



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

**Procesos físicos de mesoescala que
favorecen la distribución y
concentración de Clorofila-a, en el
Golfo de California, México**

T E S I S

que para obtener el título de:

BIÓLOGO

P R E S E N T A:

Diego Giovanni Crisóstomo López

DIRECTORA DE TESIS:

Dra. María Adela Monreal Gómez

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

1. Datos del alumno

Crisóstomo

López

Diego Giovanni

5577966254

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Biología

308000429

2. Datos del asesor

Dra.

María Adela

Monreal

Gómez

3. Datos del sinodal 1

Dr.

Adolfo

Gracia

Gasca

4. Datos del sinodal 2

Dr.

Raúl

Aguirre

Gómez

5. Datos del sinodal 3

Dr.

Pablo

Hernández

Alcántara

6. Datos del sinodal 4

Dra.

Ligia Lucina

Pérez

Cruz

7. Datos del trabajo escrito

Procesos físicos de mesoescala que favorecen la distribución y concentración de Clorofila-a, en el Golfo de California, México

75 p.

2017

DEDICATORIAS

Dedico esta tesis a mi familia que siempre estuvo presente apoyándome y con palabras de ánimo para nunca darme por vencido, especialmente a mi mamá Luz María y a mi papá Héctor Antonio por siempre darme los mejores consejos para tomar buenas decisiones, así como a mis hermanos por su apoyo incondicional. También dedico esta tesis a mi bonita novia por siempre apoyarme y alentarme a ser mejor cada día para lograr mis objetivos y, por último, pero no menos importante, a aquellas personas que conocí en la facultad y que hicieron de esta etapa de mi vida algo divertido y genial.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar a la Universidad Nacional Autónoma de México por darme toda esta formación de estudiante y permitir mi crecimiento como persona.

De igual forma agradezco al Servicio Meteorológico Nacional por apoyarme con los datos utilizados en este trabajo de tesis.

De manera muy especial al M. en C. Jorge Arturo Castro Sánchez por toda la ayuda y paciencia que tuvo con el manejo de edición y procesamiento de las imágenes de esta tesis, ¡muchas gracias!

A la Dra. María Adela Monreal Gómez por ser parte importante durante todo el proceso de realización de este trabajo, por las correcciones y observaciones, por su paciencia y por todos los consejos dados a lo largo de todo este tiempo.

Al Dr. David Salas de León por los comentarios y apoyo en la parte final de esta tesis, así como a los sinodales el Dr. Adolfo Gracia Gasca, Dr. Pablo Hernández Alcántara, Dr. Raúl Aguirre Gómez y a la Dra. Ligia Pérez Cruz por todos los comentarios y observaciones que aportaron para esta tesis.

CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT	3
CAPITULO I	4
INTRODUCCIÓN	4
I.1. PROCESOS FÍSICOS E IMÁGENES DE SATÉLITE	5
I.1.1. Mezcla por mareas	5
I.1.2. Surgencias	6
I.1.3. Vórtices oceánicos	8
I.1.4. Frentes	9
I.1.5. Dinámica oceánica relacionada con fenómenos El Niño y La Niña	10
I.1.6. Imágenes satelitales	11
I.2. ANTECEDENTES	12
Motivación	14
Objetivo general	14
Objetivos específicos	15
I.3. Área de estudio	15
CAPITULO II	20
MÉTODOS Y MATERIALES	20
2.1. IMÁGENES DE SATELITE	21
2.1.1. Imágenes de Clorofila-a (Chl-a)	21
2.1.2. Imágenes de Temperatura Superficial del Mar	21
2.2. DATOS METEOROLÓGICOS	22
2.2.1. Imágenes de Patrones de Viento	22
2.2.2. Datos de Estaciones Sinópticas Meteorológicas	24
2.3. INDICE DE BAKUN	25
2.4. INDICE DE OSCILACIÓN DEL SUR	27
CAPÍTULO III	30
RESULTADOS	30
3.1. VELOCIDAD DEL VIENTO E ÍNDICE DE BAKUN	30
3.1.1. San Felipe	31
3.1.2. Empalme	33
3.1.3. Santa Rosalía B.C.S.	33
3.1.4. Loreto B.C.S.	34
3.1.5. Mazatlán	36
3.2. DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA SUPERFICIAL Y DE CLOROFILA-a	37
3.3. EL ÍNDICE DE OSCILACIÓN DEL SUR (SOI), LA PRESENCIA DE EL NIÑO, LA NIÑA Y EL AÑO NEUTRO	52
CAPÍTULO IV	61

DISCUSIÓN	61
CONCLUSIONES	66
REFERENCIAS	68

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1. Localización y batimetría del Golfo de California, los puntos negros representan las estaciones meteorológicas (ESIME) utilizadas en el análisis del campo de vientos (imagen a). Inclinación de la línea de costa respecto al norte magnético, en las cinco localidades de las ESIME's (imagen b).	17- 18
Figura 2.1. Velocidad y dirección del viento ($m s^{-1}$) en el Golfo de California.	23
Figura 2.2. Índice de Oscilación del Sur (2009 a 2013) de acuerdo a la NOAA.	29
Figura 3.1. Diagrama de estacas de los vientos e índice de surgencia en San Felipe, B. C., en los años: a) 2009, b) 2010, c) 2011 y d) 2013.	32
Figura 3.2. Diagrama de estacas de los vientos e índice de surgencia en Empalme Son., en el año 2013.	33
Figura 3.3. Diagrama de estacas de los vientos e índice de surgencia en Santa Rosalía B. C., en el año 2013.	34
Figura 3.4. Diagrama de estacas de los vientos e índice de surgencia en Loreto B.C.S. a) año 2009, b) año 2010, c) año 2011 y e) año 2013.	35
Figura 3.5. Diagrama de estacas de los vientos e índice de surgencia en Mazatlán Sin., en el año 2013.	36
Figura 3.6. Temperatura superficial del mar y concentración de Chl- <i>a</i> en 2009.	38- 39
Figura 3.7. Temperatura superficial del mar y Clorofila- <i>a</i> en 2010.	41- 42
Figura 3.8. Temperatura superficial del mar y Clorofila- <i>a</i> en 2011.	44- 45
Figura 3.9. Temperatura superficial del mar y Clorofila- <i>a</i> en 2013.	47- 48
Figura 3.10. Temperatura superficial del mar ($^{\circ}C$) y de clorofila- <i>a</i> ($mg m^{-3}$) para los meses de enero (mes representativo de otoño, invierno y primavera) y julio (mes representativo de verano), de cada uno de los años estudiados.	50
Figura 3.11. Valores del Índice de la Oscilación del Sur, durante los años de estudio (según la NOAA).	53
Figura 3.12. Valores del Índice de la Oscilación del Sur, durante el año de El Niño 2009-2010 (según la NOAA).	54

Figura 3.13.	Evento de La Niña 2010-2011 (según la NOAA).	55
Figura 3.14.	Índice de la Oscilación del Sur durante el año neutro de 2013 (según la NOAA).	56
Figura 3.15.	Temperatura superficial del mar (°C) y concentración de clorofila- <i>a</i> (mg m ⁻³) durante los meses de octubre de 2009 y marzo de 2010.	58
Figura 3.16.	Temperatura superficial del mar (°C) y concentración de clorofila- <i>a</i> (mg m ⁻³) durante los meses de abril de 2010 y mayo de 2011.	59
Figura 3.17.	Temperatura superficial del mar (°C) y concentración de clorofila- <i>a</i> (mg m ⁻³) durante los meses de febrero de 2010 y diciembre de 2011.	60
Figura 4.1.	Enriquecimiento biológico en el Golfo de California durante 1970-1996 observado por medio de imágenes satelitales (tomado de Lluch-Cota, 1999).	63
Figura 4.2.	Serie de tiempo de anomalía de temperatura superficial del mar (°C) (línea naranja), Clorofila- <i>a</i> superficial (mg m ⁻³) (línea azul), productividad primaria (gC m ⁻² d ⁻¹) (línea roja) e Índice de la anomalía de la Temperatura Superficial del Mar, según el Centro de Predicción del Clima de la NOAA (línea verde), para los años 1997 a 2009 (tomada de Escalante <i>et al.</i> , 2013).	64

LISTA DE TABLAS

		Página
Tabla 3.1.	Variación de TSM (°C) y concentración de Clorofila-a (mg m ⁻³) para cada época del año 2009-2011 y 2013.	49
Tabla 3.2.	Estructuras físicas observadas dentro del Golfo de California en los años 2009, 2010, 2011 y 2013 durante las dos épocas contrastantes de acuerdo a los vientos en el Golfo de California.	51
Tabla 3.3.	Temperatura Superficial del Mar (TSM, °C) y concentración de Clorofila-a (Chl-a, mg m ⁻³) para los meses de máximo valor del SOI en los años El Niño, La Niña y un mes comparable para el año neutro.	56- 57

RESUMEN

Existen diversos procesos físicos de mesoescala que favorecen la distribución y concentración de Clorofila-*a* en los océanos, como son, las surgencias, vórtices y frentes y fenómenos globales como El Niño y La Niña. El propósito de esta tesis fue identificar a través de imágenes de satélite y datos históricos de viento, los procesos físicos de mesoescala que favorecieron la distribución de Clorofila-*a* en el Golfo de California. Los resultados muestran que existen surgencias de ambos lados del Golfo de California; durante otoño, invierno y primavera éstas fueron intensas en la costa continental, mientras que en el verano se observaron con menor intensidad en la costa peninsular debido; por un lado, a la intensidad de los vientos y por otro, a la estratificación de la columna de agua. La intrusión de agua cálida al golfo es notoria en enero de 2010 debido a la presencia de El Niño, mientras que durante La Niña de 2011, la temperatura superficial fue más baja que en condiciones neutras. Núcleos cálidos a lo largo del Golfo de California coinciden con bajas concentraciones de Clorofila-*a*, contrariamente a lo que ocurre en núcleos fríos. Durante invierno, la zona norte y la del archipiélago, permanecieron más frías con respecto al resto del golfo, ya que la mezcla por mareas provoca que aguas subsuperficiales asciendan a la capa eufótica, lo cual induce el incremento de clorofila-*a*. Mientras que durante el verano las diferencias de temperatura son mínimas. Es importante determinar el alcance de estas anomalías interanuales (El Niño/La Niña) debido a las consecuencias que tienen en el medio marino, recursos naturales, la sociedad, la economía y el impacto ambiental en diferentes lugares del

planeta, ya que cada región responde de manera diferente a estos eventos de interacción océano-atmósfera.

ABSTRACT

Several mesoscale physical processes that support the distribution and concentration of Chlorophyll-*a* in the oceans are upwelling, vortex and fronts, as well as global phenomena's like El Niño and La Niña. The purpose of this thesis work was to identify the mesoscale physical processes that promote Chlorophyll-*a* distribution in the Gulf of California through satellite images and historical wind data. Results show that there were upwelling on both sides of the Gulf of California. During autumn, winter and spring seasons upwelling was intense on the continental coast, whereas in the summer it was with less intensity in the peninsular coast, which is due to the intensity of the winds and stratification of the water column. The intrusion of warm water into the Gulf is notorious in January 2010 due to the presence of El Niño, while in 2011 during La Niña the surface temperature was lower than in normal conditions. Warm eddies along the Gulf of California coincide with low concentrations of Chlorophyll-*a*, contrary to that occurs in cold eddies. During winter in the northern archipelago areas remained colder than the rest of the Gulf, as the tidal mixing causes the uplift of subsurface waters into the euphotic layer, which induces high concentrations of chlorophyll-*a*. While during summer the sea surface temperature was very uniform. We consider that it is important to determine the effect of these interannual anomalies (El Niño / La Niña), due to the consequences that they have on the marine environment, natural resources, society, economy and environmental impact in different parts of the planet, such as each region has a different response to these oceanic-atmospheric events.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

En el océano existen procesos físicos que favorecen la producción biológica, como la mezcla por marea, los vórtices, los frentes y las surgencias. La alternancia entre estratificación y mezcla también favorece la producción biológica (Margalef, 1978).

El Golfo de California es muy dinámico, con gran diversidad y alta productividad biológica debido a la presencia de tres procesos fundamentales para la fertilización: surgencias, mezcla y circulación termohalina (Álvarez-Borrego, 2002; Salas-de-León *et al.*, 2011). El campo de vientos en el golfo es marcadamente estacional; durante el otoño, invierno y primavera los vientos soplan del noroeste alcanzando una magnitud de hasta 12 m s^{-1} , mientras que durante el verano estos son del sureste con magnitud que llega a 5 m s^{-1} (Merrifield and Winant, 1989; Badan-Dangon *et al.*, 1991). Por lo que se espera que estos vientos generen surgencias eólicas de diferente intensidad de uno y otro lado del golfo. Existe también afloramiento del agua subsuperficial hacia las capas más someras debido a fuertes cambios en la batimetría, como los que se presentan en la zona del archipiélago. Por otra parte, la mezcla que producen las mareas en el norte del golfo también juega un papel muy importante en la productividad biológica.

I.1. PROCESOS FÍSICOS E IMÁGENES DE SATELITE

I.1.1. Mezcla por mareas

Las mareas en el Golfo de California se deben a la co-oscilación con las mareas del Océano Pacífico (Filloux, 1973), con diferentes amplitudes de acuerdo a las componentes que se presentan en el golfo, siendo las semidiurnas las de mayor amplitud. En la entrada del golfo se presentan amplitudes de 35 cm, en la parte central del golfo esta es de 5 cm y en región del norte del golfo se tienen elevaciones de hasta 150 cm (Lavín y Marinone, 2003). En el Alto Golfo los efectos de la marea son intensos ya que se presentan con amplitudes de 10 m, produciendo corrientes de hasta 3 m s^{-1} (Makarov y Jiménez-Illescas, 2003).

Las mareas dentro del golfo tienen características diferentes dependiendo de la zona, por ejemplo, en la parte norte las mareas son muy intensas (Carbajal, 1993); por lo tanto, la productividad primaria es elevada (Salas de León *et al.*, 2011). Por otra parte, el archipiélago se caracteriza por tener una fuerte mezcla por marea alrededor de las islas Tiburón y Ángel de la Guarda (Badan-Dangon *et al.*, 1991), suministrando nutrientes a las capas superficiales del océano (Salas-de-León *et al.*, 2011).

Las mareas en el Golfo de California estimulan otros fenómenos físicos como ondas internas que se forman a partir de una elevada energía cinética y estratificación (Filonov y Lavín, 2003), cuyo rompimiento generan mezcla la cual a su vez produce un flujo de nutrientes hacia la capa eufótica promoviendo la productividad biológica.

En zonas donde las mareas son intensas los procesos biológicos se ven afectados por otros procesos como vorticidad y mezcla (Farfán y Álvarez-Borrego, 1992), de esta manera se induce el enriquecimiento de las aguas superficiales y así, se incrementa la productividad (Merino y Monreal-Gómez, 2004).

I.1.2. Surgencias

Las surgencias o afloramientos se definen como el movimiento vertical de agua subsuperficial hacia capas superficiales de los océanos, estas pueden ser generadas ya sea por el esfuerzo del viento (surgencias eólicas) o por una corriente muy intensa que pasa de una profundidad mayor a otra menor, en cuyo caso se le conoce como surgencia topográfica (Cervantes-Duarte *et al.*, 1993; Monreal-Gómez *et al.*, 1999; Merino y Monreal-Gómez, 2004). Las zonas de surgencias representan el 0.1% de la superficie de los océanos y aportan aproximadamente el 50% del total de peces que se explotan (Ryther, 1969).

Las surgencias costeras típicas de mares marginales son el resultado de procesos de interacción océano-atmósfera (Goni *et al.*, 2006) y tienen periodos de relajamiento que duran desde unos cuantos días hasta tres semanas (Bakun y Nelson, 1977) e impactan en aspectos físicos, biológicos y en las condiciones atmosféricas locales, con consecuencias importantes en el ámbito pesquero y económico (Monreal-Gómez *et al.*, 1999). En las zonas de surgencia el agua superficial que se desplaza hacia el mar, es sustituida por agua fría subsuperficial, que asciende desde los 100-200 m de profundidad, dotando de nutrientes a la capa superficial (Monreal-Gómez *et al.*, 1999; Zaytsev *et al.*, 2003).

Dentro de las características más importantes del agua que aflora se encuentra una cantidad considerable de nutrientes como fosfatos y nitratos, bajo contenido de oxígeno, bajas temperaturas; y generalmente se promueve la producción de fitoplancton (Cervantes-Duarte *et al.*, 1993; Monreal-Gómez *et al.*, 1999; Bakun *et al.*, 2015) y se mantiene una gran variedad de organismos desde plancton y sardinas (Lluch-Cota, 1999) hasta mamíferos marinos y aves (Zaytsev *et al.*, 2003).

En un principio el estudio de las surgencias costeras se hacía por medio de la observación de parámetros hidrográficos, después se introdujeron otras técnicas tales como modelación numérica e imágenes satelitales que son capaces de dar

información detallada de la distribución de la temperatura superficial y la concentración de clorofila-*a* (Monreal-Gómez *et al.*, 1999).

Los vientos del sureste con magnitudes que llegan a 5 m s^{-1} , producen lluvias debido a que llevan aire tropical cálido y húmedo al golfo, mientras que durante el resto del año los vientos soplan del noroeste con mayor intensidad la cual alcanza hasta 12 m s^{-1} , llevando aire frío y seco sobre el norte del golfo (Paden *et al.*, 1991; Fernández-Barajas *et al.*, 1994).

Se ha mencionado que los vientos son del noroeste en otoño, invierno y primavera. Sin embargo, también se sabe que el campo de vientos en el Golfo de California, es de tipo monzónico. Debido a que se ha reportado que el campo de viento durante invierno-primavera, son intensos y del noroeste e inducen intensas surgencias en la costa del lado continental, mientras que durante verano principalmente, cuando los vientos son del sureste, se producen surgencias más débiles en la costa del lado peninsular (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1999; Lavín y Marinone, 2003; Lara-Lara *et al.*, 2008).

En el verano las surgencias se presentan del lado peninsular y son débiles o incluso están ausentes debido, por un lado, a los vientos débiles del sureste que provocan que la termoclina se encuentre a mayor profundidad y a que las corrientes superficiales son en sentido contrario al viento (Lluch-Cota, 1999), lo cual puede inhibir la surgencia.

El Agua Superficial del Pacífico Tropical Oriental, cálida y oligotrófica, en el verano entra al golfo llegando hasta las islas Ángel de la Guarda y Tiburón. En invierno esta masa de agua sólo llega hasta la boca del golfo (Álvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979; Guevara-Aguirre y Gallo-Reynoso, 2015) y como consecuencia se produce un efecto en el fitoplancton similar al que ocurre en las costas peruanas cuando se presenta el fenómeno de El Niño, reduciendo notablemente la distribución de organismos de aguas frías y de baja salinidad y, aumentando la abundancia de organismos de aguas cálidas y salinas, como lo mencionan Ochoa *et al.* (1985).

La intensidad de la surgencia se puede analizar mediante el valor del índice de Bakun propuesto por Bakun y Nelson en 1977 el cual está definido como la razón entre el esfuerzo de viento (τ) paralelo a la costa y la vorticidad planetaria (f), lo que resulta en el transporte perpendicular a la costa.

I.1.3. Vórtices oceánicos

Dependiendo de la dirección de rotación de los vórtices y si éstos presentan centros de alta o baja presión, se pueden definir como anticiclónicos o ciclónicos respectivamente; en otras palabras, el movimiento alrededor de un área de baja presión se denomina giro ciclónico en donde la dirección de la corriente va en sentido opuesto a las manecillas del reloj en el hemisferio norte y viceversa en el hemisferio sur; por otra parte, si se encuentra rodeando un área de alta presión se considera un vórtice anticiclónico con la corriente en sentido de las manecillas del reloj en el hemisferio norte y al contrario en el hemisferio sur (Merino y Monreal-Gómez, 2004).

En los vórtices ciclónicos la dinámica es tal que, en su centro, en la superficie, existe divergencia del agua, lo que provoca un ascenso de la termoclina y nutriclina, generando un afloramiento de nutrientes a la capa superficial, por lo que se les conoce como vórtices fríos y ricos. En estos vórtices se ha observado una distribución diferencial del fitoplancton; en el centro del giro dominan los dinoflagelados, mientras que en su periferia en donde hay mezcla y presencia de silicatos, dominan las diatomeas (Coria-Monter *et al.*, 2014). Por otra parte, los vórtices anticiclónicos se caracterizan por presentar un centro cálido con bajo contenido de nutrientes debido a que, al presentarse convergencia de agua hacia su centro en la superficie y por consiguiente hundimiento de agua, se genera una gruesa capa superficial que es pobre en nutrientes como nitratos y en clorofila-*a*, por lo tanto, la productividad primaria es baja y las aguas en estos giros son oligotróficas (Merino y Monreal-Gómez, 2004).

Otro aspecto fundamental en el cual intervienen los vórtices, es el transporte de energía interna en el océano (transporte de calor para algunos científicos), de esta manera se logra una heterogeneidad horizontal en el transporte de nutrientes entre la costa y las zonas profundas; por lo tanto, en la distribución de fitoplancton y zooplancton (Salas-de-León *et al.*, 2011).

I.1.4. Frentes

La zona frontal se encuentra donde masas de agua con diferentes propiedades convergen, en estas regiones se producen intensos gradientes horizontales de propiedades como puede ser: densidad, temperatura, velocidad, salinidad, nutrientes y clorofila (Merino y Monreal-Gómez, 2004). Existen varias causas por las que se pueden formar frentes, dentro de los cuales se encuentran los inducidos por marea, los frentes por surgencias y los frentes por descarga de ríos. Estos últimos son generalmente frentes halinos, mientras que los frentes por surgencias son térmicos o termohalinos. En el caso de los frentes de marea estos son efímeros ya que duran aproximadamente seis horas, pues las componentes de la marea semidiurna tiene un periodo de aproximadamente 12 horas (Merino y Monreal-Gómez, 2004). Estos mecanismos físicos promueven el transporte de plancton (Merino y Monreal-Gómez, 2004) y conjuntamente con ríos, lagunas costeras y regiones de afloramientos o surgencias, tienen un alto impacto biológico generando zonas de elevada producción biológica (Baumgartner *et al.*, 2001; Connor *et al.*, 2000; Lluch-Belda *et al.*, 2000; Bakun, 1996).

