



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

El análisis de productos satelitales para la caracterización de procesos físicos como agentes de producción biológica en el Sur del Golfo de California.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

B I Ó L O G A

P R E S E N T A:

Karla Ivonne Saavedra Valdez



DIRECTORA DE TESIS:

Dra. Elizabeth Johana Durán Campos

Ciudad Universitaria, CDMX, 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Comité tutorial

El jurado académico designado por la **Facultad de Ciencias** de la **Universidad Nacional Autónoma de México** para la evaluación de la tesis que presenta **Karla Ivonne Saavedra Valdez** número de cuenta **316205357** para obtener el grado de Licenciada en Biología se conforma por:

- Dra. María Adela Monreal Gómez

Instituto de Ciencias de Mar y Limnología, UNAM

- Dr. Raúl Aguirre Gómez

Instituto de Geografía, UNAM.

- Dr. Francisco Javier Flores de Santiago

Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM

- Dr. León Felipe Álvarez Sánchez

Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM

Con todo el cariño a mi sostén más grande: mis padres y hermanos que me apoyaron de diferentes maneras a lo largo de este camino, esperándome en las noches más largas de clase y escuchándome cuando divagaba sobre ciencia.

Llegar aquí no habría sido posible sin su ayuda. ♥

Agradecimientos

Agradezco infinitamente a la Universidad Nacional Autónoma de México y al Instituto de Ciencias del Mar y Limnología por brindar los espacios y herramientas necesarias para obtener el conocimiento teórico y empírico sobre el mar y todo lo relacionado a él.

A mi asesora Elizabeth que siempre estuvo respaldando todo mi proyecto y que junto con el doctor Erik me brindaron el aprendizaje y herramientas necesarias para lograr este objetivo, así como abrirme las puertas en su laboratorio y darme la oportunidad de tener unas increíbles experiencias marinas.

A mis amigas Fátima, Dani, Hannia, Jenny y mi amigo Rodrigo por compartir momentos de aprendizaje a mi lado, así como su mano y apoyo a lo largo de la carrera. Además de los amigos que me dio la mar y vivieron a mi lado la elaboración de este proyecto: Selina y Christopher.

Al hidrobiólogo Sergio Castillo Sandoval por el apoyo técnico en la determinación de clorofila-*a*, así como al Ingeniero Francisco Ponce Nuñez por el apoyo en la elaboración de algunas de las figuras presentadas en este trabajo.

A todas aquellas personas que me brindaron grandes deseos, vibras y apoyo moral en la elaboración.

Y por último, pero no menos importante: al proyecto DGAPA PAPIIT-UNAM #IG100421 “Análisis en las interacciones entre aguas continentales y marinas en el Golfo de California bajo el enfoque de la fuente al mar con base a su gestión sustentable.”

Índice

Resumen	8
Abstract	10
I. Introducción	11
II. Marco teórico	13
II.I. El Golfo de California	13
II.II. Hidrografía y procesos hidrodinámicos.....	14
II.II.I. Masas de agua.....	14
II.II.II. Ondas internas	17
II.II.III. Surgencias	17
II.II.IV. Vorticidad y vórtices	18
II.II.V. Interacciones y ENSO.....	20
III. Objetivos	22
III.I. General.....	22
III.II.Particulares.....	22
IV. Justificación	22
V. Hipótesis	22
VI. Material y Métodos	23
VII. Resultados	32

VII.I. Distribución de TSM.....	33
VII.II. Distribución horizontal de Chl- <i>a</i>	51
VII.III. Series de tiempo analizadas en el área de estudio	70
VIII. Discusión	71
IX. Conclusiones	81
X. Referencias	82

Índice de figuras

Figura	Página
1. Localización del Golfo de California. La batimetría se muestra en m.	11
2. Tipos de surgencia.	18
3. Esquema de vórtices.	19
4. Representación del evento de El Niño y La Niña.	20
5. Ejemplo de imágenes de: a) TSM (°C), y b) Chl- <i>a</i> (mg m ⁻³) obtenidas para el día 3 de julio de 2019 en la porción sur del Golfo de California.....	24
6. Temperatura superficial del mar en el área de estudio durante el año 2015.	33
7. Temperatura superficial del mar en el área de estudio durante el año 2016.	37
8. Temperatura superficial del mar en el área de estudio durante el año 2017.....	41

9. Temperatura superficial del mar en el área de estudio	
durante el año 2018.....	46
10. Concentración de Chl-a en el área de estudio	
durante el año 2015.	51
11. Concentración de Chl-a en el área de estudio	
durante el año 2016.	55
12. Concentración de Chl-a en el área de estudio	
durante el año 2017.	60
13. Concentración de Chl-a en el área de estudio	
durante el año 2018.....	64
14. Serie de tiempo desde 2015 hasta 2018 en el	
Golfo de California para la temperatura de la superficie	
del mar en rojo (TSM) (°C), y la concentración de clorofila-a (Chl-a) (mg m⁻³), en	
verde.....	70
15. Serie de tiempo desde 2015 hasta 2018 en el	
Océano Pacífico para la temperatura de la superficie	
del mar en rojo (TSM) (°C), y clorofila-a (Chl-a) (mg m⁻³), en verde..	71

Tabla	Página
1. Propiedades de las Masas de Agua en la entrada	
del Golfo de California (según Lavín et al., 2009).	15

2. Comparación de máximos y mínimos de Chl-a por año en el Golfo de California. 76

3. Comparación de máximos y mínimos de Chl-a por año en el Océano Pacífico77

4. Comparación de máximos y mínimos en la temperatura superficial del por año.78

Resumen

El Golfo de California, ubicado al Oeste en la Península de Baja California y una parte continental del Noroeste de México, es considerado uno de los ecosistemas marinos más grandes de América Latina debido a la convergencia de diversos ecosistemas altamente productivos. Actualmente, se pueden utilizar diferentes estrategias metodológicas para la caracterización de diferentes procesos oceanográficos, uno de estos métodos es mediante observaciones satelitales. El enfoque de este proyecto, se centró en el análisis de imágenes de satélite de la temperatura superficial del mar y la biomasa fitoplanctónica expresada como concentración de clorofila-*a* de los años 2015 al 2018 con el fin de caracterizar procesos de mesoescala, su relación con la producción biológica en el área de estudio, así como identificar cambios estacionales en la temperatura superficial del mar y clorofila-*a* y, a su vez, zonas y épocas con elevada producción biológica. Para esto, se utilizaron datos e imágenes disponibles en el servidor de la NASA. El procesamiento se realizó con ayuda del software SeaDAS 7.2, Excel, MATLAB y CorelDraw, lo que permitió demostrar la presencia de procesos físicos como vórtices ciclónicos y anticiclónicos en los años 2015 y 2016 que afectaron la concentración y distribución de la clorofila-*a*; también, se observó el efecto del fenómeno de "El Niño" el cual provocó un aumento en la temperatura superficial del mar en el Golfo de California y en el Océano Pacífico. Por otro lado, en cuanto a los años 2017 y 2018 se observó el efecto del fenómeno de "La Niña", el cual genera la advección de agua superficial fría rica en nutrientes, lo que provocó un aumento en la biomasa fitoplanctónica del Golfo de California y Océano Pacífico y una disminución en la temperatura superficial del mar. También se observó una marcada estacionalidad de la temperatura superficial del mar y la clorofila-*a* en las series de tiempo. Por ejemplo, durante finales de invierno y principios de primavera se observó el primer pico de clorofila-*a*, mientras que a finales de verano y principios

de otoño se presentó el segundo pico de clorofila-*a* siendo este el comportamiento típico de los ambientes tropicales.

Palabras clave: imágenes de satélite, clorofila-*a*, temperatura superficial del mar, vórtices, El Niño, La Niña, Golfo de California, Océano Pacífico.

Abstract

The Gulf of California, located at the West portion of the Baja California Peninsula and the continental part of Northwestern Mexico, is considered one of the largest marine ecosystems of Latin America due to the convergence of diverse highly productive ecosystems. Currently, different methodological strategies can be used for the characterization of different oceanographic processes, one of them is the use of satellite observations. This project analyzed satellite products of sea surface temperature and chlorophyll-*a* available from the NASA ocean color server from 2015 to 2018 in order to characterize mesoscale processes and its relationship with the biological production in the Gulf of California and Pacific Ocean, as well as to identify seasonal changes of these parameters intending to characterize areas and seasons with high biological production. The satellite products were processed using SeaDAS 7.2, Excel, MATLAB and CorelDraw software. The results showed that in the years 2015 and 2016 the presence of physical process including cyclonic and anticyclonic eddies affected the concentration and distribution of the chlorophyll-*a*. Besides, it was observed the effect of "El Niño" phenomenon, which caused an increase of the sea surface temperature in the Gulf of California and in the Pacific Ocean. On the other hand, during 2017 and 2018, it was observed the effect of "La Niña", which generated the advection of cold surface nutrient-rich water that increased in the chlorophyll-*a* levels in the Gulf of California and the Pacific Ocean, decreasing the sea surface temperature. It was also observed a marked seasonality in the sea surface temperature and chlorophyll-*a*, where during the end of winter season and at the beginning of spring, occurred the first peak of chlorophyll-*a*, while at the end of the summer season and the beginning of autumn, the second peak of chlorophyll-*a* occurred, being the typical behavior of tropical environments

Key Words: satellite images, chlorophyll-a, sea surface temperature, eddies, "El Niño", "La Niña", Gulf of California, Pacific Ocean.

I. Introducción

El Golfo de California (GC), ubicado entre los 22-32° de latitud Norte y los 105-108° de longitud Oeste en la Península de Baja California y una parte continental del noroeste de México, posee una extensión de aproximadamente 1200 km, y un ancho que oscila entre 70 y 200 km (Lluch-Cota et al., 2007). Su profundidad es ampliamente variable, con un gradiente que va desde los 3000 m de profundidad en su porción sur, hasta 200 m de profundidad en su porción norte (Lavin y Marinone, 2003) (Figura 1).

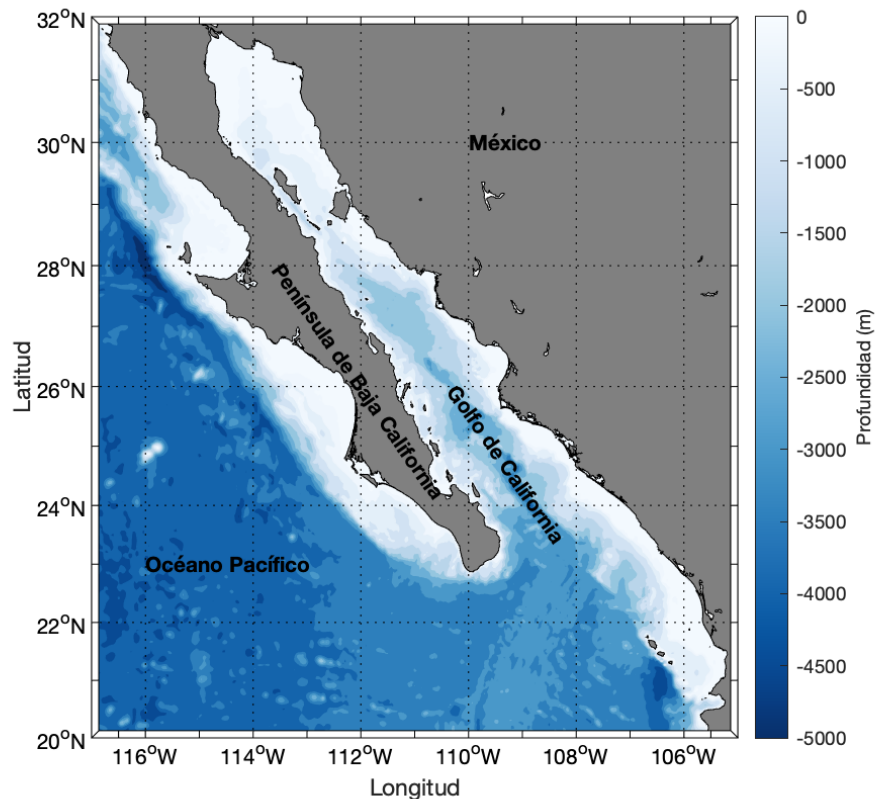


Figura 1. Localización del Golfo de California. La batimetría se muestra en m.

El GC es considerado uno de los ecosistemas marinos más grandes de América Latina y reconocido como un ecosistema altamente productivo debido a la presencia de procesos hidrodinámicos a diferentes escalas espacio-temporales. Estos procesos han sido categorizados, con base en enfoques teóricos y observacionales, como procesos de microescala (< 10 km, e.g. ondas internas), de mesoescala (10-100 km, e.g. vórtices, surgencias) y procesos de macroescala (> 100 km, e.g. corrientes, frentes geostroficados) (Mahadevan, 2016; McGillicuddy, 2016). En su conjunto, estos procesos oceánicos transportan energía, calor, y generan mezcla en la columna de agua, lo que asegura la disponibilidad de nutrientes en la zona eufótica y promueve una elevada producción fitoplanctónica seguida de una elevada producción zooplanctónica (Della Penna y Gaube, 2019).

De la elevada producción en los niveles inferiores de la cadena trófica depende, en gran medida, la producción de los niveles tróficos superiores, razón por la cual el GC soporta una elevada diversidad biológica, incluyendo especies emblemáticas con elevado valor ecológico (e.g. la vaquita marina, tortugas marinas), hasta especies con elevado valor comercial que soportan importantes pesquerías (e.g. atún, sardina, calamar, camarón) que constituyen más del 60% de la captura anual del país, lo que convierte al GC en la región pesquera más importante de México y que proporciona empleo a miles de personas (Arreguín et al., 2017; Páez et al., 2017; Durán-Campos, et al., 2019).

La caracterización de los procesos oceánicos puede ser a través del uso de diferentes estrategias metodológicas que incluyen observaciones *in-situ* y satelitales. En este sentido, desde el año 2002 y hasta la fecha se encuentran disponibles, gracias al espectroradiómetro de imágenes de resolución moderada de la NASA (MODIS, por sus siglas en inglés), datos e imágenes de dos variables fundamentales: temperatura superficial del mar (TSM) y clorofila-*a* (Chl-*a*) con una resolución espacial de 1 km, y una resolución temporal de un día. MODIS es un instrumento clave a bordo de los satélites Terra y Aqua. La órbita de Terra alrededor de la Tierra está programada para su recorrido de norte a sur a través del ecuador

por la mañana, mientras que Aqua recorre de sur a norte sobre el ecuador por la tarde. Terra y Aqua generan datos de toda la superficie de la Tierra cada 1 o 2 días, adquiriendo datos en 36 bandas espectrales o grupos de longitudes de onda (Justice et al., 2002).

Debido a que se tiene registro, a lo largo de los años de que eventos como el Niño, la Niña o “The Blob”, generan cambios significativos en la concentración de Chl-a, el presente trabajo analizó el periodo comprendido entre 2015 y 2018 con el objetivo de identificar el efecto de dichos eventos en la TSM y Chl-a estimadas a partir de observaciones satelitales MODIS.

El uso de los productos MODIS ha sido probado en diferentes dominios alrededor del mundo, y en particular en el GC, se ha demostrado que representan un buen enfoque para monitorear las condiciones del océano de una manera confiable y con alta resolución (diaria y 1 km/píxel) que es muy útil para generar series de tiempo relativamente largas y caracterizar procesos oceánicos como agentes de producción biológica (Coria Monter et al., 2017; Coria-Monter et al., 2018; Coria-Monter et al., 2019; Durán-Campos et al., 2019; Durán-Campos et al., 2020).

II. Marco teórico

II.1 El Golfo de California

Geomorfología

El GC es un sistema de rift activo con deformación transtensional entre un movimiento de límites de placa divergente y transformante de alrededor de 1500 km de longitud y aproximadamente 200 km de ancho y una superficie de 160,000 km². La parte sur del golfo presenta relieves submarinos abruptos con fosas abisales de más de 3,000 m de profundidad, mientras que su parte septentrional es somera, lo

que ocasiona una oscilación de mareas que llegan a superar los 9 m. El golfo incluye casi 1,000 islas entre las que destacan las dos islas más grandes de México: Ángel de la Guarda y Tiburón. Por su alta productividad biológica, sus aguas profundas, arrecifes rocosos y playas arenosas, Jacques-Yves Cousteau llamó al Golfo de California “el acuario del mundo”. Está rodeado por los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora, Sinaloa y Nayarit (Figura1) y se encuentra definido por un arreglo de fallas transformantes lateral derecha que conectan una serie de cuencas tipo pull-apart a partir del Mioceno Medio-Tardío (Arreguin-Sánchez y Arcos-Huitrón, 2011; Luque et al., 2016). En estas cuencas prevalecen ambientes que van desde transicionales y neríticos hasta ambientes pelágicos. La región norte del golfo ilustra los efectos de un gran volumen de sedimentación ocurrida durante el adelgazamiento y la ruptura del manto litosférico, el cual se caracteriza por conectar cuencas activas al oeste (Delfin, Consag, Wagner, Cerro Prieto y Salton) e inactivas al este (Tiburón y Aldair-Tepoca), amplias y someras con paquetes de sedimentos de hasta 6 km, producto del aporte de terrígenos provenientes del río Colorado. En contraste, la parte central y sur del golfo está caracterizada por grandes tirantes de agua, cuencas estrechas y alargadas, con espesores sedimentarios de hasta 1 km, y conectadas por un arreglo bien definido de fallas transforme dextral, que se desarrollan sobre corteza transicional y oceánica (Figura 1). Más al sur, la cuenca Alarcón forma parte de un sistema distinto, en donde se ha mostrado la formación de nuevo piso oceánico desde hace 3.5 Ma (DeMets, 1995; Antonelis et al., 1999).

II.II Hidrografía y procesos hidrodinámicos

II.II. I Masas de agua

El golfo está ubicado en una zona de transición entre patrones cálidos y fríos de circulación atmosférica y oceánica, por lo que es importante conocer las variaciones en la circulación superficial y las masas de agua, así como en la productividad y el clima. Con base en la clasificación propuesta por Lavín et al. (2006), las masas de

agua que se presentan en la entrada del Golfo de California son tres: el agua de la Corriente de California (Kessler, 2006; Castro, et al., 2006; Wyrki, 1967), el Agua Tropical Superficial (TSW, por sus siglas en inglés) y el Agua del Golfo de California (GCW, por sus siglas en inglés), las características de las masas de agua se enlistan en la Tabla 1. La dinámica que se presenta en la boca del golfo y las masas de agua dan como resultado procesos de mesoescala (vórtices, frentes) capaces de generar intercambio, mezcla y distribuir las comunidades planctónicas. Además, dentro de los primeros 150 m de la columna de agua se encuentra la presencia de un máximo subsuperficial de fluorescencia de la clorofila (Ruelas y Trasviña, 2017).

Tabla 1. Propiedades de las Masas de Agua en la entrada del Golfo de California (Lavín, et al., 2009)

Masas de Agua	Abreviatura, por su nombre en inglés	Salinidad	Temperatura °C
Agua del Golfo de California	GCW	> 34.9	≥ 12
Agua Tropical Superficial	TSW	< 34.9	≥ 18
Agua de la Corriente de California	CCW	≤ 34.5	12 ≤ T ≤ 18
Agua Subtropical Subsuperficial	StSsW	34.5 ≤ S < 35	9 ≤ T ≤ 18
Agua Intermedia del Pacífico	PIW	34.5 ≤ S < 34.8	4 ≤ T < 9
Agua Profunda del Pacífico	DPW	34.5 < S ≤ 35	0 ≤ T ≤ 3

En el Océano Pacífico y sur del Golfo de California confluyen diversos sistemas de corrientes, con diferentes características termohalinas. A continuación, se describen las más importantes.

Corriente de California (CC). La CC presenta una velocidad aproximada anual entre 0.926 — 0.6482 m/s, pero en invierno-primavera es constante y en verano otoño es más variable (Wyrki, 1965). La CC es fría y fluye desde el norte a lo largo de la costa oeste de California hasta la Península de Baja California. En invierno y primavera, la corriente es fuerte y circula casi pegada a la línea de costa de California y Baja California, gradualmente, por debajo de la termoclina gira hacia el oeste, pero superficialmente sigue por la costa de México, hasta alcanzar el sur de la Península de Baja California, para posteriormente girar hacia el suroeste (Kessler, 2006).

Corriente Ecuatorial del Norte (NEC, North Equatorial Current, por sus siglas en inglés). La NEC se ubica al este de los 118°O y está conformada por agua de la CC y agua de la NECC (North Equatorial Countercurrent, por sus siglas en inglés); aunque la contribución de ambas varía durante el año. En primavera, la NEC es conformada casi en su totalidad por la CC, pero el agua el NECC es más significativa el resto del año (Kessler, 2006).

Corriente Mexicana del Oeste (WMC, West Mexican Current, por sus siglas en inglés). La WMC es una corriente subsuperficial cálida, más intensa en primavera y otoño con velocidades aproximadas de 0.36 m/s (Gómez-Valdivia et al., 2013), frecuentemente puede llevar agua hacia el interior del golfo. La WMC fluye hacia el norte a lo largo de la costa de México (Chiappa-Carrara et al., 2019) desde el Golfo de Tehuantepec y hasta Cabo Corrientes, cuando deja atrás a la CRCC (Costa Rica Coastal Current, por sus siglas en inglés) (Regalado, 2022).

En el Golfo de California hay procesos hidrodinámicos que se presentan en diferentes escalas de tiempo y espacio. Por ejemplo, existen procesos de microescala que pueden durar horas y decenas de metros de longitud, incluyen las ondas internas y turbulencia.

II.II. II. Ondas Internas

Los océanos se encuentran influenciados por dos factores que determinan la estratificación vertical: el balance hidrostático y la radiación solar. En el balance hidrostático la fuerza de gravedad trabaja para mantener las capas de agua más densa por debajo de las capas de menor densidad lo cual genera una estratificación en toda la columna de agua; mientras que el segundo factor mantiene con mayor temperatura las capas superficiales de la columna provocando la estratificación estable (Bravo-Gasca, 2011).

La relación entre la estratificación, la batimetría de la zona y el flujo de corriente dan como resultado perturbaciones conocidas como ondas en el interior de la columna de agua (Jackson, 2007).

