



**Universidad Autónoma de
Baja California**



Facultad de Ciencias Marinas

**EFFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN REMOLINOS DE
MESOESCALA EN EL PACÍFICO NORTE MEXICANO**

TESIS

que para obtener el título de

OCEANÓLOGO

Presenta

AGUSTÍN RAFAEL GARCÍA ROMERO

Ensenada, Baja California, México

Mayo 2025



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
CAMPUS ENSENADA



**"Efecto del Cambio Climático en remolinos de mesoescala en el Pacífico Norte
Mexicano"**


TESIS

PARA CUBRIR LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA OBTENER EL TÍTULO DE
Oceanólogo
PRESENTA:

Agustín Rafael García Romero
362029

A quien el Comité de Tesis autoriza el trabajo terminal, después de haber efectuado una revisión minuciosa del mismo y de acuerdo con el Art. 19 del R.G.E.P.E.P, las y los señores profesores emiten los siguientes votos aprobatorios mediante rubrica:


Dra. Patricia Alvarado Graef
DIRECTOR


Dr. Rubén Castro Valdez
SINODAL


Dra. Violeta Zetzangari Fernández Díaz
SINODAL


Dra. Gabriela De Jesús Arreguín Rodríguez
SINODAL

"Por la Realización Plena del Ser"

C.c.p.- Archivo
C.c.p.- Minutario

Resumen

Los ciclos naturales y procesos en los océanos del mundo se han visto modificados por el cambio climático. Debido a esto, se ha vuelto importante el monitoreo de los cambios climáticos en escalas espaciales menores. En México, se han realizado varios estudios de la temperatura y del incremento del mar para comprender y proteger sus recursos y población. Por otro lado, los remolinos de mesoescala, fenómenos clave en la dinámica oceánica, transportan nutrientes, partículas y calor. Se han realizado varios estudios para observar el efecto que presenta el cambio climático y eventos interanuales (El Niño/La Niña) sobre ellos. El objetivo de este trabajo es determinar la variabilidad espacial y temporal de los remolinos debido al efecto del cambio climático, por medio de una nueva metodología para identificar remolinos, un análisis del efecto de eventos interanuales y el cambio climático en sus propiedades. Se utilizaron datos satelitales del Océano Pacífico Norte Mexicano de SSH y SST (1993–2022), y RRS (convertidos a concentración de clorofila-a), 1997 a 2025, para calcular las tendencias a largo plazo, varianza explicada y un análisis armónico. Se utilizó el parámetro de Okubo-Weiss en conjunto a la función “SimpleEddyDetection” para la detección de remolinos y sus parámetros. En este estudio se encontró que la temperatura superficial del mar tiene una tendencia a largo plazo positiva, mientras que la elevación del mar es positiva en la región norte y negativa al sur. Por otro lado, la clorofila presentó una tendencia positiva en zona oceánica, y negativa cerca de la costa. No se identificaron efectos significativos de eventos interanuales en los remolinos. En la región norte del área de estudio, los remolinos de mesoescala presentaron tendencias a disminuir en el número de remolinos y en sus propiedades físicas, causado por el cambio climático.

Palabras clave: *Cambio climático, remolinos, Okubo-Weiss, Océano Pacífico Norte Mexicano.*

Dedicatoria

A mis padres Jaime y Miriam, por estar siempre a mi lado apoyarme a cumplir mis sueños y metas, por enseñarme tantas cosas de la vida e impulsarme a seguir mejorando, y por criarme para ser la persona que soy, con valores y principios solidos.

A mi hermano Josué, por las risas, lagrimas, buenos y malos momentos que hemos pasado juntos.

A mis abuelos, Carmen, Charito y Jesús por estar en mi vida, ser unos abuelos tan cariñosos y apoyarme en mis sueños.

A mis tíos y primos, por el cariño y el apoyo que me han brindado, así como los momentos en familia tan bonitos que pasamos.

A mi pareja, Katherine por ser tan amorosa, por estar a mi lado, creer en mi y estar a mi lado.

A mis más cercanos amigos, Ivar, Ivan, Angelica, Conrado, Julio, Amir, Majo, Dulce, entre otros a lo largo de la carrera, por estar y haber estado en los buenos y malos momentos, y apoyandonos para seguir creciendo como personas, estudiantes y profesionistas.

Agradecimientos

A la Dra. Patricia Alvarado Graef, por ser mi directora de tesis y profesora, por creer en mí. Por darme la oportunidad de trabajar con ella, por impulsarme a mejorar y conseguir cosas que no me hubiera imaginado. Así como el apoyo y guía para ir a congresos nacionales e internacionales antes y durante la realización de la tesis. Por ser una excelente profesora con mucha paciencia y dedicación por la ciencia.

Al Dr. Eduardo Santamaria del Angel, por haber sido mi tutor desde que entre a la carrera hasta el momento de su jubilación, por los consejos y charlas que tuvimos sobre la vida. Por decir las cosas con claridad y directas.

Al cuerpo academico de Geociencias Marinas y Costeras: Gabriela Arreguín, Violeta Fernández y Karla Mejia; por el apoyo económico, emocional y escolar que me brindaron durante la realización de este trabajo de investigación.

Al Dr. Rubén Castro, Dra. Karina Lugo, Dra. Sorayda Tanahara, Mtro .Julio Lopez, Dr. Rodrigo Beaz, Mtro. Daniel Diaz, Dr. Luis Malpica, por brindarme conocimientos, oportunidades y experiencias muy importantes para mi

A la FCM, por los profesores y tecnicos que nos ayudan a generar conocimientos de la oceanografía. De igual manera a los estudiantes que generan un ambiente amigable. Y a personal administrativo que mantienen en funcionamiento la facultad.

Índice

<i>Introducción</i>	1
<i>Materiales y Métodos</i>	5
Área de estudio	5
Adquisición de datos	8
Métodos	8
<i>Resultados</i>	10
Datos sintéticos y datos reales	10
Condiciones generales y estacionalidad	13
Tendencias a largo plazo	19
Remolinos.....	22
Series de tiempo.....	28
<i>Discusión</i>	34
<i>Conclusiones</i>	40
<i>Referencias</i>	42

Introducción

Los océanos tienen un papel muy importante en la regulación del clima, nutrientes y en el ciclo del carbono (IPCC 2019). Debido al incremento en las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, se han generado cambios en los océanos del mundo, afectando la temperatura, estratificación, oxígeno, y el nivel del mar (IPCC 2019; Talley et al. 2016). Dado que estos cambios generan un impacto en la estructura de los ecosistemas (Doney et al. 2020, 2012; IPCC 2019), se han realizado varios esfuerzos internacionales para monitorearlos. Por otra parte, existe una variabilidad considerable entre las cuencas oceánicas, aún cuando los procesos oceanográficos son similares (Lima y Wethey 2012). Por esa razón, se ha vuelto evidente que el análisis de los efectos del cambio climático en océanos mexicanos es esencial para proteger sus recursos y a su población. A pesar que se ha generado mucha información con estas iniciativas, las tendencias y características globales (tasas de cambio, evolución espacial y temporal de variables y fenómenos oceanográficos) no representan de manera adecuada las áreas costeras (Lima y Wethey 2012; Siedlecki et al. 2021).

En México, se han realizado estudios de la variabilidad de la temperatura del océano y del incremento del nivel del mar en océanos (Chiappa-Carrara et al. 2019; Flores et al. 2022; Flores-Morales et al. 2009; Gómez-Villeras et al. 2022; Lluch-Cota et al. 2013; Wells et al. 2017, 2013). Espinosa-Carreón et al. (2004) caracterizaron las propiedades físicas y biológicas del Océano Pacífico frente a la península de Baja California (PBC) en el periodo de 1997–2002, y encontraron un claro gradiente de la temperatura superficial del mar (SST, por sus siglas en inglés, *Sea Surface Temperature*) que incrementa de norte-sur, con isotermas orientadas perpendicularmente a la costa y un rango de valores de temperatura de 17–21 °C. Con respecto a la elevación del nivel del mar

(SSH, por sus siglas en inglés, *Sea Surface Height*), estos autores identificaron un gradiente que incrementa del noroeste-sureste, con isolíneas alineadas paralelas a la línea de costa, y un rango de valores de 0.8–1.1 metros. Por otra parte, los autores describieron la distribución espacial de la concentración de los pigmentos de clorofila, con altas concentraciones observadas a lo largo de la costa (0.6–2 mg/m³), excepto en la región norte, en donde las altas concentraciones fueron encontradas lejos de la costa. Estos valores de grandes concentraciones de clorofila mar adentro coinciden con la presencia del Frente de Ensenada; característica que también es evidente en la distribución espacial de SST y SSH. García-Morales et al. (2025) describió las características costeras y oceánicas de la SST y la Clorofila-a (*Chl-a*, por sus siglas en inglés, *Chlorophyll-a*) frente a la PBC para el periodo de 2000–2022. Encontraron una estacionalidad muy marcada para los periodos cálidos (julio a noviembre) y fríos (enero a junio). En dicho trabajo, registraron que el promedio de la SST presenta intervalo de 17.5–23 °C (disminuyendo hacia el sur) y un promedio de *Chl-a* (que disminuye alejándose de la costa) con un rango de 0.05–1.5 mg/m³. Además, García-Morales et al. (2025) encontraron que en Punta Eugenia (PE) durante el periodo de 2004–2012 se generó un transporte de grandes concentraciones de *Chl-a* hacia ~150 km lejos de la costa, el cuál puede ser atribuido a remolinos (estos fenómenos son descritos más adelante). Estos autores identificaron una gran variabilidad para la SST y la *Chl-a*, con baja SST y alta *Chl-a* para el periodo de 2000–2011, y alta SST con bajas *Chl-a* para el periodo de 2012–2022. Las tendencias que encontraron fueron de ~0.6 °C/año y de ~0.03 mg m³/año, para SST y *Chl-a*, respectivamente.

Espinosa-Carreón et al. (2004) también analizaron la varianza explicada asociada a los ciclos estacionales en el océano adyacente a la PBC; es decir, para la SST, la menor varianza explicada fue encontrada a lo largo de la costa desde PE hacia el norte (45–50 %), mientras que

áreas lejanas a la costa presentaron mayores valores mayores (65–70 %). Zonas con baja varianza en SST fueron asociadas con la presencia de remolinos de mesoescala, cobertura persistente de nubes, y surgencias costeras (Espinosa-Carreón et al. 2004). De acuerdo a dichos autores, la varianza explicada estacional de la SSH fue baja en el área (10–15%), mientras que en la zona costera y norte se presentaron valores moderadamente altos, con un rango de 25–40%. Además, Godínez et al. (2010) encontraron que en la entrada del Golfo de California el 35% de la varianza explicada se debió a la componente estacional, otro 35% a la componente interanual, y un 30% a la componente de mesoescala asociados a una fuerte actividad de remolinos. En cuanto a la concentración de pigmentos de clorofila, los ciclos estacionales explican del 45–65% de la varianza, causados principalmente por surgencias costeras (Espinosa-Carreón et al. 2004). Sin embargo, es necesaria mayor investigación para comprender cómo el cambio climático ha afectado la dinámica del océano, y particularmente en los remolinos de mesoescala.