I.1.5. Dinámica oceánica relacionada con fenómenos El Niño y La Niña

El ENOS (El Niño Oscilación del Sur) como se le conoce a este fenómeno, es una variación interanual del sistema océano-atmósfera que se manifiesta en dos fases: El Niño y La Niña. Cuando el sistema de vientos alisios se debilita se presenta una corriente cálida hacia las costas de América, provocando el hundimiento de la termoclina y el aumento en el nivel del mar en el Pacífico Tropical Oriental este fenómeno es conocido como El Niño, el cual es recurrente en intervalos de 4 a 7 años (Monreal-Gómez *et al.*, 1999). La segunda fase se presenta cuando los vientos alisios se intensifican y se incrementa la corriente cálida hacia el Pacífico Occidental en la región ecuatorial, produciendo el levantamiento en la termoclina en la costa de América, a esta fase fría se le conoce como La Niña (Pérez-Arvizu *et al.*, 2013).

Como se mencionó anteriormente, en estos casos se altera la circulación global del viento sobre todo el Pacífico, afectando a las zonas de surgencia (Zaytsev *et al.*, 2003). En la región de la Corriente de California durante El Niño, disminuyen los eventos de surgencias de aguas ricas en nutrientes y concentraciones elevadas de clorofila en las capas superficiales, así como, el impacto que tiene sobre la biomasa fitoplanctónica y las pesquerías (Chávez *et al.*, 2002) reduciendo el crecimiento, reproducción y supervivencia del zooplancton y diversos peces, además de algunas aves marinas (Tershy *et al.*, 1991).

De acuerdo con Ochoa *et al.* (1985), algunos organismos fitoplanctónicos pueden ser considerados como indicadores biológicos ya que son sensibles a los cambios de temperatura y salinidad, estos organismos presentan cambios en sus poblaciones mucho antes de que las anomalías térmicas puedan manifestarse claramente y es una muestra clara de que no necesariamente cuando se presenta el fenómeno de El Niño debe disminuir la concentración de organismos planctónicos de una región. En este caso, los dinoflagelados son buenos indicadores de los movimientos de las masas de agua y con ello se puede hacer una detección temprana de El Niño.

I.1.6. Imágenes satelitales

Una herramienta importante en el estudio de diversos procesos que se presentan en las capas superficiales del océano a diferentes escalas espacio-temporales, es la percepción remota mediante imágenes satelitales, en el caso de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) que se registra a partir de dichas imágenes proporcionan un diagnóstico de los posibles procesos dinámicos que estén ocurriendo (Soto-Mardones *et al.*, 1999). Se han llevado a cabo diferentes modelos desarrollados usando imágenes de satélites, en donde se muestran buenos resultados en el monitoreo de la producción primaria neta de fitoplancton (Behrenfeld y Falkowski, 1997), otros autores como Álvarez-Borrego y Lara-Lara (1991) mencionan que por medio de imágenes satelitales es posible distinguir altas concentraciones de pigmentos asociados a bajas temperaturas, mientras que en presencia de aguas cálidas se ha observado lo contrario. Las imágenes satelitales también pueden mostrar el efecto que tiene El Niño Oscilación del Sur (ENOS) sobre la distribución de Temperatura Superficial del Mar (Aguirre-Gómez *et al.*, 2003).

Las imágenes satelitales son muy utilizadas para evaluar las surgencias, ya que, a partir de esta información se pueden observar los cambios en la temperatura superficial del mar (TSM) y en la distribución de la concentración de clorofila-*a*, con lo cual se pueden identificar estructuras oceanográficas como surgencias, vórtices y frentes (Badan-Dangon *et al.*, 1984; Lluch-Cota, 1999; Soto-Mardones *et al.*, 1999; Aguirre-Gómez *et al.*, 2001).

I.2. ANTECEDENTES

En el Golfo de California se han observado o simulado mediante modelos numéricos, diferentes vórtices. Los asociados al esfuerzo del viento, presentes en la región norte del golfo con vientos del sureste, son vórtices ciclónicos, mientras que con vientos del noroeste se presentan vórtices anticiclónicos (Marinone, 1997), este último se ha reportado en invierno gracias a observaciones hidrográficas y mediciones directas (Makarov y Jiménez-Illescas, 2003). En la región sur del Golfo de California se simuló la circulación obteniendo un flujo de entrada y otro de salida que se intensifica a lo largo de las costas con presencia de vórtices anticiclónicos en invierno y ciclónicos en verano (Beier, 1997). En dicha región también se ha reportado un sistema de tres vórtices alternados (Fernández-Barajas *et al.*, 1994).

En cuanto a las mareas, el Golfo de California en su zona norte, presenta una gran mezcla debido a que la onda de marea al irse propagando hacia el norte va incrementando su amplitud de la boca hacia la cabeza, alrededor de la anfidromía virtual, esto por el efecto del cambio en la batimetría en torno al archipiélago (Salas-de-León *et al.*, 2003).

El Golfo de California experimenta un cambio evidente en la productividad primaria durante el fenómeno de El Niño, debido a que se introduce Agua Superficial Tropical ocasionando que la mezcla vertical se debilite debido a una mayor estratificación dejando efectos negativos en muchos ecosistemas marinos (Kahru *et al.*, 2004). Por ejemplo, en verano se detiene la mezcla vertical y se reduce la actividad de las surgencias sobre la plataforma continental occidental de Norteamérica, por lo tanto, el suministro de nutrientes disminuye considerablemente (Zaytsev *et al.*, 2003; Kahru *et al.*, 2004).

Las investigaciones realizadas en el Golfo de California han contribuido a explicar los cambios climáticos y atmosféricos de la región a escalas estacionales, anuales e interanuales, dichos cambios tienen un impacto significativo en los ecosistemas marinos e incluso desde el punto de vista económico ya que en el golfo

existe un buen número de pesquerías, las cuales son afectadas por esos cambios. Los cambios estacional e interanual de la concentración de clorofila-*a* en el Golfo de California, utilizando imágenes del Coastal Zone Color Scanner (CZCS por sus siglas en inglés), evidenció la variación estacional con mayores concentraciones ($>10 \text{ mg m}^{-3}$ próximo a la costa peninsular) durante invierno, mientras que, el mínimo se presentó durante verano (Santamaría del Ángel *et al.*, 1994). Durante invierno y primavera las zonas de surgencias en el golfo, con alta productividad primaria, son muy importantes para algunos mamíferos marinos, en especial para los delfines de la especie *Tursiops truncatus* (Guevara-Aguirre y Gallo-Reynoso, 2015).

Zuria-Jordan *et al.* (1995) utilizando datos de concentración de clorofila-*a* obtenidos mediante Coastal Zone Color Scanner (CZCS), pudieron detectar las variaciones en el fitoplancton frente a las costas del sur de Baja California. Las mayores concentraciones de pigmentos se encontraron próximas a la costa debido a procesos de surgencias y fisiografía local.

En un estudio realizado por Kahru *et al.* (2004) en el Golfo de California utilizando series de tiempo de clorofila-*a* de 1997 a 2003, obtenidos de datos satelitales de los sensores OCTS, SeaWiFS, MODIS, AVHRR y VGPM, encontraron que la variabilidad de la clorofila-*a* estuvo marcada por un ciclo anual que fue el dominante en todo el golfo, exceptuando la zona de las grandes islas en donde predominó un ciclo semianual. Además, observaron que durante este ciclo las mayores concentraciones de clorofila-*a* se encontraron durante la primavera. En cuanto a la variabilidad interanual se observó que durante el evento de El Niño de 1997-1998 disminuyó la productividad primaria neta (NPP por sus siglas en inglés) en aproximadamente 30-40% en el sur del golfo.

Por otra parte, con respecto a la productividad primaria, Guevara-Aguirre y Gallo-Reynoso (2015) en un estudio en diferentes épocas de los años 2012 y 2013 en la región de Guaymas, observaron que la presencia de mamíferos marinos como los delfines de la especie *Tursiops truncatus*, estuvo relacionada con el proceso de surgencias, que genera gran cantidad de nutrientes, el cual favorece la producción del plancton en la región. Estos autores mencionan que la presencia de dichos

mamíferos marinos fue mayor durante invierno-primavera y decreció en verano debido a que los vientos provenientes del sureste provocan que agua cálida del Pacífico Tropical entre al golfo, provocando una estratificación mayor en la columna de agua y, por consiguiente, aguas pobres en nutrientes.

En la zona sur del Golfo de California de un estudio *in situ*, se mostró que la clorofila-*a* en primavera, presentó valores de 0.287 mg m^{-3} , mientras que en otoño los valores fueron de 0.188 mg m^{-3} (Caballero-García *et al.*, 2013).

Motivación

Existen diversos procesos físicos de mesoescala que favorecen la distribución y concentración de Clorofila-*a* en los océanos, como son: las surgencias, vórtices, frentes, mezcla por marea, además de los fenómenos globales como El Niño y La Niña. El propósito de esta tesis es identificar a través de imágenes de satélite y datos históricos de viento, los procesos físicos de mesoescala que favorecen la distribución de Clorofila-*a* en el Golfo de California.

Objetivo general

Determinar la variación espacio-temporal de la temperatura superficial del mar y de las concentraciones de Clorofila-*a* dentro del Golfo de California, durante el periodo 2009-2010 (año Niño) 2010-2011 (año Niña) y 2013 (año neutro) por medio de imágenes satelitales y datos históricos, para identificar los procesos físicos de mesoescala presentes en la zona.

Objetivos específicos

Reconocer las variaciones en las concentraciones de Clorofila-*a* y los cambios en la temperatura superficial del mar haciendo uso de imágenes satelitales.

Identificar los procesos físicos que se relacionan con la concentración de Clorofila-*a* y la distribución de temperatura en superficie del Golfo de California.

Identificar la presencia de surgencias, tanto en la costa continental, como en la costa peninsular en el golfo.

Diferenciar los cambios interanuales en la concentración de Clorofila-*a* y de Temperatura Superficial del Mar dentro del Golfo de California debido a la presencia de fenómenos meteorológicos como El Niño y La Niña.

I.3. ÁREA DE ESTUDIO

El Golfo de California es un mar marginal estrecho y alargado localizado en el Pacífico Oriental subtropical (Figura 1.1a), es una cuenca evaporativa (Roden, 1958; Zeitzschel, 1969; Lluch-Cota, 1999; Soto-Mardones *et al.*, 1999; Jiménez *et al.*, 2005), con 1100 km de largo y 200 km de ancho aproximadamente (Badan-Dangon *et al.*, 1984; Fernández-Barajas *et al.*, 1994). El golfo presenta características oceanográficas que lo hacen único entre los mares semi-cerrados de dimensiones y latitudes similares, éste presenta fuerte mezcla por marea, que incluso puede romper la estratificación profunda.

El golfo es afectado por una gran cantidad de señales (mareas, ondas sub-inerciales, El Niño y La Niña) que llegan del Océano Pacífico por lo que, tanto su dinámica estacional como su estructura termodinámica es gobernada por el Pacífico (Lavín y Marinone, 2003). En el golfo se llevan a cabo varias pesquerías de importancia comercial por lo que es necesario conocer los procesos hidrodinámicos o estructuras físicas que favorecen la productividad biológica para entender mejor el comportamiento de dichas pesquerías.

La batimetría presenta diferencias muy marcadas: el Alto Golfo que es una cuenca evaporativa con fuerte mezcla por mareas es somero (<30 m); el Norte del Golfo ubicado a una latitud de 30°N presenta una profundidad de 100 a 200 metros (Lavín y Marinone, 2003); en el archipiélago en la zona en donde se encuentran las grandes islas: Ángel de la Guarda, San Esteban, San Lorenzo e Isla Tiburón, se presentan profundidades entre 200 y 500 m y en el sur del golfo se tienen profundidades que van de 2000 a 3200 m (Salas-de-León *et al.*, 2011).

Dentro del Golfo de California la circulación atmosférica es una consecuencia de los cambios en los centros de alta y baja presión y del efecto que tienen las cadenas montañosas sobre el golfo, resultando en vientos entre 8 y 12 m s⁻¹ provenientes del noroeste durante otoño, invierno y primavera, mientras que en verano éstos provienen del sureste con rapidez promedio de 5 m s⁻¹ (Zeitzschel, 1969; Lavín y Marinone, 2003; Pérez-Arvizu *et al.*, 2013). Por lo tanto, en época de invierno que se caracteriza por un centro de alta presión en el Pacífico y otro de baja sobre el continente (Lluch-Cota, 1999) e inicios de primavera (Lavín y Marinone, 2003), se llevan a cabo intensos procesos de surgencia del lado continental, con altos índices de nutrientes en el golfo debido al bombeo de agua hacia la capa eufótica, mientras que en verano el campo de presión provoca que la dirección del viento cambie, viniendo del sureste, acarreando aguas cálidas ~29°C (Paden, 1991; Pérez-Arvizu *et al.*, 2013).

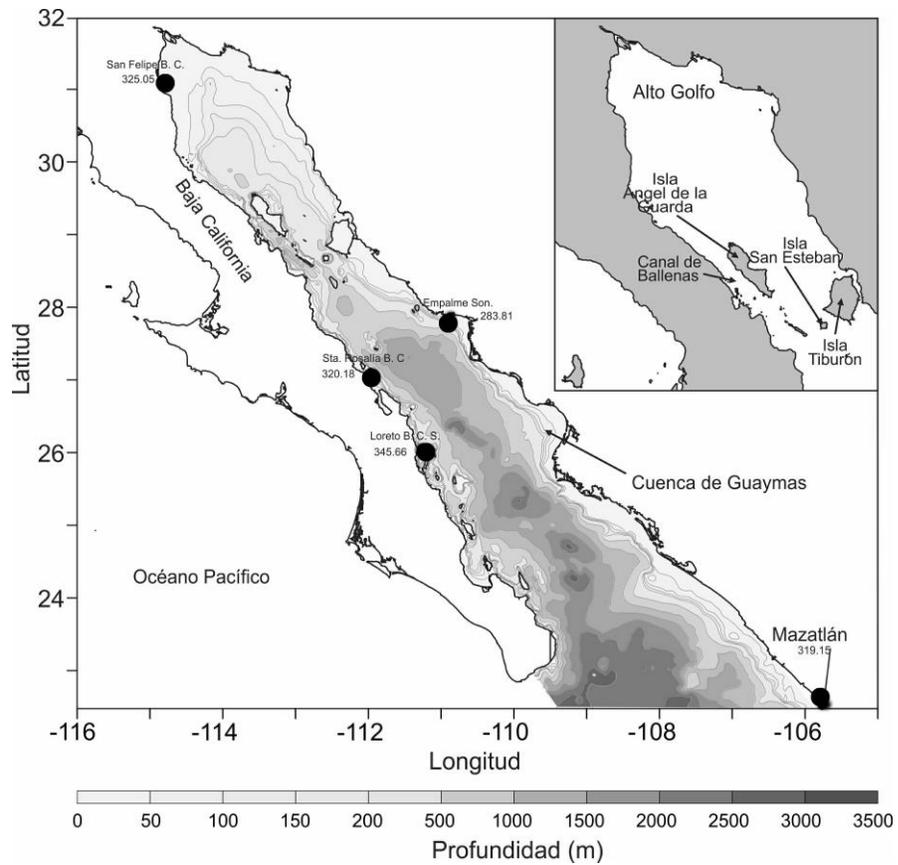


Figura 1.1a. Localización y batimetría del Golfo de California, los puntos negros representan las estaciones meteorológicas (ESIME) utilizadas en el análisis del campo de vientos (modificado de Salas-de-León *et al.*, 2011).

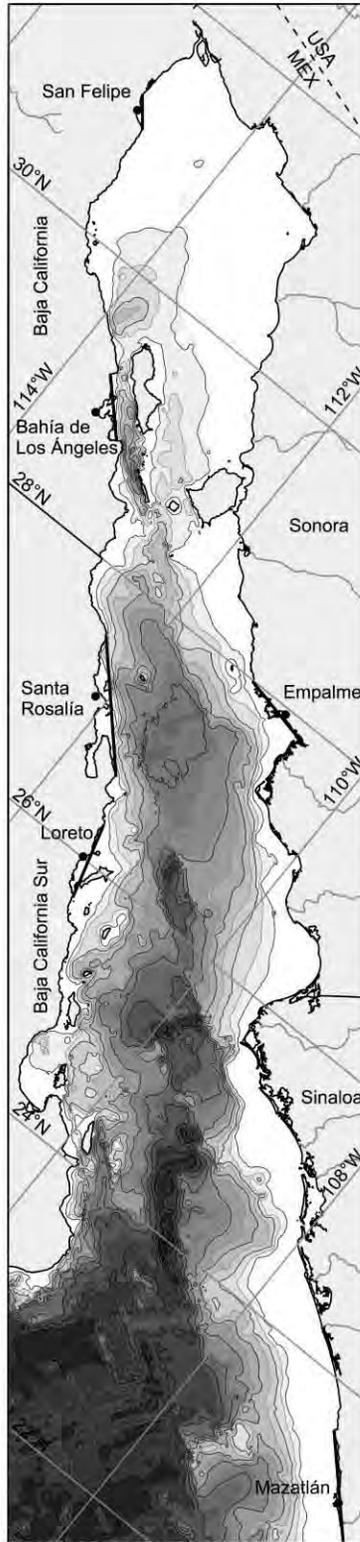


Figura 1.1b. Inclinación de la línea de costa respecto al norte magnético, en las cinco localidades de las ESIME's.

De acuerdo a los antecedentes de la zona, se han reportado dos patrones del viento en el Golfo de California, en primer lugar se ha argumentado que existe una marcada estacionalidad en la dirección e intensidad del viento, diferenciando dos épocas contrastantes: invierno-primavera (vientos del noroeste, con máximas intensidades de 12 m s^{-1}) y verano-otoño (vientos del sureste, con máximas intensidades de 5 m s^{-1}) (Molina-Cruz, 1986; Lluich-Cota, 1999; Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1999; Lavín y Marinone, 2003; Lara-Lara *et al.*, 2008; Pérez-Cruz 2013; Guevara-Aguirre y Gallo-Reynoso, 2015). Por otro lado, se ha mencionado que durante otoño, invierno y primavera los vientos provienen del noroeste y que durante el verano estos provienen del sureste con intensidades que alcanzan solo 5 m s^{-1} (Merrifield y Winant, 1989; Badan-Dangon *et al.*, 1991). En este trabajo se investigó el comportamiento de los vientos en cada una de las épocas, así como, las diferencias en un año neutro, un evento donde se presentó el fenómeno El Niño y otro evento La Niña.

CAPITULO II

MÉTODOS Y MATERIALES

Para la elaboración de esta investigación se obtuvieron y analizaron datos sinópticos de velocidad del viento, los cuales se obtuvieron del Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PODAAC)¹, con el fin de obtener los patrones de viento a lo largo del Golfo de California además de imágenes satelitales, tanto de Temperatura Superficial del Mar (TSM) como de concentración de Clorofila-*a*. Además, se analizaron datos de velocidad del viento provenientes de Estaciones Sinópticas Meteorológicas (ESIME) del Servicio Meteorológico Nacional, en cinco sitios: San Felipe B.C., Santa Rosalia, Loreto en B.C.S., Empalme, Son. y Mazatlán Sin. (Fig. 1.1a). Los datos de las componentes de la velocidad del viento, además de utilizarlos para analizar la dirección e intensidad del viento, se utilizaron para calcular el Índice de Surgencia propuesto por Bakun (1977). Por otro lado se usó el Índice de la Oscilación del Sur (SOI) para relacionar los cambios en la temperatura superficial del mar y las concentraciones de Chl-*a* con los eventos de El Niño (2009-2010), La Niña (2010-2011) y un año normal o neutro (2013). Esto con el fin de determinar si se presentaron surgencias de uno u otro lado del Golfo de California, así como, diferenciar los cambios interanuales debido a la presencia de El Niño o La Niña.

¹http://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/CCMP_MEASURES_ATLAS_L4_OW_L3_0_WIND_VECTORS_FLK

2.1. IMÁGENES DE SATELITE

2.1.1. Imágenes de Clorofila-a (Chl-a)

Las imágenes de color que se analizaron son composiciones mensuales para cada año, es decir, del año 2009 al 2011 y 2013, las imágenes se obtuvieron de la página Web OceanColor WEB² con una resolución espacial de 4 km, del sensor satelital Aqua MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (Hu *et al.*, 2012) que usa el algoritmo OCx (O'Reilly *et al.*, 2000). Dichas imágenes ofrecen una estimación de la cantidad de Clorofila-a en mg m^{-3} dentro del Golfo de California a lo largo del año. Con lo anterior se obtuvieron las concentraciones de Chl-a en las diferentes épocas del año y de esa manera se pudieron comparar las concentraciones en primavera, verano, otoño e invierno, para analizar si se comportan solo como dos épocas características: invierno-primavera y verano-otoño, o si tienen una variabilidad diferente.

Una vez que se contó con las imágenes mensuales de Clorofila-a, utilizando el programa Surfer 13, se mostró la zona del Golfo de California que abarca desde las latitudes 23 a 32°N para posteriormente llevar a cabo el análisis de las imágenes que se describirán más adelante.

2.1.2. Imágenes de Temperatura Superficial del Mar

Las imágenes de temperatura superficial del mar consisten en una composición mensual obtenidas del sitio web <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov> mediante el sensor satelital Aqua MODIS (11 M daytime) con una resolución espacial de 4 km, comprendiendo el intervalo entre el año 2009 al 2011 y el año 2013. Al igual que

²<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>

para las imágenes de concentración de clorofila-a, se utilizó el paquete Surfer 13 para recortar la zona de estudio, que en este caso fue el Golfo de California.

2.2. DATOS METEOROLOGICOS

2.2.1. Imágenes de patrones de viento

Las imágenes de viento obtenidas de PODAAC muestran el campo de viento con valores normales mensuales desde el año de 1987 hasta 2011 ya que sólo la base de datos de dicho sitio web contiene datos hasta el 2011, con una resolución espacial de 0.25° de latitud por 0.25° de longitud y con una resolución temporal de seis horas. El uso de dichas imágenes permitió distinguir de manera clara la dirección del viento y así, tener una referencia de la temporalidad en la cual ocurren las surgencias en el Golfo de California (Fig. 2.1).

