGE Learning. USA. 576 pp.
- Garrison, T. 2009. *Essentials of Oceanography*. Quinta edición. Brooks / Cole CENGAGE Learning. USA. 532 pp.
- Gaxiola-Castro, G., Álvarez-Borrego, S., Nájera-Martínez, S. y Zirino, R.A. 2002. *Efecto de las Ondas Internas en el Fitoplancton del Golfo de California*. *Ciencias Marinas*. 28(3):297-309.
- Gaxiola-Castro, G., García-Córdova, J., Valdez-Holguín, J.E. y Botello-Ruvalcaba M. 1995. *Spatial Distribution of Chlorophyll a and Primary Prooductivity in Relation to Winter Physical Structure in the Gulf of California*. *Continental Shelf Research*. 15:1043-1059.
- Gendrop-Funes, V., Acosta-Ruiz, M.J., y Schwartzlose, R.A. 1978. *Distribución Horizontal de Clorofila a Durante la Primavera en la Parte Norte del Golfo de California*. *Ciencias Marinas*. 5:71-89.
- Gilbert, J.Y y Allen, W.E. 1943. *The Phytoplankton of the Gulf of California Obtained by the E. W. Scripps in 1939 and 1940*. *Journal of Marine Research*. 5:89-110.
- Glantz, A.S. 2005. *Bioestadística*. Sexta edición. McGraw-Hill. Colombia. 520 pp.
- Glantz, H.M. 2001. *Currents of Change. Impacts of El Niño and La Niña on Climate and Society*. Segunda edición. Cambridge. UK. 266 pp.
- Glantz, H.M. 2006. *Forecasting El Niño: Science's Gift to the 21st Century*. Capítulo 3, pp. 29-40. En: Babkina, M.A (ed.). *El Niño. Overview and Bibliography*. NOVA. USA.
- Gordillo, F.J.L, Jimenez, C., Figueroa, F.L. y Niell, F.X. 2003. *Influence of elevated CO<sub>2</sub> and Nitrogen Supply on the Carbon Assimilation Performance and Cell Composition of the Unicellular Alga *Dunaliella viridis**. *Physiologia Plantarum* 119: 513-518.
- Granados-Gallegos, J.L y Schwartzlose, R.A. 1974. *Corrientes Superficiales en el Golfo de California. En: Memorias del V Congreso Nacional de Oceanografía*. Escuela de Ciencias Marinas del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Guaymas, Sonora, México.
- Gregg, W.W. y Casey, W.N. 2004. *Global and Regional Evaluation of the SeaWiFS Chlorophyll Data Set. Remote Sensing of Environment*. 93:463-479.
- Gudmundson, C. 2006. *El Niño and Climate Prediction*. Capítulo 2, pp. 5-28. En: Babkina, M.A. 2003. *El Niño. Overview and Bibliography*. NOVA. USA.
- Heileman, S. 2009. *The North-East Pacific. Gulf of California*. Capítulo XIV-47. En: Sherman, K. y Hempel, G. (eds.). *The UNEP Large Marine Ecosystem Report: A Perspective of Changing Conditions in LMEs of the World's Regional Seas*. UNEP

Regional Seas Report and Studies No. 182. United Nations Environment Programme. Nairobi.

- Hidalgo-González, M.R. y Álvarez-Borrego, S. 2004. *Total and New Production in the Gulf of California Estimated from Ocean Color Data from the Satellite Sensor SeaWiFS*. Deep-Sea Research II. 51:739-752.
- Iglesias-Rodríguez, D.M., Halloran, R.P., Rickaby, M.E., Hall, R.H., Colmenero-Hidalgo, E., Gittins, R.J., Green, H.R.D., Tyrrell, T., Gibss, J.S., Dassow, P., Rehm, E., Armbrust, V.E. y Boessenkool, P.K. 2008. *Phytoplankton Calcification in a High-CO<sub>2</sub> World*. Science. 320(5874):336-340.
- Jiménez-Pérez, LC. Y Lara-Lara, JR. 1988. *Zooplankton Biomass and Copepod Community Structure in the Gulf of California Structure in the Gulf of California during the 1982-1983 El Niño Event*. CALCOFI Rep. 29:122.128.
- Karleskint, G. Jr., Turner, R. y Small, W. J. Jr., 2010. *Introduction to Marine Biology*. Tercera edición. Brooks/Cole CENGAGE Learning. USA. 592 pp.
- Kahru, M., Marinone, S.G., Lluch-Cota, S.E., Parés-Sierra, A. y Mitchell, G.B. 2004. *Ocean-Color Variability in the Gulf of California: Scales from Days to ENSO*. Deep-Sea Research II. 51:139-146.
- Kilpatrick, K.A., Podesta, G.P. y Evans, R. 2001. Overview of the NOAA/NASA Advanced Very High Resolution Radiometer Pathfinder Algorithm for Sea Surface Temperature and Associated Matchup Database, J. Geophys. Res.-Oceans, 106(C5): 9179-9197.
- Lara-Lara, J.R., García-Pámanes, J. y Bazán-Guzmán, C. 2007. *Flujo Vertical de Materia Orgánica Particulada en la Región Central del Golfo de California*. Capítulo 26, pp. 383-396. En: Hernández-de-la-Torre, B. y Gaxiola-Castro, G. (eds.). Carbono en Ecosistemas Acuáticos de México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- Lara-Lara, J.R., Millán-Núñez, R., Lara-Osorio, J.L. y Bazán-Guzmán, C. 1993. *Productividad y Biomasa del Fitoplancton por Clases de Tamaño en la Parte Central del Golfo de California Durante Primavera, 1985*. Ciencias Marinas. 19(002):137-154.
- Lara-Lara, J.R., Valdez-Holguín, J.E. y Jiménez-Pérez, C. 1984. *Plankton Studies in the Gulf of California During the 1982-1983 El Niño*. Trop. Ocean-Atmosph. Newsletter. 28:16-17.
- Lavín, M.F., Palacios-Hernández, E. y Cabrera, C. 2003. *Sea Surface Temperature Anomalies in the Gulf of California*. Geofísica Internacional. 42(3):363-375.
- Lavín, M.F. y Marinone, S.G. 2003. *An Overview of the Physical Oceanography of the Gulf of California*. Capítulo 11, pp. 173-204. En: Fuentes-Velasco, O.U, Sheinbaum, J. y Ochoa, J. (eds.) Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics. Kluwe Academic Publishers. Holanda.
- Lavín, M.F. y Organista. 1988. *Surface Heat Flux in the Northern Gulf of California*. Journal of Geophysycal Research. 93:14033-14038.

