



UNIVERSIDAD DE SONORA

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

POSGRADO EN BIOCENCIAS

VARIABILIDAD OCEANOGRÁFICA DE LA ZONA COSTERA DEL ESTADO DE SONORA

TESIS

Para obtener el grado de:

MAESTRO EN BIOCENCIAS

Presenta:

CARLOS MANUEL ROBLES TAMAYO

Hermosillo, Sonora, México

10 de Agosto de 2018

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



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

DERECHOS DE AUTOR

El presente trabajo de tesis se presenta como uno de los requisitos parciales para la obtención del grado de **Maestro en Biociencias** de la Universidad de Sonora.

Se deposita en la biblioteca de Ciencias Biológicas y de la Salud para ponerla a disposición de los interesados. Se permiten citas breves del material contenido en la tesis sin permiso del autor, siempre y cuando se otorgue el crédito correspondiente. Para reproducir, o en su caso referirse a este documento en forma parcial o total, se deberá solicitar la autorización al Coordinador del Programa del Posgrado.

Bajo cualquier otra circunstancia se debe solicitar permiso directamente al autor.

Atentamente

Carlos Manuel Robles Tamayo

Autor

Dra. Nohemí Gámez Meza

Coordinadora del Programa de Maestría en Biociencias

Hermosillo, Sonora, México

Agosto de 2018

VARIABILIDAD OCEANOGRÁFICA DE LA ZONA COSTERA
DEL ESTADO DE SONORA

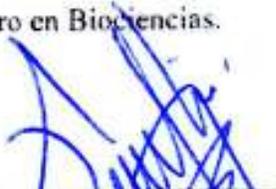
TESIS

que para obtener el grado de:
MAESTRO EN BIOCENCIAS
presenta:

CARLOS MANUEL ROBLES TAMAYO

APROBACIÓN

Los miembros del Comité designado para revisar la Tesis titulada: "Variabilidad oceanográfica de la zona costera del Estado de Sonora" presentada por: Carlos Manuel Robles Tamayo, la han encontrado satisfactoria y recomiendan que sea aceptado como requisito para obtener el grado de Maestro en Biociencias.



Dr. José Eduardo Valdez Holguín
Director



Dr. Luis Fernando Enriquez Ocaña
Secretario



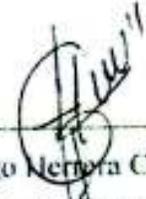
Dra. Juana López Martínez
Sinodal Externo



Dr. Ricardo García Morales
Co-Director



Dra. Gudelia Figueroa Preciado
Sinodal Interno



Dr. Hugo Herrera Cervantes
Sinodal Externo

“No es necesario civilizar la ciencia; necesitamos utilizar la ciencia para civilizar a la civilización”.

Jacques-Yves Cousteau.

Carlos Manuel Robles Tamayo

Agosto 2018

DEDICATORIA

A mi familia.

A mis maestros.

A mis amigos.

A mis compañeros del Posgrado en Biociencias de la Universidad de Sonora.

Carlos Manuel Robles Tamayo

Agosto de 2018

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Sonora como al Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (DICTUS) por aceptarme como alumno en el Programa de Maestría del Posgrado en Biociencias, por brindarme una formación académica ejemplar con nuevos conocimientos durante el desarrollo de mis estudios.

A mis padres, Carlos Alberto Robles Corbalá y Emma Patricia Tamayo Reyes. Gracias por absolutamente todo, gracias por su apoyo incondicional, por enseñarme la importancia de estudio, la responsabilidad, la perseverancia y el esfuerzo para lograr mis metas y superarme cada día más. Gracias por apoyarme en todas las decisiones que he tomado, por sus sabios consejos, por transmitirme nuevos conocimientos, por brindarme atención, comprensión y cariño único que me han dado a lo largo de mi vida, por fomentar valores y principios hacia mi persona y seguir siendo un ejemplo para mí. Gracias a ustedes toda mi vida es posible y con ello demostrarme que cada día se puede ser mejor en todos los sentidos.

A mi hermano Santiago Francisco Robles Tamayo. Gracias por los buenos momentos que pasamos juntos, por brindarme ese apoyo incondicional que sé que lo tendré en cualquier momento, ese ánimo y palabras de aliento que tienen un efecto positivo en mi vida.

A mi Director de Tesis y Profesor. Dr. José Eduardo Valdez Holguín por sus enseñanzas tanto en clase como fuera del área de clase, por su apoyo constante, por su paciencia, por demostrarme la importancia de actualizarse cada vez más en el conocimiento, por introducirme cada vez más al mundo de la oceanografía y por haberme dedicado tiempo para mi formación profesional al igual que personal con amabilidad, entusiasmo y disposición para que siga adelante y encontrar motivación cuando más lo necesitaba y así, tener un gusto apasionado por la ciencia e investigación. Es un honor trabajar con usted, es una gran persona, un excelente profesor y un ejemplo a seguir para mí.

A mi Co-Director, Ricardo García Morales por sus enseñanzas, asesoramiento y apoyo académico en la realización de este trabajo de tesis. Gracias por brindarme tiempo y paciencia en la preparación y revisión de este trabajo de forma eficaz. Ha sido un honor conocerlo y trabajar con usted.

A mis sinodales, Dr. Luis Fernando Enríquez Ocaña, Dra. Gudelia Figueroa Preciado, Dra. Juana López Martínez y Dr. Hugo Herrera Cervantes por el tiempo que le dedicaron a la revisión de este trabajo, por sus observaciones, correcciones y sobre todo por sus aportaciones para que este trabajo sea bueno y de primera calidad.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado mediante una beca y por el proyecto titulado “Respuestas poblacionales de algunas especies marinas del Golfo de California al Cambio Climático Global”. Clave CB-2015-256477.

A todos los profesores que contribuyeron a mi formación tanto académica como personal. Gracias por sus clases impartidas, por su tiempo dedicado a la preparación y disposición fuera del tiempo de clase. En particular quiero agradecer al Dr. Alf Enrique Meling López por sus enseñanzas poco ortodoxas que tuvieron un impacto positivo en mi desarrollo académico y sobre todo a la Dra. Gudelia Figueroa Preciado por sus consejos, por su apoyo, por permitirme trabajar con usted y por confiar en mi desde los inicios de la maestría lo cual me motivó para echarle más ganas al trabajo y ser un mejor estudiante. Es usted una profesora ejemplar.

A los estudiantes de estancias de investigación de la Licenciatura en Biología que me ayudaron en la obtención y procesamiento de datos de este trabajo.

Al Laboratorio de Investigación y Consultoría Estadística (LICE) del Departamento de Matemáticas, en particular al Dr. José Arturo Montoya Laos por su asesoría, disposición para ayudarme en proporción de ideas y soluciones mediante la aplicación de la estadística y por darle un enfoque más amplio en el momento de desarrollar nuevas ideas y resultados. También quiero agradecer a los compañeros que tuve en el curso de Temas Selectos de Estadística en el Semestre 2017-2 Daniel Eduardo Fernández Villalobos, Itchel Nathaly Osuna Llamas, Jazmín Sarahí Flores Gómez, Grecia Mendoza Aviña, Jessica Isamar Uriarte García, Saúl Sebastián Pérez Núñez y Hugo de Jesús Valenzuela Chaparro por su maravillosa contribución de ideas al desarrollo de este proyecto.

A mis compañeros de generación del Posgrado en Biociencias Crescent Fernando Berrelleza Valdez, Hugo Cañedo Orihuela, Lorenzo Enrique Costich González, María Luisa Juárez Gómez, José Pablo Lovio Fragoso, Oscar Enrique López Bujanda, Jonathan Abigail Paredes Aguilar, Fernando Guadalupe Razo Mendívil, Génesis Valenzuela

Quintero y Celia Guadalupe Valenzuela Sánchez. Una generación bastante agradable en donde compartimos bastantes horas de estudio y en la elaboración de tareas, discusiones de trabajos, pero también y lo más importante una grata y maravillosa compañía, buenos momentos con pláticas y risas. Son personas con las que he compartido grandes experiencias a lo largo de la maestría. Sé que cuento con ustedes y les deseo lo mejor y el mayor éxito posible en su futuro y espero seguirnos encontrando.

Carlos Manuel Robles Tamayo

Agosto de 2018

RESUMEN

Las zonas costeras son áreas con un alto flujo de energía y materiales donde se desarrollan diversos ecosistemas. El estudio de la oceanografía costera es importante para comprender la variabilidad de estos ecosistemas y determinar su papel en los ciclos biogeoquímicos y cambio climático. El análisis de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) es indispensable para la caracterización de procesos físicos y biológicos, y puede ser afectada por procesos en escalas espacio temporales muy diversas. El análisis de la clorofila *a* (Chl *a*) es indispensable para la cuantificación de biomasa fitoplanctónica considerada la base principal de la cadena trófica en los océanos y un indicador del estado trófico. El objetivo de este trabajo es describir la variabilidad oceanográfica de la zona costera del Estado de Sonora a través del estudio de la TSM y Chl *a* a partir de análisis de series de tiempo (transformada rápida de Fourier) de datos mensuales obtenidos de los sensores remotos AVHRR-Pathfinder Versión 5.1 y Versión 5 con 4 km de resolución; MODIS-Aqua con una resolución de 4 km para el período de Septiembre 1981 a Marzo 2016; SeaWiFS y MODIS-Aqua con una resolución de 9 km para el período de Septiembre 1997 a Enero 2018. Se obtuvo un Análisis de Clusters agrupado en cuatro regiones (Sur, Centro, Grandes Islas y Norte); un decrecimiento de la TSM en dirección Sur a Norte con valores mínimos durante Enero y Febrero entre los 18 y 20 °C y valores máximos entre 30 y 32 °C durante Agosto y Septiembre; la Chl *a* obtuvo valores mínimos en el mes de Agosto cerca de los 0.5 mg/m³ y valores máximos en el mes de marzo alrededor de los 3 mg/m³. El Análisis de Fourier en cada región mostró frecuencias de variación en escalas: anual, estacional, semianual e interanual.

ABSTRACT

Coastal zones are areas with a high flow of energy and materials where diverse ecosystems are developed. The study of coastal oceanography is important to understand the variability of these ecosystems and determine their role in the biogeochemical cycles and the climate change. The analysis of Sea Surface Temperature (SST) is indispensable for the characterization of physical and biological processes, and processes in very diverse temporal space scales can affect it. The analysis of Chlorophyll *a* (Chl *a*) is indispensable for the quantification of phytoplankton biomass considered the main base of the food chain in the oceans and it is an indicator of the trophic state index. The objective of this work is to describe the oceanographic variability of the coastal zone from Sonora State through the study of the SST and Chl *a* through the time series (Fast Fourier Transformation) analysis obtained from the remote sensors AVHH-Pathfinder Version 5.1 and Version 5 with 4 km resolution and MODIS-Aqua with 4 km resolution for the period from September 1981 to March 2016; SeaWiFS and MODIS-Aqua with a 9 km resolution for the period from September 1997 to January 2018. Clusters Analysis grouped four regions (South, Central, Midriff Islands and North); a SST decrease from South to North with minimum values during January and February between 18 and 20 °C and maximum values in August and September between 30 and 32 °C; the Chl *a* showed minimum values in August near of 0.5 mg/m³ and maximum values in March around the 3 mg/m³. Fourier analysis showed frequencies of variation in scales: annual, semi-annual and interannual.

INDICE GENERAL

	Página
APROBACIÓN	i
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
INTRODUCCIÓN	1
I. ANTECEDENTES	4
I.1. El Golfo de California	4
I.2. Transformaciones y escenarios del clima	7
I.3. Análisis de variabilidad oceanográfica en el Golfo de California y zona costera de Sonora	9
II. JUSTIFICACIÓN	12
III. HIPÓTESIS CIENTÍFICA	13
IV. OBJETIVOS	14
IV.1. Objetivo general	14
IV.2. Objetivos específicos	14
V. METODOLOGÍA	15
V.1. Área de estudio	15
V.2. Caracterización oceanográfica y obtención de datos mensuales de Temperatura Superficial del Mar (TSM) y Clorofila <i>a</i> (Chl <i>a</i>)	17
V.3. Análisis y procesamiento de datos mensuales de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) y Clorofila <i>a</i> (Chl <i>a</i>)	18
VI. RESULTADOS	20
VI.1. Caracterización de Regiones	20
VI.2. Análisis de series de tiempo y climatología	27
VI.3. Diagramas de dispersión y correlación entre Temperatura Superficial del Mar (TSM) y Clorofila <i>a</i> (Chl <i>a</i>)	54
VI.4. Análisis de Fourier	58
VII. DISCUSIÓN	63
VIII. CONCLUSIÓN	71
IX. LITERATURA CITADA	72

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA		PÁGINA
1.	Mapa de la zona costera del Estado de Sonora con la ubicación de los diferentes puntos de muestreo de los datos mensuales de TSM y Chl <i>a</i> .	16
2.	Localización de los diferentes puntos de análisis de datos mensuales de TSM de la zona costera del Estado de Sonora en el mes de enero de 2007 del sensor Aqua MODIS.	18
3.	Localización de los diferentes puntos de análisis de datos mensuales de Chl <i>a</i> de la zona costera del Estado de Sonora en el mes de enero de 2007 del sensor Aqua MODIS.	18
4.	Análisis de Clusters de la zona costera del Estado de Sonora en base a los valores de TSM.	20
5.	Análisis de Clusters de la zona costera del Estado de Sonora en base a los valores de Chl <i>a</i> .	21
6.	Distribución de la TSM en la Región Sur de la zona costera del Estado de Sonora.	22
7.	Distribución de la TSM en la Región Centro de la zona costera del Estado de Sonora.	23
8.	Distribución de la TSM en la Región de las Grandes Islas de la zona costera del Estado de Sonora.	23
9.	Distribución de la TSM en la Región Norte de la zona costera del Estado de Sonora.	24
10.	Distribución de la Chl <i>a</i> en la Región Sur de la zona costera del Estado de Sonora.	25
11.	Distribución de la Chl <i>a</i> en la Región Centro de la zona costera del Estado de Sonora.	25
12.	Distribución de la Chl <i>a</i> en la Región de las Grandes Islas de la zona costera del Estado de Sonora.	26
13.	Distribución de la Chl <i>a</i> en la Región Norte de la zona costera del Estado de Sonora.	26
14.	Serie de tiempo de la TSM de la Región Sur de la zona costera del Estado de Sonora.	28
15.	Serie de tiempo de la TSM de la Región Centro de la zona costera del Estado de Sonora.	28
16.	Serie de tiempo de la TSM de la Región Grandes Islas de la zona costera del Estado de Sonora.	29
17.	Serie de tiempo de la TSM de la Región Norte de la zona costera del Estado de Sonora.	29
18.	Anomalías de la serie de tiempo de la TSM de la Región Sur de la zona costera del Estado de Sonora.	30
19.	Anomalías de la serie de tiempo de la TSM de la Región Centro de la zona costera del Estado de Sonora.	31
20.	Anomalías de la serie de tiempo de la TSM de la Región de las Grandes Islas de la zona costera del Estado de Sonora.	31

21.	Anomalías de la serie de tiempo de la TSM de la Región Norte de la zona costera del Estado de Sonora.	32
22.	Serie de tiempo de la Chl <i>a</i> de la Región Sur de la zona costera del Estado de Sonora.	33
23.	Serie de tiempo de la Chl <i>a</i> de la Región Centro de la zona costera del Estado de Sonora.	33
24.	Serie de tiempo de la Chl <i>a</i> de la Región de las Grandes Islas de la zona costera del Estado de Sonora.	34
25.	Serie de tiempo de la Chl <i>a</i> de la Región Norte de la zona costera del Estado de Sonora.	34
26.	Anomalías de la serie de tiempo de la Chl <i>a</i> de la Región Sur de la zona costera del Estado de Sonora.	35
27.	Anomalías de la serie de tiempo de la Chl <i>a</i> de la Región Centro de la zona costera del Estado de Sonora.	36
28.	Anomalías de la serie de tiempo de la Chl <i>a</i> de la Región de las Grandes Islas de la zona costera del Estado de Sonora.	36
29.	Anomalías de la serie de tiempo de la Chl <i>a</i> de la Región Norte de la zona costera del Estado de Sonora.	37
30.	Climatología general de la TSM de la zona costera del Estado de Sonora.	33
31.	Climatología de la TSM de cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora.	39
32.	Anomalías de la climatología de la TSM de cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora.	41
33.	Diagrama de caja de bigotes de la TSM de la varianza de cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora durante la etapa de verano.	42
34.	Diagrama de caja de bigotes de la TSM de la varianza de cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora durante la etapa de invierno.	43
35.	Análisis de Curva ROC de la TSM entre cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora durante la etapa de verano.	44
36.	Análisis de Curva ROC de la TSM entre cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora durante la etapa de verano.	45
37.	Climatología general de la Chl <i>a</i> de la zona costera del Estado de Sonora.	46
38.	Climatología de la Chl <i>a</i> de cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora.	48
39.	Anomalías de la climatología de la Chl <i>a</i> de cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora.	49
40.	Diagrama de caja de bigotes de la Chl <i>a</i> de la varianza de cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora durante la etapa de verano.	50
41.	Diagrama de caja de bigotes de la Chl <i>a</i> de la varianza de cada	51

	una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora durante la etapa de invierno.	
42.	Análisis de Curva ROC de la $Chl\ a$ entre cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora durante la etapa de verano	52
43.	Análisis de Curva ROC de la $Chl\ a$ entre cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora durante la etapa de invierno.	53
44.	Regresión lineal del modelo de $Chl\ a$ vs. TSM de la zona costera del Estado de Sonora.	55
45.	Regresión lineal del modelo de $Chl\ a$ vs. TSM de la Región Sur de la zona costera del Estado de Sonora.	56
46.	Regresión lineal del modelo de $Chl\ a$ vs. TSM de la Región Centro de la zona costera del Estado de Sonora.	56
47.	Regresión lineal del modelo de $Chl\ a$ vs. TSM de la Región de las Grandes Islas de la zona costera del Estado de Sonora.	57
48.	Regresión lineal del modelo de $Chl\ a$ vs. TSM de la Región Norte de la zona costera del Estado de Sonora.	57
49.	Análisis de Fourier de la serie de tiempo de la TSM de la Región Sur de la zona costera del Estado de Sonora.	58
50.	Análisis de Fourier de la serie de tiempo de la TSM de la Región Centro de la zona costera del Estado de Sonora.	59
51.	Análisis de Fourier de la serie de tiempo de la TSM de la Región de las Grandes Islas de la zona costera del Estado de Sonora.	59
52.	Análisis de Fourier de la serie de tiempo de la TSM de la Región Norte de la zona costera del Estado de Sonora.	60
53.	Análisis de Fourier de la serie de tiempo de la $Chl\ a$ de la Región Sur de la zona costera del Estado de Sonora.	60
54.	Análisis de Fourier de la serie de tiempo de la $Chl\ a$ de la Región Centro de la zona costera del Estado de Sonora.	61
55.	Análisis de Fourier de la serie de tiempo de la $Chl\ a$ de la Región de las Grandes Islas de la zona costera del Estado de Sonora.	61
56.	Análisis de Fourier de la serie de tiempo de la $Chl\ a$ de la Región Norte de la zona costera del Estado de Sonora.	62

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA		PÁGINA
1.	Lista de coordenadas geográficas de cada punto de muestreo de la zona costera del Estado de Sonora, Golfo de California.	16
2.	Pruebas de normalidad de los valores de TSM de cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora.	24
3.	Pruebas de normalidad de los valores de Chl <i>a</i> de cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora.	27
4.	Datos estadísticos de la climatología de la TSM de cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora.	37
5.	Datos estadísticos de la climatología de la TSM de cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora durante la etapa de verano.	40
6.	Datos estadísticos de la climatología de la TSM de cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora durante la etapa de invierno.	40
7.	Comparación múltiple con un ajuste de Bonferroni entre las cuatro regiones de la zona costera del Estado de Sonora durante la etapa de verano.	42
8.	Comparación múltiple con un ajuste de Bonferroni entre las cuatro regiones de la zona costera del Estado de Sonora durante la etapa de invierno.	42
9.	Datos estadísticos de la climatología de la Chl <i>a</i> de cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora.	46
10.	Datos estadísticos de la climatología de la Chl <i>a</i> de cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora durante la etapa de verano.	48
11.	Datos estadísticos de la climatología de la Chl <i>a</i> de cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora durante la etapa de invierno.	48
12.	Comparación múltiple con un ajuste de Bonferroni entre las cuatro regiones de la zona costera del Estado de Sonora durante la etapa de verano.	50
13.	Comparación múltiple con un ajuste de Bonferroni entre las cuatro regiones de la zona costera del Estado de Sonora durante la época de invierno.	50
14.	Niveles tróficos en base al contenido de clorofila <i>a</i> (mg/m ³) en base a la escala de Morel y Berthon (1989).	54

INTRODUCCIÓN

La mayoría de la superficie del Planeta Tierra está compuesta por océanos y mares, considerados sistemas dinámicos asociados a corrientes superficiales y profundas. Sin embargo, los niveles, así como los gradientes de temperatura y salinidad determinan características particulares en la columna de agua de los océanos como estratificación, los mismos sistemas de corrientes, surgencias y procesos de mezclas que fomentan un alto nivel de heterogeneidad en el ambiente marino y un alto nivel de biodiversidad (Lara-Lara *et al.*, 2008).

Las áreas oceánicas comparten ciertas características como la topografía, sistemas de corrientes y variaciones de temperatura que promueven el desarrollo de poblaciones de flora y fauna que pueden ser afectados por cambios ambientales de tipo estacional a través de los años. La interacción entre los factores abióticos y bióticos lo convierten en grandes ecosistemas marinos (Morrissey, 1991). El mar es una masa de agua heterogénea que presenta una gran biodiversidad al igual que regiones, ecosistemas, entre los cuales se encuentran las zonas costeras.

Las zonas costeras son eco-regiones amplias con intensas interacciones físicas, biológicas y socioeconómicas que presenta un intercambio dinámico de energía y materiales entre el medio terrestre, medio acuático y la atmósfera (Yañez-Arancibia y Day, 2010). Al presentar estas características, las zonas costeras generan diversos ecosistemas como lagunas costeras, arrecifes, estuarios, manglares que desempeñan un papel fundamental en la protección de la línea de costa, prevención de inundaciones, recarga de agua de acuíferos (Berlanga-Robles y Ruíz-Luna, 2006).

Las zonas costeras juegan un rol importante en los ciclos biogeoquímicos como el ciclo del carbono, nitrógeno, fósforo, entre otros (Hernández-Ayón *et al.*, 2007). Estas zonas son áreas altamente productivas debido a la gran disponibilidad de recursos naturales que las hacen áreas importantes de refugio, alimentación y desove de una gran cantidad de fauna silvestre fomentando una alta diversidad biológica (Martínez-López *et al.*, 2001) al igual que una amplia variedad de bienes y servicios directos e indirectos a la sociedad

mediante actividades productivas como la pesca, acuacultura, agricultura, entre otras (Barraza-Guardado *et al.*, 2014).

En la actualidad se han utilizado diversas variables de interés para describir la oceanografía de la zona costera, entre ellas se encuentran la Temperatura Superficial del Mar (TSM) y la Clorofila *a* (Chl *a*). La TSM es considerada la variable más importante en oceanografía que está influenciada por parámetros climatológicos, meteorológicos, hidrodinámicos y topográficos (Iglesias *et al.*, 2010) y su distribución espaciotemporal es útil para la localización de frentes térmicos, sistemas de corrientes de los océanos y el intercambio de energía térmica entre el océano y la atmósfera (Rojas-Acuña y Eche-Llenque, 2006) al igual que para indicar cambios en niveles de productividad primaria (Martínez-Flores *et al.*, 2006).

Por otro lado, el análisis de la Chl *a* es indispensable en la oceanografía para la cuantificación de biomasa fitoplanctónica y su distribución determina niveles de productividad primaria (Barocio-León *et al.*, 2007) y de fertilidad en los océanos (Lara-Lara *et al.*, 1993) que sirven como un indicador del estado trófico. El nivel de biomasa y producción de fitoplancton es considerado la base principal de la red trófica en los ecosistemas pelágicos de los océanos y en los sistemas acuáticos es una propiedad ecológica clave al cuantificar la tasa de conversión de carbono inorgánico a carbono orgánico a través del fitoplancton mediante fotosíntesis (Gaxiola-Castro *et al.*, 2010); la fijación fotosintética es realizada casi totalmente por el fitoplancton en el océano (Valdez-Holguín *et al.*, 1999) que sostiene la vida de todo el ecosistema.

En la actualidad se han utilizado sistemas de clasificación biogeográfica como herramientas esenciales para diferentes actividades como delimitar regímenes oceanográficos y ligarlas a procesos oceanográficos o estructuras geofísicas para definir las por separado (Díaz de León-Corral *et al.*, 2009). El océano se puede regionalizar mediante métodos directos o indirectos facilitando el estudio de grandes áreas con patrones de variación utilizando como indicadores la temperatura del agua, masas de agua, barreras físicas, clima, topografía y áreas productivas (Millán-Núñez *et al.*, 2006).

Para el análisis de la variabilidad de la TSM y Chl *a* es importante a estudiar sus tendencias de cambio asociadas a modificaciones ambientales que pueden ser de tipo

natural o antropogénico (Morales-Hernández *et al.*, 2016) desarrollando muchos cambios en la variabilidad de la temperatura y clorofila. Desde esta perspectiva el uso de sensoria remota es una técnica que puede proporcionar una alta resolución temporal y una amplia cobertura de variables ambientales y su costo es relativamente bajo a comparación de los métodos para realizar estimaciones *in situ* de embarcaciones que no se consideran adecuadas cuando se trata de obtener datos de áreas extensas y de largo plazo y una de sus aplicaciones en la oceanografía es el cálculo de la TSM y Chl *a*. El uso de satélites mediante sensoria remota ha permitido la obtención de información precisa a escala global describiendo los aspectos físicos y biológicos de los océanos a nivel global estando en función de cambios estacionales, anuales e interanuales (Longhurst A.R., 2007).

El Golfo de California (GC) es un mar cerrado con características intrínsecas que no se presentan en el Océano Pacífico (Morrissey, 1991). Las zonas costeras del GC se consideran sitios importantes debido a sus altos niveles de productividad primaria con una variación desde estacional hasta interanual (Escalante-Almazán *et al.*, 2013). Estos niveles de productividad primaria son debido una nutriclina somera que favorece un abastecimiento de nutrientes por procesos de mezcla vertical por vientos y mareas, surgencias y aportes continentales (Álvarez-Borrego, 1983), además de la rápida mineralización de la materia orgánica en la parte pelágica y bentónica (Chen y Borges, 2009). Estas zonas costeras al igual que el océano adyacente, tienden a presentar desde variaciones estacionales hasta interanuales; estas últimas asociadas a los fenómenos climáticos El Niño y La Niña se manifiestan con cambios en los niveles de temperatura de la columna de agua y en la biomasa fitoplanctónica generando un impacto en los ecosistemas marinos.

Los estudios de la oceanografía costera del GC, en particular del Estado de Sonora, han sido llevados a cabo en lagunas o bahías y no existen estudios de la variabilidad a lo largo de la zona costera. Estos sitios son considerados vulnerables a cambios naturales y antropogénicos que tienen un papel importante en los ciclos biogeoquímicos. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es describir la variabilidad oceanográfica espaciotemporal de meso escala (mensual y regional) de la zona costera oriental del GC mediante el análisis de la TSM y Chl *a* mediante uso de imágenes satelitales.

I. ANTECEDENTES

I.1. El Golfo de California

El GC es una mar marginal semicerrado de aproximadamente 240,000 km² que se encuentra en el Océano Pacífico Oriental localizado en el noroeste de México. Se encuentra rodeado de regiones áridas y montañosas que abarcan la península de Baja California y los estados de Sonora, Sinaloa y Nayarit que influyen en los patrones climáticos (Morrissey, 1991). Presenta una serie de cuencas separadas por umbrales, con profundidades mayores de 3000 metros en la región de la boca hasta muy someras en la parte norte siendo igual o menores de 200 metros (Álvarez-Borrego, 2007). Se caracteriza por ser una cuenca de evaporación, con una longitud y anchura promedio de aproximadamente 1,400 y 150-200 km respectivamente (Lavín y Marinone, 2003). Topográficamente se puede dividir básicamente en dos provincias hidrográficas separadas por las Islas Ángel de la Guarda e Isla Tiburón (Valdez-Holguín y Lara-Lara, 1987). La costa peninsular es en su mayoría rocosa con tramos arenosos y plataforma compacta y carece casi por completo de drenaje de ríos debido al clima subdesértico, mientras que la costa continental presenta playas arenosas, lagunas costeras, bahías fangosas, una plataforma continental amplia y grandes suministros de agua dulce (Lluch-Cota *et al.*, 2007).

El Golfo de California presenta un clima más continental que oceánico, contribuyendo a los grandes rangos de temperatura anuales y diurnas. Los cielos son generalmente despejados, lo que permite que sea un sitio ideal para la calibración de sensoria remota de color de satélites. En general, sus características hidrográficas indican altos niveles de productividad; aguas bajas en oxígeno y con alto nivel de nutrientes se encuentran a profundidades muy bajas y se necesita relativamente poca energía para que estos nutrientes lleguen a la zona eufótica (Álvarez- Borrego, 2012).

Es un mar dinámico debido a las corrientes de marea, la transferencia de momento del viento, las surgencias y el elevado calentamiento solar (Álvarez-Borrego, 2007). Su dinámica física y ecológica es generalmente de carácter estacional (Lluch-Cota *et al.*, 2010) con una circulación general del agua se debe principalmente por efectos del viento, los ciclos de marea y el intercambio de calor (Lara-Lara *et al.*, 1993; Lluch-Cota *et al.*, 2010);

presenta vientos del noroeste durante diciembre a mayo, que favorecen procesos de surgencias intensas frente a la costa oriental. Durante estas "condiciones de invierno", la entrada de nutrientes favorece el incremento de biomasa de las comunidades fitoplanctónicas. Mientras que, de julio a octubre, los vientos dominantes son del sureste, son débiles y no tienen energía suficiente para romper la fuerte estratificación térmica de la columna de agua en verano, estas "condiciones de verano" no tienen un efecto en los niveles de biomasa fitoplanctónica. Los meses de junio y noviembre son considerados los períodos de transición entre ambas épocas (Álvarez-Borrego, 2010) y pueden ser detectados mediante imágenes de satélite (Lluch-Cota *et al.*, 2010).

El Golfo de California presenta diferentes características oceanográficas a lo largo de sus regiones. La Región Sur que presenta mayor comunicación con el océano pacífico a través la boca tiene una estructura hidrográfica complicada debido a la confluencia de diferentes masas de agua (Soto-Mardones *et al.*, 1999) registrando valores de temperatura mayores de 25° C en verano y 20° C en invierno (Valdez-Holguín *et al.*, 1999); presenta una distribución vertical de nutrientes similar al mar abierto y se caracteriza por tener la más baja población de fitoplancton en todo el golfo (Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991). La Región Centro se caracteriza por presentar procesos de mezcla por mareas y surgencias causadas por vientos de carácter estacional; vientos del noroeste durante invierno y primavera causan surgencias en la costa este, mientras que en la costa oeste ocurren vientos del sur durante verano (Badán-Dangón *et al.*, 1985) desarrollando altas tasas de productividad primaria mayores que en otros océanos (Valdez-Holguín y Lara-Lara, 1987). Esta región presenta rangos de temperatura de entre 16 y 18°C en invierno y 28°C y 30°C respectivamente en verano (López-Verdín, 1999). La Región de las Grandes Islas presenta una distribución vertical de nutrientes de manera constante controlada por procesos de mezcla asociados a la marea (Hernández-Ayón *et al.*, 2013); De acuerdo a Hidalgo-González *et al.* (1997) en las cercanías de la Isla Tiburón y Ángel de la Guarda se presentan umbrales y cuencas profundas formando corrientes de marea fuentes, principalmente en los canales. Esta región se caracteriza por presentar un comportamiento y dinámica particular en la distribución de la temperatura; en el sur de la Isla Ángel de la Guarda e Isla Tiburón presenta una disminución de la temperatura a medida que aumenta la profundidad en el sur con menos de 2 °C mientras que en el Canal de Ballenas la distribución de la temperatura

es totalmente diferente con valores alrededor de 11 °C incluso en áreas muy profundas (Álvarez-Borrego, 2008). La Región Norte se caracteriza en su mayoría por ser un área somera con profundidades no mayores de 200 metros con una influencia importante de procesos de mezcla por mareas (Bastidas-Salamanca *et al.*, 2014) al igual que un alto nivel de turbidez que presenta una alta concentración de nutrientes, principalmente en el delta del Río Colorado, considerado con alta energía cinética turbulenta que mantiene la suspensión de sedimentos generando un procesos de fertilización en la capa superficial y en consecuencia, una alta turbidez que genera poca penetración de luz solar (Millán-Núñez *et al.*, 1999). Esta región presenta altos valores de salinidad superficial y temperaturas de entre 10°C en invierno a 32°C en verano (Sverdrup, 1941; Valdez-Holguín, 1999); en la región norte las temperaturas son bajas debido a procesos de mezcla por marea y viento en la columna de agua (Robinson, 1973). En base a este patrón de distribución de temperatura hay mayor disponibilidad de nutrientes en la región de las islas y decrece hacia el norte y sur (Álvarez-Borrego *et al.*, 1978).

El Golfo de California presenta características físicas y biológicas únicas que no se encuentran en el Océano Pacífico adyacente (Morrissey, 1991). Es considerado como un área altamente productiva y reconocida por ser un área óptima de reproducción y refugio de diversas especies neotónicas como el camarón, sardina y tiburón al igual que para invertebrados marinos bentónicos debido a procesos de mezclas eficientes de las masas de agua que fomenta la fertilización del fitoplancton y zooplancton (Ledesma-Vázquez *et al.*, 2009). Tiene una de las más grandes biodiversidades marinas del mundo, algunas de ellas endémicas y que son de gran interés para la conservación (Lluch-Cota *et al.*, 2010). Desde un punto de vista ecológico y en base a sus altos niveles de productividad primaria se considera una región importante para la actividad pesquera contribuyendo al 40% del total de la captura a nivel nacional (Lluch-Cota *et al.*, 2010). En la región se producen distintas pesquerías, desde pelágicas hasta costeras con niveles particulares de captura y variabilidad (Lluch-Cota *et al.*, 2007); se pueden identificar tres tipos de flotas, dos de ellas comerciales. La flota industrial se dirige principalmente a la sardina, camarón, atún y tiburón. La flota de pequeña escala es dirigida a varios recursos pesqueros como tiburones, corvinas, meros, jureles, peces gato, lisas y algunos invertebrados como el calamar gigante, almejas, camarones, algas, cangrejos y caracoles. El tercer tipo de flota es la pesca deportiva donde

se captura más de 20 especies como el pez espada y el dorado que son los más importantes (Arreguín-Sánchez *et al.*, 2017).