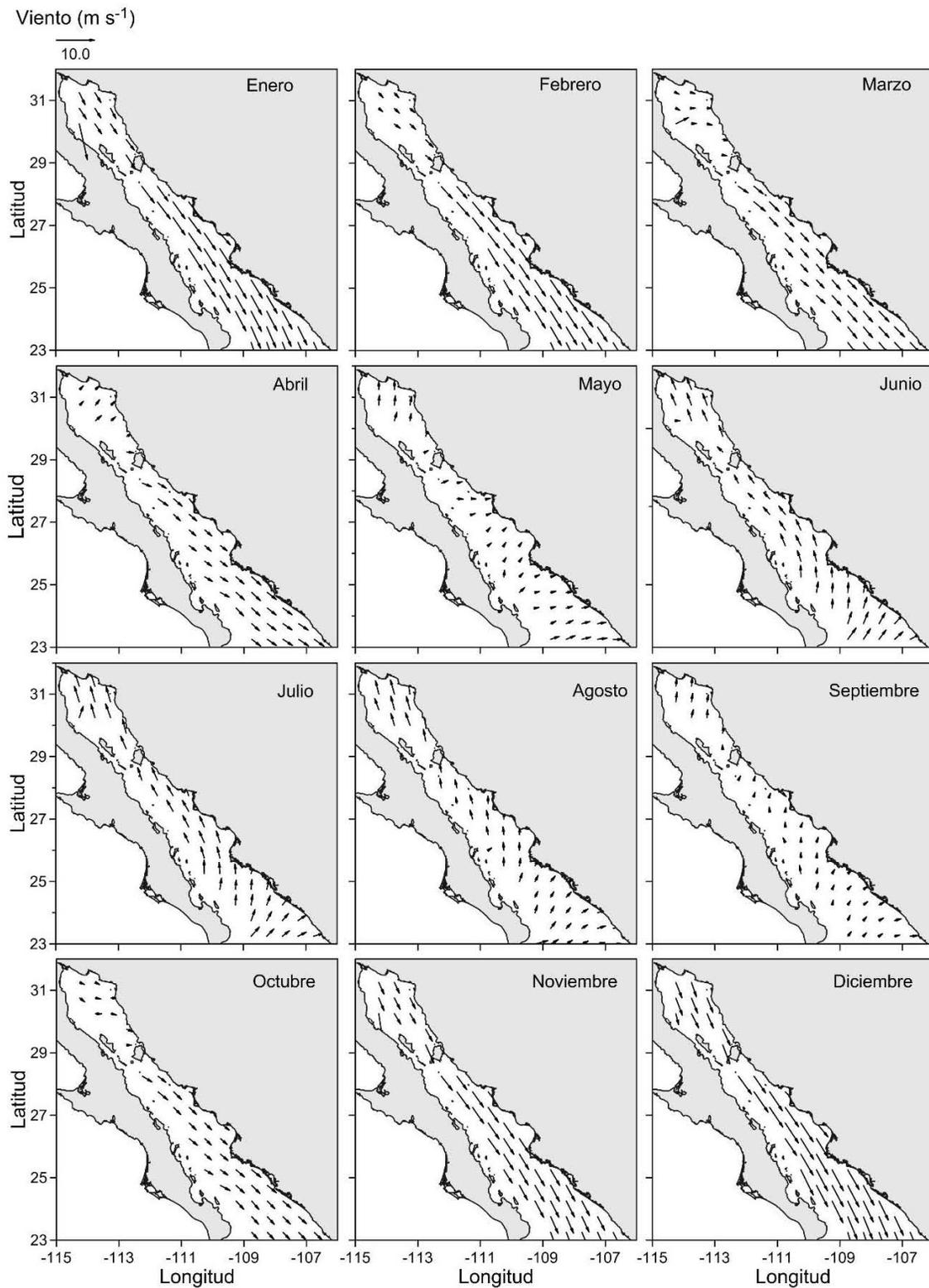


Figura 2.1. Campo de la velocidad y dirección del viento (m s^{-1}) en el Golfo de California.

2.2.2. Datos de estaciones sinópticas meteorológicas

Las Estaciones Sinópticas Meteorológicas (ESIME)³ son un grupo de equipos que llevan a cabo mediciones de diferentes variables meteorológicas automáticamente, construyendo una base de datos y mensajes cada tres horas que funcionan con el Tiempo Universal Coordinado (UTC), este tipo de equipos se encuentran ubicados solo en los observatorios meteorológicos.

En este estudio se utilizaron ESIME's de cinco localidades a lo largo del Golfo de California tanto del lado continental como del lado peninsular, para analizar si en realidad de un lado se presentan surgencias más intensas (otoño, invierno y primavera) que del otro lado (verano), respectivamente.

Las ESIME utilizadas fueron San Felipe en el Alto Golfo con un ángulo de inclinación de 325.05° con respecto al norte magnético, Santa Rosalía en el centro del golfo (320.18°) y Loreto en el sur (345.66°), estas tres estaciones del lado peninsular. Del lado continental se usaron datos de las estaciones Empalme, Sonora (283.81°) en el centro y Mazatlán, Sinaloa (319.15°) en la boca del golfo (Figura 1.1b). Los datos proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional para las estaciones de Loreto y San Felipe contemplan los años completos de estudio (2009-2011 y 2013) mientras que, para Empalme, Santa Rosalía y Mazatlán solo se contó con datos del año neutro 2013.

Utilizando las componentes de la velocidad diaria del viento, se realizaron diagramas de estacas con el fin de esquematizar la dirección y magnitud del viento a lo largo de los años de estudio, para finalmente determinar si los vientos se comportan en forma estacional como lo proponen algunos autores, es decir, siendo los vientos del noroeste durante otoño, invierno y primavera y del sureste durante verano (Merrifield y Winant, 1989; Badan-Dangon *et al.*, 1991), o si en realidad existe una variabilidad de invierno-primavera y verano-otoño (Molina-Cruz, 1986;

³<http://smn.cna.gob.mx>. 2016.

Lluch-Cota, 1999; Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1999; Lavín y Marinone, 2003; Lara-Lara *et al.*, 2008; Guevara-Aguirre y Gallo-Reynoso, 2015).

2.3. INDICE DE BAKUN

Las estaciones meteorológicas cuentan con mediciones cada 10 minutos de la velocidad del viento \vec{W} y se obtuvieron sus respectivas componentes: W_x viento perpendicular a la costa y W_y (viento paralelo a la costa). Se analizó la velocidad del viento debido a que es un mecanismo fundamental para las surgencias costeras de la región, se analizó también, el transporte perpendicular de Ekman obtenido a partir del Índice de Surgencia de Bakun (ISB) (Schwing *et al.*, 1996).

Se obtuvo un promedio mensual de los datos para después obtener el Índice de Bakun, el cual estima el transporte de Ekman a lo largo de 100 m de costa, con unidades de $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \times 100 \text{ m}$. La forma de obtener el índice Bakun está dada por (Bakun, 1977):

$$\text{ISB} = \frac{\tau}{\rho f} 100$$

Donde τ es la componente del esfuerzo del viento, ρ ($= 1025 \text{ kg m}^{-3}$) es la densidad promedio del agua en la capa superficial, f es el parámetro de Coriolis dado como (Schwing *et al.*, 1996):

$$f = 2\Omega \sin\phi$$

Donde ϕ es la latitud y Ω es la velocidad angular de la Tierra, es decir; $\Omega = \frac{2\pi}{T}$; donde $T = 86400$ s. (un día en segundos). \rightarrow_{τ} el esfuerzo de viento a lo largo de la costa (positivo cuando la dirección el viento se dirige hacia el ecuador). El vector esfuerzo de viento se puede obtener a partir de la siguiente fórmula (Bakun y Nelson, 1977; Schwing *et. al.*, 1996):

$$\rightarrow_{\tau} = \rho_a C_D |\vec{w}| \vec{w}$$

Donde:

\rightarrow_{τ} Es el vector del esfuerzo del viento.

ρ_a Es la densidad del aire la cual se considera constante con valor de 1.22 kg m^{-3} .

$|\vec{w}|$ Es la magnitud de la velocidad del viento.

\vec{w} Es el Vector velocidad del viento.

C_D es el coeficiente de arrastre (adimensional) que tiene diversos valores dependiendo de la intensidad del viento (Large y Pond, 1981; Trenberth *et al.*, 1990):

$$C_D \times 10^3 = \begin{cases} 2.18 & \text{para } W < 1 \text{ m s}^{-1} \\ 0.62 + \frac{1.56}{W} & \text{para } 1 \text{ m s}^{-1} \leq W < 3 \text{ m s}^{-1} \\ 1.14 & \text{para } 3 \text{ m s}^{-1} \leq W < 10 \text{ m s}^{-1} \\ 0.49 + 0.065 W & \text{para } W \geq 10 \text{ m s}^{-1} \end{cases}$$

2.4. INDICE DE OSCILACIÓN DEL SUR

El Índice de Oscilación del Sur (SOI, por sus siglas en inglés) se utilizó para comparar los años en que se presentaba el fenómeno de El Niño y de La Niña. El ENSO presenta una fase oceánica (El Niño y La Niña) y una componente atmosférica que va a ser estimada con el SOI, la manera en la que se calcula dicho índice es por medio de la diferencia de presión entre Darwin (Australia) que normalmente presenta presión baja y Tahití (Polinesia Francesa), con altas presiones (Capel-Molina, 1999; Cerano-Paredes *et al.*, 2011).

Este tipo de cambios en la presión de ambas regiones; son recurrentes cada dos o cuatro años, se conoce como Oscilación del Sur y la diferencia entre la presión de ambas regiones se conoce como Índice de Oscilación del Sur (Fein Y Stephens, 1987).

Se utilizaron como referencia las gráficas obtenidas de la página web del National Centers for Environmental Information de la NOAA⁴ donde se marcan por años los eventos El Niño y La Niña que han existido, siendo los valores negativos (rojos) los pertenecientes al fenómeno de El Niño y los valores positivos (azules) a La Niña (Fig. 2.2). Una vez teniendo esta referencia se llevó a cabo una comparación entre el SOI y las temperaturas que se presentaron dentro del Golfo de California para 2009-2010 (año El Niño), 2010-2011 (año La Niña) y 2013 que fue un año normal o neutro.

La manera en la que se realiza el cálculo del Índice de Oscilación del Sur de acuerdo al National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) es el siguiente:

$$SOI = \frac{Presion\ Estandarizada\ en\ Tahití - Presion\ Estandarizada\ en\ Darwin}{MSD}$$

⁴<https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/soi>

Donde MSD significa Desviación Estándar Mensual

$$\text{Presion Estandarizada en Tahití} = \frac{\text{SLP actual de Tahití} - \text{media SLP de Tahití}}{\text{Desviación Estandard de Tahití}}$$

Con:

$$\text{Desviación estándar de Tahití} = \sqrt{\frac{\sum [(SLP \text{ actual de Tahití} - \text{media SLP de Tahití})^2]}{N}}$$

N es el número de meses y SLP es la presión atmosférica a nivel del mar (SLP por sus siglas en inglés).

$$\text{Presion Estandarizada en Darwin} = \frac{\text{SLP actual de Darwin} - \text{media SLP de Darwin}}{\text{Desviación Estandard de Darwin}}$$

Donde:

$$\text{Desviación estándar de Darwin} = \sqrt{\frac{\sum [(SLP \text{ actual de Darwin} - \text{media SLP de Darwin})^2]}{N}}$$

$$\text{MSD} = \sqrt{\frac{\sum [(\text{Estandarizada de Tahití} - \text{Estandarizada de Darwin})^2]}{N}}$$

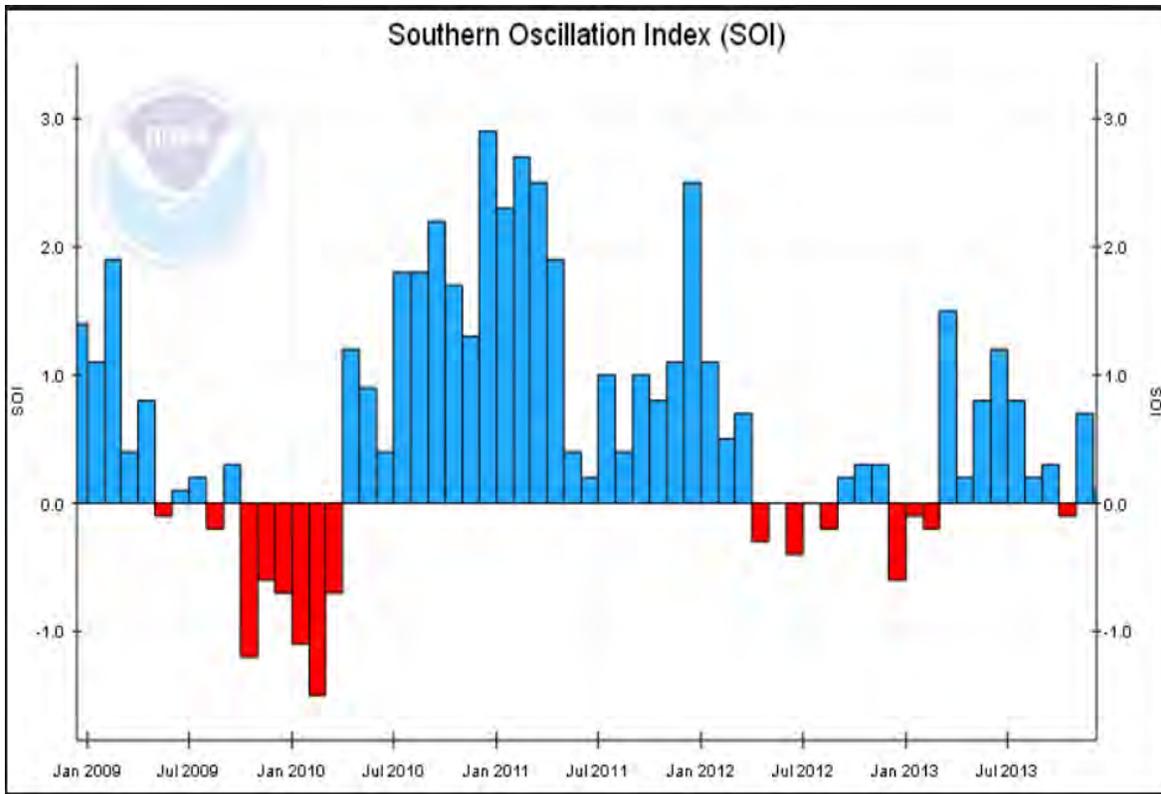


Figura 2.2. Índice de Oscilación del Sur (2009 a 2013) de acuerdo a la NOAA.

De esta manera se contó con información para analizar el impacto de estos fenómenos en las variaciones de la temperatura superficial del mar, en el Golfo de California y su relación con las concentraciones de Clorofila-a.

CAPÍTULO III

RESULTADOS

En este estudio los patrones de viento coincidieron con lo reportado por Merrifield y Winant (1989) y Badan-Dangon *et al.* (1991), por lo cual con el fin de comparar el comportamiento entre los diferentes años, se consideró el mes de enero como el representativo de la época de otoño-invierno-primavera de todos los años de estudio, debido a que se presentaron características de las estructuras físicas muy bien definidas, respecto a los otros meses de esas épocas. Mientras que para la época de verano el mes de julio presentó las estructuras físicas contrastantes con la época anterior (Fig. 3.10).

3.1. VELOCIDAD DEL VIENTO E ÍNDICE DE BAKUN

El análisis de estacas de las series de velocidad de viento en las cinco localidades del Golfo de California mostradas en la Fig. 1.1a, permitió obtener la intensidad y dirección de donde provienen los vientos. Así mismo, se consideró la forma de la costa con el propósito de analizar o tener un punto de vista más objetivo sobre la componente de la velocidad del viento paralelo a la costa, que es la que determina en esta región la presencia de divergencias (afloramientos o surgencias) y convergencias (hundimientos) del agua. Mediante el valor del índice de Bakun se analizaron las épocas y las zonas en la que podrían ocurrir las surgencias, así como, la diferencia entre los años de estudio. Lo anterior se relacionó con la variación en las concentraciones de Clorofila-*a* y los cambios en la temperatura superficial del mar a lo largo del golfo. A continuación, se describen los resultados del análisis de vientos para cada lugar estudiado.

3.1.1. San Felipe

En la estación meteorológica San Felipe durante el año 2009 se tuvieron vientos irregulares con dirección del suroeste en enero, febrero y marzo, mientras que de abril a julio los vientos fueron más frecuentes del noreste, en agosto y septiembre el viento tuvo dirección del sureste, con magnitudes mayores a 5 m s^{-1} (Fig. 3.1a) provocando una ligera surgencia en la región. A fin de año (octubre, noviembre y diciembre) su intensidad se incrementó y su dirección fue del noroeste, con lo anterior y con el valor del índice de Bakun se infiere un hundimiento del agua producido por los vientos en la parte peninsular en el periodo de abril a julio y de octubre a diciembre (Fig. 3.1a), mientras que en agosto y septiembre se presentaron condiciones favorables a la presencia de surgencias.

Durante el año 2010, la serie de datos se interrumpió en los tres primeros meses, en el otoño e invierno la dirección del viento fue predominante del noroeste (Fig.3.1b), provocando hundimientos en la costa peninsular. De acuerdo al índice de Bakun en julio y agosto se esperaba la presencia de surgencias débiles en la costa peninsular con viento del sureste con magnitudes menores a 5 m s^{-1} , de septiembre a diciembre nuevamente la dirección del viento se invirtió y se mostró del noroeste con magnitudes mayores a 5 m s^{-1} , provocando hundimiento de agua en la costa de la Península de Baja California.

En el año 2011 se mostró el comportamiento de vientos intensos ($\sim 12 \text{ m s}^{-1}$) del noroeste en otoño-invierno-primavera, mientras que en verano los vientos fueron muy débiles ($< 5 \text{ m s}^{-1}$) y de dirección sureste (Fig. 3.1c), coincidiendo con la descripción de Merrifield y Winant (1989) y Badan-Dangon *et al.* (1991). En este año se esperarían surgencias en el verano en la costa peninsular y durante el resto del año surgencias más intensas en la costa continental. Por último, la figura (3.1d) perteneciente al año neutro 2013, muestra que la intensidad de los vientos fue muy constante a lo largo del año, con valores más bajos respecto a los años anteriores, en otoño-invierno-primavera los vientos fueron del noroeste que es un viento muy

común en esta época, en verano los vientos soplaron del sureste con menor intensidad que en la época anterior, este año neutro define las características del patrón de viento que domina el Golfo de California con vientos a lo largo de su eje principal. El índice de Bakun refleja valores muy pequeños a lo largo del año, por lo que se intuye que de presentarse las surgencias estas serían muy débiles, tanto de un lado como del otro del golfo.

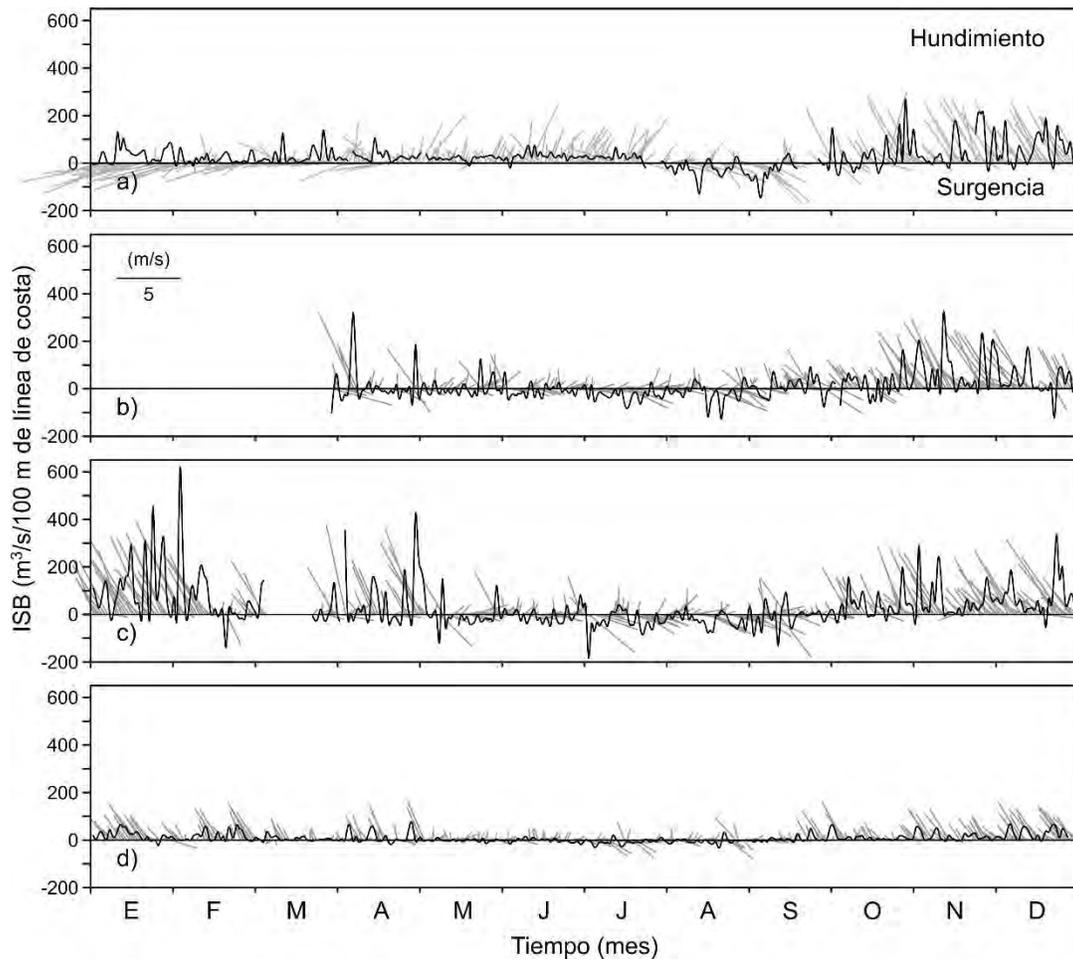


Figura. 3.1. Diagrama de estacas de los vientos e índice de surgencia en San Felipe, B. C., en los años: a) 2009, b) 2010, c) 2011 y d) 2013.