Las ondas internas se presentan de diferentes maneras en el océano. Estas ondas se producen cuando dos capas de fluido de densidades diferentes se encuentran una sobre la otra, la gravedad hace que la interfaz (o superficie de separación entre las capas) tienda a mantenerse horizontal. Estas condiciones se presentan, por ejemplo, en los estuarios, fiordos o en la llamada picnoclina del océano, que es una región donde se producen fuertes variaciones (o gradientes) de densidad (Esquivel-Trava, 2008).

Los procesos de mesoescala que se presentan en el océano son perturbaciones que pueden durar días a meses y se presentan entre 10 a 100 km de diámetro, entre los procesos se encuentran las surgencias y los vórtices.

II.II.III. Surgencias

Las surgencias son procesos de mesoescala que se presentan en el mar como afloramientos de agua subsuperficial hacia la capa eufótica que provocan un

aumento en la producción biológica del océano debido a que llevan agua fría y rica en nutrientes. Las surgencias pueden ser de tres tipos (Figura 2): eólicas provocadas por el viento, topográficas debidas a la batimetría de la zona y, por último, las generadas por diferencias de densidad (Kämpf y Chapman, 2016).

Las surgencias eólicas o de transporte de Ekman (Figura 2) son aquellas donde el viento ejerce una fuerza de manera persistente sobre la superficie oceánica, provocando el desplazamiento del agua superficial en un ángulo de 90° respecto a la dirección del viento; en el hemisferio norte debido a la fuerza de Coriolis gira hacia la derecha y hacia la izquierda en el hemisferio Sur (Barahona y Gallegos, 2000). Las surgencias topográficas se presentan en las zonas donde existe un cambio abrupto de profundidades (Kämpf y Chapman, 2016).

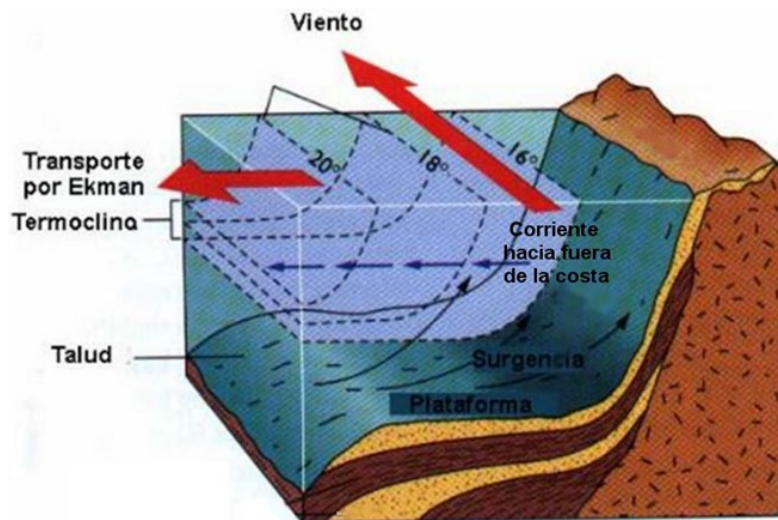


Figura 2. Diagrama de un sistema de surgencias por viento (Pinet, 2000)

II.II.IV. Vorticidad y vórtices

La vorticidad es una propiedad intrínseca de un fluido que se desplaza en un medio con fricción; es una medida vectorial que caracteriza la rotación que experimenta un flujo y a la cual está sometido el fluido (Pedlosky, 1987).

Los vórtices son manifestaciones de flujos turbulentos en rotación en el océano; se presentan a diferente escala y el tamaño de éstos depende de diversos factores tales como el cambio en la latitud y la topografía del fondo, entre otros (Olson, 1991).

Los vórtices presentan características físicas distintivas (Figura 3); existen vórtices cálidos con movimiento convergente, con vorticidad negativa, los cuales giran, en el hemisferio norte, en dirección de las manecillas del reloj provocando un hundimiento de agua. Por el contrario, existen vórtices fríos con movimientos divergentes, con vorticidad positiva, los cuales giran, en el hemisferio norte, en contra de las manecillas del reloj, provocando un ascenso de aguas subsuperficiales frías y ricas en nutrientes, originando una fertilización en la zona donde sucede el giro (Cruz Gómez et al., 2008).

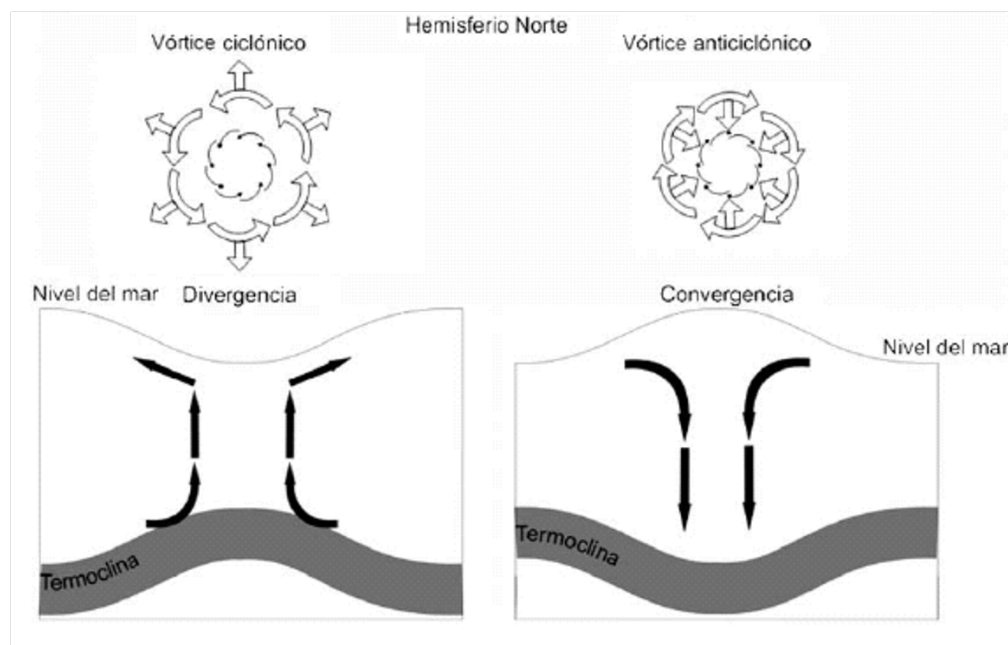


Figura 3. Esquema de vórtices (tomada de Cruz-Gómez et al., 2008)

Los procesos a macroescala que se presentan en el océano son aquellos que se pueden durar de meses a años y con diámetros mayores a 100 km. El principal proceso son los eventos de la Niña y el Niño.

II.II.V. Interacciones y ENSO

El evento de El Niño y La Niña (Figura 4) son las fases cálida y fría, respectivamente, de un patrón climático recurrente en el Pacífico tropical: El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). El patrón cambia de forma irregular cada dos a siete años, provocando cambios predecibles en la temperatura de la superficie del océano e interrumpiendo los patrones de viento y lluvia en los trópicos. Estos cambios tienen una cascada de efectos secundarios globales (NOAA, 2023).

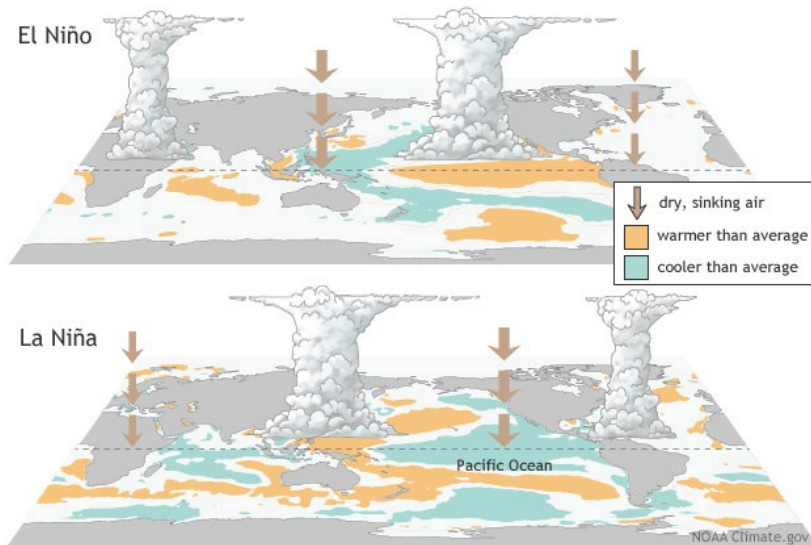


Figura 4. Representación del Evento de El Niño y La Niña (www.climate.gov).

En su parte sur, el Golfo de California se fusiona con el Océano Pacífico, que tiene interés científico debido a los procesos a gran escala que ocurren en el Pacífico oriental e impactan en todo el Golfo de California. Una de las principales fuentes de la variabilidad interanual y estacional en la región se ha relacionado con ENOS, principalmente aquellos eventos que tuvieron lugar en 1982/1983 y 1997/1998, lo que indujo anomalías de la temperatura de la superficie del mar con impactos en los

niveles de productividad primaria (Pérez-Cruz, 2013). Sin embargo, mientras que ENOS representa una potencial fuente de variabilidad, la región también está sujeta a otros procesos a gran escala que podrían ocurrir a lo largo del Océano Pacífico, como eventos de calentamiento repentino (Durán-Campos et al., 2022).

A pesar de que existen diversos procesos que ocurren en el Océano Pacífico y alteran toda la estructura trófica, en este estudio nos centraremos en el evento “El Niño”, el cual se vincula con temperaturas superficiales del mar excepcionalmente cálidas en el Pacífico Tropical, y se encuentra relacionado con cambios importantes en la atmósfera a través del fenómeno conocido como Oscilación del Sur (OS), por lo que todo el fenómeno se denomina ENOS. El fenómeno surge debido a las interacciones acopladas atmósfera-océano mediante las cuales los vientos crean cambios en la temperatura superficial del mar que a su vez determinan dónde ocurren las principales actividades de convección tropical y tormentas, por lo que determinan los vientos (Trenberth et al., 2019).

III. Objetivos

III.I. General

- Obtener productos satelitales (MODIS-AQUA) de TSM y Chl-a para la caracterización de procesos de mesoescala (vórtices) y macroescala (ENOS) y su relación con la producción biológica en el Sur del Golfo de California y el Océano Pacífico.

III.II. Particulares

- Identificar cambios estacionales de la distribución de ambos parámetros.
- Identificar zonas y épocas con elevada producción biológica.
- Realizar una comparación, en términos de producción biológica, entre la región del Pacífico con el Golfo de California.

IV. Justificación

El conocimiento de los procesos físicos y cómo influyen directamente en la producción biológica de los océanos es una prioridad para el manejo de los recursos y para realizar planes de manejo que ayuden a los tomadores de decisiones. La obtención de datos *in-situ* puede ser costosa debido a la necesidad de utilizar buques oceanográficos, por lo tanto, el uso de metodologías alternativas, como imágenes de satélite, nos permite identificar estructuras físicas y producción biológica, además de ayudar en la reducción de gastos.

V. Hipótesis

Las imágenes satelitales MODIS permitirán identificar cambios en la TSM y en la concentración de Chl-a relacionados con la presencia de eventos ENOS. Durante su fase cálida (El Niño) se espera un aumento en la TSM con una disminución en

los niveles de Chl-*a*. Durante la fase fría (La Niña) se observará un patrón contrario, es decir, una disminución de la TSM y un incremento en la Chl-*a*.

VI. Materiales y Métodos

Se obtuvieron datos e imágenes (L1 y L2) de TSM y Chl-*a* disponibles del servidor de la NASA (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov>) durante el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2015 y hasta el 31 de diciembre de 2018. El tipo de imágenes obtenidas son de niveles L1 y L2. Las imágenes nivel L1 son datos que en la mayoría de los casos la NASA los proporciona como conjuntos de datos de producción para ser procesados y para producir productos de nivel superior. En estos, los sensores satelitales miden la radiación electromagnética en longitudes de onda específicas. Estas mediciones, llamadas radiancias, se pueden utilizar directamente para realizar observaciones sobre la atmósfera, la tierra o los océanos. A su vez, los datos de nivel 1b se utilizan en algoritmos científicos para derivar parámetros geofísicos, que se denominan datos de nivel L2. Las imágenes de nivel L2 contienen información derivada de los datos del sensor geolocalizado, como la elevación del suelo, las elevaciones de retorno de la superficie más alta y más baja, etc. (EarthData, 2021; NOAA, 2024)

La información fue obtenida para los días de menor nubosidad. Los datos fueron procesados con algoritmos estándar y con ayuda del software SeaDAS 7.2. Para filtrar los datos de mala calidad a medida que se generaron las imágenes, se aplicaron diferentes filtros (máscaras), que incluyeron LAND, CLDICE, HILT y STRAY-LIGHT. Con base en los criterios por Prieri et al (2015), LAND y CLDICE se aplican a todos los píxeles de imágenes L2 para enmascarar píxeles. HILT se utiliza cuando se alcanza la saturación física de las bandas, mientras que STRAY-LIGHT se utiliza para resaltar el brillo de los píxeles adyacentes en el valor de reflectancia de un píxel. Una vez limpios y procesados los datos, se obtuvieron imágenes con una resolución espacial de 1 km/píxel, lo cual asegura la captación y caracterización de procesos oceánicos de mesoescala (Figura 5).

Posterior a la extracción de datos de Chl-a y TSS realizada en SeaDAS v.7.2 para cada una de las imágenes de la NASA se obtuvieron una serie de datos, los cuales fueron procesados mediante la ayuda del programa Excel. Una vez seleccionados todos los datos, se obtuvo un promedio (el cual se generó mediante el método estadístico de suma de datos cuantitativos y división de los mismos entre la cantidad de datos N) por mes y se colocó el resultado en una tabla de Excel diferente para hacer una comparación de todos los datos obtenidos para las fechas analizadas.

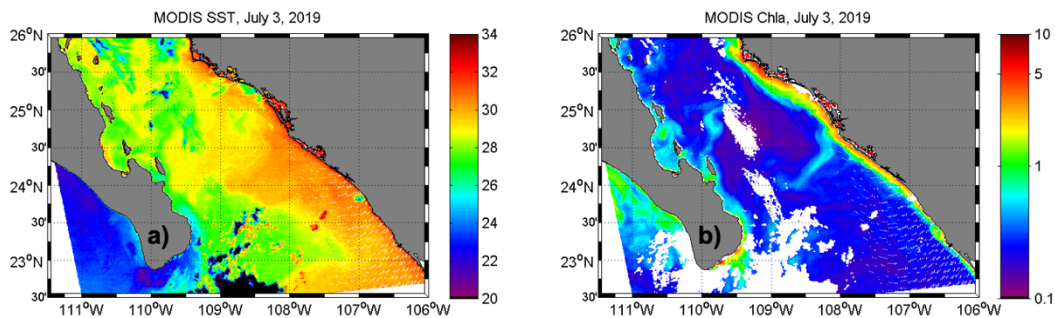


Figura 5. Ejemplo de imágenes de: a) TSM ($^{\circ}\text{C}$), y b) Chl-a (mg m^{-3}) obtenidas para el día 3 de julio de 2019 en la porción sur del Golfo de California.

Para la obtención de las imágenes analizadas superficiales de 20m, se utilizó de MODIS (o espectro radiómetro de imágenes de resolución moderada por sus siglas en inglés) el cual cuenta con 36 bandas que miden la radiación visible e infrarroja y obtiene datos que se utilizan para derivar productos que van desde vegetación, cobertura de la superficie terrestre y fluorescencia de la clorofila del océano hasta propiedades de nubes y aerosoles, ocurrencia de incendios, nieve en la tierra y capa de hielo marino en los océanos. Se encuentra dentro de los satélites Terra (EOS AM) y Aqua (EOS PM). La órbita del satélite Terra alrededor de la Tierra está programada para que pase de norte a sur a través del ecuador por la mañana, mientras que Aqua pasa de sur a norte sobre el ecuador por la tarde. Terra MODIS y Aqua MODIS ven toda la superficie de la Tierra cada 2 días, adquiriendo datos en las 36 bandas espectrales.

En el caso de este estudio, se utilizó MODIS con el fin de ayudar a la estimación de TSM y Chl-a. MODIS posee bandas infrarrojas que mide radiancias en cinco bandas espectrales en las ventanas atmosféricas infrarrojas, en el infrarrojo medio y lejano de las que se puede derivar la TSM. Estas bandas se ubican en un perfil de la radiancia terrestre esperada a una altura del satélite de 3 μm a 14 μm . Las bandas ubicadas cerca de 4 μm (20, 22 y 23) exhiben una alta sensibilidad y se colocan donde la influencia del vapor de agua de la columna es mínima sobre las radiaciones detectadas. Las bandas en el infrarrojo lejano entre 10 μm y 12 μm (31 y 32) están ubicadas cerca de la emisión máxima para un cuerpo negro de 300 K (una aproximación a la temperatura promedio de la Tierra) y colocadas de manera que haya una diferencia significativa en la absorción de vapor de agua integrada en la banda para ambas bandas.

Las bandas 31 y 32 en la ventana de infrarrojos térmicos corresponden aproximadamente a los canales 4 y 5 del radiómetro avanzado de muy alta resolución (RAMR), y la banda 20, en la ventana de infrarrojos medio, es similar al canal 3 del RAMR. MODIS tiene dos bandas estrechas adicionales en la ventana de infrarrojos medios (bandas 22 y 23).

Aunque la ventana del infrarrojo medio es “más limpia” que la del infrarrojo térmico, las mediciones en longitudes de onda más cortas son susceptibles a la contaminación por la radiación solar reflejada en la superficie del mar. MODIS es un instrumento mucho más complejo que sus predecesores y, como tal, tiene varias fuentes únicas de artefactos instrumentales, incluidos los resultantes de múltiples detectores (10) en cada banda espectral y el uso de un espejo de escaneo de rueda de paletas de dos lados con una reflectividad de la superficie que depende del ángulo de incidencia, la longitud de onda y el lado del espejo. Estos tienen un componente dependiente del tiempo.

Los algoritmos lineales se basan en una fórmula de la siguiente forma para la temperatura de la superficie del mar TSM:

$$\text{TSM} = \alpha + \beta T_i + \gamma (T_i - T_j) + \delta (1 - \sec(\theta))$$

donde T_i son temperaturas de brillo en varias bandas para una ubicación determinada; i, j serían reemplazados por las bandas en las que se está construyendo el algoritmo. Se pueden construir relaciones equivalentes para dos pares de bandas cualesquiera. Los coeficientes α , β y γ dan la corrección parametrizada y sus valores son -1, 1 y 3, respectivamente, para un algoritmo RAMR 4,5 típico (TSM en °C) θ es el ángulo cenital y δ es un coeficiente de ángulo de exploración adicional. (Brown, O y Minnett, P)

En cuanto al análisis de clorofila mediante el uso de MODIS, al igual que la detección de TSM, el satélite cuenta con tres bandas principales de altura de línea de fluorescencia (FLH por sus siglas en inglés) son las bandas 13 (665,1 nm), 14 (676,7 nm) y 15 (746,3 millas náuticas). Los productos de color del océano MODIS/Aqua NIR-SWIR se obtienen mediante el uso del algoritmo de corrección atmosférica basado en infrarrojos de onda corta (SWIR) desarrollado por el Centro de Investigación y Aplicaciones de Satélites (STAR) de NOAA/NESDIS. Los productos incluyen concentración de clorofila, reflectancia de teledetección a 667 nm, coeficiente de atenuación del agua a 490 nm en 12 regiones de interés de CoastWatch, es decir, noreste (NE), sureste (SE), golfo de México (GOM), Caribe (CB).) Costa Oeste (WC), Alaska (AK), Pacífico Oriental Tropical (EP), Atlántico Ecuatorial (EA), Grandes Lagos (GL), Hawái (HI), Atlántico Norte (NA) y Cuenca del Pacífico (PB) (NASA OCEAN COLOR, 2019).

Este algoritmo devuelve la concentración cercana a la superficie de clorofila-a (chl_a) en $mg\ m^{-3}$, calculada utilizando una relación empírica derivada de mediciones in situ de clorofila y proporciones de bandas azul a verde de reflectancias de detección remota in situ. La implementación depende de la disponibilidad de tres o más bandas de sensores que abarquen el régimen espectral de 440 a 570 nm. El algoritmo es aplicable a todos los sensores de color de los océanos actuales. El producto chl_a se incluye como parte del conjunto de productos estándar OC de nivel 2 y del conjunto de productos CHL de nivel 3.

El algoritmo de altura de la línea de fluorescencia es una medida relativa de la cantidad de radiación que sale de la superficie del mar, lo que presumiblemente es el resultado de la fluorescencia de la clorofila. Al construir una línea de base usando bandas a cada lado de la banda de fluorescencia, podemos estimar la desviación de la cantidad de radiación esperada para el agua pura que resulta de la fluorescencia de la clorofila. Este aumento de la radiación (centrado en 683 nm para la clorofila) se ha observado durante décadas en mediciones del campo luminoso en el océano. Esta señal es generalmente débil, incluso en regiones con altas concentraciones de clorofila. Para medir la fluorescencia, se aumentó la relación señal-ruido para la banda de fluorescencia y las bandas "de referencia" adyacentes a 665,1 nm (banda 13) y 746,3 nm (banda 15). La medición de la fluorescencia en sí se realiza a 676,7 nm (banda 14) como un compromiso entre la medición del pico de fluorescencia (683 nm) y la presencia de una banda de absorción de oxígeno a 687 nm (NASA OCEAN COLOR, 2019).

El producto estándar actual chlor_a se basa en el algoritmo de Hu et al. (2019), que combina un enfoque empírico de diferencia de bandas en concentraciones bajas de clorofila con un enfoque de relación de bandas en concentraciones más altas de clorofila. El enfoque de diferencia de banda es el índice de color o CI (Hu et al. 2019), y el enfoque de relación de banda se basa en la serie de algoritmos OCx introducida en O'Reilley et al 1998, con coeficientes actualizados de O'Reilley y Werdell (2019).