La zona costera de Sonora presenta alrededor de 1207.81 km de costa caracterizados por presentar diversos ecosistemas (manglares, pastos marinos, marismas, lagunas costeras, costas arenosas y rocosas) y cuerpos de agua que tienen un rol importante en las pesquerías y acuicultura al igual que otras actividades humanas como la agricultura, turismo y transporte marítimo (Castañeda-López y Contreras-Espinosa, 2003; Arreola-Lizárraga *et al.*, 2012). Esta zona costera tiene una llanura costera con un extenso río deltaico formado por los ríos Colorado, Sonora, Yaqui y Mayo (Álvarez-Arellano y Gaitán-Moran, 1994). Los vientos costeros estacionales desarrollan una circulación en la superficie del mar a lo largo de la costa, desde el noroeste durante octubre-marzo y desde el sureste durante junio-septiembre (Badan-Dangon *et al.*, 1985; Reyes y Lavín, 1997) desarrollando una circulación superficial del mar hacia el norte durante el verano y el al sur durante el invierno.

I.2. Transformaciones y escenarios del clima

El sistema climático de la tierra varia naturalmente en diferentes rangos de escalas temporales que abarcan ciclos estacionales, patrones interanuales, ciclos interdecadales, hasta cambios de escala multimilenial reflejando la variabilidad natural como adaptaciones evolutivas y patrones biogeográficos a gran escala (Harley *et al.*, 2006). El GC en general presenta una variación estacional donde la amplitud de las variables físicas tiende a aumentar de sur a norte. En la zona norte, los estudios a largo plazo han documentado cambios dramáticos en las temperaturas del agua de la superficie del mar y la estructura de la comunidad de flora y fauna desde el invierno hasta el verano (Lluch-Cota *et al.*, 2007). Estos cambios en ciertas variables oceanográficas pueden estar asociadas al cambio climático.

El cambio climático se define como una transformación del clima en la Tierra, que persiste por un tiempo prologando de al menos 30 años (Lluch-Cota *et al.*, 2010). Puede tener un origen natural o antropogénico. Los efectos de cambio climático pueden ser identificados a través de modificaciones en la media de sus variables y su climatología

(IPCC, 2014). Estas transformaciones generalmente son cambios en los promedios de las condiciones atmosféricas presentes por décadas o por más tiempo.

En los últimos años, las actividades antropogénicas han aumentado de forma drástica contribuyendo al cambio climático, principalmente por el aumento de los niveles de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera generando cambios en aspectos físicos y químicos en los ecosistemas marinos (Harley *et al.*, 2006; Doney *et al.*, 2012). El efecto del cambio climático tiende a ser un factor importante en los ecosistemas marinos por su influencia en los procesos oceanográficos (McLean *et al.*, 2001). Uno de los cambios físicos de mayor impacto asociados al cambio climático en la zona costera se asocian con las modificaciones en la frecuencia y/o intensidad de las tormentas y el ascenso del nivel medio del mar (Arreola-Lizárraga *et al.*, 2012), modificación en los vientos, aumento en los niveles de estratificación y alteración de patrones de circulación de los océanos; esto genera a la vez cambios químicos en la biogeoquímica de la columna de agua alterando los niveles de dióxido de carbono, oxígeno y el nivel de pH (Harley *et al.*, 2006). Estos cambios físicos y químicos generan diversas consecuencias en los ecosistemas marinos afectando la fisiología, el comportamiento, aspectos demográficos de los organismos alterando su estructura del tamaño, rango de distribución y la abundancia de las poblaciones en consecuencia generando cambios en sus interacciones, redes tróficas, cambios en la comunidad y funcionamiento del ecosistema (Doney *et al.*, 2012). La temperatura, nivel del mar y vientos se consideran indicadores del cambio climático, debido a que su variabilidad se debe a anomalías entre el océano y atmósfera y cambios en la radiación solar, modificaciones en el Planeta Tierra y actividades antropogénicas.

En el caso del Golfo de California se presentan señales de tipo estacional fuertes en la temperatura superficial del mar al igual que en la clorofila *a*. A una escala interanual, las señales más significativas provienen de los fenómenos climatológicos que son El Niño y La Niña (Soto-Mardones *et al.*, 1999; Lluch-Cota *et al.*, 2010), los cuales tienen un impacto en la TSM y Chl *a*. El Fenómeno El Niño se caracteriza por presentar un calentamiento anormal del Océano Pacífico Ecuatorial presentando teleconexiones climáticas globales considerada la variabilidad dominante cíclica del clima en escalas de tiempo subdecadales (Yen *et al.*, 2009). Es considerada la fase cálida de la Oscilación del Sur caracterizada por un balance en la presión del nivel del mar tropical entre el Pacífico Oriental y Occidental

asociado al debilitamiento y fortalecimiento de vientos alisios orientales sobre el Pacífico Tropical (Vikas y Dwarakish, 2015); El Niño-Oscilación Sur corresponde a la fase cálida que aparece entre cada 2 a 7 años (Hamedani-Azmoordehfar y Ali-Azarmsa, 2013) caracterizada por un debilitamiento de vientos alisios que se dirigen en dirección oeste permitiendo que las aguas superficiales cálidas se inviertan su dirección hacia el este y por la ausencia de surgencias de agua fría a lo largo de la costa oeste de América del Sur generando un impacto climático en los niveles de TSM, cambios en la precipitación y afectado la productividad biológica al igual que actividades como la pesca en el Pacífico Oriental debido a que la aparición de agua cálida rompe el efecto de surgencias y por lo tanto, la producción de fitoplancton (Vikas y Dwarakish, 2015). Esto a la vez afecta actividades económicas de la zona costera como la pesca a través de alteraciones biológicas severas como aumentos en las tasas de mortalidad, fallas en el reclutamiento de individuos y crecimientos somáticos disminuidos (Luch-Cota *et al.*, 1999). Por otro lado, se tiene la fase contraria denominada La Niña que consiste en un enfriamiento de la cuenca del Pacífico Tropical y, por lo tanto, la fase fría de la Oscilación del Sur (Trenberth, 1997).

Cabe mencionar que, con el paso del tiempo, los asentamientos humanos han tenido una influencia en el cambio climático asociado al impacto antropogénico sobre la Tierra generando diversos efectos como es el caso de la escases de agua que está asociada a otro efecto negativo que son las sequias, que son anomalías climatológicas transitoria donde la disponibilidad de agua es más baja que lo normal en una determinada área geográfica, incremento de temperaturas e incidencia de ciclones (MacDonald, 2010), los cuales han tenido un efecto significativo en las actividades de la zona costera como las pesquerías y la acuicultura y han ido en aumento a través de los años.

I.3. Análisis de variabilidad oceanográfica en el Golfo de California y zona costera de Sonora

A partir de series de tiempo, se ha determinado que la temperatura superficial del mar en el GC varía en escalas estacionales a interanuales (Soto Mardones *et al.*, 1999; Valenzuela-Sánchez, 2016). Soto Mardones *et al.* (1999) mostró una disminución de la temperatura superficial del mar desde la boca hasta la cabeza y que la escala anual es la responsable de

la mayor variabilidad de la TSM oscilando en fase con variaciones menores norte-sur. Escalante-Almazán *et al.* (2013) también reportó esta disminución de la TSM promedio en dirección sur a norte a lo largo del GC con claras diferencias entre las condiciones cálida (verano y otoño) y fría (invierno y primavera) para todo el Golfo. Robles y Marinone (1987) y Ripa y Marinone (1989) encontraron una clara variabilidad estacional de la TSM en la Cuenca de Guaymas en la región central del GC: condiciones de invierno que abarcan de diciembre a mayo y condiciones de verano de junio a octubre con períodos de transición en mayo y noviembre. Valenzuela-Sánchez (2016) trabajó en la región central del GC enfocándose en la TSM frente a la Bahía de Guaymas, concluyendo que en el ciclo anual es el dominante en la variabilidad de la temperatura seguida de la señal semianual al igual que se presentó una tendencia positiva en la TSM. Con respecto a la variabilidad interanual, se han hecho estudios que indicaron que este tipo de variabilidad está asociada a anomalías con la circulación ciclónica ecuatorial norte compuesta por la contracorriente ecuatorial del norte, la corriente ecuatorial norte y la corriente de Costa Rica (Baumgartner y Christensen, 1985) y anomalías positivas y negativas asociadas a El Niño y La Niña y con la Variabilidad Interdecadal del Océano Pacífico (Lavín *et al.*, 2003). García-Morales *et al.*, (2017a) analizaron fenómenos de meso escala y su influencia en la TSM en la región sur y central de la zona costera de Sonora; ellos mostraron anomalías positivas y negativas asociadas a los fenómenos El Niño y La Niña y que la variabilidad de los procesos oceanográficos estacionales e interanuales tienen una gran influencia en las condiciones ambientales en el GC.

Por otro lado, se han realizado estudios para analizar la variabilidad de la Chl *a* en el GC. Regionalmente, la clorofila *a* presenta concentraciones más altas en la región de las Islas decreciendo hacia la boca (Gaxiola-Castro *et al.*, 1995; Escalante *et al.*, 2013). De acuerdo a Gaxiola-Castro *et al.* (1995) ésta característica determina condiciones eutróficas en la Región de las Grandes Islas y condiciones de mesotróficas a oligotróficas en la región de la boca del GC en combinación con la dinámica física asociado a mezclas por efectos de viento y marea, turbulencia y estratificación en la columna de agua son considerados los factores que determinan estas condiciones en regiones del GC (Gaxiola-Castro *et al.*, 1995; Álvarez-Molina *et al.*, 2013). Se ha demostrado que la variabilidad estacional presenta mayores concentraciones en invierno-primavera y bajas concentraciones en verano-otoño

(Gaxiola Castro *et al.*, 1995; Espinosa-Carreón y Valdez-Holguín, 2007; Pérez-Arvizu *et al.*, 2013; Escalante *et al.*, 2013). Por otro lado, Santamaría-del-Angel *et al.* (1994) demostró mediante series de tiempo una clara variación estacional con valores máximos en invierno-primavera y mínimos en verano, además de definir regiones biogeográficas mediante un análisis de componentes principales con los mismos patrones estacionales. En la Laguna Costera La Cruz, zona costera del Estado de Sonora, se ha encontrado que la variabilidad de temperatura y clorofila está asociada a procesos de marea (Valdez-Holguín, 1994). Morales-Soto *et al.* (2000) concluyen que los valores máximos y mínimos de Chl *a* se asocia a la disponibilidad de nutrientes. Un estudio por Félix-Gocobachi y Valenzuela-Fino (2000) consideró la influencia de El Niño en los niveles de Chl *a* en este ecosistema. Espinoza-Carreón y Valdez-Holguín (2007) encontraron que la clorofila aumentó de la Boca del Golfo a la Cabeza, con una señal anual clara y variabilidad interanual debida a eventos El Niño/La Niña. Los trabajos en zonas costeras, principalmente en lagunas y bahías, del GC se han realizado a través de muestreos *in situ*, los trabajos de variabilidad oceanográfica de estos sitios a través del uso de bases de datos son escasos.

Debido a que este tipo de estudios son escasos en zonas costeras del GC como es el caso del Estado de Sonora, se requiere aportar más información ambiental de estos sitios por medio del análisis de variables como la TSM y Chl *a* consideradas como importantes en los ecosistemas marinos y asociadas al estudio del cambio climático para caracterizar bioregiones, determinar el estado trófico, desarrollar modelos de predicción en las áreas de ecología marina, costera y pesquera de cambios en estas variables para estimar anomalías positivas o negativas influyendo en los ecosistemas y en la distribución y abundancia de especies, algunas de ellas de interés comercial para el sector pesquero fomentando el conocimiento de la oceanografía y de cambio climático en la zona costera del Estado de Sonora mediante el uso de sensoria remota.

II. JUSTIFICACIÓN

Las zonas costeras son sitios muy variables que juegan un papel importante en los ciclos biogeoquímicos. Mediante series de tiempo de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) y Clorofila *a* (Chl *a*) se pretende hacer análisis de la variabilidad de la zona costera del Estado de Sonora para establecer las características ecológicas (tróficas y zonación) y tendencias de cambio debido a diversos factores ambientales (oceanográficos) y su influencia en el ecosistema.

III. HIPÓTESIS

La variabilidad oceanográfica de la zona costera del Golfo de California en el Estado de Sonora está determinada por la climatología continental y la interacción con el Océano Pacífico Oriental mostrando variabilidad en escalas de alta frecuencia (cambios estacionales y anuales) y de baja frecuencia (como El Niño y La Niña) y cambios decadales.

IV. OBJETIVOS

IV.1. Objetivo general

Describir la variabilidad espacio temporal de mesoescala de la zona costera del Estado de Sonora mediante el análisis de imágenes de satélite de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) y de la biomasa fitoplanctónica utilizando como estimador la clorofila *a* (Chl *a*).

IV.2. Objetivos específicos

- Determinar la variabilidad de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) a lo largo de la zona costera del Estado de Sonora.
- Determinar la variabilidad de la biomasa fitoplanctónica con base al contenido de Clorofila *a* (Chl *a*) a lo largo de la zona costera del Estado de Sonora.
- Con base en el análisis de series de tiempo de estas variables a partir de imágenes satelitales, establecer las principales frecuencias de variabilidad.
- Definir el estado trófico de la zona costera del Estado de Sonora en base al contenido de Chl *a*.
- Caracterización de regiones en la zona costera mediante el análisis de TSM y Chl *a*.

V. METODOLOGÍA

V.1. Área de estudio

El área de estudio abarca la zona costera oriental del GC (desde el norte del Estado de Sinaloa hasta el delta del Río Colorado) (Figura 1). La zona costera abarca aproximadamente 1208 km de línea de costa con una gran diversidad de ecosistemas costeros (Castañeda-López y Contreras-Espinoza, 2003). Esta región tiene importantes puertos pesqueros como Topolobampo, Guaymas, Yavaros y Puerto Peñasco y áreas altamente productivas de agricultura y granjas camaronícolas. Esta región del GC es altamente productiva asociada a procesos de surgencias costeras y la descarga de los ríos (Merino-Ibarra, 1987) y presenta un patrón estacional de producción biológica y concentración de nutrientes del lado noroeste (lado continental) durante el comienzo del invierno (diciembre a mayo) y tiempo después, esta agua se expande a la región sureste (lado de la península); las condiciones de verano contraen aguas ricas en nutrientes en la dirección opuesta (Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991; Lluch-Cota, 2000; Espinoza-Carreón y Valdez-Holguín, 2007). El área de estudio comprendió un transecto con 17 puntos de muestreo georreferenciados a 60 km de distancia uno de otro y 30 km de la costa que va desde el norte de Sinaloa hasta el norte de Sonora (Tabla 1).



Figura 1. Mapa de la zona costera del Estado de Sonora con la ubicación de los diferentes puntos de muestreo de los datos mensuales de TSM y Chl *a*.

Tabla 1. Lista de coordenadas geográficas de cada punto de muestreo de la zona costera del Estado de Sonora, Golfo de California.

Puntos de muestreo	Coordenadas geográficas	Puntos de muestreo	Coordenadas geográficas	Puntos de muestreo	Coordenadas geográficas
1	24°48'N, 108°24'W	8	27°36'N, 111°00'W	15	30°24'N, 113°18'N
2	25°12'N, 108°54'W	9	28°00'N, 111°36'W	16	30°48'N, 113°24'W
3	25°36'N, 109°42'W	10	28°24'N, 112°00'W	17	31°12'N, 113°48'W
4	25°60'N, 109°42'W	11	28°42'N, 112°12'W		
5	26°24'N, 109°42'W	12	29°12'N, 112°42'W		
6	26°48'N, 110°12'W	13	29°36'N, 112°54'W		
7	27°12'N, 110°48'W	14	30°00'N, 113°60'W		

V.2. Caracterización oceanográfica y obtención de datos mensuales de Temperatura Superficial del Mar (TSM) y Clorofila *a* (Chl *a*)

Para la caracterización oceanográfica y ambiental se utilizaron imágenes de satélite de TSM y Chl *a* con una resolución temporal de un mes con la finalidad de analizar su variabilidad durante el período de estudio en la zona costera continental. Las imágenes de satélite de la TSM se obtuvieron a través de la página web del Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PODAAC) del Jet Propulsion Laboratory del California Institute of Technology (<https://podaac.jpl.nasa.gov/>) y de la página web del Ocean Color de la NASA (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>), y las composiciones mensuales de Chl *a* se obtuvieron a partir de imágenes de satélite del portal Ocean Color de la NASA. Las imágenes de ambas variables se obtuvieron del nivel 3 de procesamiento (L3) en formato .HDF (Hierarchical Data Format).

Los sensores utilizados del portal PODAAC para obtener los datos de las imágenes de la TSM fue el Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR-Pathfinder Version 5.1) para el período de septiembre de 1981 hasta enero 1985 y Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR-Pathfinder Version 5) para el período febrero 1985 hasta junio 2002. Estos sensores corresponden al período diurno en grados centígrados (°C) con una resolución de 4 km. Por otro lado, el sensor utilizado del portal Ocean Color fue el Aqua MODIS Sea Surface Temperature (11 μ daytime) en escala de grados centígrados (°C) con una resolución de 4 km para el período de julio 2002 hasta marzo de 2016 para completar una base de datos de 34 años y 6 meses. En el caso de la clorofila se realizó el mismo procedimiento de recopilación de datos a través de sensores remotos. Para el período de septiembre de 1997 hasta mayo de 2002 se utilizó el sensor SeaWiFS Chlorophyll Concentration OCI Algorithm y el sensor Aqua MODIS Chlorophyll Concentration OCI Algorithm para el período de julio 2002 hasta enero 2018. Ambos sensores con una resolución de 9 km en escala de miligramos por metro cúbico (mg/m³) para desarrollar una base de datos de 20 años y 4 meses.

Las imágenes de satélite fueron procesadas con el software Windows Image Manager WimSoft (WIM) Software versión 9.06 (Copyright Mati Kahru 1995-2015) para

la obtención de los promedios mensuales de la temperatura (Figura 2) y clorofila (Figura 3) del transecto de 17 puntos de muestreo de la zona costera.

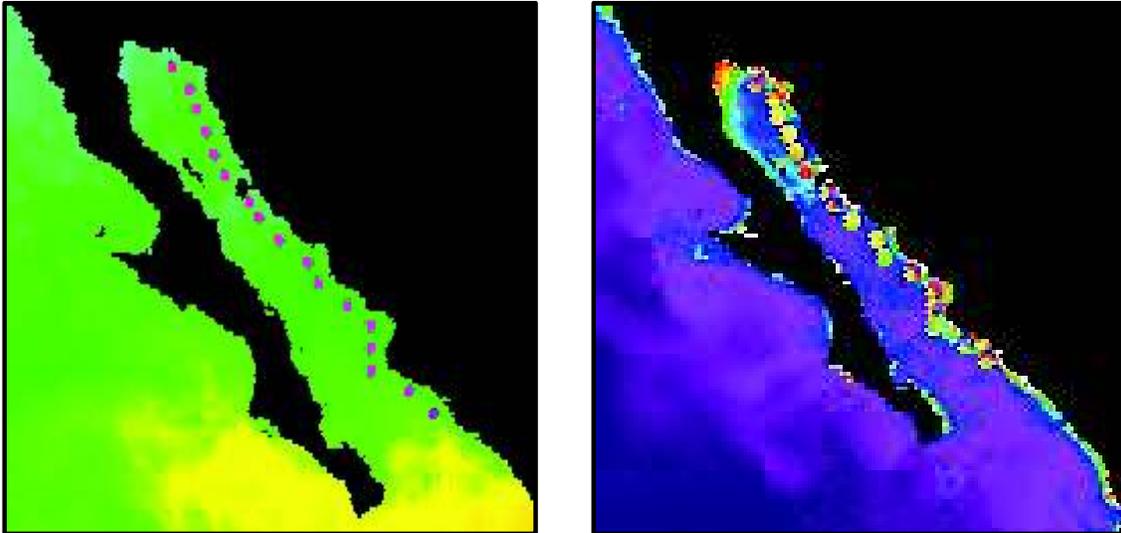


Figura 2. Localización de los diferentes puntos de análisis de datos mensuales de TSM de la zona costera del Estado de Sonora en el mes de enero de 2007 del sensor Aqua MODIS.

Figura 3. Localización de los diferentes puntos de análisis de datos mensuales de Chl *a* de la zona costera del Estado de Sonora en el mes de enero de 2007 del sensor Aqua MODIS.

V.3. Análisis y procesamiento de datos mensuales de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) y Clorofila *a* (Chl *a*)

Antes de realizar los análisis correspondientes, los datos fueron previamente calibrados y reprocesados para ajustar los valores de los diferentes sensores utilizados para completar la serie. Se utilizó un Análisis de Cluster para agrupar los valores mensuales de cada estación de muestreo y lograr un máximo nivel de homogeneidad en cada grupo y la mayor diferencia entre ellos. La descripción estadística se realizó mediante una prueba de normalidad, comparación de medias y graficado de los datos de TSM y Chl *a* para análisis de la climatología y series de tiempo.

En cada serie de tiempo se obtuvo la densidad espectral de la varianza a través de una transformada rápida de Fourier para determinar cuáles son las principales frecuencias de variación (estacional, semianual, anual e interanual) mediante el modelaje de funciones senoidales (curva que representa gráficamente la función seno y también a dicha función en

sí) para determinar el comportamiento de variabilidad y así, determinar las anomalías positivas (aumento de los niveles cuantitativos de las variables) y anomalías negativas (baja de los niveles cuantitativos de las variables).

Se determinó el estado trófico en la zona costera con base al contenido de clorofila a (mg/m^3) siguiendo el criterio de Morel y Berthon (1989). Se realizó una Prueba de Kruskal-Wallis al 95% de confianza para probar la hipótesis sobre diferencias de temperatura y clorofila entre cada una de las regiones de la zona costera. Todos estos análisis fueron hechos en el programa Statistical Software versión 7.5 y R Software.

V.I. RESULTADOS

V1.1. Caracterización de Regiones

Se obtuvieron un total de cuatro grupos del Análisis de Clusters con base a los valores de la TSM de las estaciones de muestreo a partir de las 20 unidades de distancia de enlace (Figura 4). El primer grupo lo agrupa la Región Sur que abarca desde la primera hasta la tercera estación; el segundo grupo consiste en la Región Centro que contiene desde la cuarta hasta la décima estación; el tercer grupo es la Región de las Grandes Islas que abarca únicamente la undécima estación y por último se obtuvo la Región Norte que presenta desde la duodécima hasta la décimo séptima estación.

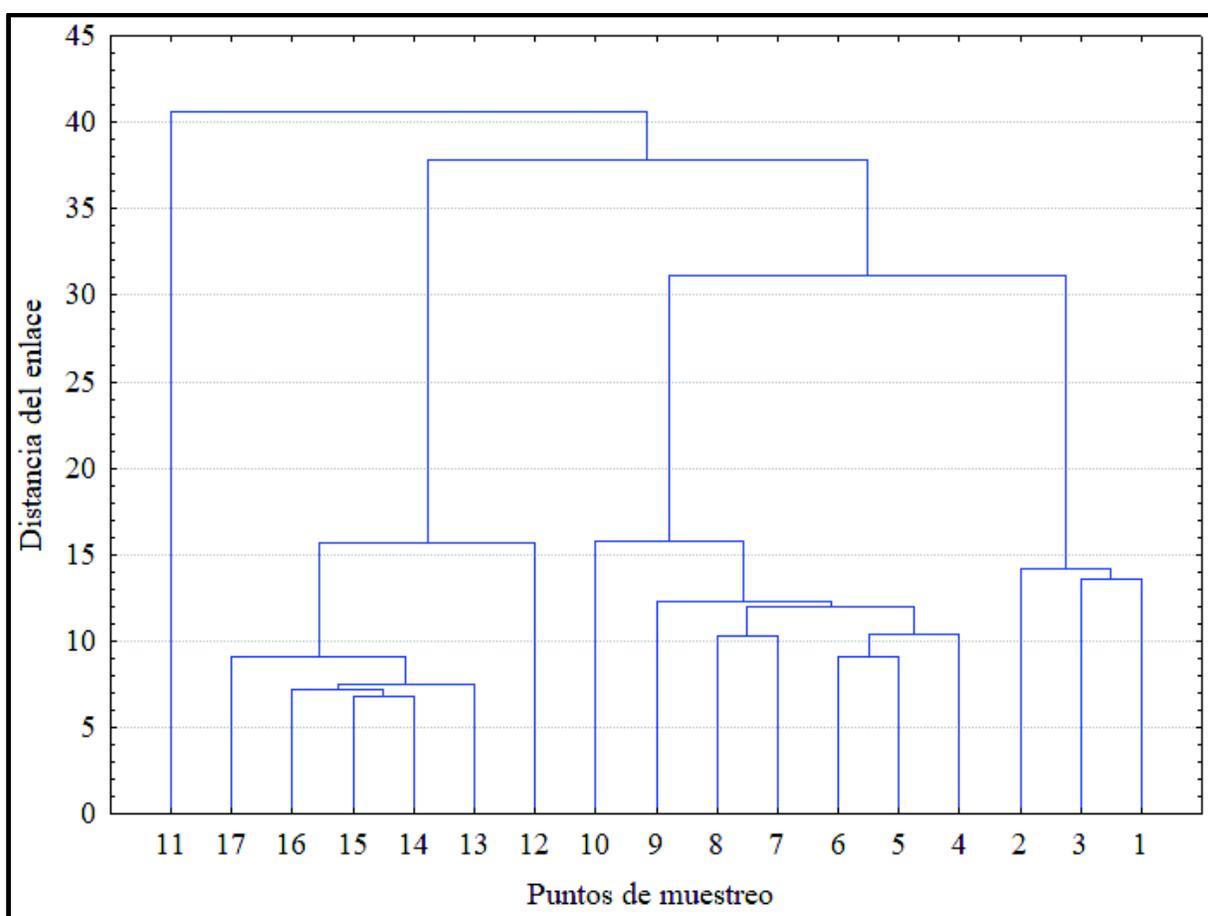


Figura 4. Análisis de Clusters de la zona costera del Estado de Sonora en base a los valores de TSM.

En el caso de la Chl *a* se obtuvo una distribución diferente de los puntos de muestro con una agrupación de 3 grupos diferente a la temperatura superficial del mar a partir de las 20 unidades de distancia de enlace (Figura 5). El primer grupo consiste en la Región Sur con la primera y segunda estación. El segundo grupo corresponde a una división de tres subgrupos; el primer subgrupo corresponde la tercera estación y de la séptima a la novena estación; el segundo subgrupo corresponde desde la decimotercera hasta la decimoséptima estación y el tercer subgrupo corresponde de la cuarta a la sexta estación junto con la decimosegunda estación. El tercer grupo corresponde a la décima y décimo primera estación.

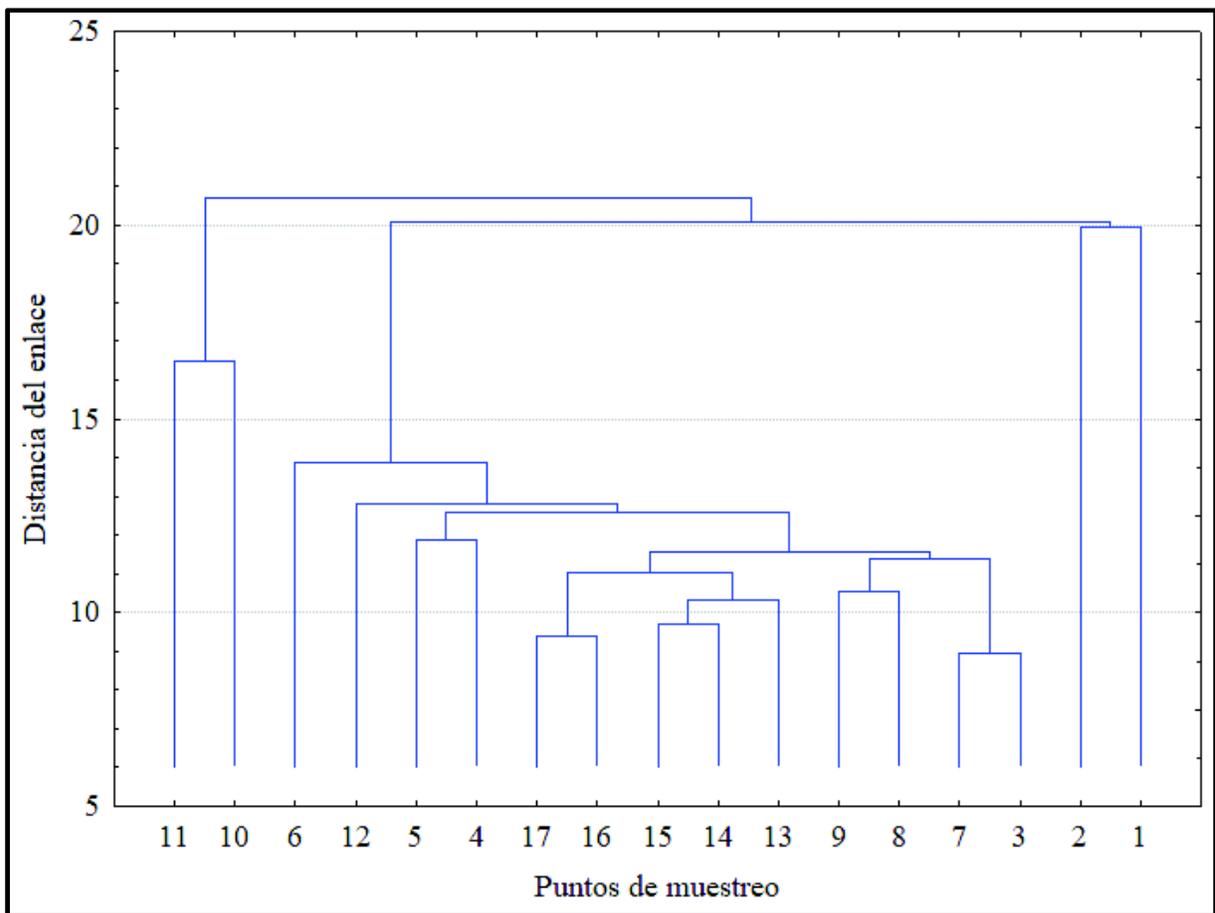


Figura 5. Análisis de Clusters de la zona costera del Estado de Sonora en base a los valores de Chl *a*.

Basándose en la caracterización del Análisis de Clusters de la TSM se realizó un análisis general de datos de ambas variables. Los datos de la TSM de cada una de las regiones de la zona costera presentaron una distribución bimodal. La Región Sur presentó una moda de valores mínimos entre 20 y 25 °C y la segunda moda entre 30 y 35 °C (Figura 6). Los datos de la Región Centro y Región de las Grandes Islas presentaron una primera moda con valores de temperatura entre 15 a 20 °C y la segunda moda fue entre 25 y 30 °C separados por el mismo valor de temperatura que en la Región Sur (Figura 7) (Figura 8). Los datos de la Región Norte obtuvieron una primera moda con valores de entre 15 a 20°C y una segunda moda alrededor de 30°C (Figura 9). Ninguna de las regiones pasó las pruebas de normalidad (Tabla 2).

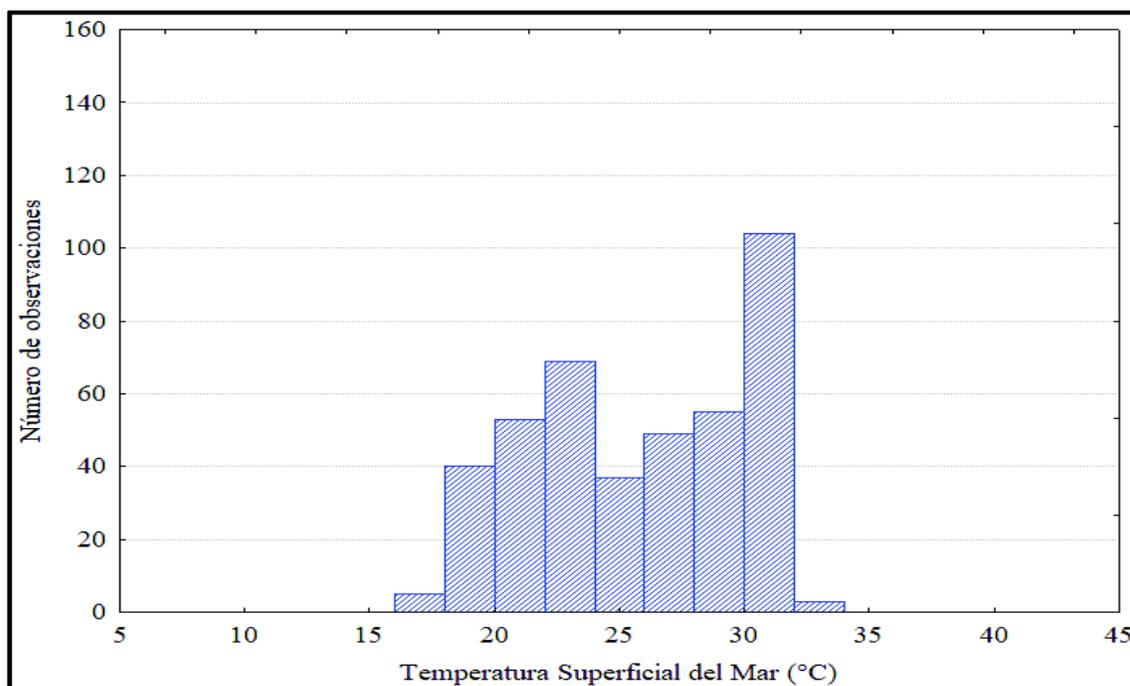


Figura 6. Distribución de la TSM en la Región Sur de la zona costera del Estado de Sonora.