3.1.2 Empalme

Para la localidad de Empalme, Sonora, del lado continental, sólo se contó con datos del año 2013 (SMN). En la figura (3.2) se observa para finales de primavera y verano que los vientos predominantes venían del sur, lo cual, aunque la intensidad fue considerable, de acuerdo a su dirección estos generan hundimientos muy pequeños de agua en la costa continental. En el resto del año se tuvieron vientos del noroeste con mayor intensidad, el índice de surgencias muestra que es factible que se presenten surgencias considerables del lado continental, a inicios de año se tiene un índice de Bakun con mayor intensidad, lo que indica que el transporte de Ekman es mayor.

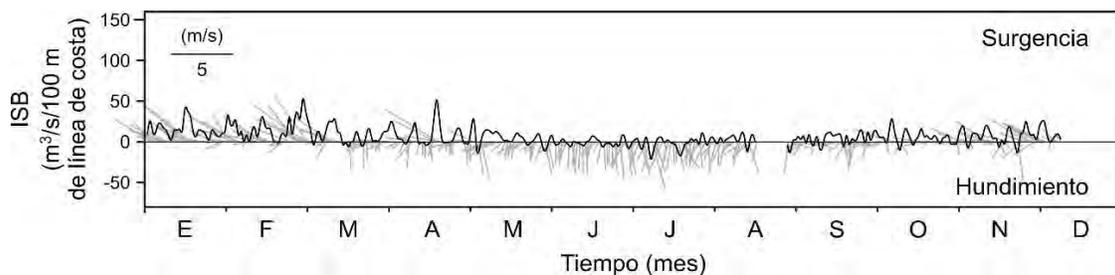


Figura. 3.2. Diagrama de estacas de los vientos e índice de surgencia en Empalme Son., en el año 2013.

3.1.3 Santa Rosalía B. C. S.

En Santa Rosalía se observaron aspectos contrastantes entre los procesos de surgencia y de hundimiento. Cabe resaltar que en esta ESIME también se cuenta sólo con información del año 2013.

En el diagrama de estacas de la velocidad del viento, se observa que de enero a abril se presentaron vientos intensos del noroeste y, por lo tanto, se esperaba la presencia de eventos fuertes de hundimiento del lado peninsular. De mayo a septiembre el viento del sureste provocó surgencias muy débiles (Fig. 3.3). En diciembre se observaron vientos del noroeste y como consecuencia se produjo un hundimiento del lado peninsular.

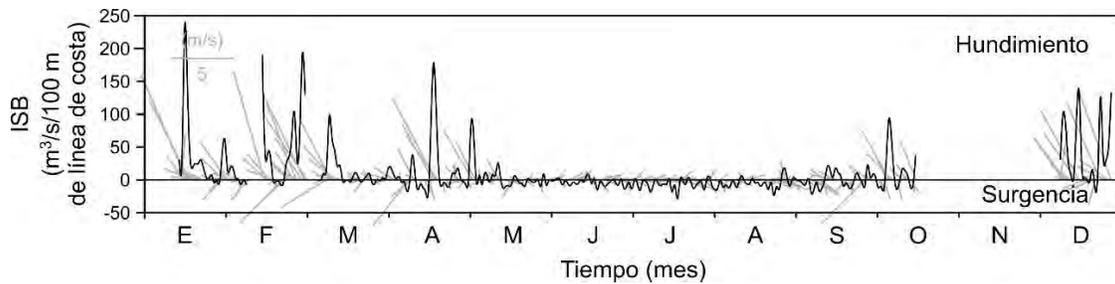


Figura. 3.3. Diagrama de estacas de los vientos e índice de surgencia en Santa Rosalía B. C., en el año 2013.

3.1.4 Loreto B. C. S.

En la estación meteorológica Loreto, B. C. S. se contó con datos para 2009, 2010, 2011 y 2013 los cuales fueron obtenidos de la ESIME, de esta manera se obtuvieron todos los diagramas de estacas y se estimó el índice de Bakun para dichos años.

En todos los años de estudio se observó que los vientos de verano fueron provenientes del sureste, teóricamente deberían ser favorables a la generación de surgencias en el lado peninsular, sin embargo, estos vientos son de poca intensidad y el índice de Bakun es incipiente (Fig. 3.4.). A principios de 2009 los vientos del noroeste fueron muy intensos (Fig. 3.4a), se observó que de enero a abril vientos intensos provenientes del noroeste generaron hundimiento para la zona, sin embargo, en la segunda mitad de marzo y todo abril se observa que la dirección del viento es muy irregular, es decir, en ocasiones los vientos son del suroeste (provocando surgencias) o en ocasiones del noroeste generando hundimientos.

La figura (3.4 b) representa el viento durante el 2010, en ella se puede observar que de la segunda mitad de abril hasta septiembre se presentaron surgencias muy débiles, con vientos provenientes del sureste. Durante el último trimestre del año, los vientos predominantes fueron del noroeste provocando los hundimientos más intensos del año.

En el año 2011, los vientos fueron débiles comparados con el 2009, durante el verano se presentaron vientos muy constantes del sureste y de acuerdo al índice de Bakun (Fig. 3.4c), se debería esperar surgencias débiles, en el resto del año la dirección del viento fue del noroeste indicando hundimientos en la zona.

La figura (3.4d) corresponde al año neutro 2013 y en ella se observa que desde finales de primavera y durante el verano la dirección predominante del viento fue del sureste, como se ha visto en los otros años, este viento debería generar surgencias en la costa peninsular. En el resto del año los vientos se invierten, presentándose del noroeste y se esperaría que causaran hundimientos.

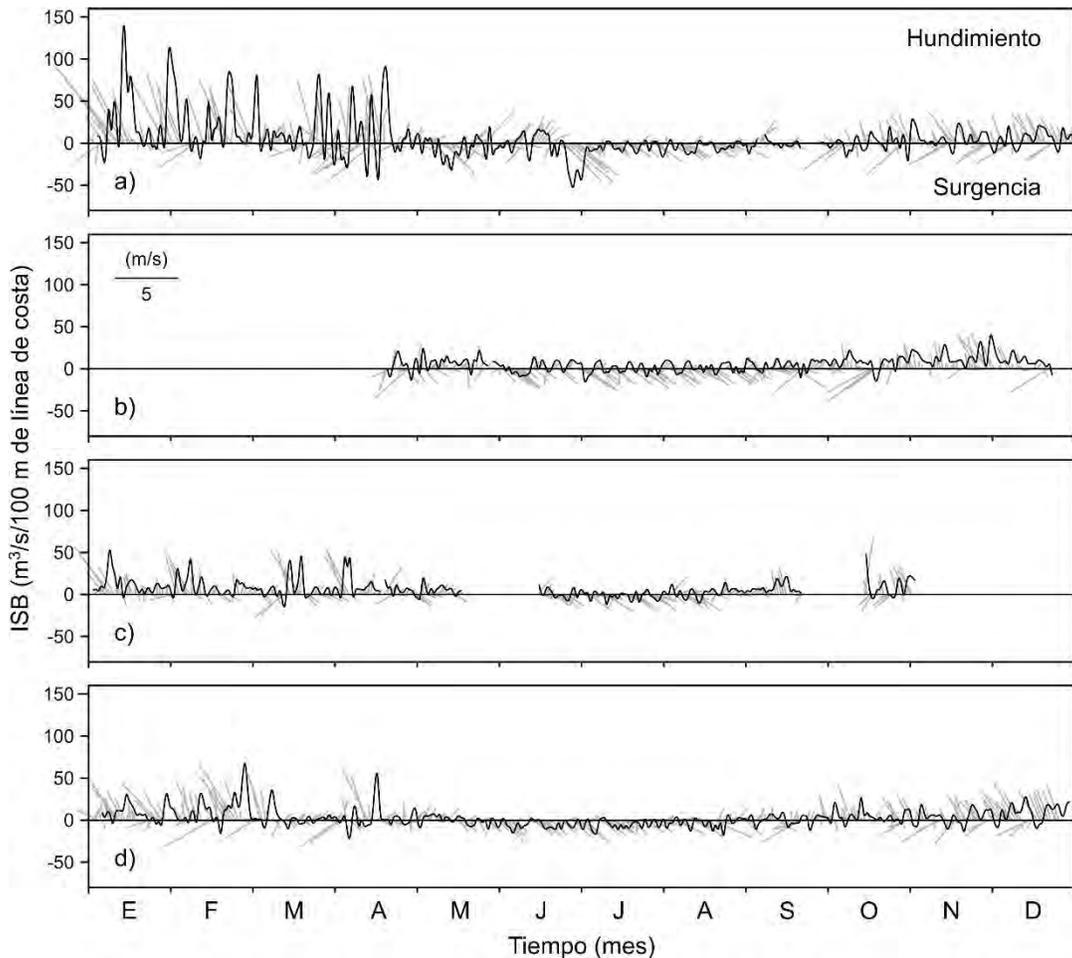


Figura. 3.4. Diagrama de estacas de los vientos e índice de surgencia en Loreto B. C. S. a) año 2009, b) año 2010, c) año 2011 y d) año 2013.

3.1.5 Mazatlán

La última región dentro de este estudio fue la de la costa de Mazatlán, Sinaloa, para esta zona solo se contó con datos del año 2013, en donde se observó que, de enero a inicios de marzo, intensos vientos del noroeste provocaron surgencias fuertes en la región, a finales de primavera y durante el verano, la intensidad del viento disminuye y provienen del suroeste los cuales en teoría provocarían ligeros hundimientos (Fig. 3.5).

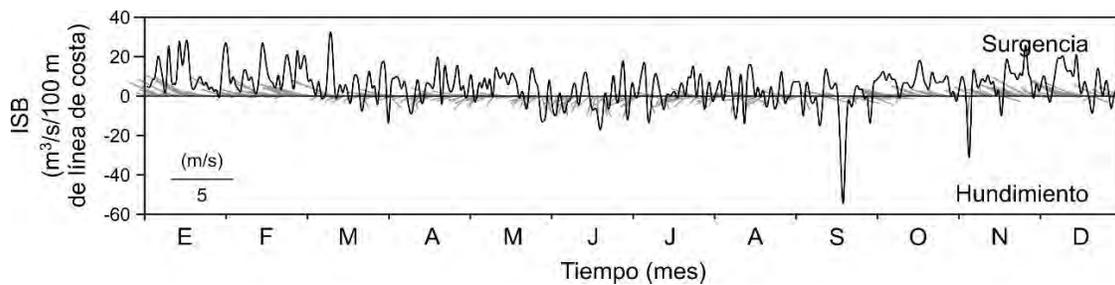


Figura. 3.5. Diagrama de estacas de los vientos e índice de surgencia en Mazatlán Sin., en el año 2013.

Los resultados anteriores de esta investigación concuerdan con la propuesta de Merrifield y Winant (1989) y Badan-Dangon *et al.* (1991), que menciona que durante otoño, invierno y primavera los vientos son del noroeste con intensidades de hasta 12 m s^{-1} , mientras que en el verano estos vienen del sureste con intensidades máximas de 5 m s^{-1} .

3.2. DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA SUPERFICIAL Y DE CLOROFILA-a

En el Golfo de California durante otoño, invierno y primavera, los vientos son del noroeste, mientras que durante el verano son del sureste con menores intensidades que en las épocas antes mencionadas. Las concentraciones más altas de clorofila-a se encontraron en otoño, invierno y primavera, mientras que durante el verano la distribución de clorofila-a presenta estructuras muy diferentes, es decir, se observaron menores concentraciones de Clorofila-a .

Durante el otoño, invierno y primavera de 2009, se observaron filamentos en la boca del golfo con temperaturas menores y altas concentraciones de clorofila-a. A lo largo del golfo se presentan núcleos con altas temperaturas y bajas concentraciones de clorofila-a. Según la teoría de Ekman, los vientos del noroeste deben de favorecer la presencia de surgencias eólicas en la costa continental, en efecto, en estas épocas se presentaron surgencias, así como, la presencia de un frente térmico en la zona del archipiélago, donde se observa un fuerte gradiente horizontal. El intervalo de temperaturas fue desde los 12 hasta los 21 °C de otoño a primavera propiciando altos valores de clorofila-a con valores que fueron de los 0.15 a los 9 mg m⁻³, por otro lado, durante el verano la temperatura estuvo dentro de un intervalo de 18 a 24 °C, estas altas temperaturas superficiales se vieron reflejadas en bajas concentraciones de clorofila-a que fue de 0.2 a 3 mg m⁻³ (Fig. 3.6).

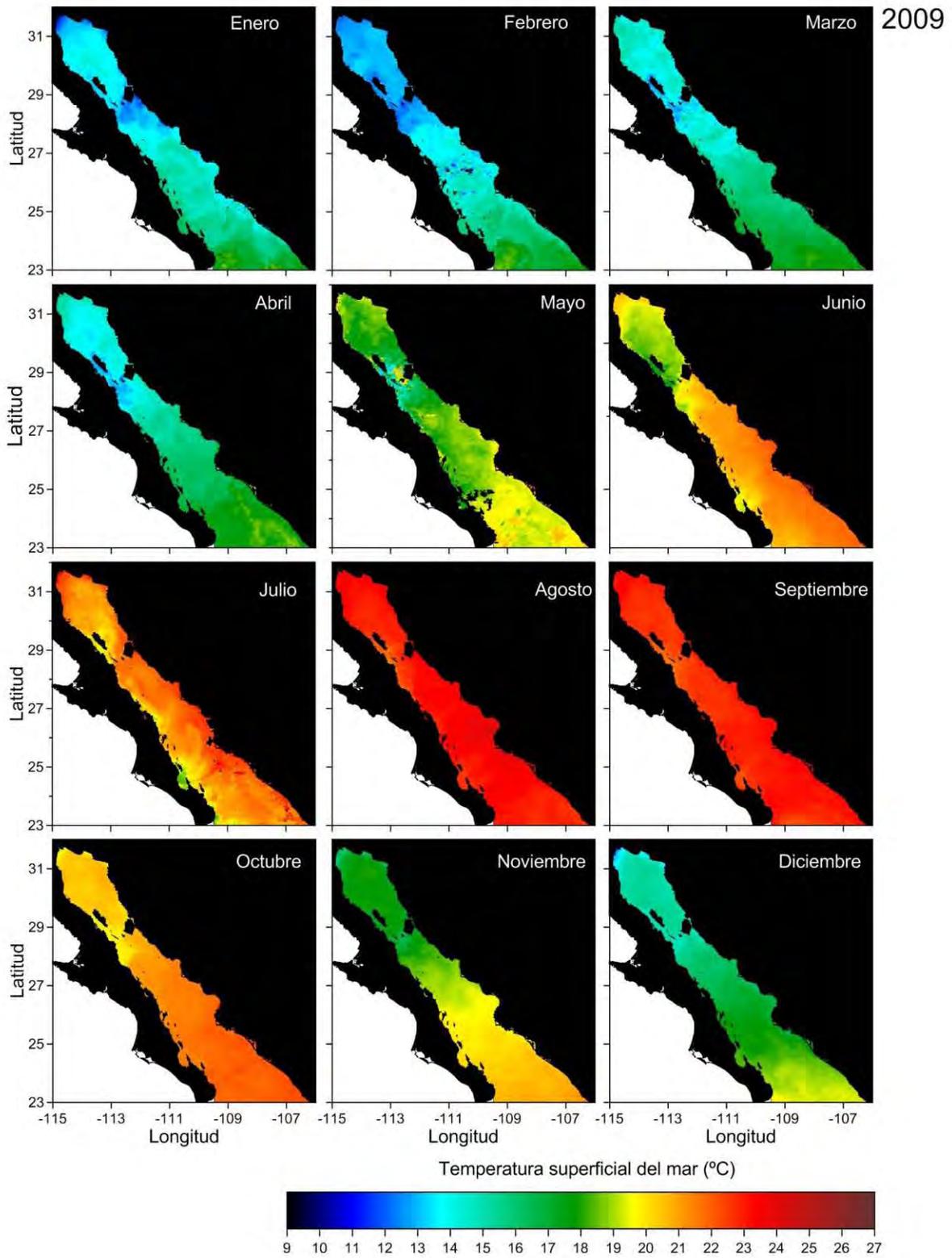


Figura. 3.6. Temperatura superficial del mar en 2009.

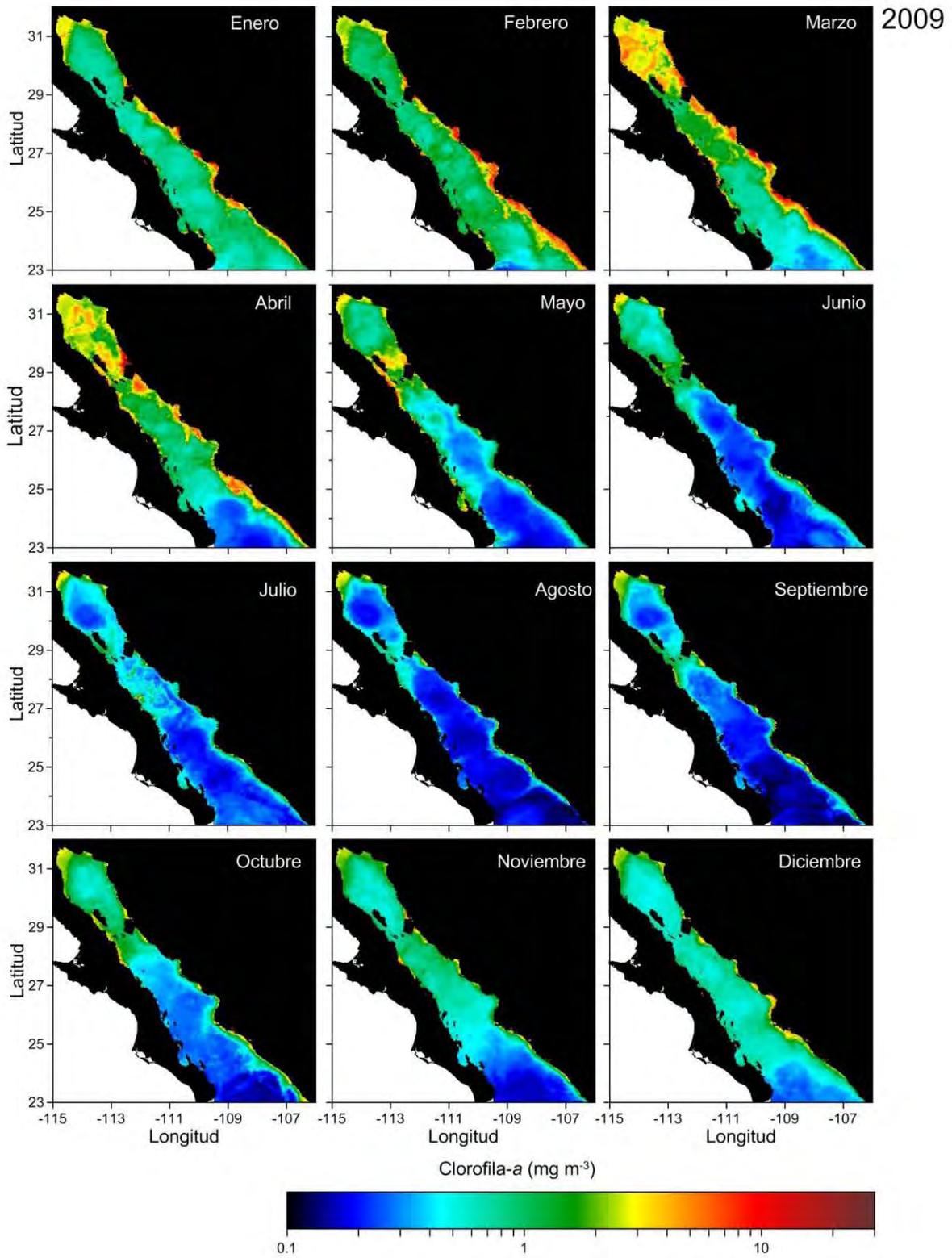


Figura. 3.6. Concentración de Chl-a en 2009.

En 2010 durante otoño-primavera, se observaron filamentos de agua con alta temperatura en la boca del Golfo de California además de núcleos de agua cálidos a lo largo del eje del golfo y, por lo tanto, bajas concentraciones de clorofila-*a*. En cuanto a las surgencias, éstas se presentaron en la costa continental con temperaturas ligeramente más bajas (13 - 22°C) comparadas con las del lado oeste del golfo, con concentraciones de clorofila-*a* que van de 0.1 a 8 mg m⁻³, además de un frente térmico en la zona del archipiélago. Para verano del mismo año, se observó la presencia de meandros a lo largo del golfo con alta temperatura y concentraciones bajas de clorofila-*a*, la temperatura decreció de la zona continental a la zona peninsular (24 a 19 °C) y para la clorofila-*a* se observó que las mayores concentraciones se encontraron en la costa peninsular (0.1 a 3 mg m⁻³) (Fig.3.7).