La concentración de clorofila se calcula primero usando el algoritmo CI, que es un algoritmo de diferencia de reflectancia de tres bandas que emplea la diferencia entre Rrs específicos del sensor en la banda verde y una referencia formada linealmente entre Rrs en las bandas azul y roja (NASA OCEAN COLOR, 2019)

$$CI = \frac{Rrs(\lambda_{verde}) - [Rrs(\lambda_{azul}) + (\lambda_{verde} - \lambda_{azul}) / (\lambda_{rojo} - \lambda_{azul}) * (Rrs(\lambda_{rojo}) - Rrs(\lambda_{azul}))]}{}$$

El cálculo final del CI de clorofila se realiza utilizando dos coeficientes ($a_{0CI} = -0,4287$ y $a_{1CI} = 230,47$) especificados por Hu et al (2019), donde:

$$\mathbf{chlor_a = 10 (a_{0CI} + a_{1CI} * CI)}$$

Luego se calcula la concentración de clorofila siguiendo el algoritmo OCx, que es una relación polinómica de cuarto orden entre una proporción de Rrs y chlor_a, donde:

$$\log_{10}(\mathit{chlor_a}) = a_0 + \sum_{i=1}^4 a_i \left(\log_{10} \left(\frac{Rrs(\lambda_{\text{azul}})}{Rrs(\lambda_{\text{verde}})} \right) \right)^i$$

donde el numerador, Rrs(λ_{azul}), es el mayor de varios valores de Rrs de entrada y los coeficientes, a0-a4, son específicos del sensor (que en este caso es el sensor MODIS, con el algoritmo OC3M, CI, el OCx y Rrs usados de azul y verde son Rrs(443>488)/Rrs547 y a0-a4 son sustituidos por los valores 0,26294; -2,64669; 1,28364; 1,08209; -1.76828 respectivamente).

Para recuperaciones de clorofila inferiores a 0,25 mg m⁻³, se utiliza el algoritmo CI. Para recuperaciones de clorofila superiores a 0,35 mg m⁻³, se utiliza el algoritmo OCx. Entre estos valores, el algoritmo CI y OCx se combinan utilizando un enfoque ponderado donde:

$$\mathit{chlor_a} = \frac{\mathit{chlor_aCI}(t_2 - \mathit{chlor_aCI})}{t_2 - t_1} + \frac{\mathit{chlor_aOCx}(\mathit{chlor_aCI} - t_1)}{t_2 - t_1}$$

con t1 = 0,25 y t2 = 0,35 (bordes de la región de fusión actual). Para el algoritmo CI, la banda más cercana a 443, 555 y 670 nm se utiliza para las bandas azul, verde y roja, respectivamente, para todos los sensores. (NASA OCEAN COLOR, 2019).

Para la obtención de los datos del área de estudio se hizo uso del software SeaDAS 7.2, mediante el trazado de un polígono con una longitud de (116°W-107°W) y una latitud de (19°N-26°N). SeaDAS es un software que permite llevar a cabo el procesamiento, visualización, análisis y control de la calidad de los datos respecto al color del océano. Debido a que principalmente se enfoca en el análisis respecto al color del océano, se puede aplicar el uso de este software para diversos análisis de datos basados en satélites. SeaDAS actualmente apoya el procesamiento

científico de más de 15 misiones satelitales estadounidenses e internacionales. Se utilizan datos auxiliares coincidentes adicionales para corregir y calibrar los componentes atmosféricos de la señal a fin de determinar una señal de nivel de la superficie terrestre/oceánica. Se pueden desarrollar y aplicar algoritmos personalizados dentro de SeaDAS para evaluar datos oceánicos, terrestres y atmosféricos, así como para producir imágenes de color verdadero (Coria-Monter, et al., 2019).

Los datos de color del océano se pueden utilizar para evaluar las concentraciones de clorofila-*a* y con ello determinar las ubicaciones de las floraciones algales o de biomasa fitoplanctónica. Otras aplicaciones son el seguimiento de derrames de contaminantes, la temperatura del agua y la turbidez. SeaDAS se basa en la caja de herramientas BEAM y se encuentra bajo la licencia de software libre (NASA, 2022; United Nations).

Los elementos centrales del procesamiento científico de SeaDAS (tanto la línea de comandos como la interfaz gráfica de usuario) están contenidos en SeaDAS ToolBox. Los lectores de archivos de datos de la misión satelital de la NASA y los procesadores ESA para las misiones Sentinel-3 se encuentran dentro de Sentinel-3 Toolbox. SeaDAS 8 es una modificación significativa sobre SeaDAS 7.5.3 con respecto a los componentes centrales y el marco interno de la GUI (NASA, 2022; United Nations).

Para la realización de las imágenes analizadas en este proyecto, se hizo uso de la plataforma de programación MATLAB, en la cual se realizaron ajustes en el script de `m_map`, cómo en longitud (-114°W-106°W) y en latitud (22°N-26°N). Estos intervalos fueron seleccionados con base a la visibilidad del área de estudio y la relación entre los mismos (Océano Pacífico y Golfo de California) con el fin de obtener proyecciones Mercator de Chl-*a* y TSM en un periodo entre 2015 y 2018.

Matrix Laboratory (MATLAB) es una plataforma de programación que permite que ingenieros y científicos lleven a cabo el análisis, exploración y visualización de datos, desarrollo de algoritmos, creación de modelos y aplicaciones, modelado,

simulación y creación de prototipos entre otros. MATLAB, utiliza un lenguaje basado en matrices que permite la expresión más natural de las matemáticas computacionales (MathWorks, 2023).

MATLAB incluye facilidades para administrar las variables en su espacio de trabajo e importar y exportar datos. También, incluye herramientas para desarrollar, administrar, depurar y perfilar archivos. Una de las ventajas en este caso es que MATLAB cuenta con una vasta colección de algoritmos computacionales, que van desde funciones elementales como suma, seno, coseno y aritmética compleja, hasta funciones más sofisticadas como matriz inversa, valores propios de matriz, funciones de Bessel y transformadas rápidas de Fourier.

A su vez, MATLAB cuenta con diferentes herramientas, “toolbox”. Estos son paquetes de funciones y/o clases que brindan herramientas, generalmente para un tema específico (como análisis de señales o procesamiento de imágenes). Para llevar a cabo la creación de las imágenes satelitales utilizadas en este estudio las cuales permitieron realizar la comparación en el periodo de tiempo analizado, se utilizó la toolbox `m_map`. La toolbox `m_map` es un conjunto de herramientas de mapeo escritas para MATLAB que incluye:

- Rutinas para proyectar datos en 20 proyecciones diferentes (y determinar mapeos inversos), utilizando modelos terrestres esféricos y elipsoidales.
- Una rutina de generación de mallas para hacer buenos ejes con límites, ya sea en términos de latitud/longitud o en términos planos de X/Y. Una base de datos de línea costera (con resolución de 1/4 de grado).
- Una base de datos de elevación global (resolución de 1 grado).
- Conexión a bases de datos batimétricas y costeras de alta resolución disponibles gratuitamente.
- Proyección Mercator, latitud, longitud, etc.

Las imágenes realizadas tal como se describe en los elementos incluidos en la toolbox `m_map` tienen una proyección Mercator (University of British Columbia, 2021) La proyección Mercator es una proyección cartográfica cilíndrica presentada

por el geógrafo y cartógrafo flamenco Gerardus Mercator en 1569. Esta proyección cartográfica es práctica para aplicaciones náuticas debido a su capacidad para representar líneas de rumbo constante, conocidas como líneas loxodrómicas, como segmentos rectos que conservan los ángulos con los meridianos. (Fletcher, S, 2023).

Con el objetivo de analizar de manera cuantitativa y generar series de tiempo de la TSM y de Chl-a, se eligieron dos polígonos, uno ubicado en la porción sur del Golfo de California y otro en el Océano Pacífico. Siguiendo los protocolos descritos en Coria-Monter et al. (2019) se extrajeron datos/píxeles de ambas variables con ayuda del software SeaDas 7.2 que fueron útiles para generar series de tiempo, aplicando las funciones “plotyy” y loess de MATLAB. (MathWorks, 2023)

La función “plotyy” ($X1, Y1, X2, Y2$) permite trazar $Y1$ contra $X1$ etiquetando el eje y a la izquierda y $Y2$ contra $X2$ etiquetando el eje y a la derecha. La función plotyy utiliza una función de trazado específica para generar la gráfica, esto es: utiliza la función de trazado $f1$ para trazar $Y1$ contra $X1$ y la función de trazado $f2$ para trazar $Y2$ contra $X2$. Permitiendo así, trazar dos conjuntos de datos en un gráfico usando dos ejes y.

El método loess fue introducido por primera vez por William Cleveland entre 1979 y 1996. El método es uno de varios métodos incluidos en las funciones de Matlab. El método se puede usar para la estimación n-dimensional. El método loess estima la función $Y(x)$ usando un ajuste de mínimos cuadrados móviles. El ajuste móvil se aplica en ubicaciones x especificadas y se representa mediante una función de ajuste polinomial de segundo orden y una función de ponderación tricúbica, ambas centradas en la ubicación x para cada estimación. Como tal, el método loess puede verse como una aproximación de la serie de Taylor en movimiento. Un buen aspecto del método loess es que, dado que se basa en el método de los mínimos cuadrados, todo el conocimiento de ese método es directamente aplicable para comprender e interpretar las estimaciones. Por lo general, el método loess solo proporciona estimaciones en las ubicaciones x_i para las observaciones. La función aquí permite estimaciones en cualquier ubicación específica, x_q , dentro del rango de las

observaciones. La salida incluye estimaciones de Y_q y dY_q/dx en las ubicaciones x_q especificadas. Además, el código también tiene en cuenta las lagunas en las observaciones en las que Y_q y dY_q/dx no se pueden estimar directamente (Brandon, 2023).

En síntesis, la función “loess” genera un ajuste de regresión no paramétrico ponderado localmente mediante un polinomio de segundo orden a datos unidimensionales, sin la caja de herramientas de ajuste de curvas de MATLAB (Pantano, 2023).

Una vez obtenidas las imágenes, con el fin de unir las en una sola página para llevar a cabo una comparación más eficiente, se utilizó el programa CorelDraw. CorelDraw es una familia de programas de software utilizados para editar gráficos vectoriales, ilustración y diseño. Fue desarrollado por Michael Bouillon y Pat Beirn en 1985, escrito en C++ y C#. Los gráficos vectoriales se crean en paquetes de gráficos y consisten en objetos. Cada objeto se puede editar por separado, lo que significa que la forma, el color, el tamaño y la posición se pueden cambiar sin perder calidad. Corel permite a los usuarios hacer cosas como agregar efectos como bordes a las imágenes, además de permitir el ajuste de contraste, el equilibrio de color y más (Vinod, 2023).

VII. Resultados

En esta sección se describen y se discuten los resultados obtenidos. En cada imagen al margen superior se observan en datos numéricos los días julianos correspondientes a la fecha analizada de cada imagen y SST hace referencia a la temperatura superficial del mar (TSM como la hemos tratado a lo largo del estudio) por sus siglas en inglés que abrevian el término de “superficial sea temperature”. Primero se describen los resultados de temperatura, después los resultados de Chl-*a*.

VII.1. Distribución de TSM

Año 2015

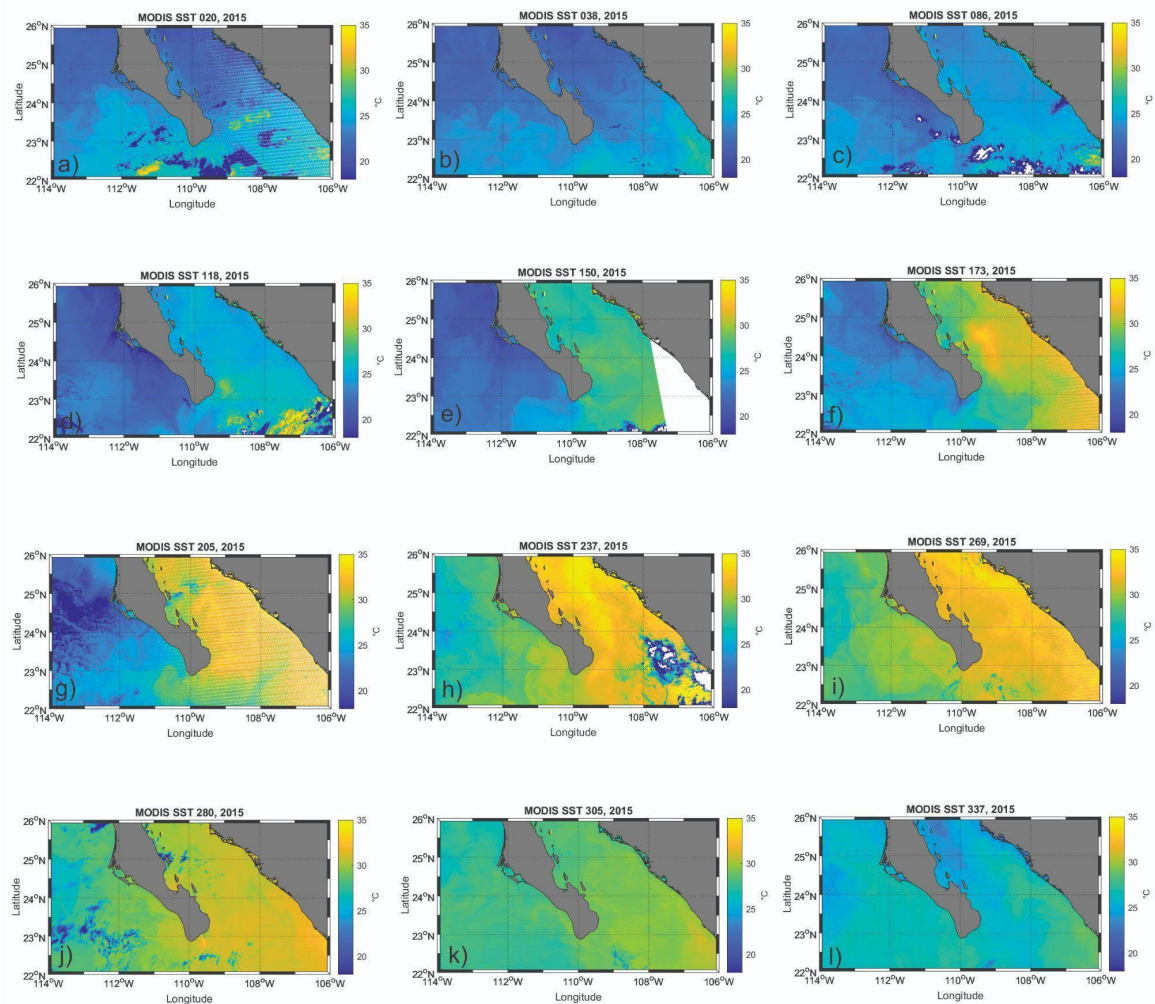


Figura 6. Temperatura superficial del mar (°C) en el área de estudio durante el año 2015.

Durante enero de 2015 se observa una distribución de temperatura que oscila entre 20° y 35 °C. Al Norte del Golfo de California los valores de TSM fueron de 24 °C y en el noroeste de la Península de Baja California de 25 °C. Se pueden observar, al sur del Golfo y de la Península, pequeños parches de entre 20 °C y ≈34°C (Figura 6a).

En febrero la temperatura se distribuyó de manera más uniforme a lo largo del área de estudio, con valores que van desde los 25 °C al sur del Océano Pacífico hasta los ≈20 °C al norte del área de estudio. En general el promedio fue de 22.5 °C (Figura 6b).

El mes de marzo presentó más nubosidad. Sin embargo, la temperatura observada durante este mes fue más uniforme dentro del Golfo de California, con valores de 25 °C, mientras que en el Océano Pacífico la temperatura observada fue de aproximadamente 20 °C (Figura 6c).

Durante el mes de abril se puede observar un aumento en la temperatura, esto al sur del Golfo de California. Se observó que en esta zona la temperatura puede encontrarse alrededor de los 33 °C. Por otro lado, a lo largo del Golfo de California se observó una temperatura de alrededor de 25 °C, mientras que a lo largo del Océano Pacífico la temperatura osciló alrededor de 20 °C. Con lo observado, se puede decir que la temperatura para esta fecha puede estar alrededor de los 26 °C (Figura 6d).

El mes de mayo presenta un aumento de temperatura aún mayor que en el mes de abril, esto principalmente dentro del Golfo de California, con temperaturas más elevadas observadas en esta fecha, las cuales se observaron alrededor de 30 °C,

mientras que el Océano Pacífico se mantienen temperaturas similares a los meses anteriores, que son de 25 °C al sur y 20 °C en el resto del área. Con lo observado se podría decir que la temperatura promedio para la fecha analizada fue de alrededor de 25 °C (Figura 6e).

En el mes de junio se observa el mayor aumento de temperatura hasta ahora analizado para este año. Este, se distribuye principalmente dentro del Golfo de California, con temperaturas que van desde los 30° hasta 35 °C. Por otro lado, al igual que meses anteriores, el Océano Pacífico presenta temperaturas más bajas, las cuales pueden encontrarse alrededor de los 25 °C al sur y 20 °C al norte. Con lo observado, podría decirse que la temperatura promedio para esta fecha es de alrededor de 26 °C (Figura 6f).

Para el mes de julio, la temperatura dentro del Golfo de California se observó de manera uniforme con una tendencia entre los 30-35 °C, mientras que en el Océano Pacífico la temperatura se observó alrededor de los 25 °C y, en pocas áreas, de alrededor de los 20 °C. Con lo observado, se puede decir que esta fecha el valor promedio fue 26 °C (Figura 6g).

Durante el mes de agosto se observó una notable diferencia a comparación de todos los meses antes analizados para este año, pues las temperaturas aumentaron notablemente en toda el área de estudio. Dentro del Golfo de California, se observa una distribución casi uniforme de una temperatura entre los 33-35 °C a excepción de una pequeña zona al sureste con valores entre los 20-25 °C. La mayor diferencia observada a comparación de las figuras de los meses anteriores es el aumento de temperatura en el Océano Pacífico cuyos valores rondan entre los 25-30 °C. Con lo observado, se puede decir que la temperatura promedio fue de 28 °C (Figura 6h).

El mes de septiembre en cuanto a temperatura, tuvo valores muy similares a los observados en agosto, la única diferencia notable es que la temperatura dentro del Golfo de California ahora se distribuyó de manera uniforme en un intervalo entre los

33-35 °C, mientras que en el Océano Pacífico valores entre los 28-33 °C se distribuyeron a lo largo de este. Con lo observado, se puede decir que la temperatura promedio para esta fecha fue de 30 °C (Figura 6i).

Octubre fue un mes casi con las mismas características del mes de septiembre, aunque tal y como se esperaba, la temperatura que se presentó a lo largo del Océano Pacífico comenzó a disminuir en ciertos parches al suroeste. Dichos parches presentaron una temperatura entre los 20-25 °C, mientras que en general se podría decir que todas las demás zonas del Océano Pacífico presentaron una temperatura uniforme entre los 30 °C. Por otro lado, dentro del Golfo de California, la temperatura fue casi uniformemente de alrededor de 33 °C, a excepción también de algunos pequeños parches cuya temperatura fue de entre 20° y 25 °C. Para esta fecha, la temperatura promedio fue de 27 °C (Figura 6j).

El mes de noviembre marcó una gran diferencia, pues aquí los valores de temperatura disminuyeron significativamente pues comenzó a observarse una tendencia por valores más bajos de los observados en los últimos tres meses. Dentro del Golfo de California, que solía ser la parte más cálida del área de estudio, con valores mayores de los 30 °C, pasó a presentar valores por ≤ 30 °C. Por otro lado, a lo largo del Océano Pacífico, los valores rondan alrededor de 28 °C. Con los datos observados, el promedio para esta fecha fue de 28 °C (Figura 6k).

Tal y como lo predecían las figuras analizadas de octubre a noviembre, en el mes de diciembre los valores disminuyen significativamente; dentro del Golfo de California y el Océano Pacífico se observa casi la misma temperatura. De valores de 30 °C que se observaron en noviembre, diciembre presentó en ambas zonas valores alrededor de los 26 °C, con pequeños parches de menor temperatura al

norte del Golfo de California de alrededor de 20 °C. En promedio para esta fecha, se estima que la temperatura podría encontrarse alrededor de los 23 °C (Figura 6I).

Año 2016

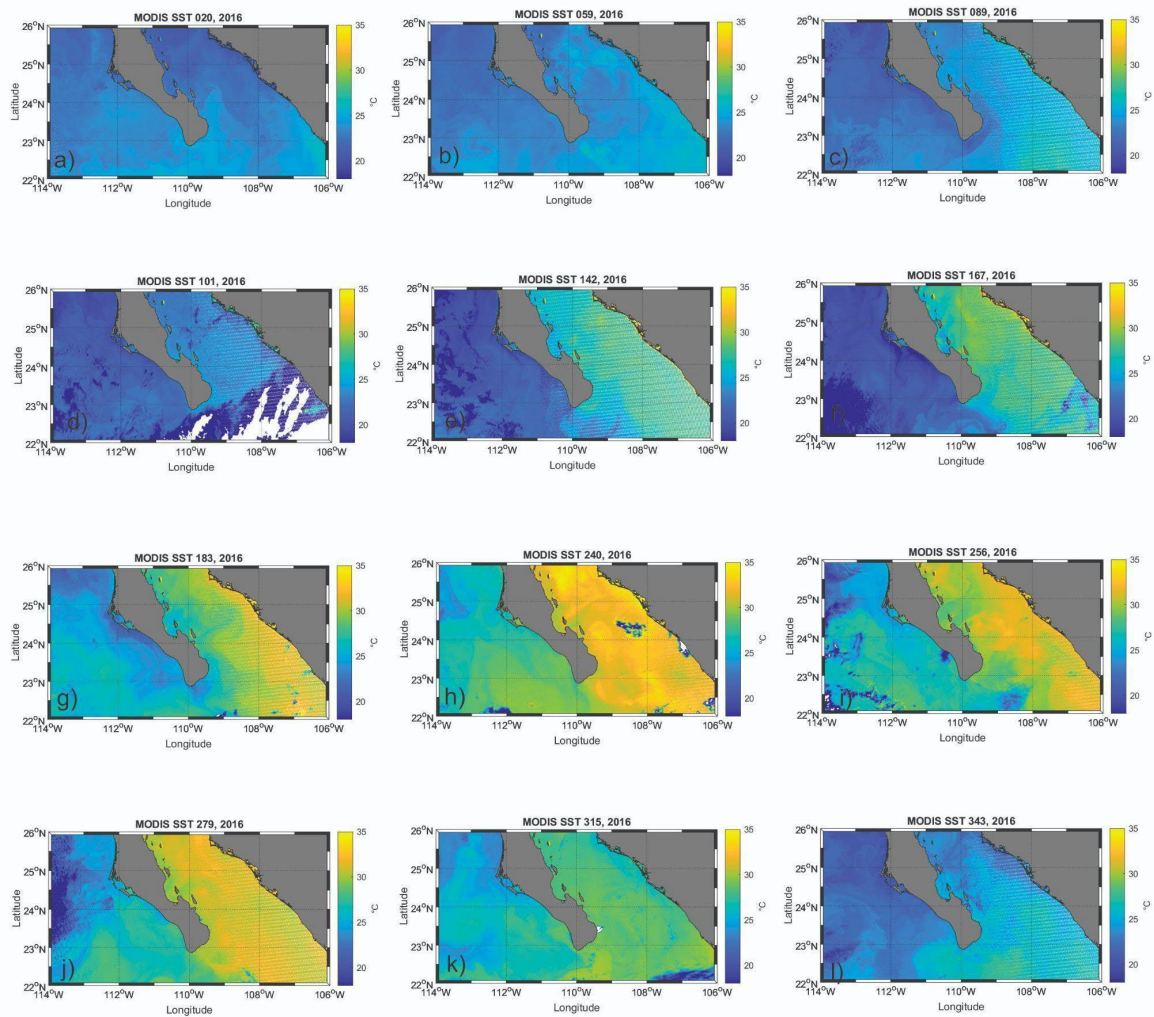


Figura 7. Temperatura superficial del mar (°C) en el área de estudio durante el año 2016.