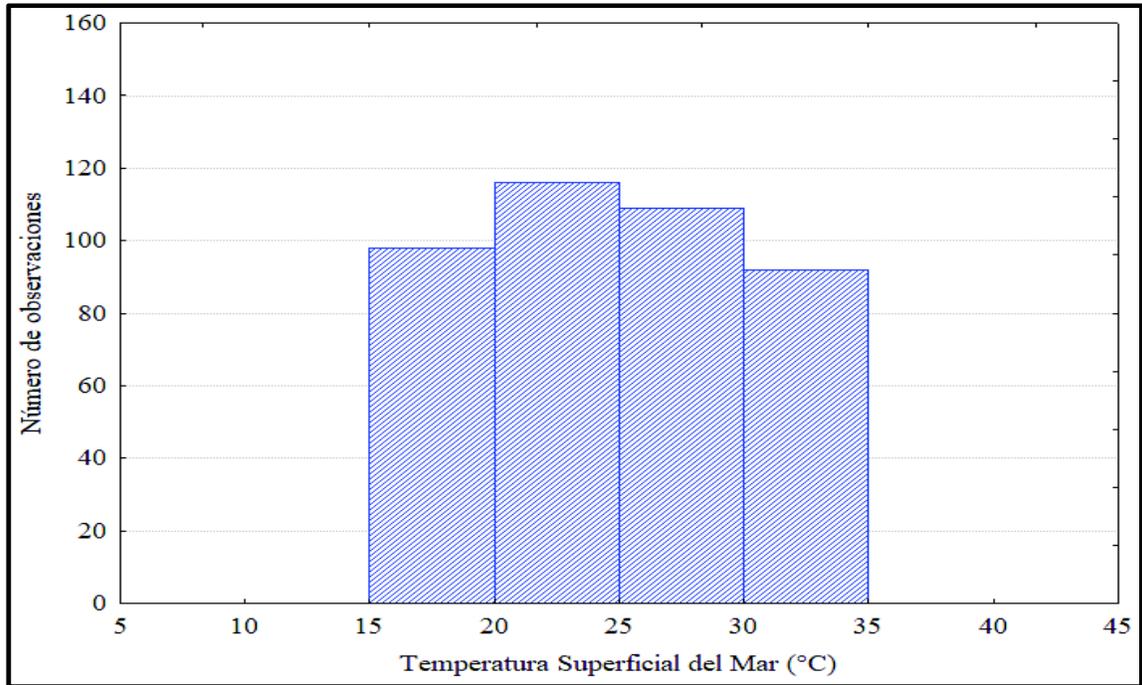


Figura 7. Distribución de la TSM en la Región Centro de la zona costera del Estado de Sonora.

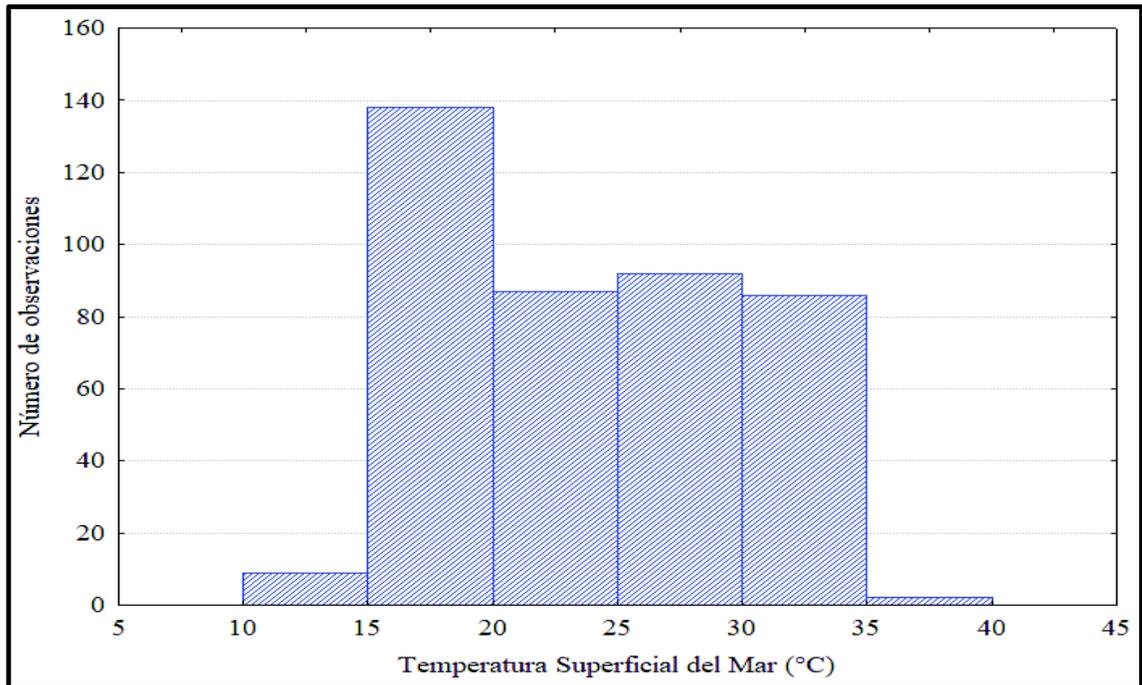


Figura 8. Distribución de la TSM en la Región de las Grandes Islas de la zona costera del Estado de Sonora.

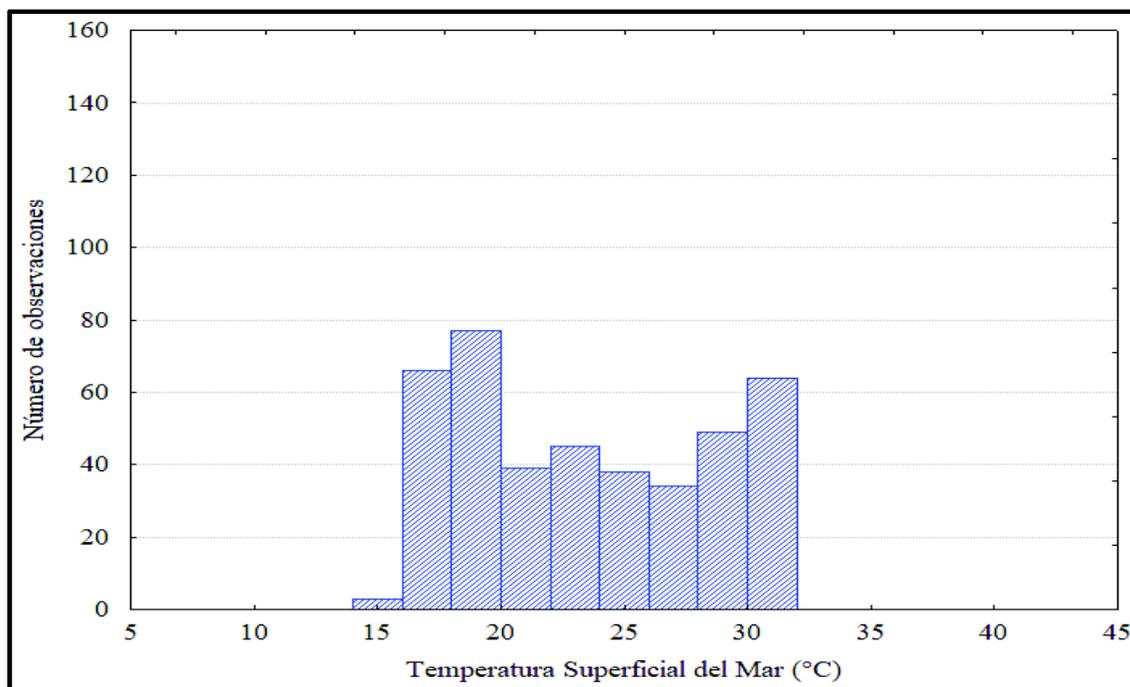


Figura 9. Distribución de la TSM en la Región Norte de la zona costera del Estado de Sonora.

Tabla 2. Pruebas de normalidad de los valores de TSM de cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora.

Regiones	Kolmogorov-Smirnov p	Liliefors p	Shapiro-Wilks	p
Sur	p < .01	p < .01	0.925892	0
Centro	p < .01	p < .01	0.918019	0
Grandes Islas	p < .01	p < .01	0.930777	0
Norte	p < .01	p < .01	0.915425	0

Los datos de la Chl *a* de cada una de las regiones (Sur, Centro, Grandes Islas y Norte) de la zona costera presentaron una distribución unimodal entre 0 y 2 mg/m³ (Figuras 10, 11, 12 y 13). Al igual como sucedió en la TSM no se pasaron las pruebas de normalidad (Tabla 3).

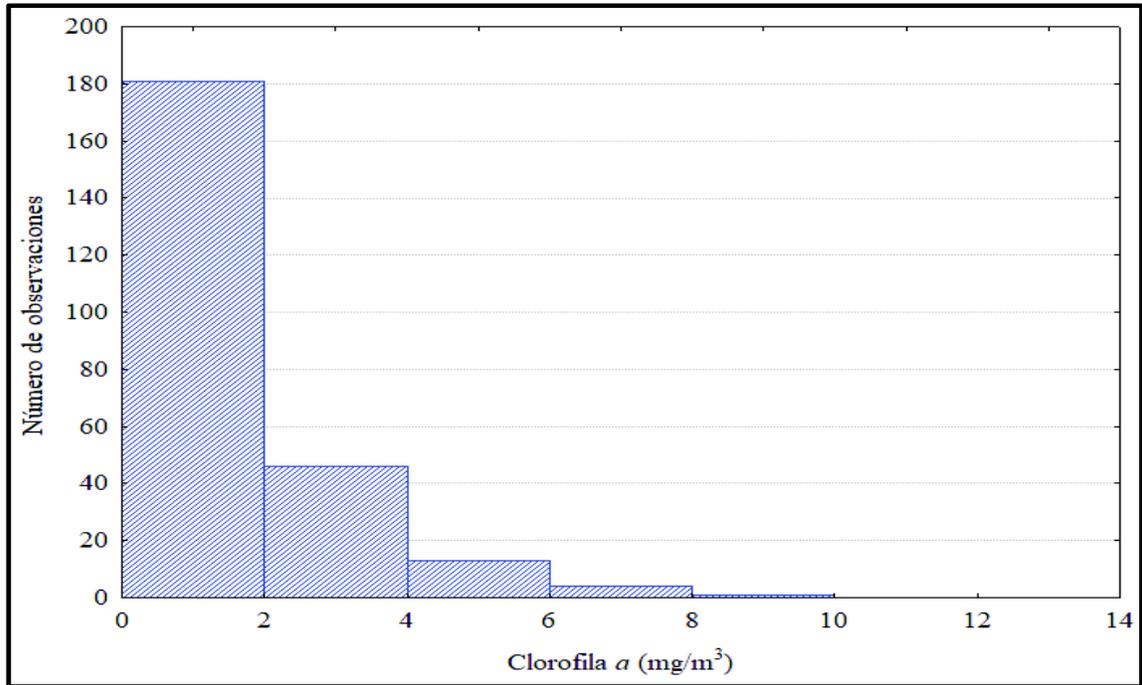


Figura 10. Distribución de la Chl *a* en la Región Sur de la zona costera del Estado de Sonora.

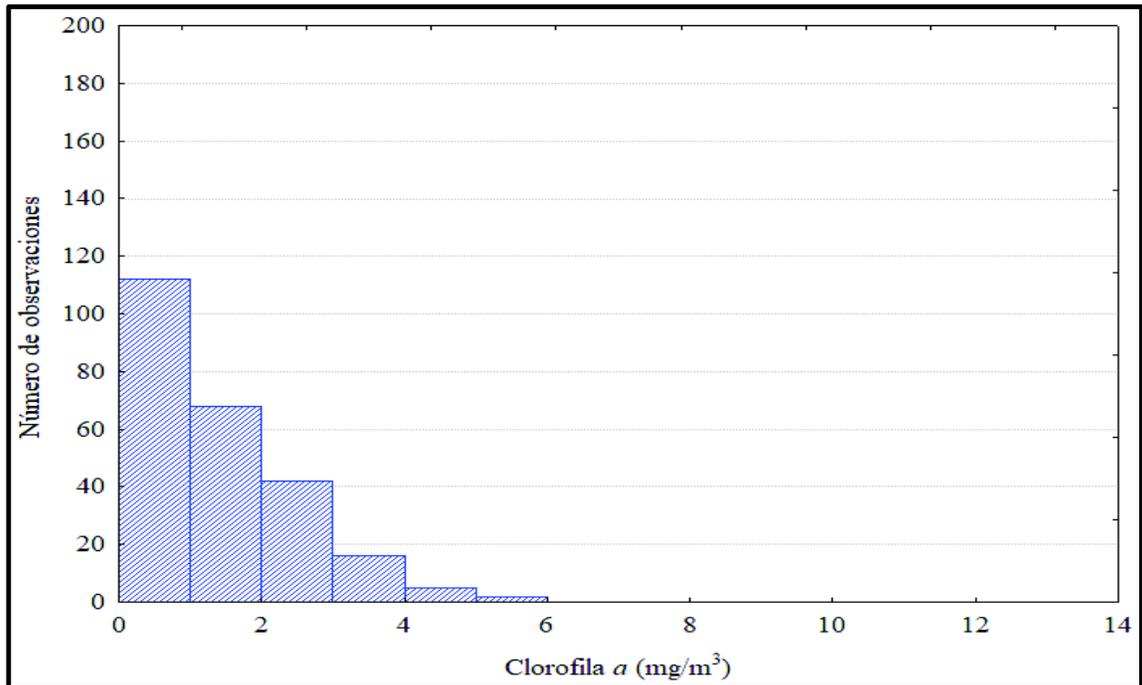


Figura 11. Distribución de la Chl *a* en la Región Centro de la zona costera del Estado de Sonora.

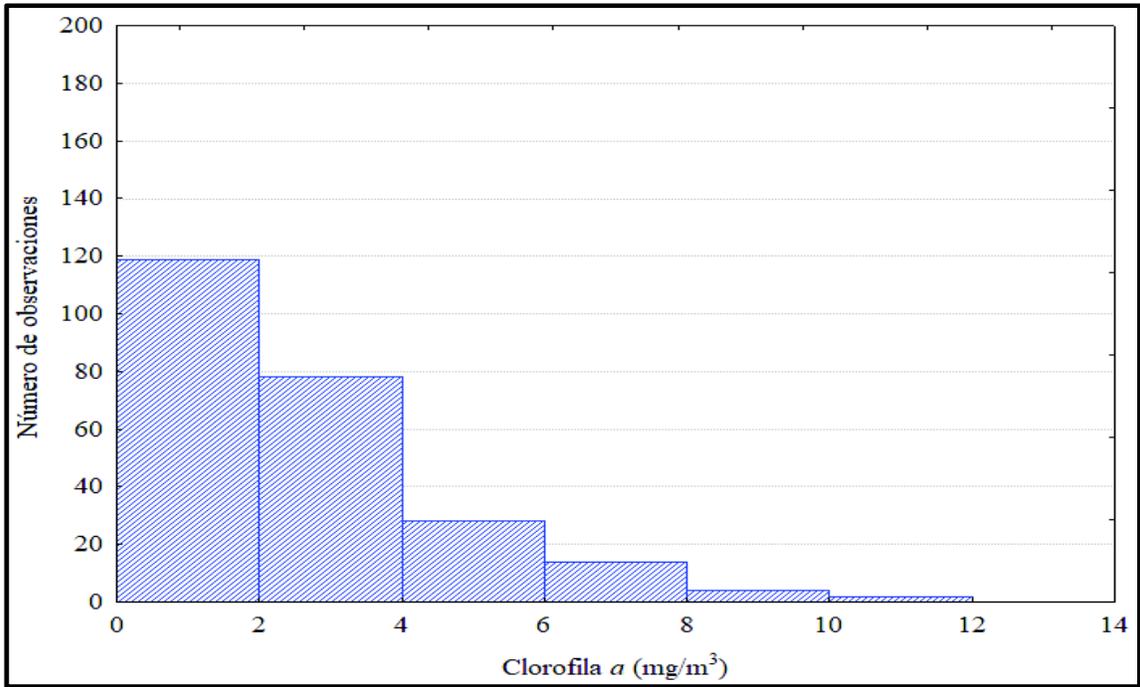


Figura 12. Distribución de la Chl *a* en la Región de las Grandes Islas de la zona costera del Estado de Sonora.

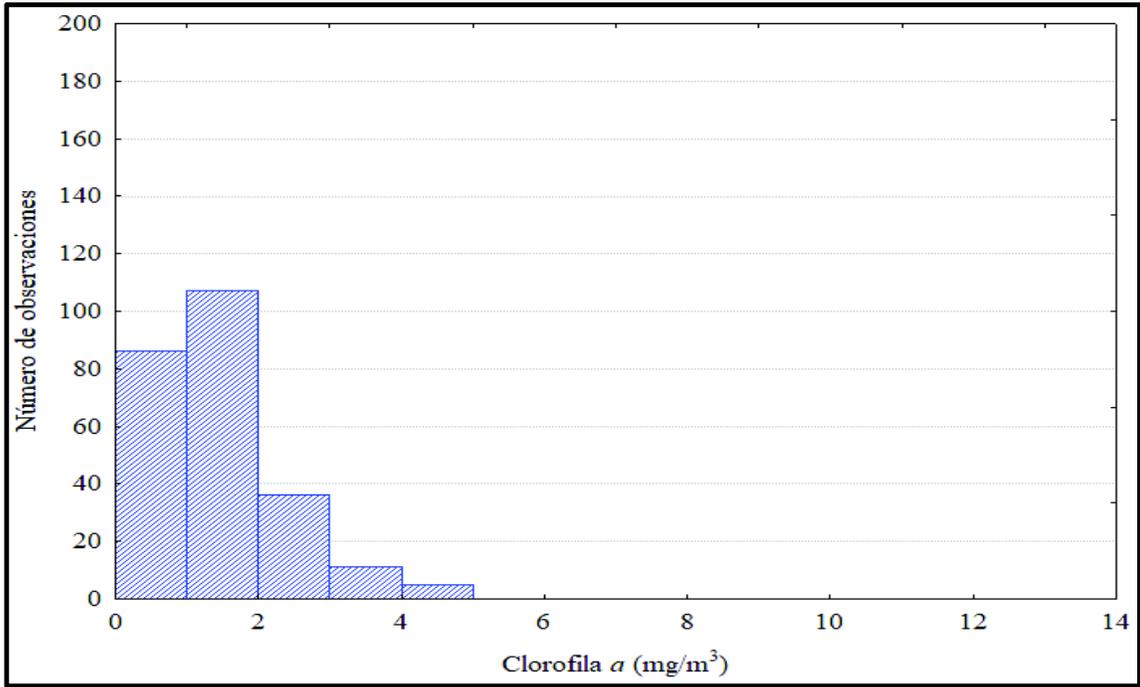


Figura 13. Distribución de la Chl *a* en la Región Norte de la zona costera del Estado de Sonora.

Tabla 3. Pruebas de normalidad de los valores de Chl *a* de cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora.

Regiones	Kolmogorov-Smirnov p	Liliefors p	Shapiro-Wilks	p
Sur	p < .01	p < .01	0.781753	0
Centro	p < .01	p < .01	0.889082	0
Grandes Islas	p < .01	p < .01	0.857649	0
Norte	p < .01	p < .01	0.912169	0

VI.2. Análisis de series de tiempo, climatología y anomalías

Las series de tiempo de la TSM de las regiones en general presentó un rango entre 12 y 36 °C y ninguna de ellas presentó una tendencia significativa. La Región Sur (Figura 14) presentó el rango más estrecho entre 17 y 32 °C con una tendencia lineal positiva de un incremento de 0.0011 °C por cada mes y un coeficiente de variación bajo ($r^2 = 0.0009$). La Región Centro (Figura 15) mostró un rango entre 16 y 32 °C con una tendencia lineal positiva de un incremento de 0.002 °C por cada mes y un coeficiente de variación bajo ($r^2 = 0.0024$). La Región de las Grandes Islas (Figura 16) obtuvo el rango más amplio de valores (12 a 36 °C) con una tendencia lineal positiva de un incremento de 0.0029 °C por cada mes y un coeficiente de variación bajo ($r^2 = 0.0039$). La Región Norte (Figura 17) presentó un rango similar de valores como la Región Centro, una tendencia lineal positiva de un incremento de 0.003 °C por cada mes y un coeficiente de variación bajo ($r^2 = 0.0050$).

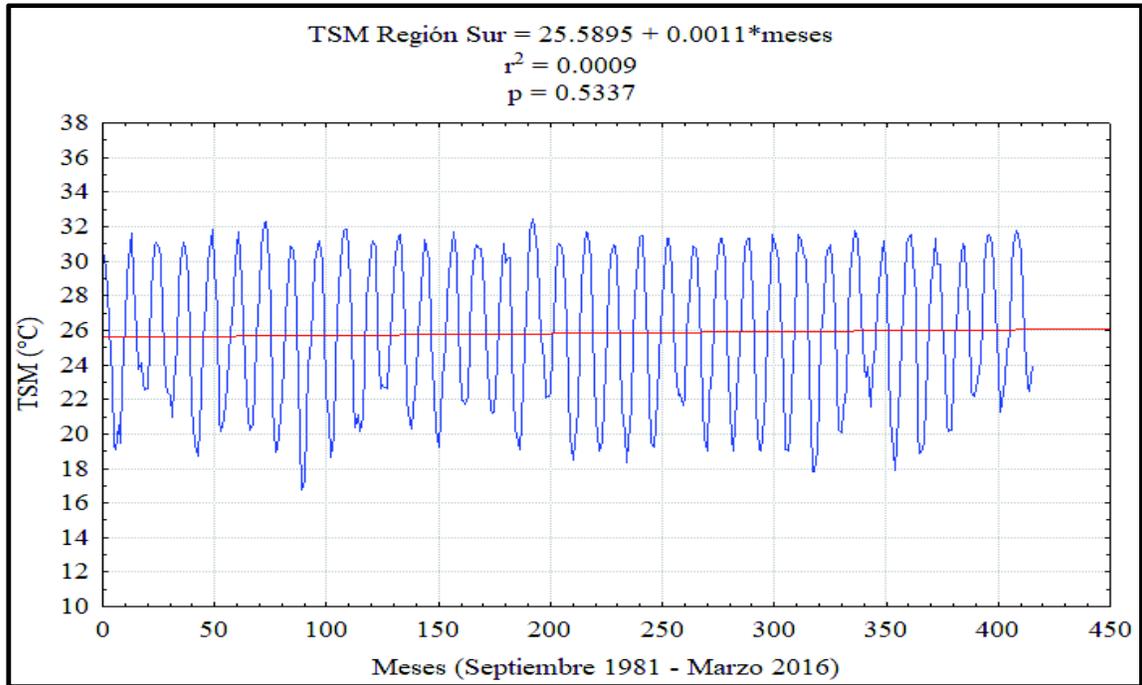


Figura 14. Serie de tiempo de la TSM de la Región Sur de la zona costera del Estado de Sonora.

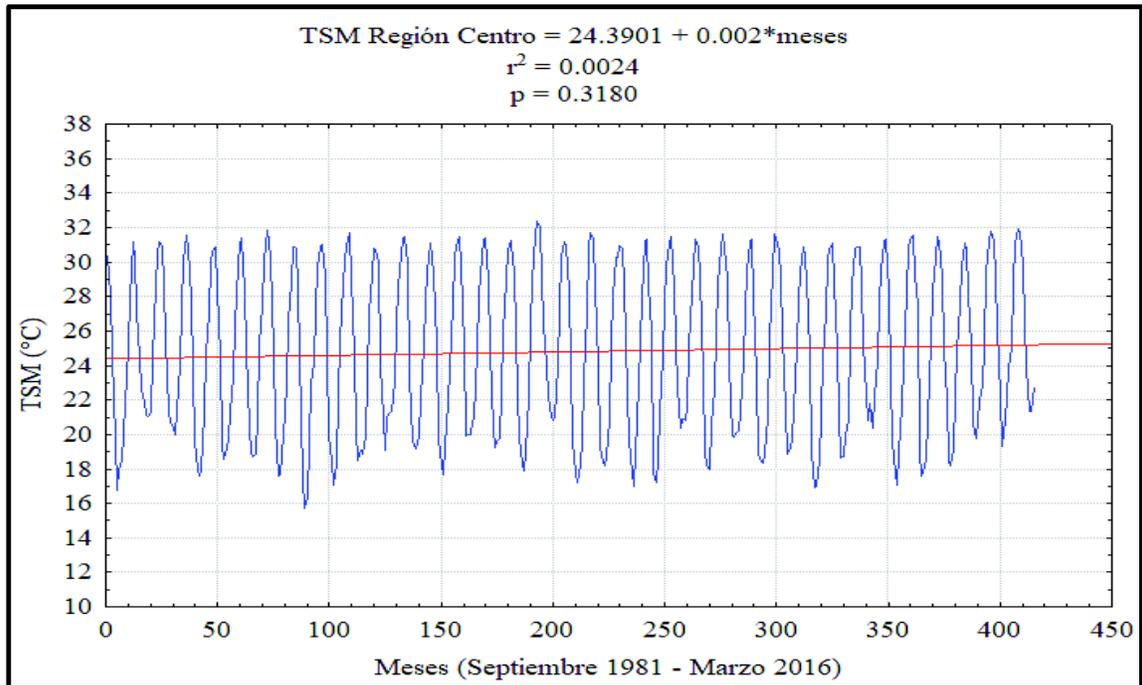


Figura 15. Serie de tiempo de la TSM de la Región Centro de la zona costera del Estado de Sonora.

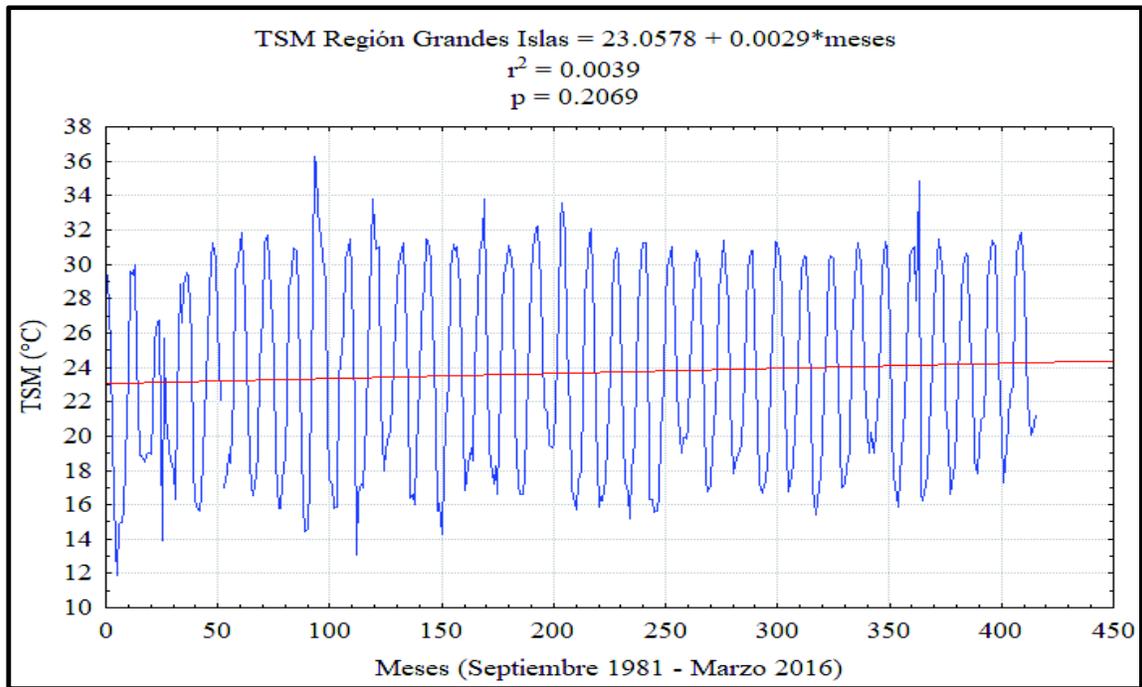


Figura 16. Serie de tiempo de la TSM de la Región de las Grandes Islas de la zona costera del Estado de Sonora.

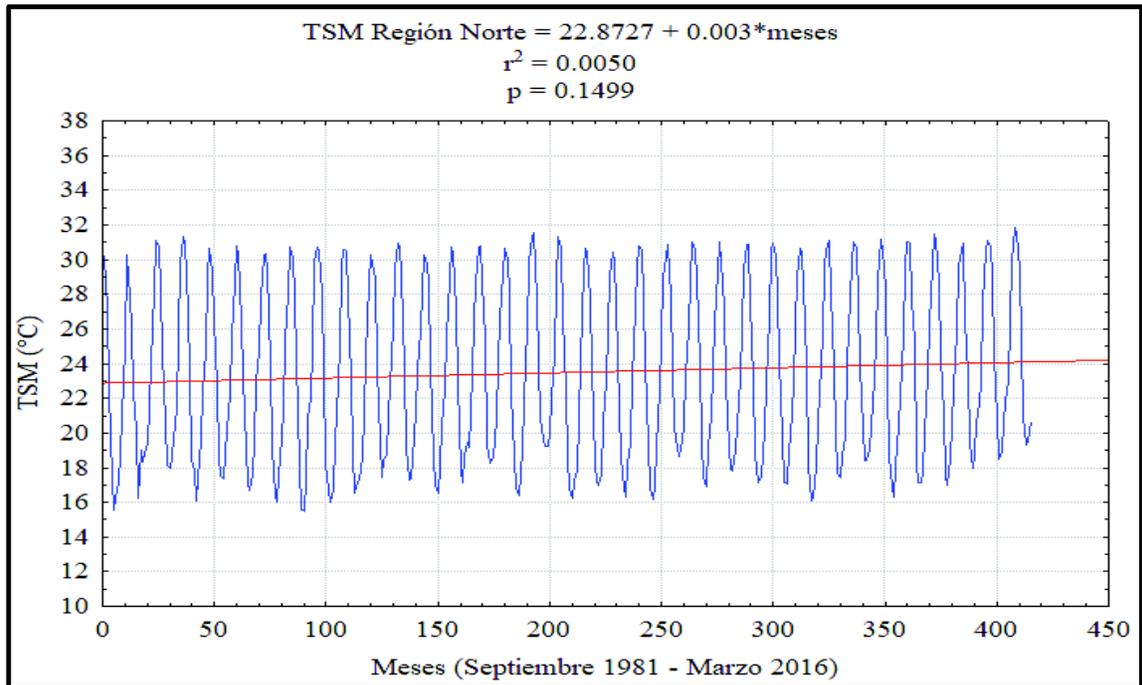


Figura 17. Serie de tiempo de la TSM de la Región Norte de la zona costera del Estado de Sonora.

Las anomalías obtenidas de las series de tiempo de la TSM presentaron un rango entre -5.5 y 4.3 °C. La Región Sur presentó el rango más estrecho un rango entre -2.9 y 2.8 °C (Figura 18). La Región Centro obtuvo un rango entre -4.1 y 2.9 °C (Figura 19). La Región de las Grandes Islas mostró el rango más amplio de las anomalías entre -5.5 y 4.3 °C (Figura 20). La Región Norte presentó un rango de valores entre -4.8 y 2.4 °C (Figura 21). Las anomalías de la TSM de cada región de la zona costera fueron comparadas con una base de datos global del Índice de Oscilación Sur (SOI por sus siglas en inglés) del Océano Pacífico Ecuatorial obtenida del portal ClimateDateGuide (<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-ti>) con un rango entre -3.4 and 4.2.

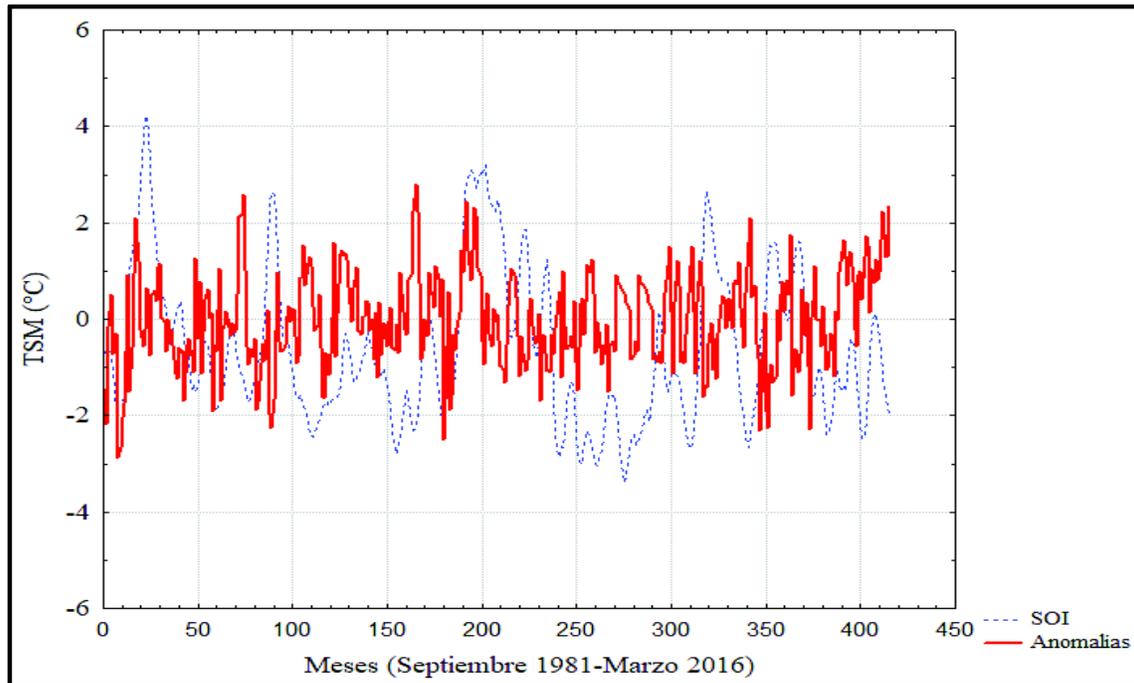


Figura 18. Anomalías de la serie de tiempo de la TSM de la Región Sur de la zona costera del Estado de Sonora.