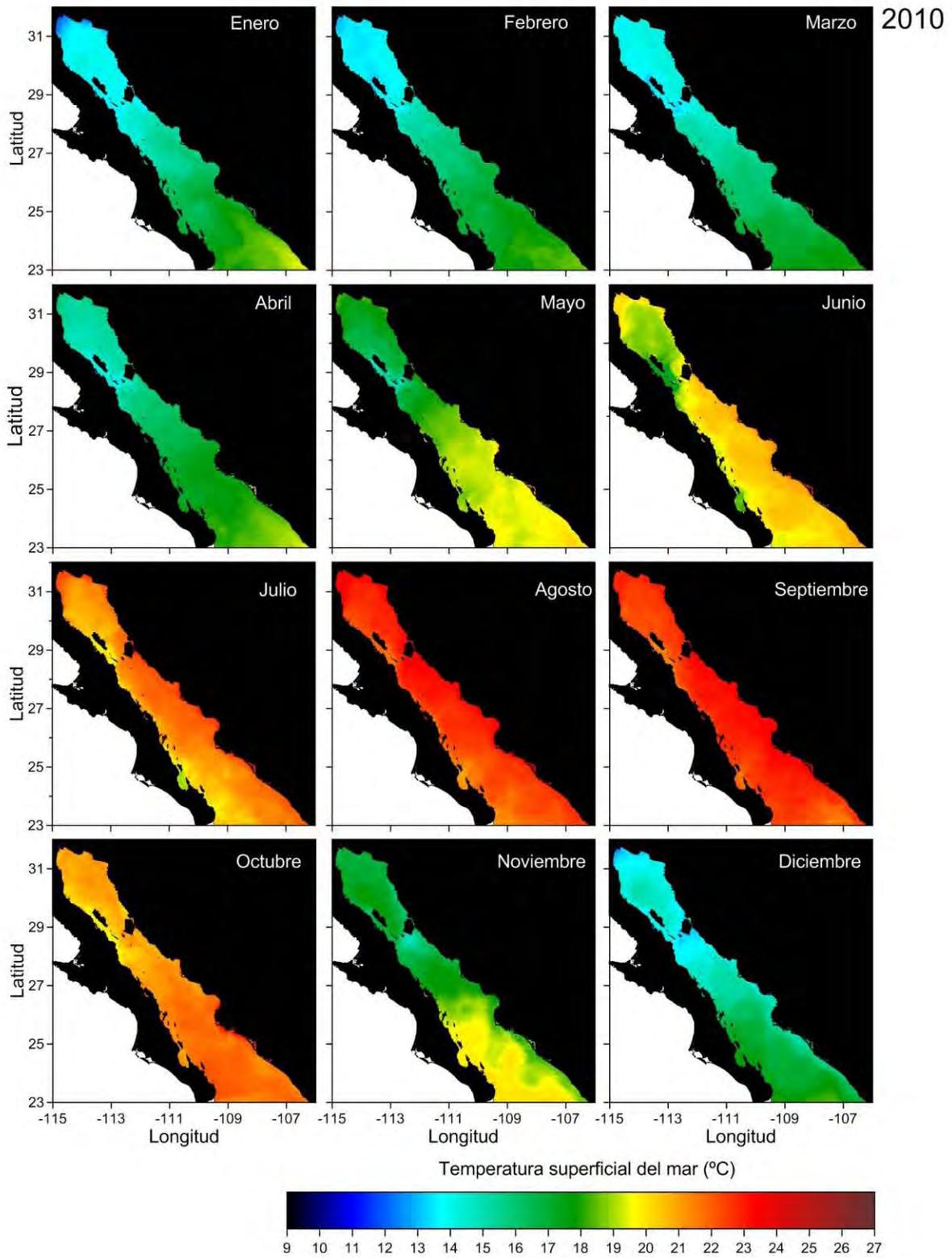


Figura. 3.7. Temperatura superficial del mar en 2010.

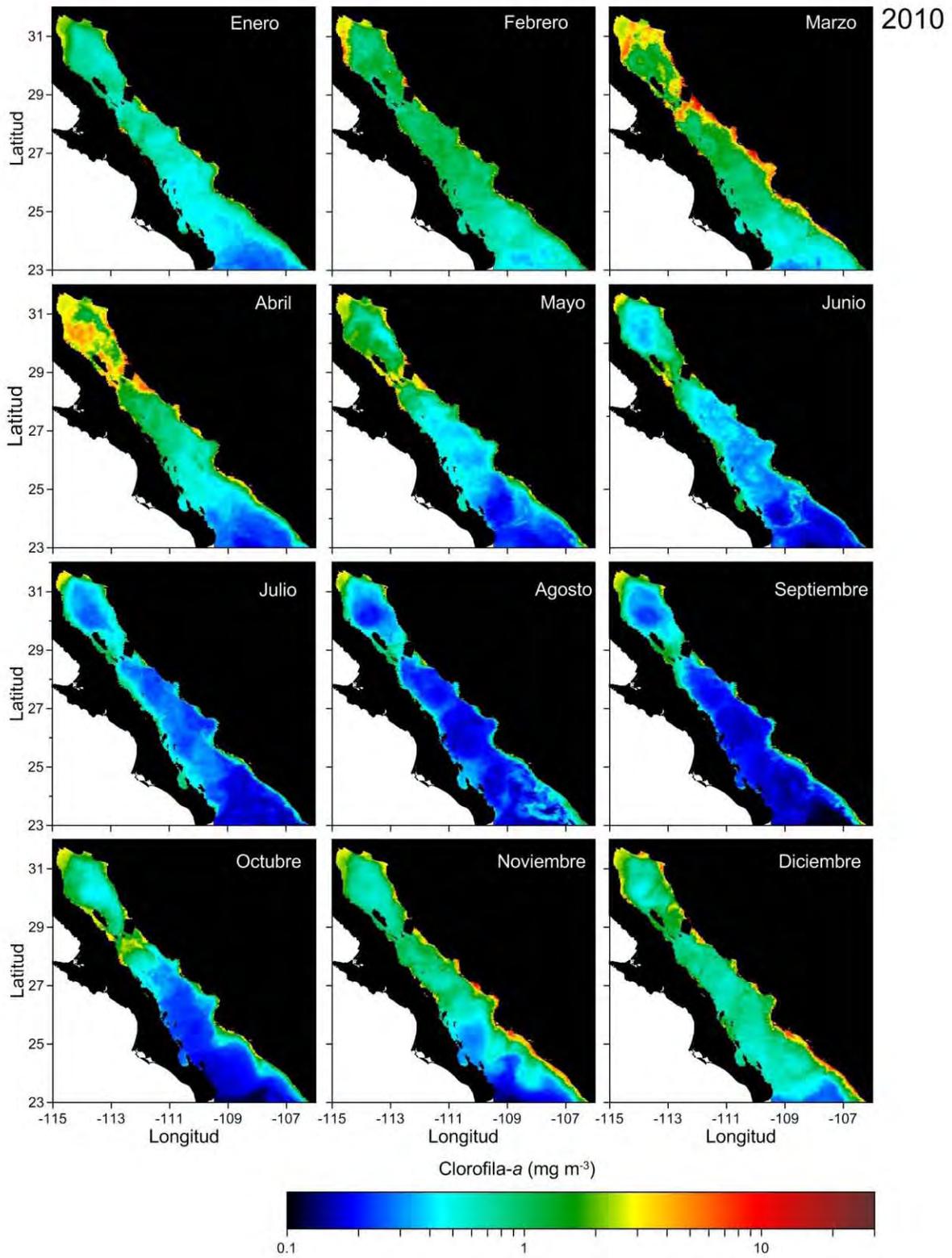


Figura. 3.7. Concentración de Chl-a en 2010.

En 2011 de otoño a primavera, se observaron meandros y un núcleo de agua cálida en la entrada del golfo con bajas concentraciones de clorofila-*a*, mientras que en el archipiélago se observó un frente térmico. En cuanto a la temperatura que se observó durante estas tres épocas, los intervalos fueron de los 11 a los 22 °C con concentraciones de Chl-*a* de 0.1 a 7 mg m⁻³. Mientras que en el verano se observaron meandros de agua cálida (21-25°C) desde la boca del golfo hasta el archipiélago, con bajas concentraciones de clorofila-*a* (0.2 a 3 mg m⁻³), así como, la formación de núcleos cálidos en el centro y norte del golfo con bajas concentraciones de Chl-*a* (Fig. 3.8).

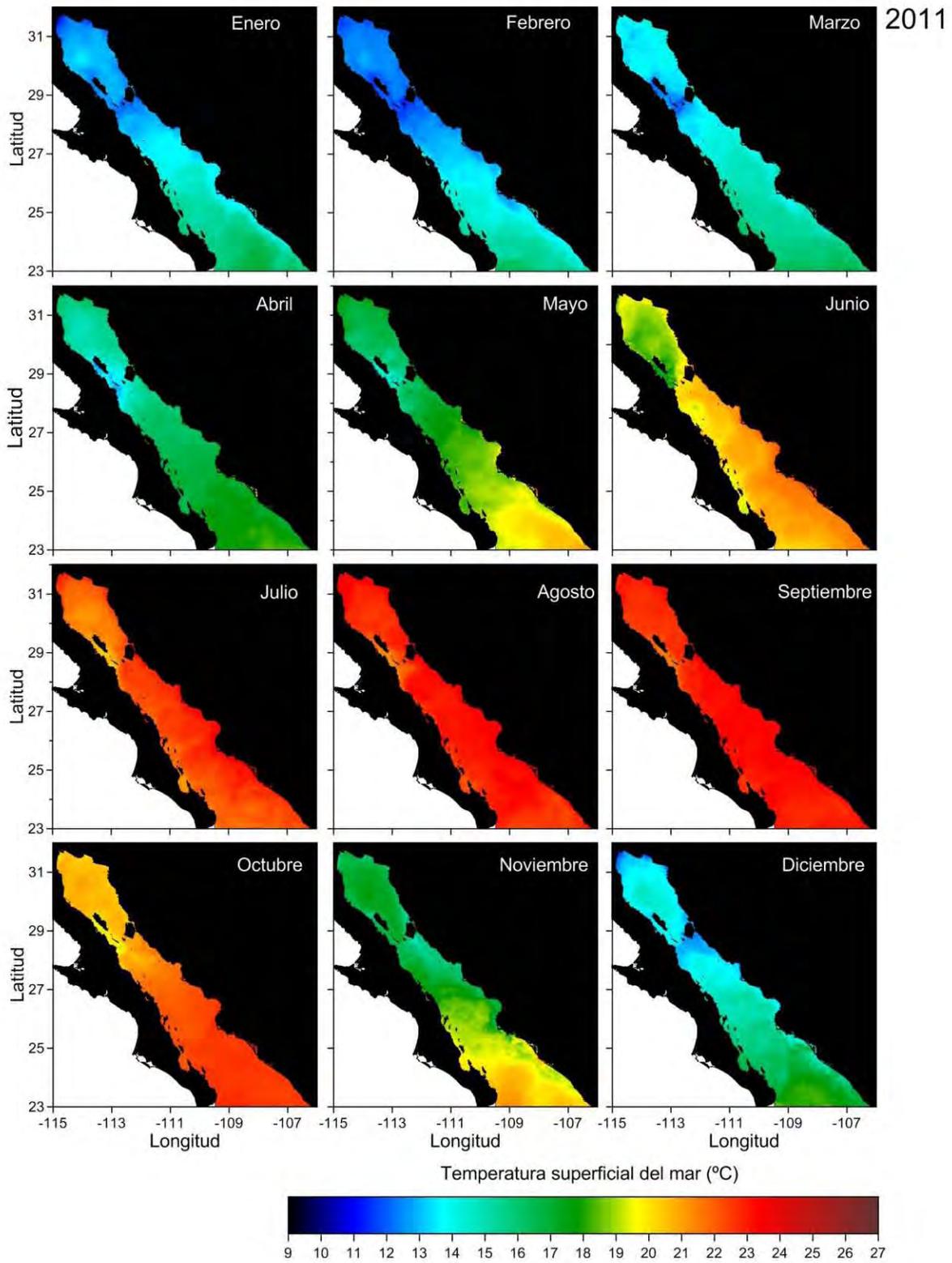


Figura. 3.8. Temperatura superficial del mar en 2011.

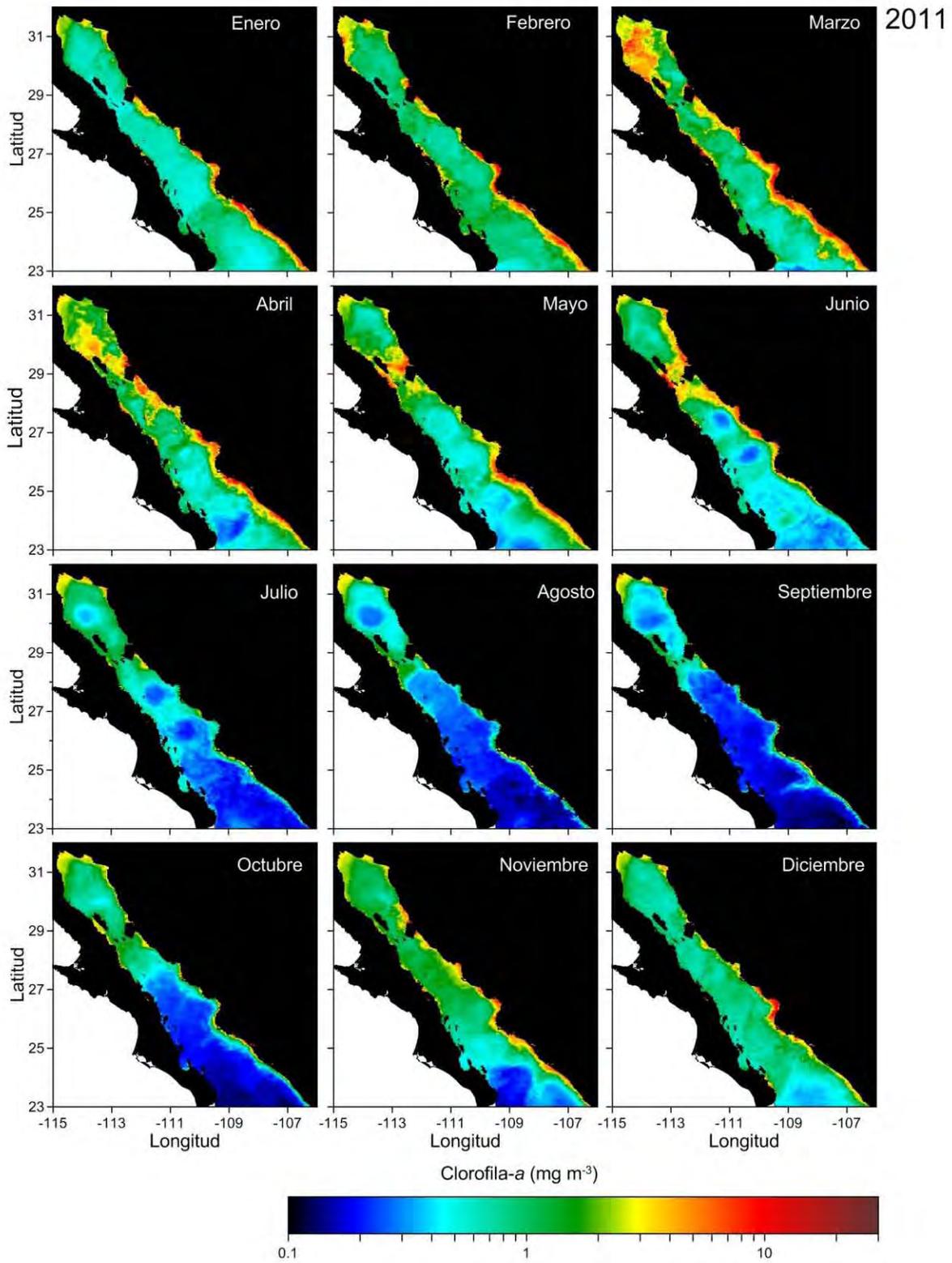


Figura. 3.8. Concentración de Chl-a en 2011.

Para el 2013, de otoño a primavera, las estructuras físicas que se observaron fueron un núcleo cálido en la boca del golfo y bajas concentraciones de Chl-*a*, un frente térmico en el archipiélago y concentraciones de Chl-*a* relativamente altas. La temperatura superficial del mar varió de los 12 a los 22 °C y las concentraciones de Chl-*a* fueron de 0.2 a 6 mg m⁻³. En el verano del mismo año se observaron filamentos fríos en la zona peninsular, con relativamente altas concentraciones de Chl-*a* (0.1-3 mg m⁻³), agua con temperatura superficial entre 20 y 25 °C en todo el golfo con núcleos cálidos y bajas concentraciones de Chl-*a* (Fig. 3.9.). Sin embargo, en la figura 3.10 se observan de mejor manera las estructuras físicas mencionadas anteriormente.

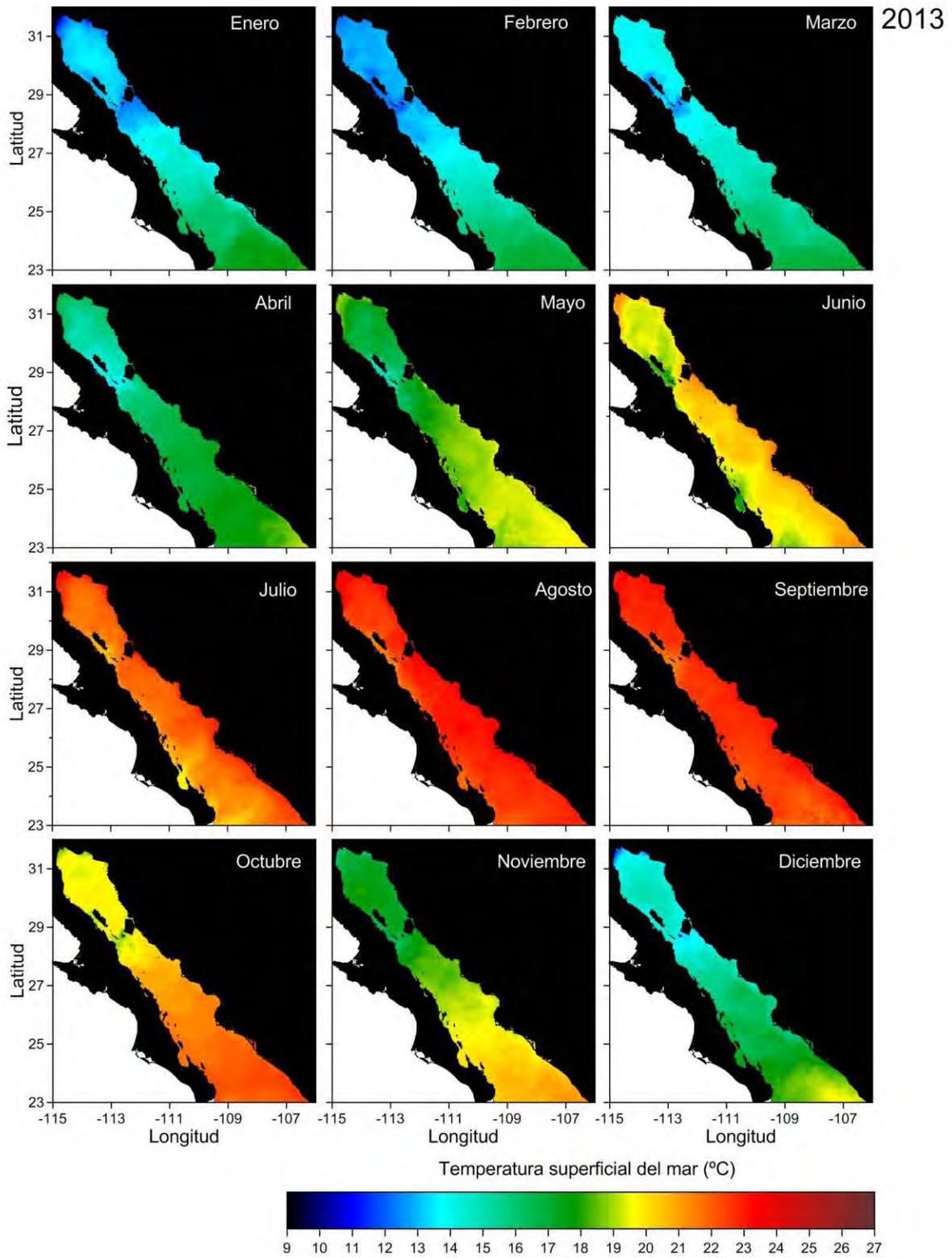


Figura. 3.9. Temperatura superficial del mar en 2013

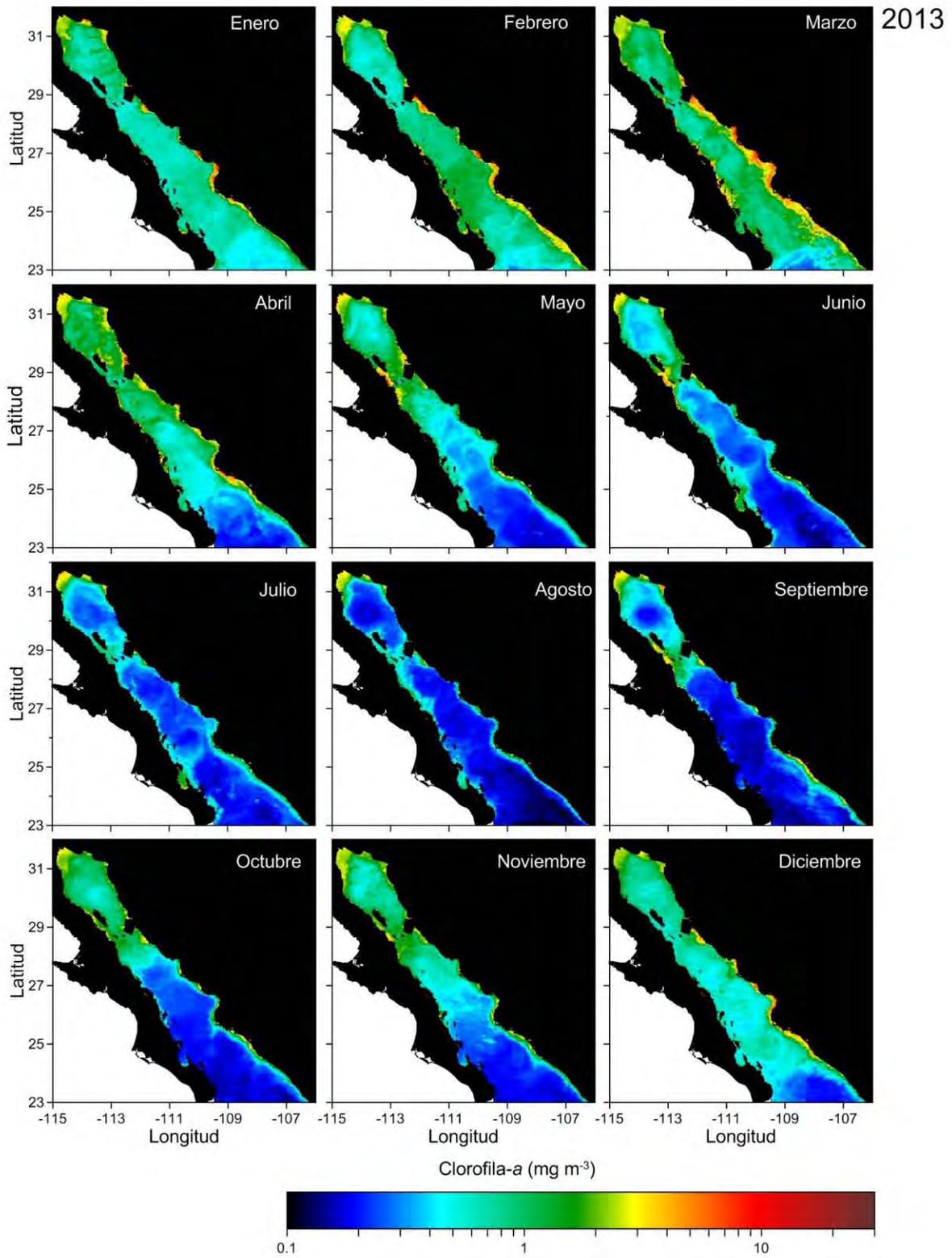


Figura. 3.9. Concentración de Chl-a en 2013.