Durante enero, la temperatura se encuentra distribuida casi de manera uniforme tanto dentro del Golfo de California como a lo largo del Océano Pacífico. Al norte de ambas zonas, se observa una tendencia alrededor de los 20 °C, mientras que al sur de ambas zonas se ve una tendencia hacia los 25 °C. En esta fecha, el promedio de temperatura fue de 22 °C (Figura 7a).

El mes de febrero, a diferencia del mes de enero, muestra una influencia por los movimientos oceánicos al centro y norte del Golfo de California y al sur del Océano

Pacífico, los cuales son indicativos de la presencia de un vórtice. En este mes, se comienza a observar un aumento de temperatura dentro del Golfo de California con un valor casi uniforme dentro del área de alrededor de 25 °C, con pequeños parches de alrededor de 20 °C. Mientras que el Océano Pacífico muestra una inclinación más bien por una temperatura alrededor de los 20 °C. Esta fecha presenta un valor de temperatura promedio de 21 °C (Figura 7b).

Durante el mes de marzo y tomando en cuenta las figuras antes analizadas para este año, se observa una uniformidad en la tendencia por el aumento de temperatura que se había estado previendo dentro del Golfo de California. Esta vez, con excepción de una zona al oeste del Golfo de California, cerca de la Península de Baja California, se observa un pequeño parche con una temperatura alrededor de los 20 °C, mientras que a lo largo del Golfo se observa una temperatura de alrededor de 25 °C. Por otro lado, el Océano Pacífico toma tendencias a una temperatura un poco más baja que el golfo, se estima que la temperatura en esta zona es de alrededor de 20 °C. En esta fecha la temperatura promedio fue de 21 °C (Figura 7c).

Durante el mes de abril, se observó una mayor nubosidad al sur del Golfo de California, así como una menor temperatura en dicha zona. Se estima que la temperatura en esa zona fue de alrededor de 20 °C, mientras que, en la región adyacente al Golfo de California, la temperatura fue de alrededor 25 °C. Por otro lado, en el Océano Pacífico la temperatura se distribuye uniformemente, con 23 °C. La temperatura promedio de esta fecha, con base a lo observado, fue de 22 °C (Figura 7d).

Durante el mes de mayo se observa una marcada diferencia entre la temperatura que se observó a lo largo del Golfo de California y a lo largo del Océano Pacífico. Mientras que el Océano Pacífico presentó una temperatura casi uniforme de alrededor de 20 °C, el Golfo de California presentó valores entre los 28 °C y 30 °C,

en zonas más cercanas a la costa de Sinaloa y en parches al centro del golfo. El promedio de temperatura para esta fecha fue de 24 °C (Figura 7e).

El mes de junio de este mismo año, presentó una gran similitud con los valores correspondientes al mes de mayo. Sin embargo, se observa una mayor claridad en cuanto a la tendencia de temperatura en el área de estudio. Mientras que el Océano Pacífico se mantiene la temperatura alrededor de los 20 °C, a lo largo del Golfo de California la temperatura toma valores más cercanos a un intervalo entre 28° y 30 °C, con valores más altos al norte del Golfo, cerca de la costa. El promedio estimado para esta fecha fue de 24 °C (Figura 7f).

Durante el mes de julio, dentro del Golfo de California, tal y como se ha observado en meses anteriores, la temperatura fue más elevada que a lo largo del Océano Pacífico. Dentro del Golfo de California, para esta fecha se distribuyó un intervalo de temperatura que tomó valores entre los 28° y 30 °C, mientras que a lo largo del Océano Pacífico las temperaturas fueron menores, con un intervalo entre los 25-28 °C. Para esta fecha y con base a los datos observados, se estima que el promedio fue de 28 °C (Figura 7g).

El mes de agosto mostró un aumento en la tendencia de altas temperaturas que ya habían sido observadas dentro del Golfo de California. Se estima que, para este mes, los valores se encuentran en un intervalo entre los 32° y 35 °C. Por otro lado, en el Océano Pacífico la temperatura tomó un intervalo menor que el del Golfo de California, se estima que este puede encontrarse entre los 28° y 30 °C. Para esta fecha y con base a los datos observados, se estima que el promedio en cuanto a temperatura fue de 31 °C (Figura 7h).

El mes de septiembre fue muy similar al mes de agosto, pues el mayor intervalo de temperatura (28-33 °C) se ubicó en el Golfo de California, mientras que a lo largo del Océano Pacífico se observó el menor intervalo de temperatura (25-28 °C). En esta fecha se observaron algunos parches con temperatura de alrededor de los 20

°C distribuidos al sur del Golfo de California y en diversas zonas del Océano Pacífico. Con base a lo observado, se estima que el promedio en temperatura para esta fecha fue de 28 °C (Figura 7i).

El mes de octubre mantuvo el comportamiento uniforme presentado en meses anteriores, es decir, dentro del Golfo de California se observaron las temperaturas más elevadas en un intervalo aproximado entre los 30-34 °C, mientras que en el Océano Pacífico se observaron los valores más bajos, en un intervalo entre los 25-28 °C. En esta fecha, a su vez, se observa un patrón de entre los 20 °C al oeste del Océano Pacífico. Para esta fecha, se estima que el promedio fue de 26 °C (Fig 7j).

El mes de noviembre marcó la transición hacia una disminución en los intervalos generales del área de estudio. Mientras que en meses anteriores el Golfo de California había presentado valores alrededor de los 30 °C, en este mes la inclinación se tornó a un intervalo entre los 26-28 °C. Por otro lado, el Océano Pacífico se mantuvo prácticamente estable, con valores alrededor de los 25-28 °C. Durante este mes la menor temperatura se observó ubicada en un parche al sur del Golfo de California, se estima que el valor ahí puede ser de aproximadamente 20 °C. Con base en lo observado, se puede decir que el promedio para la fecha es de alrededor de 24 °C (Figura 7k).

El mes de diciembre marcó la recta final en cuanto a la tendencia antes observada en la disminución de temperatura. Valores de alrededor de 20 °C, se distribuyeron casi de manera uniforme a lo largo del Océano Pacífico y al norte del Golfo de California y valores de entre los 25 °C se distribuyeron al centro del Golfo de California. A su vez, se observan pequeños parches de alrededor de los 30 °C al sur del Golfo de California. Para esta fecha, se estima que el promedio fue de 22 °C (Figura 7l).

Año 2017

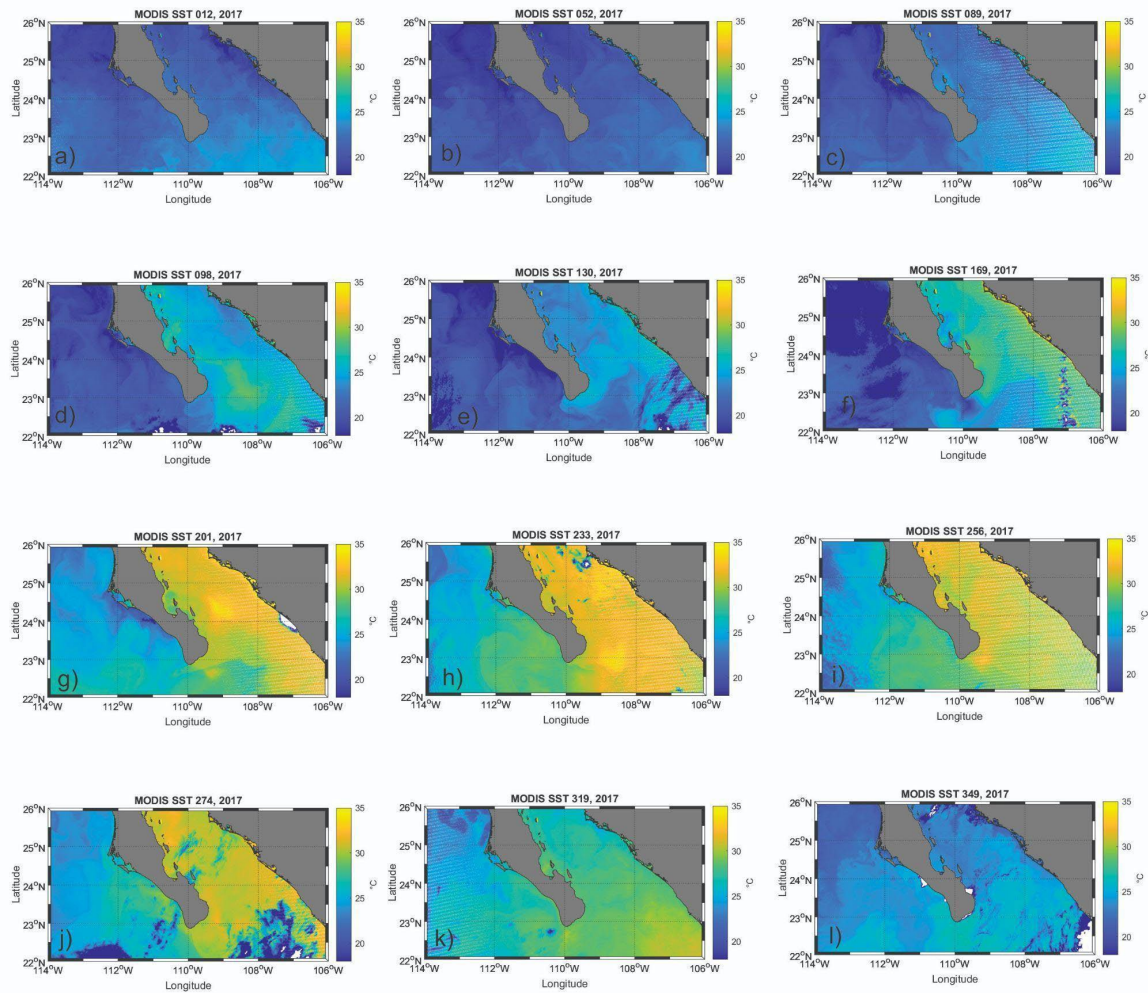


Figura 8. Temperatura superficial del mar (°C) en el área de estudio durante el año 2017.

Durante el mes de enero, la temperatura se observó alrededor de los 20 °C a lo largo, tanto del Océano Pacífico cómo al norte del Golfo de California. La diferencia notable se observa al sur del Golfo de California, en el que se observan valores de alrededor de 25 °C. Con base a lo observado, se estima que el promedio para esta fecha puede estar alrededor de 22 °C (Figura 8a).

Durante el mes de febrero, se ve distribuida una temperatura casi uniforme a lo largo de toda el área de estudio. Con un valor de entre los 20-22 °C. Con excepción de

una pequeña zona frente a la costa de entre Sinaloa y Sonora, en la que se observa una temperatura aproximada de 25 °C. Para esta fecha, se estima que el promedio en cuanto a temperatura fue de 24 °C (Figura 8b).

En marzo ya comienza a observarse una tendencia que ya ha sido documentada en los años anteriormente analizados y es que, dentro del Golfo de California, la temperatura comienza a ser más elevada que a lo largo del Océano Pacífico. El Océano Pacífico presenta temperaturas aparentes de alrededor de 20 °C, mientras que en el Golfo de California se observan distribuidas temperaturas de alrededor de 25 °C. Durante esta fecha se observa poca influencia de movimientos oceánicos y con base a lo observado, se estima que la temperatura promedio para este mes fue de 22 °C (Figura 8c).

Durante el mes de abril, la temperatura observada dentro del golfo comienza a mostrar pequeños parches, con una temperatura aproximadamente de 30 °C. Sin embargo, en general se puede decir que la temperatura distribuida a lo largo del Golfo de California se encuentra alrededor de 27 °C. Por otro lado, el Océano Pacífico se mantiene con una temperatura constante de alrededor de 20 °C. Con lo observado, se estima que la temperatura promedio para esta fecha fue de 25 °C (Figura 8d).

Durante el mes de mayo se detectó una influencia marcada por ligeros movimientos oceánicos, lo que contribuyó a que dentro del Golfo de California la temperatura no tuviera un comportamiento uniforme, sino que se ve distribuida a lo largo de este una mezcla heterogénea de valores entre los 20-25 °C, observándose una tendencia marcada por una distribución de los 20 °C al sur de la misma zona. Por otro lado, el Océano Pacífico se mantiene estable, con una temperatura alrededor de los 20 °C. Con lo observado se estima que la temperatura promedio en el área de estudio para esta fecha fue de 21 °C (Figura 8e).

Durante el mes de junio se observó una menor influencia de los movimientos oceánicos sobre la temperatura superficial del mar, lo que conllevó a que los valores observados en el Golfo fueran más uniformes y elevados. A lo largo del Golfo de California, durante esta fecha, se observaron valores entre los 25-28 °C distribuidos a lo largo del Golfo de entre los 33 °C cerca de las costas de Sinaloa y Sonora. Por otro lado, a lo largo del Océano Pacífico se observa una tendencia por valores entre los 20 °C desde el norte, y al acercarse al sur, cambia la tendencia a valores más cercanos a 25 °C. Con base a los datos observados, se estima que el promedio en cuanto a temperatura para esta fecha fue de 25 °C (Figura 8f).

A partir del mes de julio en este año se observó una marcada diferencia a comparación de los meses anteriormente analizados. Dentro del Golfo de California la temperatura se distribuyó casi de manera uniforme entre los 30-33 °C, mientras que se observa una concentración de alrededor de los 35 °C al centro. Por otro lado, el Océano Pacífico también presentó un cambio en la temperatura observada, con una tendencia hacia valores entre los 25 °C y 20 °C en las zonas cercanas a la costa oeste de la Península de Baja California. La única zona en el que las aguas del Golfo convergen con las del Océano Pacífico en nuestra área de estudio es al sur de la Península de Baja California, mismo punto en el que hay una mezcla de temperaturas tanto entre los 30 °C, lo más cerca de la Península y de entre los 25-28 °C al norte de esta misma zona. Con base a lo observado, el promedio de temperatura para esta fecha fue de 28 °C (Figura 8g).

Durante el mes de agosto la elevación de temperatura es significativamente notable a lo largo del Océano Pacífico. Esto debido a que, hasta esta fecha, los valores se habían mantenido considerablemente bajos a comparación con los observados dentro del Golfo de California. Durante este mes, a lo largo del Océano Pacífico, se aprecian temperaturas de entre 26° y 28 °C, mientras que dentro del Golfo de California se observan las temperaturas más elevadas, con un valor de alrededor de los 33 °C con pequeñas zonas con tendencia a los 35 °C al centro. También, se observa en la zona norte del Golfo de California un pequeño parche que puede tener

un valor alrededor de los 20 °C. Sin embargo, se estima que este valor está influenciado por la nubosidad de la fecha. Con base a lo antes observado, se estima que la temperatura promedio para esta fecha fue de 29 °C (Figura 8h).

Considerando la posible nubosidad presentada durante el mes de septiembre, se observa una disminución en la temperatura superficial del Golfo de California a comparación con la antes observada durante el mes de agosto. Se estima que, a lo largo de dicha zona, la temperatura se encuentra en valores de entre los 30° y 33 °C. Por otro lado, el Océano Pacífico se mantiene estable, con valores aproximados entre los 25° y 28 °C. No se observa influencia alguna por movimientos oceánicos. Con base a lo antes observado, se estima que el promedio en cuanto a temperatura superficial del mar fue de 29 °C (Figura 8i).

El mes de octubre presentó valores que sugieren un descenso de la temperatura superficial, principalmente dentro del Golfo de California. A pesar de que principalmente dicha zona se encontró dominada por valores alrededor de los 30 °C, al sur de esta zona se observó una pequeña mancha de valores alrededor de los 20 °C. Por otro lado, el Océano Pacífico permaneció en un intervalo entre los 25° y 28 °C, con una pequeña influencia de valores alrededor de los 30 °C los cuales se asume que corresponden a lo que se encontraba dentro del Golfo de California, pero se vio influenciado por el viento. A su vez, al sur del Océano Pacífico se observó una acumulación de valores alrededor de los 20 °C. Con base a lo observado, se estima que el promedio en cuanto a temperatura superficial para esta fecha fue de 25 °C (Figura 8j).

El mes de noviembre presentó un valor casi uniforme a lo largo de toda el área de estudio. Los valores observados tanto a lo largo del Golfo de California como del Océano Pacífico, se encontraron alrededor de los 28-30°C, con una pequeña convergencia de valores más cercanos a los 30 °C al sureste del Golfo de California

y con valores más bajos (≈ 20 °C) al norte del Océano Pacífico. Con base a lo observado, se estima que la temperatura superficial promedio para esta fecha fue de 27 °C (Figura 8k).

Durante diciembre, se observó una disminución en la temperatura superficial general observada en el área de estudio. Los valores más bajos para esta fecha se vieron distribuidos a lo largo del norte del Océano Pacífico y del Golfo de California. Sin embargo, en el caso del Golfo de California, esta también se observó al sureste de esta zona. Se estima que los valores en estas zonas podrían encontrarse alrededor de los 20 °C, mientras que a lo largo del Océano Pacífico y dentro del Golfo de California se observó una temperatura de alrededor de los 25 °C. No hubo influencia aparente de movimientos oceánicos. Con base a lo observado, se estima que la temperatura superficial promedio para esta fecha fue de 22 °C (Figura 8l).

Año 2018

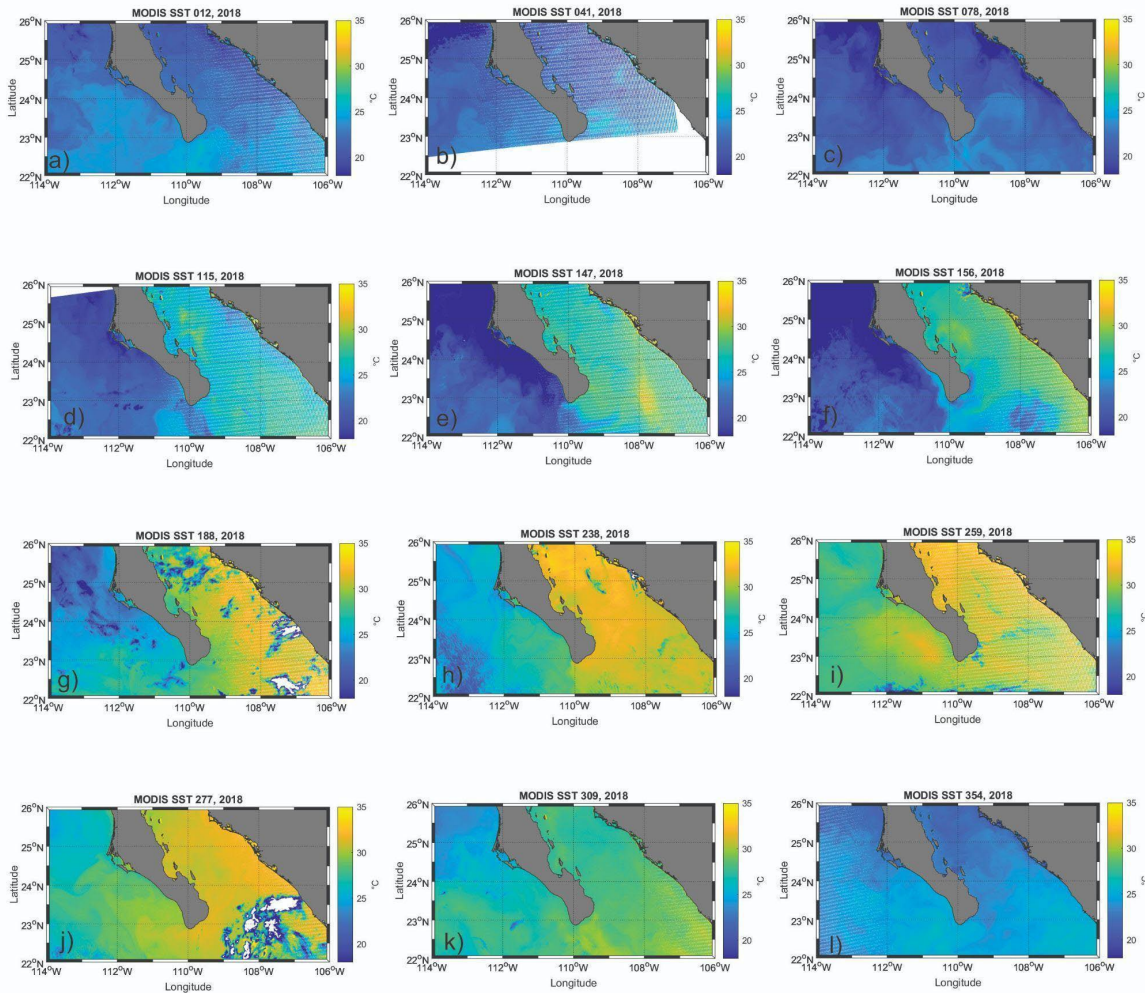


Figura 9. Temperatura superficial del mar (°C) en el área de estudio durante el año 2018.