Los remolinos, que están presentes en los océanos del planeta, son estructuras que rotan y debido a ese movimiento pueden transportar masa y calor (Nagai et al. 2015). La investigación de estos movimientos es mediante la medición de un fluido en rotación, i.e., la vorticidad, calculada usando el curvamiento de la velocidad (Calin Iulian 2018). Otra variable importante para el estudio de los remolinos es la vorticidad absoluta, que es la suma de la vorticidad planetaria (f), debido a la rotación de la Tierra, y la vorticidad relativa (ω), la cual describe la rotación de un fluido con referencia a un punto fijo en la Tierra (Cushman-Roisin y Beckers 2006).

En diferentes estudios se encontró que las propiedades del agua de mar dentro de los remolinos son diferentes a las de agua circundante. Los remolinos pueden ser clasificados como: (1) remolinos anticiclónicos, caracterizados por una elevación del nivel del mar en el centro del

giro, agua cálida, bajas concentraciones de fitoplancton, longevos, y gran desplazamiento; y (2) ciclónicos, caracterizados por una depresión en el centro, bajas temperaturas, grandes concentraciones de fitoplanctón, y suelen ser más comunes (Chelton et al. 2011; Mann and Lazier 2006; Quetz-Que et al. 2022).

Los remolinos de mesoescala presentan una escala espacial que va de decenas a cientos de kilómetros, y temporal en el orden de días a años (Yun et al. 2024). Beech et al. (2022) observaron cambios en la energía cinética de los remolinos de mesoescala, así como una tendencia de los remolinos a moverse hacia los polos. Por otra parte, Yun et al. (2024) sugiere que debido al cambio climático los remolinos de mesoescala en latitudes medias se volverán más frecuentes, con mayor amplitudes y radios, a pesar de las diferencias regionales. Pequeños cambios, pero significativos, en las propiedades de los remolinos se han atribuido al cambio climático (Yun et al. 2024), ya que, los remolinos de mesoescala tienen un papel crucial en el transporte de nutrientes, fitoplancton, y calor en los océanos (Mann y Lazier 2006; Quetz-Que et al. 2022). El estudio de la variabilidad es esencial para tener una descripción más acertada de los cambios esperados en los océanos debido a presión climática en los sistemas asociados con el cambio climático. En el caso del Golfo de México, Li et al. (2022) reportaron un decremento en el área de los remolinos, intensidad, y fuerza. Kurczyn et al. (2012) analizaron remolinos en la zona tropical-subtropical del Océano Pacífico Mexicano e identificaron áreas de generación, propiedades de los remolinos, trayectorias, duración, y el efecto de la variabilidad interanual en los remolinos. Esto reafirma la necesidad de comprender los procesos regionales y un método para describir sus características.

Hang et al. (2022) dieron una descripción detallada de las dificultades y varios métodos para la identificación de remolinos oceánicos. Xing and Yang (2021) compararon los tres

algoritmos principales para detectar remolinos: (1) basado en el parámetro de Okubo-Weiss (OW), (2) *vector-geometry*, y (3) *widing-angle*. Cada uno de estos algoritmos presenta errores en la identificación de remolinos y en la estimación de la magnitud del transporte inducido por remolinos, porque dependen del número, radio, y duración de los remolinos. Encontraron que cada método tiene diferentes ventajas y desventajas, como tasa de detección falsa, definición de los límites de los remolinos, tasa de rastreo, detección de remolinos débiles, errores en la trayectoria de detección, y sobreestimación o subestimación del número de remolinos. Además, estos autores concluyeron que las mediciones *in situ* algunas veces hacen evidente que haya discrepancias entre los datos observados y los resultados de los algoritmos.

En los océanos mexicanos es importante determinar la variabilidad espacial y temporal de los remolinos debido al efecto del cambio climático con el objetivo de coadyuvar en la comprensión de los cambios en productividad y su impacto en pesquerías y economía, así como en los cambios en la circulación y corrientes oceánicas, y el efecto en los contaminantes y florecimientos algales. Por lo tanto, en el presente trabajo se cuantifican algunos de los cambios en los remolinos de mesoescala en el Océano Pacífico Norte Mexicano (OPNM). Para lograr nuestra meta, proponemos una nueva metodología para identificar remolinos, seguido del análisis del efecto de eventos interanuales y el cambio climático en sus propiedades con el tiempo.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El OPNM esta ubicado frente a la costa de la PBC (Fig. 1). Este estudio comprende un área ubicada entre 107–125° O de longitud y 21–32° N de latitud, enfocándonos exclusivamente en el

Océano Pacífico. En el área de estudio, la dinámica oceanográfica es muy compleja y variable, impulsadas por la combinación de factores locales y procesos de gran escala. El Sistema de la Corriente de California, un sistema de corriente de frontera este, es parte de la circulación del Océano Pacífico Norte. Esta corriente es somera y circula hacia el sur, trayendo agua fría y menos salina. Además, en la región costera hay mucha actividad de mesoescala, como lo son las áreas de surgencias a lo largo de la costa, advección fuera de la costa, corrientes de chorro, y remolinos (Talley et al. 2016).

A medida que la Corriente de California fluye hacia el sur, cerca de México, se genera un giro, conocido como el Remolino Sur de California (*Southern California Bight Eddy*), éste gira hacia la costa formando el Frente de Ensenada. Este frente separa el agua fría, eutrófica en el norte, del agua cálida y oligotrófica en el sur (Mirabal-Gómez et al. 2017). Cuando el Frente de Ensenada se desarrolla, una parte de la Corriente de California continua hacia el sur, adentrándose en aguas mexicanas. La extensión de la corriente depende de la estación; por ejemplo, en invierno–primavera la corriente se extiende tan lejos como la punta de la PBC e incursiona en el Golfo de California, mientras que en el verano se retrae hasta PE (Durazo et al. 2010). En PE se presenta un giro semipermanente, generado por la batimetría del área de estudio, volviéndose bien definido durante verano y otoño (Durazo 2015). Mientras que, en el sur, el agua transicional, compuesta por Agua del Golfo de California y Agua Tropical Superficial, es regulada por una onda de Rossby anual, forzamiento local del viento, y radiación costera (Portela et al. 2016).

En el Océano Pacífico frente a la PBC, Kurczyn et al. (2012) identificaron en PE y en Cabo San Lucas áreas de generación de remolinos, debido al cambio abrupto de la morfología costera. PE mostró gran producción de remolinos con baja velocidad de propagación y baja energía cinética

de remolinos. La generación estacional de remolinos puede verse incrementada por corrientes con dirección al océano e intensificación de surengencias costeras. Dichos autores también encontraron que los remolinos presentes en el área poseen una duración de 70 a un máximo de 651 días, con diámetros entre 79–440 km y amplitudes de –23–15 cm. Los autores compararon la generación de remolinos con la variabilidad interanual y encontraron una correlación muy baja, indicando que El Niño/La Niña no afectan a la generación de remolinos.

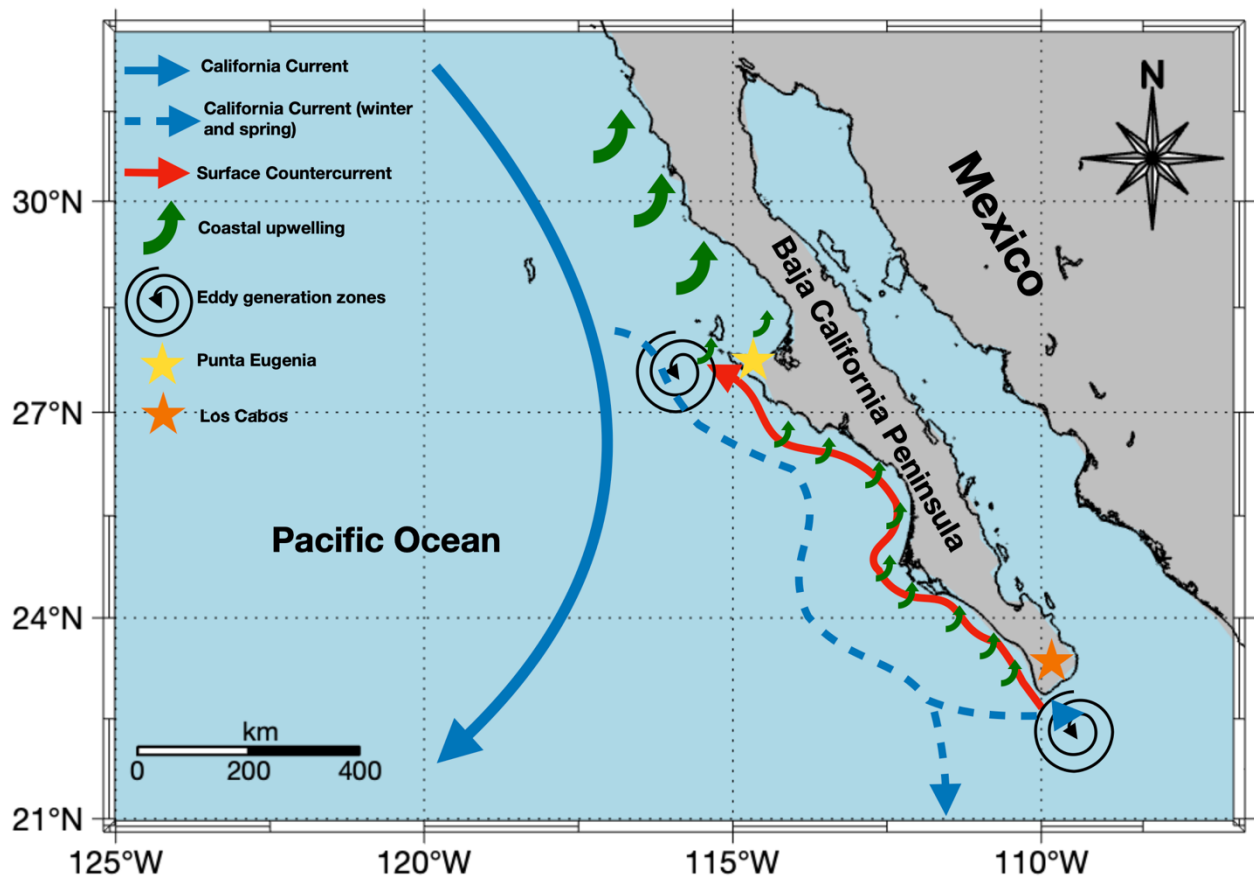


Figura 1. Océano Pacífico Norte Mexicano (OPNM) y la Península de Baja California. Adaptado de Checkley y Barth (2009); Kurczyn et al. (2012); Durazo (2015); y López-Aviles et al. (2024).

Adquisición de datos

En este estudio se usaron datos semanales de elevación geopotencial (SSH) y temperatura de la superficie del mar (SST), con una resolución espacial de 0.125° , para el periodo de 1993 a 2022 (datos obtenidos de <https://doi.org/10.48670/moi-00052>, accesado por última vez en febrero 2025) fueron usados en este estudio. Además, se emplearon datos diarios de reflectancia (RRS, por sus siglas en inglés, Remote Sensing Reflectance) con una resolución de 4 km (datos obtenidos de <https://doi.org/10.48670/moi-00280>, accesado por última vez en febrero 2025), para un periodo desde septiembre de 1997 a marzo de 2025, y con longitudes de onda de 443, 490, y 555 nm fueron usadas. Los datos fueron obtenidos de *Copernicus Marine Data* y el Índice de la Oscilación de El Niño Sur (ONI, por sus siglas en inglés, *Oceanic Niño Index*) de la base de datos del Equipo Web del Centro de Predicciones de la NOAA.