La tabla 3.1 muestra de manera resumida las variaciones de los valores promedios mensuales de TSM y concentración de clorofila-a obtenidos de información satelital, para cada época del año, durante los años de estudio.

Tabla 3.1. Variación de TSM (°C) y concentración de Clorofila-a (mg m⁻³) para cada época del año 2009-2011 y 2013 en el Golfo de California.

		<i>Otoño</i>	<i>Invierno</i>	<i>Primavera</i>	<i>Verano</i>
<i>2009</i>	TSM	14-21°C	12-18°C	13-21°C	18-24°C
	Chl-a	0.2-3 mg m ⁻³	0.3-7 mg m ⁻³	0.15-9 mg m ⁻³	0.2-3 mg m ⁻³
<i>2010</i>	TSM	13-22°C	13-19.5°C	15-20.5°C	19-24°C
	Chl-a	0.1-6 mg m ⁻³	0.3-8 mg m ⁻³	0.2-7 mg m ⁻³	0.1-3 mg m ⁻³
<i>2011</i>	TSM	12-22°C	11-18°C	14-22°C	21-25°C
	Chl-a	0.1-7mg m ⁻³	0.5-7 mg m ⁻³	0.3-7 mg m ⁻³	0.2-3 mg m ⁻³
<i>2013</i>	TSM	14-22°C	12-18 °C	15-21°C	20-25°C
	Chl-a	0.2-3 mg m ⁻³	0.3-6 mg m ⁻³	0.2-4 mg m ⁻³	0.1-3 mg m ⁻³

La observación de vórtices ciclónicos y anticiclónicos además de los frentes (Figura 3.10), fue posible gracias a las siguientes imágenes en las cuales se tomó un mes representativo para la época de otoño, invierno y primavera y otro mes para la época de verano. En las imágenes se muestra en el primer renglón la temperatura superficial del mar (TSM, °C) y en el segundo renglón la concentración de Clorofila-a (mg m⁻³) para el mes de enero de cada año de estudio (2009, 2010, 2011 y 2013), se eligió este mes porque de toda la serie fue en donde se observaron las mejores características hidrodinámicas (vórtices y frentes) para la época de otoño, invierno y primavera.

Los otros dos renglones de imágenes pertenecen al mes de julio de TSM y Chl-a respectivamente, en este caso julio mostró de manera clara diferentes características como las antes mencionadas dentro del Golfo de California para la

época de verano y debido a eso se eligió como representativo de dicha época (Fig. 3.10).

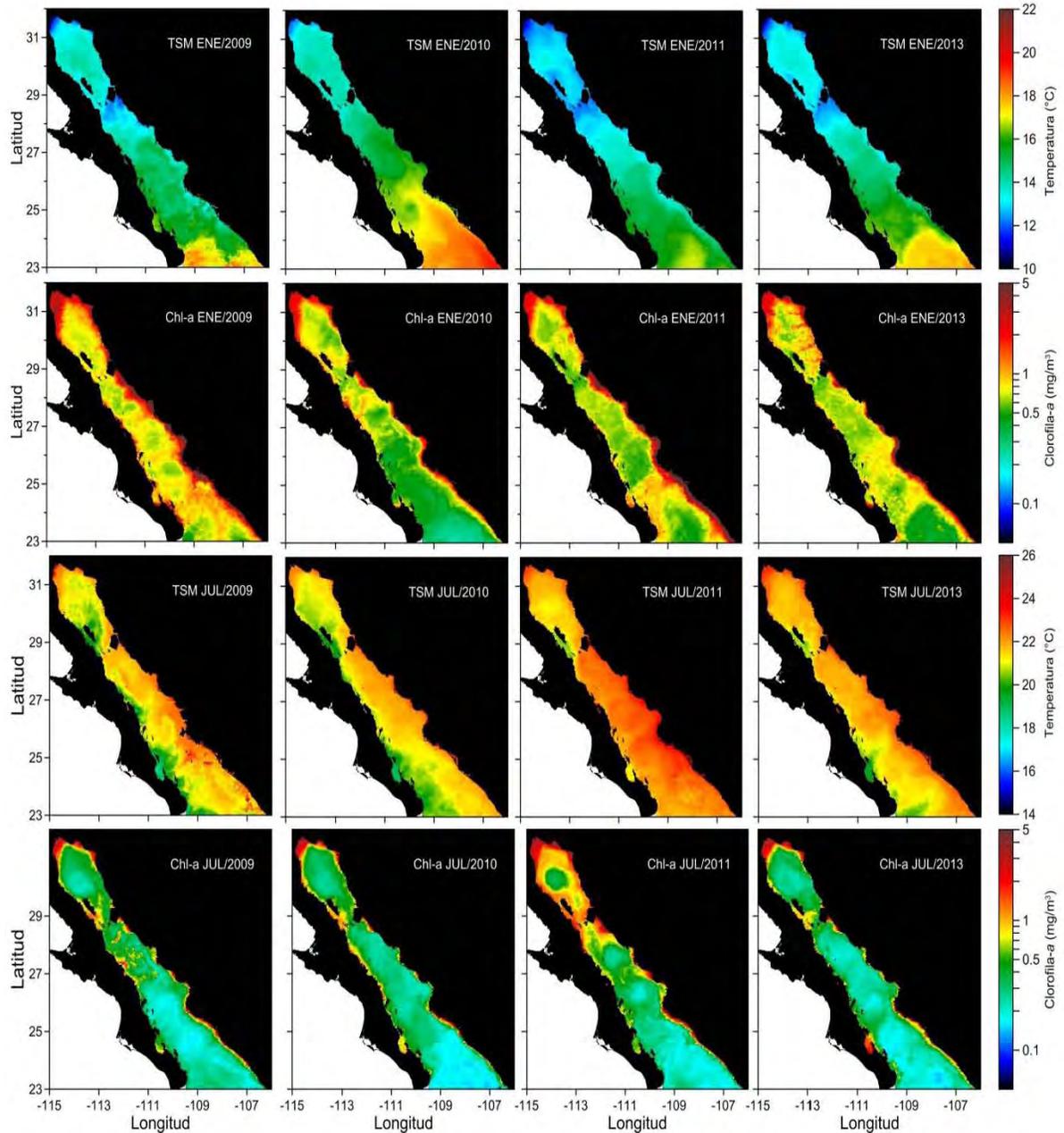


Figura. 3.10. Temperatura superficial del mar ($^{\circ}\text{C}$) y de clorofila-a (mg m^{-3}) para los meses de enero (mes representativo de otoño, invierno y primavera) y julio (mes representativo de verano), de cada uno de los años estudiados.

Tabla 3.2. Estructuras físicas observadas dentro del Golfo de California en los años 2009 a 2011 y 2013 durante las dos épocas contrastantes de acuerdo a los vientos en el Golfo de California.

	Otoño, Invierno y Primavera	Verano
2009	Filamentos en la boca del golfo, a lo largo de su eje se presentan núcleos cálidos y bajas concentraciones de clorofila. Surgencias en la costa continental con temperatura ligeramente más baja y altas concentraciones de Clorofila-a, así como, un frente térmico en el archipiélago.	Meandros a lo largo del Golfo con temperaturas altas y bajas concentraciones de clorofila-a, la temperatura decrece de la zona continental a la peninsular, contrariamente a las concentraciones de clorofila-a.
2010	El agua cálida ocupa una mayor área en la región de la boca comparada con el 2009, con meandros cerca de la boca. Bajas concentraciones de clorofila-a principalmente en la boca del golfo. Presencia de un frente térmico en la Cuenca de La Paz.	En la costa peninsular se tiene baja temperatura y alta concentración de clorofila-a. Presencia de un frente térmico meridional en la boca del golfo.
2011	Meandros y núcleo cálido en la entrada del golfo con bajas concentraciones de Clorofila-a. En el archipiélago se presenta un frente térmico.	Meandros con agua cálida desde la boca del golfo hasta el archipiélago y bajas concentraciones de clorofila-a; formación de núcleos cálidos en el centro y norte del golfo con bajas concentraciones de clorofila-a.
2013	Núcleo cálido en la boca del golfo y bajas concentraciones de clorofila-a, un frente térmico en el archipiélago y concentraciones de clorofila-a relativamente altas.	Filamentos fríos en la zona peninsular con altas concentraciones de clorofila-a, temperaturas altas en todo el golfo con núcleos cálidos y bajas concentraciones de clorofila-a.

La información de la tabla (3.2) fue obtenida de la Figura (3.10), en donde se muestran los meses de enero que fue el mes mas representativo de la época de otoño, invierno y primavera y, el mes de julio que representa el verano.

En otoño, invierno y primavera del año 2009, 2010, 2011 y 2013 se observaron frentes térmicos siempre en la zona del archipiélago con altas concentraciones de Clorofila-*a* y bajas temperaturas, además de núcleos cálidos y filamentos con temperatura elevada y bajas concentraciones de Clorofila-*a* en la boca del golfo, ésto debido a que en esa zona converge agua cálida tropical. Por otra parte, durante verano de todos los años de estudio se observaron meandros cálidos dentro del golfo que se extendieron hasta el archipiélago, núcleos cálidos en el centro y norte del Golfo de California provocando bajas concentraciones de Clorofila-*a*, mientras que en la zona peninsular debido a que los vientos del sureste predominaron, se observaron surgencias y temperatura baja, así como elevada concentración de Clorofila-*a*.

3.3. EL ÍNDICE DE OSCILACIÓN DEL SUR (SOI), LA PRESENCIA DE EL NIÑO, LA NIÑA Y EL AÑO NEUTRO

Como ya se ha mencionado anteriormente, el Índice de Oscilación del Sur (SOI), es un indicador de la diferencia de presión entre la isla de Tahití (Polinesia Francesa) y de Darwin (Australia) (Capel-Molina, 1999; Cerano-Paredes *et al.*, 2011), dicho índice se utilizó de acuerdo a la NOAA (<https://www.ncdc.noaa.gov/>) en donde se observan eventos de El Niño durante 2009-2010, La Niña 2010-2011 y un año normal o neutro 2013 (Fig. 3.11).

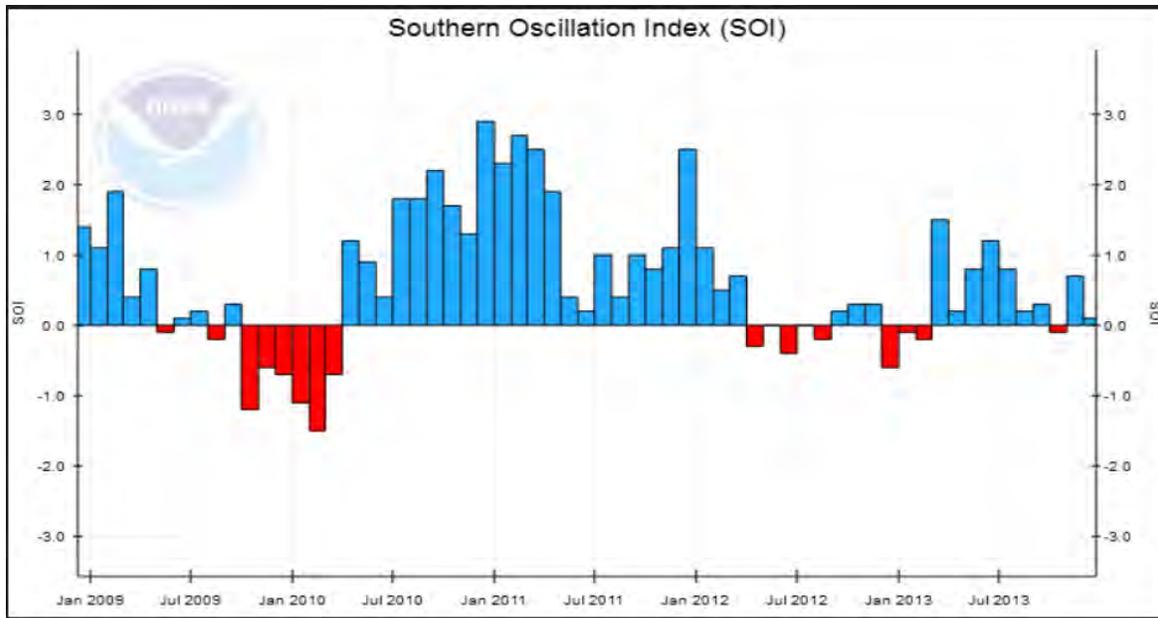


Figura. 3.11. Valores del Índice de la Oscilación del Sur, durante los años de estudio (según la NOAA).

En el primer caso, el fenómeno de El Niño de 2009-2010 comenzó en octubre de 2009, es decir, en otoño en donde la TSM tiene valores promedio de $\sim 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la boca del golfo y de $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la parte norte del mismo. Para febrero de 2010 se presentó la máxima intensidad de El Niño, que si se compara la imagen satelital de este año con el 2009, se observa que este año resultó ser ligeramente más cálido ($18\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la boca del golfo y $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el Alto Golfo). Para marzo de 2010 El Niño se debilitó (Fig. 3.12).

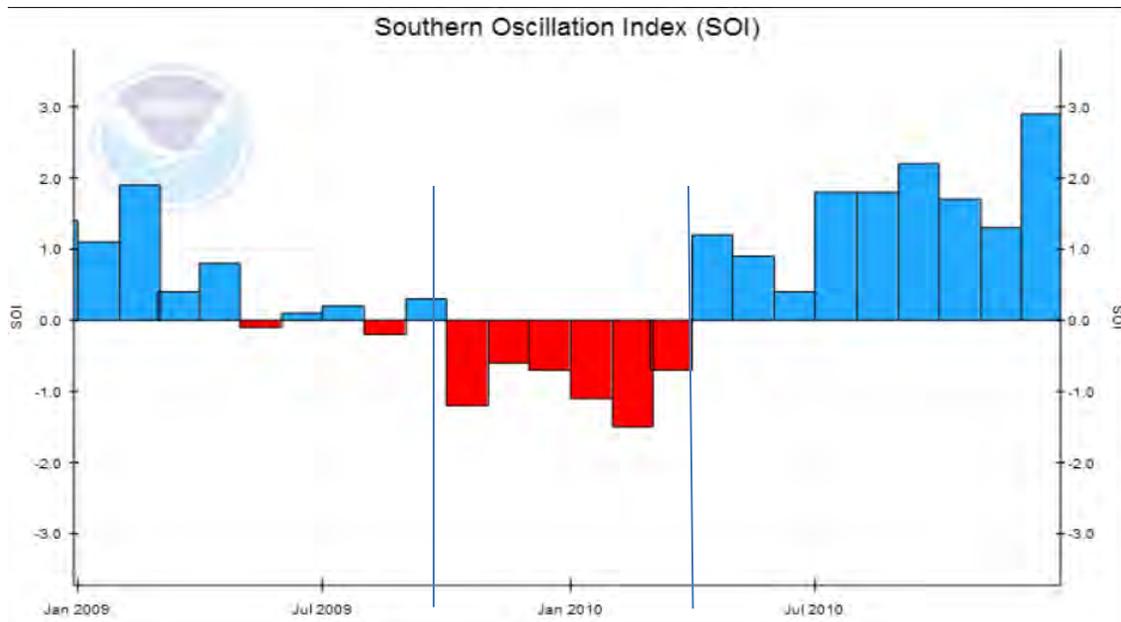


Figura. 3.12. Valores del Índice de la Oscilación del Sur, durante el año de El Niño 2009-2010 (según la NOAA).

La Niña de 2010-2011 mostró sus primeras señales en abril de 2010, es decir, durante primavera. Si se compara el mes de julio de 2009 con el de este año, se puede observar que en ambos años la temperatura es semejante, entre los 18 y 24 °C, por lo cual, no hay una diferencia tan marcada en la TSM. El Índice de la Oscilación del Sur indica que el valor más alto ocurrió en diciembre de 2010, en la imagen satelital de ese año se observó una temperatura de 13.5 °C en el norte del golfo y de 16 °C en la parte centro y sur del Golfo de California, para diciembre. Al comparar el primer trimestre del 2011 con el primer trimestre del 2010 se observa que la temperatura es más baja durante el 2011, lo cual se debe a que el efecto de La Niña propicia bajas temperaturas (de 12 a 15°C) dentro del golfo (Fig. 3.13.).

Por último, este evento Niña fue muy prolongado pues se manifestó hasta el año 2012.

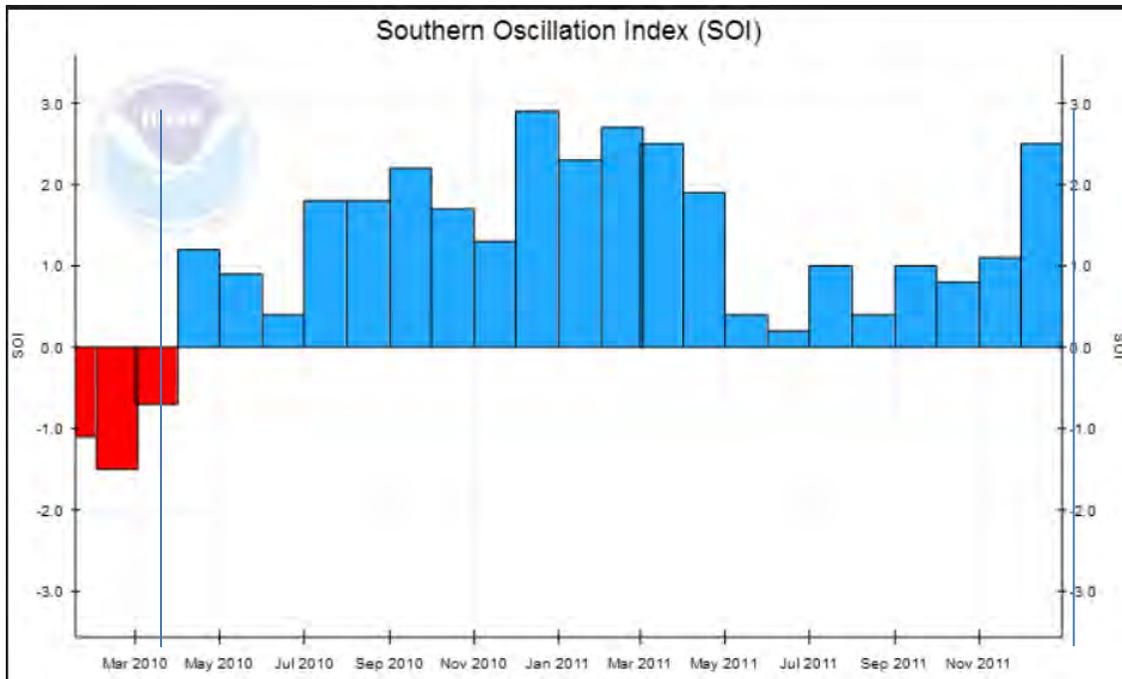


Figura. 3.13. Evento de La Niña 2010-2011 (según la NOAA).

Por último, en el 2013 se puede apreciar que el Índice de la Oscilación del Sur tuvo valores menores a 0.5, lo que indica que 2013 fue un año neutro. No obstante, durante marzo se observa un evento débil de La Niña y otro menor en junio (Fig. 3.14). Las imágenes satelitales del 2013 muestran que la temperatura durante otoño-primavera fue de 12 a 21°C mientras que durante verano la temperatura fue de aproximadamente 20 a 25 °C (Fig. 3.9).

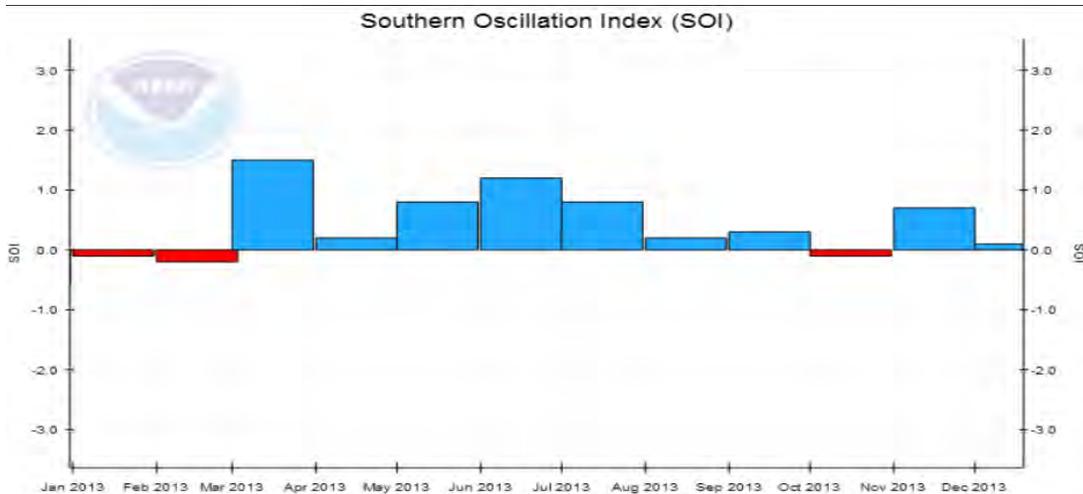


Figura. 3.14. Índice de la Oscilación del Sur durante el año neutro de 2013 (según la NOAA).

La tabla (3.3) contiene datos de temperatura y concentración de Chl-a para los meses de máximo valor del SOI durante los fenómenos El Niño (Febrero de 2010) y La Niña (enero de 2011), esto con la finalidad de comparar las diferencias de TSM y Chl-a en eventos El Niño, La Niña y año neutro.