Durante el mes de enero la temperatura a lo largo de toda el área de estudio se observaron valores de entre los 20-25 °C. Al norte, tanto del Océano Pacífico como del Golfo de California, la temperatura osciló desde 20 °C y al sur de ambas zonas, la temperatura aumentó hasta 25 °C. Se estima que, con base a lo observado, la temperatura superficial promedio fue de 22 °C (Figura 9a).

Durante el mes de febrero la nubosidad fue muy elevada, por lo que ambas variables fueron cuantificadas parcialmente. Sin embargo, se puede observar que dentro del Golfo de California la temperatura se encuentra alrededor de los 20 °C y 25 °C, al igual que a lo largo del Océano Pacífico. Con base a los datos observados, se estima que la temperatura promedio para esta fecha fue de 22 °C (Figura 9b).

En marzo a comparación del mes de febrero, la nubosidad disminuye, permitiéndonos observar la conexión entre el Océano Pacífico y el Golfo de California. A su vez, en esta fecha se observa la influencia de movimientos oceánicos como vórtices. A lo largo del Océano Pacífico se observó una distribución de temperatura casi uniforme, la cual se encuentra alrededor de los 20 °C, casi igual que a lo largo del Golfo de California. Sin embargo, al sur del Golfo de California, al sur de la Península de Baja California, hay una convergencia de las aguas de ambas zonas, la cual está dada por los movimientos oceánicos. En dicha zona, se observa un aumento de la temperatura superficial, la cual alcanza aproximadamente los 25 °C. Con base en lo anterior, se estima que la temperatura superficial promedio para esta fecha fue de 22 °C (Figura 9c).

Durante el mes de abril se observa un incremento en cuanto a las temperaturas ya antes observadas, esto principalmente dentro del Golfo de California. La temperatura dentro de dicha zona alcanza entre los 25° a 30 °C (esto en zonas más cercanas a las costas de Sonora, Sinaloa y cerca de la Península de Baja California). Por otro lado, a lo largo del Océano Pacífico, la temperatura se encuentra estable a comparación de los meses anteriormente observados (≈ 20 °C). Se estima que, con base a lo observado, la temperatura superficial promedio para esta fecha fue de 23 °C (Figura 9d).

Durante el mes de mayo, dentro del Golfo de California la temperatura se elevó alrededor de los 28 °C, con algunas zonas pequeñas que alcanzaron alrededor de los 30 °C. Esto principalmente cerca de las costas aledañas al golfo y a la región centro-sur del mismo. Por otro lado, en el Océano Pacífico, la temperatura se mantuvo alrededor de los 20 °C, cómo se había observado en meses anteriores del mismo año. Durante esta fecha, se observa influencia de los movimientos oceánicos abajo del sur de la Península de Baja California, donde las aguas tanto del Golfo de California como del Océano Pacífico convergen, es por esto que en dicha zona se observa una convergencia tanto de agua con una temperatura alrededor de los 25 °C y también de 20 °C. Con base en lo anterior, se estima que la temperatura superficial promedio para esta fecha fue de 24 °C (Figura 9e).

El mes de junio se mantuvo casi igual al mes de mayo, pues dentro del Golfo de California, se observan temperaturas más elevadas, de alrededor de los 25-30 °C. En esta fecha, se observa una tendencia hacia los 30 °C, principalmente proveniente desde el este de la zona y cerca de la Península de Baja California. Por otro lado, el Océano Pacífico se mantiene estable (20°C), a excepción de la parte oeste de la Península de Baja California, donde se comienzan a observar temperaturas de alrededor de 25 °C. Con base a lo observado, se estima que la temperatura superficial promedio para esta fecha fue de 26 °C (Figura 9f).

Durante el mes de julio, se observó una marcada diferencia dentro del Océano Pacífico a comparación de otros meses, ya que la temperatura pasó de estar constantemente alrededor de los 20 °C a aproximadamente 25 °C, con pequeños parches de alrededor de 20 °C. Por otro lado, a lo largo del Golfo de California, se observa una temperatura que se encuentra entre los 30° y 33 °C, con pequeños parches de entre 20° y 25 °C. Con base a lo observado, se estima que la temperatura superficial promedio para esta fecha fue de 25 °C (Figura 9g).

Durante el mes de agosto, la temperatura general del área de estudio, ya se encontraba por arriba de los 25 °C. Mientras que a lo largo del Océano Pacífico se observa una temperatura de ≈ 28 °C, a lo largo del Golfo de California se distribuyó una temperatura casi uniforme de ≈ 30 °C. Con base en lo anterior, se estima que la temperatura superficial fue de 28 °C (Figura 9h).

Durante el mes de septiembre la temperatura observada a lo largo del Océano Pacífico continuaba en aumento, pues mientras en el mes de agosto se encontraba alrededor de los 28 °C, durante este mes, la tendencia ya se encontraba más hacia los 30 °C. Dentro del Golfo de California, la temperatura observada fue ligeramente más elevada, alrededor de 33 °C, con pequeños parches de alrededor de 25 °C, posiblemente debido a la nubosidad presente durante el mes. Con base a lo observado, se estima que la temperatura superficial promedio para esta fecha fue de 29 °C (Figura 9i).

Durante el mes de octubre, al oeste del Océano Pacífico comenzaba a observarse un decremento en la temperatura superficial, pues mientras en el mes de septiembre se observó una temperatura alrededor de los 30 °C, durante este mes se comenzó a observar una temperatura en esta zona alrededor de los 27 °C, con una diferencia en la zona al sur de alrededor de 30 °C. Por otro lado, en el Golfo de California, la temperatura se distribuyó de manera casi uniforme, con un valor alrededor de los 33 °C, a excepción de una mancha al sur de entre 25° y 20 °C. Con base a lo observado, se estima que la temperatura promedio para esta fecha fue de 27 °C (Figura 9j).

El mes de noviembre hizo más evidente el decremento en la temperatura superficial dentro del área de estudio, pues casi se observó un valor uniforme a lo largo del Golfo de California y el Océano Pacífico (≈ 27 °C). Esto a excepción de una zona al

norte del Océano Pacífico, donde la temperatura fue la más baja observada para esta fecha (≈ 25 °C) y una zona al sur del Golfo de California, que fue donde en este caso se observó la temperatura más elevada (≈ 30 °C). Con base a lo observado, se estima que la temperatura superficial promedio para esta zona fue de 27 °C (Figura 9k).

El mes de diciembre fue muy similar al mes de enero de este año, pues la temperatura disminuyó al grado de ser casi uniforme en toda el área de estudio. La temperatura más baja se observó al norte, tanto del Océano Pacífico, como del Golfo de California, en donde se estima que la temperatura se encontraba alrededor de los 20 °C, mientras que, al centro y sur de ambas zonas, la temperatura alcanzó un valor aproximado de 25 °C. Además, durante esta fecha, se observó la influencia de movimientos oceánicos de tipo vórtice al centro del Golfo de California y al sur de la Península de Baja California. Con base a lo observado, se estima que la temperatura promedio para esta fecha fue de alrededor de 22 °C (Figura 9l).

VII.II. Distribución horizontal de Chl-a.

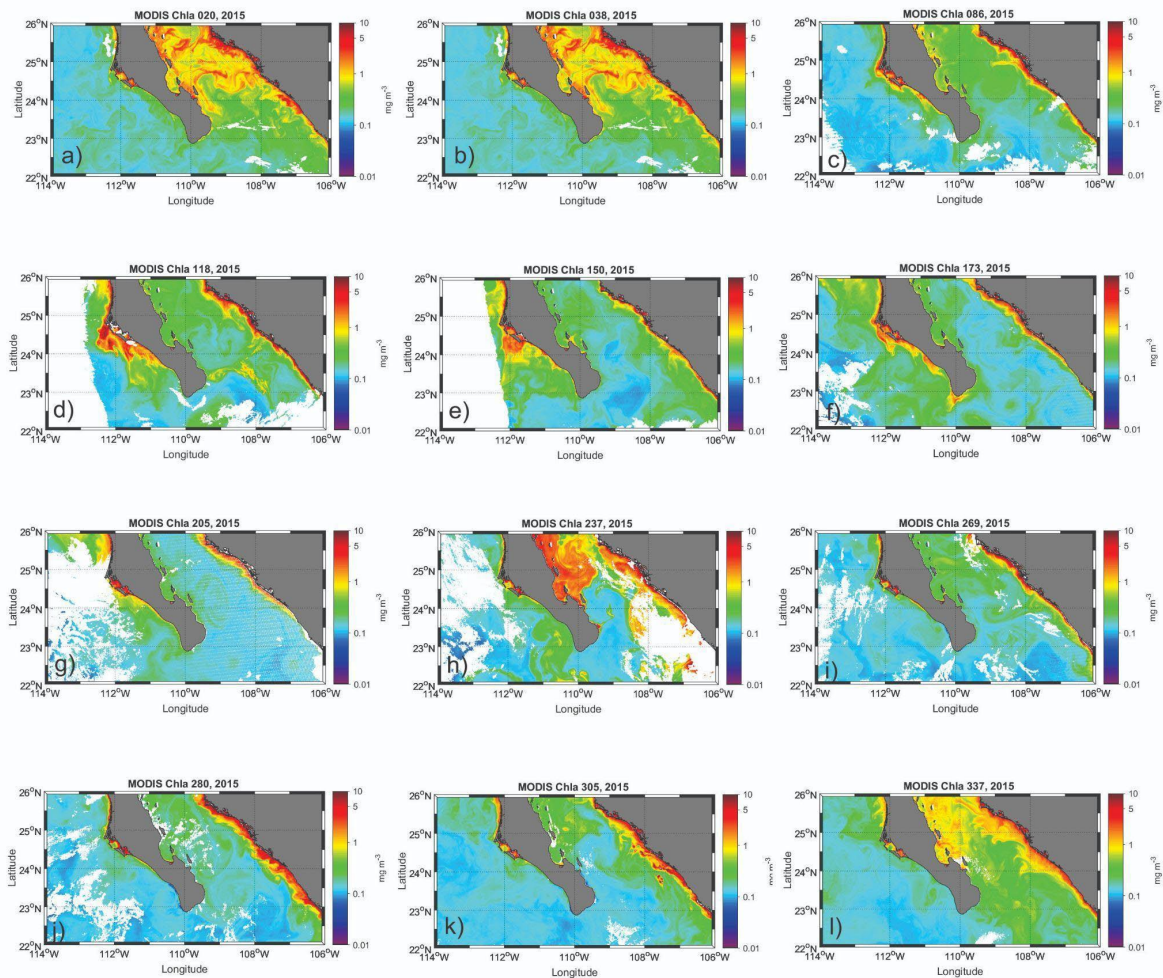


Figura 10. Concentración de Chl-a (mg m^{-3}) en el área de estudio durante el año 2015.

Año 2015

En el mes de enero la mayor concentración de Chl-a se presentó en la parte norte de la costa de Sinaloa y también en el norte del golfo. A su vez se observa la influencia de los movimientos oceánicos, los cuales influyen en la distribución de la concentración de Chl-a en el golfo. Los valores van desde los 0.5 mg m^{-3} en la entrada del golfo, hasta los 5 mg m^{-3} en la parte norte y cerca de las costas. A su vez, dentro del golfo, se observa que la Chl-a sigue el patrón de distribución de movimiento establecido por las masas de agua circundantes (Figura 10a).

En cuanto al mes de febrero, se observa una disminución en los valores. Mientras que, para el mes de enero, los valores de Chl-*a* observado en las costas fue de alrededor de 10 mg m⁻³, ahora el valor máximo en la costa de Sinaloa y de la Península de Baja California fue de entre 3 mg m⁻³ y 4 mg m⁻³. Sin embargo, también se observa una disminución en el Golfo de California con valores entre 0.7 mg m⁻³ y 0.9 mg m⁻³ (Figura 10b).

El mes de marzo muestra una gran concentración en la costa oeste de la Península de Baja California, en el Océano Pacífico. Con valores alrededor de (1.8-10 mg m⁻³) A su vez también se observa una gran concentración de Chl-*a* en las costas de Sinaloa y Nayarit, los cuales tienen una tendencia mayor a los valores alrededor de los 10 mg m⁻³ (Figura 10c).

En abril, se observa una disminución en la concentración de Chl-*a* al Este de la Península de Baja California. De valores que podrían estar alrededor de los 1.8-10 mg m⁻³, ahora se observan valores alrededor de los 1.4 mg m⁻³. Por otro lado, se observa que la concentración de Chl-*a* en la costa también disminuyó, de los 10 mg m⁻³ a aproximadamente ≤ 5 mg m⁻³ (Figura 10d).

El mes de mayo muestra una mayor concentración al oeste de la Península de Baja California y en la costa de Sinaloa, en ambos casos, los valores pueden estar alrededor de los ≤ 5 mg m⁻³ (Figura 10e).

La mayor concentración en el mes de junio, se observa en la costa de Sinaloa y también en la costa de Baja California sur, con valores de 4 mg m⁻³. Mientras que en los valores más bajos se distribuyen con un patrón de movimientos de aguas oceánicas en las zonas más cercanas a la costa de la Península de Baja California y el Golfo de California (Figura 10f).

La mayor concentración de Chl-a para el mes de julio se distribuye principalmente en la zona noreste del Golfo de California. Los valores probablemente fluctúan entre los 4-5 mg m⁻³. En cuanto a los valores más bajos, los cuales probablemente fluctúan entre los 0.8 y 1 mg m⁻³ son los que se ubican en la punta de la Península de Baja California y probablemente cerca de la costa de Sinaloa (Figura 10g).

El mes de agosto, se observó una distribución homogénea en cuanto a la concentración de Chl-a comparada con meses pasados. Es decir, en la costa de Sinaloa y en la zona este de la Península de Baja California sur con valores de alrededor de 7-10 mg m⁻³. Además, también se observa una mayor concentración de Chl-a en la parte media del Golfo de California a comparación del mes de julio. Tomando en este mes valores de aproximadamente 0.8-0.9 mg m⁻³ (Figura 10h).

Durante septiembre, se observa una concentración uniforme en la costa este de la zona de estudio con valores más altos que los observados en meses pasados. Se estima que los valores para este mes pueden rondar de entre los 3 mg m⁻³ a los 10 mg m⁻³, al igual que la observada en el oeste de la Península de Baja California sur. Por otro lado, se observa una disminución de Chl-a distribuida en el Golfo de California. Mientras que en agosto se observaba una mayor concentración, en este mes se observó una disminución. Sin embargo, los valores aparentes se mantienen alrededor de los 0.9 mg m⁻³ (Figura 10i).

En el mes de octubre, la concentración de Chl-a (1-10 mg m⁻³) se distribuye en la costa oeste de la zona de estudio y al oeste de la Península de Baja California Norte. A comparación del mes de septiembre, se observa una mayor concentración de Chl-a en el Golfo de California, el cual tiene un valor persistente de aproximadamente 0.9 mg/m³ (Figura 10j).

En cuanto al mes de noviembre, se observa una convergencia de Chl-a en la zona norte del Golfo de California, así como las costas oeste de la zona de estudio y la

costa oeste de la Península de Baja California. La mayor concentración se ubica en la costa oeste de la zona de estudio y se estima que los valores aproximados ahí rondan entre 1-10 mg m⁻³. A su vez, se observa una mayor concentración en el Golfo de California de la constante observada en otros meses (0.9 mg m⁻³), pero ahora en mayor cantidad (Figura 10k).

En la figura correspondiente al mes de diciembre, se observan valores regulares en el Golfo de California de alrededor de 1 mg m⁻³, con variaciones al norte del Golfo de California y en el Océano Pacífico, los cuales se estima cuyo valor ronda aproximadamente en los 0.5 mg m⁻³. La mayor concentración se observa en la costa oeste de la zona de estudio y el oeste de la Península de Baja California sur con valores alrededor de los 4-6 mg m⁻³ (Figura 10l).

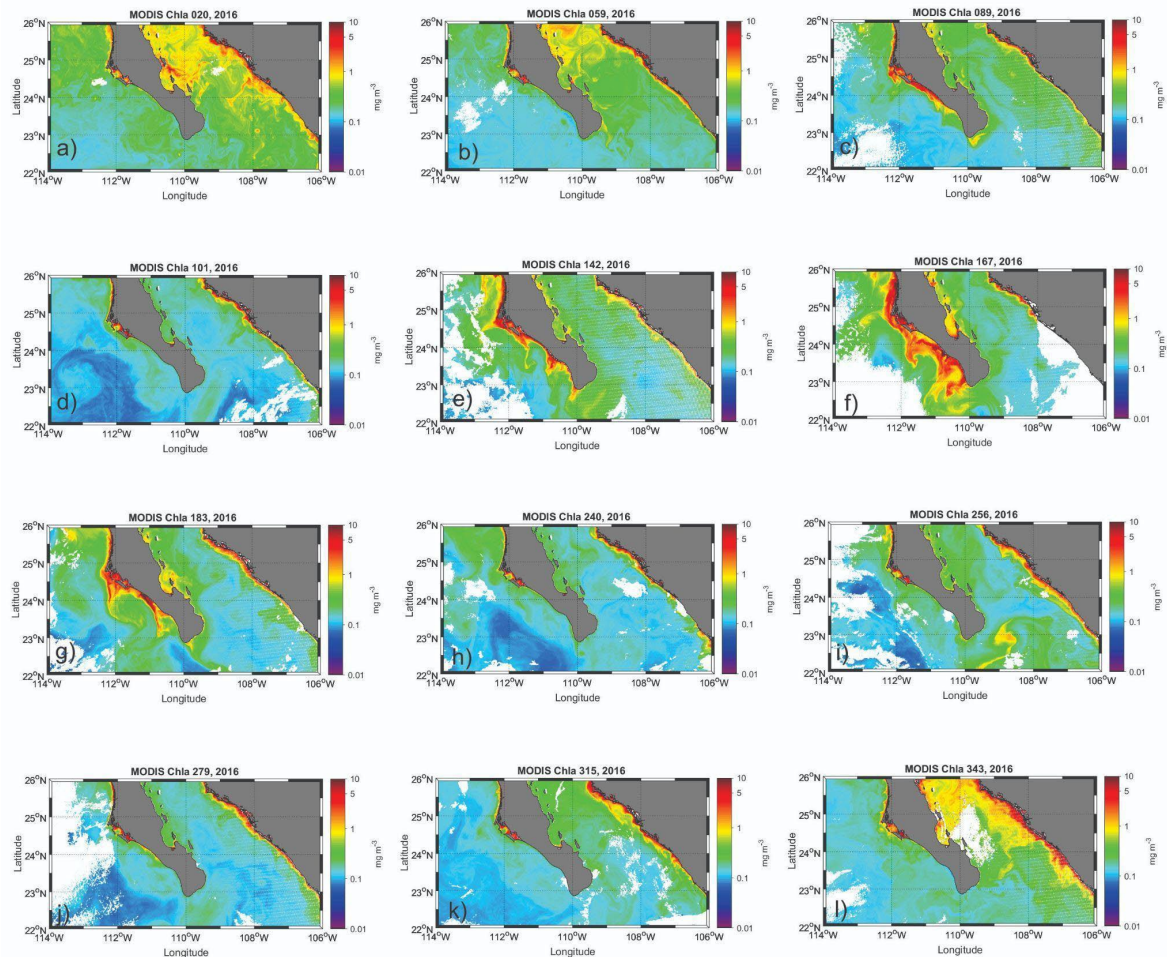


Figura 11. Concentración de Chl-a (mg m^{-3}) en el área de estudio durante el año 2016.

Año 2016

Durante el mes de enero, se puede observar una alta concentración de Chl-a en las costas al este tanto de la Península de Baja California como en la costa de la zona de estudio, del lado de Sinaloa. Se estima que los valores observados pueden estar alrededor de los $1\text{-}4 \text{ mg m}^{-3}$. Mientras que a lo largo del Océano Pacífico y el Golfo de California, también se observa una concentración de Chl-a, que no es tan alta

como la observada en las costas, pero se estima que puede tener valores alrededor de los 0.5-0.9 mg m⁻³ (Figura 11a).

En el mes de febrero, se observa un aumento en la concentración de Chl-*a* en el este de la Península de Baja California y en la parte norte de la costa de la zona de estudio, cerca de Sinaloa. Se observa una mayor concentración en la Península y por lo tanto en el Océano Pacífico. Sin embargo, los valores que se observan en la costa de la República se estima que son muy similares a los de la Península, rondando en un valor aproximado para ambos casos de 4.5 mg m⁻³. Por otro lado, se ve una mayor concentración a lo largo del Golfo de California y en el Pacífico, la cual a pesar de presentar un menor valor (≈ 0.5 mg m⁻³) que el observado en las costas antes mencionadas, ya que abarca áreas mucho más grandes, por lo tanto, posiblemente la biomasa fitoplanctónica presente en ambas áreas durante este periodo, fue mucho mayor a la que presentada en las costas. A diferencia de meses anteriores, se observa una disminución en los valores de Chl-*a*. En esta figura, se estima que los valores máximos sean de entre 1-4 mg m⁻³.

Presentándose en un patrón uniforme a lo largo de este año (hasta ahora) en la costa oeste de la zona de estudio (cerca de Sinaloa) y en la costa oeste de la Península de Baja California. A su vez, se sigue observando un patrón de Chl-*a* con valores de alrededor de 0.5 mg m⁻³ tanto en la entrada al Golfo de California, como en la parte norte y en el Océano Pacífico, cerca de la costa este de la Península de Baja California. En la boca del Golfo de California se encontraron valores aproximados de 4 mg m⁻³, los cuales claramente se observa que siguiendo el patrón de un vórtice (Figura 11b).