- Leal, J.C. y Lavín, M.F. 2002. *Comparación del Viento Costero y Marino de la Región Norte del Golfo de California Durante el Invierno de 1994*. Geos. 22(1):12.27.
- Lluch-Cota, S.E., Aragón-Noriega, E.A., Arreguín-Sánchez, F., Aurióles-Gamboa, D., Bautista-Romero, J.J., Brusca, R.C., Cervantes-Duarte, R., Cortés-Altamirano, R., Del-Monte-Luna, P., Esquivel-Herrera, A., Fernández, G., Hendricks, M., Hernández-Vázquez, S., Karhu, M., Lavín, M., Lluch-Belda, D., Lluch-Cota, D.B., López-Martínez, J., Marinone, S.G., Nevárez-Martínez, M.O., Ortega-García, S., Palacios-Hernández, E., Parés-Sierra, A. Ponce-Díaz, G. Ramírez, M., Salinas-Zavala, C.A., Schwartzlose, R.A. and Sierra-Beltrán, A.P. 2004. *The Gulf of California: Ecosystem View and Environmental Trends*. Marine Ecosystems of the North Pacific, North Pacific Marine Science Organization, PICES Special Publication. USA. 1280 pp.
- López-Sandoval, D.C., Lara-Lara, J.R., Lavín, M.F., Álvarez-Borrego, S. y Gaxiola-Castro, G. 2009. PP en *el Pacífico Oriental Tropical Adyacente a Cabo Corrientes, México*. Ciencias Marinas. 35(2): 169-182.
- Luque, D. y Robles, A 2006. *El Contexto: La Región del Golfo de California*. Capítulo 3, pp. 123-246. En: *Naturalezas, Saberes y Territorios Comcaac (Seri)*. Instituto Nacional de Ecología / SEMARNAT / Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo. México. 360 pp.
- Mann, H.K. 2000. *Ecology of Coastal Waters. With Implications for Management*. Segunda edición. Wiley-Blackwell. USA. 432 pp.
- Mann, H.K. y Lazier, N.R.J. 2006. *Dynamics of Marine Ecosystems. Biological-Physical Interactions in the Oceans*. Tercera edición. Wiley-Blackwell. USA. 489 pp.
- Marinone, S.G, Parés-Sierra, A., Castro, R., y Mascarenhas, A. 2004. *Correction to "Temporal and Spatial Variation of the Surface of the Surface Winds in the Gulf of California"*. Geophysical Research Letters. 31:L10305.
- Martínez-Gaxiola, M.D., Peña-Manjarrez, J.L., Gaxiola-Castro, G., De la Cruz-Orozco, M.E. y García-Córdova, J. 2007. *Flujo de CO<sub>2</sub> Océano-Atmósfera en Bahía de Todos Santos, Baja California, Durante un Florecimiento Algal*. Capítulo 25, pp. 371-382. En: Hernández-de-la-Torre, B. y Gaxiola-Castro, G. (eds.). *Carbono en Ecosistemas Acuáticos de México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- McClennen, C. 2003. *Marine Productivity: Explaining Geographic Patterns of Economic Development*. Contemporary Oceanic Issues. En: <http://fletcher.tufts.edu/maritime/documents/MarineProductivity.pdf>
- Merrifield, M.A y Winant, C.D. 1989. *Shelf Circulation in the Gulf of California: a Description of the Variability*. Journal of Geophysical Research. 94(C12):18133-18160..
- National Aeronautics and Space Administration. 2010. *Ocean Color Web Data Access*. En: <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>
- National Oceanic and Atmospheric Administration. 2005. *The Enso Cycle. La Niña Conditions – Related Winds, Equatorial Walker Circulation, and Subsurface Ocean Structure*. En:[http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring)