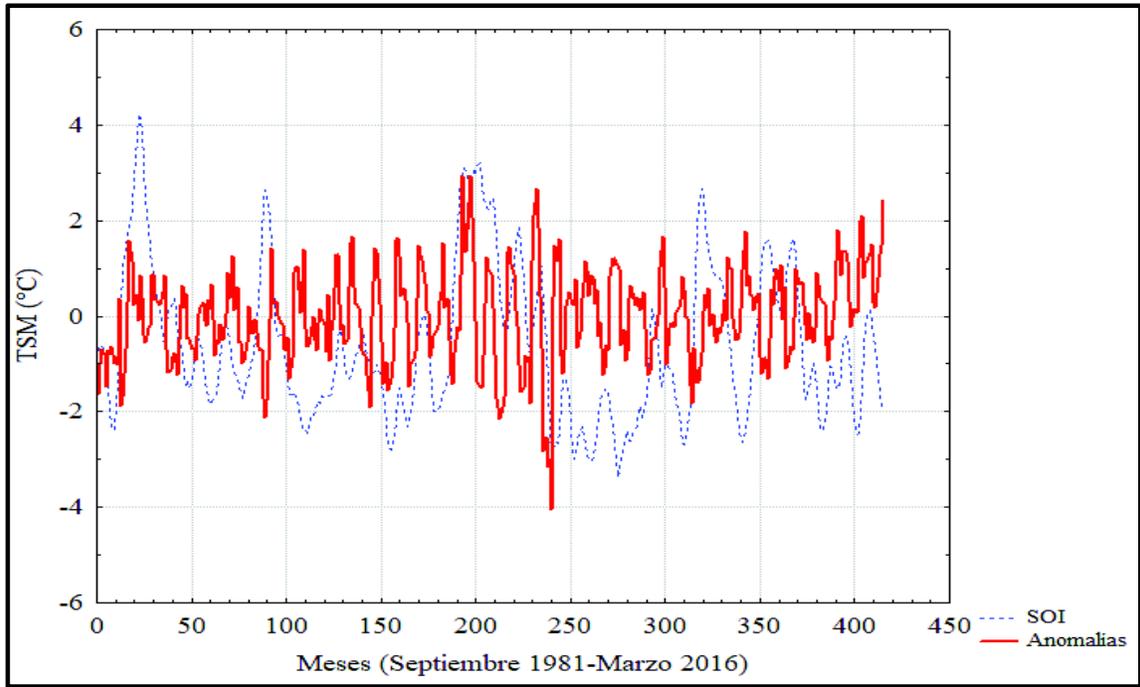


Figura 19. Anomalías de la serie de tiempo de la TSM de la Región Centro de la zona costera del Estado de Sonora.

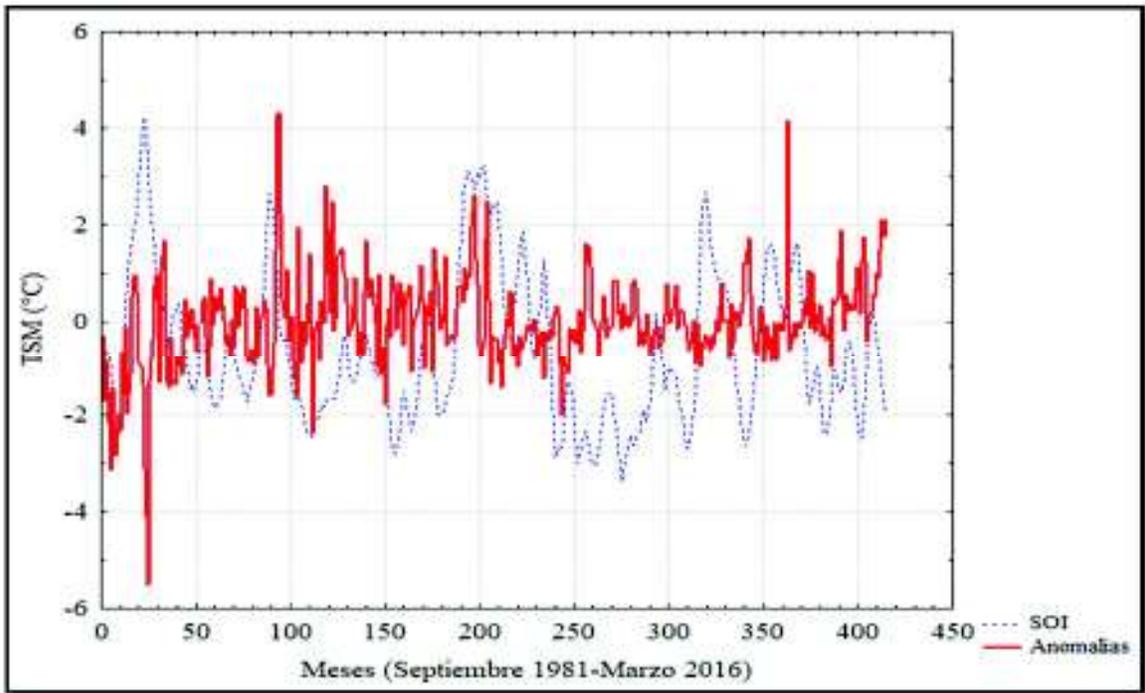


Figura 20. Anomalías de la serie de tiempo de la TSM de la Región de las Grandes Islas de la zona costera del Estado de Sonora.

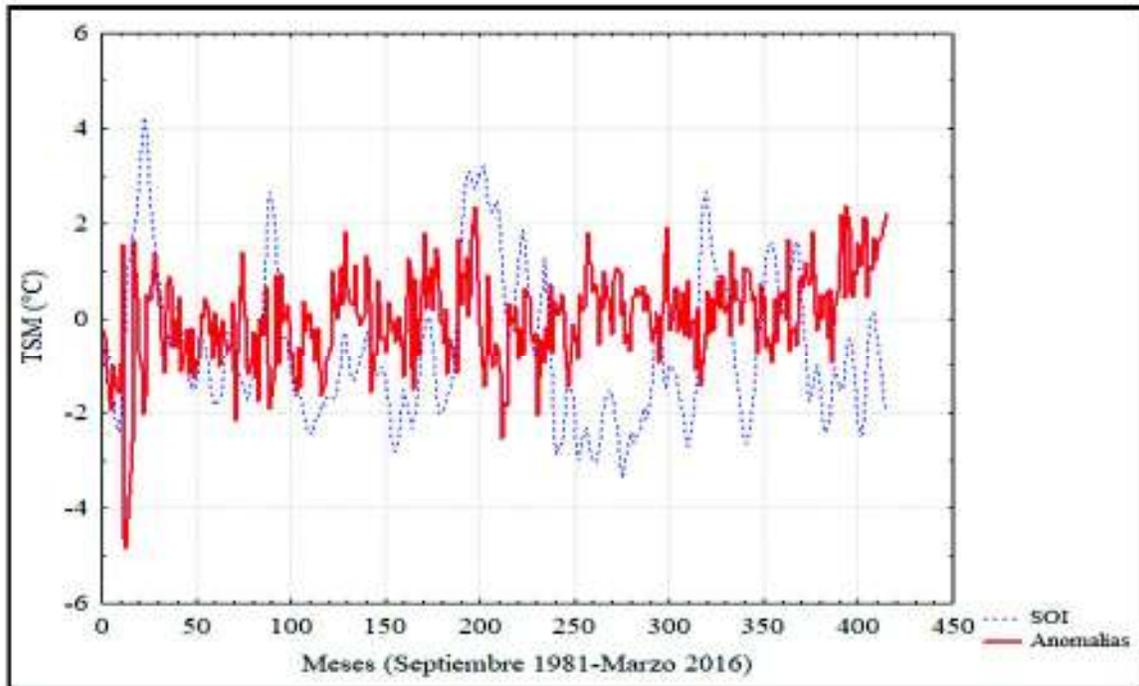


Figura 21. Anomalías de la serie de tiempo de la TSM de la Región Norte de la zona costera del Estado de Sonora.

Las series de tiempo de la Chl *a* de las regiones en general presentó un rango entre 0 y 11 mg/m³ y tampoco presentaron una tendencia significativa. La Región Sur (Figura 22) presentó un rango de valores entre 0 y 9 mg/m³ con una tendencia lineal negativa de un decrecimiento de 0.0008 mg/m³ por cada mes y un coeficiente de variación bajo ($r^2 = 0.0015$). La Región Centro (Figura 23) mostró un rango entre 0 y 6 mg/m³ con una tendencia lineal positiva de un incremento de 0.0005 mg/m³ por cada mes y un coeficiente de variación bajo ($r^2 = 0.0008$). La Región de las Grandes Islas (Figura 24) obtuvo el rango más amplio de valores (0 y 11 mg/m³), una tendencia lineal positiva de un incremento de 0.0027 mg/m³ por cada mes y un coeficiente de variación bajo ($r^2 = 0.0085$). La Región Norte (Figura 25) obtuvo el rango de valores más bajo (0 y 5 mg/m³), una tendencia lineal positiva de un incremento de 0.0008 mg/m³ por cada mes y un bajo coeficiente de variación ($r^2 = 0.0039$).

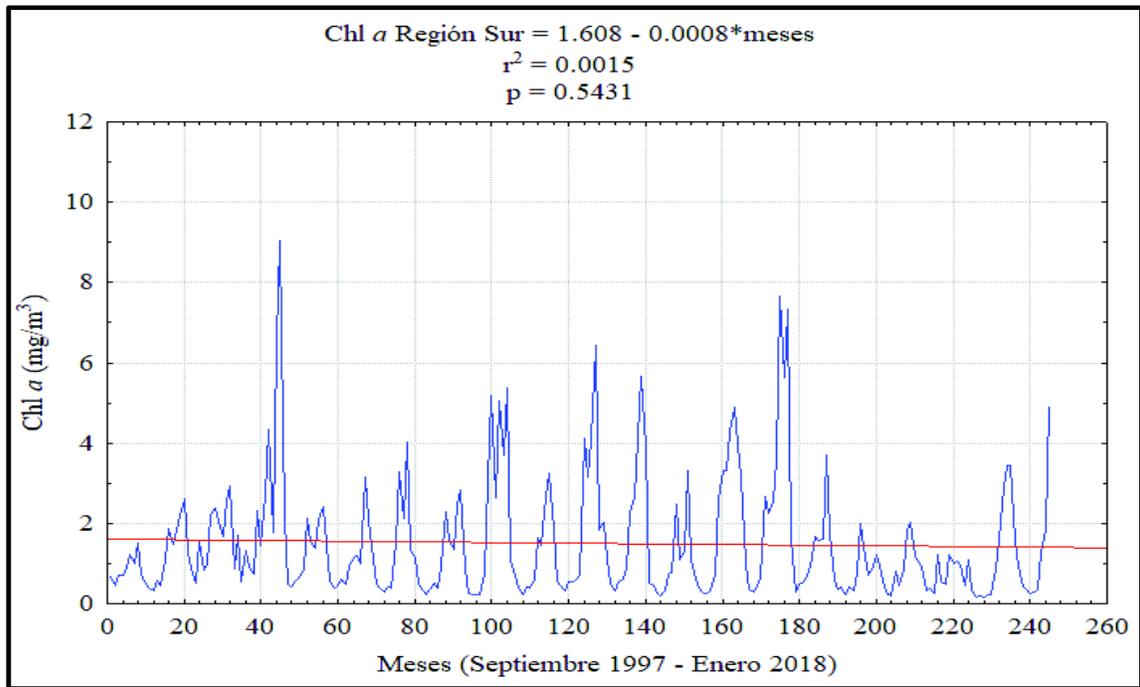


Figura 22. Serie de tiempo de la Clorofila *a* (Chl *a*) de la Región Sur de la zona costera del Estado de Sonora.

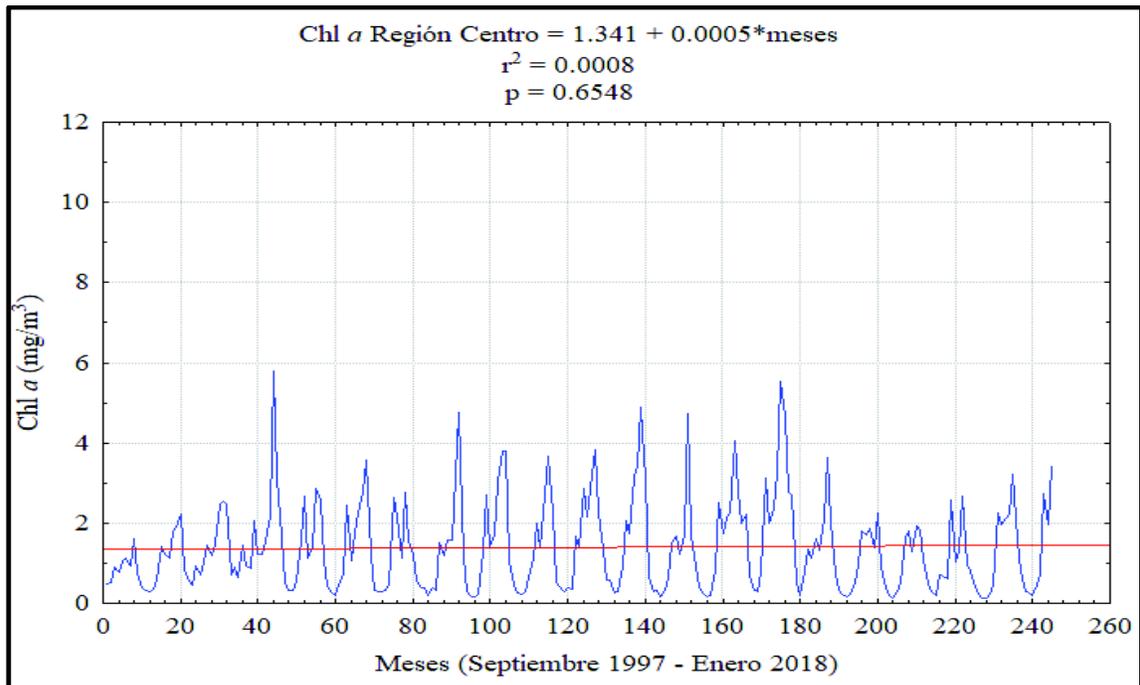


Figura 23. Serie de tiempo de la Clorofila *a* (Chl *a*) de la Región Centro de la zona costera del Estado de Sonora.

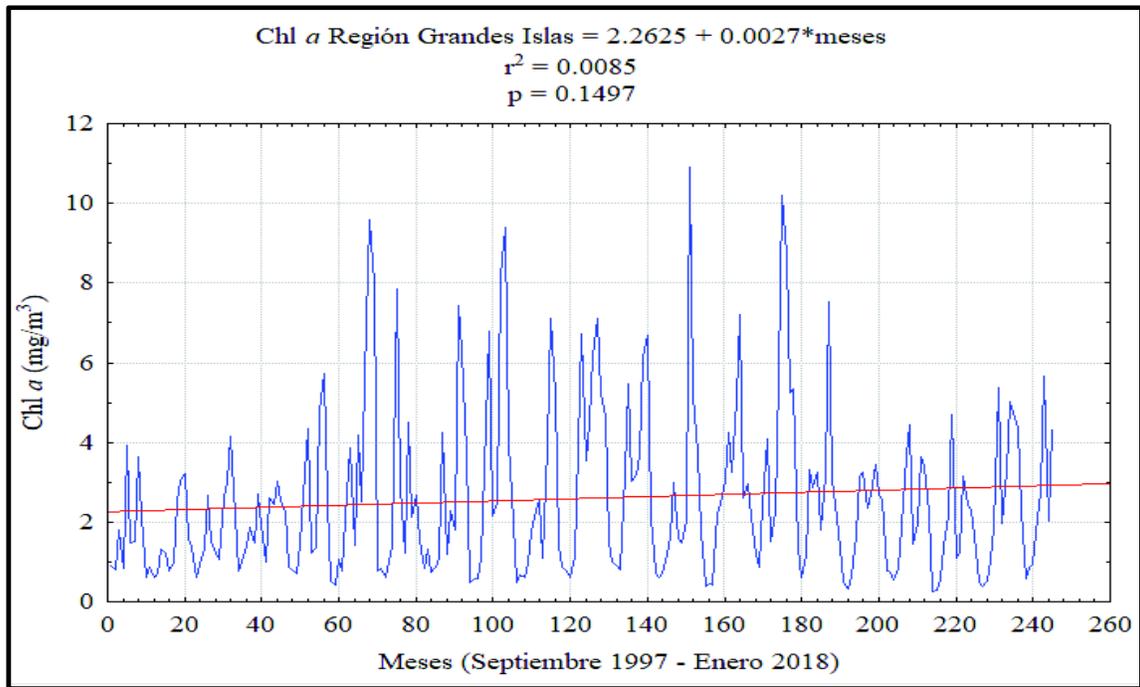


Figura 24. Serie de tiempo de la Clorofila *a* (Chl *a*) de la Región de las Grandes Islas de la zona costera del Estado de Sonora.

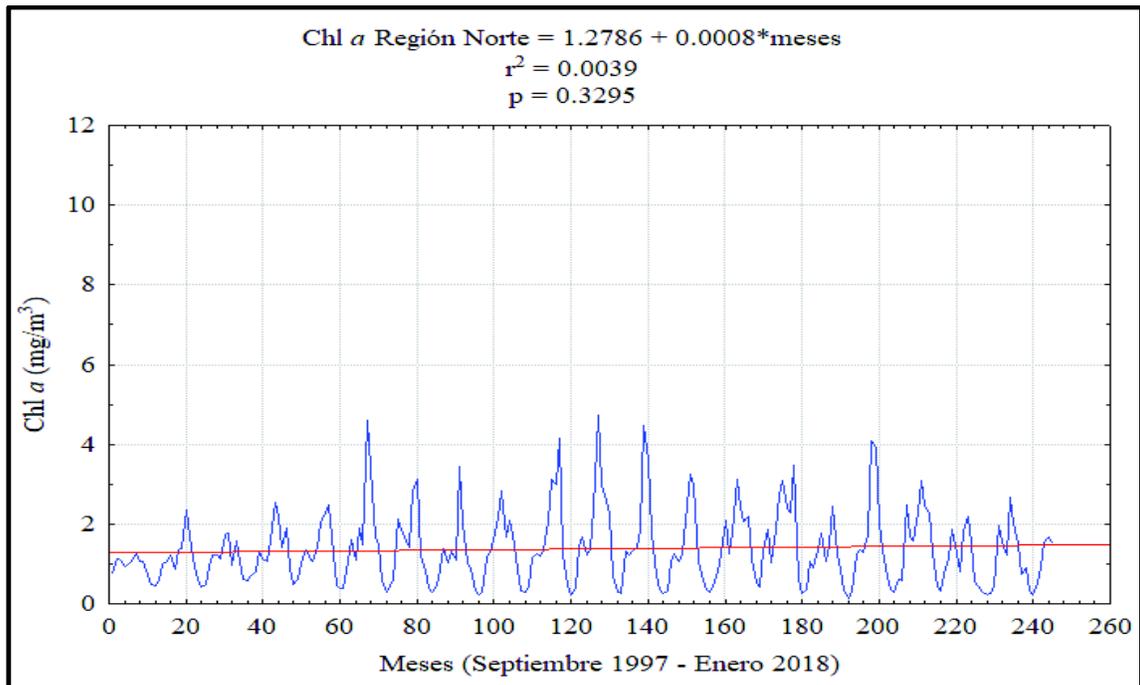


Figura 25. Serie de tiempo de la Clorofila *a* (Chl *a*) de la Región Norte de la zona costera del Estado de Sonora.

Las anomalías de las series de tiempo de la Chl *a* presentaron un rango entre -2.2 y 3.5 mg/m³. La Región Sur presentó un rango entre -1.7 y 3.2 mg/m³ (Figura 26). La Región Centro obtuvo un rango similar entre -1.7 y 3.4 mg/m³ (Figura 27). La Región de las Grandes Islas mostró el rango más amplio de las anomalías entre -1.6 y 3.5 mg/m³ (Figura 28). La Región Norte presentó un rango de valores entre -2.2 y 3 mg/m³ (Figura 29). Las anomalías de Chl *a* de cada región de la zona costera fueron comparadas con la base de datos global del Índice de Oscilación Sur (SOI) del Océano Pacífico Ecuatorial obtenida del portal ClimateDateGuide con un rango de entre -3.4 y 3.2.

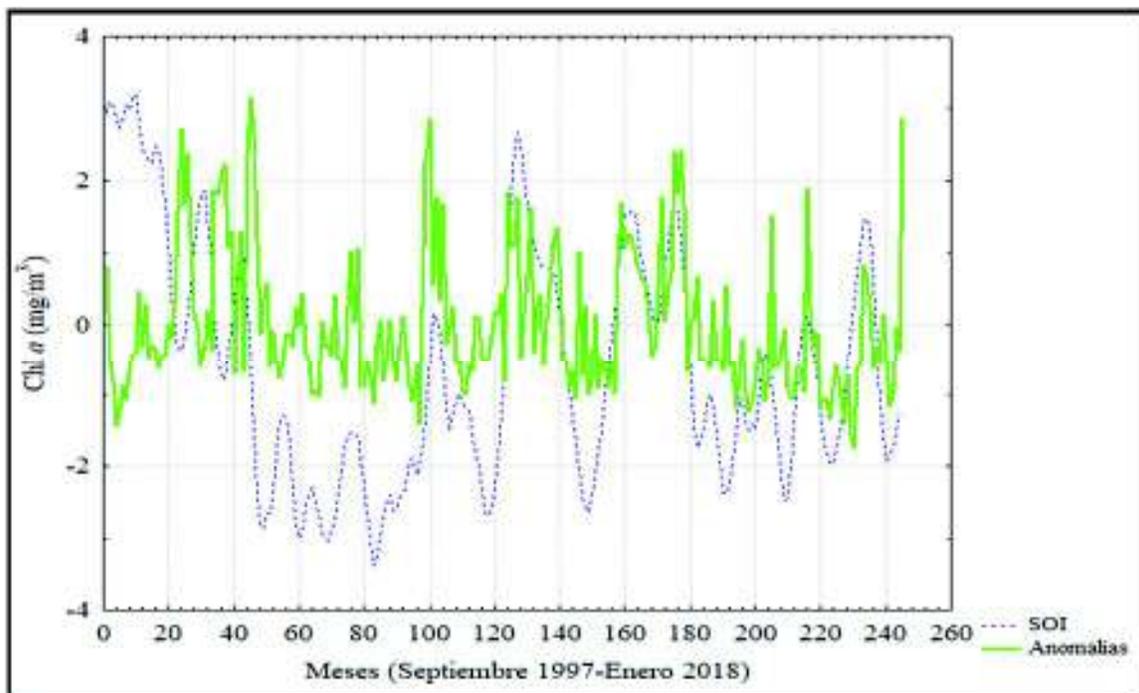


Figura 26. Anomalías de la serie de tiempo de la Chl *a* de la Región Sur de la zona costera del Estado de Sonora.

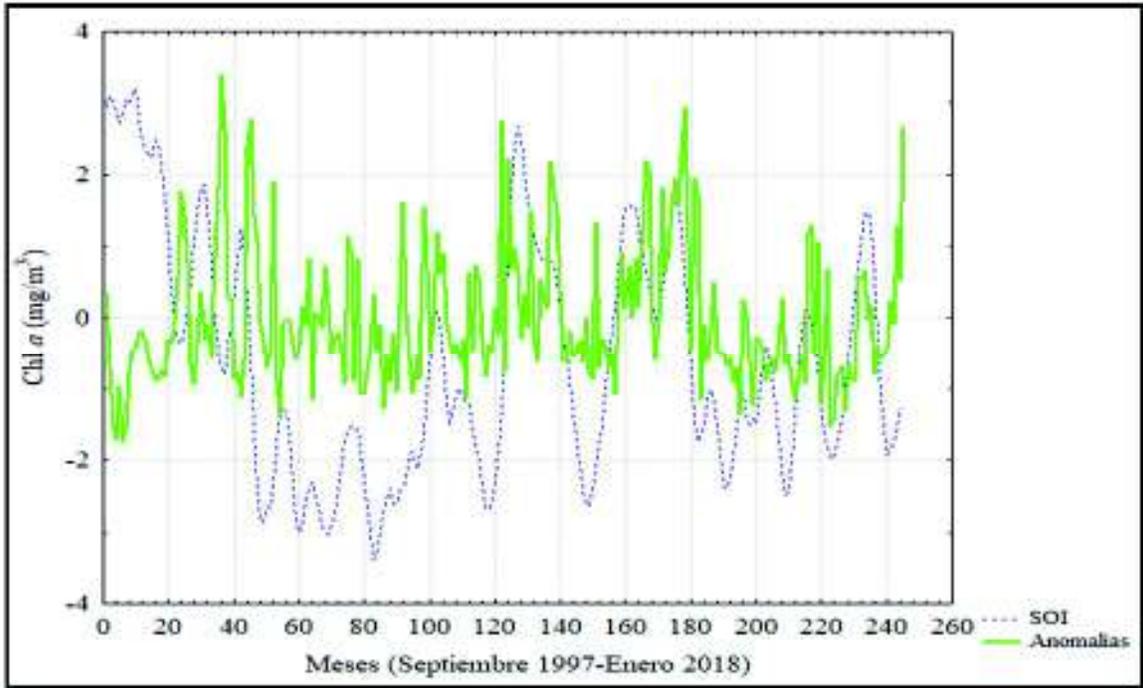


Figura 27. Anomalías de la serie de tiempo de la Chl *a* de la Región Centro de la zona costera del Estado de Sonora.

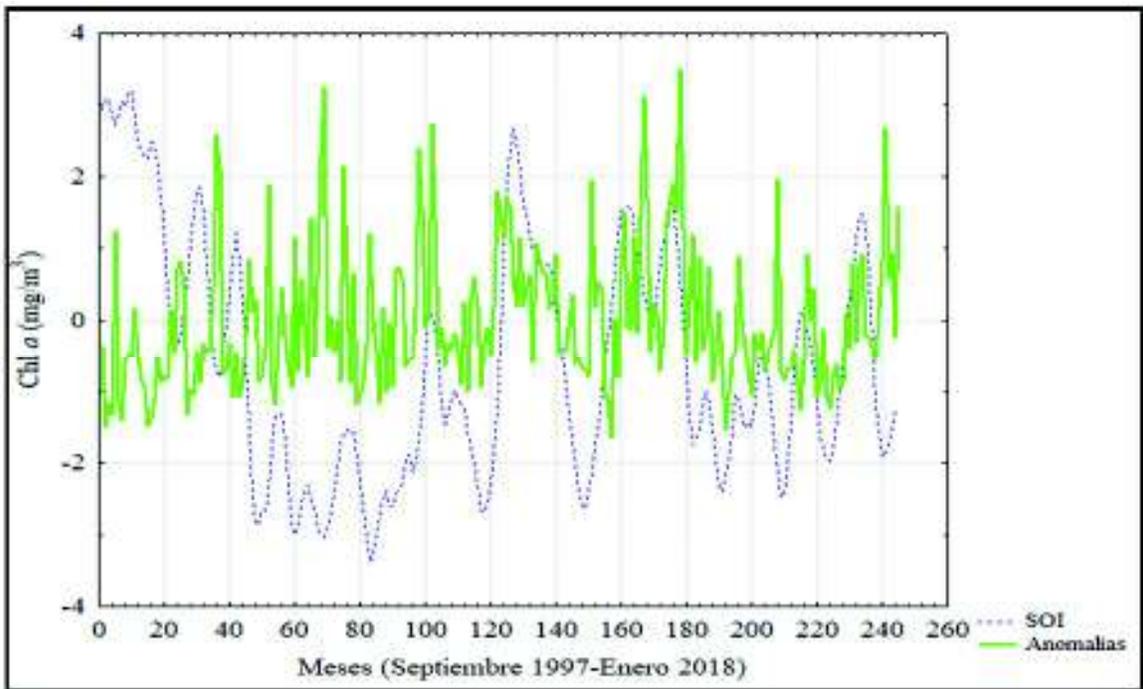


Figura 28. Anomalías de la serie de tiempo de la Chl *a* de la Región de las Grandes Islas de la zona costera del Estado de Sonora.

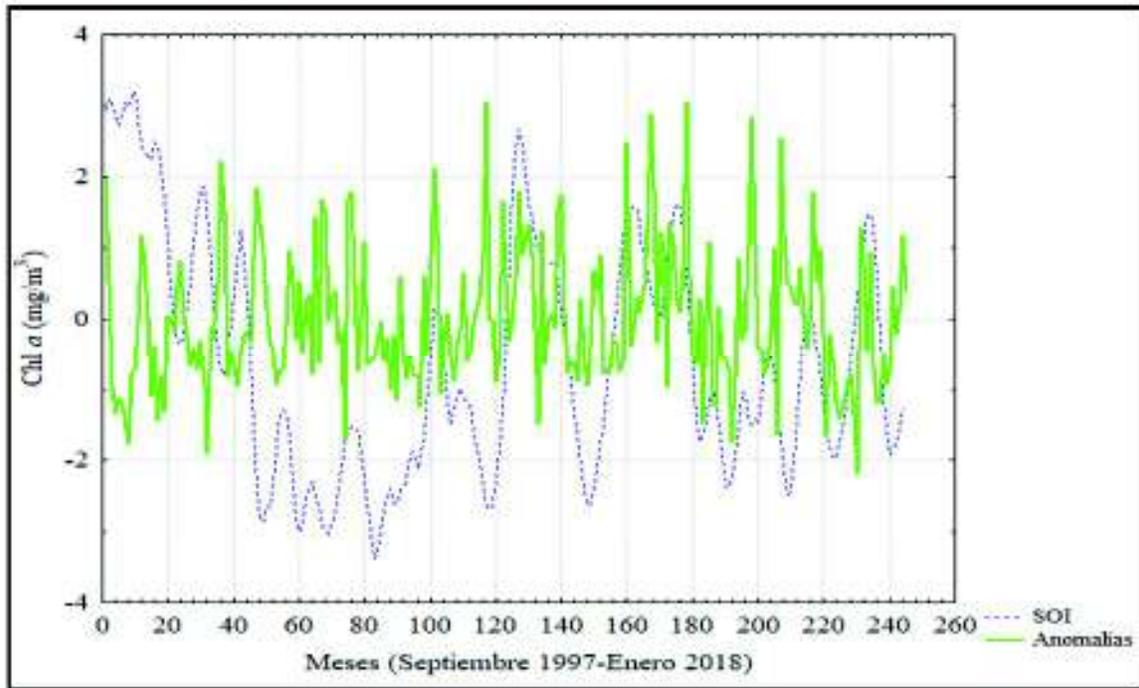


Figura 29. Anomalías de la serie de tiempo de la Chl *a* de la Región Norte de la zona costera del Estado de Sonora.

La climatología de la TSM de la Región Sur obtuvo un valor promedio de 27.82 °C con un valor máximo de 32.43 °C y un valor mínimo de 16.76 °C. La Región Centro presentó un valor promedio de 24.80 °C con un valor máximo de 32.41 °C y un valor mínimo de 15.71 °C. El valor promedio de la Región de las Grandes Islas fue 23.67 °C con un valor máximo de 36.30 °C y un valor mínimo de 11.90 °C y el promedio de la Región Norte fue 23.49 °C con un máximo de 31.83 °C y un mínimo de 15.48 obteniendo una disminución de la temperatura superficial del mar en dirección sur a norte (Tabla 4).

Tabla 4. Datos estadísticos de la climatología de la TSM de cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora.

Regiones	Promedio ± DS	Máximo	Mínimo
Sur	25.81 ± 4.28	32.43	16.76
Centro	24.80 ± 4.77	32.41	15.71
Grandes Islas	23.67 ± 5.68	36.30	11.90
Norte	23.49 ± 5.01	31.83	15.48

La TSM de la zona costera en general mostró una variabilidad estacional con valores máximos en los meses de agosto y septiembre entre los 30 y 32 °C y valores mínimos durante los meses de enero y febrero entre los 18 y 20 °C demostrando dos períodos de transición característicos del Golfo de California (verano e invierno) alrededor de los 25°C entre mayo y junio y durante noviembre (Figura 30).

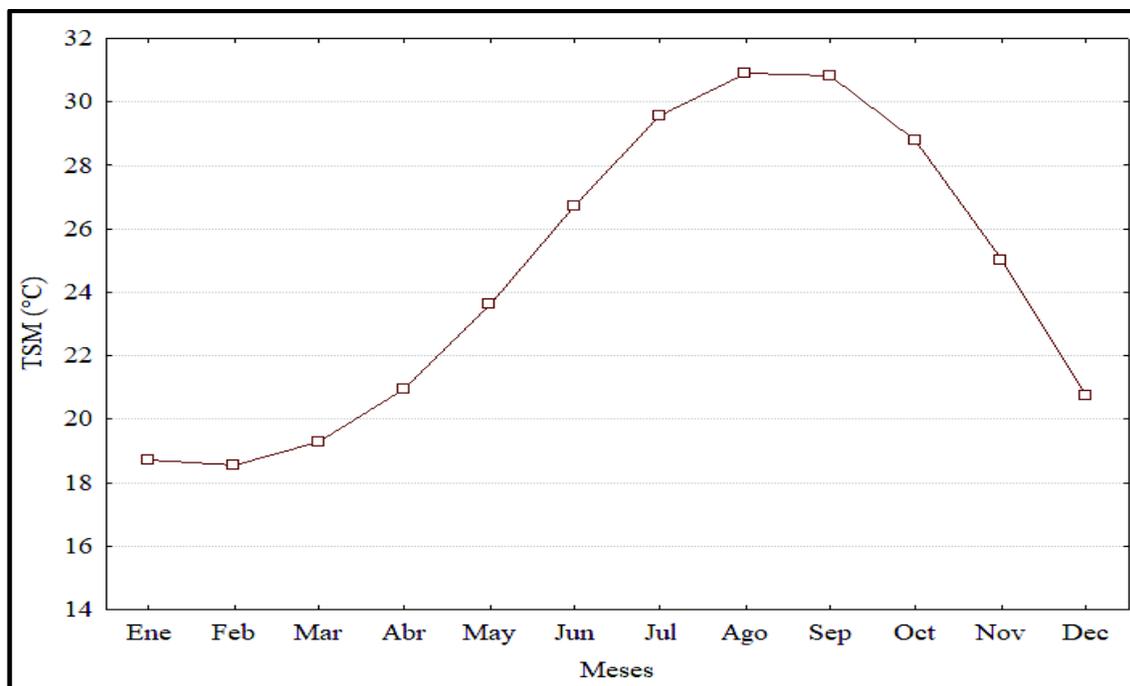


Figura 30. Climatología general de la TSM de la zona costera del Estado de Sonora.