En cuanto al mes marzo, se observa que los valores y concentración de Chl-*a* disminuyeron en cuanto al área abarcada. Los valores siguen presentando una tendencia principalmente en las costas oeste tanto de la Península de Baja California norte, cómo en la costa oeste de la zona de estudio, cerca de Sinaloa

teniendo valores aparentes que van desde 1-5 mg m⁻³, en ambas áreas. A su vez, también se observa un aumento en la concentración de Chl-a con valores de ≈0.5 mg m⁻³ en la parte norte del Golfo de California y alrededor de la Península de Baja California (Figura 11c).

A comparación con meses pasados, el mes de abril, se observa una disminución en la concentración de Chl-a en el área de estudio. Sin embargo, en cuanto a los valores observados, se observa una convergencia de biomasa en la costa oeste de la Península de Baja California. Siendo en este caso el mayor punto de concentración. Los valores de Chl-a observados en dicha área son aparentemente similares a los observados en la costa oeste de la zona de estudio, tomando valores aproximados en esta última área entre los 1-1.5 mg m⁻³, mientras que en el Océano Pacífico se estima que los valores aproximados se encuentran entre los 4-5 mg m⁻³. Por otro lado, se observa una concentración de Chl-a con valores de ≈0.5 mg m⁻³ a lo largo del Océano Pacífico y de manera más dispersa, cerca de la costa este de la Península de Baja California, correspondiente al Golfo de California (Figura 11d).

En cuanto al mes de mayo, se puede observar una alta concentración de Chl-a principalmente al oeste de la Península de Baja California, es decir, en el Océano Pacífico. Los valores de Chl-a alrededor de la Península varían entre valores de los 0.5 mg m⁻³ y 10 mg m⁻³ en algunas zonas, mientras que, en el norte de la costa Oeste cerca de Sinaloa, los valores de Chl-a van, en menor cantidad, en un intervalo de los 0.5-4 mg m⁻³ (Figura 11e).

Se observa que la mayor concentración de Chl-a para junio, se ubica en el punto medio del oeste de la Península de Baja California, en el Océano Pacífico tomando valores aproximados de entre los 1-10 mg m⁻³. Seguida de esta área, la costa oeste cerca de Sinaloa toma unos valores entre los 1-4 mg m⁻³. También alrededor de toda la Península de Baja California se observa una gran concentración de Chl-a, abarcando ahora tanto parte del Océano Pacífico como el Golfo de California. Se

estima que los valores observados pueden encontrarse alrededor de los 0.5 mg m^{-3} (Figura 11f).

A comparación con los meses antes analizados el mes de julio se puede observar una disminución en la concentración de la Chl-*a* con un valor entre 0.9 mg m^{-3} a 4 mg m^{-3} . Por otro lado, se observa también una concentración de Chl-*a* elevada al Norte del Océano Pacífico y al Noreste del Golfo de California. Los valores aproximados que pueden tomar estos varían alrededor de los 0.5 mg m^{-3} (Figura 11g).

Durante agosto, los valores más elevados de Chl-*a* se ubican tanto en la costa oeste de la zona de estudio, cómo en el punto medio al oeste de la Península de Baja California. Se estima que los valores aproximados que alcanza la Chl-*a* en dichas áreas varía de entre $0.9\text{-}5 \text{ mg m}^{-3}$. Se estima que el valor aproximado en esta área se encuentra alrededor de los 0.5 mg m^{-3} (Figura 11h).

Durante septiembre, la concentración de Chl-*a* es uniforme a meses anteriores con valores entre los $1\text{-}4 \text{ mg m}^{-3}$ al oeste de la zona de estudio y entre los $1\text{-}5 \text{ mg m}^{-3}$ al oeste de la Península de Baja California. Por otro lado, al Sur del Golfo de California se observa una concentración de Chl-*a* con valor de 1 mg m^{-3} la cual presenta una influencia por la presencia de vórtices. La concentración más baja para este mes se presenta al suroeste de la Península de Baja California con valores alrededor de los 0.08 mg m^{-3} (Figura 11i).

En términos generales se puede decir que, durante octubre, los valores y la distribución de Chl-*a*, disminuyeron con valores de 0.5 mg m^{-3} ; mientras que en la costa cerca de Sonora y Sinaloa se presentó una mayor biomasa fitoplanctónica con valores entre los $1 \text{ a } 4 \text{ mg m}^{-3}$ (Figura 11j).

En el mes de noviembre, la concentración de Chl-*a* se presentó principalmente dentro del Golfo de California. Los valores van de manera ascendente desde la boca

con valores de Chl-*a* de alrededor de 0.5 mg m^{-3} , en la zona central de entre 1 a 4 mg m^{-3} . y en la costa Oeste de la República $\approx 5 \text{ mg m}^{-3}$. También se observa este patrón con los mismos valores y en el mismo orden ascendente en la costa oeste de Baja California Norte, siendo el valor más bajo el más lejano a la costa (Figura 11k).

Durante diciembre la concentración de Chl-*a* fue alta, observándose principalmente ubicada dentro del Golfo de California. Los valores van de manera ascendente desde la boca con valores de Chl-*a* de alrededor de 0.5 mg m^{-3} , en la zona central de entre $1\text{-}4 \text{ mg m}^{-3}$. y en la costa este de la República $\approx 5 \text{ mg m}^{-3}$. También se observa este patrón con los mismos valores y en el mismo orden ascendente en la costa este de Baja California Norte, siendo el valor más bajo el más lejano a la costa (Figura 11l).

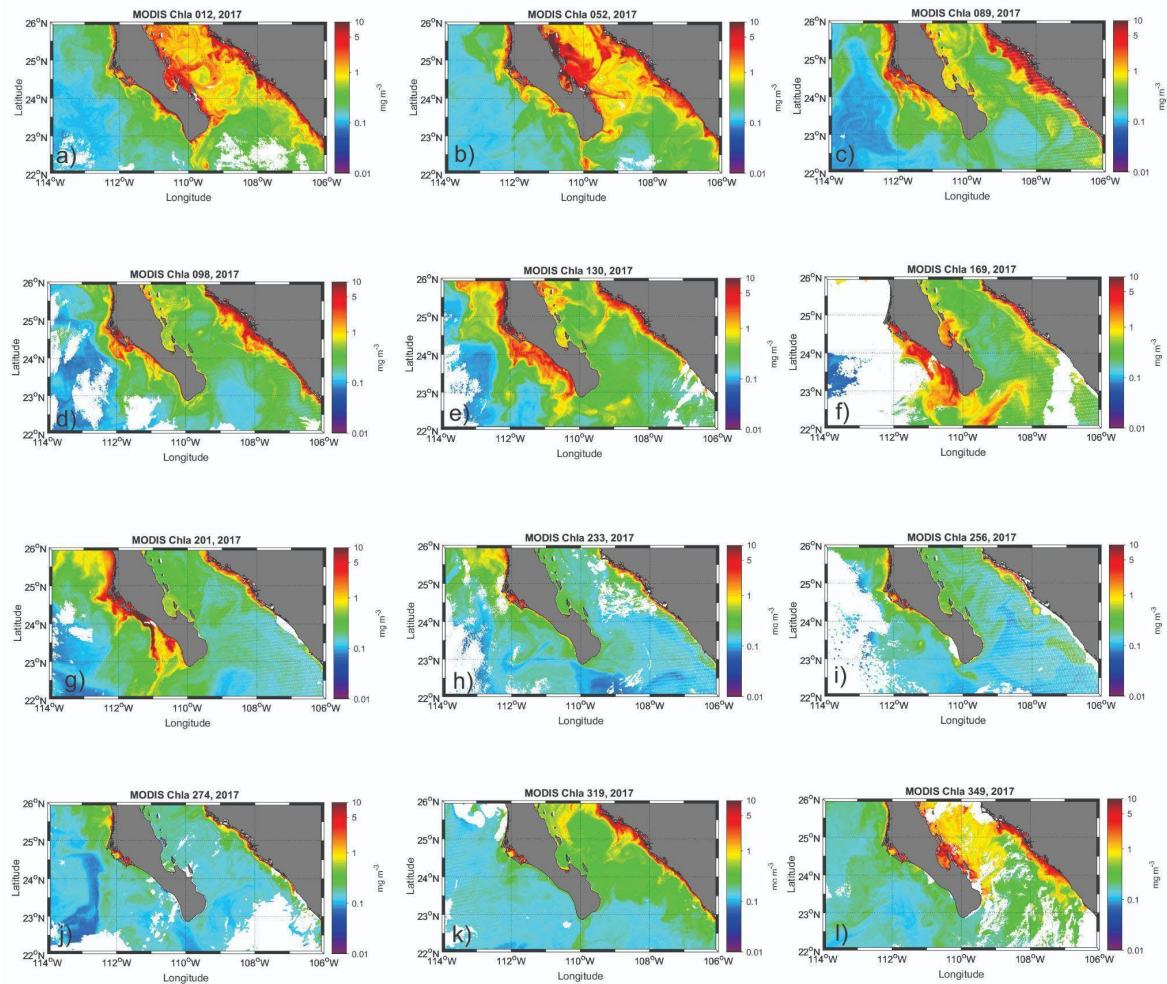


Figura 12. Concentración de Chl-a (mg m^{-3}) en el área de estudio durante el año 2017.

Año 2017

Durante el mes de enero, se observó una elevada concentración de Chl-a dentro del Golfo de California y las costas aledañas. Se estima que los valores aquí van desde los aproximadamente 3 mg m^{-3} en las zonas más lejanas a la costa, hasta entre los $5\text{-}10 \text{ mg m}^{-3}$ en las zonas más cercanas a la costa, además se observa una influencia en estos valores por los movimientos oceánicos posiblemente de tipo vórtice. En la costa este de la Península de Baja California, también se observa un patrón cuyos intervalos se asemejan a los antes mencionados para las áreas cercanas a la costa en el Golfo de California. Por otro lado, los valores más bajos de Chl-a, se distribuyen en una gran porción a lo largo del Océano Pacífico y el sur

del Golfo de California. Se estima que esta concentración toma valores aproximados de 0.5 mg m^{-3} (Figura 12a).

La figura correspondiente a febrero, se asemeja a la correspondiente a enero. La Chl-a se concentra en mayor parte dentro del Golfo de California y las costas que lo rodean, tomando valores más elevados al oeste de entre $5\text{-}10 \text{ mg m}^{-3}$ y más cercanos a los $3\text{-}5 \text{ mg m}^{-3}$ distribuidos en el centro del Golfo de California. A su vez, distribuida de manera uniforme, se aprecian valores $\geq 1 \text{ mg m}^{-3}$ al norte y sur dentro del Golfo de California y tanto en la entrada al Golfo como al oeste de la Península de Baja California, ya en el Océano Pacífico, se aprecian valores que pueden rondar en los 0.5 mg m^{-3} (Figura 12b).

La Chl-a presentó un aumento durante el mes de marzo, principalmente al oeste de las costas tanto de la Península de Baja California, como las de la República Mexicana. Se estima que los valores más altos en estas zonas pueden variar entre los $2\text{-}10 \text{ mg m}^{-3}$. Por otro lado, se observa también un aumento en cuanto a los datos cuyos valores giran en torno a los 0.5 mg m^{-3} , principalmente dispersos en cerca de la Península de Baja California y al norte y centro del Golfo de California (Figura 12c).

Durante el mes de abril, la mayor concentración se presentó en las costas del este del Golfo de California con valores entre los $2\text{-}10 \text{ mg m}^{-3}$. Por otro lado, también se observa una alta concentración al oeste de la Península de Baja California con valores entre los $1\text{-}8 \text{ mg m}^{-3}$. Siendo ligeramente más bajos que los observados en esta misma fecha en el Golfo de California, pero también distribuidos una en menor área. En cuanto a los valores que pueden encontrarse en torno a los 0.5 mg m^{-3} , se observa un patrón casi igual al del mes pasado. En cuanto a estos datos, se observa una mayor concentración al norte y centro del Golfo de California, así como en la punta sur de la Península de Baja California (Figura 12d).

En el mes de mayo, la concentración de Chl-a se ubicó principalmente al oeste de la Península de Baja California, en este caso a pesar de que los valores al este del Golfo de California son similares, el área abarcada en el Océano Pacífico es mayor con valores entre los 1-4 mg m⁻³ en el Golfo de California y entre 1-10 mg m⁻³ en el Océano Pacífico (Figura 12e).

A pesar de la nubosidad observada en el mes de junio, se puede observar una alta concentración de Chl-a en el oeste de la Península de Baja California. Se estima que los valores más elevados durante este mes se localizan en dicha área, con un intervalo aproximado de entre 1-10 mg m⁻³ de las zonas más lejanas a las más cercanas a la Península. Por otro lado, al este del Golfo de California, se observa una concentración que va de entre 1-3 mg m⁻³. Por otro lado, distribuida dentro de todo el Golfo de California y la punta sur de la Península de Baja California se observa una distribución uniforme de aproximadamente 0.5 mg m⁻³ (Figura 12f).

El mes de julio permite observar una amplia distribución de la Chl-a, principalmente al oeste de la Península de Baja California, cuyos valores se presentan entre los 1-10 mg m⁻³. También rodeando toda la Península (tanto en el Océano Pacífico como en el Golfo de California) se observan valores alrededor de 0.5 mg m⁻³, mientras que para el Noreste del Golfo de California, se observa una menor área abarcada por Chl-a con valores entre los 1-4 mg m⁻³ (Figura 12g).

A comparación de los meses antes analizados, durante el mes de agosto, los valores que giran en torno a los 10 mg m⁻³, se observa una disminución en la concentración de Chl-a con valores de 1-5 mg m⁻³ al noreste tanto de la Península de Baja California como de las costas del Golfo de California. En este caso, se observa una mayor área cubierta por valores que están alrededor de los 0.5 mg m⁻³ principalmente al oeste de la Península de Baja California y también al oeste del Golfo de California (Figura 12h).

Durante septiembre, la distribución de la Chl-*a* con valores no mayores a los 5 mg m⁻³ fueron pocas. Esto principalmente al oeste de la Península de Baja California y al noreste del Golfo de California. En este caso los datos que giran en torno a los 0.5 mg m⁻³ abarcan una mayor área principalmente alrededor de la Península de Baja California, tanto en el Océano Pacífico, cómo en al este del Golfo de California (Figura 12i)

Las áreas abarcadas que presentan una concentración de Chl-*a* no mayor a los 2 mg m⁻³ fueron pocas durante octubre. Sin embargo, las áreas con estos valores se observaron principalmente al oeste de la Península de Baja California y al este del Golfo de California. A su vez, en este caso también se observan pocos datos que se encuentren alrededor de los 0.5 mg m⁻³. Esto frente a la costa este del Golfo de California y al oeste de la Península de Baja California, donde al norte de esta misma zona es el área en la que se observa la mayor concentración de Chl-*a* en general. Para esta fecha, los datos observados tanto en el Océano Pacífico cómo en el Golfo de California toman un rango aproximado alrededor de los 0.1 mg m⁻³ (Figura 12j).

En noviembre, la acumulación máxima en cuanto a concentración de Chl-*a*, se presentó al noreste del Golfo de California, en las costas más cercanas a Sinaloa. También se observa una menor área cubierta al oeste medio de la Península de Baja California por datos similares. En ambas áreas la concentración de Chl-*a* con valores alrededor de los 1-10 mg m⁻³ en el Golfo de California y entre 1-4 mg m⁻³ en el Océano Pacífico. Por otro lado, una mayor área está cubierta dentro del Golfo de California por datos que pueden encontrarse alrededor de los 0.5 mg m⁻³ (Figura 12k)

A comparación de los últimos meses analizados para este año, en diciembre se presentó un aumento en la concentración de Chl-*a*, en este caso ubicada principalmente dentro del Golfo de California. Los valores más altos se encuentran frente a sus costas tanto cómo del oeste cómo del este y parte del centro del oeste de la Península de Baja California. Se estima que los valores en dichas áreas

pueden encontrarse entre los $1-10 \text{ mg m}^{-3}$. Mientras que al sur del mismo Golfo de California y al oeste de la Península de Baja California se observan datos que se encuentran alrededor de 0.5 mg m^{-3} (Figura 12)

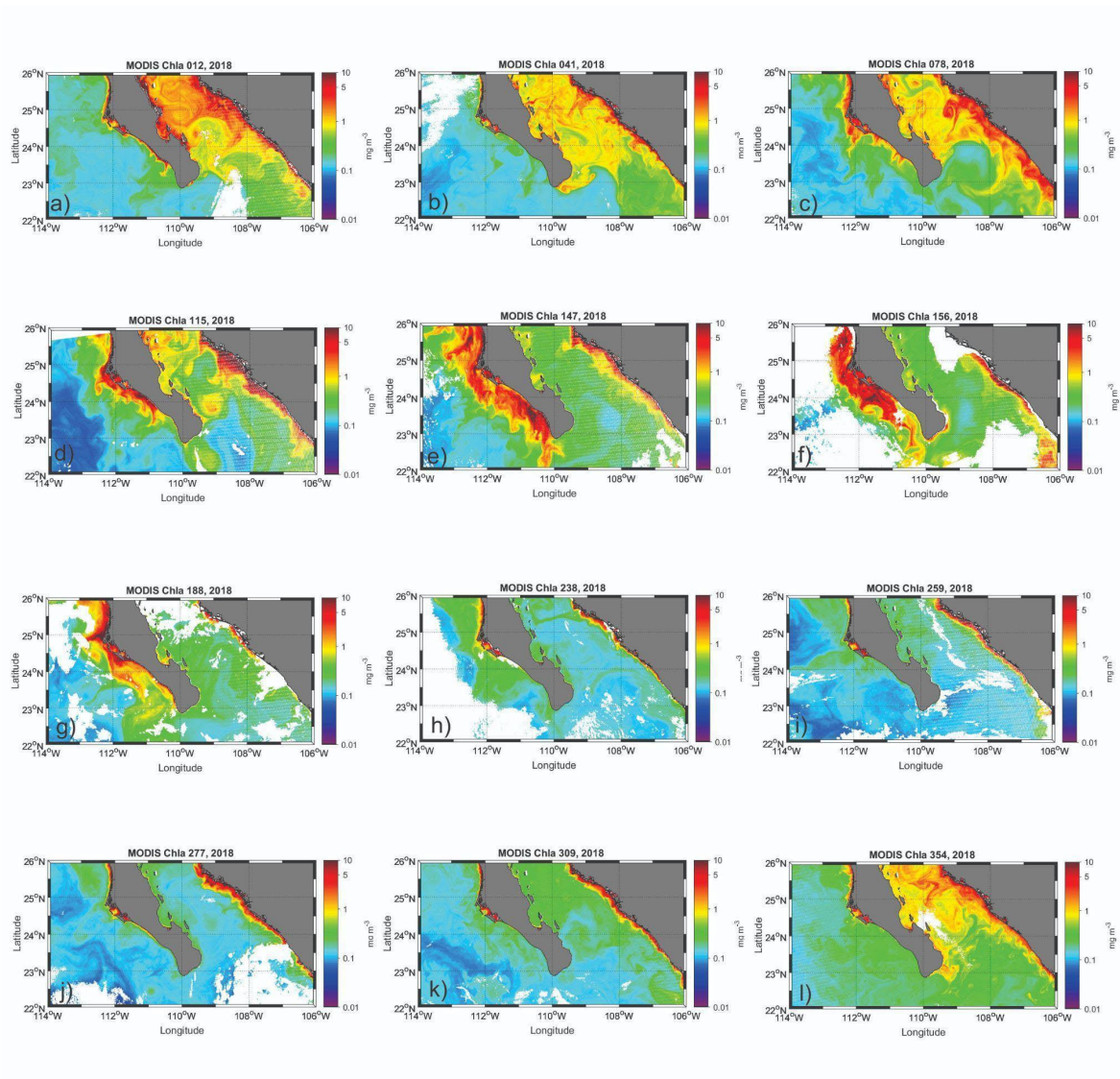


Figura 13. Concentración de Chl-a (mg m^{-3}) en el área de estudio durante el año 2018.

Año 2018

Durante enero, la concentración de Chl-*a* se ubicó principalmente al norte del Golfo de California. Se estima que los valores máximos para esta fecha se ubican en esta área, tomando valores aproximados de entre 0.9-10 mg m⁻³. El punto de mayor concentración se ubica al oeste del Golfo de California, frente a las costas de la Península de Baja California. Por otro lado, en la entrada del mismo Golfo se ve una concentración de Chl-*a* que toma valores de alrededor de 0.5 mg m⁻³, también dicha proporción de Chl-*a* abarca una gran porción del área de estudio (Figura 13a).

Durante el mes de febrero, la concentración de Chl-*a* se distribuyó principalmente dentro del Golfo de California. Los valores más elevados se encuentran al norte del mismo, teniendo valores aproximados de entre 1-4 mg m⁻³. Al sur del Golfo, en lo que se considera la entrada o la boca, también se observa una gran concentración de Chl-*a*, cuyos valores son más bajos a los antes mencionados (\approx 0.5 mg m⁻³). Sin embargo, el área abarcada por este conjunto, también es tan grande como la ocupada por la Chl-*a* con valores más altos (Figura 13b).

Durante marzo, la concentración de Chl-*a* se distribuyó principalmente al oeste tanto de la Península de Baja California, como al este de la República Mexicana, que a su vez corresponde al este del Golfo de California. Se estima que los valores aproximados para estos conjuntos pueden encontrarse alrededor de 2-4 mg m⁻³. A su vez, dentro del Golfo de California (donde también se observa la mayor concentración de Chl-*a*) se observan distribuidos otros conjuntos cuyos valores son más bajos que los antes mencionados, pero se estima que estos pueden ir desde 0.5 mg m⁻³ al sur del Golfo hasta 4 mg m⁻³ al centro. En general también se aprecia una distribución de la Chl-*a* influenciada por movimientos en las masas de agua como vórtices (Figura 13c).