Métodos

A los datos de RSS se les aplicó un modelo empírico regional de Alvarado-Graef et al. (2024) para obtener la concentración de *Chl-a*. Después, para todos los datos, se calcularon las tendencias por el método del mínimo cuadrado, y se utilizó un análisis armónico para las series de tiempo. Datos de SSH fueron utilizados para calcular la velocidad geostrófica y el parámetro de OW, utilizando las siguientes ecuaciones. Primero, se obtuvo el gradiente de la superficie del mar ($(\nabla_{SSH_y}, \nabla_{SSH_x})$):

$$\nabla SSH_y = \partial h / \partial y \quad , \quad (1)$$

$$\nabla SSH_x = \partial h / \partial x \quad , \quad (2)$$

donde **h** es SSH, **x** es la posición E-O, y **y** es la posición N-S. Se utilizó la aproximación de Euler para discretizar los datos y calcular las derivadas numéricas. En segundo, se calcularon los componentes de la velocidad geostrófica (**u**, **v**) usando las siguientes ecuaciones:

$$u = -\left(\frac{1}{f} \nabla SSH_y\right) \quad , \quad (3)$$

$$v = \left(\frac{1}{f} \nabla SSH_x\right) \quad , \quad (4)$$

donde **f** es el parámetro de Coriolis. Estos resultados se utilizaron para calcular la vorticidad relativa ω :

$$\omega = \partial v / \partial x - \partial u / \partial y \quad (5)$$

Para calcular el **parámetro de Okubo-Weiss**, se obtuvieron el esfuerzo normal (**Sn**) y cortante (**Ss**) utilizando las derivadas de la velocidad geostrófica.

$$Sn = \partial u / \partial x - \partial v / \partial y \quad , \quad (6)$$

$$Ss = \partial v / \partial x + \partial u / \partial y \quad , \quad (7)$$

Después, usando **Sn**, **Ss**, y ω , se calculó el **parámetro de OW**.

$$OW = Sn^2 + Ss^2 - \omega^2 \quad (8)$$

Cuando el parámetro de OW es negativo, la vorticidad relativa excede el efecto combinado del esfuerzo normal y cortante, indicando que en un punto dado la rotación es la que domina sobre

la deformación. Nosotros regionalizamos el parámetro de OW basándonos en el análisis de datos sintéticos y satelitales del área de estudio. Determinamos un valor de $-0.15 \times 10^{-10} \text{ s}^{-2}$. Además del parámetro de OW, usamos una función llamada “SimpleEddyDetection” (Xu 2020), la cual detecta remolinos con un radio mayor a 45 km y una amplitud mayor a 3 cm, este método se basa en las anomalías del nivel del mar. Para validar los métodos de detección usamos datos sintéticos. Estos datos fueron generados usando una ecuación racional de dos variables dentro de nuestra área de estudio. A partir de ello, generamos cuatro escenarios: el primero, con un remolino ciclónico; el segundo, con un remolino anticiclónico; el tercero con dos remolinos, uno ciclónico y uno anticiclónico; y el cuarto, sin remolinos.

Resultados

Datos sintéticos y datos reales

Los datos sintéticos se usaron para evaluar la precisión del parámetro OW y de la función “SimpleEddyDetection” (Xu 2020) a través de los diferentes escenarios (Fig. 2). En los casos con un solo remolino, el parámetro de OW identificó de forma fiable los centros, al igual que la función “SimpleEddyDetection”, aunque también la función delineó casi acertadamente los límites, produciendo una forma similar a un círculo. En el escenario con dos remolinos, el parámetro de OW continuó detectando de forma acertada los centros de los remolinos, y la función “SimpleEddyDetection” identificó la frontera; sin embargo, un remolino presentó una forma parecida a un círculo mientras que la otra más parecida a una elipse. Por último, en el escenario de control, donde no hay ningún remolino, el parámetro de OW así como “SimpleEddyDetection” no detectaron remolinos, como era de esperarse. En general, el parámetro de OW fue consistente en

la identificación de los centros de los remolinos, mientras que la función “SimpleEddyDetection” nos brinda una confirmación de los centros, así como los límites de los remolinos. Basándonos en estos resultados preliminares, definiremos en éste trabajo a un remolino como una estructura detectada por ambos criterios, el parámetro de OW y la función “SimpleEddyDetection”.

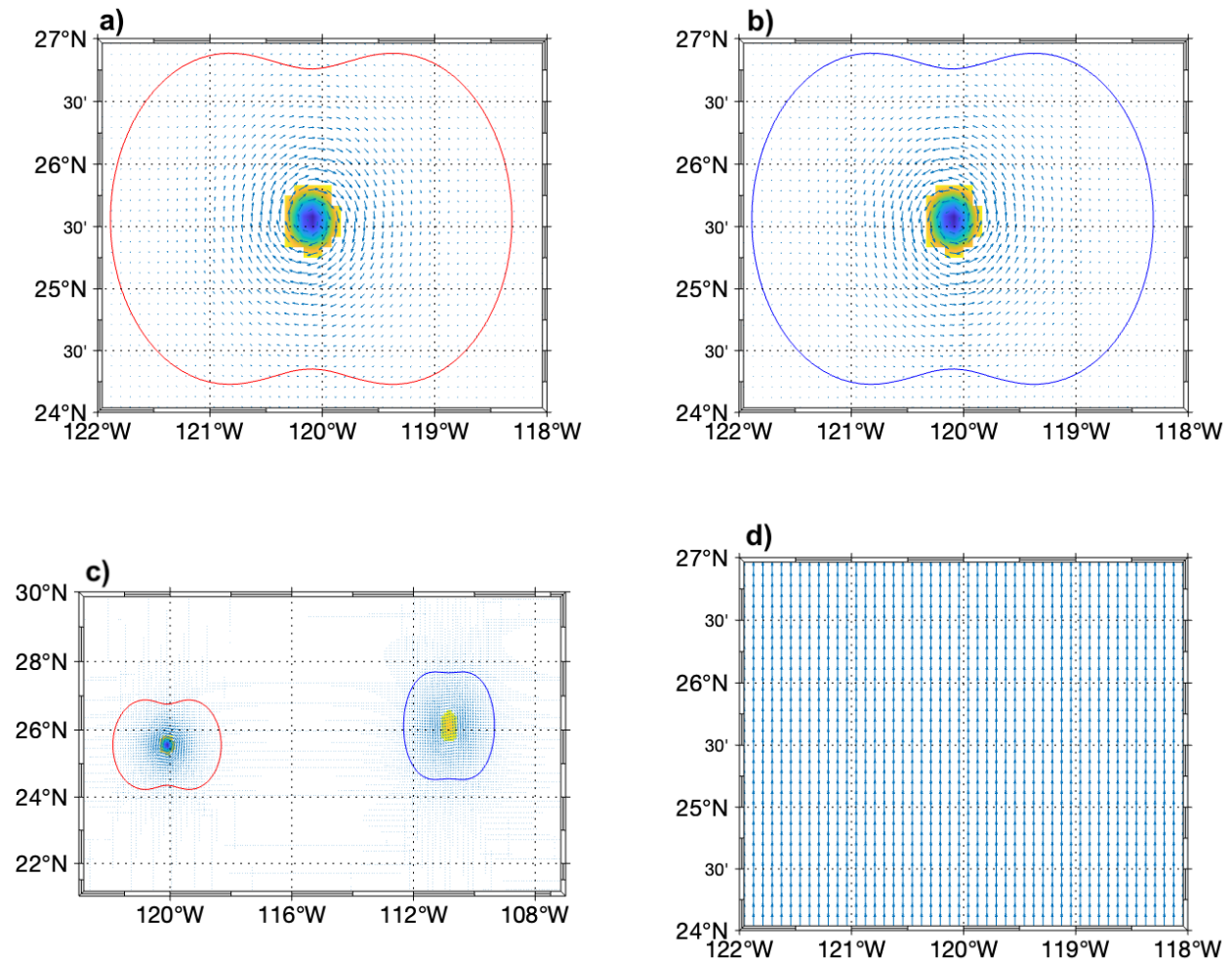


Figura 2. Datos sintético usados para validar los métodos de detección de remolinos, parámetro de OW con valores inferiores a $-0.15 \times 10^{-10} \text{ s}^{-2}$, representados con colores, y la función “SimpleEddyDetection” (Xu 2020), graficada con líneas solidas que indicando los límites de los remolinos, mientras que el color indica el tipo de remolino: azul para ciclónicos y rojo para anticiclónicos. Las flechas pequeñas denotan la velocidad geostrófica. (a) Primer escenario con un remolino ciclónico; (b) Segundo escenario con un remolino anticiclónico; (c) Tercer escenario con un remolino anticiclónico (izquierda) y uno ciclónico (derecha); (d) Cuarto escenario sin remolinos.

El parámetro de OW y la velocidad geostrófica revelan la presencia de remolinos en el área de estudio (Fig. 3). Dentro de los círculos morados se observan los vectores de velocidad revelando el patrón de flujo circular, mientras que el parámetro de OW identifica los centros de los remolinos. En algunos casos, el centro no es un simple punto, sino una región elíptica, o incluso dos zonas distintas con un valor de OW bajo, sugiriendo la presencia de estructuras complejas o que interactúan con los remolinos. Los remolinos bien definidos predominan cerca de la costa y en la zona central del área de estudio.