/ensocycle/lanina\_schem.shtml

- National Oceanic and Atmospheric Administration. 2006. *El Niño*. Capítulo 1, pp. 1-4. En: Babkina, M.A. (ed.). *El Niño. Overview and Bibliography*. NOVA. USA.
- National Oceanic and Atmospheric Administration. 2010. *Enso Cycle. Recent Evolution, Current Status and Predictions*. Update by the Climate Prediction Center / National Oceanic and Atmospheric Administration. USA. En: [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/lanina/enso\\_evolution-status-fcsts-web.pdf](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/lanina/enso_evolution-status-fcsts-web.pdf)
- National Oceanic and Atmospheric Administration. 2011. *El Niño / Southern Oscillation (ENSO) Diagnostic Discussion*. National Oceanic and Atmospheric Administration. USA. En: [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/enso\\_advisory/ensodisc.html](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/enso_advisory/ensodisc.html)
- National Oceanic and Atmospheric Administration, National Environmental Satellite, Data, and Information Service, National Oceanographic Data Center y University of Miami. 2011. *Pathfinder Version 5.0 Sea Surface Temperature. Dataset Summary*. En: [http://coastwatch.pfeg.noaa.gov/infog/PH\\_ssta\\_las.html](http://coastwatch.pfeg.noaa.gov/infog/PH_ssta_las.html)
- National Oceanic and Atmospheric Administration CoastWatch Program, Goddard Space Center y GeoEye. 2011a. *Global Chlorophyll-a Concentration from SeaWiFS. Dataset Summary*. En: [http://coastwatch.pfeg.noaa.gov/infog/SW\\_chla\\_las.html](http://coastwatch.pfeg.noaa.gov/infog/SW_chla_las.html)
- National Oceanic and Atmospheric Administration CoastWatch Program, Goddard Space Center y NASA's OceanColor Web. 2011b. *Science Quality Chlorophyll-a Concentration from Modis/Aqua*. En: [http://coastwatch.pfeg.noaa.gov/infog/MH\\_chla\\_las.html](http://coastwatch.pfeg.noaa.gov/infog/MH_chla_las.html)
- National Oceanic and Atmospheric Administration CoastWatch Program, National Environmental Satellite, Data, and Information Service, Goddard Space Flight Center y NASA's OceanColor Web. 2011c. *Blended Sea Surface Temperature. Dataset Summary*. En: [http://coastwatch.pfeg.noaa.gov/infog/BA\\_ssta\\_las.html](http://coastwatch.pfeg.noaa.gov/infog/BA_ssta_las.html)
- National Oceanic and Atmospheric Administration CoastWatch Program, National Ocean Service, National Weather Service Monterrey Regional Forecast Office. 2011d. *Primary Productivity from MODIS Chlorophyll and Pathfinder SST. Dataset Summary*. En: [http://coastwatch.pfeg.noaa.gov/infog/PP\\_bfp2\\_las.html](http://coastwatch.pfeg.noaa.gov/infog/PP_bfp2_las.html)
- National Oceanic and Atmospheric Administration CoastWatch Program, National Ocean Service, National Weather Service Monterrey Regional Forecast Office. 2011e. *Primary Productivity from SeaWiFS Chlorophyll and Pathfinder SST. Dataset Summary*. En: [http://coastwatch.pfeg.noaa.gov/infog/PP\\_bfp1\\_las.html](http://coastwatch.pfeg.noaa.gov/infog/PP_bfp1_las.html)
- Oesch, D. 2004. *NOAA / AVHRR RSGB. Sea & Lake Surface Temperature*. En: [http://saturn.unibe.ch/rsbern/noaa/dw/realtime/RSGB\\_AVHRR\\_SST.pdf](http://saturn.unibe.ch/rsbern/noaa/dw/realtime/RSGB_AVHRR_SST.pdf)
- Padín, A.X y Navarro, G. 2007. *Estimación de Flujos de CO<sub>2</sub> Superficial en el Golfo de Vizcaya Usando Relaciones Empíricas y la Teledetección*. *Revista de Teledetección*. Número especial:15-19

- Pan, Y., Tang, D. y Weng, D. 2010. *Evaluation of the SeaWiFS and MODIS Chlorophyll Algorithm Used for the Northern South China Sea during the Summer Season*. Terr. Atmos. Ocean. Sci. 21(6):997-1005.
- Pérez-Marrero, J., Maroto, L., Godoy, J., Villagarcía, M., Cianca, A., Rueda, J.M y Llinás, O. 2001. *Validación de Modelos para la Determinación de Clorofila <<A>> a partir de Imágenes SeaWiFS en el Atlántico Centro-Oriental*. Teledetección, Medio Ambiente y Cambio Global. 17:599-602.
- Philander, G.S. 1990. *El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation*. Academic Press. USA. 293 pp.
- Platt, T. y Sathyendranath, S. 1999. *Spatial Structure of Pelagic Ecosystem Processes in the Global Ocean*. Ecosystems. 2:384-394.
- Prentice, I.C., Farquhar, G.D., Fasham, M.J.R. , Goulden, M.L., Heimann, M., Jaramillo, V.J, Kheshgi, H.S., Quéré CL., Scholes, R.J. y Wallace, D.W.R. 2001. *The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide*. Capítulo 3, pp. 183-237. En: Houghton T.J., Ding, Y., Griggs, D.J., Nouger, M., Van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K. y Johnson, C.A. (eds.). *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, UK.
- Quevedo-Urías, .H. y Pérez-Salvador, B.R. 2008. *Estadística para Ingeniería y Ciencias. Patria*. México. 440 pp.
- Redden, M.A., Kobayashi, T., Suthers, I., Bowling, L., Rissik, D. y Newton, G. 2009. *Plankton Processes and the Environment*. Capítulo 2, pp. 15-38. En: Suthers, M.I. y Rissik, D. (eds.). *Plankton. A Guide to their Ecology and Monitoring for Water Quality*. CSIRO. Australia.
- Redfield, A.C., Ketchum, B.H. y Richards, F.A. 1963. *The Influence of Organisms on the Composition of Seawater*. En: Hill, M.N. (Ed.). *The Sea*. Vol. 2: 26-77, Interscience, New York.
- Reynolds, R. W., Rayner, N.A, Smith, T.M., Stokes, D.C. y Wang, W. 2002. *An Improved in situ and Satellite SST Analysis for Climate*. J. Climate, 15:1609-1625.
- Riebesell, U., Zondervan, I., Rost, B., Tortell, P.D., Zeebe, R.E. y Morel, F.M. 2000. *Reduced Calcification of Marine Plankton in Response to Increased Atmospheric CO<sub>2</sub>*. Nature. 407(6802):364-367.
- Ripa, P. y Marinone, S.G. 1989. *Seasonal Variability of Temperature, Salinity, Velocity, Vorticity and Sea Level in the Central Gulf of California, as Inferred from Historical Data*. Q. J. R. Meteorological Society. 115:887-913.
- Robinson, M. K.. 1973. *Atlas of Monthly Mean Sea Surface and Subsurface Temperatures in the Gulf of California, Mexico*. San Diego Society of Natural History, San Diego, California. Memoir 5:97 pp.
- Roden, G.I. 1964. *Oceanographic Aspects of the Gulf of California*. En: Van Andel, T.H. y Shor Jr, G.G. (eds.). *Marine Geology in the Gulf California*. Mem. American