En cada una de las regiones se presentó el mismo tipo de variabilidad con diferentes intervalos de tiempo de los períodos de transición alrededor de los 25 °C (Figura 31). La Región Sur presenta la transición a verano entre abril y mayo alcanzando valores máximos en agosto y septiembre con una duración de 7 meses y un valor promedio de 28.53 °C, un máximo de 32.43 °C y un mínimo de 19.49 °C; la transición a invierno inicia entre noviembre y diciembre con una duración de 4 meses alcanzando los mínimos valores en febrero con un valor promedio de 22.10 °C, un máximo de 28.03 °C y un mínimo de 16.76 °C. La Región Centro inicia su transición a verano entre mayo y junio obteniendo los valores máximos en agosto y septiembre con una duración de 6 meses y un valor promedio de 28.53 °C, un máximo de 32.41 °C y un mínimo de 18.94 °C; la transición a invierno inicia nuevamente entre noviembre y diciembre con una duración de 6 meses obteniendo

los valores mínimos en enero y febrero con un valor promedio de 21.12 °C, un máximo de 30.79 °C y un mínimo de 15.71 °C. La Región de las Grandes Islas inicia la transición al verano entre mayo y junio con valores máximos en agosto con una duración de 5 meses y un valor promedio de 28.77 °C, un máximo de 36.30 °C y un valor mínimo de 13.92 °C; la transición a invierno inicia entre octubre y noviembre con valores mínimos en enero con una duración de 7 meses con un valor promedio de 20.08 °C, un máximo de 34.85 °C y un mínimo de 11.90 °C. La Región Norte tiene una transición de verano que inicia en junio con valores máximos en agosto con una duración de 4 meses con un valor promedio de 29.01 °C, un máximo de 31.83 °C y un mínimo de 24.03 °C; la transición a invierno inicia en octubre con una duración de 7 meses alcanzando los valores mínimos en febrero con un valor promedio de 20.76 °C, un máximo de 29.47 °C y un mínimo de 15.48 °C (Tabla 5 y Tabla 6).

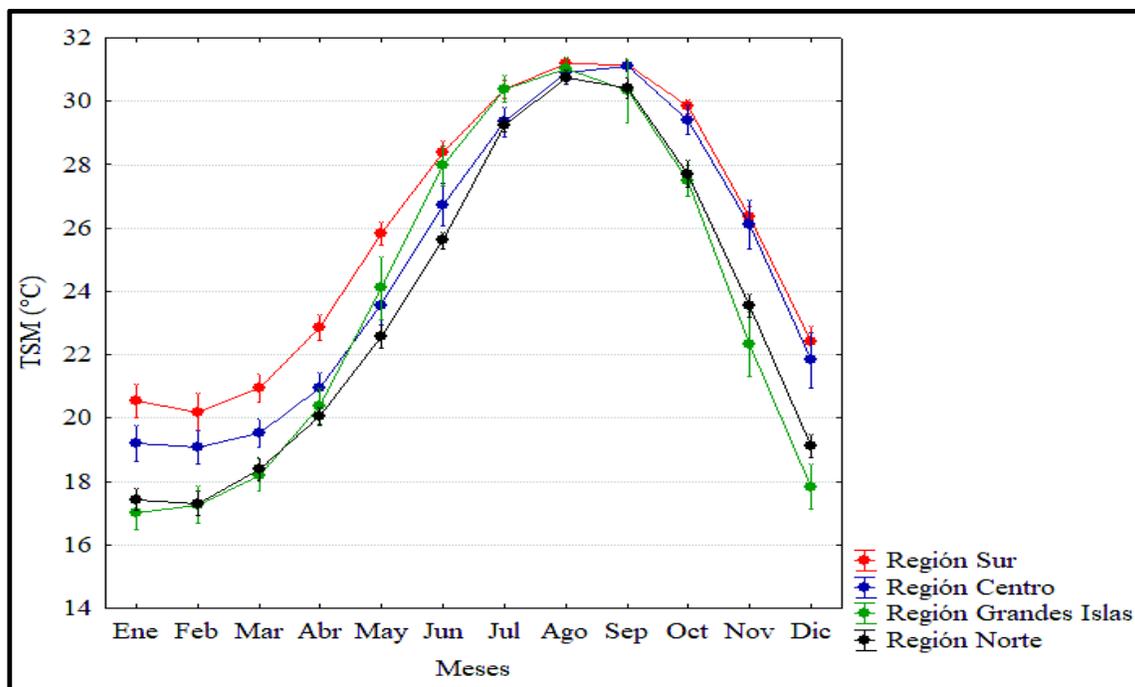


Figura 31. Climatología de la TSM de cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora.

Tabla 5. Datos estadísticos de la climatología de la TSM de cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora durante la etapa de verano.

Regiones	Tiempo	Promedio \pm DS	Máximo	Mínimo
Sur	7 meses	28.53 \pm 3.00	32.43	19.49
Centro	6 meses	28.55 \pm 2.96	32.41	18.94
Grandes Islas	5 meses	28.77 \pm 3.32	36.30	13.92
Norte	4 meses	29.01 \pm 2.18	31.83	24.03

Tabla 6. Datos estadísticos de la climatología de la TSM de cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora durante la etapa de invierno.

Regiones	Tiempo	Promedio \pm DS	Máximo	Mínimo
Sur	5 meses	22.10 \pm 2.68	28.03	16.76
Centro	6 meses	21.12 \pm 3.06	30.79	15.71
Grandes Islas	7 meses	20.08 \pm 3.99	34.85	11.90
Norte	8 meses	20.76 \pm 3.55	29.47	15.48

Las climatologías de cada una de las regiones de la zona costera mostraron una serie de anomalías positivas y negativas. La Región Sur mostró anomalías positivas entre 0 y 3 °C con valores máximos en mayo y mínimos en agosto y septiembre. La Región Centro obtuvo un rango de valores entre -1 y 2 °C con valores máximos en noviembre y diciembre asociado a anomalías positivas mientras que los valores mínimos se presentaron en julio asociados a anomalías negativas. La Región de las Grandes Islas mostró el rango más amplio de anomalías entre -3 y 1 °C obteniendo anomalías positivas con valores máximos en junio y anomalías negativas con valores mínimos en diciembre. La Región Norte solo mostró anomalías negativas entre -2 y 0 °C con valores máximos en agosto y valores mínimos en diciembre (Figura 32).

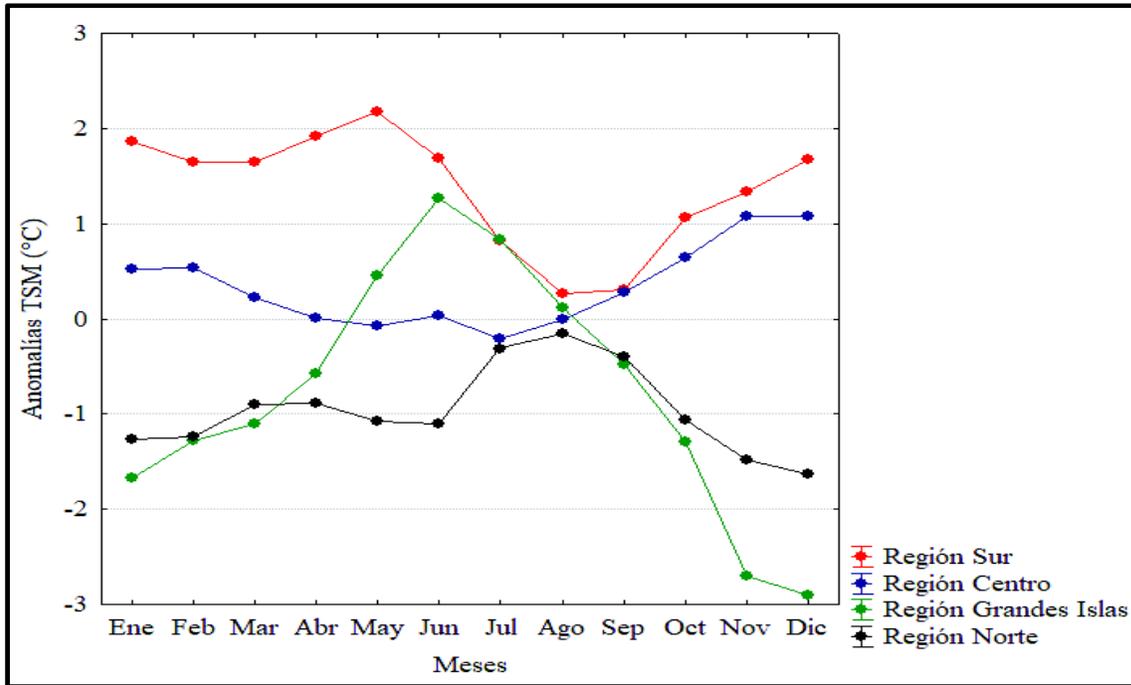


Figura 32. Anomalías de la climatología de la TSM de cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora.

Para la comparación de datos mensuales de la TSM durante las etapas de verano e invierno entre las cuatro regiones, los resultados se comprobaron mediante una prueba de Kruskal-Wallis y la diferencia de los valores mensuales de la TSM se confirmaron mediante una prueba post de comparación múltiple con un ajuste de Bonferroni con un nivel de significancia de 0.05 entre las cuatro regiones.

Los valores mensuales durante la etapa de verano entre cada una de las regiones no mostraron una diferencia estadística ($p = 0.7763$) al igual que en la prueba post hoc tampoco se encontraron diferencias entre cada una de las regiones (Tabla 7). Sin embargo, durante la etapa de invierno las 4 regiones mostraron diferencias significativas ($p < 0.0001$). Las diferencias de los valores mensuales de la TSM durante la época de invierno fueron confirmadas mediante una prueba post hoc de comparación múltiple con un ajuste de Bonferroni con un nivel de significancia de 0.05 entre las cuatro regiones obteniendo diferencias entre la Región Sur con todas las Regiones, la Región Central con la Región de las Grandes Islas, la Región de las Grandes Islas con la Región Sur y Región Central y finalmente la Región Norte con la Región Sur y la Región de las Grandes Islas (Tabla 8). Estos resultados fueron comprobados con un diagrama de caja de bigotes de la varianza

obteniendo valores con poca variabilidad durante la etapa de verano (Figura 33) a comparación de los valores mensuales de la TSM durante invierno (Figura 34).

Tabla 7. Comparación múltiple con un ajuste de Bonferroni entre las cuatro regiones de la zona costera del Estado de Sonora durante la etapa de verano.

	Sur	Centro	Grandes Islas	Norte
Sur		1.000000	1.000000	1.000000
Centro	1.000000		1.000000	1.000000
Grandes Islas	1.000000	1.000000		1.000000
Norte	1.000000	1.000000	1.000000	

Tabla 8. Comparación múltiple con un ajuste de Bonferroni entre las cuatro regiones de la zona costera del Estado de Sonora durante la etapa de invierno.

	Sur	Centro	Grandes Islas	Norte
Sur		0.003880*	0.000000*	0.000000*
Centro	0.003880*		0.000094*	0.339130
Grandes Islas	0.000000*	0.000094*		0.048219*
Norte	0.000000*	0.339130	0.048219*	

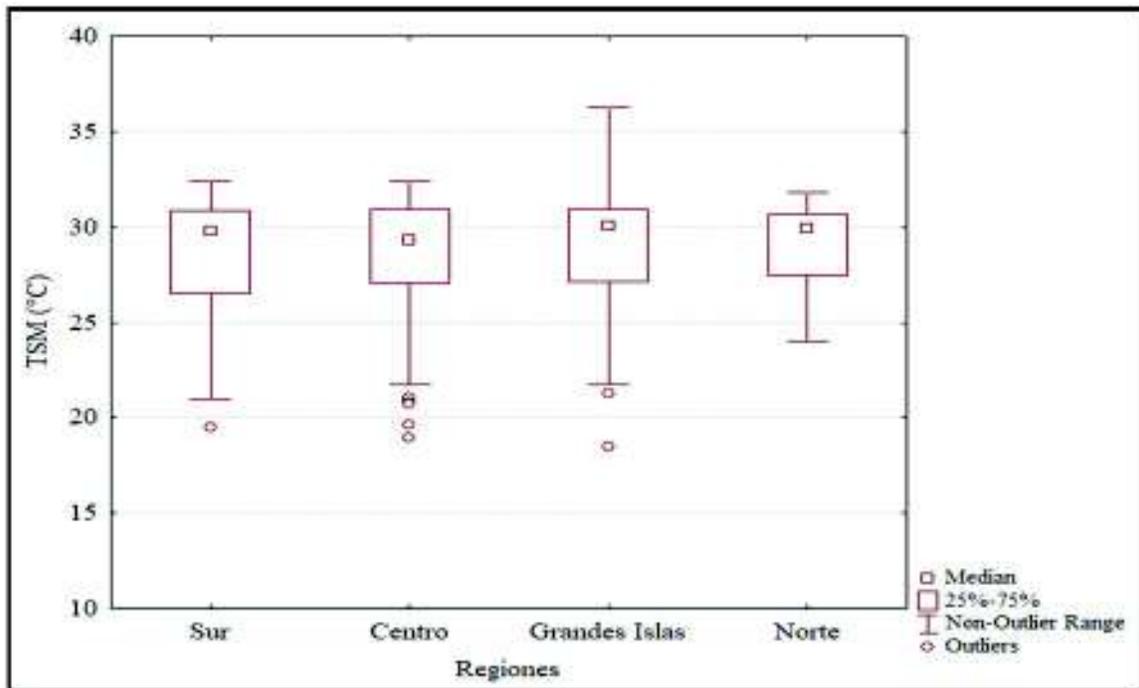


Figura 33. Diagrama de caja de bigotes de la TSM de la varianza de cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora durante la etapa de verano.

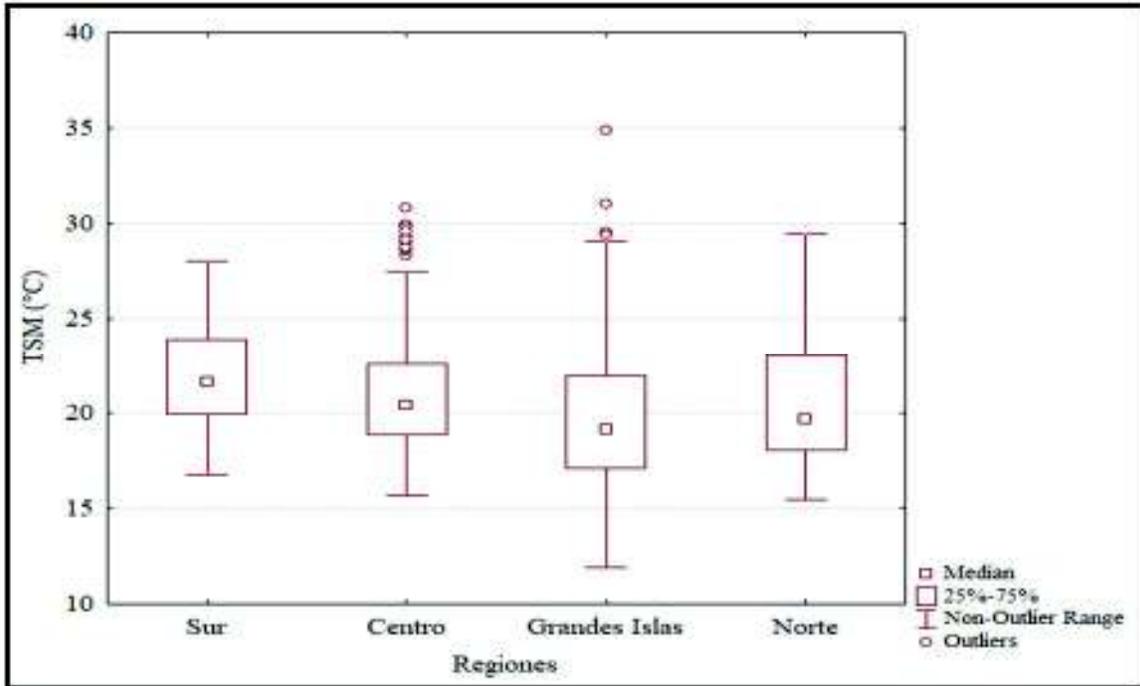


Figura 34. Diagrama de caja de bigotes de la TSM de la varianza de cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora durante la etapa de invierno.

Se realizaron Curvas ROC (Receiver Operating Characteristic por sus siglas en inglés), una herramienta estadística que nos permite clasificar dos regiones basadas en los valores mensuales de TSM en las etapas de verano e invierno. Se obtuvo que durante la etapa de verano las regiones fueron prácticamente similares al presentar un intervalo de confianza por el área bajo la curva (AUC por sus siglas en inglés) donde 0.5 está en este intervalo (Figura 35), siendo imposible obtener diferencias entre esas regiones. Sin embargo, durante el período de invierno los resultados fueron diferentes mostrando diferencias entre cada una de las regiones al obtener un intervalo de confianza por el AUC mayor de 0.5 (Figura 36).

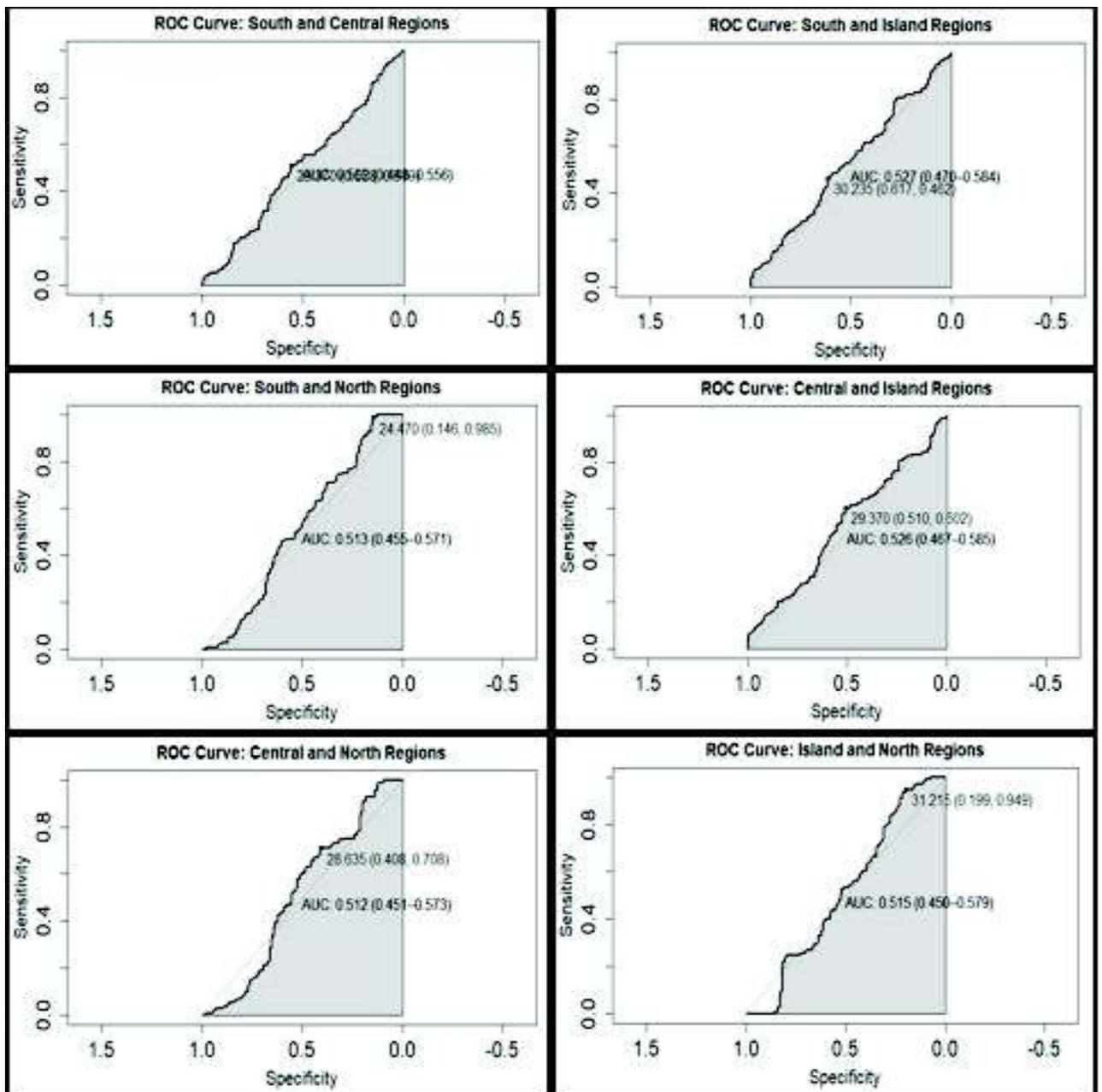


Figura 35. Análisis de Curva ROC de la TSM entre cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora durante la etapa de verano.

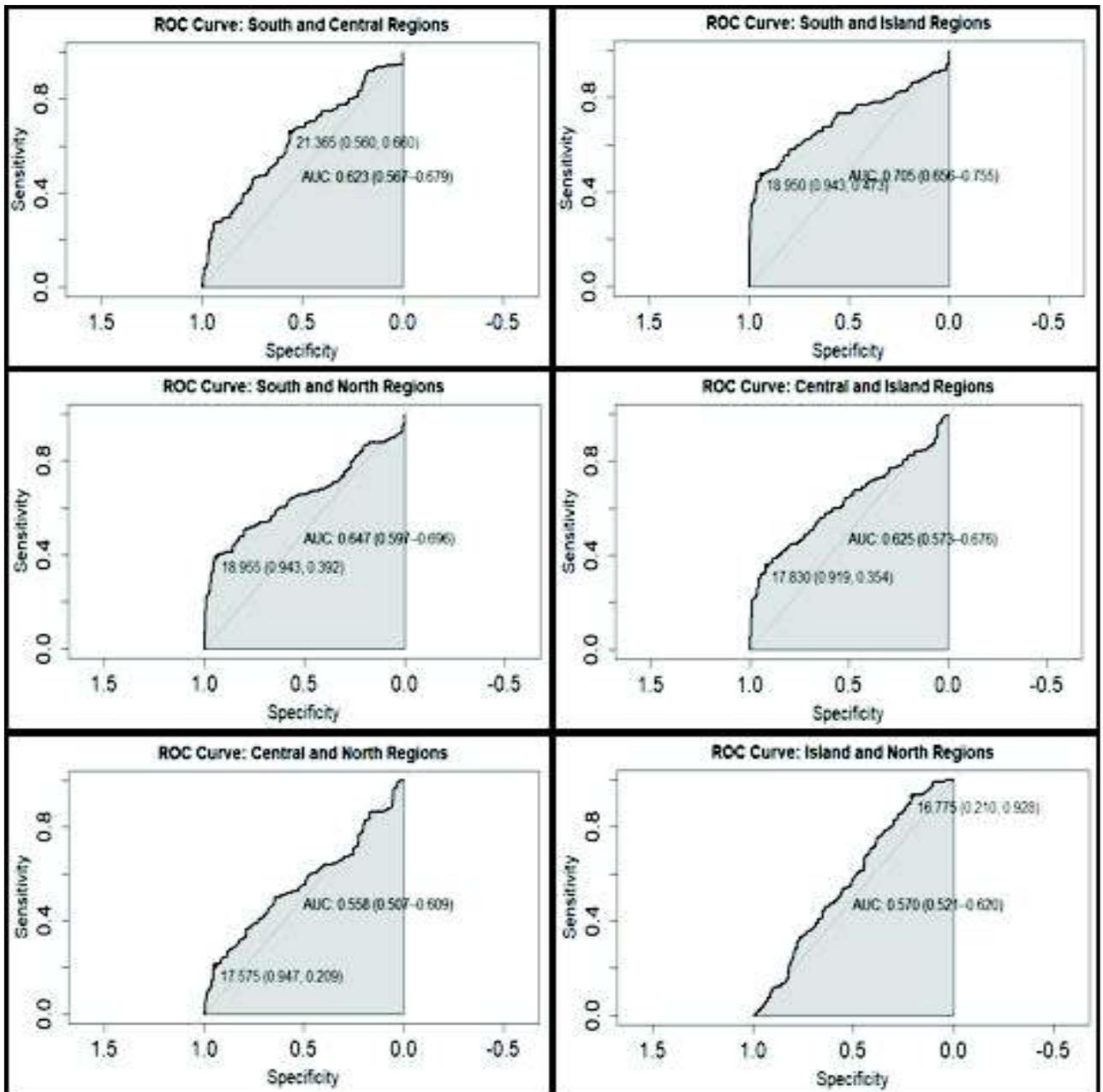


Figura 36. Análisis de Curva ROC de la TSM entre cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora durante la etapa de invierno.

La climatología de la Chl *a* de la Región Sur obtuvo un valor promedio de 1.51 mg/m³ con un valor máximo de 9.05 mg/m³ y un valor mínimo de 0.16 mg/m³. La Región Centro presentó un valor promedio de 1.49 mg/m³ con un valor máximo de 5.78 mg/m³ y un valor mínimo de 0.12 mg/m³. El valor promedio de la Región de las Grandes Islas fue 2.59 mg/m³ con un valor máximo de 10.90 mg/m³ y un valor mínimo de 0.27 mg/m³ y el promedio de la Región Norte fue 1.38 mg/m³ con un máximo de 4.72 mg/m³ y un mínimo de 0.12 (Tabla 9).

Tabla 9. Datos estadísticos de la climatología de la Chl *a* de cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora.

Regiones	Promedio ± DS	Máximo	Mínimo
Sur	1.51 ± 1.49	9.05	0.16
Centro	1.40 ± 1.13	5.78	0.12
Grandes Islas	2.59 ± 2.08	10.90	0.27
Norte	1.38 ± 0.91	4.72	0.12

La Chl *a* de la zona costera en general mostró una variabilidad estacional con valor máximo en marzo alrededor de los 3 mg/m³ y valor mínimo en agosto cerca de los 0.5 mg/m³ asociados a los períodos de transición del Golfo de California (Figura 37).

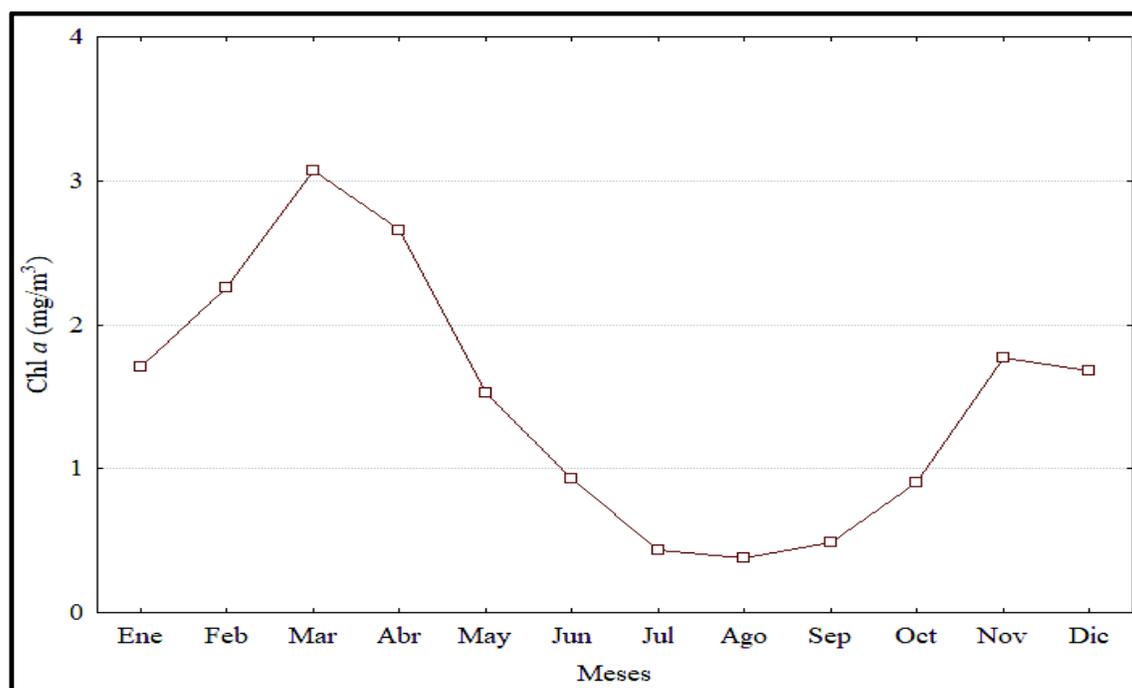


Figura 37. Climatología general de la Chl *a* de la zona costera del Estado de Sonora.

Se presentó una variación de los niveles promedios de Chl *a* en dirección sur a norte demostrando una variabilidad estacional en general con valores máximos durante el mes de marzo con un decrecimiento a partir del mes de abril alcanzando valores mínimos en agosto y un incremento general durante los meses de octubre y noviembre (Figura 38). Tomando en cuenta la duración de los períodos de transición de cada región en base a la TSM se realizaron análisis descriptivos de la Chl *a* durante verano e invierno. En la etapa de verano la Región Sur presentó un valor promedio de 0.99 mg/m³, un valor máximo de 3.11 mg/m³ y un valor mínimo de 0.16 mg/m³; la Región Centro presentó un promedio de 0.61 mg/m³, un máximo de 3.11 mg/m³ y un mínimo de 0.12 mg/m³; la Región de las Grandes Islas obtuvo un promedio de 1.34 mg/m³, un máximo de 7.99 mg/m³ y un mínimo de 0.27 mg/m³; la Región Norte obtuvo un promedio de 0.64 mg/m³, un máximo de 3.48 mg/m³ y un mínimo de 0.12 mg/m³ (Tabla 10).

Durante la etapa de invierno la Región Sur presentó un valor promedio de 2.23 mg/m³, un máximo de 7.65 mg/m³ y un mínimo de 0.45 mg/m³; la Región Centro presentó un valor promedio de 2.18 mg/m³, un máximo de 5.78 mg/m³ y un mínimo de 0.76 mg/m³; la Región de las Grandes Islas obtuvo un promedio de 3.48 mg/m³, un máximo de 10.90 mg/m³ y un mínimo de 0.77 mg/m³; la Región Norte obtuvo un promedio de 1.74 mg/m³, un máximo de 4.72 mg/m³ y un mínimo de 0.46 mg/m³ (Tabla 11).

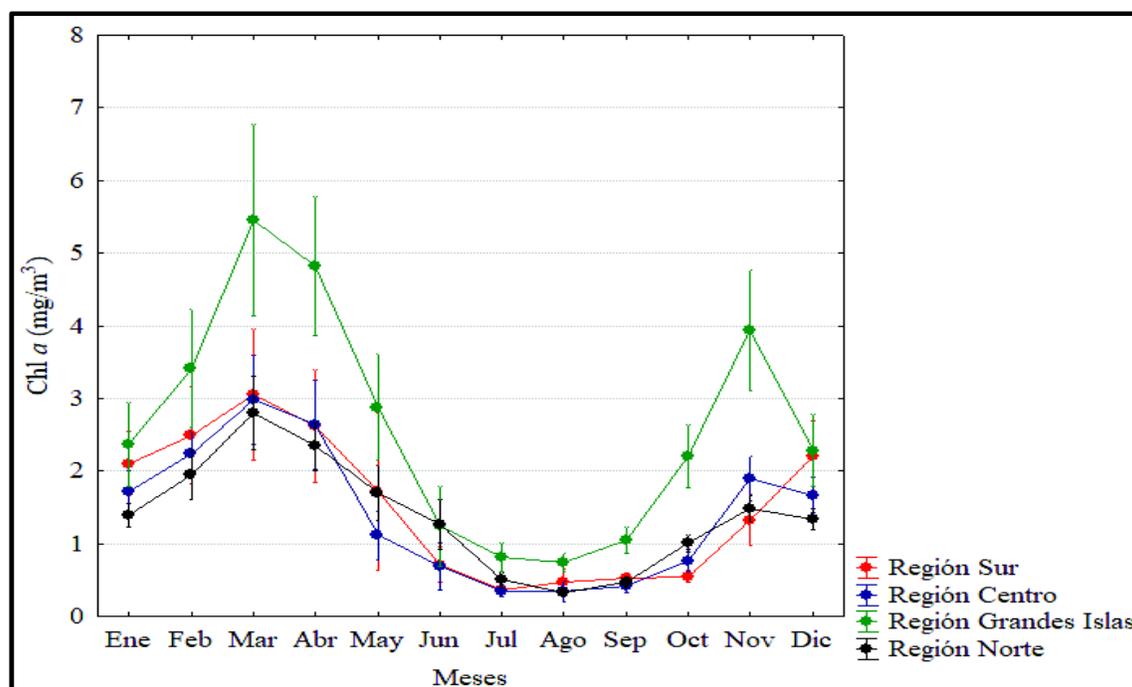


Figura 38. Climatología de la Chl *a* de cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora.

Tabla 10. Datos estadísticos de la climatología de la Chl *a* de cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora durante la etapa de verano.

Regiones	Tiempo	Promedio \pm DS	Máximo	Mínimo
Sur	7 meses	0.99 ± 1.34	9.05	0.16
Centro	6 meses	0.61 ± 0.53	3.11	0.12
Grandes Islas	5 meses	1.34 ± 1.20	7.99	0.27
Norte	4 meses	0.64 ± 0.53	3.48	0.12

Tabla 11. Datos estadísticos de la climatología de la Chl *a* de cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora durante la etapa de invierno.

Regiones	Tiempo	Promedio \pm DS	Máximo	Mínimo
Sur	5 meses	2.23 ± 1.38	7.65	1.38
Centro	6 meses	2.18 ± 1.01	5.78	1.01
Grandes Islas	7 meses	3.48 ± 2.11	10.90	2.11
Norte	8 meses	1.74 ± 0.83	4.72	0.83

Se obtuvieron anomalías positivas y negativas en cada una de las regiones de la zona costera. La Región Sur obtuvo un rango de anomalías entre -1 y 1 °C con un valor máximo en diciembre asociado a anomalías positivas y valor mínimo en noviembre relacionado con anomalías negativas. La Región Centro obtuvo el mismo rango de valores que la Región Sur con un valor máximo en noviembre (anomalía positiva) y valor mínimo en mayo (anomalía negativa). La Región de las Grandes Islas obtuvo el rango más amplio

de anomalías siendo únicamente de tipo positivas entre 0 a 3 °C con valor máximo en abril y valor mínimo en junio. La Región Norte obtuvo en su mayoría anomalías negativas abarcando un rango entre -1 y 1 °C con valor máximo en junio (anomalía positiva) y valores mínimos de enero a abril y de noviembre a diciembre (anomalías negativas) (Figura 39).