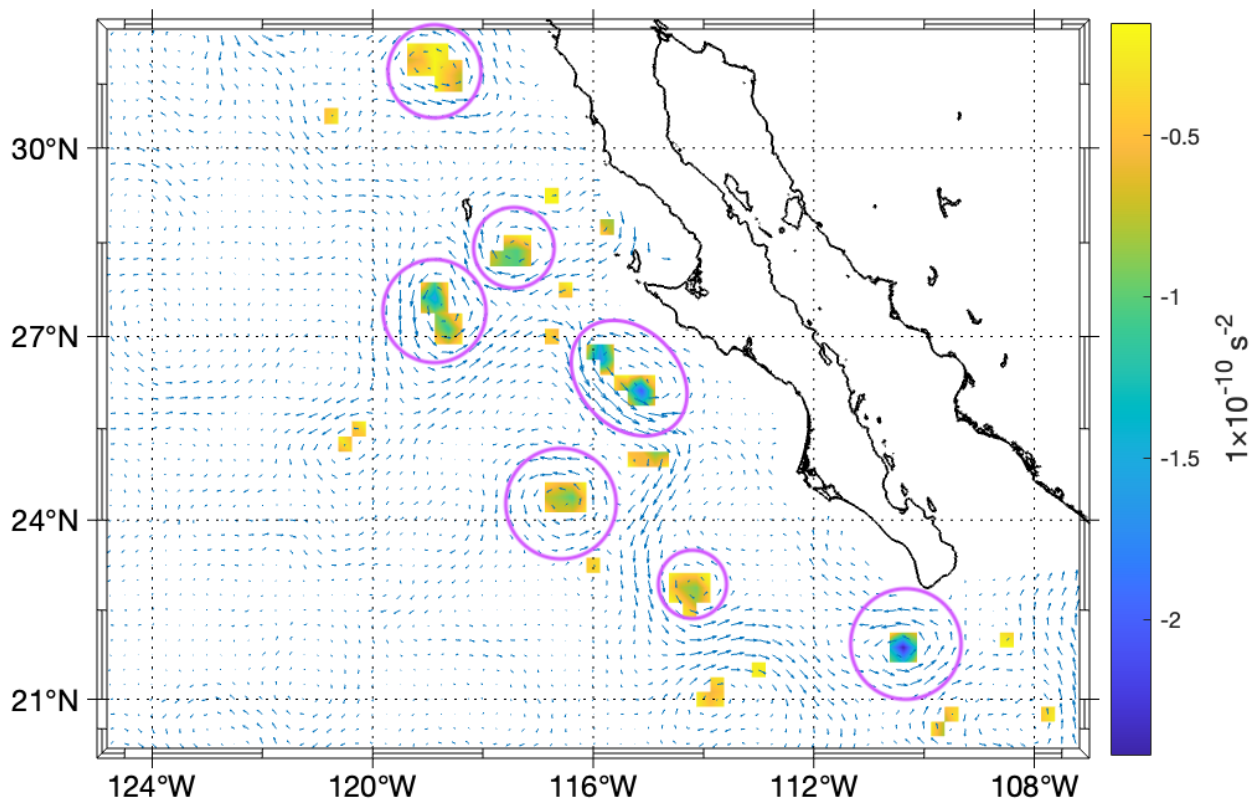


Figure 3. Mapa con el parámetro de Okubo-Weiss ($< -0.15 \times 10^{-10} \text{ s}^{-2}$) representado por los colores, con velocidades geostróficas denotado por flechas azules. Los círculos morados resaltan ejemplos donde el parámetro de OW y los campos de velocidad indican la presencia de remolinos.

Condiciones generales y estacionalidad

Las condiciones generales de la región se encuentran bien definidas, con diferentes gradientes espaciales y estacionales de la SST y SSH, así como en la *Chl-a*, aunque no tan definido. La SST muestra un claro gradiente norte-sur, donde las temperaturas más frías, en un rango de $\sim 16.5\text{--}19\text{ }^{\circ}\text{C}$, se encuentran en la zona norte de la región (Fig. 4a). En contraste, las temperaturas más cálidas ($\sim 27\text{ }^{\circ}\text{C}$), se presentan en la zona sur. La SSH presenta un gradiente bien definido este-oeste. Cerca de la costa, los valores de SSH alcanzan $\sim 0.5\text{ m}$, incrementando gradualmente hasta $\sim 0.8\text{ m}$, lejos de la costa (Fig. 4b), indicando un distintivo gradiente de SSH. Concentraciones significativas de *Chl-a* fueron observadas principalmente cerca de la costa con valores mayores a 1 mg/m^3 (Fig. 4c); i.e., las mayores concentraciones se encuentran en cuerpos costeros, mientras que lejos de la costa las concentraciones de *Chl-a* son cercanas a 0 mg/m^3 .

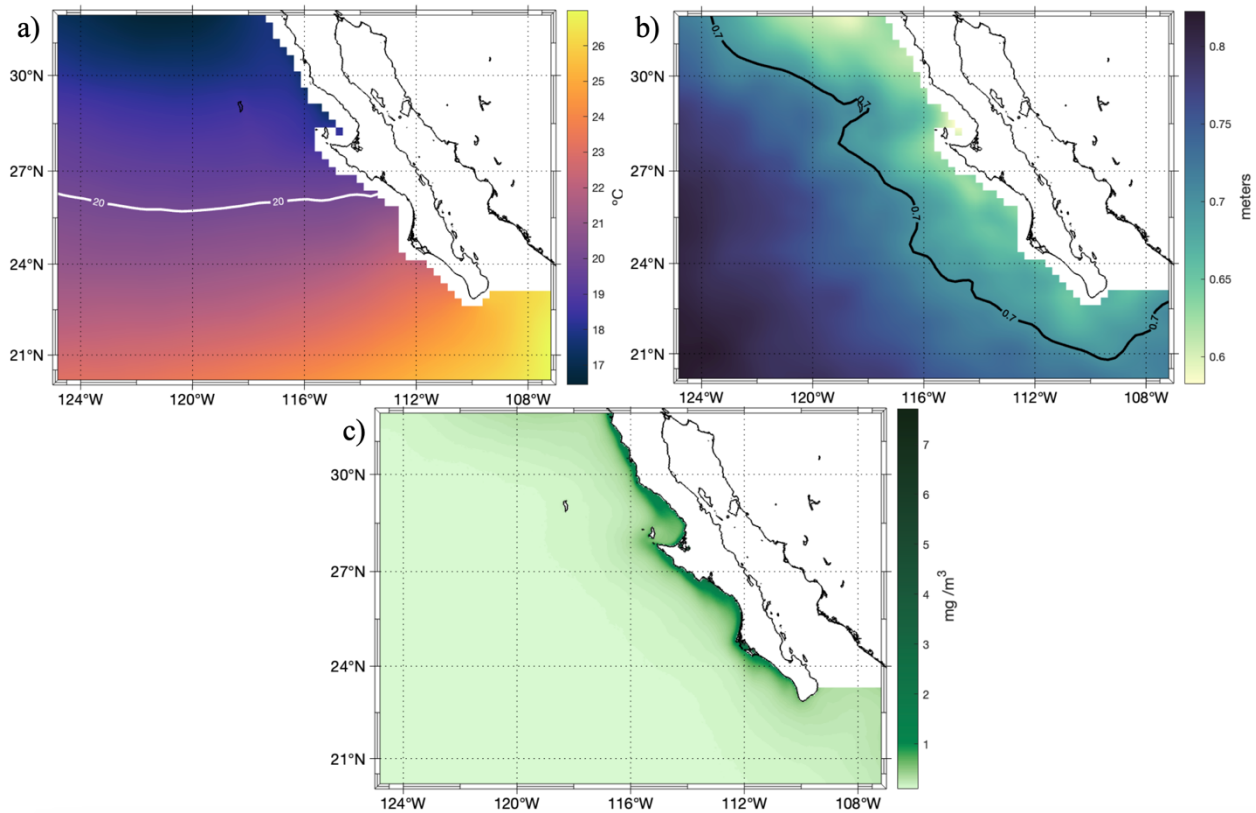


Figure 4. Condiciones generales de la SST (a), con isoterma a los 20° C, y SSH (b), con isolínea a los 0.7 m, los valores son promedios del periodo de 1993 a 2022, y *Chl-a* (c), promedio de valores del periodo de 1997 a 2025.

Aunque los patrones generales se mantiene, se observan variaciones estacionales en la SST (Fig. 5). Durante el invierno, aproximadamente en tres cuartos de la PBC, cerca y lejos de la costa, se presentan temperaturas debajo de 20 °C, mientras que las temperaturas más cálidas (~24 °C) se encuentran cerca de la entrada del Golfo de California. En primavera, la mayor parte del área de estudio permanece bajo los 20 °C, excepto entre las latitudes de 21-21° N, donde la temperatura excede los 20 °C. Lejos de la costa el agua permanece fría (21 °C), mientras que en áreas cercanas a la costa, principalmente en la entrada del Golfo de California alcanza los 24 °C. En verano, se presenta un calentamiento abrupto del agua en la región sur. La isoterma de 20 °C se retracta a la

mitad de la PBC, y la temperatura en el sur incrementa llegando a los 28-29 °C. La isoterma de los 20 °C alcanza su posición más norteña durante el otoño y la máxima temperatura se expande en la región sur de la PBC.

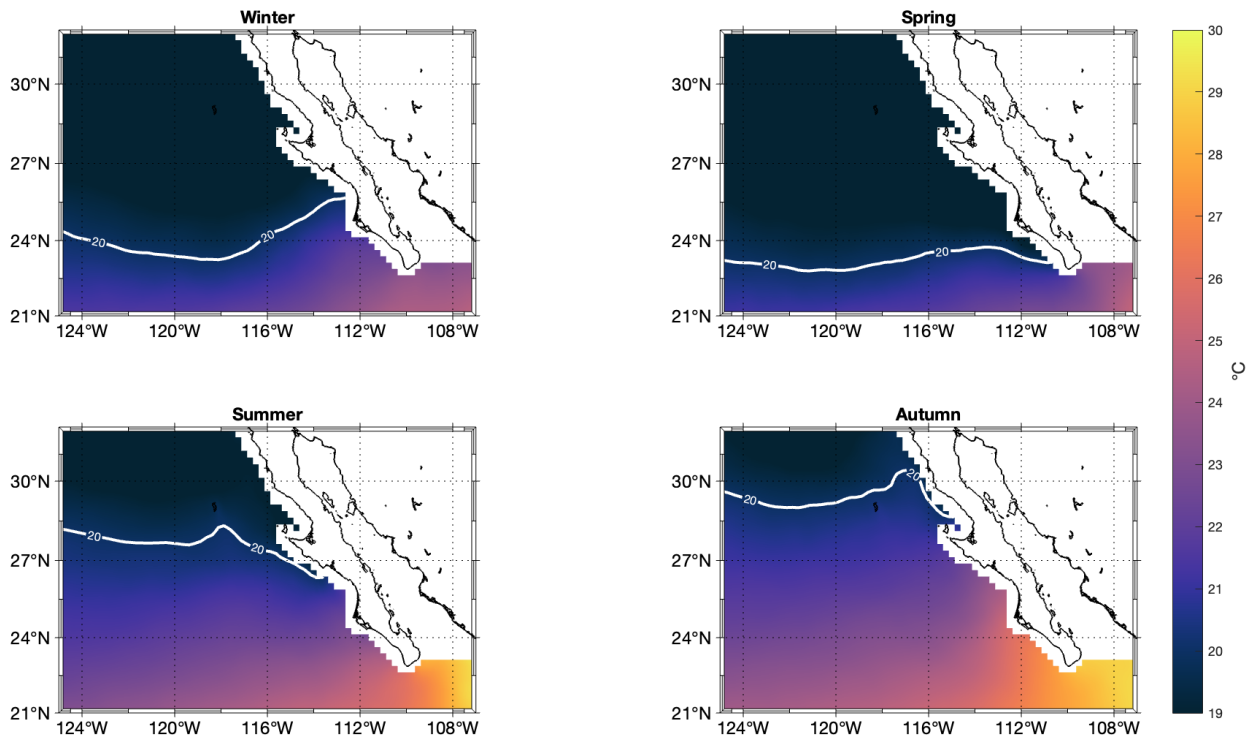


Figura 5. Estacionalidad promedio de SST, con isoterma indicando los 20 °C.

La variabilidad estacional de la SSH presenta un patrón similar a las condiciones generales (Fig. 6). Durante invierno, primavera y verano, se presentaron las elevaciones menores en la región norte y en las zonas cercanas a la costa. Sin embargo, en otoño, la isolínea no cubre por completo la península, aunque las elevaciones menores permanecen cerca de la costa, y las elevaciones mayores se presentan en la región suroeste del mapa y en la entrada del Golfo de California.