- Association of Petroleum Geologists. 3:30-58.
- Roden, G.I. 1972. *Thermohaline Structure and Baroclinic Flow Across the Gulf of California Entrance and in the Revillagigedo Islands Region*. I. Phys. Oceanogr., 2:117-183.
- Roden, G.I. y Groves, G.W. 1959. *Recent Oceanographic Investigations in the Gulf of California*. Journal Marine Research. 18:10-35.
- Sabine, L.C., Feely, A.R., Gruber, N., Key, M.R., Lee, K., Bullister, L.J., Wanninkhof, R., Wong, S.C., Wallace, R.W., Tilbrook, B., Millero, J.F., Peng, T., Kozyr, A., Ono, T. y Rios, F.A. 2004. *The Oceanic Sink for Anthropogenic CO<sub>2</sub>*. Science. 305(5682):367-371.
- Santamaría-del-Ángel, E., Álvarez-Borrego, S. y Muller-Karger, F.E. 1994a. *Gulf of California Biogeographic Regions Based on Coastal Zone Color Scanner Imagery*. Journal of Geophysical Research. 99(C4):7411-7421.
- Santamaría-del-Ángel, E., Álvarez-Borrego, S. y Muller-Karger, F.E. 1994b. *The 1982-1984 El Niño in the Gulf of California as Seen in the Coastal Zone Color Scanner Imagery*. Journal of Geophysical Research. 99(C4):7423-7431.
- Schippers, P., Lurling, M. and Scheffer, M. 2004. *Increase of atmospheric CO<sub>2</sub> promotes phytoplankton productivity*. Ecology Letters 7: 446-451.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2000. *Programa de Manejo. Área de Protección de Flora y Fauna. Islas del Golfo de California*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales/Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. México. 262 pp.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2006. *Descripción General del Golfo de California*. Anexo I, pp. 1-11. En: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Ordenamiento Ecológico Marino del Golfo de California. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- Simpson, J.H., Souza, A.J., y Lavín, M.F. 1994. *Tidal Mixing in the Gulf of California*. En: Beven, K.J., Chatwin, P.C. y Millbank, J.H. (Eds.). *Mixing and Transport in the Environment*. John Wiley, New York. pp. 169-182.
- Sosa-Ávalos, R., Espinosa-Carreón, T.L y Gaxiola-Castro, G. 2007. *¿Causaron las Condiciones de La Niña 1999 un Incremento en la Producción de Carbono Orgánico frente a Baja California?* Capítulo 21, pp. 305-317. En: Hernández-de-la-Torre, B. y Gaxiola-Castro, G. (eds.). *Carbono en Ecosistemas Acuáticos de México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- Soto-Mardones, L.S., Marinone, S.G. y Parés-Sierra, A. 1999. *Variabilidad Espaciotemporal de la Temperatura Superficial del Mar en el Golfo de California*. Ciencias Marinas. 25(1):1-30.
- Stevenson, M. R. 1970. *On the Physical and Biological Oceanography Near the Entrance to the Gulf of California, October 1966-August 1967*. Bull. Inter. Am. Trap. Tuna Comm. 4(3):389-504
- Sun, J., Feng, Y., Zhang, Y. y Hutchins, D. 2007. *Fast Microzooplankton Grazing on Fast-*

- growing, *Low biomass Phytoplankton: a Case Study in Spring in Chesapeake Bay, Delaware, Inland Bays and Delaware Bays*. *Hydrobiologia*. 589: 127-139.
- Thorade, H. 1909. *Über die Kalifornische Meeresströmung*. *Hidrog. Marit. Met. Ann.*, 37:17-34, 63-76.
- Tortell, D.P., DiTullio, R.G., Sigman, M.D. y Morel, M.M.F. 2002. *CO<sub>2</sub> Effects on Taxonomic Composition and Nutrient Utilization in an Equatorial Pacific Phytoplankton Assemblage*. *Marine Ecology Progress Series*. 236:37.43.
- Trasmonte, G. y Silva, Y. 2008. *Evento La Niña: Propuesta de Definición y Clasificación Según las Anomalías de Temperatura de la Superficie del Mar en el Área Niño 1+2*. *Inf. Inst. Mar Perú* 35(3): 199-207.
- US Hydrographic Office. 1947. *Atlas of Surface Currents: Northeastern Pacific Ocean*. H.O. Publ. 570, US Hydrogr. Office, 12 map, Washington, DC.
- Valdez-Holguín, J.E. 1986. *Distribución de la Biomasa y Productividad del Fitoplancton en el Golfo de California Durante el Evento de El Niño 1983-1983*. Tesis de maestría no publicada. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Ensenada, Baja California. 92 pp.
- Valdez-Holguín, J.E., Álvarez-Borrego, S. y Trees, C. C. 1999. *Seasonal and Spatial Characterization of the Gulf of California Phytoplankton Photosynthesis Parameters*. *Ciencias Marinas*. 25:445-467.
- Valdez-Holguín, J.E., Gaxiola-Castro, G. y Cervantes-Duarte, R. 1995. *PP en el Golfo de California Calculada a partir de la Relación entre Irradiancia Superficial y Clorofila de la Zona Eufótica*. *Ciencias Marinas*. 21(3):311-329.
- Valdez-Holguín, J.E y Lara-Lara, R. 1987. *Primary Productivity of the Gulf of California of El Niño 1982-1983 Event*. *Ciencias Marinas*. 13:34.50.
- Walton, C.C., Pichel, W.G., Sapper, J.F., y May, D.A, 1998. *The Development and Operational Application of Nonlinear Algorithms for the Measurement of Sea Surface Temperatures with the NOAA Polar-orbiting Environmental Satellites*. *Journal of Geophysical Research*. 103(C12): 27999-28012.
- Wang, J.W., Behrenfeld, M., Borgne, L.R., Murtugudde, R. y Boss, E. 2008. *Regulation of Phytoplankton Carbon to Chlorophyll Ratio by Light, Nutrients and Temperature in the Equatorial Pacific Ocean: a Basin-scale Model*. *Biogeosciences Discuss*. 5:3869-3903.
- White, E.A., Prhal, G.F., Letelier, M.R. y Popp, N.B. 2007. *Summer Surface Waters in the Gulf of California: Prime Habitat for Biological N<sub>2</sub> Fixation*. *Global Biogeochemical Cycles*. 21(GB2017-10.1029):1-11.
- Williams, P.J.B., Thomas, D.N. y Reynolds, C.S. 2002. *Phytoplankton Productivity. Carbon Assimilation in Marine and Freshwater Ecosystems*. Wiley-Blackwell Science. 400 pp. India.
- Williams, G.R. y Follows, J.M. 2003. *Physical Transport of Nutrients and the Maintenance of Biological Production*. Capítulo 2, pp. 19-46. En: Fasham, J.R.M. (ed.). *Ocean*

Biogeochemistry: a Synthesis of the Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS).  
Springer. Alemania.