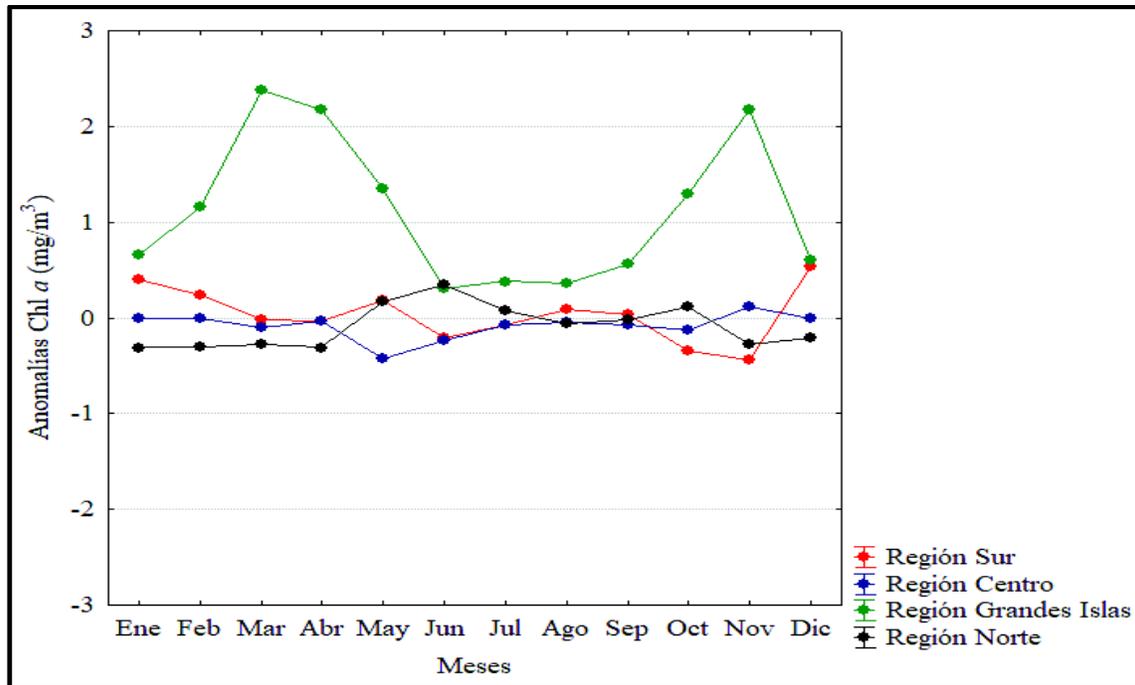


Figura 39. Anomalías de la climatología de la Chl *a* de cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora.

Los resultados obtenidos en la Prueba de Kruskal-Wallis para la clorofila mostraron diferencias significativas entre cada una de las regiones en la etapa de verano e invierno ($p = < 0.0001$). Las diferencias de los valores mensuales de la Chl *a* durante verano e invierno se confirmaron mediante una prueba post hoc de comparación múltiple con un ajuste de Bonferroni con un nivel de significancia de 0.05 entre las cuatro regiones obteniendo las siguientes diferencias; durante verano la Región Sur mostró diferencia con la Región de las Grandes Islas, la Región Centro con la Región de las Grandes Islas, la Región de las Grandes Islas con cada una de las Regiones y la Región Norte con la Región de las Grandes Islas (Tabla 12) mientras que durante la etapa de invierno la Región Sur mostró diferencia con la Región de las Grandes Islas, la Región Centro con la Región de las Grandes Islas y Región Norte, la Región de las Grandes Islas con todas las regiones y la Región Norte con

la Región Centro y la Región de las Grandes Islas (Tabla 13). Estos resultados fueron comprobados con un diagrama de caja de bigotes de la varianza mostrando una clara diferencia entre los valores mensuales de la Chl *a* durante verano (Figura 40) e invierno (Figura 41).

Tabla 12. Comparación múltiple con un ajuste de Bonferroni entre las cuatro regiones de la zona costera del Estado de Sonora durante la etapa de verano.

	Sur	Centro	Grandes Islas	Norte
Sur		0.058857	0.000000*	0.696696
Centro	0.058857		0.000000*	1.000000
Grandes Islas	0.000000*	0.000000*		0.000000*
Norte	0.696696	1.000000	0.000000*	

Tabla 13. Comparación múltiple con un ajuste de Bonferroni entre las cuatro regiones de la zona costera del Estado de Sonora durante la época de invierno.

	Sur	Centro	Grandes Islas	Norte
Sur		1.000000	0.000000*	0.064857
Centro	1.000000		0.000003*	0.002182*
Grandes Islas	0.000000*	0.000003*		0.000000*
Norte	0.064857	0.002182*	0.000000*	

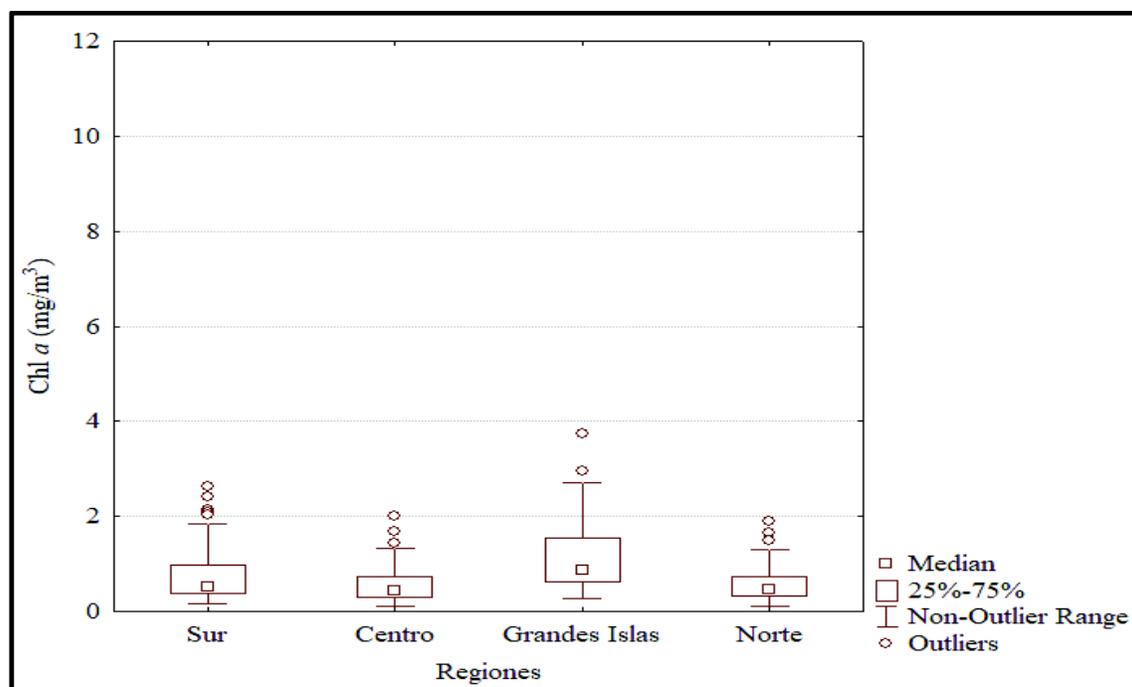


Figura 40. Diagrama de caja de bigotes de la Chl *a* de la varianza de cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora durante la etapa de verano.

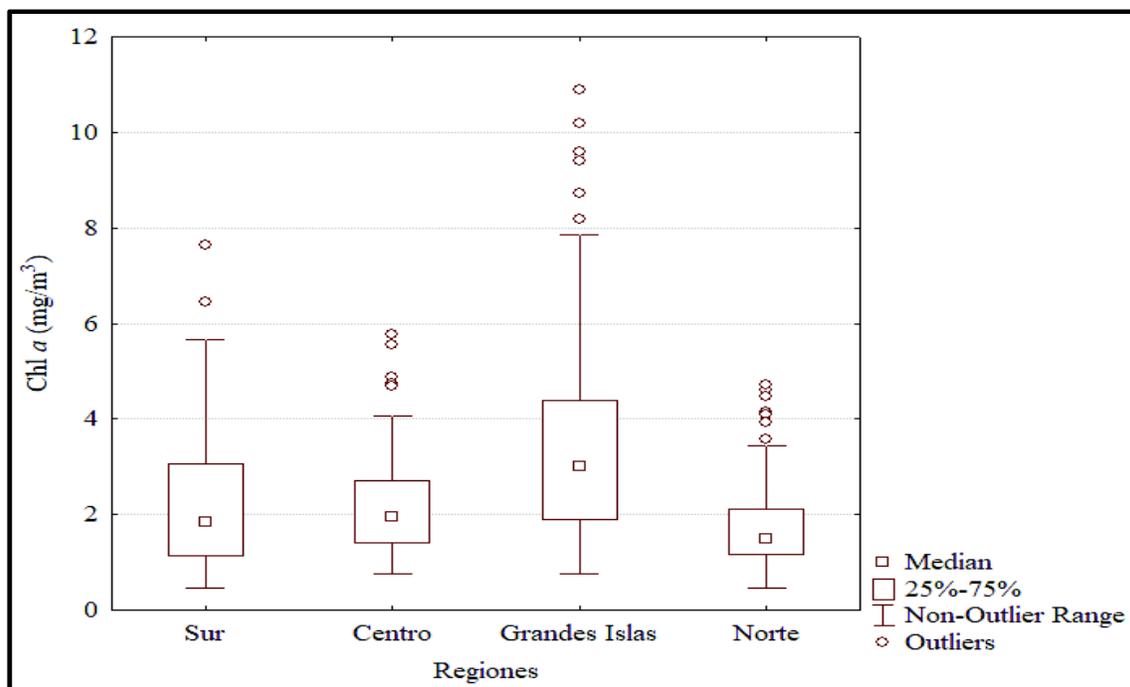


Figura 41. Diagrama de caja de bigotes de la Chl *a* de la varianza de cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora durante la etapa de invierno.

Se realizaron Curvas ROC con los valores mensuales de Chl *a* de cada una de las regiones de la zona costera obteniendo que durante la etapa de verano se presentaron diferencias en la concentración de Chl *a* entre diferentes regiones al obtener un intervalo de confianza de AUC mayor que 0.5 excepto en las comparaciones entre la Región Sur y Norte (AUC: 0.560: (0.483-0.637) y la Región Centro y Norte (AUC: 0.539 (0.459-0.618) (Figura 42). Estas diferencias también se presentaron en invierno en la mayoría de las regiones de la zona costera por presentar un intervalo de confianza del AUC mayor de 0.5 a excepción de la comparación entre la Región Sur y la Región Centro (AUC: 0.529 (0.451-0.608) (Figura 43).

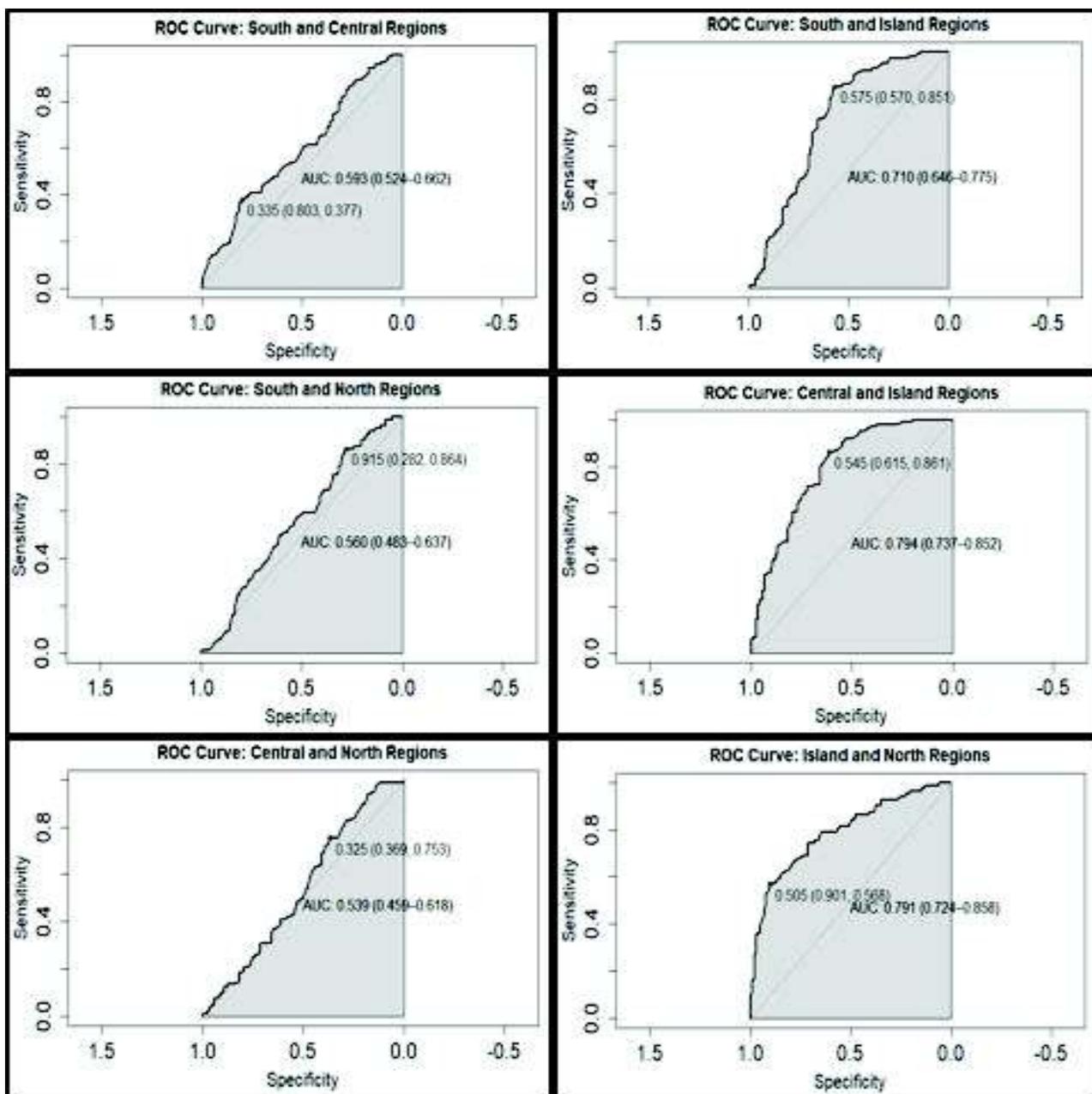


Figura 42. Análisis de Curva ROC de la Chl *a* entre cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora durante la etapa de verano.

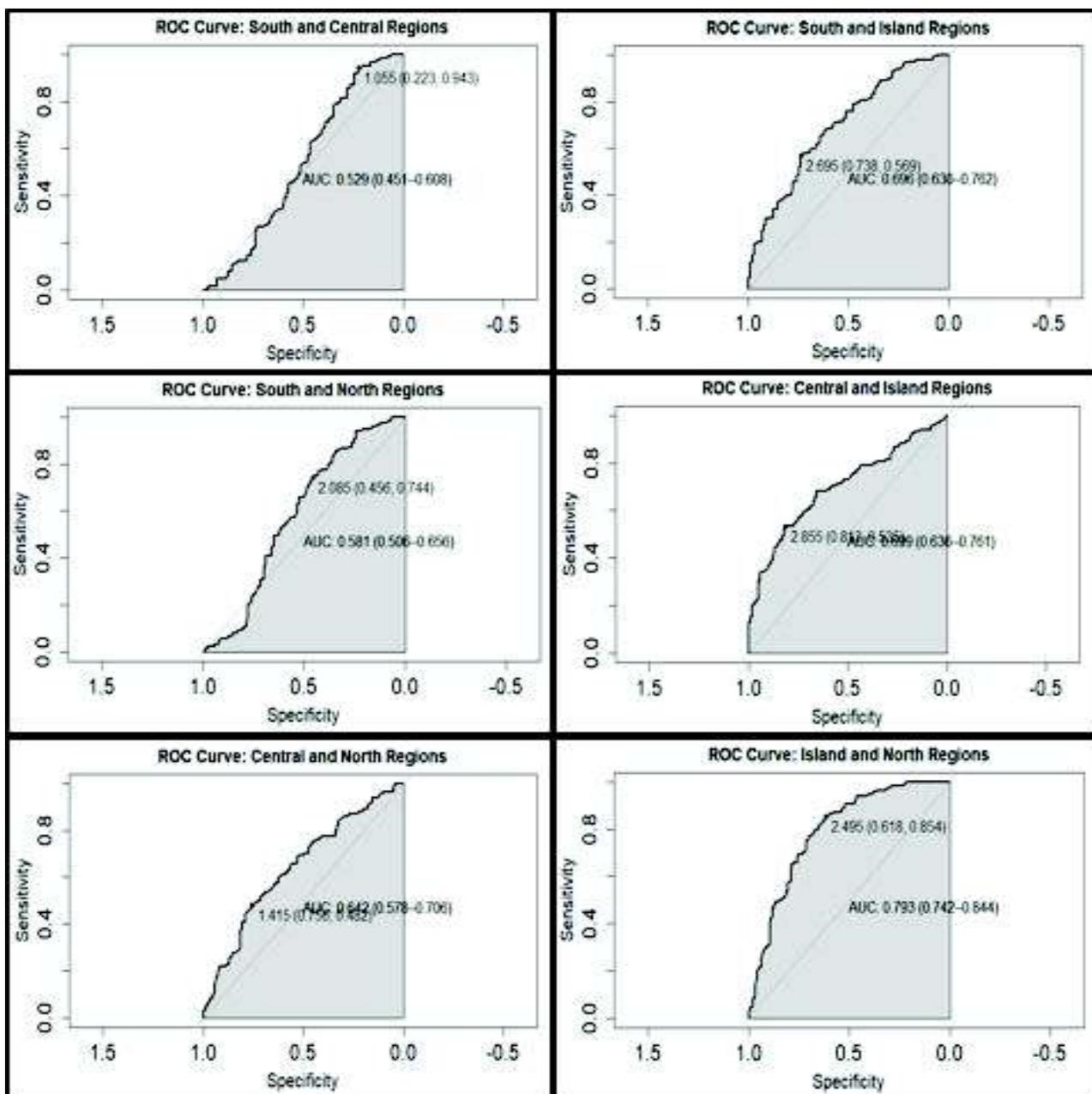


Figura 43. Análisis de Curva ROC de la Chl *a* entre cada una de las regiones de la zona costera del Estado de Sonora durante la etapa de invierno.

Con base a los valores promedios de Chl *a* obtenidos en cada región se determinó el estado trófico siguiendo el criterio de Morel y Berthon (1989) tomando en cuenta los niveles de Chl *a* (Tabla 14). Siguiendo este criterio, se obtuvo que la Región Centro y Región Norte presentan un estado mesotrófico que corresponde a un nivel medio de nutrientes. Sin embargo, la Región Sur y Región de las Grandes Islas presentaron un nivel eutrófico, es decir, un nivel con un alto contenido de nutrientes.

Tabla 14. Niveles tróficos en base al contenido de clorofila *a* (mg/m³) en base a la escala de Morel y Berthon (1989).

Nivel de clorofila (mg/m³)	Estado trófico
0.00 – 0.15	Ultraoligotrófico
0.015 – 0.45	Oligotrófico
0.45 – 1.50	Mesotrófico
1.50 – 50.00	Eutrófico
>5.00	Hipertrófico

VI.3. Diagramas de dispersión y correlación TSM y Chl *a*

Se realizó un diagrama de dispersión y correlación entre la TSM y la Chl *a* de la zona costera, pues en la oceanografía se presenta una relación directa entre ambas variables representándose mediante un modelo de regresión lineal tomando en cuenta el período de tiempo en que coinciden las fechas, en este caso el diagrama de dispersión se inició en septiembre de 1997 hasta marzo de 2016. El modelo de regresión lineal para la zona costera en general fue el siguiente: $\text{Chl } a \text{ (mg/m}^3\text{)} = 6.0956 - 0.1772 \cdot ^\circ\text{C}$ con un coeficiente de determinación bajo ($r^2 = 0.3145$, $p = 0.0000$) (Figura 44) indicando que del total de la variación de la clorofila *a* en la zona costera, aproximadamente el 31% corresponde a la temperatura superficial del mar.

Mismo procedimiento se realizó en cada una de las regiones de la zona costera (Sur, Centro, Grandes Islas y Norte) para determinar el modelo lineal y sus coeficientes de variación respectivamente. La Región Sur (Figura 45) obtuvo el siguiente modelo lineal: $\text{Chl } a \text{ (mg/m}^3\text{)} = 7.3117 - 0.2235 \cdot ^\circ\text{C}$ con un coeficiente de determinación bajo ($r^2 = 0.4123$, $p = 0.0000$) demostrando un porcentaje aproximado de 41% de la variabilidad de la clorofila *a* asociada a la temperatura superficial del mar. La Región Centro (Figura 46) presentó el siguiente modelo lineal: $\text{Chl } a \text{ (mg/m}^3\text{)} = 5.5476 - 0.1656 \cdot ^\circ\text{C}$ con un coeficiente de determinación medio ($r^2 = 0.4900$, $p = 0.0000$) explicando que el 49% de los cambios en la clorofila *a* se deben a la temperatura superficial del mar. La Región de las Grandes Islas (Figura 47) mostró el siguiente modelo lineal: $\text{Chl } a \text{ (mg/m}^3\text{)} = 7.3772 - 0.2007 \cdot ^\circ\text{C}$ y un coeficiente de determinación muy bajo ($r^2 = 0.2647$, $p = 0.0000$) revelando que el 26% de la variabilidad de la clorofila *a* es causada por la temperatura superficial del mar.

La Región Norte (Figura 48) obtuvo el siguiente modelo lineal: $\text{Chl } a \text{ (mg/m}^3\text{)} = 4.1591 - 0.116 \cdot \text{TSM}$ y un coeficiente de determinación bajo ($R^2 = 0.3908$, $p = 0.0000$) señalando que el 39% de variación de la clorofila a se debe por la temperatura superficial del mar.

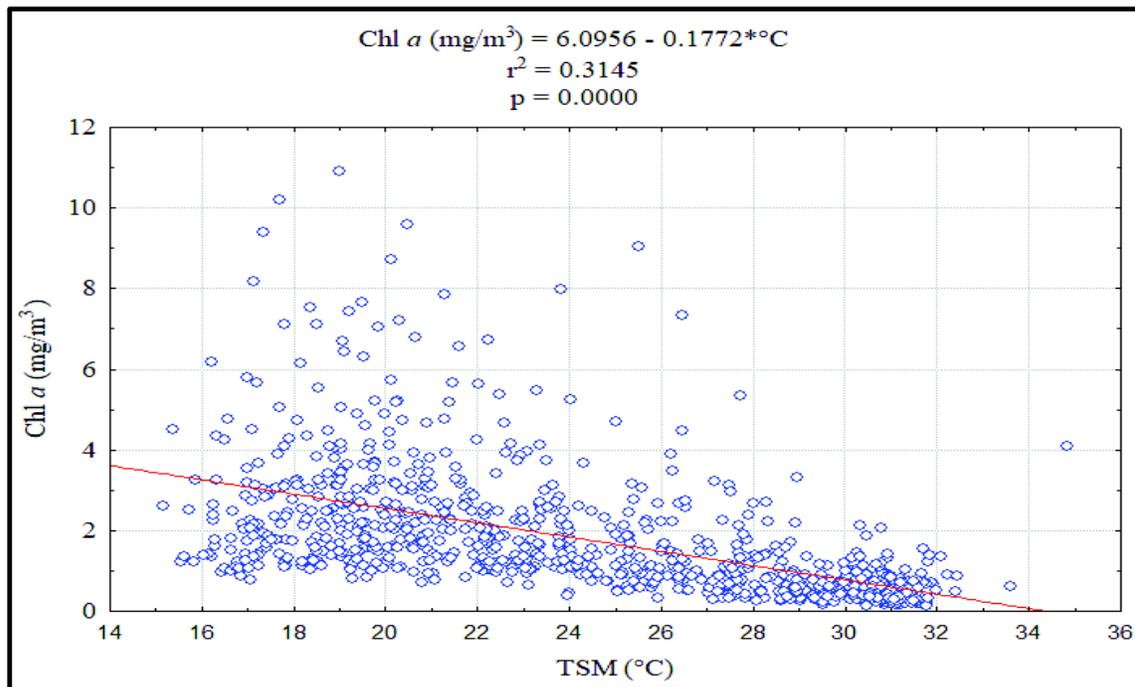


Figura 44. Regresión lineal del modelo de Chl a vs. TSM de la zona costera del Estado de Sonora.

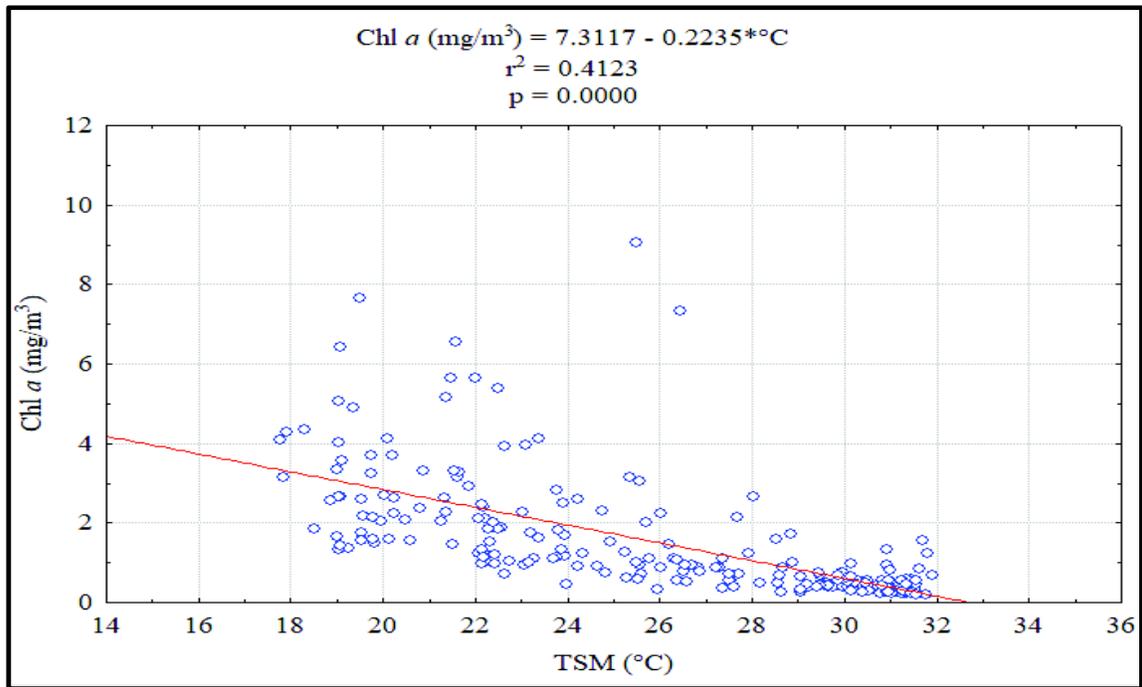


Figura 45. Regresión lineal del modelo de Chl *a* vs. TSM de la Región Sur de la zona costera del Estado de Sonora.

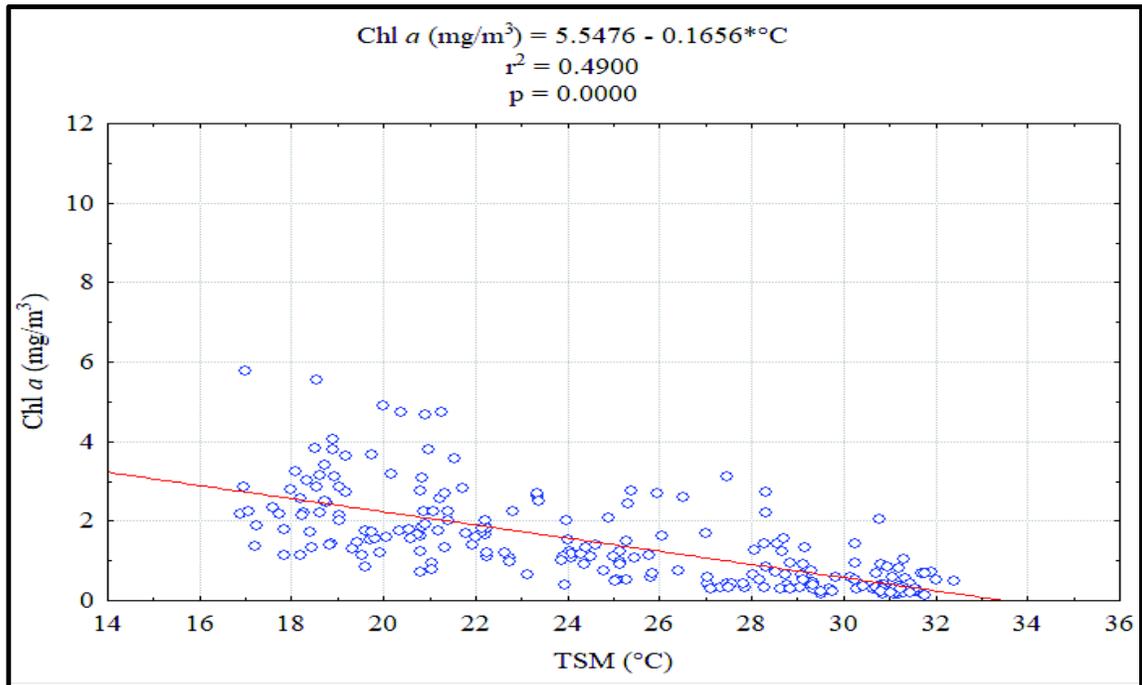


Figura 46. Regresión lineal del modelo de Chl *a* vs. TSM de la Región Centro de la zona costera del Estado de Sonora.

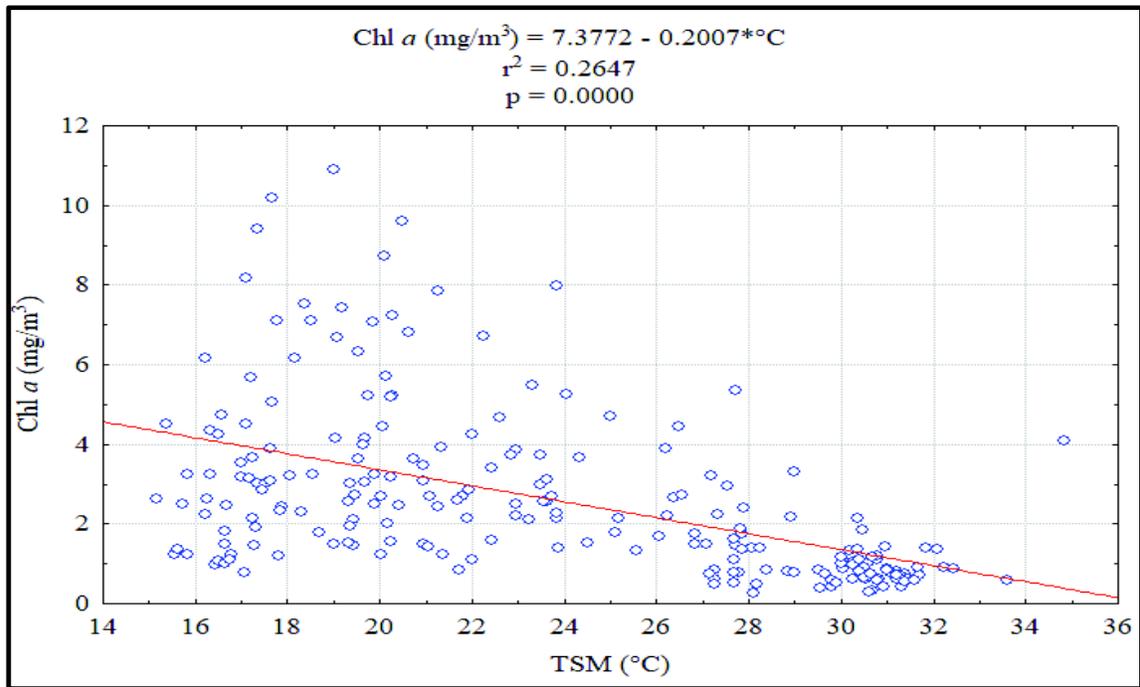


Figura 47. Regresión lineal del modelo de Chl *a* vs. TSM de la Región de las Grandes Islas de la zona costera del Estado de Sonora.

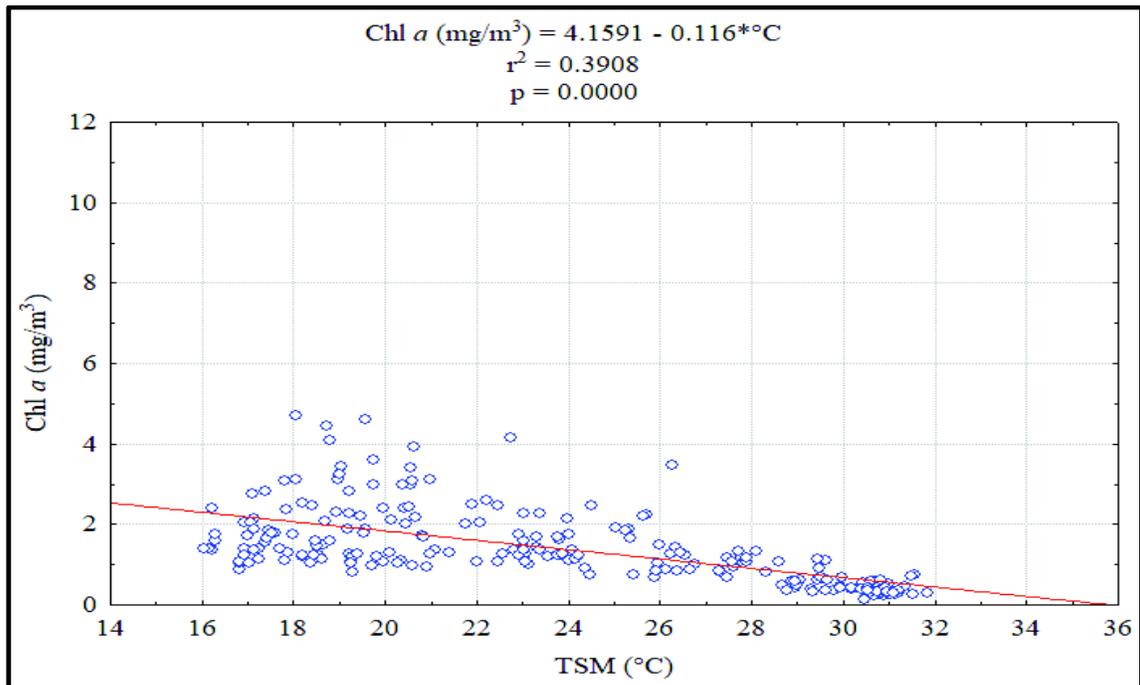


Figura 48. Regresión lineal del modelo de Chl *a* vs. TSM de la Región Norte de la zona costera del Estado de Sonora.