Abril fue un mes con una marcada diferencia tomando en cuenta los meses anteriores. La mayor concentración de Chl-*a* se encontraba concentrada frente a las

costas, al oeste de la Península de Baja California y al este del Golfo de California. Se estima que en ambas áreas los valores que puede tomar la Chl-a giran en torno a un intervalo entre 1-10 mg m⁻³. Mientras que al centro del Golfo las concentraciones al norte y centro, pueden estar alrededor de 1-3 mg m⁻³. A su vez, se observa una gran área cubierta por una concentración posiblemente entre los 0.5 mg m⁻³. Esta se ubica al centro y sur del Golfo de California, pero con mayor intensidad al oeste de la Península de Baja California. En general los valores observados para esta fecha son altos y además influenciados por movimientos oceánicos (Figura 13d).

Durante mayo, la concentración de Chl-a se distribuyó a lo largo de todo el oeste de la Península de Baja California se estima que los valores que puede alcanzar la Chl-a en esta zona pueden estar alrededor de 0.9 mg m⁻³ en los puntos más lejanos a la costa y de entre 3-10 mg m⁻³ en los puntos más cercanos a la costa. A su vez, se observan valores similares al este del Golfo de California, aunque más bajos en esta zona, se estima que los valores pueden estar entre 0.9 mg m⁻³ a 5 mg m⁻³. En este caso la mayor proporción del área de estudio es cubierta por un conjunto de Chl-a cuyos valores pueden estar alrededor de los 0.5 mg m⁻³. Este conjunto se encuentra mayormente distribuido dentro del Golfo de California, sin embargo, también se distribuye en el Océano Pacífico (Figura 13e).

Junio presentó una distribución de Chl-a muy similar a la observada en mayo. La mayor concentración se observó en la costa oeste de la Península de Baja California con valores entre 1 mg m⁻³ a 10 mg m⁻³. También al este del Golfo de California, frente a la costa de Sinaloa, la concentración fue muy similar a la observada al oeste de la Península de Baja California (1 mg m⁻³ a 10 mg m⁻³). En general dentro del Golfo de California se observó una predominancia de los valores entre 0.2 mg m⁻³ a 0.5 mg m⁻³ (Figura 13f).

La mayor concentración de Chl-a en el año analizado se presentó en julio, al oeste de la Península de Baja California los valores en esta zona pueden rondar de entre

los 10 mg m^{-3} en las zonas más cercanas a la costa y hasta los 1 mg m^{-3} en las zonas más lejanas. Al este del Golfo de California frente a la costa se observa una pequeña área cubierta por Chl-*a* cuyos valores se acercan un poco a los analizados en la Península de Baja California. Se estima que los valores del Golfo pueden encontrarse alrededor de los $1\text{-}3 \text{ mg m}^{-3}$. Por otro lado, se observa también una gran porción del área de estudio cubierta por Chl-*a* con valores entre los $0.2\text{-}0.5 \text{ mg m}^{-3}$, tanto dentro del Golfo de California como en el Océano Pacífico (Figura 13g).

En agosto, la concentración de Chl-*a* se vio acumulada al oeste de la Península de Baja California, en el Océano Pacífico con valores entre los 0.5 mg m^{-3} , el cual a su vez es la mayor proporción de área cubierta en esta fecha. Por otro lado, los valores más elevados en cuanto a la concentración de Chl-*a* se observan al noroeste de la Península de Baja California y al este del Golfo de California con valores entre los $1\text{-}4 \text{ mg m}^{-3}$. En este caso, el Golfo de California presenta valores mucho más bajos de los antes observados (aproximadamente entre los 0.2 mg m^{-3}) (Figura 13h).

En el mes de septiembre se vio una marcada disminución en cuanto a la concentración de Chl-*a* en general. Este mes tuvo una dominancia de valores los cuales giran en torno a 0.1 mg m^{-3} , esto en el Océano Pacífico y a lo largo del Golfo de California. Sin embargo, en algunas áreas sí se vio una acumulación de Chl-*a* cuyos valores fueron más elevados, esto a lo largo de las costas del este del Golfo de California, desde Sonora, hasta Sinaloa y también en oeste de la Península de Baja California con valores entre 1 mg m^{-3} a 4 mg m^{-3} . Por otro lado, se observan pequeños parches de Chl-*a* con concentraciones aproximadas de 0.5 mg m^{-3} , esto al noroeste de la Península de Baja California y al este del Golfo de California (Figura 13i)

El mes de octubre fue muy similar al mes de septiembre, pues se vio una marcada dominancia por valores de 0.1 mg m^{-3} , dentro del Golfo de California y a lo largo del Océano Pacífico. Los valores más elevados para esta fecha, se presentaron frente a las costas de Sonora y Sinaloa, al este del Golfo de California con valores entre 1

mg m^{-3} a 10 mg m^{-3} . A pesar de que frente a la costa oeste de la Península de Baja California se observa una concentración de Chl-*a* que puede estar en los mismos intervalos (1 mg m^{-3} a 10 mg m^{-3}) el área abarcada en esta zona es mucho menor a la antes mencionada en el Golfo de California. Por otro lado, valores alrededor de los 0.5 mg m^{-3} se observan distribuidos frente a la Península de Baja California, tanto al oeste, como al este, pero con una mayor área abarcada al este del Océano Pacífico y frente a las costas del este del Golfo de California (Figura 13j).

La concentración de Chl-*a* en noviembre se presentó con valores aproximados de 0.2 mg m^{-3} , está a su vez es la que ocupa una mayor distribución en el área de estudio, tanto en el Golfo de California como en el Océano Pacífico. Seguido de este valor, se observa una gran porción del área de estudio cubierta por concentraciones de alrededor de los 0.5 mg m^{-3} , principalmente dentro del Golfo de California. Tanto el conjunto de valores de entre los 0.2 mg m^{-3} como el de los 0.5 mg m^{-3} , nos permiten observar que la distribución para esta fecha está influenciada por movimientos en las masas de agua como posiblemente vórtices. Finalmente, los valores más elevados de Chl-*a* se ubican frente a la costa oeste de la Península de Baja California y al noreste del Golfo de California, a pesar de que el área cubierta por estos conjuntos es pequeña, se estima que los valores máximos están determinados en estas zonas por un rango aproximado de entre los 1 mg m^{-3} a 5 mg m^{-3} (Figura 13k).

Tal y como se esperaba, en diciembre se presentó una marcada diferencia en cuanto a concentración de Chl-*a*, está distribuida principalmente al norte dentro del Golfo de California e influenciada por movimientos oceánicos. Los valores en esta zona son de aproximadamente 1 mg m^{-3} a 4 mg m^{-3} , siendo mayores los valores presentados frente a las costas. Seguido de esto, se observa también una gran porción del área abarcada por un patrón de distribución uniforme en cuanto a concentración de Chl-*a* cuyos valores oscilan entre los 0.5 mg m^{-3} . Está al Sur del Golfo de California y al oeste de la Península de Baja California, y a lo largo del Océano Pacífico (Figura 13l).

Al comparar los años 2015 entre el Océano Pacífico y el Golfo de California se puede observar que las temperaturas más altas se presentaron en enero para el OP mientras que en el GC se presentaron en el mes de junio. En estos mismos meses se presentaron los valores más bajos de Chl-*a*. Para el año 2016 se puede observar que las temperaturas más altas en el OP fueron en septiembre y octubre; mientras que, en el GC se presentaron en julio, en estos meses también se presentaron los valores más bajos de Chl-*a*. Para el año de 2017 en el OP la temperatura más alta se presentó en los meses de octubre y noviembre con valores bajos de Chl-*a* mientras que para el GC fue en el mes de septiembre presentando valores alto de temperatura y baja concentración de Chl-*a*. Para el año 2018 en el OP la temperatura más alta se presentó en octubre con valores bajos de Chl-*a* mientras que el GC fue en el mes de agosto.

VII.III. Series de tiempo analizadas en el área de estudio.

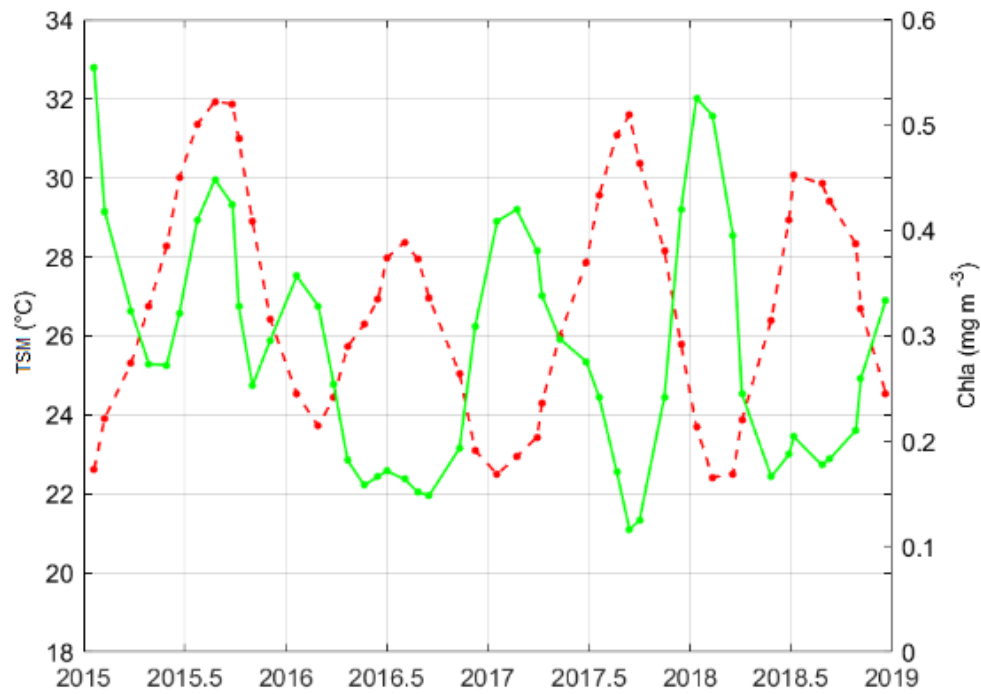


Figura 14. Serie de tiempo de 2015-2018 correspondiente al Golfo de California para temperatura de la superficie del mar en rojo (TSM) (°C), y clorofila-a (Chl-a) (mg m⁻³), en verde.

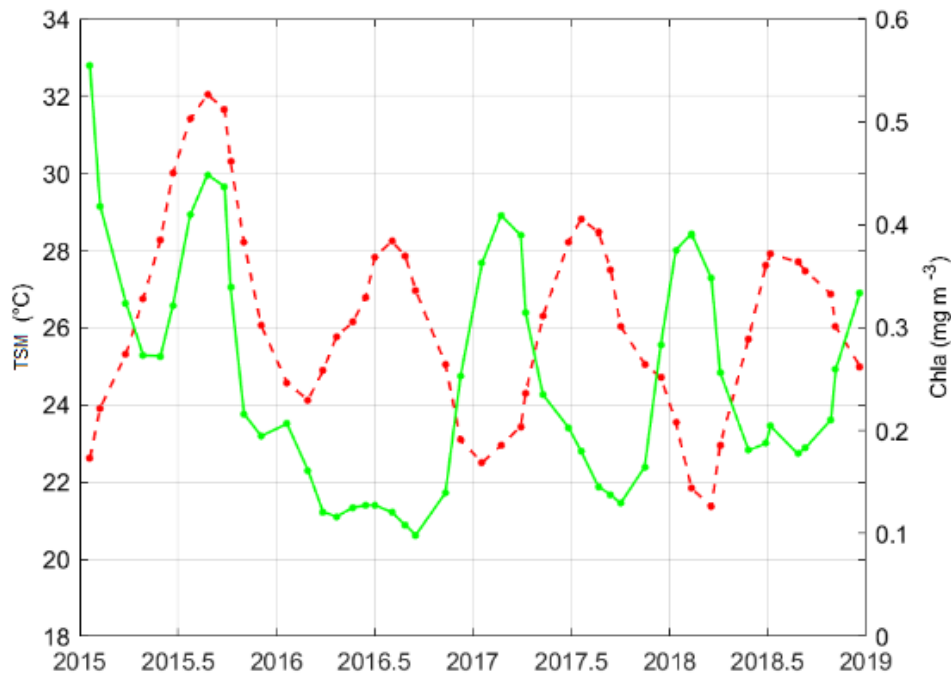


Figura 15. Serie temporal de 2015-2018 correspondiente al Océano Pacífico para temperatura de la superficie del mar en rojo (TSM) (°C), y clorofila-a (Chl-a) (mg m⁻³), en verde.

VIII. Discusión

Con los resultados obtenidos en cuanto a TSM, se hace evidente que durante el año de 2015 la temperatura comenzó a incrementar desde el mes de mayo, mientras que para el año 2016, esta comenzó a incrementar desde el mes de febrero en la zona sur del Golfo de California, es por ello que en relación con la Chl-a, no se observa un cambio abrupto, sino que la intrusión de la onda de agua más cálida por el fenómeno de El Niño comienza a tener mayor impacto desde el 2016 en cuanto a los parámetros analizados. Este cambio también puede apreciarse en los años 2017 y 2018 en los que se empieza a observar una disminución de temperatura por un cambio entre fenómenos de El Niño a La Niña. Lo que conlleva a un inicio en la intrusión de aguas menos cálidas y con mayor concentración de nutrimentos.

Con relación a los resultados obtenidos, se observó que a lo largo del Océano Pacífico la temperatura incrementa a partir del mes de julio. Esto se puede relacionar con el sistema de afloramiento de la corriente de California dado que según el estudio realizado por Quilfem et al. (2023) en ella también se ha observado un comportamiento estacional. Además de ser afectada por tres fenómenos climáticos como la Oscilación del Giro del Pacífico norte (NPGO), la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y El Niño Oscilación del sur (ENSO). Principalmente, el fenómeno de El Niño se asocia con vientos más fuertes del sur en invierno, los cuales influyen directamente en el periodo en el que presenta la surgencia y por ende en los factores analizados (TSM y Chl-a), tal y como se menciona en el estudio realizado por Arellano et al. (2023) en el que se observó que precisamente en verano la TSM es más baja a lo largo de la costa en la parte norte de la Península de Baja California debido al aumento de la surgencia costera. Además, en el mismo estudio se observó una TSM mayor en 2 °C durante la primavera y entre 2 °C y 3 °C durante el verano.

Dado que a lo largo del hemisferio norte se presentan celdas semipermanentes de alta y baja presión, se produce así el campo de vientos que generalmente presenta una variación estacional (Lutgens y Tarbuck, 2016). En otros estudios realizados a su vez en el Golfo de California, se han observado vórtices anticiclónicos durante invierno y finales de primavera, ciclónicos durante el verano y alternados de otoño a inicios de invierno. (Foster, 2022). En cuanto al mismo patrón de vientos, Quijano (2017) demostró que efectivamente existe una estacionalidad en cuanto a los vientos presentes dentro del Golfo de California, siendo los dos más relevantes o con valores más elevados, los de invierno, seguidos por los del verano. En ese mismo estudio realizado por Quijano (2017) se observó que durante el invierno la intensidad del viento promedio es $3.8 \pm 0.9 \text{ m s}^{-1}$ proveniente del norte, en comparación con la intensidad promedio de verano que fue de $2.4 \pm 0.6 \text{ m s}^{-1}$ donde los vientos provienen del suroeste. Las velocidades mínimas durante el invierno se

presentaron a lo largo de la costa este del Golfo de California, mientras que en la época del verano las velocidades mínimas se presentaron a lo largo de la costa oeste de la región. El promedio para cada estación registrado durante el estudio de Quijano (2017) fue, en invierno de $3.6 \pm 0.8 \text{ m s}^{-1}$, en primavera de $1.5 \pm 0.5 \text{ m s}^{-1}$ en verano de $2.4 \pm 0.5 \text{ m s}^{-1}$ y en otoño de $1.5 \pm 0.3 \text{ m s}^{-1}$. Además, se observó que las zonas en donde se presentaba la mayor velocidad residual del viento concordaban con los puntos en los que se observaban vórtices principalmente anticiclónicos y que las zonas de divergencia y convergencia debidas al viento se presentaron principalmente en la zona costera del Golfo de California, del lado de la Península de Baja California y del Continente.

En cuanto al análisis de ambos factores dentro del Golfo de California, a lo largo de las fechas analizadas en las series temporales, se observa cómo es que la Chl-*a* responde a los cambios en TSM, siendo mayor la concentración de Chl-*a* cuando hay una menor TSM. En cuanto a la temperatura, tal cómo se observa en la *Figura 14* el valor máximo fue alcanzado durante el 2015, mientras que en cuanto a Chl-*a*, el valor máximo se alcanzó en 2018. La relación existente entre el incremento de TSM y Chl-*a* durante el 2015, puede deberse a que todavía no se presentaban los efectos del fenómeno de El Niño.

Por otro lado, en cuanto al análisis de ambos factores, también en las series de tiempo a lo largo del Océano Pacífico, se observó una gran similitud al comportamiento observado dentro del Golfo de California. Sin embargo, para esta área de estudio, el año que presentó el valor más elevado de TSM fue en 2015, mientras que el valor más elevado de Chl-*a* se presentó en el mismo. Haciendo una comparación de los resultados obtenidos para ambas zonas de estudio, se puede apreciar que si bien, los valores de TSM fueron similares en ambas zonas, los valores de Chl-*a* fueron más elevados dentro del Golfo de California.

En un estudio realizado por Durán-Campos et al. (2023), que incluyó los mismos años de estudio analizados y la misma área de estudio que en este proyecto, se definió también la variabilidad estacional ya mencionada. En su estudio, el cual concuerda con el presente, los valores máximos de TSM se presentaron durante el verano (30-31°C), mientras que los valores mínimos se presentaron durante el invierno (20-22°C). En cuanto al comportamiento de la Chl-*a*, se mostró una tendencia inversa, igual que en el estudio presente, en la que los valores mínimos se presentaron durante el verano (0.1–1.00 mg m⁻³) y los valores máximos durante los meses fríos de invierno (>2 mg m⁻³). En el mismo estudio, se atribuye la posible diferencia de parámetros (TSM y Chl-*a*) a lo largo del tiempo, a la advección tropical de aguas superficiales, la estratificación en la columna de agua durante el verano, las condiciones de velocidad del viento asociados a períodos de calma durante el verano (<5 m s⁻¹) y con más intensidad y persistencia durante el invierno/primavera (>10 m s⁻¹) y a las descargas residuales de Mazatlán cuya frecuencia interanual coincide con los eventos de ENSO.

Además, se destacaron diferencias estacionales, semestrales, anuales y variabilidades interanuales. Se estimó una periodicidad anual e interanual para la Chl-*a* y de entre dos años y cuatro años en cuanto a la TSM.

A lo largo de los cuatro años analizados, se observó una marcada tendencia estacional en cuanto a la Chl-*a*, pues durante el invierno se presentó un pico de mayor concentración mientras que para la época de verano se observó una disminución en el mismo parámetro debido al aumento de TSM. Por otro lado, durante el otoño se presentó un segundo pico de Chl-*a*, siendo el pico de invierno-primavera el más productivo.

A lo largo del estudio realizado por Quilfem. et al. (2023) se observa cómo a lo largo del sistema de afloramiento de la corriente de California, la Chl-*a* tiene un

comportamiento estacional. La temporada de invierno (diciembre-febrero), la temporada de surgencias (abril-junio) y la temporada de relajación (julio-septiembre). Los meses de marzo, octubre y noviembre son considerados como períodos de transición. Además de observarse como la Chl-a alcanza su valor máximo durante las temporadas de surgencia o relajación (García-Reyes y Largier, 2012). Nuestros resultados son contundentes con dicho estudio, pues durante la temporada de invierno y surgencias fue cuando las concentraciones de clorofila fueron más altas, mostrando la relación del sistema de afloramiento de la corriente de California en cuanto a la concentración de Chl-a a lo largo del área de estudio.

A lo largo de diversas imágenes obtenidas (Figuras 7b, 9c, 9l, 11b, 11i, 12a y 13c) se observó que tanto la distribución de la TSM como la distribución de la Chl-a se vio influenciada por movimientos naturales del océano como circulación ciclónica y vórtices. A pesar de que se considera que cada vórtice tiene su propia naturaleza dinámica, estos movimientos si bien, influyen de manera positiva al ecosistema pues debido al movimiento circular de estos cuerpos de agua, los cuales permiten que se generen afloramientos y a su vez que haya una predominancia fitoplanctónica y por ende de Chl-a. Este tipo de evento favorable se da principalmente cuando los vórtices son fríos, con movimientos divergentes y vorticidad positiva, por lo que se estima que este tipo de movimientos son los observados en las figuras ya antes mencionadas. Además, tienen un papel importante en cuanto al transporte de energía interna y de las propiedades bioquímicas del agua a lo largo de distancias mucho mayores a su diámetro, que va de algunas decenas a cientos de kilómetros, con un periodo de vida relativamente grande; de meses e incluso años. (Cruz Gómez et al., 2008) Los vórtices son un factor importante en este estudio pues atrapan, transportan y dispersan masas de agua con diferente temperatura y salinidad, además de mantener la energía en grandes áreas por largos periodos (Garcon et al., 2001). Otra razón por la cuál la Chl-a no se ve afectada inmediatamente cuando se observa un aumento de la temperatura superficial del mar sino tiempo después, mientras que la TSM si se ve afectada en un tiempo mucho más rápido, cómo lo observado para el año de 2015.

De acuerdo con estudios realizados por Heras-Sánchez et al. (2019) los valores promedio que se pueden observar en el Golfo de California con variaciones estacionales y sin influencia de procesos naturales como el fenómeno de El Niño son ultraoligotróficas ($< 0.05 \text{ mg m}^{-3}$), oligotróficas ($0 - 0.45 \text{ mg m}^{-3}$), mesotróficas ($0.45 - 1.50 \text{ mg m}^{-3}$) eutróficas ($1.50 - 5.00 \text{ mg m}^{-3}$) e hipertrófica ($> 5.0 \text{ mg m}^{-3}$). Teniendo esto en cuenta, se puede decir que los resultados obtenidos denotan que todos los años en promedio entran en la categoría de oligotróficos (Tabla 2), con pequeñas variaciones en mesotróficos. Por otro lado, también se observa que el año con mayor concentración de Chl-a corresponde al año 2015. En términos generales también se observa que el año más estable en cuanto a valores obtenidos para Chl-a fue el 2018. En cuanto a valores de temperatura, nuevamente de acuerdo con Heras-Sánchez et al. (2019) el valor mínimo en promedio se registró en 24.59°C mientras que el promedio para el valor máximo se registró a 26.75°C . De acuerdo con los resultados obtenidos la temperatura mínima fue registrada en 2018, con un valor de 21.19°C , el cual fue 3.4°C debajo de lo esperado según Heras-Sánchez., 2019 mientras que el valor máximo fue registrado en el año 2015 con un valor de 32.19°C , el cual comparado con el estudio de Heras-Sánchez et al., 2019 se encuentra a 2.03°C de diferencia del valor más alto registrado en su estudio.