Wyrtki, K. 1966. *Oceanography of the Eastern Equatorial Pacific Ocean*. Oceanography and Marine Biology Annual Review, 4:33–68.

Yoshimura, T., Nishioka, J., Suzuki, K., Hattori, H., Kiyosawa, H. y Watanabe, W.Y. 2009. *Impacts of Elevated CO<sub>2</sub> on Phytoplankton Community Composition and Organic Carbon Dynamics in Nutrient-Depleted Okhotsk Sea Surface Waters*. Biogeosciences Discussions. 6:4143-4163.

Zeitzschel, B. 1969. *Primary Productivity in the Gulf of California*. Marine Biology. 3:201-207.

XI. APÉNDICE A  
(APÉNDICE DE PRUEBAS)

11.1 Prueba de Diferencia de Medias para Observaciones Pareadas y correlación lineal: clorofila *a* SeaWiFS vs. clorofila *a* MODIS.

Con información de composiciones mensuales de clorofila *a* para todo el Golfo de California derivada de los sensores MODIS y SeaWiFS se obtuvieron 81 promedios mensuales por sensor. Los promedios fueron obtenidos en calidad equivalente, de forma que para un mes dado existían dos valores: un promedio derivado de información MODIS y otro derivado de información SeaWiFS. El período para la obtención de los promedios fue: julio de 2002 a agosto de 2009. En este período se excluyeron cuatro meses (para los que no existía información disponible del sensor SeaWiFS) a fin de trabajar sólo con información pareada de los sensores.

El promedio ( $\pm$  desviación estándar) de clorofila *a* considerando los 81 meses (*n*) fue: 1.79 ( $\pm$  0.770) mg m<sup>-3</sup> para MODIS y 0.58 ( $\pm$ 0.283) mg m<sup>-3</sup> para SeaWiFS.

Se encontraron diferencias significativas entre sensores a través de una prueba de diferencia de medias para observaciones pareadas: Con un valor-*t* de -16.1721 se rechazó la hipótesis nula: Clor-*a* SeaWiFS = Clor-*a* MODIS. Hay evidencia suficiente para afirmar con un nivel de confianza del 95.00% ( $p < 0.050$ ) que los valores de clorofila *a* que se obtienen del sensor MODIS fueron mayores a los obtenidos del sensor SeaWiFS para una misma región y una misma fecha (Empleando la metodología descrita en este trabajo en el apartado 5.1.2.2).

La correlación de Spearman de los valores pareados estuvo descrita por: Clor-*a* MODIS = 1.0103 + 1.3523 (Clor-*a* SeaWiFS); un coeficiente de correlación (*r*) de 0.498, que describe una correlación positiva, pero no acentuada entre variables; y un coeficiente de determinación (*r*<sup>2</sup>) de 0.248, que indica que un 24 % de la clor-*a* MODIS estaría siendo explicada por la clor-*a* SeaWiFS.

Por regla de tres, se calculó el porcentaje de sobreestimación de clorofila  $a$  del sensor MODIS respecto al sensor SeaWiFS para cada uno de los 81 meses considerados y pareados. El porcentaje promedio de sobreestimación fue de 350.71 %.

En función de la sobreestimación de MODIS, se normalizaron los valores de PP de los años 2008 a 2010 (derivados de MODIS + Pathfinder). Las diferencias significativas de PP dada por estos años (Apartado 6.1.1) en la región de las islas, central y la boca del golfo (fig. 4), tienden a eliminarse (Ver apéndice C: fig. 32) con los valores normalizados.

#### 11.2 Prueba de Comparación de Dunnett para la señal interanual a escala regional en el Golfo de California.

La señal interanual de El Niño y La Niña en el Golfo de California fue significativa a escala regional utilizando la Prueba de Comparación de Dunnett. Esta prueba se utiliza para comparaciones múltiples con un sólo grupo testigo a fin de determinar el grupo que es diferente al testigo o control (Quevedo-Urias y Pérez-Salvador, 2008).

Utilizando la prueba de Dunnett a valores de Alpha ( $\alpha$ ) distintos para cada región se obtuvieron:

- 1) diferencias significativas entre El Niño y La Niña, sin diferencias estadísticas de estos eventos respecto a condiciones normales, en la región de las islas (con un nivel de significancia = 75 %,  $\alpha = 0.250$ ) y el centro (con un nivel de significancia = 85 %,  $\alpha = 0.150$ );
- 2) diferencias significativas entre El Niño y las condiciones La Niña y normal, sin haber diferencias significativas entre estas últimas, en la boca (con un nivel de significancia = 95 %,  $\alpha = 0.050$ ).

La señal interanual de estos eventos con la prueba de Tukey-Kramer es significativa (sólo entre condiciones anormales) a un 95 % de confianza ( $\alpha = 0.050$ ) si se utilizan los datos de todas las regiones como un solo juego de datos (lo que equivaldría a realizar un análisis a escala global). Esta prueba se utiliza para realizar comparaciones múltiples de medias (Glantz, 2005), y fue la prueba utilizada en todos los análisis de este trabajo, incluyendo la comparación a escala global presentada en el apartado 6.2.

XII. APÉNDICE B  
(APÉNDICE DE TABLAS)

Tabla 31. Chl ( $\text{mg m}^{-3}$ ) anual en el Golfo de California estimada a partir de sensores remotos con información. SeaWiFS y MODIS resolución 10 km (SM-10) y SeaWiFS y MODIS de resolución 1 km (SM-1).