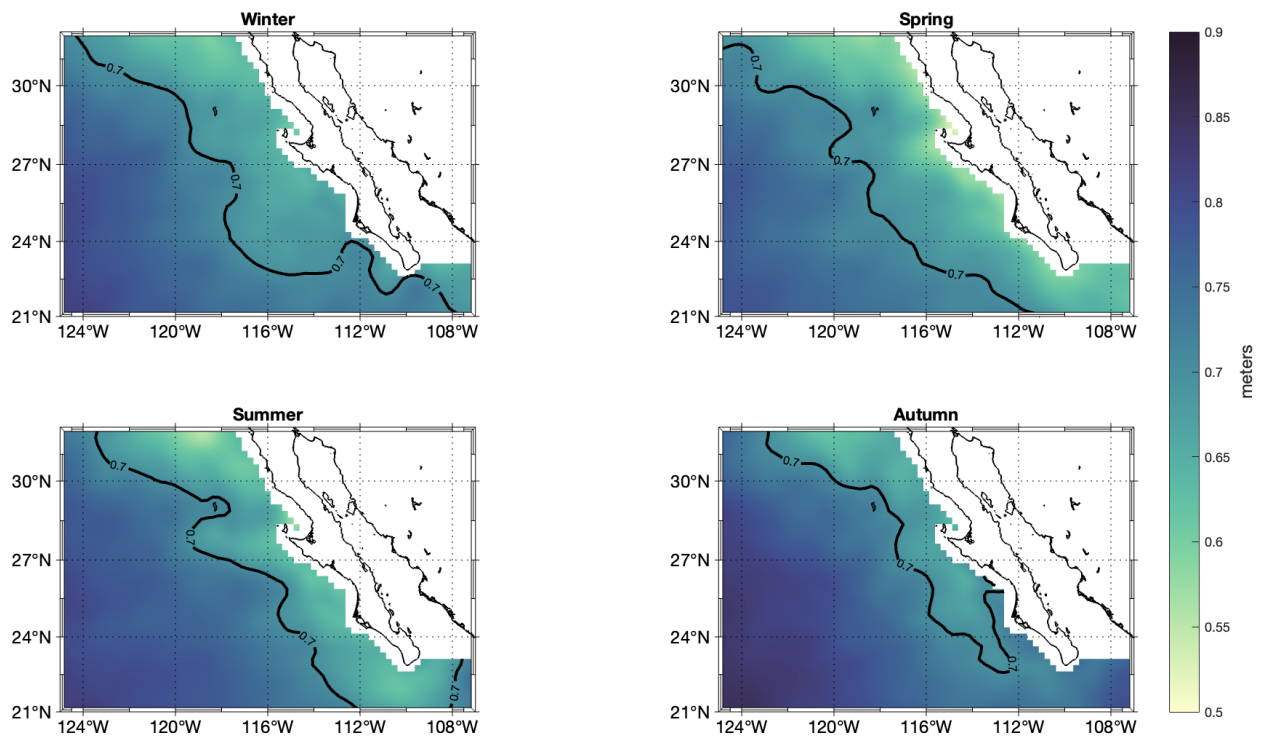


Figura 6. Promedio estacional de SSH, con isolínea a los 0.7 m.

La variación estacional fue consistente en las altas concentraciones de *Chl-a* mostrándolas cerca de la costa (Fig. 7), i.e., un patrón espacial similar a las condiciones generales. Durante primavera y verano los valores de *Chl-a* incrementan a lo largo de la costa y se extienden algunos kilómetros lejos de la costa, mientras que en aguas oceánicas las concentraciones permanecen muy bajas. Durante invierno y otoño los mayores valores de *Chl-a* se mantienen confinados a regiones costeras y curpos costeros.

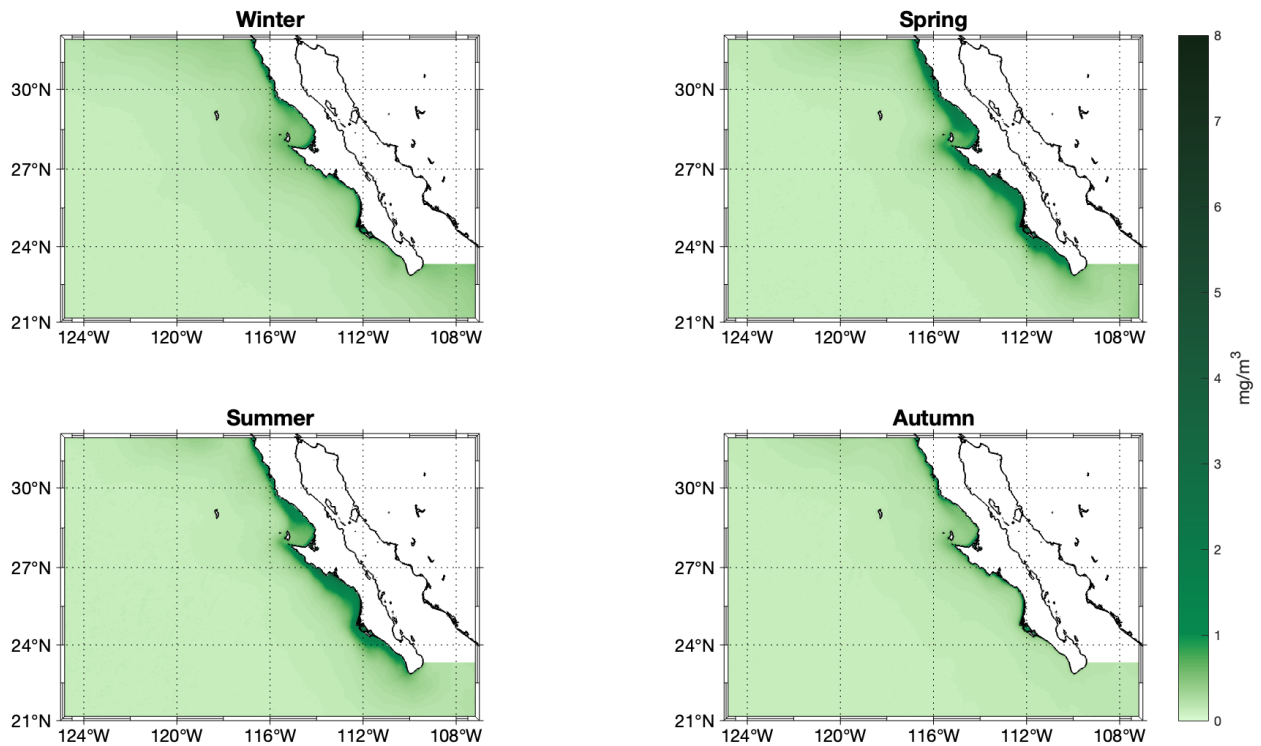


Figura 7. Promedio estacional de *Chl-a*.

Los cambios estacionales presentaron frecuencias anuales y semianuales. Para cuantificar cuanto contribuye cada frecuencia se realizó un análisis armónico para calcular la varianza explicada para ambas frecuencias. En la región sur de la PBC, la varianza explicada de la SST es mayor al 80% (Fig. 8). Los valores menores presentados para la varianza explicada (alrededor de 55%) de la SST, se observa en la región media de la PBC y en la zona norte lejos de la costa.

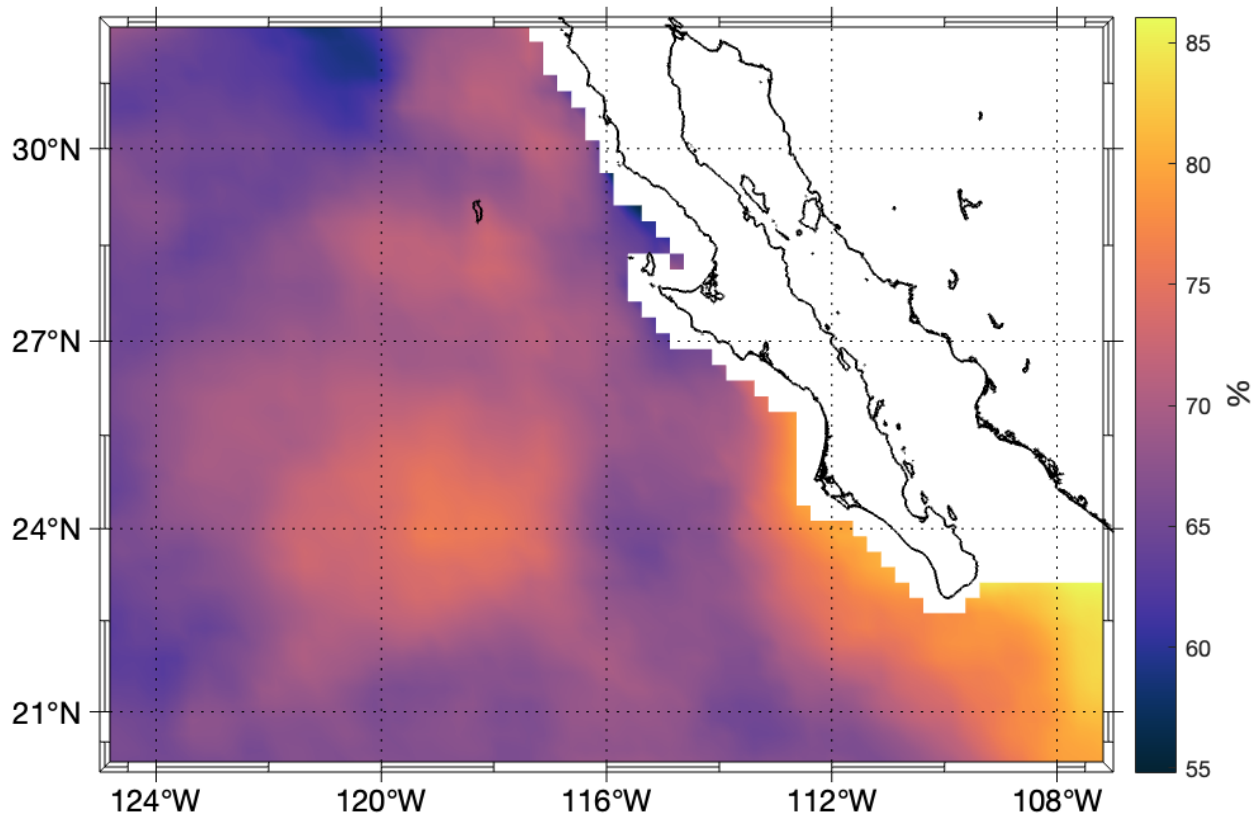


Figure 8. Porcentajes de la varianza explicada para frecuencias anuales y semianuales de la SST.

Las frecuencias anuales y semianuales únicamente explican del 0 al 60% para la serie de tiempo SSH (Fig. 9). Los mayores porcentajes se observan cerca de la costa en la zona sur de la PBC y en la entrada del Golfo de California. En la región sur lejos de la costa, se presenta un área donde la varianza explicada alcanzan una dominancia de 40%. Se presenta una banda paralela a la costa con valores del 10%. Algo similar sucede en la zona norte lejos de la costa, donde los porcentajes observados son menores al 10%. En el área oceánica se observa una mancha donde se presenta valores grandes de la varianza explicada de la SST, ésta coincide con el área donde se presentan porcentajes elevados de SSH.