Se observó que durante el fenómeno de El Niño la temperatura superficial del mar dentro del Golfo de California presentó anomalías positivas, es decir, un aumento en la temperatura, mientras que durante el fenómeno La Niña se observó una disminución de la TSM y, con ello, un aumento en la producción de Clorofila-a, mientras que en un año neutro tanto la TSM y la concentración de Clorofila-a tuvieron valores intermedios entre los fenómenos antes mencionados.

Tabla 3.3. Temperatura Superficial del Mar (TSM, °C) y concentración de Clorofila-a (Chl-a, mg m⁻³) para los meses de máximo valor del SOI en los años El Niño, La Niña y un mes comparable para el año neutro.

Observaciones			
Febrero 2010 (El Niño)	TSM	14 - 18 °C	Las máximas temperaturas van de la boca al archipiélago
	Chl-a	0.3-5 mg m ⁻³	
Enero 2011	TSM	11 - 16 °C	

(La Niña)	Chl- <i>a</i>	0.6 - 7 mg m ⁻³	La TSM de 17 °C disminuye en forma abrupta desde la boca hacia el norte
Febrero 2013	TSM	10.5 – 16.5 °C	La TSM de 16.5 °C disminuye gradualmente hacia el norte a partir de la boca
(Año neutro)	Chl- <i>a</i>	0.6 - 5 mg m ⁻³	

Por otra parte, haciendo uso sólo de imágenes de satélite correspondientes a los meses de las primeras y de las últimas señales de los eventos de El Niño, La Niña y el año neutro, se pudo tener un panorama más amplio de los cambios presentados durante dichos eventos, en cuanto a temperatura superficial del mar y a la concentración de Chl-*a*.

Las primeras señales de El Niño ocurrieron en octubre de 2009; es decir en otoño, cuando la TSM dentro del Golfo de California era relativamente alta (~19.5°C en el norte y las grandes islas y 23 °C en el sur del golfo) (Fig. 3.15), la concentración de Chl-*a* fue baja (entre 0.1 y 2.5 mg m⁻³). Sin embargo, la temperatura observada durante el pico de El Niño que ocurrió en febrero de 2010 (14°C en el norte y Alto Golfo, y 18°C en la boca) fue más baja si se compara con la observada a inicios de dicho evento, y las concentraciones de Clorofila-*a* aumentaron (Chl-*a* de 6 mg m⁻³ y de 0.8 mg m⁻³, respectivamente) debido en gran parte y, como se ha mencionado con anterioridad, a que dentro del Golfo de California los vientos se comportan de manera estacional provocando que los vientos provenientes del noroeste generen afloramientos de agua subsuperficial fría que minimiza el efecto que tiene El Niño dentro del golfo. Además, si se compara la TSM y la concentración de Clorofila-*a* durante el evento Niño y Niña, se observa que durante La Niña las concentraciones de Clorofila fueron mayores y la TSM disminuyó.

Para marzo de 2010, El Niño disminuyó registrándose temperaturas de 17°C en la boca del golfo y de 14 °C en el norte, las altas concentraciones de clorofila-*a* estuvieron presentes principalmente en la costa continental y en el Alto Golfo con valores de 4-6 mg m⁻³ (Fig. 3.15).

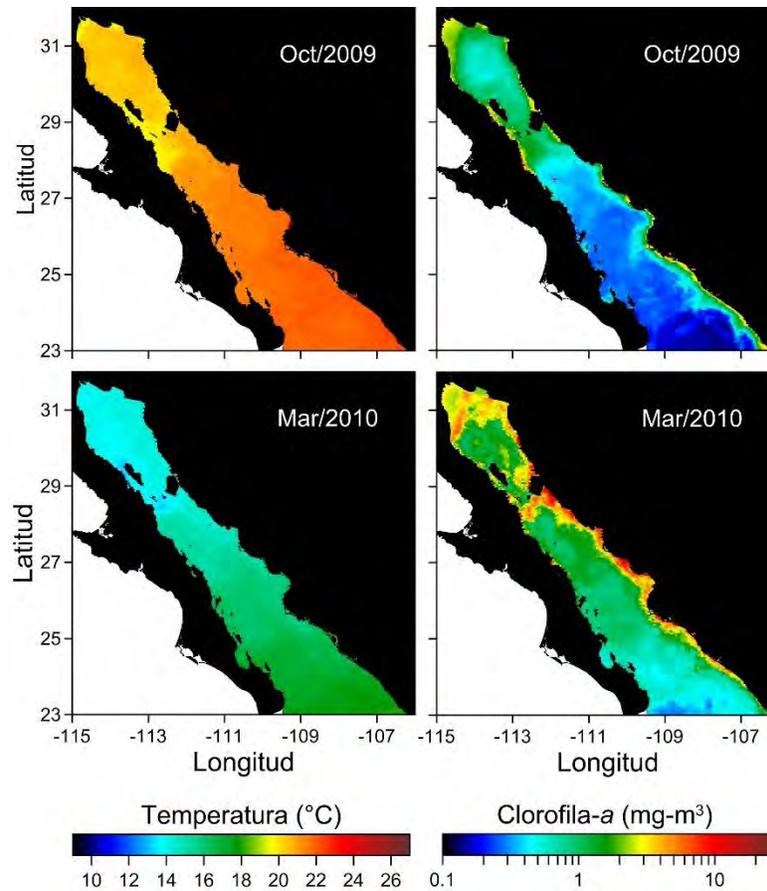


Figura. 3.15. Temperatura superficial del mar (°C) y concentración de Clorofila-a (mg m⁻³) durante los meses de octubre de 2009 y marzo de 2010.

Durante el evento de La Niña, que ocurrió en abril (primavera) de 2010 cuando se presentaron las primeras señales, la TSM en la boca del golfo fue de 19°C y de 15°C en el norte del golfo (Fig. 3.16). La mayor concentración de Chl-a se observó en el Alto Golfo y en la zona del archipiélago, tanto del lado continental como de la costa peninsular, con concentraciones de 3-5 mg m⁻³. Este evento decayó en mayo de 2011 mostrando una TSM de 20°C en la boca y 16°C en el norte del golfo, las concentraciones más altas de Chl-a se presentaron del lado de la costa continental y en la región de las grandes islas, ambas con valores de 1-7 mg m⁻³ (Fig. 3.16).

Como se mencionó en la tabla 3.3, el valor más alto del SOI y por lo tanto del evento La Niña, ocurrió en enero de 2011, cuando la TSM fue más baja que a inicio y final del evento y la concentración de Chl-a fue más elevada.

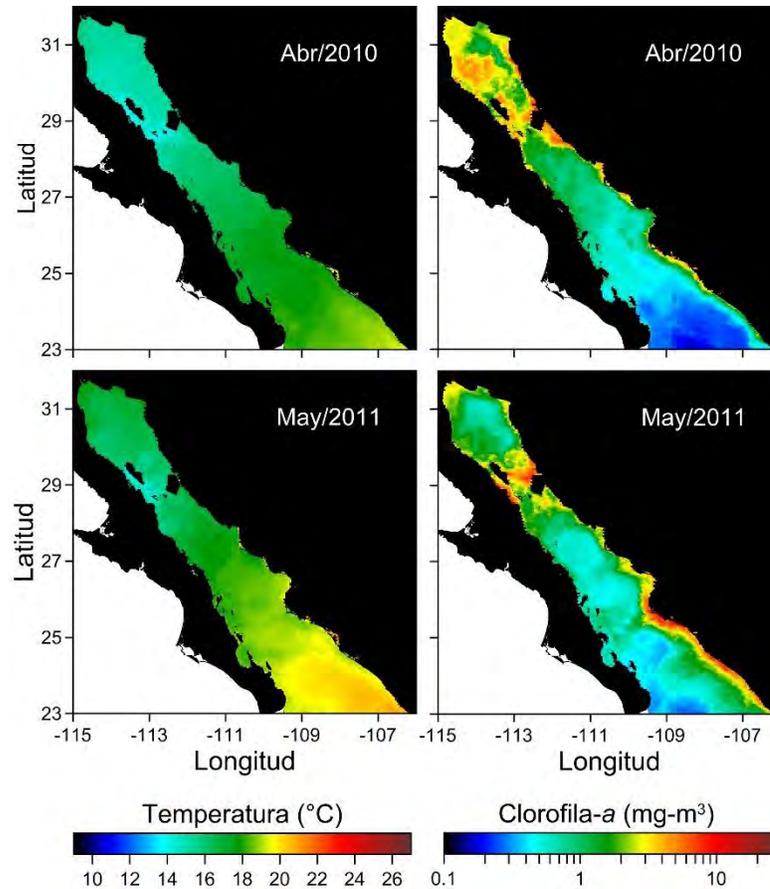


Figura. 3.16. Temperatura superficial del mar ($^{\circ}\text{C}$) y concentración de clorofila-a (mg m^{-3}) durante los meses de abril de 2010 y mayo de 2011.

Por último, en el año neutro (2013) se tomaron los meses de febrero y diciembre ya que presentaron el índice SOI más bajo para el fenómeno El Niño y La Niña respectivamente, en el caso de febrero de los datos de TSM y de concentración de Chl-a (tabla 3.3), se puede notar que las bajas temperaturas dentro del Golfo de California se deben a que el año anterior (2012) ocurrió un evento prolongado de La Niña. En el caso de diciembre se observó que la TSM en la boca del golfo (19°C) aumentó con respecto a la observada en el mes de febrero, en el Alto Golfo se

presentaron temperaturas de 14°C, mientras que las concentraciones de Clorofila-a en la costa continental fueron relativamente bajas (1-3.5 mg m⁻³) (Fig. 3.17).

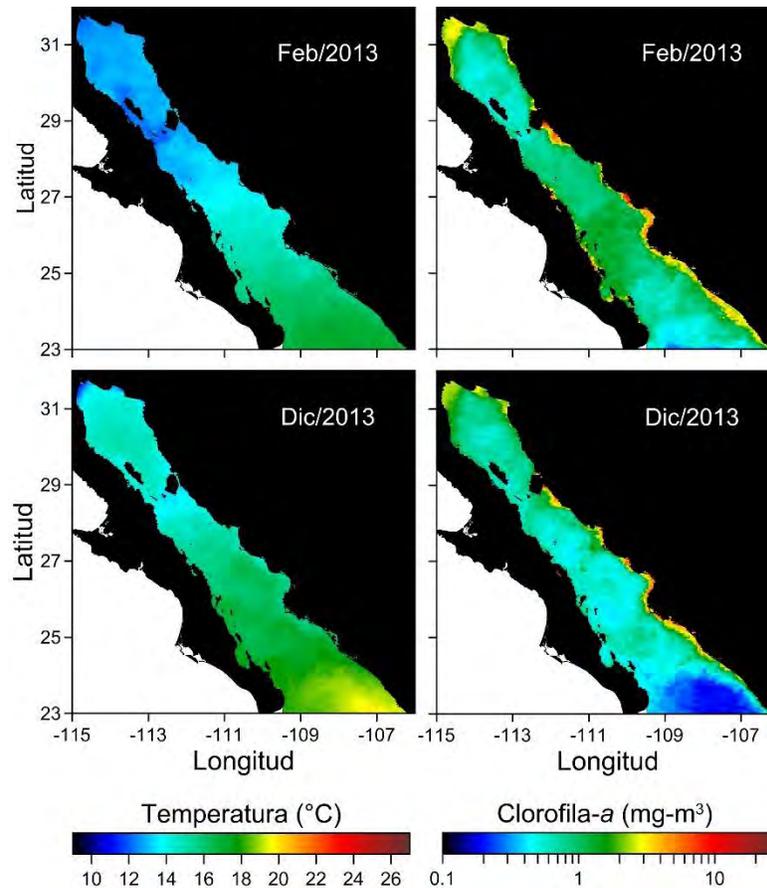


Figura. 3.17. Temperatura superficial del mar (°C) y concentración de clorofila-a (mg m⁻³) durante los meses de febrero de 2013 y diciembre de 2013.

CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN

En el periodo de análisis de este trabajo, de 2009 a 2011 y 2013 se consideraron tres diferentes condiciones climáticas: El Niño (2009-2010), La Niña (2010-2011) y un año neutro (2013), en donde se observaron que bajas temperaturas y altas concentraciones de Clorofila-*a* estuvieron presentes durante un evento La Niña, mientras que las menores concentraciones de Chl-*a*, así como, una elevada temperatura se presentó durante el evento de El Niño. De acuerdo a los diagramas de velocidad de viento (estacas), éstos en general se comportaron de manera estacional en la mayor parte del año siendo, durante otoño, invierno y primavera, del noroeste, con una velocidad máxima de $\sim 12 \text{ m s}^{-1}$ y del sureste durante el verano con menor velocidad ($\sim 5 \text{ m s}^{-1}$).

Las surgencias dentro del Golfo de California obedecieron a estos vientos estacionales, presentándose una surgencia muy productiva de otoño a primavera del lado de la costa continental y una surgencia débil y baja en concentración de Chl-*a* en la costa peninsular en verano. En el primer caso, se ha reportado un centro de alta presión en el suroeste de Estados Unidos de América, lo cual provoca vientos intensos hacia el sur sobre el golfo (Ives, 1962), que genera la surgencia en la costa continental, como se muestra en las imágenes satelitales. Por otro lado, en verano la presión atmosférica en la superficie del mar invierte la dirección del viento hacia el norte resultando en elevadas temperaturas ($18\text{-}25^\circ\text{C}$). Este efecto se observa en casi todo el golfo, excepto por las aguas superficiales de baja temperatura producto de la mezcla por marea cerca de las grandes islas (Badan-Dangon *et al.*, 1985; Paden, 1990; Robinson, 1973; Roden y Groves, 1959 y Sverdrup, 1941).

En este sentido, a partir de las imágenes satelitales de concentración de Clorofila-*a* y de los vientos, se pudo observar que la distribución de Chl-*a* se encuentra en fase con los vientos del noroeste. Por otro lado, durante el verano, con

vientos débiles del sureste, la concentración de Chl-*a* es menor y eso es debido en gran parte a que a pesar de que la dirección del viento es del sureste lo que induciría eventos de surgencia del lado peninsular, el flujo de agua es hacia el exterior del golfo (Bray, 1988; Beier, 1997) reduciendo el efecto de la intensidad del viento y, por lo tanto, disminuyendo la intensidad de las surgencias en el lado peninsular. Otro factor que influye en el verano es la alta estratificación en la columna de agua, lo cual resulta en una mayor resistencia de afloramiento del agua.

Por otra parte, los resultados de este estudio coinciden con los obtenidos por Lluch-Cota (1999) sobre la concentración de pigmentos fotosintéticos, revelando que las mayores concentraciones de Clorofila-*a* se observaron durante otoño, invierno e incluso en primavera (Fig. 4.1), cuando la TSM es baja, otros autores como Badan-Dangon *et al.* (1985); Paden *et al.* (1991) y Roden (1959) también registran una distribución estacional similar de pigmentos fotosintéticos. Un aspecto importante a resaltar es que la distribución en la concentración de Chl-*a* fue de menos a más, es decir, de una zona oligotrófica en la boca del Golfo de California, pasando a una zona mesotrófica en la parte central del golfo y por último a una zona eutrófica en la región del archipiélago y en el norte del Golfo, esto coincide con un gradiente de temperatura superficial del mar en el periodo de estudio provocado por la estacionalidad de los vientos que existen a lo largo del Golfo de California.

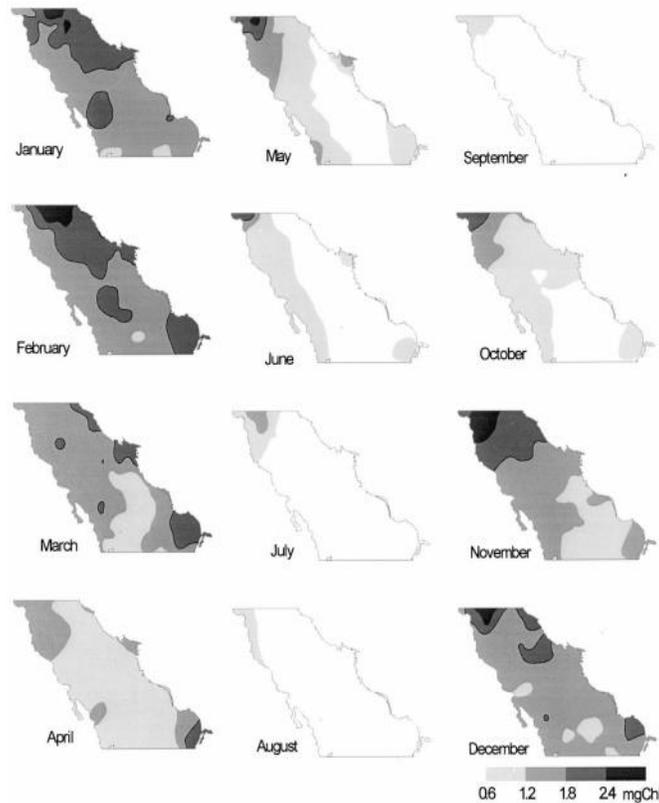


Figura.4.1. Enriquecimiento biológico en el Golfo de California durante 1970-1996 observado por medio de imágenes satelitales (tomado de Lluch-Cota, 1999).

Los resultados del análisis de imágenes satelitales coinciden con lo reportado por Soto-Mardones *et al.* (1999) y Lavín *et al.* (2003) quienes mencionan que durante eventos de El Niño la temperatura superficial del mar tiende a aumentar, resultando en una menor cantidad de nutrientes y de Chl-*a* superficial (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1994a; 1994b; Espinosa-Carreón y Valdez-Holguín, 2007). Durante el evento de El Niño 2009-2010 y La Niña 2010-2011 se observó que las mayores concentraciones de Chl-*a* ($0.5-7.0 \text{ mg m}^{-3}$) y menores temperaturas ($11-17 \text{ }^\circ\text{C}$) estuvieron presentes durante enero de 2011 asociada a la máxima señal de La Niña, mientras que las concentraciones más bajas de Chl-*a* ($0.3-3.0 \text{ mg m}^{-3}$) y elevadas temperaturas se observaron en febrero de 2010 durante el evento de El Niño.

Un resultado interesante obtenido en este estudio es que el tiempo de retorno a las condiciones de un año normal o neutro, después de eventos de El Niño o La Niña, es entre 3 y 6 meses. Durante el año 2009 donde se presentó el fenómeno de El Niño, las concentraciones de Chl-a fueron muy bajas (Fig. 4.2), con una anomalía de la TSM de 0.5°C por arriba de lo normal y un índice de anomalía de la Temperatura Superficial del Mar, según el Centro de Predicción del Clima de la NOAA de 1.5 (Escalante *et al.*, 2013).

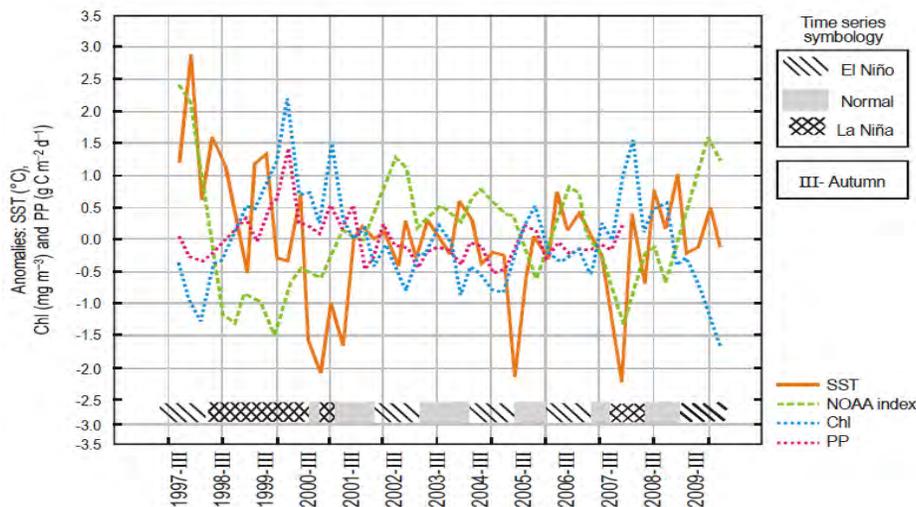


Figura 4.2. Serie de tiempo de anomalía de temperatura superficial del mar (°C) (línea naranja), Clorofila-a superficial (mg m^{-3}) (línea azul), productividad primaria ($\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$) (línea roja) e Índice de anomalía de la Temperatura Superficial del Mar (línea verde), para los años 1997 a 2009, según el Centro de Predicción del Clima de la NOAA (tomada de Escalante *et al.*, 2013).

En el presente estudio se observaron para los años 2009-2010 (evento El Niño), características de temperatura y clorofila similares a las mencionadas por Chávez *et al.* (2002) quienes reportaron que durante 1997-1998 (año Niño) en el Golfo de California, observaron altas temperaturas, elevación del nivel del mar, una termoclina más profunda y la productividad primaria disminuye debido a una menor disponibilidad de nutrientes en la zona eufótica. Por otra parte, autores como Valdez-Holguín y Lara-Lara (1987) mencionan que El Niño tiene mayores efectos en la región sur del golfo, con un decremento importante en la Clorofila-a. Sin embargo, durante El Niño 2009-2010 se observó que no solo la parte sur del Golfo

de California se ve afectada por esta masa de agua cálida, sino que incluso llega a penetrar hasta los 27°N, es decir, casi hasta la zona del archipiélago y, como consecuencia se pueden presentar un impacto negativo en los niveles tróficos superiores. La anomalía en la TSM durante eventos de El Niño dentro del Golfo de California, se debe principalmente a la entrada de Agua Tropical Superficial que es más cálida, lo que ocasiona que disminuya la mezcla vertical por el incremento de la estratificación térmica (Kahru *et al.*, 2004).

En este estudio se observaron características similares para El Niño 2009-2010 y La Niña 2010-2011 a las reportadas por Pérez-Arvizu *et al.* (2013), en donde se menciona que el sistema promueve un aumento en la cantidad de fitoplancton debido a que las condiciones del medio, de un evento a otro, presentan un menor estrés y permiten que el fitoplancton florezca en mejores condiciones ambientales. Cabe mencionar que en el estudio realizado por Pérez-Arvizu *et al.* (2013) se utilizó el Índice Multivariado ENSO (MEI por sus siglas en inglés) que toma en cuenta seis variables observables: presión a nivel del mar (P), velocidad del viento en superficie componente zonal (U) y componente meridional (V), TSM (S), temperatura superficial del aire (A) y nubosidad (C) (Wolter y Timlin, 1993), mientras que en esta tesis se utilizó el SOI. La diferencia en utilizar cierto índice depende del tipo de estudio que se va a realizar y de la especificidad en los resultados que se quieran obtener, en el caso del estudio de Arvizu *et al.* (2013), se tomaron en cuenta diferentes variables además de análisis estadísticos, mientras que en esta tesis solo se tomó en cuenta la diferencia de presión entre dos regiones (Tahití y Darwin) para observar el efecto que tiene El Niño o La Niña en el Golfo de California.