<b>Año</b>	<b>Espinosa-Carreón y Valdez-Holguín (2007)</b>	<b>Hidalgo-González y Álvarez-Borrego (2004) (<math>\text{Chl}_s = 0.9\text{Chl}_{\text{sat}} \text{mg m}^{-3}</math>)</b>	<b>Este estudio (SM-10)</b>	<b>Este estudio (SM-1)</b>	<b>Período</b>	<b>Hidalgo-González y Álvarez-Borrego (2004) (<math>\text{Chl}_s = 0.9\text{Chl}_{\text{sat}} \text{mg m}^{-3}</math>)</b>
1997	0.77	0.36	0.60	1.98 – 2.2	1997-98	0.49
1998	0.80	0.30	0.68	1.64 – 2.44	1998-99	0.67
1999	1.29	0.42	0.94	2.66 – 3.84	1999-00	0.85
2000	1.79	0.50	1.12	2.46 – 5.16	2000-01	0.92
2001	1.47	0.44	1.10	2.07 – 4.45	2001-02	0.84
2002	1.24	0.42	0.91	1.93 – 2.95		

Tabla 32. Chl ( $\text{mg m}^{-3}$ ) en la región de las islas del Golfo de California. Los valores presentados están dados para la profundidad cero, exceptuando aquellos obtenidos por •percepción remota.

Fecha o período	Chl ( $\text{mg m}^{-3}$ )	Referencias
Diciembre 1981	2.4 – 3.5	Álvarez-Borrego y Gaxiola-Castro, 1988
Diciembre 1981	3.36 – 4.46	•Santamaría del Ángel <i>et al.</i> , 1994a
Diciembre 1984	0.5 – 0.9	Bazán-Guzmán, 1990
Invierno 1997 – 2010	1.09 - 1.73	•Este estudio
Marzo 1973	3.0-5.0	Gendrop-Funes <i>et al.</i> , 1978
Marzo 1983	2.2 – 3.0	Valdez-Holguín, 1986
Primavera 1997 - 2010	1.67 – 2.65	•Este estudio
Junio 1982	2.4 - 3.5	Álvarez-Borrego y Gaxiola-Castro, 1988
Junio 1982	1.75 – 3.0	•Santamaría del Ángel <i>et al.</i> , 1994a
Verano 1997 - 2010	0.49 – 1.43	•Este estudio

Tabla 33. Chl en la región central del Golfo de California. Los valores presentados están dados para la profundidad cero, exceptuando aquellos obtenidos por •percepción remota.

Fecha o período	Chl (mg m <sup>-3</sup> )	Referencias
Marzo 1984	0.7	Valdez-Holguín, 1986
Marzo 1984b	0.15	Valdez-Holguín, 1986, Santamaría del Ángel <i>et al.</i> , 1994a
Abril 1985	5.2	Lara-Lara <i>et al.</i> 1993
Abril 1985b	1.3	Lara-Lara <i>et al.</i> 1993, •Santamaría del Ángel <i>et al.</i> , 1994a
Abril 1985	1.6	•Santamaría del Ángel <i>et al.</i> , 1994a
Primavera 1992	0.71	Valdez-Holguín <i>et al.</i> , 1995
Primavera 1997-2010	0.61 – 1.79	•Este estudio
Junio 1982	0.3	Álvarez-Borrego y Gaxiola-Castro, 1988
Junio 1982	0.22	•Santamaría del Ángel <i>et al.</i> , 1994a
Verano 1997-2010	0.19 – 0.69	•Este estudio
Noviembre 1984	0.3	Bazán-Guzmán, 1990, •Santamaría del Ángel <i>et al.</i> , 1994a
Otoño 1997-2010	0.31 – 0.89	•Este estudio



Tabla 34. Chl en la boca del Golfo de California. Los valores presentados están dados para la profundidad cero, exceptuando aquellos obtenidos por •percepción remota.

<b>Fecha o período</b>	<b>Chl (mg m<sup>-3</sup>)</b>	<b>Referencias</b>
Abril – Agosto 1967	0.76 – 1.0	Stevenson, 1970
Marzo 1984	0.20	Valdez-Holguín, 1986
Primavera 1997-2010	0.22 – 1.04	•Este estudio
Verano 1997-2010	0.13 – 0.53	•Este estudio

Tabla 35. Producción primaria total (PT); producción nueva (PN); producción regenerada (PR); producción neta (PPN) en el Golfo de California. Todos los valores están dados en  $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$ . Se señalan los valores obtenidos por •percepción remota.

Fecha o período	PP ( $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$ )	Referencias
1969	292 (PT)	Zeitzschel, 1969
1982-1983	1131 (primavera, El Niño, PT) 657 (otoño, El Niño, PT)	Lara-Lara <i>et al.</i> , 1984
Otoño 1997 - 2010	296 – 402 (PT)	•Este estudio
1982	474 – 1606 (PT)	Álvarez-Borrego <i>et al.</i> , 1987
Primavera 1985	31 - 294 (Centro, PT) 178 (Media del centro, PT)	Lara-Lara <i>et al.</i> 1993
Primavera 1995	292 ( <i>in situ</i> , PT) 229 (modelo, primavera, PT) 405 (modelo, general, PT) Islas: 474 (modelo, general, PT) Sur: 178 (modelo, general, PT)	Valdez-Holguín <i>et al.</i> , 1995
Primavera 1997 - 2010	383 (PT)	•Este estudio
1996 – 2002	328 - 566 (PT)	•Lluch-Cota <i>et al.</i> , 2004
1996 – 2003	606 (PPN)	•Kahru <i>et al.</i> , 2004
1997 - 2010	204 – 357 (PT)	•Este estudio
1997-1998	515 (PT)	•Hidalgo-González y Álvarez-Borrego, 2004
1997 - 1998	281 (1997, PT) 339 (1998, PT)	•Este estudio

Continuación (tabla 35).

Fecha o período	PP (g C m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> )	Referencias
2001-2002	635 (PT)	•Hidalgo-González y Álvarez-Borrego, 2004
2001-2002	467 (2001, PT) 376 (2002, PT)	•Este estudio
1997 - 2002	423 – 697 (condición fría, PT) 142 – 485 (condición cálida, PT) 485 (norte, condición fría, PN) 175 (sur, condición fría, PN) 91 - 113 (condición cálida, PN)	•Hidalgo-González y Álvarez-Borrego, 2004
1997 – 2010	391 – 558 (PT) 781 (Islas, PT) 555 (Centro, PT) 336 (Boca, PT) 715 (Islas, invierno, PT) 416 (Boca, invierno, PT)	•Este estudio
Julio – Agosto 2005	237 (PR) 179 (Centro, PR) 496 (Alto golfo, PR)	White <i>et al.</i> , 2007
Verano 1997-2010	277 – 394 (PR) 591 (Islas, PR) 329 (Centro, PR) 266 (Boca, PR)	•Este estudio

Tabla 36. PR en el Golfo de California. Las celdas sombreadas señalan la región homóloga entre estudios. La estimación de P-Nueva de este estudio se basa en la media de PP de verano más baja calculada para A) todo el golfo ( $0.55 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ), o B) la región central ( $0.44 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ).