Tabla 2. Comparación máximos y mínimos de Chl-a en mg m^{-3} por año en el Golfo de California.

Año	Max Chl-a	Min Chl-a	Promedio Chl-a
2015	1.12743299	0.12734181	0.352868647
2016	0.49465294	0.12207546	0.217141548
2017	0.64590628	0.10691613	0.276771464

2018	0.87244305	0.1153034	0.290207638
------	------------	-----------	-------------

En cuanto al Océano Pacífico (Tabla 3), según un estudio realizado por Correia et al. (2019) los valores promedio presentes en el Océano Pacífico entre 2006-2010 es de alrededor de 0.472 mg m⁻³. De acuerdo con el mismo intervalo antes mencionado de Heras-Sánchez et al. (2019) en el que según la cantidad de Chl-a se distinguen las siguientes zonas: ultraoligotróficas (< 0.05 mg m⁻³), oligotróficas (0 – 0.45 mg m⁻³), mesotróficas (0.45 – 1.50 mg m⁻³) eutróficas (1.50 – 5.00 mg m⁻³) e hipertrófica (> 5.0 mg m⁻³), se puede decir que, haciendo una comparación con los resultados obtenidos, el Océano Pacífico a lo largo de los años 2015-2018 se presentó una concentración de Chl-a principalmente oligotrófica con ligeras tendencias a mesotrófica, mientras que en el ámbito de temperatura, de acuerdo con estudios realizados de 2017 a 2018 (SAGARPA, 2018), la temperatura superficial promedio en el Océano Pacífico se encuentra en el valor mínimo alrededor de los 18.22°C y alrededor de los 27.65°C para el valor máximo. Haciendo una comparación con los resultados obtenidos para este estudio, la temperatura mínima se registró en el año 2017, con un valor de 21.37°C, mientras que la temperatura máxima se registró en el año 2015, con un valor de 32.17°C. A continuación, se presentan las tablas comparativas de temperatura y categoría de Chl-a por dato obtenido, en las cuales se observa todo lo mencionado en este párrafo:

Tabla 3. Comparación máximos y mínimos de Chl-a en mg m⁻³ por año en el Océano Pacífico

Año	Máx Chl-a	Mín Chl-a	Promedio Chl-a
2015	1.12743299	0.12734181	0.352868647
2016	0.15875019	0.10541403	0.129767845

2017	0.64590628	0.10691613	0.249138676
2018	0.87244305	0.1153034	0.258100688

Tabla 4. Comparación de máximos y mínimos en temperatura por año.

TSM OP			TSM GC		
Año	Mín.	Max	Año	Mín.	Max
2015	23.3	32.17	2015	23.3	32.19
2016	21.8	31.13	2016	21.8	31.13
2017	21.37	32.15	2017	21.37	32.15
2018	20.27	28.26	2018	21.19	28.26

Con los datos observados en la Tabla 3 se puede decir que en cuanto a la clasificación por productividad en el Océano Pacífico, las aguas muestran una tendencia más oligotrófica ($0 - 0.45 \text{ mg m}^{-3}$) siendo 2016 el año más recurrente teniendo 13 valores en dicha categoría, seguido por los años 2017, 2015 y 2018 que presentaron 11, 9 y 8 valores respectivamente. En cuanto a la categoría mesotrófica, que es la segunda más observada en los años analizados para el Océano Pacífico, el año que tuvo estos valores ($0.45 - 1.50 \text{ mg m}^{-3}$) de manera más recurrente fue el 2015 el cuál presentó 3 valores en esta categoría, seguido de manera simultánea por el 2017 y 2018 los cuales solo presentaron un valor de manera respectiva en esta categoría. En cuanto a los datos obtenidos para el Golfo de California, se observa que igualmente, la categoría más recurrente en cuanto a productividad, fue la oligotrófica ($0 - 0.45 \text{ mg/m}^3$) siendo en este caso el año más recurrente el 2016 el cual presentó 11 valores en esta categoría, mientras que para los años 2015, 2017 y 2018 todos presentaron 9 valores en esta categoría. A su

vez, estos datos nos permiten observar que ni para el Océano Pacífico ni para el Golfo de California se encontraron datos que se incluyeran en las clasificaciones de ultraoligotrófica y eutrófica, mientras que la clasificación para productividad oligotrófica fue la más recurrente en ambas áreas de estudio. Sin embargo, al realizar una comparación entre el número de datos que se incluyeron en ambas categorías se observa que para el Océano Pacífico fueron un total de 41 datos que se incluyeron en la categoría de oligotrófica, mientras que para el Golfo de California fueron un total de 38 datos.

En general, tanto la Tabla 3 como la 4 nos permiten observar que en los años evaluados tanto la temperatura superficial como la variación en cuanto a la concentración de Chl-*a* no fue muy distinta en el Océano Pacífico a comparación de lo observado en el Golfo de California, lo que conlleva a la hipótesis de que es altamente posible que estos parámetros hayan sido afectados por eventos como El Niño o La Niña. Dado que se tiene registro de que, en el año 2015 a 2016, se presentó un fuerte evento del fenómeno de "El Niño" conocido como "Godzilla". (Coria-Monter et al., 2018). Este evento conllevó a que existieran cambios en la capa de mezcla profunda, anomalías en la salinidad (Zhi et al., 2019), y en las tasas de productividad primaria neta (Yang et al., 2018). Incluso en un estudio realizado se encontró que durante el evento extremo de El Niño 2015/2016, en la parte oriental del Golfo de California hubo un aumento en los niveles de temperatura superficial del mar ($>27^{\circ}\text{C}$), que tuvo un impacto en la biomasa fitoplanctónica, lo que indujo a niveles bajos de Chl-*a* ($<1,00\text{ mg m}^{-3}$) (García-Morales, et al., 2017). Sin embargo, aunque la región está sujeta a la advección de calor y masas de agua oligotróficas asociadas al ENSO, a veces estos no suelen ser tan extremos dentro del Golfo. (Sánchez-Velasco et al., 2017; Coria-Monter et al., 2018; Durán-Campos et al., 2022)

A su vez, no se puede dejar de lado el hecho de que la comunidad fitoplanctónica también es determinada por factores como el forzamiento físico que varían de región a región y entre estaciones climáticas, la radiación solar, la temperatura, la concentración de nutrientes, los metales traza disponibles, la historia de vida y la

estructura taxonómica del fitoplancton (Platt y Sathyendranath, 1999), surgencias costeras (Cardona et al., 1990), actividades antropogénicas, baja abundancia en la biomasa del macro zooplancton de origen templado, la ausencia de especies subtropicales frente a Baja California ocasionada por las inusuales condiciones frías (Schwing et al., 2002; Correia, 2013), la disminución de la mezcla vertical debido al incremento de la estratificación térmica (Kahru et al., 2004), y la dominancia de nanofitoplancton con bajo contenido de Chl-*a* (Valdez-Holguín y Lara-Lara, 1987), la reducción en la intensidad de las surgencias costeras, etc. (Fiedler, 1984; Strub et al., 1990; Kahru y Mitchell, 2002; Holguín-Carreón, 2007).

Dado que el fenómeno de El Niño conlleva al debilitamiento los vientos alisios del este y la ralentización de la corriente oceánica que aleja el agua superficial de la costa occidental de América del sur, se reduce el afloramiento de agua fría y rica en nutrientes desde las profundidades del océano, aplanando la termoclina y permitiendo que el agua superficial cálida se acumule en la parte oriental, por lo que la biomasa fitoplanctónica disminuye notoriamente (Kahru y Mitchell, 2000).

Se estima que en 2015 que fue el año con un promedio más elevado de Chl-*a* todavía no se observa el impacto del evento de El Niño "Godzilla". Se esperaba que este evento generará cambios en la TSM, Chl-*a*, el flujo de partículas y variabilidad climática oceánica-atmosférica, pues según la NOAA (2023), sería uno de los eventos de mayor intensidad. Sin embargo, tal como se observó en los resultados obtenidos y según estudios realizados por Coria-Monter et al., (2018) el poco impacto de dicho evento probablemente esté relacionado con la dinámica del golfo y con el mecanismo de mejora de la productividad. Además, según se menciona en el mismo artículo, este evento ocurrió después de una fase negativa, y los dos mega ENSO anteriores ocurrieron después de una fase positiva prolongada, lo que se estima, permitió que los ecosistemas estuvieran preparados para dicho evento, especialmente en el nivel trófico superior que tiene un tiempo de respuesta más largo.

Fue entonces hasta 2016 que fue cuando los efectos de este evento fueron evidentes, pues este fue el año con un promedio más bajo de Chl-*a*. Sin embargo,

se puede asumir que esto se relaciona con los rangos de tolerancia de los diferentes organismos, los movimientos de las masas de agua de tipo vórtice, entre otros, pues en cuanto a temperatura superficial del mar, que con el fenómeno de El Niño pueden ser mayores o iguales a 0.5 °C, en los años analizados fue en 2015 cuando precisamente la temperatura se encontró en su máximo valor. Siendo hasta 2018 cuando comenzó a tener un cambio significativo. A su vez se estima que este cambio se debió a la transición entre fenómenos de El Niño y La Niña, pues mientras que con el fenómeno de El Niño la TSM aumenta alrededor de los 0.5 °C con el fenómeno de La Niña se observan cambios en temperatura menores o iguales a 0.5 °C. (NOAA,2023).

IX. Conclusiones

Se concluye que durante los años 2015 a 2018 se observó una estacionalidad en cuanto a los parámetros analizados (Chl-a y TSM). La mayor concentración de Chl-a presentó dos picos importantes: a) el valor más alto durante la temporada de invierno y b) un segundo pico en la época de otoño.

La temperatura más alta se presentó durante la transición entre la primavera y el verano y los valores más bajos durante la transición otoño e invierno.

El periodo de 2015 a 2016 se presentó el fenómeno de El Niño provocando un aumento en la temperatura superficial del mar en ambas zonas de estudio a diferencia del periodo 2017 a 2018 en donde se observaba la presencia del fenómeno La Niña.

Si bien, ambas zonas del área de estudio (Océano Pacífico y Golfo de California) fueron afectadas en cuanto a los parámetros analizados, debido a la morfología y dinamicidad presente en el Golfo de California, los cuales permiten que sus condiciones sean distintas a las presentes en el Océano Pacífico, el Golfo de California se mantuvo con una concentración de Chl-a más elevada, a pesar de que también se presentaron elevaciones en TSM. Este tipo de procesos son descritos en un artículo de Durán-Campos et al.,(2022) en el que se describe que el Golfo de

California posee diferentes mecanismos que lo “protegen” para evitar perturbaciones climáticas mediante la inducción de la mezcla y fertilización de la capa eufótica.

X. Referencias

Antonelis, K. 1999. GPS determination of current Pacific-North American plate motion, *Geology*, 27, 299-302.

Arellano, B y D. Rivas. 2019. Coastal upwelling will intensify along the Baja California coast under climate change by mid-21st century: Insights from a GCM-nested physical-NPZD coupled numerical ocean model. *Journal of Marine Systems*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2019.103207>.

Arreguín-Sánchez, F. y H.E. Arcos. 2011. La pesca en México: estado de la explotación y uso de los ecosistemas. *Hidrobiológica* 21(3): 431-462.

Barahona J. y R. Gallegos. 2000. Surgencias en la costa norte de Chile durante las temporadas Niña 1996-1997 y Niño 1997-1998*. *Revista de Geografía Norte Grande*, 27: 53-60.

Brandon, M. 2023. An extended version of the loess method. MathWorks. MATLAB Central File Exchange. Recuperado de: <https://la.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/78793-an-extended-version-of-the-loess-method>.

Coria-Monter, E., Monreal-Gómez, M.A., Salas de León, D.A., Durán Campos, E. y M. Merino-Ibarra. 2017. Wind driven nutrient and subsurface chlorophyll-a enhancement in the Bay of La Paz, Gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 196: 290-300, doi: 10.1016/j.ecss.2017.07.010.

Coria-Monter, E., Monreal-Gómez, M.A., Salas de León, D.A. y E. Durán-Campos. 2018. Impact of the “Godzilla El Niño” event of 2015-2016 on sea surface temperature and chlorophyll-a in the southern Gulf of California, Mexico, as evidenced by satellite and in situ data. *Pacific Science*, 72(4): 411-422. doi: 10.2984/72.4.2.

Coria-Monter, E., Salas de León, D.A., Monreal-Gómez, M.A. y E. Durán-Campos. 2019. Satellite observations of the effect of the Godzilla El Niño on the Tehuantepec upwelling system in the Mexican Pacific. *Helgoland Marine Research*, 73:3. doi:10.1186/s10152-019-0525-y.

Correia, M. 2013. Distribución de la concentración de Clorofila-a en 5 zonas del Pacífico oriental desde julio de 2002 a febrero de 2013. *Boletín Cofa, Convivencia Pesquera*, (7):10-16.

Cruz Gómez Candelario, R; Monreal Gómez, M.A y S. Nicolaevich Bulgakov. 2008. Efectos de los vórtices en sistemas acuáticos y su relación con la química, biología y geología. *Interciencia*. 33, 10. 0378-1844.

Della Penna, A. y P. Gaube. 2019. Overview of (Sub) mesoscale Ocean Dynamics for the NAAMES Field Program. *Frontiers in Marine Science*, 6: 384. doi: 10.3389/fmars.2019.00384.

DeMets, C. 1995. A reappraisal of seafloor spreading lineations in the Gulf of California: Implications for the transfer of Baja California to the Pacific plate and estimates of Pacific-North America motion, *Geophysical Research Letters*, v. 22, p. 3345-3548.

Dirección General Adjunta de Investigación Pesquera en el Pacífico. 2018. *Temperatura superficial marina del Pacífico Mexicano*. SAGARPA.

Durán Campos, E., Salas de León, D.A., Coria-Monter, E., Monreal-Gómez, M.A., Aldeco-Ramírez, J y B. Quiroz-Martínez. 2023. ENSO effects in the southern Gulf of California estimated from satellite data. *Continental Shelf Research*. Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2023.105084>

Durán-Campos, E., Coria-Monter, E., Monreal-Gómez, M. A. y D.A. Salas-de-León. 2019. Impact of "the Blob" 2014 and 2019 in the sea surface temperature and chlorophyll-a levels of the Gulf of California: a satellite-based study. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 50 (3): 479-491. doi: 10.3856/vol50-issue3-fulltext-2910

Durán-Campos, E., Monreal-Gómez, M.A., Salas de León, D.A. y E. Coria-Monter. 2019. Impact of a dipole on the phytoplankton community in a semi-enclosed basin of the southern Gulf of California, Mexico. *Oceanología* 61: 331-340, doi: 10.1016/j.oceano.2019.01.004.

Durán-Campos, E., Monreal-Gómez, M.A., Salas de León, D.A. y E. Coria-Monter. 2020. Field and satellite observations on the seasonal variability of chlorophyll-a in Bay of La Paz, Gulf of California, Mexico. *International Journal of Oceans and Oceanography* 14 (1): 157-167, doi: 10.37622/IJOO/14.1.2020.157-167.

EarthData. 2021. Data Processing Levels. Description of data processing levels ranging from level 0 to Level 4 for NASA EODIS data products. <https://www.earthdata.nasa.gov/engage/open-data-services-and-software/data-information-policy/data-levels>. Consultado el 7 de marzo de 2024.

Fletcher, S. J. 2022. *Data Assimilation for the Geosciences. From Theory to Application*. Elsevier. (2). doi: <https://doi.org/10.1016/C2021-0-01378-X>

Foster-Velázquez, C.E. 2022. Patrones de Circulación en el Sur del Golfo de California, Durante 2019. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias.

Heras-Sánchez, M., Valdez-Holguín, J., Garatura-Payán, J. y M. Cisneros-Mata. 2019. Regiones del Golfo de California determinadas por la distribución de la temperatura superficial del mar y la concentración de clorofila-a. *Biotecnia*, 21 (1): 13-21.

Holguín-Valdez, J. y L. Espinosa-Carreón. 2007. Variabilidad interanual de clorofila en el Golfo de California. *Ecología Aplicada*, 6 (1,2):83-92. doi: <http://dx.doi.org/10.21704/rea.v6i1-2.344>

Justice, C.O., Townshend, E.F., Vermote, E., Masuoka, R.E., Wolfe, N., Saleous, D.P y J. T. Morisette. 2002. An Overview of MODIS Land Data Processing and Product Status. *Remote Sensing of Environment*, 83, 244-262. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00076-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00076-7)

Kahru, M y B. G. Mitchell. 2000. Influence of the 1997–98 El Niño on the surface chlorophyll in the California current. *Geophysical Research Letters*. 27, 2937–2940.

Kämpf, J. y P. Chapman. 2016. *Upwelling Systems of the World*. Springer International Publishing.

Kessler, C y Stroosnijder, L. (2006). Land Degradation Assessment by Farmers in Bolivian Mountain Valleys. *Land Degradation and Development*, 17, 235-248. doi: <https://doi.org/10.1002/ldr.699>.

Lavin M. F y S. G. Marinone. 2003. An overview of the physical oceanography of the Gulf of California. In: Velasco-Fuentes O. U. *Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 173-204.

Lavín, M.F., Castro, R., Beier, E y V.M. Godínez. 2013. Mesoscale eddies in the southern Gulf of California during summer: Characteristics and interaction with the wind stress. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 118. 1367-1381. doi: doi:10.1002/jgrc.20132, 2013

Lluch-Cota, S.E., Aragón-Noriega, A., Arreguín-Sánchez, F., Aurióles-Gamboa, D., Bautista-Romero, J., Brusca, R., Cervantes-Duarte, R., Cortés-Altamirano, R., Del-Monte-Luna, P., Esquivel-Herrera, A., Fernández, G., Hendrickx, M., Hernández-Vázquez, S., Herrera-Cervantes, H., Kahru, M., Lavín, M., Lluch-Belda, D., Lluch-Cota, D., López-Martínez, J., Marinone, S.G., Nevárez-Martínez, M.O., Ortega-García, S., Palacios-Castro, E., Parés-Sierra, A., Ponce-Díaz, G., Ramírez-Rodríguez, M., Salinas-Zavala, C.A., Schwartzlose, R.A y A. P. Sierra-Beltrán. 2007. The Gulf of California: Review of ecosystem status and sustainability challenges. *Progress in Oceanography*. 73: 1-26. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2007.01.013>.

Luque, D., Martínez-Yrizar, A., Burquez, A., López-Cruz, G. y A.D. Murphy. 2016. Complejos bioculturales de Sonora: pueblos y territorios indígenas. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Hermosillo, México.

Lutgens, F.K y E.J. Tarbuck. 2016. *The Atmosphere: An Introduction to Meteorology*. New Jersey: Pearson Education, Inc. 528 pp.

MathWorks. 2023. What is MATLAB?, <https://la.mathworks.com/discovery/what-is-matlab.html>. Consultado el 21 de junio de 2023

NASA SeaDAS. 2023. The Official NASA/OB.DAAC Data Analysis Software, <https://seadas.gsfc.nasa.gov/about/>. Consultado el 21 de junio de 2023

NOAA. 2023. El Niño/Southern Oscillation (ENSO), <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/enso/technical-discussion>.

Consultado el 21 de junio de 2023

NOAA. 2024. STAR Atmospheric Composition Product Training Featuring Aerosol, Fire, and Trace Gas Satellite Products from ABI, VIIRS, and TROPOMI. https://www.star.nesdis.noaa.gov/atmospheric-composition-training/satellite_data_processing_levels.php. Consultado el 7 de marzo de 2024.

NASA OCEAN COLOR. 2019. CHLOROPHYLL A (CHLOR_A). https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/resources/atbd/chlor_a/. Consultado el 10 de marzo de 2024.

Pantano, G. 2023. LOESS regression smoothing. MathWorks, <https://la.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/55407-loess-regression-smoothing>. Consultado el 21 de junio de 2023

Pieri M, Massi L, Lazzara L, Nuccio C, Lapucci C, Maselli F. 2015. Assessment of three algorithms for the operational estimation of [CHLA] from MODIS data in the Western Mediterranean Sea. *European Journal of Remote Sensing* 48: 383–401.

Pinet, P.R. 2000. *Invitation to Oceanography*. Jones and Barlett Publishers, 208 pp.

Quijano del Olmo, S.L. 2017. *Circulación en el Golfo de California inducida por mareas y esfuerzo del viento: implicaciones sobre dispersión de trazadores*. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México. 106 pp.

Quilfem, Y., Shutler, J., Piolle, J.F y E. Autret. 2021. Recent trends in the wind-driven California current upwelling system. *Remote Sensing of Environment*. Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112486>

Roy, J. y T. Morisette. 2002. An overview of MODIS Land data processing and product status. *Remote Sensing of Environment* 83 (1–2): 3-15.

Trenberth, K. 2019. Ocean Interfaces y Human Impacts. *Encyclopedia of Ocean Sciences*, (6): 420-432. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.04082-3>

United Nations, <https://www.un-spider.org/links-and-resources/gis-rs-software/seadas>. Consultado el 21 de junio de 2023.

Van Wijk, J., Axen, G. y R. Abera. 2017. Initiation, evolution and extinction of pull-apart basins: Implications for opening of the Gulf of California. *Tectonophysics*, 719, 37-50.

Vinoid. 2023. What is CorelDraw?. *TechMonitor*, <https://techmonitor.ai/what-is/what-is-coreldraw-5003066>. Consultado el 21 de junio de 2023

Wu, J. E., McClay, K., Whitehouse, P. y T. Dooley. 2009. 4D analogue modelling of transtensional pull-apart basins. *Marine and Petroleum Geology*, 26(8), 1608-1623.

www.cilamte.gov. Consultado el 21 de junio de 2023.