V1.4. Análisis de Fourier

El análisis espectral de Fourier de las regiones mostró que las frecuencias principales de variación de la TSM (Figuras 49, 50, 51 y 52) y Chl *a* (Figuras 53, 54, 55 y 56) fueron en escalas: anual, semianual e interanual (períodos de 3 a 5 años), estas últimas frecuencias de variación están asociadas a los fenómenos del cambio climático El Niño y La Niña. Además, se logró observar la variabilidad estacional.

El análisis espectral de la TSM mostró un aumento de la frecuencia semianual desde la Región Sur a la Región Norte al igual que un aumento de la frecuencia estacional en la Región de las Grandes Islas alcanzando el mismo nivel de densidad espectral. En el caso del análisis espectral de la Chl *a* mostró un aumento de la frecuencia semianual y estacional desde la Región Sur hasta la Región de las Grandes Islas que decrecen en la Región Norte.

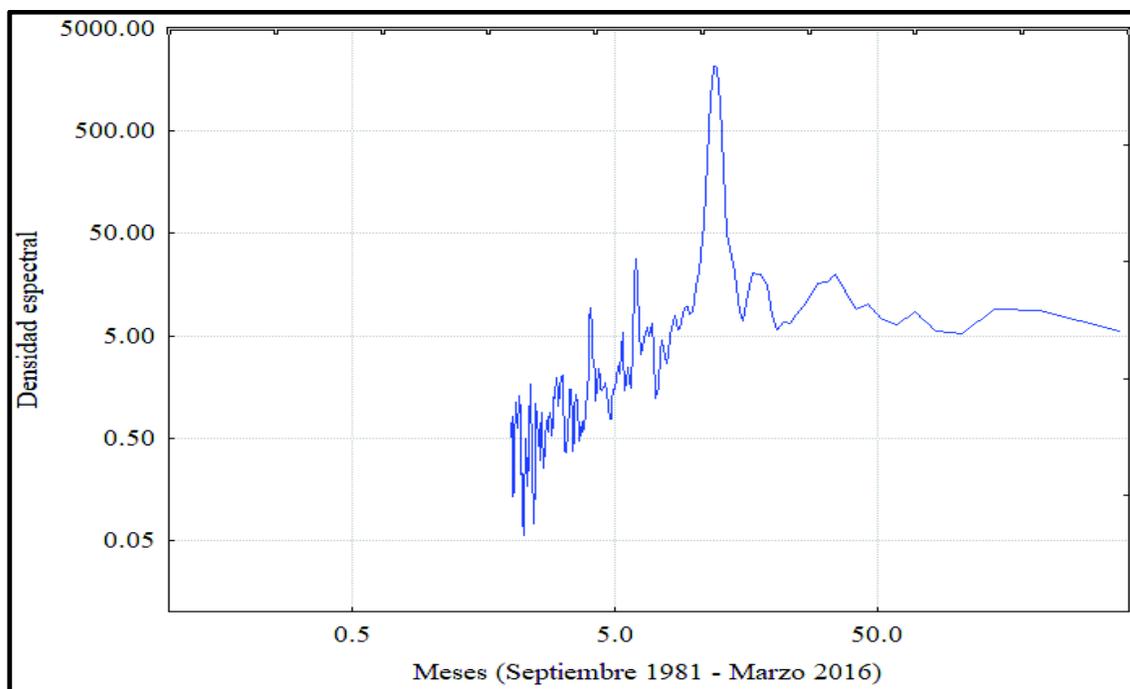


Figura 49. Análisis de Fourier de la serie de tiempo de la TSM de la Región Sur de la zona costera del Estado de Sonora.

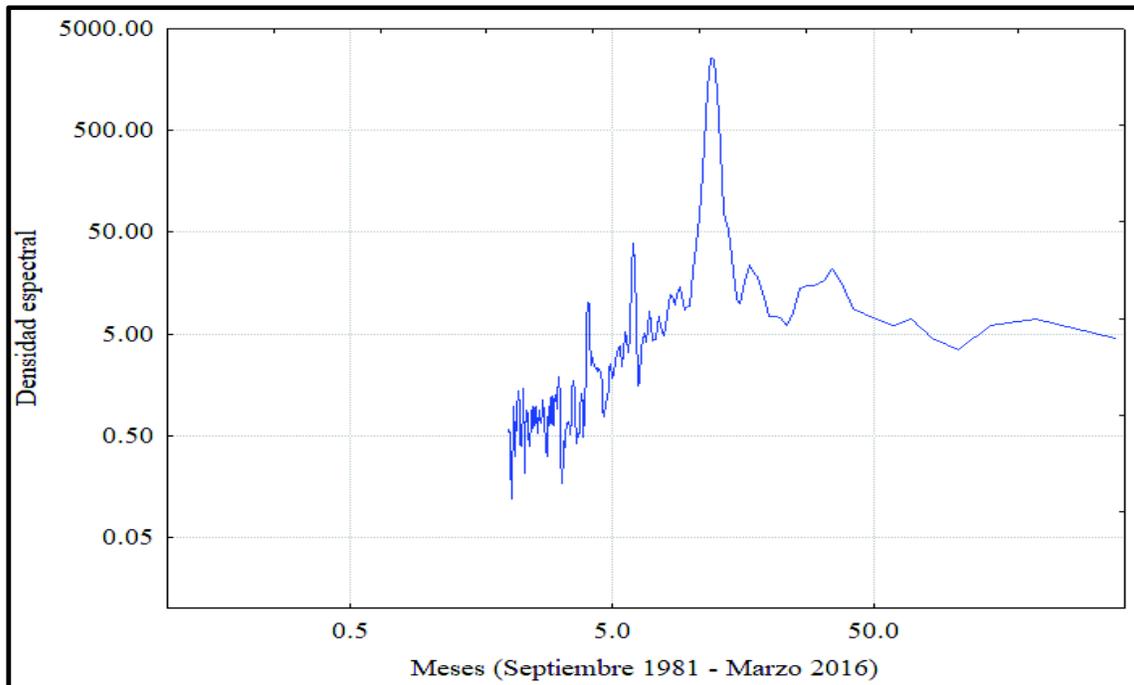


Figura 50. Análisis de Fourier de la serie de tiempo de la TSM de la Región Centro de la zona costera del Estado de Sonora.

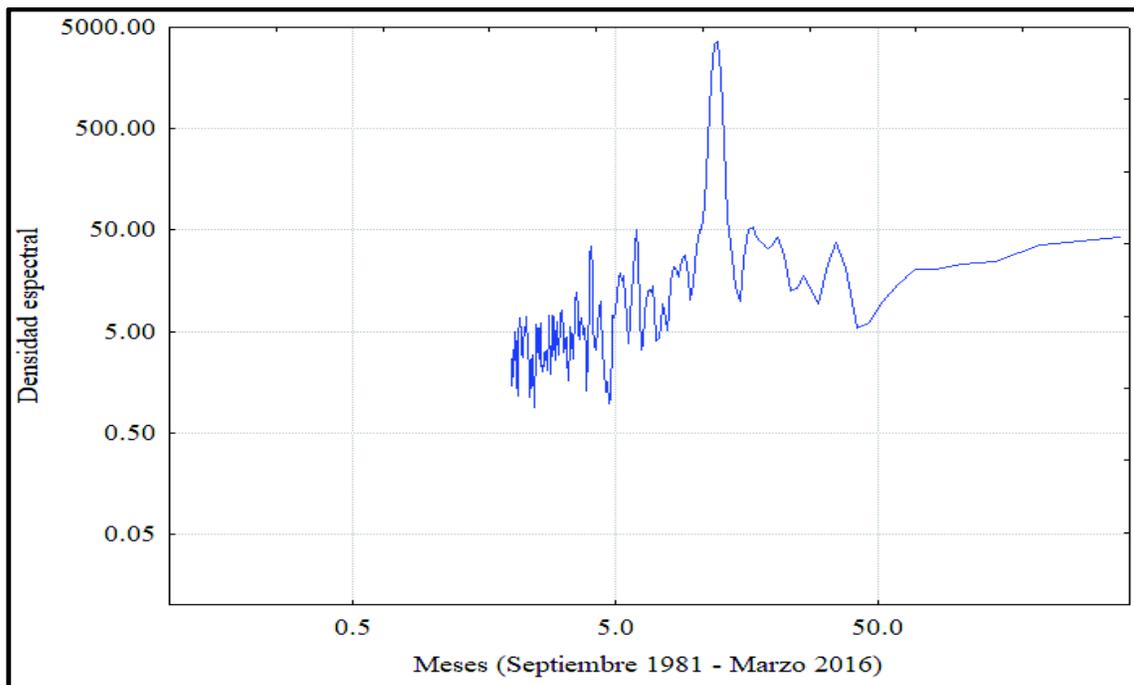


Figura 51. Análisis de Fourier de la serie de tiempo de la TSM de la Región de las Grandes Islas de la zona costera del Estado de Sonora.

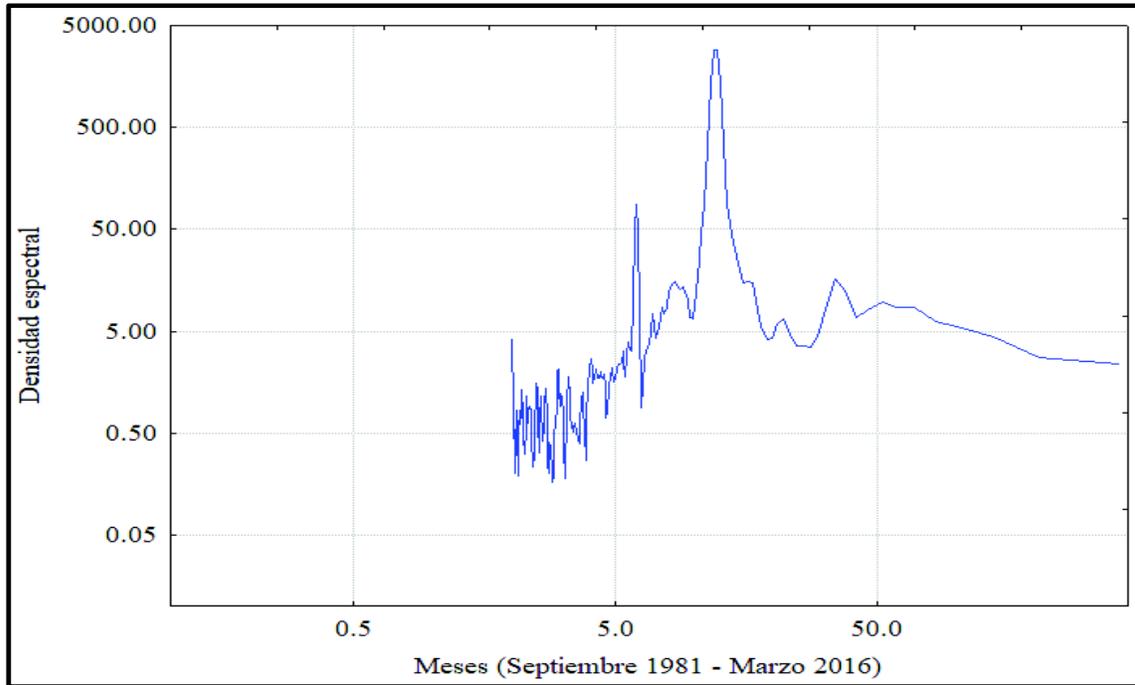


Figura 52. Análisis de Fourier de la serie de tiempo de la TSM de la Región Norte de la zona costera del Estado de Sonora.

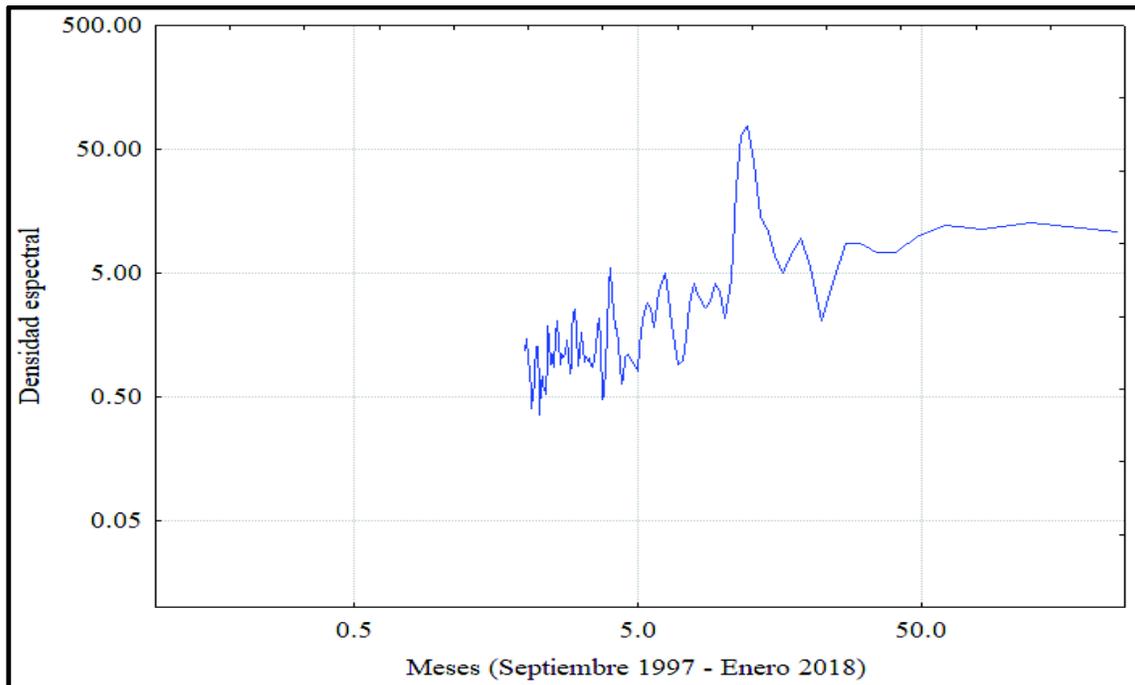


Figura 53. Análisis de Fourier de la serie de tiempo de la Chl *a* de la Región Sur de la zona costera del Estado de Sonora.

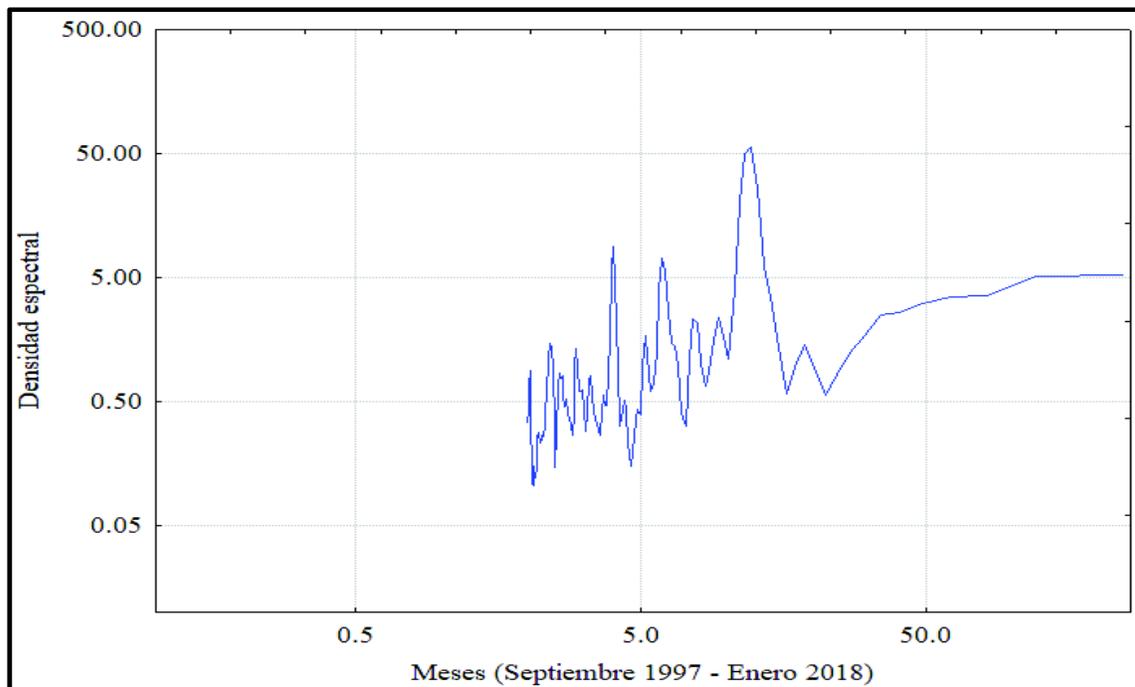


Figura 54. Análisis de Fourier de la serie de tiempo de la Chl *a* de la Región Centro de la zona costera del Estado de Sonora.

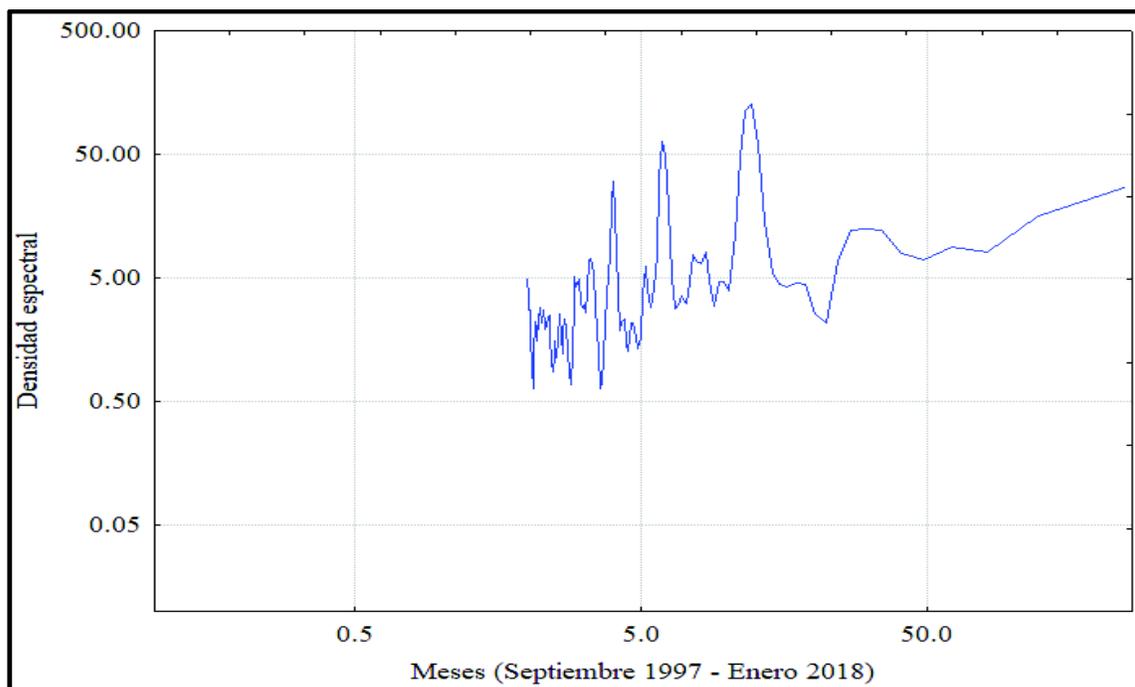


Figura 55. Análisis de Fourier de la serie de tiempo de la Clorofila *a* (Chl *a*) de la Región de las Grandes Islas de la zona costera del Estado de Sonora.

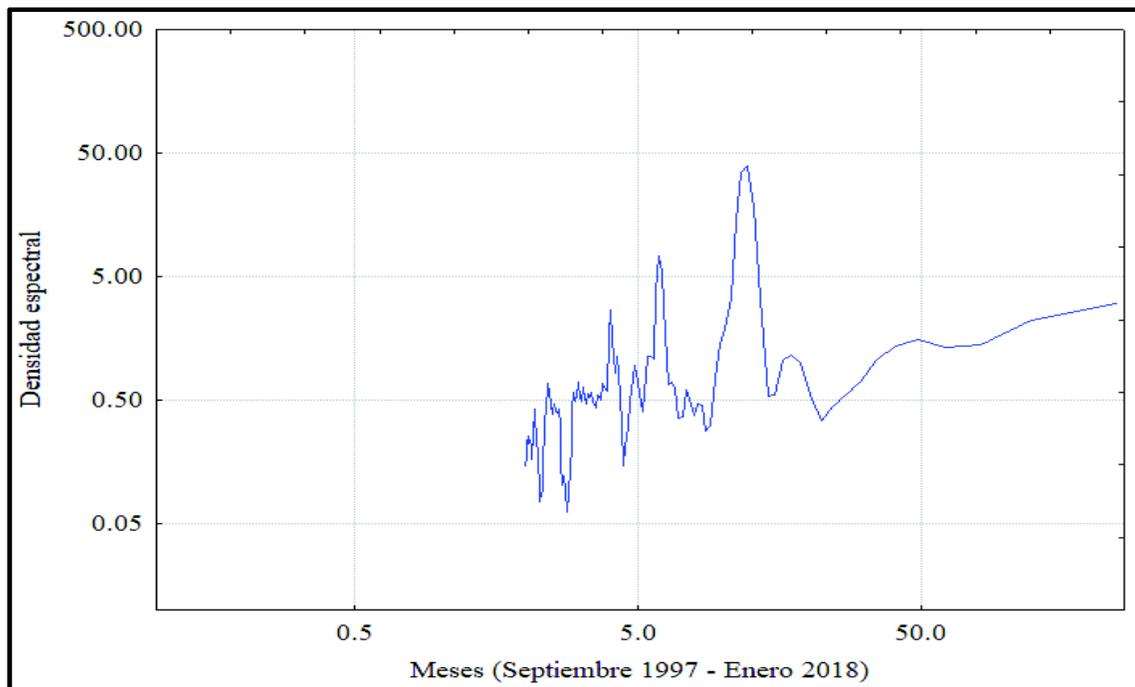


Figura 56. Análisis de Fourier de la serie de tiempo de la Chl *a* de la Región Norte de la zona costera del Estado de Sonora.

VII. DISCUSIÓN

El Análisis de Clusters de los datos de la temperatura mostró un total de cuatro grupos (Sur, Centro, Grandes Islas y Norte). Esta división es similar a la que se obtuvo por Hidalgo-González y Álvarez-Borrego (2001) durante la temporada fría del GC basada en los valores de la TSM asociado a los índices de mezcla y estratificación que se aplica como índice de mezcla o estratificación en la columna de agua durante el invierno con diferentes cambios y distribución en diferentes regiones acorde al parámetro de estratificación (Gaxiola-Castro *et al.*, 1995). Esta misma división fue reportada Round (1967) que explica la división del GC a diversos grupos de fitoplancton que tienen un efecto en la composición de los sedimentos que se distribuyen en la columna de agua. Sin embargo, esta distribución es diferente a la reportada por Santamaria-del Ángel *et al.* (1994) al obtener 14 regiones de composiciones semanales de datos de clorofila por un período de casi ocho años analizando la distribución espacial, abundancia y variación temporal del fitoplancton. El número de regiones obtenidos se debe a que la clorofila presenta más variación a comparación de la temperatura, pues está determinada por la dinámica física del océano como el movimiento de masas de agua y efectos de surgencias al igual que por procesos meteorológicos como la temperatura y patrones de vientos que generan diferentes niveles de fitoplancton generando una variabilidad en el número de regiones, principalmente en la zona costera por ser considerada un área que es más dinámica que en mar abierto tal como se mostró en el Análisis de Clusters de Chl *a* de la zona costera de Sonora mostrando algunas estaciones conglomeradas con otras que no están cercanas.

La distribución de los valores de la TSM fue bimodal con valores mayores de 25 °C y otros valores menores a 25 °C asociado al período de transición entre las fases cálidas y frías. Este tipo de distribución es similar con Valenzuela-Sánchez (2016) con el mismo rango de valores asociado a los dos tipos de condiciones que presenta el Golfo de California (condiciones de verano e invierno) (Lluch-Cota *et al.*, 2010; Álvarez-Borrego, 2010) Los valores de temperatura fueron similares con Valenzuela-Sánchez (2016), García-Morales *et al.*, (2017a) y Soto-Mardones *et al.*, (1999) generado por vientos estacionales y la influencia climática del Océano Pacífico (Bernal *et al.*, 2001) que también genera una

distribución en los niveles de la clorofila asociada a los efectos del viento, los ciclos de marea y el intercambio de calor.

El valor promedio de la temperatura presenta una disminución en dirección sur a norte. Este patrón de distribución fue reportado por Soto-Mardones *et al.* (1999), Hidalgo-González y Álvarez-Borrego (2001) y Escalante-Almazán *et al.* (2013). Este gradiente de temperatura puede ser explicado a que en la Región Sur presenta mayores niveles de temperatura superficial por efectos de evaporación (Svedrup, 1941; Roden, 1958) al igual que por presentar comunicación directa con el Océano Pacífico Tropical que permite la entrada de Agua Superficial Ecuatorial (Reyes-Salinas, 1999) que es más cálida que la del GC; este intercambio de aguas de la Región Sur con el Océano Pacífico que desarrolla este gradiente de temperatura puede estar asociado a los flujos ciclónicos y anticiclónicos (Castro *et al.*, 2006) como a procesos de remolinos (Castro *et al.*, 2017) que tienen un efecto en la variabilidad termohalina y circulación geostrófica. A medida que se va en dirección sur a norte, la temperatura va disminuyendo por procesos de la dinámica física en la columna de agua, principalmente por efectos de mezcla por marea y vientos estacionales (Robinson, 1973; Robles y Marinone, 1987), principalmente en la Región de las Grandes Islas y Región Norte que presentaron los valores mínimos más bajos a comparación de la Región Centro y la Región Sur debido principalmente por la dinámica de los efectos de mezcla por marea en la Región de las Grandes Islas y en el caso de la Región Norte se caracteriza por ser un área somera (Soto-Mardones *et al.*, 1999). López *et al.* (2006) también mostró esta disminución de temperatura en las cuencas del norte del GC. Los valores bajos de temperatura superficial se asociaron a procesos de marea y flujos en el área que conecta en el Canal del Ballenas generando un patrón de circulación particular generando surgencias constantes de aguas profundas bastante frías generando valores bajos de temperatura, altos niveles de productividad y condiciones de mezcla significativas en toda la columna de agua.

Los valores promedio de la clorofila mostraron un gradiente dirección sur a norte, con un patrón diferente a la temperatura. En general se presentaron altos niveles de clorofila debido a que la línea de costa es un área dinámica que tiene un aporte significativo de nutrientes incrementando la biomasa del fitoplancton (Reyes-Salinas, 1999; Martínez-López *et al.*, 2001). La Región Sur mostró un valor alto de clorofila *a* en comparación de

otros trabajos que reportaron bajos valores debido a la alta estratificación en la columna de agua y presencia de aguas más cálidas (Torres-Orozco 1993; Santamaría-del Angel *et al.*, 1994). Sin embargo, estos altos niveles valores pueden ser explicados debido a una alta escorrentía provenientes de campos agrícolas ricas en nitrógeno (Beman *et al.*, 2005) que alimenta grandes floraciones del fitoplancton hasta un 80% a comparación de su forma natural en combinación con otros nutrientes inorgánicos como hierro y fósforo. Niveles altos de clorofila también fueron reportados por Martínez-López *et al.* (2007) en el sistema complejo lagunar de San Ignacio-Navachiste-Macapule en el norte de Sinaloa obteniendo altas concentraciones de Chl *a* de hasta 15 mg/m³ asociadas a la descarga de efluentes de agricultura combinados con las lluvias estacionales, efluentes de aguas residuales que aportan una cantidad significativa de nutrientes generando una influencia en la distribución de especies fitoplanctónicas y de cianobacterias concluyendo una clara relación entre el desarrollo del fitoplancton con la aportación externa de nutrientes. Estos valores altos estarían asociados también a la escorrentía provenientes de granjas camaronícolas como lo reporto Miranda *et al.* (2009) en las costas del sur de Sonora indicando que las descargas de efluentes de granjas de camarón pueden generar un incremento en la cantidad de nutrientes descargados, principalmente de nitrógeno y fósforo que pueden llegar a ser un factor importante en el enriquecimiento de las aguas costeras del GC y en consecuencia de los niveles de clorofila *a*. La Región Centro presentó un nivel de clorofila menor a comparación de la Región Sur mostrando valores similares a los reportados por Hidalgo-González y Álvarez-Borrego (2001) demostrando que comienzan a incrementar desde esa región de estudio en dirección norte durante la época de invierno alcanzado valores de hasta 4.2 mg/m³ al igual que una ligera tendencia de aumentar los niveles de clorofila en la época de verano. Otro estudio de Lara-Lara *et al.*, (1993) en la Región Central determinó valores máximos de clorofila *a* debido a una alta dinámica física dominando el microfitoplancton a excepción de algunas regiones como en Guaymas por la presencia de zooplancton, copépodos principalmente que realizan efecto de pastoreo modificando los niveles de clorofila. En el trabajo de Santamaría-del Angel *et al.* (1994) esa región es clasificada como un área que presenta altas concentraciones de clorofila posiblemente por la diferencia de tiempo que se presentan los eventos de surgencias, pues no se consideran simultáneos debido a los efectos de fluctuaciones durante la transición de mareas vivas y muertas. Este

comportamiento de estos niveles de clorofila puede explicarse a la respuesta biológica a las fuerzas físicas sugieren cambios en la estructura poblacional del fitoplancton dominando un determinado número de especies capaces de adquirir y asimilar una baja cantidad de nutrientes en aguas oligotróficas (Verdugo-Díaz *et al.*, 2012). La Región de las Grandes Islas fue la que mostró el mayor nivel de Chl *a* de la zona costera de Sonora, mostró altos valores que coinciden con los trabajos de Hidalgo-González y Álvarez-Borrego (2001) y Escalante-Almazán *et al.* (2013) indicando que están asociados a mayor desarrollo de marea y flujo medio en el área que además presenta una topografía particular que conecta con el Canal de Ballenas (López *et al.*, 2006) desarrollando un patrón de circulación más constante que el promedio de otras áreas del GC que genera surgencia persistente de aguas profundas causando bajos valores de TSM, altos niveles de Chl *a*, alta productividad y condiciones bien mezcladas en toda la columna de agua. Estos niveles de clorofila también fueron reportados por Santamaría-del Ángel *et al.* (1994) caracterizando a esta región como un área que presenta surgencias significativas generando altas concentraciones de pigmentos fotosintéticos. La Región Norte fue la que obtuvo los valores menores de clorofila *a* pese a ser un área con altas concentraciones de nutrientes debido a efectos de surgencia y procesos de mezcla por mareas (Álvarez-Borrego, 1983; Santamaría-del Ángel *et al.*, 1994; Pérez-Arvizu *et al.*, 2013); esta disminución de valores pueden explicarse que al ser un sitio dinámico de altos intervalos de marea y alta energía cinética de carácter turbulento que fomenta el aporte de nutrientes inorgánicos, tipo terrígenos o materia total en suspensión, estos pueden generar un alto nivel de turbidez. Este mismo efecto fue reportado por Lechuga-Deveze *et al.* (1986) en la región de Ensenada de La Paz caracterizando a ese lugar como un sitio ideal para generar una “trampa” de sedimento terrígeno caracterizando esta área como un tipo de "trampa" de sedimento de origen terrígeno que provoca un azolve lento, pero continuo evitando que la luz esté disponible para el fitoplancton, un factor limitante para el desarrollo de biomasa fitoplanctónica.

La climatología de la TSM mostró una clara variabilidad estacional con valores máximos en agosto y septiembre y valores mínimos durante enero y febrero. Castro *et al.* (2000) reportan esta variabilidad similar en la entrada del GC que muestran una termohalina estacional que aumenta de 21 °C en febrero a 31 °C en agosto indicando un intercambio de calor de flujos de masas de agua frías y calientes. Este tipo de variabilidad

también reportada por Robles y Marinone (1987) en la cuenca de Guaymas para investigar la variabilidad hidrológica a escalas estacionales e interanuales obteniendo una fuerte señal estacional de la TSM con condiciones de invierno de diciembre a abril y de verano de junio a octubre mostrando un aumento de 16 °C entre febrero y marzo a 31 °C en agosto asociado a un proceso de advección del agua del GC y una indicación de que un tipo de agua subsuperficial de tipo tropical puede presentarse alrededor del año, sin embargo, los procesos de mezcla en invierno obstruyen dicho proceso. Por otro lado, Ripa y Marinone (1989) también indicaron un ciclo estacional relacionado a la interacción con la atmósfera a través de la difusión turbulenta de calor y procesos físicos horizontales en la columna de agua que regulan el balance de calor. Esto genera que los meses más fríos sean enero, febrero y marzo y los más calientes agosto y septiembre y a la vez una variación en la duración de las épocas en la zona costera asociado a los giros ciclónicos en verano (son los de tipo frío que presentan una elevación de agua profundas y frías en su centro) causados por principalmente por la distribución específica de la densidad, que provoca corrientes relativamente más fuertes y anticiclónicas en invierno (son los de tipo caliente por tener en su centro máximas temperaturas por el hundimiento de aguas superficiales) causado por los mecanismos básicos (planetarios-topográficos) y los efectos baroclínicos y del viento (Soto-Mardones *et al.*, 1999) causando diferencias de las etapas cálidas y frías en las diferentes regiones de la zona costera generando un verano más corto y un invierno más largo en dirección sur a norte y en consecuencia obteniendo temperaturas promedio y temperaturas mínimas diferentes a comparación de las temperaturas máximas que son similares por el efecto de homogenización en la columna de agua asociado a la radiación solar.