Región	PR ( $\text{g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ )		Porcentaje de PP atribuible a la PR (%):	
	White <i>et al.</i> (2007)	Este estudio	White <i>et al.</i> (2007)	Este estudio
GC-3 (Alto golfo)	1.36			
GC-1 (Centro)	0.49	0.55 <sup>A</sup>	32	36 <sup>A</sup>
		0.44 <sup>B</sup>		29 <sup>B</sup>
GC-2 (Centro)	0.57	0.44	38	29
GC-4 (Centro)	0.65	0.44	42	29

XIII. APÉNDICE C  
(APÉNDICE DE FIGURAS)

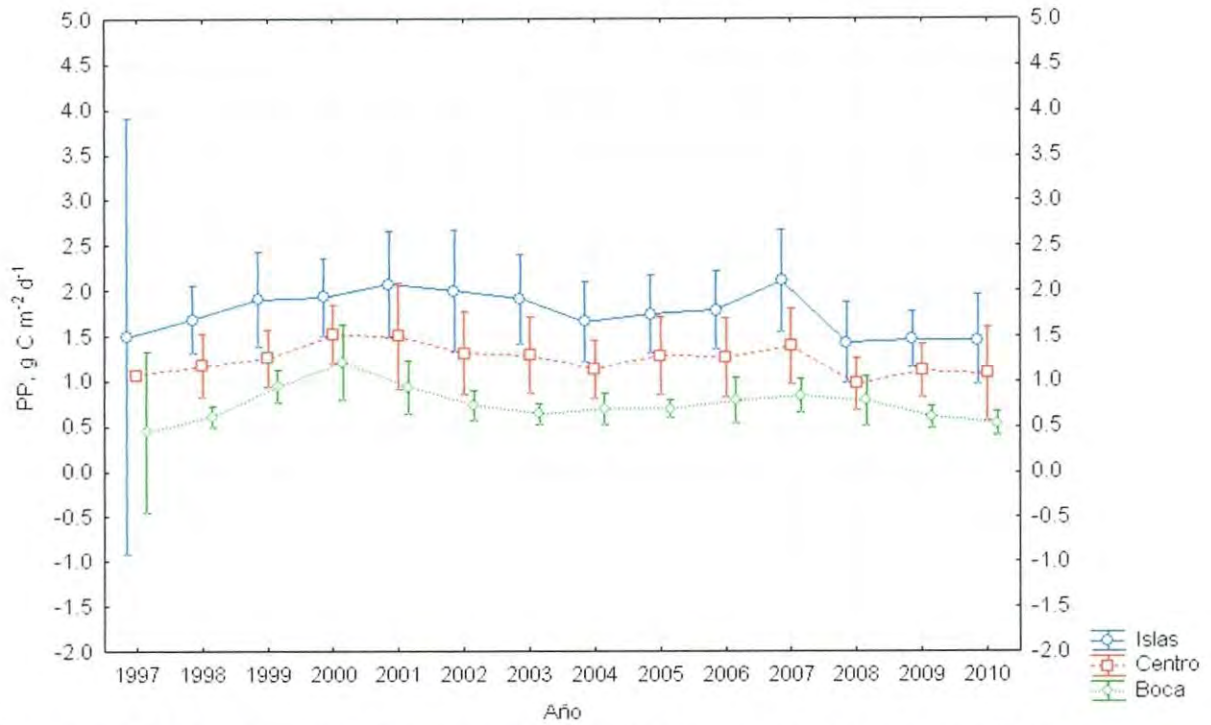


Figura 32. Medias anuales de PP para tres regiones del Golfo de California (1997 – 2010) utilizando valores SeaWiFS & Pathfinder (SP) (1997 - 2007) y MODIS & Pathfinder (2008 – 2010) sin el efecto de la sobreestimación del sensor MODIS. Las barras verticales denotan el intervalo de confianza (95%).