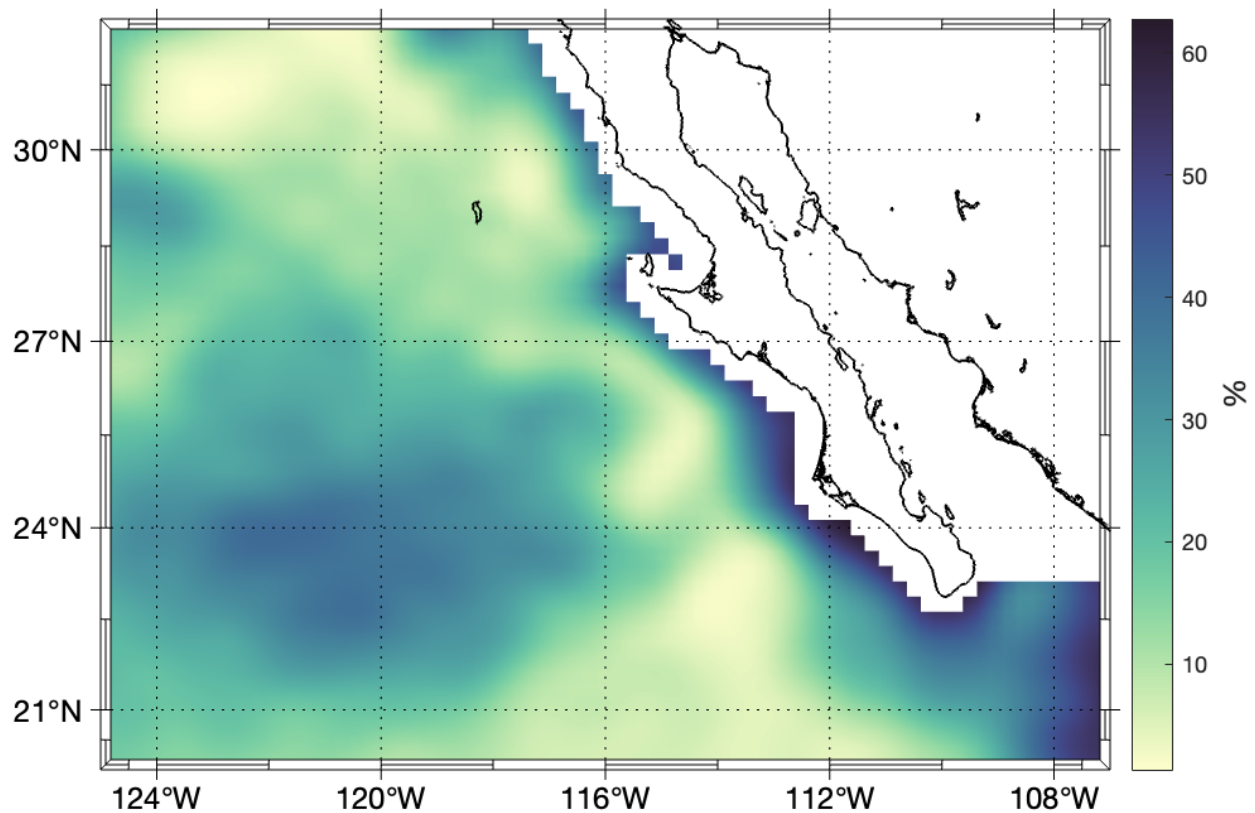


Figure 9. Porcentajes de la varianza explicada debido a la frecuencia anual y semianual de la SSH.

Tendencias a largo plazo

En el OPNM la tendencia lineal de los datos de SST muestran valores positivos en la región (Fig. 10). En la zona norte se observa un gradiente costa-océano, en donde las mayores tendencias se presentan a lo largo de la costa, mientras que en regiones lejos de la costa se observan valores bajos. Las mayores tendencias ($0.03\text{--}0.0392\text{ }^{\circ}\text{C/año}$) se encuentran en una franja entre $120\text{--}110^{\circ}$ O, cerca del Frente de Ensenada, donde se presentan las tasas de cambio máximas. En contraste, las menores tendencias ($0.01\text{ }^{\circ}\text{C/año}$) se presentan en un área lejos de la costa delimitada por $125\text{--}119^{\circ}$ O y $24\text{--}32^{\circ}$ N.

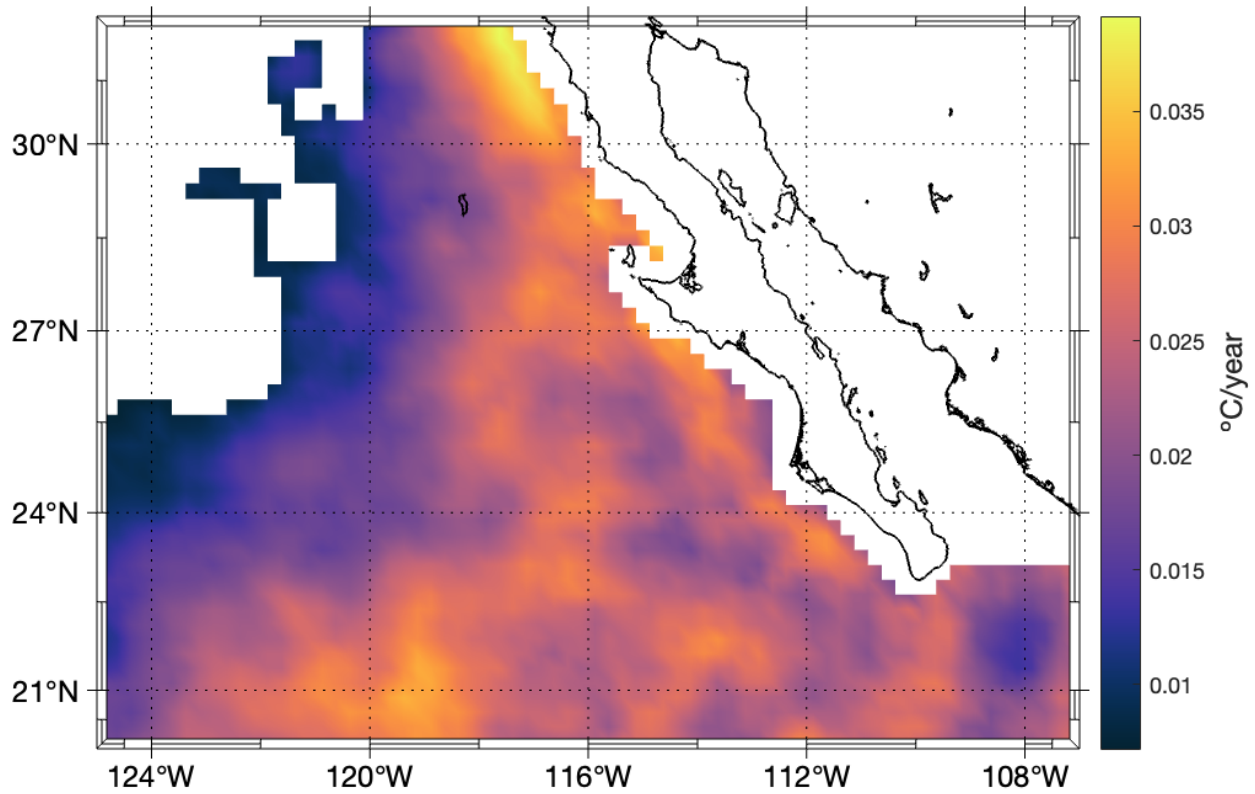


Figure 10. Tendencia lineal de SST ($p < 0.1$) para el Océano Pacífico Norte Mexicano.

Las tendencias de SSH presentan valores positivos y negativos, formando un gradiente norte-sur (Fig. 11). Las tendencias negativas dominan la región norte, mientras que las positivas se presenta en el área más sureña. Las mayores tendencias presentes en la región sur alcanza valores de 0.0013 m/año, mientras que las mínimas tasas en el norte es de -0.0019 m/año. Además, algunas áreas en la Figura 11 no presentan tendencias estadísticamente aceptadas.

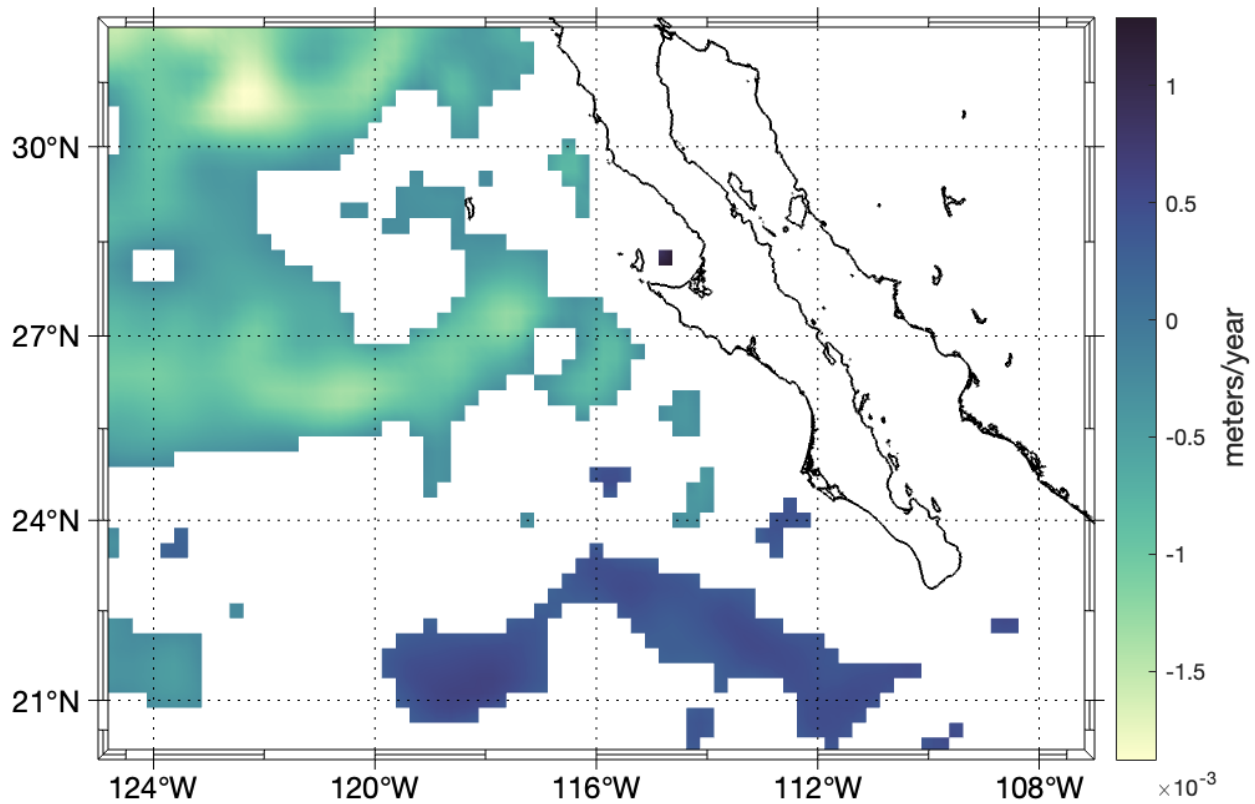


Figure 11. Tendencia lineal de SSH ($p < 0.1$) para el Océano Pacífico Norte Mexicano.