La climatología de la Chl *a* mostró el mismo tipo de variabilidad estacional con valores máximos en marzo y valores mínimos en agosto. Los valores reportados en la climatología de la zona costera en este trabajo mostraron los dos períodos asociados a las condiciones del GC (verano e invierno) con niveles bajos y altos de clorofila respectivamente y generando variaciones estacionales e interanuales (Álvarez-Borrego., 2010). Este comportamiento se presentó en el trabajo de García Morales *et al.*, (2017) demostrando una disminución de noviembre a abril alcanzando su máximo nivel en marzo entre $5.11 \pm 1.68 \text{mg/m}^3$ y un decrecimiento de mayo a octubre alcanzando valores mínimos

en agosto y septiembre entre $1.02 \pm 0.25 \text{ mg/m}^3$ indicando que este comportamiento de la Chl *a* es generado por los efectos de viento en la época de invierno que transporta agua rica en nutrientes al igual que por los efectos de giros ciclónicos que se generan con la misma fuerza de los vientos son los responsables de la dispersión de Chl *a* en la zona costera, observándose este comportamiento a partir de enero y abril. Sin embargo, estos giros también tienen un efecto en la distribución de materia total en suspensión que puede afectar la distribución del fitoplancton y en consecuencia los valores de clorofila. Por otro lado, este comportamiento se presenta también en el trabajo de Espinoza-Carreón y Valdez-Holguín (2007) mostró valores máximos en febrero y marzo y valores mínimos a partir de mayo-junio y se explica que los ciclos estacionales de la biomasa fitoplanctónica se asocia al 51% de la variabilidad en el GC demostrando que el promedio estacional está determinado por efectos de surgencias costeras de agua subsuperficial fría y rica en nutrientes, las cuales ocurren durante invierno principalmente en costas de Sonora y Sinaloa promoviendo un incremento del fitoplancton a lo largo de la costa. Estas surgencias están determinadas por la intensidad de los vientos dominantes en las diferentes estaciones del año, la profundidad de la zona y las heterogeneidades de la línea de costa.

Las anomalías de la TSM se presentaron un rango de entre -5.5 a $4.3 \text{ }^\circ\text{C}$ con anomalías positivas mayores en las Regiones Sur y Centro mientras que las anomalías negativas se presentaron más en la Regiones de las Grandes Islas y Región Norte. Este resultado coincide con el reportado por Lavín *et al.*, (2003) en el GC con anomalías de aproximadamente 2 a $3 \text{ }^\circ\text{C}$ asociadas al evento de El Niño y anomalías negativas aproximadamente de $-4 \text{ }^\circ\text{C}$ asociadas al evento La Niña con anomalías positivas mayores en la Región Central mientras que las anomalías negativas no presentaron un patrón de distribución. Este tipo de variabilidad se deberá probablemente a la variabilidad interdecadal del Océano Pacífico. En el caso de la Chl *a* se mostraron este tipo de anomalías que también está asociadas a un patrón de decrecimiento e incremento de esta variable asociadas a los eventos de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) tal como lo reportó Herrera-Cervantes *et al.*, (2010) indicando una influencia importante de procesos físicos asociados a la interrupción de vientos generadores de surgencias a lo largo de la costa este del GC. Este fenómeno también fue reportado por Kahru *et al.*, (2004) obteniendo una

disminución de 30 a 40% de la productividad primaria nueva, a lo largo del GC teniendo influencia significativa en dirección sur a norte.

Bajo el criterio de Morel y Berthon (1989) los valores obtenidos en cada una de las regiones de la zona costera son clasificados como mesotrófico. Estos valores coinciden con los trabajos de Valdez-Holguín *et al.* (1995) y López-Cortés *et al.* (2003) en base a la concentración de nutrientes concluyendo que este estado trófico está determinado por la disponibilidad de nutrientes asociados a la dinámica física.

La principal frecuencia de variación de la TSM en cada una de las regiones de la zona costera fue la anual, fue la misma que fue reportada por García-Morales *et al.* (2017a), Lavín *et al.* (2003) y Herrera-Cervantes *et al.* (2007). Además, se observó una señal de cinco años en cada una de las regiones, principalmente en la Región de las Grandes Islas. Esta señal está asociada a las variaciones interanuales y es el componente dominado por los períodos de El Niño y La Niña. Soto-Mardones *et al.* (1999) obtuvieron que la frecuencia anual es la responsable de la mayor parte de la variabilidad oscilando con pequeñas variaciones de sur a norte en conjunto a un proceso de calentamiento y enfriamiento en todo el golfo; la frecuencia semianual mostró un comportamiento similar con la anual y que la frecuencia interanual se asoció a los eventos de El Niño. Por otro lado, Escalante-Almazán *et al.* (2013) mostraron evidencias de El Niño y La Niña en la Región Sur.

En el caso de la Chl *a* también la principal frecuencia de variación fue la anual, misma que fue observada por García-Morales *et al.*, (2017a), Escalante *et al.*, (2013) y por Espinoza-Carreón y Valdez-Holguín (2007) demostrando anomalías valores positivos durante invierno y primavera y negativos durante verano y otoño. García Morales *et al.*, (2017) explicaron que los fenómenos de meso escala que se presentaron en su área de estudio fueron modulados en tres escalas de tiempo: sistemas de corrientes estacionales asociados a la Corriente de California y la Corriente Costera Mexicana; efectos de giros oceánicos que se presentan en la boca del Golfo de California y anomalías interanuales como El Niño y La Niña. En este trabajo se presentaron frecuencias de variación asociados a la duración de períodos como El Niño y La Niña; estos fenómenos también están asociados a la variación de señal interanual (Escalante-Almazán *et al.*, 2013).

El análisis de la TSM y Chl *a* mostró que ambas variables están determinadas principalmente por procesos físicos, climatológicos y biológicos que pueden presentar diferentes escalas de tiempo presentando una influencia en los ecosistemas costeros ya sea un efecto positivo y negativo y en consecuencia a la distribución de organismos, como lo fue en el estudio de García-Morales *et al.* (2017a) al analizar la variabilidad ambiental de la costa central de Sonora indicando que la variabilidad de temperatura, clorofila e índices climáticos pueden tener una influencia en los ecosistemas pelágicos proporcionando hábitats productivos y biológicamente ricos de diversas especies, algunas de ellas de interés comercial. Estudio similar fue el de Nevárez-Martínez *et al.* (2001) que analizaron la distribución y abundancia de la sardina del Pacífico (*Sardinops sagax*) en el Golfo de California y su relación con el ambiente determinando que su distribución está determinada por la TSM y vientos que generan efectos de surgencias moderadas. Por otro lado, García-Morales *et al.* (2017b) determinó la influencia de la variabilidad ambiental en la distribución de ballenas en el Golfo de California en base a la TSM y Chl *a* obteniendo que el mayor número de ballenas fue durante la época fría del Golfo de California y el menor número durante la época cálida concluyendo que la TSM influyen en la abundancia relativa de las ballenas mientras que la concentración de Chl *a* influye en su distribución.

VIII. CONCLUSIONES

En la climatología de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) se obtuvo una variabilidad estacional con valores máximos en los meses de agosto y septiembre y valores mínimos durante los meses de enero y febrero mostrando un período de transición a verano abarca los meses de abril, mayo y junio iniciando en la Región Sur mientras que el período de transición a invierno inicia en la Región Norte y de las Grandes Islas que abarca los meses de octubre y noviembre.

La Región Sur presentó una etapa cálida con una duración promedio de 7 meses y una fría de 4 meses. La Región Centro presentaron una etapa cálida y fría con una duración de 6 meses. La Región de las Grandes Islas presenta una etapa cálida de 5 meses una fría de 7 meses y la Región Norte presenta una etapa cálida de 4 meses y una fría de 8 meses.

En cada una de las regiones, la climatología de la Clorofila *a* (Chl *a*) presentó una variación estacional mostrando un incremento entre octubre y noviembre alcanzando su nivel máximo en marzo y un decrecimiento a partir de abril obteniendo valores mínimos en agosto y septiembre.

El mayor nivel de TSM se presentó en la Región Sur y el mayor nivel de Chl *a* fue mayor en la Región de las Grandes Islas.

En cada una de las regiones la señal anual de TSM y Chl *a* fue la principal frecuencia de variabilidad seguidas por eventos estacionales, semianuales e interanuales.

El análisis de la TSM y Chl *a* mostró que ambas variables están determinadas principalmente por procesos físicos, climatológicos y biológicos que pueden presentar diferentes escalas de tiempo presentando una influencia en los ecosistemas costeros.

IX. LITERATURA CITADA

- Álvarez-Arellano, A.D y Gaitán-Moran, J. 1994. Lagunas costeras y el litoral mexicano: Geología. 13-74 p. En: de la Lanza-Espino, G., y Cáceres-Martínez, C. (Eds.), Lagunas costeras y el Litoral Mexicano. Universidad Autónoma de Baja California Sur. México.
- Álvarez-Borrego, S. 1983. Gulf of California. 427-449. En: Ketchum, B. H. (Ed.), Estuaries and enclosed seas. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- Álvarez-Borrego, S. 2007. Flujos de carbono en los Golfos de California y México. 337-353 p. En: Hernández-de la Torre, B., y Gaxiola-Castro, G. (Eds.), Carbono en Ecosistemas Acuáticos de México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. Centro de Investigación Científica y Superior de Ensenada. México.
- Álvarez-Borrego, S. 2008. Oceanografía de la Región de las Grandes Islas. 45-65 p. En: Danemann, G.D., y Ezcurra, E. (Eds.), Bahía de los Ángeles: recursos naturales y comunidad. Línea Base 2007. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Pronatura Noroeste A.C. Instituto Nacional de Ecología. México. San Diego Natural History Museum. Estados Unidos.
- Álvarez-Borrego, S. 2010. Physical, chemical, and biological oceanography of the Gulf of California. 24-48 p. En: Brusca, R.C. (Eds.), The Gulf of California: biodiversity and conservation. University of Arizona Press. Estados Unidos.
- Álvarez-Borrego, S. 2012. Phytoplankton Biomass in the Gulf of California: a review. *Botánica Marina*. 55:119-128.
- Álvarez-Borrego, S., J.A. Rivera, G. Gaxiola-Castro, M.J. Acosta-Ruiz y R.A. Schwartzlose. 1978. Nutrientes en el Golfo de California. *Ciencias Marinas* 5(2): 53-71.
- Álvarez-Borrego, S y J.R. Lara-Lara. 1991. The physical environment and primary productivity of the Gulf of California. 555-567 p. En: Dauphin and Simoneit. (Eds.), The Gulf of California, province of the Californias. American Association of Petroleum Geologists. Memoria 47. Tulsa, Oklahoma, Estados Unidos.
- Álvarez-Molina, L.L., S. Álvarez-Borrego, J.R. Lara-Lara y S.G. Marinone. 2013. Variaciones anual y semianual de la biomasa y producción fitoplanctónica en el Golfo de California central estimadas mediante datos de satélite. *Ciencias Marinas* 39(2): 217–230.
- Arreola-Lizárraga, J.A., E.I. Polanco-Mizquez, M.S. Burrola-Sánchez, G. Padilla-Arredondo y S.C. Díaz-Castro. 2013. Análisis preliminar de los impactos de la zona costera por efecto del cambio climático. 217-224 p. En: C. Gay-García, J.C. Rueda-Abad, L. Aguirre-Ramírez, R. Alonso-Rodríguez, G. Castañeda-Nolasco, C. Chávez-Baeza, S. Gómez-Noguera, S. Lucatello, J.E. Ospina-Noreña, G. Sánchez-Torres-Esqueda y V.M. Vidal-Martínez (Eds.). Memorias del Segundo Congreso Nacional del Investigación en Cambio Climático. 15 al 19 de Octubre de 2012. México.

- Arreguín-Sánchez, F., P. del Monte-Luna., M.J. Zetina-Rejón y M.O. Álvarez-Lucero. 2017. The Gulf of California Large Marine Ecosystem: Fisheries and other natural resources. *Environmental development* 22:71-77.
- Badan-Dangon, A., C.J. Koblinsky y T. Baumgartner. 1985. Spring and summer in the Gulf of California: Observations of surface thermal patterns. *Oceanología Acta* 8(1):13-22.
- Barraza-Guardado, R.H., L.R. Martínez-Córdova, L.F. Enríquez-Ocaña, M. Martínez-Porchas, A. Miranda-Baeza y M.A. Porchas-Cornejo. 2014. Efecto de efluentes de granjas camaronícolas sobre parámetros de la calidad del agua y del sedimento frente a la costa de Sonora. *Ciencias Marinas* 40: 221-235.
- Barocio-León, O.A., R. Millán-Núñez, E. Santamaría-del Angel y A. González-Silvera. 2007. Productividad primaria de fitoplancton en la zona eufótica del Sistema de la Corriente de California estimada mediante imágenes del CZCS. *Ciencias Marinas* 33:59-72.
- Bastidas-Salamanca, M., A. González-Silvera, R. Millán-Núñez., E. Santamaría-del Angel y R. Frouin. 2013. Bio-Optical Characteristics of the Northern Gulf of California during June 2008. *International Journal of Oceanography* 2014: 1-13.
- Baumgartner, T.R y N. Christensen Jr. 1985. Coupling of the Gulf of California to large-scale interannual climatic variability. *Journal of Marine Research* 43:825-848.
- Beman, M., K.R. Arrigo y P.A. Matson. 2005. Agricultural runoff fuels large phytoplankton blooms in vulnerable areas in the ocean. *Nature* 434: 211-214.
- Berlanga-Robles, C.A y A. Ruíz-Luna. 2006. Evaluación de cambios en el paisaje y sus efectos sobre los humedales costeros del sistema estuarino de San Blas, Nayarit (México) por medio de análisis de imágenes Landsat. *Ciencias Marinas* 32: 523-538.
- Bernal, G., P. Ripa y J.C. Herguera. 2001. Variabilidad Oceanográfica y climática en el Bajo Golfo de California: Influencias del Trópico y Pacífico Norte. *Ciencias Marinas* 27(4):595-617.
- Castañeda-López, O y F. Contreras-Espinoza. 2003. El Centro de “Documentación Ecosistemas Litorales Mexicanos” como una herramienta de diagnóstico. *ContactoS* 48: 5-17.
- Castro, R., A.S. Mascarenhas, R. Durazo y C.A. Collins. 2000. Variación estacional de la temperatura y salinidad en la entrada del Golfo de California, México. *Ciencias Marinas* 26(4): 561-583.
- Castro, R., R. Durazo, A. Mascarenhas, C.A. Collins, A y A. Transviña. 2006. Thermohaline variability and geostrophic circulation in the southern portion of the Gulf of California. *Deep Sea Research* 53: 188-200.
- Castro, R., C.A. Collins, T.A. Rago, T. Margolina y L.F. Navarro-Olache. 2017. Corrientes, transportes y variabilidad termohalina en la entrada al Golfo de California (19-21 de abril de 2013). *Ciencias Marinas* 43(3): 173-190.
- Chen, A.C. y A.V. Borges. 2009. Reconciling opposing views on carbon cycling in the coastal ocean: Continental shelves as sinks and near-shore ecosystems as sources of atmospheric CO₂. *Deep-Sea Research II* 56:578-590.

- Díaz de León-Corral, A., P. Álvarez-Torres y O. Iglesias-Barrón. 2009. Experiencias globales de clasificación y ejercicios de zonificación marina. 21-41 p. En: Córdova y Vázquez, A., Rosete-Vergés, F., Enríquez-Hernández, G., y Hernández-de la Torre, B. (Eds.), Ordenamiento ecológico marino Visión integrada de la regionalización. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT). México.
- Doney, S.C., M. Ruckelshaus, J.E. Duffy, J.P. Barry, F. Chan, C.A. English, H.M. Galindo, J.M. Grebmeier, A.B. Hollowed, N. Knowlton, J. Polovina, N.N. Rabalais, W.J. Sydeman y L.D. Talley. 2012. Climate change impacts on marine ecosystems. *The Annual Review of Marine Science* 4:11-37.
- Escalante-Almazán F.I., J.E. Valdez-Holguín, S. Álvarez-Borrego y J.R. Lara-Lara. 2013. Variación temporal y espacial de temperatura superficial del mar, clorofila *a* y productividad primaria en el Golfo de California. *Ciencias Marinas*. 39(2): 203–215.
- Espinosa-Carreón, L y J.E. Valdez-Holguín. 2007. Variabilidad interanual de clorofila en el Golfo de California. *Ecología Aplicada* 6:83-92.
- Félix-Gocobachi, R.N y M.S. Valenzuela-Fino. 2000. Abundancia Fitoplanctónica, Biomasa y Nutrientes del Agua de la Laguna La Cruz, Sonora en el Período de Abril-Agosto de 1998. Tesis de Licenciatura. Universidad de Sonora. Departamento de Ciencias Químico Biológicas. Hermosillo, Sonora, México.
- García-Morales, R., J. López-Martínez, J.E. Valdez-Holguín, H. Herrera-Cervantes y L.D. Espinosa-Chaurand. 2017. Environmental variability and Oceanographic Dynamics of the Central and Southern Coastal Zone of Sonora in the Gulf of California. *Journal of Remote Sensing* 9:925.
- García-Morales, R., E.L. Pérez-Lezama y B. Shirasago-Germán. 2017. Influence of environmental variability of baleen whales (suborden Mysticeti) in the Gulf of California. *Marine Ecology* 38:10.
- Gaxiola-Castro, G., J. García-Córdova, J.E. Valdez-Holguín y M. Botello-Ruvalcaba. 1995. Spatial distribution of chlorophyll *a* and primary productivity in relation to winter physical structure in the Gulf of California. *Continental Shelf Research* 15:1043-1059.
- Gaxiola-Castro, G., J. C. A. Cepeda-Morales, S. Nájera-Martínez, T. L. Espinosa-Carreón, M. E. De La Cruz-Orozco, R. Sosa-Avalos, E. Aguirre-Hernández y J. P. Cantú-Ontiveros. 2010. Biomasa y producción de fitoplancton. 59-85 p. En: Gaxiola-Castro, G., y Durazo-Arvizu, R. (Eds.), *Dinámica del ecosistema pelágico frente a Baja California, 1997-2007. Diez años de investigaciones mexicanas de la Corriente de California*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. Centro de Investigación Científica y Superior de Ensenada. Universidad Autónoma de Baja California. México.
- Hamedani-Azmoordehfar, M y S. Ali-Azarmsa. 2013. Assessment the effect of ENSO on weather temperature changes using fuzzy analysis (Case study: Chabahar). *APCBEE Procedia* 5: 508-513.

- Harley, C.D.G., A.R. Hughes, K.M. Hultgren, B.G. Miner, C.J.B. Sorte, C.S. Thornber, L.F. Rodríguez, L. Tomanek y S.L. Williams. 2006. The impacts of climate change in coastal marine ecosystems. *Ecology Letters* 9: 228-241.
- Hernández-Ayón, J.M., V.F. Camacho-Ibar, A. Mejía-Trejo y A. Cabello-Pasini. 2007. Variabilidad del CO₂ total durante eventos de surgencia en Bahía San Quintín, Baja California, México. 187-200 p. En: Hernández-de la Torre, B., y Gaxiola-Castro, G. (Eds.), *Carbono en Ecosistemas Acuáticos de México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. Centro de Investigación Científica y Superior de Ensenada. México.
- Hernández-Ayón, J.M., C. Chapa-Balcorta, F. Delgadillo-Hinojosa, V.F. Camacho-Ibar, M.A. Huerta-Díaz, E. Santamaría-del Angel, S. Galindo-Bect y J.A. Segovia-Zavala. 2013. Dinámica del carbono inorgánico disuelto en la Región de las Grandes Islas del Golfo de California: Influencia de las masas de agua. *Ciencias Marinas* 39(2): 183-201.
- Herrera-Cervantes, H., D.B. Lluch-Cota, S.E. Luch-Cota y G. Gutiérrez-de Velasco. 2007. The ENSO signature in sea-surface temperature in the Gulf of California. *Journal of Marine Research* 65:589-605.
- Herrera-Cervantes, H., S.E. Luch-Cota, D.B. Lluch-Belda, G. Gutiérrez de Velasco-Sanromán y D. Lluch-Belda. 2010. ENSO influence on satellite-derive Chlorophyll trends in the Gulf of California. *Atmósfera* 23(3): 253-262.
- Hidalgo-González, R.M., S. Álvarez-Borrego y A. Zirino. 1997. Mezcla en la región de las grandes islas del Golfo de California: efecto en la pCO₂ superficial. *Ciencias Marinas* 23(3): 317-327.
- Hidalgo-González, R. y S. Álvarez-Borrego. 2001. Chlorophyll profiles and the water column structure in the Gulf of California. *Oceanología Acta* 24(1):19-28.
- Iglesias, I., M.N. Lorenzo, M. Gómez-Gesteira y J.J. Taboada. 2010. La temperatura superficial del mar como herramienta de predicción climática. *Avances en Ciencias de la Tierra* 1:95-108.
- IPCC, 2014. Cambio climático 2014: impactos, adaptación y vulnerabilidad- resumen para responsable de políticas. Contribución del grupo de trabajo II al quinto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. Field, C. B., V. Barros, D. J. Dokke, K. Mach, M. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. Estrada, R. Genova, B. Girma, E. Kissel, A. Levy, S. McCracken, P. R. Mastrandrea y L. L. White (Eds.). Organización meteorológica mundial, Ginebra.
- Kahru, M., S.G. Marinone, S.E. Luch-Cota, A. Pares-Sierra y B. Greg-Mitchell. 2004. Ocean-color variability in the Gulf of California: scales from days to ENSO. *Deep-Sea Research II* 51: 139-146.
- Lara-Lara, J.R., V. Arenas-Fuentes, C. Bazán-Guzmán, V. Díaz-Castañeda, E. Escobar-Briones, M. García-Abad, M. I. Espejel-Carvajal, M. Guzmán-Arroyo, L. B. Ladah, M. López-Hernández, G. Gaxiola-Castro, G. Robles-Jarero, R. Sosa-Ávalos, L.A. Soto-González, M. Tapia-García y J.E. Valdez-Holguín. 2008. Los ecosistemas

- marinos. 135-159 p. En: Soberón, J., Halffter, G y Llorente, J. (Eds.), Capital Natural de México. Vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. CONABIO. México.
- Lara-Lara, J.R., R. Millán-Núñez, J.L. Lara-Orozco y C. Bazán-Guzmán. 1993. Productividad y biomasa de fitoplancton por clases de tamaño en la parte central del Golfo de California durante primavera 1985. *Ciencias Marinas* 19:137-154.
- Lavín, M.F., E. Palacios-Hernández y C. Cabrera. 2003. Sea Surface anomalies in the Gulf of California. *Geofísica Internacional* 42(3):363-375.
- Lavín, M.F, y S.G. Marinone. 2003. An overview of the physical Oceanography of the Gulf of California. 173-204 p. En: Velasco-Fuentes, O.I., Sheinbaum, J, Ochoa-de la Torre, J.L. (Eds.), *Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Netherlands.
- Lechuga-Deveze C.H., J. García-Pámanes y J.J. Bustillos-Guzmán. 1986. Condiciones ecológicas de una laguna costera de la costa del Golfo de California. Turbiedad y clorofila a. *Ciencias Marinas* 12(1): 19-31.
- Ledesma-Vázquez J., M.E. Johnson, O. González-Yajimovich y E. Santamaría-del Angel. 2009. Gulf of California Geography, Geological Origins, Oceanography and Sedimentation Patters. 1-10 p. En: Johnson, M.E., y J. Ledesma-Vázquez (Eds.), *Atlas of Coastal Ecosystem in the Gulf of California*. The University Arizona Press. Arizona. Estados Unidos.
- López, M., J. Candela y M.L. Argote. 2006. Why does the Ballenas Channel have the coldest SST in the Gulf of California?. *Geophysical Research Letters* 33:5.
- López-Cortés, D.J., I. Gárate-Lizárraga., J.J. bustillos-Guzmán., R. Alonso-Rodríguez e I. Murillo-Murillo. 2003. Variabilidad del estado trófico y la biomasa fitoplanctónica de Bahía Concepción, Golfo de California. *Hidrobiológica* 13(3):195-206.
- López-Verdín, C.1999. Variabilidad de la productividad orgánica primaria en el Golfo de California. Tesis de Licenciatura. Universidad de Sonora. Departamento de Ciencias Químico Biológicas. Hermosillo, Sonora, México.
- Longhurst, A.R., 2007. *Ecological Geography of the Sea*; 2º Edición. Editorial Elsevier. San Diego. Estados Unidos.
- Lluch-Cota, D.B., D. Lluch-Belda, S. Lluch-Cota, J. López-Martínez, M. Nevárez-Martínez, G. Ponce-Díaz, G. Salinas-Zavala, A. Vega-Velázquez, J.R. Lara-Lara. G. Hammann y J. Morales. 1999. Las pesquerías y El Niño: Impactos de El Niño en el sector pesquero. 137-178 p. En: Magaña-Rueda, V.O.(Ed.), *Impactos de El Niño en México*. Dirección General de Protección Civil. México.
- Lluch-Cota, S.E. 2000. Coastal upwelling in the Easter Gulf of California. *Oceanología Acta* 23:731-740.
- Lluch-Cota, S.E., E.A. Aragón-Noriega, F. Arreguín-Sánchez, D. Auriol-Gamboa, J.J. Bautista-Romero, R.C. Brusca, R. Cervantes-Duarte, R. Cortés-Altamirano, P. Del-Monte-Luna, A. Esquivel-Herrera, G. Fernández, M.E. Hendrickx, S. Hernández-Vázquez, H. Herrera-Cervantes, M. Kahru, M. Lavín, D. Lluch-Belda, D.B. Lluch-

- Cota, J. López-Martínez, S.G. Marinone, M.O. Nevárez-Martínez, S. Ortega-García, E. Palacios-Castro, A. Parés-Sierra, G. Ponce-Díaz, M. Ramírez-Rodríguez, C.A. Salinas-Zavala, R.A. Schwartzlose y A.P. Sierra-Beltrán. 2007. The Gulf of California: Review of ecosystem and sustainability challenge. *Progress in Oceanography* 73:1-26.
- Lluch-Cota S.A., A. Parés-Sierra, V.O. Magaña-Rueda, F. Arreguín-Sánchez, G. Bazzino, H. Herrera-Cervantes y D. Lluch-Belda. 2010. Changing climate in the Gulf of California. *Progress in Oceanography* 87:114-126.
- Mclean, R.F., A. Tsyban, V. Burkett, J.O. Codignott, D.L. Forbes, N. Minura, R.J. Beamish y V. Ittekkot. 2001. Coastal Zones and Marine Ecosystems. 345-372 p. En: McCarthy, J.J., Canziani, O.F., Leary, N.A., Dokken, D.J., y White, K.S. (Eds.), *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- MacDonald, G. 2010. Water, climate change and sustainability in the southwest. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107(50):21256–21262.
- Martínez-Flores, G., R. Cervantes-Duarte y E. González-Rodríguez. 2006. Análisis de la Temperatura Superficial del Mar en Bahía de La Paz, Baja California Sur. *Naturaleza y Desarrollo* 4: 26-34.
- Martínez-López, A., R. Cervantes-Duarte, A. Reyes-Salinas y J.E. Valdez-Holguín. 2001. Cambio estacional de clorofila *a* en la Bahía de La Paz, Baja California Sur. *Hidrobiológica* 11(1):45-52.
- Martínez-López, A., D. Escobedo-Urías, A. Reyes-Salinas y M.T. Hernández-Real. 2007. Respuesta del fitoplancton al aporte de nutrientes en un sistema lagunar del Golfo de California. *Hidrobiológica* 17(2): 101-112.
- Merino-Ibarra, M. 1987. The Coastal zone of Mexico. *Coastal Management* 15:27-42.
- Millán-Núñez, R., E. Santamaría-del Angel, R. Cajal-Medrano y O.A. Barocio-León. 1999. El delta Río Colorado: un ecosistema con alta productividad primaria. *Ciencias Marinas* 25(4):509-524.
- Millán-Núñez, R., E. Santamaría-del Ángel y A. González-Silvera. 2006. Metodología para la regionalización de la zona mediante aspectos biológicos. 33-38 p. En: Córdova y Vázquez, A., Rosete-Vergés, F., Enríquez-Hernández, G., y Hernández-de la Torre, B. (Eds.), *Ordenamiento ecológico marino Visión temática de la regionalización*. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT). México.
- Miranda, A., D. Voltolina, M.G. Frías-Espericueta, G. Izaguirre-Fierro y M.E. Rivas-Vega. 2006. Balance y descarga de nutrientes al Golfo de California de una granja semi-intensiva de camarón del noroeste de México. *Hidrobiológica* 19(1): 43-48.
- Morales-Hernández, J.C., F.M. Carrillo-González, L.M. Farfán-Molina y V.M. Cornejo-López. 2016. Vegetation change cover in the coastal region of Bahia de Banderas, Mexico. *Caldasia* 38(1): 17-29.

- Morales-Soto, J.C., J.E. Valdez-Holguín y R. Cervantes-Duarte. 2000. Cambio diario y estacional de la clorofila *a* y algunas variables fisicoquímicas en la Laguna La Cruz, Sonora, México. *Oceánides* 15(1): 25-33.
- Morel, A. y J.F. Berthon. 1989. Surface pigments, algal biomass profiles, and potential production of the euphotic layer: Relationships reinvestigated in view of remote sensing applications. *Limnology and Oceanography* 34(8): 1545-1562.
- Morrissey, P.A. 1991. The Gulf of California as a Large Marine Ecosystem. Master of Arts in Marine Affairs. University of Rhode Island. College of the Environment and Life Sciences. Department of Marine Affairs. Kingston. Rhode Island. Estados Unidos.
- Nevárez-Martínez, M.O., D. Lluch-Belda, M.A. Cisneros-Mata, J.P. Santos-Molina, M.A. Martínez-Zavala y S.E. Luch-Cota. 2001. Distribution and abundance of the Pacific sardine (*Sardinops sagax*) in the Gulf of California and their relation with the environment. *Progress in Oceanography* 49: 565-580.
- Pérez-Arvizu, E.M., E.A. Aragón-Noriega y T. L. Espinoza-Carreón. 2013. Variabilidad estacional de clorofila *a* en el Golfo de California y su respuesta a condiciones El Niño y La Niña en el Norte del Golfo de California. *Biología Marina y Oceanografía* 48(1):131-141.
- Reyes, C y Lavín, M. F. 1997. Effects of the autumn-winter meteorology upon the surface heat loss in the Northern Gulf of California. *Atmósfera*, 10:101-123.
- Reyes-Salinas A. 1999. Factores que controlan la productividad primaria en la Bahía de La Paz, Baja California Sur. Tesis de Maestría. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. Departamento de Oceanología. La Paz, Baja California Sur, México.
- Ripa P. and Marinone S.G. 1989. Seasonal variability of temperature, salinity, velocity, vorticity and sea level in the central Gulf of California, as inferred from historical data. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 115:887-913.
- Rojas-Acuña, J. y C. Eche-Llenque. 2006. La Temperatura de la Superficie del Mar Peruano a partir de imágenes AVHRR/NOOA (2000-2003). *Revista de Investigación en Física*. 9: 24-30.
- Robles, J.M. y Marinone, S.G. 1987. Seasonal and interannual thermohaline variability in the Guaymas Basin in the Gulf of California. *Continental Shelf Research* 7(7):715-733.
- Robinson, M.K. 1973. Atlas of monthly mean sea surface and subsurface temperatures in the Gulf of California, Mexico. *San Diego Soc. Nat. Hist. Mem* 5:97.
- Roden, G.I. 1958. Oceanographic and meteorological aspects of the Gulf of California. *Pacific Science* 12(1): 21-45.
- Round, F.E. 1967. The Gulf of California. Part I: Its composition, distribution and contribution to the sediments. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 1: 76-97.
- Santamaría-del Angel, E., S. Álvarez-Borrego y F.E. Muller-Karger. 1994. Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery. *Journal of Geophysical Research* 99(24):7411-7421.

- Soto-Mardones, L., S.G. Marinone y A. Parés-Sierra. 1999. Variabilidad espaciotemporal de la temperatura superficial del mar en el Golfo de California. *Ciencias Marinas* 25(1):1-30.
- Sverdrup, H.U. 1941. The Gulf of California: preliminary discussion on the cruise of the E.W. Scripps in February and March 1939. 161-166 p. En: Pacific Science Association (Ed.). Proceedings of the Sixth Pacific Science Congress, Volume III. July 24 to August 12. California, United States.
- Torres-Orozco, E. 1993. Análisis volumétrico de las masas de agua del Golfo de California. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Departamento de Oceanografía Física. Ensenada. Baja California, México.
- Trenberth, K.E. 1997. The definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*: 2771-2777.
- Valdez-Holguín, J.E. y J.R. Lara-Lara. 1987. Productividad primaria en el Golfo de California efectos del evento El Niño 1982-1983. *Ciencias Marinas* 13(2):34-50.
- Valdez-Holguín, J.E. 1994. Variaciones diarias de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y clorofila *a* en una laguna hipersalina del Golfo de California. *Ciencias Marinas* 20(2): 123-127.
- Valdez Holguín J.E., G. Gaxiola-Castro y R. Cervantes-Duarte. 1995. Productividad primaria en el Golfo de California calculada a partir de la relación entre la irradiancia superficial y clorofila de la zona eufótica. *Ciencias Marinas* 21(3):311-329.
- Valdez-Holguín, J. E., Álvarez Borrego, S y Trees, C.C.1999. Caracterización estacional y espacial de los parámetros fotosintéticos del fitoplancton del Golfo de California. *Ciencias Marinas* 25(4):445-467.
- Valenzuela-Sánchez, C.G. 2016. Tendencia de la Temperatura Superficial del Mar, nivel medio del mar e incidencia de vientos en la Región Central del Golfo de California. Tesis de Maestría. Universidad de Sonora. Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas. Hermosillo, Sonora, México.
- Verdugo-Díaz, G., A. Martínez-López, G. Gaxiola-Castro y J.E. Valdez-Holguín. 2012. Photosynthetic parameters from the Gulf of California southern region. *Biología Marina y Oceanografía* 47(3): 527-535.
- Vikas, M y G.S. Dwarakish. 2015. El Niño: A Review. *International Journal of Earth Sciences and Engineering* 8(2): 130-137.
- Yañez-Arancibia, A y J.W. Day. 2010. La zona costera frente al cambio climático: vulnerabilidad de un sistema biocomplejo e implicaciones en el manejo costero. 2-22 p. En: Yañez-Arancibia A. (Ed.), Impactos del cambio climático sobre la zona costera. Instituto de Ecología A.C. (INECOL), Texas Sea Grant Program, Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT). México.
- Yen, S.W., J.S. Kug, B. Dewitte, M.H. Kwon, B.P. Kirtman y F.F. Jin. 2009. El Niño in a changing climate. *Nature* 461: 511-514.