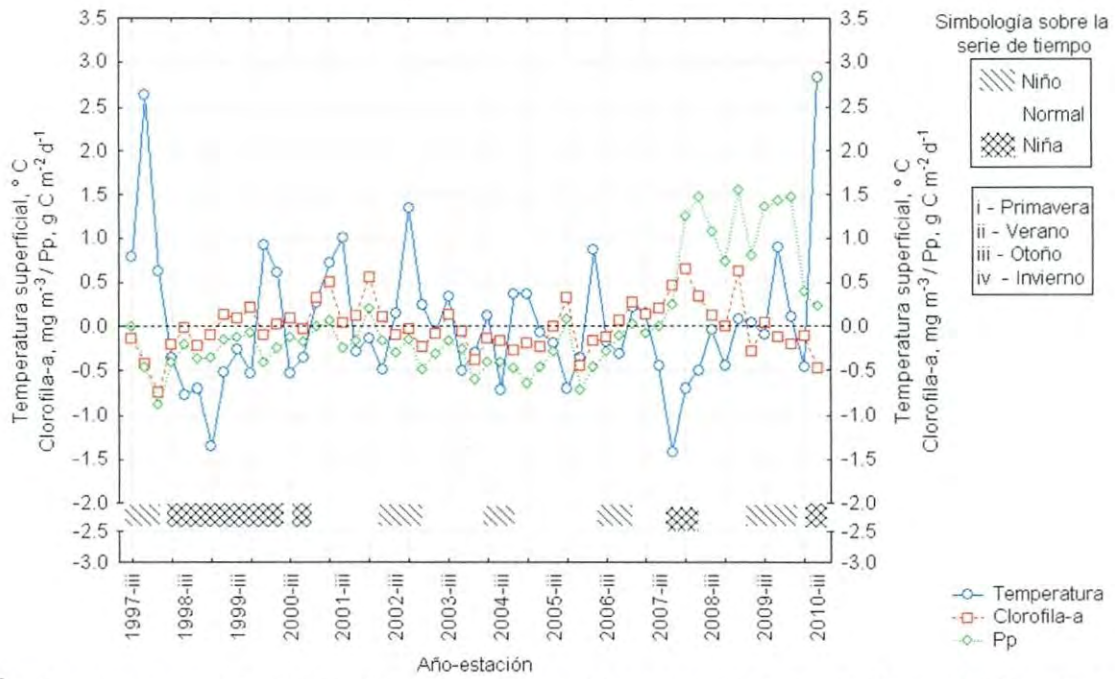


Figura 33. Anomalías de TSM, Chl y PP en la región de las islas del Golfo de California (1997 – 2010).

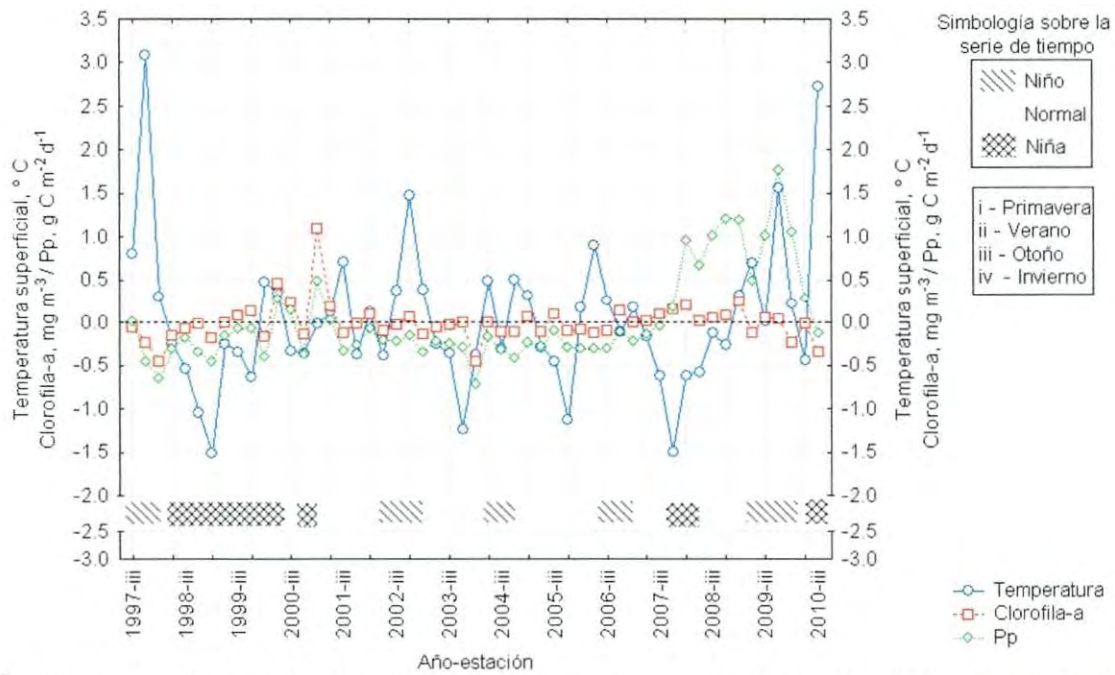


Figura 34. Anomalías de TSM, Chl y PP en la región central del Golfo de California (1997 – 2010).

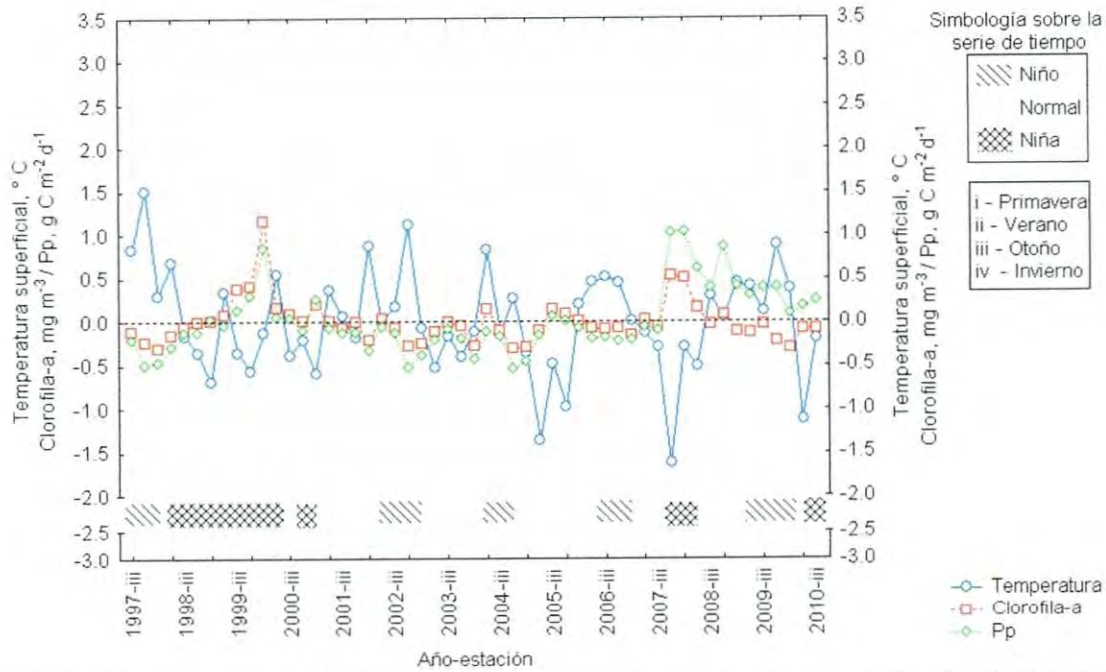


Figura 35. Anomalías de TSM, Chl y PP en la boca del Golfo de California (1997 – 2010).