Durante La Niña de 2010-2011 según el Índice de Oscilación del Sur, el pico más alto ocurrió en diciembre de 2010, sin embargo, analizando las imágenes satelitales de temperatura superficial del mar, se observó que fue en diciembre de 2011 cuando la temperatura superficial del mar, fue más baja dentro del Golfo de California, debido a que este evento de La Niña, fue un evento de larga duración, pues se manifestó hasta el año 2012.

CONCLUSIONES

En el Golfo de California se observaron surgencias en ambas costas: durante otoño, invierno y primavera fueron intensas en la costa continental cuando el viento provenía del noroeste con velocidades $\sim 12 \text{ m s}^{-1}$, mientras que en el verano con intensidad de $\sim 5 \text{ m s}^{-1}$ se observaron surgencias débiles en la costa peninsular debido, por un lado, a la baja intensidad de los vientos y, por otro, a la estratificación de la columna de agua.

La intrusión de agua cálida al golfo fue notoria en enero de 2010 debido a la presencia de El Niño, mientras que durante La Niña en 2011, la temperatura superficial fue más baja que en condiciones neutras disminuyendo o incrementando, respectivamente la concentración de pigmentos fotosintéticos.

En cuanto a estructuras físicas se refiere, núcleos cálidos a lo largo del Golfo de California coincidieron con bajas concentraciones de Clorofila-*a*, este efecto se hizo más evidente en la boca del golfo en donde los impactos de agua cálida fueron mayores que en el resto de la región, contrariamente a lo que ocurrió en núcleos fríos.

En la zona del archipiélago, casi siempre se observaron temperaturas bajas comparadas con el resto del Golfo de California debido a la mezcla por marea, sin embargo, no siempre se observan altas concentraciones de Clorofila-*a* asociadas a los frentes térmicos inducidos por las mareas.

Los frentes térmicos se observaron de manera permanente en la zona de las grandes islas en el norte del golfo, en la Cuenca de La Paz para el año 2010 se observó un frente térmico que coincidió con altas concentraciones de Chl-*a*, además del observado en la boca del golfo el cual presentó menor concentración de clorofila-*a* respecto a la observada en la Cuenca La Paz.

Durante invierno, la zona del alto golfo permaneció con temperaturas más bajas comparadas con el resto del Golfo de California, ya que la mezcla por mareas

que siempre está actuando, provocó el ascenso de agua subsuperficial a la capa eufótica promoviendo el incremento de nutrientes lo cual provocó el incremento de Clorofila-a. Mientras que durante el verano las temperaturas fueron muy uniformes.

La distribución del promedio mensual de la concentración de clorofila-a a lo largo del golfo proporcionó mayor información sobre las estructuras físicas (vórtices ciclónicos y anticiclónicos, meandros, frentes térmicos), ya que en verano el promedio mensual de la temperatura superficial del mar fue muy uniforme y no permitió identificar dichos rasgos físicos.

Los procesos físicos que favorecieron el incremento de clorofila-a en el Golfo de California durante el periodo 2009-2013 fueron: la mezcla por mareas, los frentes térmicos, los vórtices ciclónicos, las surgencias costeras y a escala interanual la presencia de La Niña.

REFERENCIAS

- Aguirre-Gómez R., Weeks A. R., Boxall S. R. 2001. The identification of phytoplankton pigments from absorption spectra. *International Journal of Remote Sensing*, 22(2-3). Pp. 315-338.
- Aguirre-Gómez R., Salmerón O. y Álvarez R. 2003. Effects of ENSO off the southwest coast of Mexico, 1996-1999. *Geofísica Internacional*, 42 (3). Pp. 377-388.
- Álvarez-Borrego S. y Schwartzlose R. A. 1979. Masas de agua del Golfo de California. *Ciencias Marinas*. 6. Pp. 43-61.
- Álvarez-Borrego S. y Lara-Lara J. R. 1991. The physical environment and primary productivity of the Gulf of California. In: J. P. Dauphin and B. R. T. Simoneit (Eds.). *The Gulf and Peninsular Provinces of the Californias*. Am. Ass. Petr. Geol., Memoir 47. Pp. 555-567.
- Álvarez-Borrego, S. 2002. Physical oceanography. En: *New Island Biogeography of the Sea of Cortés* (Case, T. J., M. L. Cody., y E. Ezcurra, eds.) Oxford University Press. Oxford, EE. UU. Pp. 41-59
- Álvarez-Borrego S. 2012. Producción fitoplanctónica nueva como herramienta para estimar el componente vertical del intercambio de agua entre el Golfo de California y el Pacífico. *Ciencias Marinas*, 38 (1A). Pp. 89-99.
- Badan-Dangon A. Koblinsky C. J. Baumgartner T. 1984. Spring and Summer in the Gulf of California: observations of Surface thermal patterns. *OCEANOLOGICA ACTA*, Vol. 8 – N°1.
- Badan-Dangon A., Koblinsky C. J. y Baumgartner T. 1985. Spring and summer in the Gulf of California: Observations of surface thermal patterns, *Oceanol. Acta*, 8, Pp. 13-22.
- Badan-Dangon A. Dorman E. Merrifield A. Winant D. 1991. The lower atmosphere over the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 96. NO. C9. 16 877-16 896.
- Bakun A. y Nelson C. S. 1977. Climatology of upwelling related processes off Baja California, California Cooperative Oceanic Fisheries Investigation, Rep. 19, Pp. 107-127.
- Bakun A. 1996. Patterns in the ocean. Ocean processes and marine population dynamics. California Sea Grant College System, National Oceanic and

- Atmospheric Administration, en cooperación con el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, La Paz, BCS, México. ISBN 1-888691-01-8. Pp. 323.
- Bakun A., Black B. A., Bograd S. J. y García-Reyes M. 2015. Anticipated Effects of Climate Change on Coastal Upwelling Ecosystems. *Curr. Clim. Change Rep.* 1:85-93. DOI 10.1007/s40641-015-0008-4.
- Barocio-León O. A., Millán-Núñez R., Santamaría-del-Ángel E. y González-Silvera A. 2007. Phytoplankton primary productivity in the euphotic zone of the California Current System estimated from CZCS imagery. *Ciencias Marinas*. Vol. 33 (1). Pp. 59-72.
- Baumgartner M. F., Mullin K. D., May L. N., y Leming T. D. 2001. Cetacean habitats in the northern Gulf of Mexico. *Fishery Bulletin* 99. Pp. 219-239.
- Behrenfeld M. J. y Falkowski P. G. 1997. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnol. Oceanogr.* Vol. 42(1). Pp. 1-20.
- Beier, E. 1997. A numerical of the annual variability in the Gulf of California. *J. Phys. Oceanogr.*, 27: Pp. 615–632.
- Bray N. A. 1988. Water mass formation in the Gulf of California. *J. Geophys. Res.*, 93(C8). Pp. 9223–9240.
- Caballero-García C. G., Trigueros-Salmerón J. A., Ramírez-Valverde B., Rojo-Martínez G. E. y Martínez-Ruiz R. 2013. Caracterización de los perfiles verticales de clorofila-a en la bahía de La Paz, Baja California Sur, México, durante primavera y otoño del año 2009. *Serie Oceanológica*. N° 12. Pp. 48-55.
- Capel-Molina J. J. 1999. El fenómeno ENSO (El Niño/Oscilación del Sur) en 1997-1998: alteraciones climáticas inducidas en el mundo. *NIMBUS*, N° 3, Pp. 37-62.
- Carbajal, N. 1993. Modelling of the circulation in the Gulf of California. Ph. D. Thesis, University of Hamburg, Germany. Pp. 186.
- Cerano-Paredes J., Villanueva-Díaz J., Valdez-Cepeda R., Arreola-Ávila J. G. y Constante-García V. 2011. El Niño Oscilación del Sur y sus efectos en la precipitación en la parte alta de la cuenca del río Nazas. *Rev. Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. Vol. 17. Pp. 207-215.
- Cervantes-Duarte R., Aguñiga-García S. y Hernández-Trujillo S. 1993. Condiciones de surgencia asociadas a la distribución de zooplancton en San Hipólito, B. C. S. *Ciencias Marinas*, vol. 19, N° 1. Pp. 117-135.
- Chávez F. P. Pennington J. T., Castro C. G., Ryan J. P., Michisaki R. P., Schlining B., Walz P., Buck K. R., McPhaden A. y Collins C. A. 2002. Biological and

chemical consequences of the 1997-1998 El Niño in central California waters. *Progress in Oceanography* 54. Pp. 205-232.

Connor R. C., Wells R. S., Mann J. y Read A. J. 2000. The bottlenose dolphin. Social relationships in a fission-fusion society. En: *Cetacean Societies. Field Studies of Dolphins and Whales* (Mann, J, R. C. Connor, P. L. Tyack, y H. Whitehead, eds.). University of Chicago Press. Chicago, EE. UU. Pp. 91–126.

Coria-Monter E., Monreal-Gómez M. A., Salas-de-León D. A., Aldeco-Ramírez J. y Merino-Ibarra M. 2014. Differential distribution of diatoms and dinoflagellates in a cyclonic eddy confined in the Bay of La Paz, Gulf of California, *J. Geophys. Res. Oceans*, 119,6258–6268, doi:10.1002/2014JC009916.

Cross-Calibrated Multi-Platform Ocean Surface Wind Vector L3.0 First-Look Analyses PODAAC.2015. Recuperado de: [Podaac.jpl.nasa.gov](http://podaac.jpl.nasa.gov)

Descripción de una Estación Sinóptica Meteorológica – ESIME. 2016. Ciudad de México. Recuperado de: <http://smn.cna.gob.mx>

Durazo R., Ramírez-Manguilar A. M., Miranda L. E. y Soto-Mardones L. A. 2010. Climatología de variables hidrográficas en la Corriente de California frente a Baja California. En: Gaxiola-Castro G, Durazo R (eds.), *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California, 1997–2007: Diez años de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California*. Pp. 25-57.

Escalante F., Valdez-Holguín J. E., Álvarez-Borrego S. y Lara-Lara J. R. 2013. Variación temporal y espacial de temperatura superficial del mar, clorofila-a y productividad primaria en el golfo de California. *Ciencias Marinas*. Vol. 39 (2). Pp. 203-215.

Espinosa-Carreón T. L. 2005. Producción primaria en relación a procesos físicos de mesoescala en la región Sur de la Corriente de California. Tesis de Doctorado. CICESE Ensenada, México. Pp. 170.

Espinosa-Carreón L. T y Valdez-Holguín J. E. 2007. Variabilidad interanual de clorofila en el Golfo de California. *Ecol. Aplicada* 6. Pp. 81–92.

Farfán C. y Álvarez-Borrego, S. 1992. Zooplankton biomass of the northernmost Gulf of California. *Ciencias Marinas*. 18. Pp. 17–36.

Fein J. S. y Stephens P. L. 1987. *Monsoons*. Wiley-Inter- Science Publication, New York. Pp. 632.

Fernández-Barajas E. Monreal-Gómez M. A. y Molina-Cruz A. 1994. *Ciencias Marinas*, 20 (2). Pp. 267-286.

- Fiedler P. C. 1984. Satellite Observations of the 1982-1983 El Niño along the U. S. Pacific Coast. *Science*. Vol. 224. DOI: 10.1126 / science. 224.4654.1251. Pp. 1251-1254.
- Filloux, J. H. 1973. Tidal Patterns and Energy Balance in the Gulf of California. *Nature*, 243. Pp. 217-221.
- Filonov, A. E. y Lavín, M. F. 2003. Internal tides in the northern Gulf of California. *J. Geophys. Res.* 108. doi: 10.1029 / 2 0 0 2 J C 0 0 1 4 6 0.
- Gaxiola-Castro G., Durazo R., Lavaniegos B., De-La-Cruz-Orozco M. E., Millán-Núñez R., Soto-Mardones L. y Cepeda-Morales J. 2008. Respuesta del ecosistema pelágico a la variabilidad interanual del océano frente a Baja California. *Ciencias Marinas*. Vol. 34 (2). Pp. 263-270.
- Goni M. A., Thunell R. C., Woodworth M. P. y Müller-Karger F. E. 2006. Changes in wind-driven upwelling during the last three centuries: Interocean teleconnections. *Geophysical Research Letters*. Vol. 33, L15604, doi: 1029/2006GL026415.
- Guevara-Aguirre y Gallo-Reynoso. 2015. Abundancia relativa y estacionalidad de dos poblaciones de toninas (*Tursiops truncatus*) en la región de Guaymas, Sonora, Golfo de California. *THERYA*. Vol. 6 (2): Pp. 315-328.
- Hernández-de-la-Torre B., Gaxiola-Castro G. y Nájera-Martínez S. 2004. ENSO effects on primary production off Baja California. *Ciencias Marinas*. Vol. 30(3). Pp. 427-441.
- Hu C., Lee Z. y Franz B. 2012. Chlorophyll a algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on three-band reflectance difference. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 117.
- Ives R. L. 1962. The "pestiferous winds" of the upper Gulf of California, *Weatherwise*, 15, Pp. 197-201.
- Jiménez A., Marinone S. G. y Parés-Sierra A. 2005. Effect of the spatial and temporal variability of winds on the circulation in the Gulf of California. *Ciencias Marinas*. Vol. 31(2). Pp. 357-368.
- Kahru M. Marinone S. G., Lluch-Cota E. E., Parés-Sierra A. y Mitchell B. 2004. Ocean-color variability in the Gulf of California: scales from days to ENSO. *Deep-Sea Research II* 51. Pp. 139–146.
- Lara-Lara, J. R. *et al.* 2008. Los ecosistemas costeros, insulares y epicontinentales, en *Capital natural de México*. vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. Conabio, México. Pp. 109-134.

- Large W. S. y Pond S. 1981. Open ocean momentum flux measurement in moderate to strong winds. *J. Phys. Oceanogr.* 11. Pp. 324-336.
- Lavín M. F. y Marinone S. G. 2003. An overview of the physical oceanography of the Gulf of California. En: *Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics*. Kluwer Academic Publishers. Pp. 173-204.
- Lluch-Belda D., Elorduy-Garay J., Lluch-Cota S. E., Ponce-Díaz G. (Ed.) 2000. BAC Centros de Actividad Biológica del Pacífico mexicano. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, 367 p., ISBN 970-18-6285-6.
- Lluch-Cota E. 1999. Coastal upwelling in the eastern Gulf of California. *OCEANOLOGICA ACTA*, Vol. 23. N°6. Estructura termohalina y flujo geostrofico en el Golfo de California, durante 1992.
- Makarov V. y Jiménez-Illescas Á. 2003. Corrientes básicas barotrópicas en el Golfo de California. *Ciencias Marinas*, Vol. 29 (2). Pp. 141-153.
- Margalef R. 1978. Life-forms of phytoplankton as survival alternatives in an unstable environment. *Oceanologica Acta* 1. Pp. 493-509.
- Marinone, S. G. 1997. Tidal residual currents in the Gulf of California: Is the M2 tidal constituent sufficient to induce them? *J. Geophys. Res.*, 102, 8611–8623.
- Marinone S. G. 2003. A three-dimensional model of the mean and seasonal circulation of the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108.N° C10, 3325.doi:10.1029/2002JC001720.
- Mateos E., Marinone S. G. y Lavín M. F. 2006. Role of tides and mixing in the formation of an anticyclonic gyre in San Pedro Mártir Basin, Gulf of California. *Deep-Sea Research II* 53. Pp. 60-76.
- Merino M., Monreal-Gómez M. A. 2004. Ocean currents and their impact on marine life. In: *Marine Ecology. Encyclopedia of Life Support Systems*.
- Merrifield M. A. y C. D. Winant. 1989. Shelf circulation in the Gulf of California: a description of the variability. *J. Geophys. Res.* 94. 18,133-18,160.
- Molina-Cruz A. 1986. Evolución oceanográfica de la boca del golfo de California. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM*, 13(2). Pp. 95-120.
- Monreal-Gómez M. A., Salas-de-León D. A. y Aldeco-Ramírez J. 1999. Las Surgencias Costeras de América. *Revista Geofísica*. N° 51. Pp. 7-43.
- NASA Ocean Color. 2015. Recuperado de: [Oceancolor.gsfc.nasa.gov](http://oceancolor.gsfc.nasa.gov).

- Ochoa N., Rojas-de-Mendiola B. y Gómez O. 1985. Identificación del fenómeno El Niño a través de los organismos fitoplanctónicos. Instituto del Mar del Perú.
- O'Reilly J. E., y 24 coautores más. 2000. SeaWiFS post launch calibration and validation analyses, Part 3, NASA Tech. Memo. 2000-206892, Vol. 11. S. B. Hooker and E. R. Firestone, Eds., NASA, Goddard Space Flight Center. Pp. 49.
- Paden C. A. 1990. Tidal and atmospheric forcing of the upper ocean in the Gulf of California, Ph. D. thesis. Scripps Inst. Of Oceanogr. Univ. of Calif. San Diego, La Jolla. Pp. 87.
- Paden A., Abbott M. y Winant C. 1991. Tidal and atmospheric forcing of the Upper Ocean in the Gulf of California. Sea surface temperature variability. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 96, NO.C10. 18,337-18.359.
- Pérez-Arvizu E., Aragón-Noriega A. y Espinosa-Carreón T. L. 2013. Variabilidad estacional de la clorofila-a y su respuesta a condiciones El Niño y La Niña en el Norte del Golfo de California. *Biología Marina y Oceanografía*. Vol. 48. N° 1. DOI 10.4067/S0718-19572013000100011. Pp. 131-141.
- Pérez-Cruz L. 2013. Hydrological changes and paleoproductivity in the Gulf of California during middle and late Holocene and their relationship with ITCZ and North American Monsoon variability. View at Publisher. *Quaternary Research*, 79(2). Pp. 138-151.
- Robinson M. K. 1973. Atlas of monthly mean sea surface and subsurface temperatures in the Gulf of California, Mexico, Mem. 5. San Diego Soc. of Nat. Hist., San Diego, Calif. Pp. 19.
- Roden G. I. 1958. Oceanographic and Meteorological Aspects of the Gulf of California. *Pac. Sci.*, 12. Pp. 21-45.
- Roden G. I. y Groves G. W. 1959. Recent oceanographic investigations in the Gulf of California. *J. Mar. Res.*, 18. Pp. 10-35.
- Ryther J. H. 1969. Photosynthesis and fish production in the sea. *Sci.* 166. Pp. 72-80.
- Salas-de-León D. A., Carbajal N. y Monreal-Gómez A. 2003. Residual circulation and tidal stress in the Gulf of California. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-OCEANS*. 108(C10). Pp. 3317-3327.
- Salas-de-León D. A., Carbajal N., Monreal-Gómez M. A. y Gil-Zurita A. 2011. Vorticity and mixing induced by the barotropic M2 tidal current and zooplankton biomass distribution in the Gulf of California. *Journal of Sea Research*. 66. Pp. 143-153.

- Santamaría-del-Ángel E., Álvarez-Borrego S. y Muller-Karger F. E. 1994a. The 1982-1984 El Niño in the Gulf of California as seen in the coastal zone color scanner imagery. *J. Geophys. Res.* 99(C4). 7423–7431.
- Santamaría-del-Ángel E., Álvarez-Borrego S. y Muller-Karger F. E. 1994b. Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery. *J. Geophys. Res.*, 99 (C4). 7411-7421.
- Santamaría-del-Ángel E., Álvarez-Borrego S., Millán-Núñez R. y Müller-Karger F. 1999. Sobre el efecto de las surgencias de verano en la biomasa fitoplanctónica del Golfo de California. *Rev. Soc. Mex. Hist. Nat.* 49. Pp. 207–212.
- Schwing F., O'Farrell M., Steger J. M. y Baltz K. 1996. Coastal upwelling indices west coast of North America. NOAA Technical Memorandum NMFS.
- Soto-Mardones L., 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). Pp. 1-30.
- Southern Oscillation Index (SOI). 2016. Estados Unidos de América. Recuperado de: <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/soi/>.
- Sverdrup H. U. 1941. The Gulf of California: Preliminary discussion on the cruise of the E. W. Scripps in February and March 1939. *Proceedings of the Sixth Pacific Science Congress, held at Berkeley, Stanford, and San Francisco, July 24 to August 12, 1939, Vol. 3.* Pp. 161-166.
- Tershy B. R., Breese D. y Álvarez-Borrego S. 1991. Increase in cetacean and seabird numbers in the Canal de Ballenas during an El Niño-Southern Oscillation event. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* Vol. 69: 299-402.
- Thomas A. C. y Brickley P. 2006. Satellite measurements of chlorophyll distribution during spring 2005 in the California Current. *Geophysical Research Letters.* Vol. 33. L22S05. doi:10. 1029/2006GL026588.
- Trenberth K. E., Large W. G. y Olson J. G. 1990. The mean annual cycle in global ocean wind stress. *J. Phys. Oceanogr.* 20. 1742-1760.
- 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. Pp. 34-50.
- Wolter K. y Timlin M. S. 1993. Monitoring ENSO in COADS with a seasonally adjusted principal component index. En: *Proceedings of the 17th Climate Diagnostics Workshop, Norman, Oklahoma.* Pp. 52-57.

- Zaytsev O., Cervantes-Duarte R. y Montante O. 2003. Coastal Upwelling Activity on the Pacific Shelf of the Baja California Peninsula. *Journal of Oceanography*, Vol. 59. Pp. 489-502.
- Zeitzschel, B. 1969. Primary productivity in the Gulf of California. *Marine Biology* 3. Pp. 201–207.
- Zuria-Jordan I. L., Álvarez-Borrego S. y Müller-Karger F. E. 1995. Estimación de biomasa fitoplanctónica, derivada de dato de satélite, frente a Baja California Sur. *Ciencias Marinas*. Vol. 21 (3). Pp. 265-280.