Las tendencias de *Chl-a* presentan valores positivos y negativos, presentando tendencias positivas a lo largo de la línea de costa y en regiones oceánicas (Fig. 12). Sin embargo, áreas con tendencias negativas se intercalan entre la zona oceánica y costera, con valores negativos cerca de aguas costeras. Además, las tendencias negativas son evidentes en la región sur de la PBC, extendiéndose hasta la zona norte.

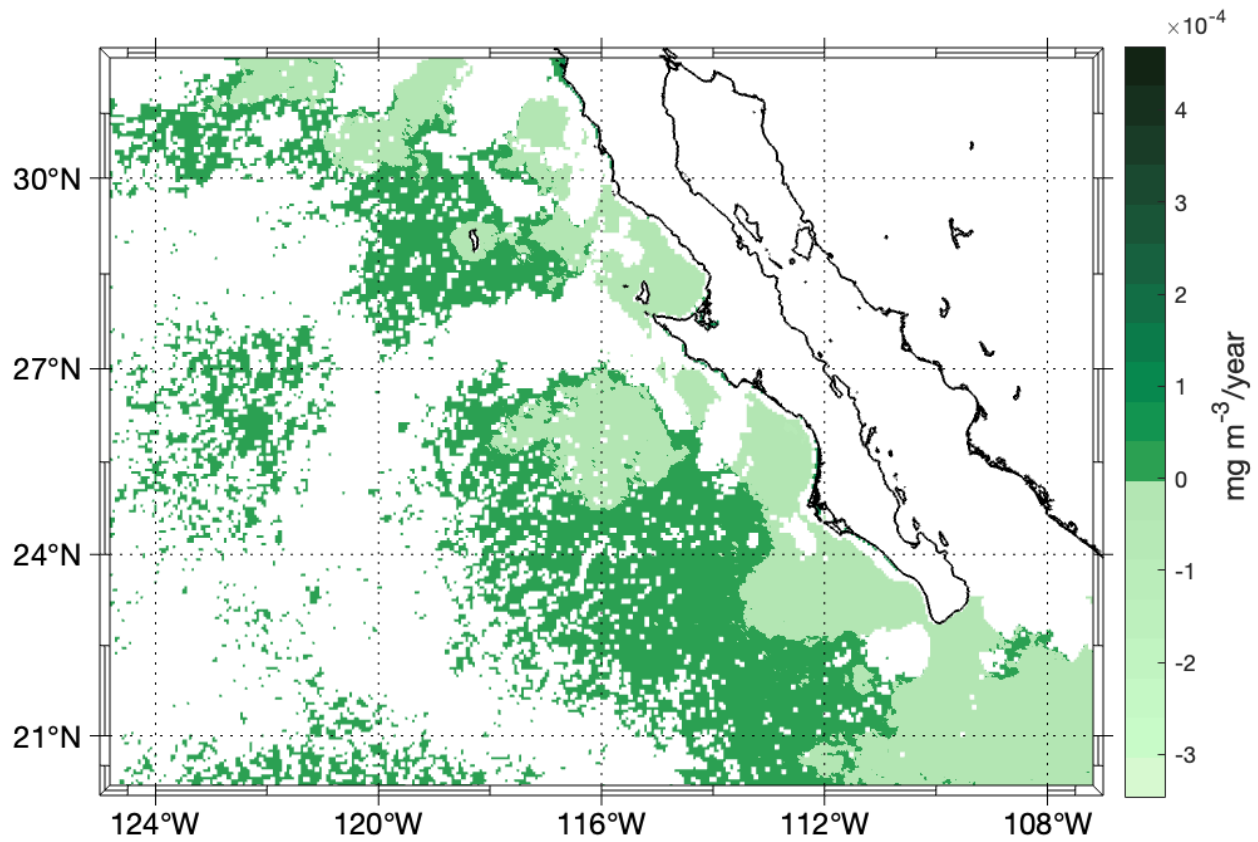


Figure 12. Tendencia lineal de *Chl-a* ($p < 0.1$) para el Océano Pacífico Norte Mexicano.

Remolinos

La distribución espacial de los remolinos en el OPNM revela una alta concentración de ellos cerca de la región norte de la PBC, particularmente entre 27–31° N (Fig. 13). Otra región con gran actividad de remolinos está ubicada en el sur de la PBC, entre 112–108° O.

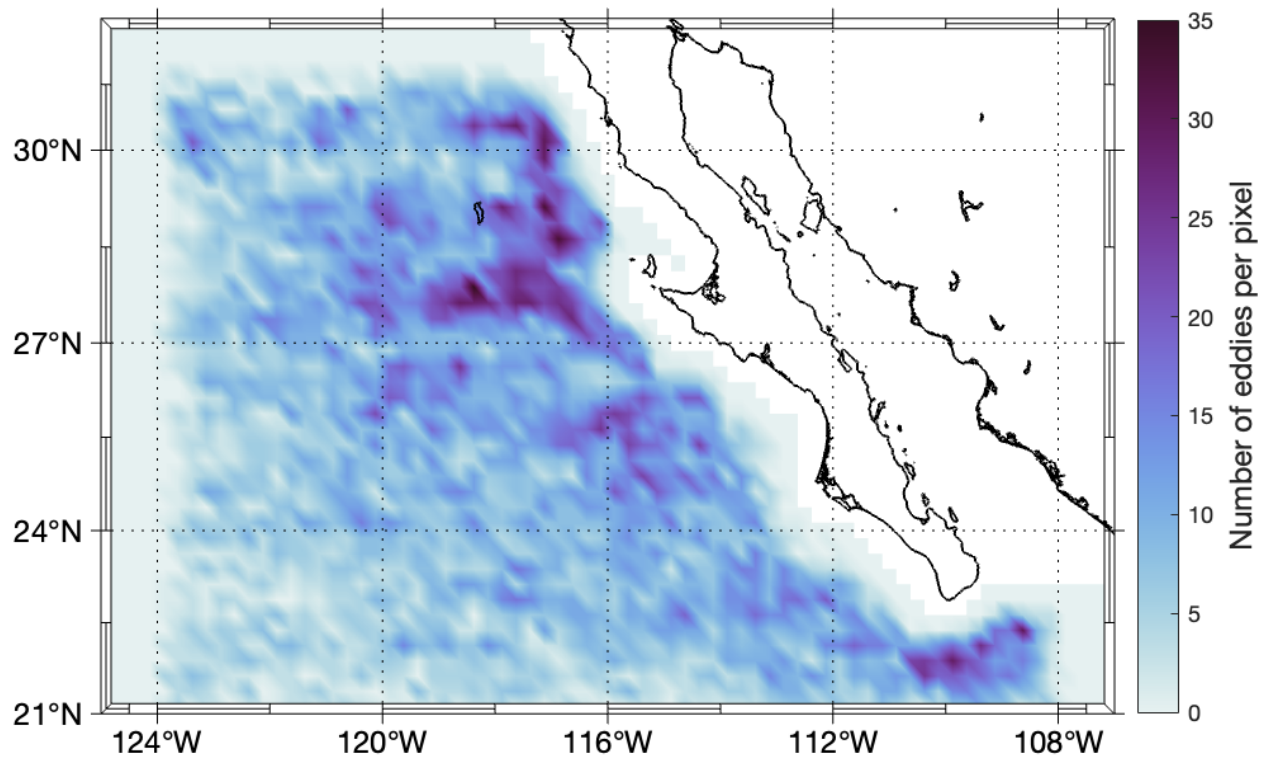


Figure 13. Número de remolinos por pixel para el periodo de 1993 a 2022.

Para evaluar el efecto de eventos interanuales en las propiedades de los remolinos, realizamos un análisis para toda el área de estudio, enfocándonos en años donde dominaba una fase del ONI, para identificar similitudes y diferencias (Tabla I). El mayor número de remolinos ocurrió durante La Niña. En el periodo de El Niño se presentaron los valores promedio más altos para la amplitud (5.28 cm) y radio (88.18 km). Sin embargo, la amplitud máxima reportada (19.35) se presentó durante la fase Normal, mientras que al mayor radio (156.68 km) se observó durante La Niña. No se presentaron diferencias significativas para la amplitud y el radio en las tres fases del ONI ($p > 0.1$). Estos resultados sugieren que dentro del área de estudio, la variabilidad interanual asociada a los diferentes fases del ONI no presenta una influencia sobre la amplitud o el radio de los remolinos.

Tabla I. Comparación entre diferentes fases del ONI.

	1993 (Normal)	2000 (La Niña)	2015 (El Niño)
Anticiclónico	102	111	73
Ciclónico	118	126	126
Amplitud radio (cm)	5.3925	5.1881	5.2880
Desviación estándar del radio	3.0776	1.9117	1.9559
Amplitud máxima	19.3563	11.1438	11.2375
Amplitud mínima	3.0083	3.0104	3.0021
Radio promedio (km)	85.1976	87.7289	88.188
Desviación estándar del radio	19.1810	21.9416	23.4052
Radio máximo	141.4317	156.6899	149.4606
Radio mínimo	48.4082	46.6823	46.8937

Debido a que no se encontraron diferencias significativas en el área de estudio, decidimos dividirla en seis zonas: tres regiones costeras y tres oceánicas. Esta partición nos permite realizar análisis con mayor detalle de los efectos del ONI en los parámetros de los remolinos (Fig. 14). Realizamos una correlación entre los parámetros de los remolinos y el ONI (Tabla II). En todas las zonas para todos los parámetros, el valor de p fue mayor a 0.1, indicando que no hay una relación estadísticamente significativa. En la región norte, la Zona 1 exhibe una correlación positiva para los parámetros, mientras que la Zona 2 mostró únicamente correlaciones negativas. En contraste, la región central y sur, presentaron correlaciones positivas.

Tabla II. Correlación entre ONI y cada parámetro de los remolinos, donde la p es el p -value, y r es el valor de la correlación.

	Zona 1		Zona 2		Zona 3		Zona 4		Zona 5		Zona 6	
	p	r	p	r	p	r	p	r	p	r	p	r
Remolinos anticiclónicos	0.2163	0.0653	0.1149	-0.0832	0.8466	0.0102	0.1406	0.0778	0.9863	0.0009	0.4466	0.0402
Remolinos ciclónicos	0.7416	0.0174	0.1149	-0.0402	0.1673	0.0729	0.1406	0.0778	0.9863	0.0009	0.4466	0.0402
Amplitud promedio (cm)	0.4963	0.0360	0.3378	-0.0507	0.148	0.0763	0.1406	0.0778	0.9863	0.0009	0.4466	0.0402
Radio promedio (km)	0.3815	0.0463	0.3804	-0.0464	0.1651	0.0733	0.1406	0.0778	0.9863	0.0009	0.4466	0.0402

El análisis no mostró un efecto significativo de eventos interanuales en parámetros de remolinos para las seis zonas. Realizamos un estudio de cada zona para comprender las diferencias de los parámetros de los remolinos (Fig. 14). La tendencia del radio promedio a lo largo del área de estudio mostró valores negativos. Además, la tendencia positiva de la amplitud promedio se observó en la Zona 4, 5 y 6, sugiriendo un incremento en la amplitud promedio de los remolinos en la región sur del área de estudio. En la Zona 1 las tendencias con valores dentro del umbral para ser estadísticamente significativos fueron los anticiclones, ciclones, amplitud promedio, y amplitud radio, con una tendencia negativa. Un patrón similar se observa en la Zona 2, donde todas las tendencias son negativas; sin embargo, el valor de p para los remolinos anticiclónicos no entran en el umbral de significancia.

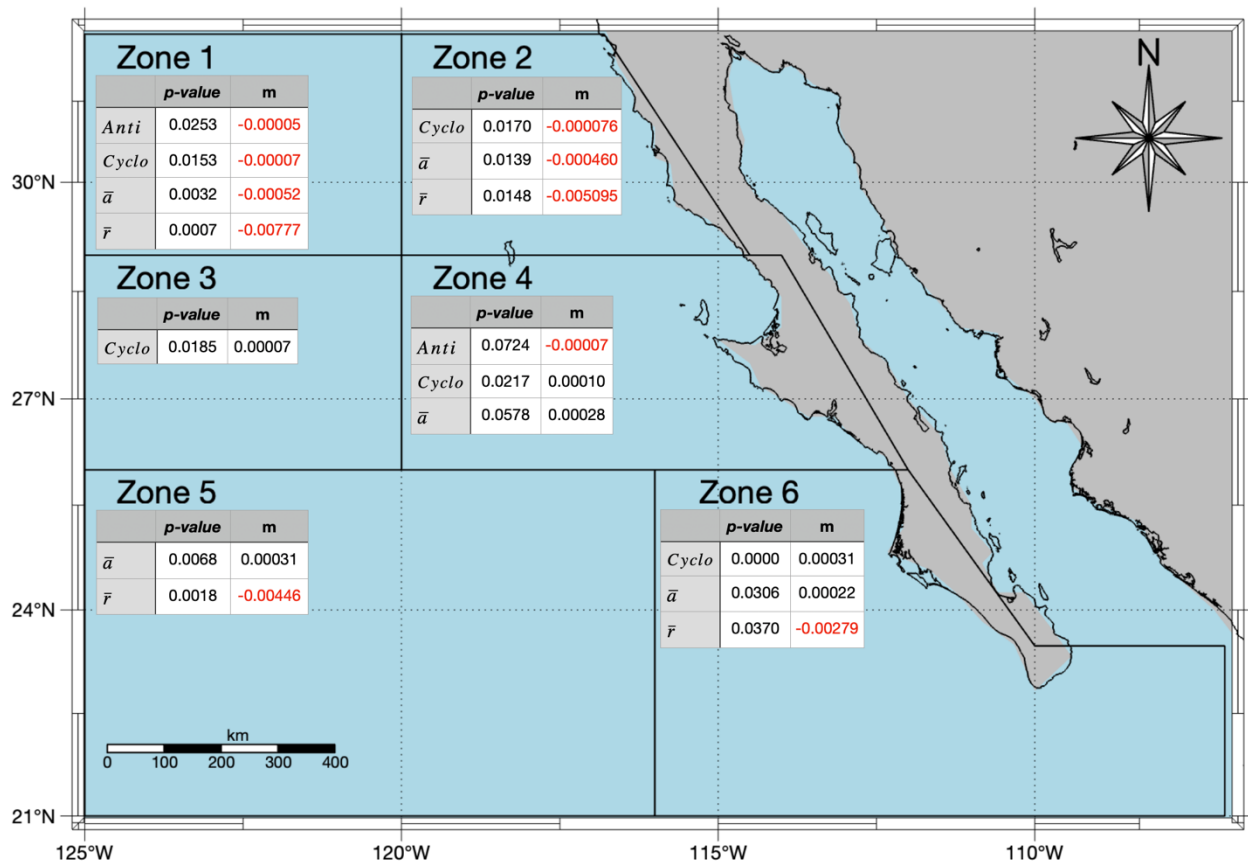


Figura 14. Partición del área de estudio en seis zonas. Zona 2, 4 y 6 corresponden a la región costera, mientras zona 1, 3 y 5 representan la región oceánica. Cada zona incluye una tabla mostrando la tendencia a largo plazo (*m*) para los parámetros de los remolinos y su *p-value* (solo se muestran tendencias con un *p-value* menos a 0.1). Los títulos de las filas *Anti*, *Cyclo*, \bar{a} , and \bar{r} , representan remolinos anticiclónicos, remolinos ciclónicos, amplitud promedio, y radio promedio, respectivamente.

Cuando se analizó cada zona por separado (Tabla II), en las Zonas 1–3 se reportó el menor número de remolinos, comparado con las Zonas 4–6. En todas las zonas los remolinos ciclónicos tienen mayor aparición que los anticiclónicos. El valor promedio más grande de la amplitud (6.2844 cm) y el valor máximo de la amplitud (20.4396 cm) se registraron en la Zona 4, mientras que el mayor promedio del radio (96.092 km) y el radio máximo (169.9219 km) se presentaron en la Zona 3.

Tabla III. Resumen de las características de los remolinos para cada zona.

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6
Anticiclónico	317	539	619	1353	1557	1461
Ciclónico	588	768	817	1713	2345	2315
Amplitud promedio (cm)	5.4441	5.7820	5.8706	6.2844	5.1111	5.2950
Desviación estándar de la amplitud	2.3171	2.4688	2.8292	2.9296	2.1181	1.9211
Amplitud máxima	17.2354	16.1688	19.4063	20.4396	20.0438	16.6030
Amplitud mínima	3.0063	3.0063	3.0000	3.0029	3.0000	3.0000
Radio promedio (km)	78.6483	71.6415	96.0920	83.0980	93.7740	81.1580
Desviación estándar del radio	17.9506	18.4584	21.8826	22.4170	21.2282	19.8722
Radio máximo	138.2877	135.899	169.9219	155.1059	161.7277	152.2864
Radio mínimo	45.9510	45.9389	46.5845	46.4346	47.0871	45.0044

Se realizó una comparación estadística para determinar si los valores de la amplitud y el radio son similares entre zonas, se analizaron separados usando un umbral de p de 0.1. El resultado indicó que los radios son diferentes entre todas las zonas, con un $p < 0.1$. Sin embargo, para la amplitud, la mayoría de las zonas mostraron diferencias estadísticas significativas entre zonas, excepto para la Zona 2 y Zona 3 ($p = 0.3812$), que son similares.

Series de tiempo

Las series de tiempo para la amplitud promedio revela diferentes variaciones espaciales y temporales en el área de estudio. En la región norte (Zona 1 y 2), el número de remolinos detectados fueron menores (Tabla III) y exhibe tendencias negativas (Fig. 14). La Zona 2 muestra gran variabilidad de la serie de tiempo de la amplitud promedio comparado con la Zona 1. En la región central (Zona 3 y 4), solo la Zona 4 muestra tendencias positivas estadísticamente significativas ($p\text{-value} < 0.1$) (Fig. 14). Además, la Zona 4 presenta mayor número de remolinos y gran variabilidad en la amplitud promedio comparada a las Zona 3. En la región sur (Zona 5 y 6) se presentan el mayor número de remolinos y ambas zonas poseen tendencias positivas del promedio de la amplitud.

Al comparar las regiones oceánicas y costeras, se observa que los remolinos son más frecuentes y presentan mayor variabilidad cerca de la costa en la región del norte y central. En contraste en la zona oceánica de la región sur se encuentra una gran frecuencia de remolinos. Además, la región central y sur mostraron tendencias positivas para la amplitud promedio, y en el norte una tendencia negativa. Se comparó una parte de la serie de tiempo de la amplitud promedio con el ONI. A pesar de que algunos picos parecen coincidir con ambos grupos de datos, el análisis no reveló un patrón consistente (Fig. 15).

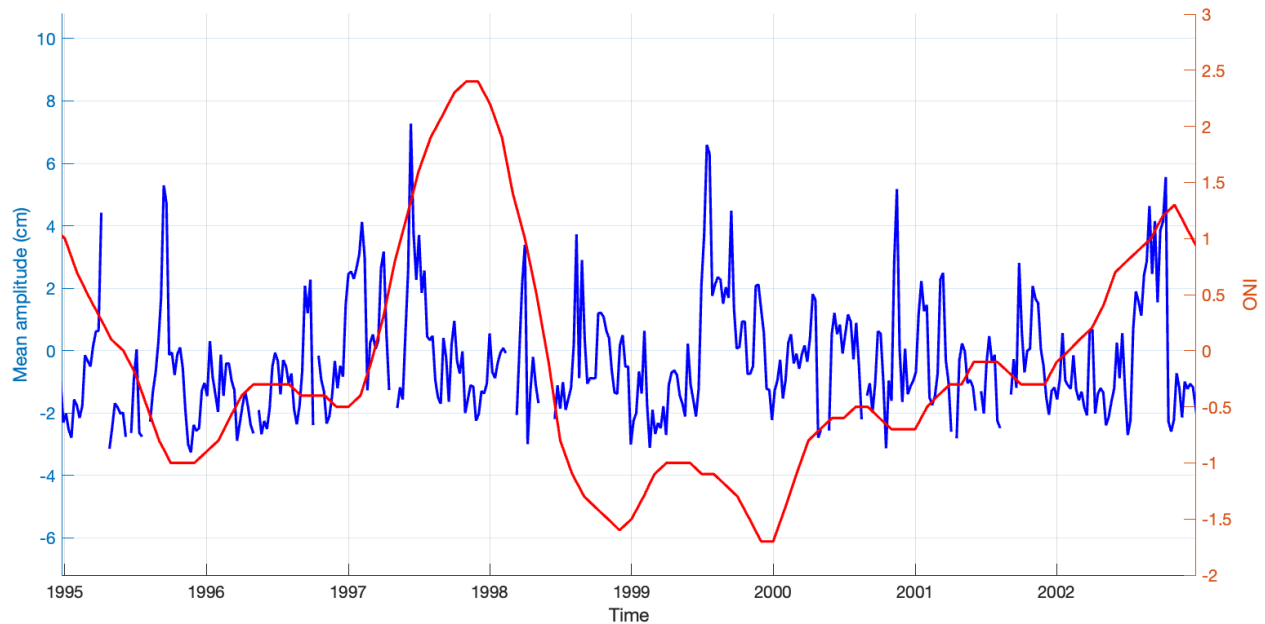


Figura 15. Series de tiempo de amplitud promedio (cm) comparado con el ONI para la Zona 4, desde 1995 a 2003. Sin los datos que no presentaron ningún remolino.

La serie de tiempo del radio promedio muestra diferencias en variaciones espaciales y temporales. En la Zona 1, 2, y 3 se observó un patrón similar en las series de tiempo. Asimismo, en las Zonas 4 y 6 la tendencia de la variabilidad es parecida. En la región norte y sur se presentaron tendencias negativas en el radio promedio (Fig. 14). En contraste, no se observaron tendencias claras en la región central, sugiriendo radios más estables en esa área. Al comparar la serie de tiempo del radio promedio con el ONI, no es evidente un patrón similar para las variables en la gráfica (Fig. 16).

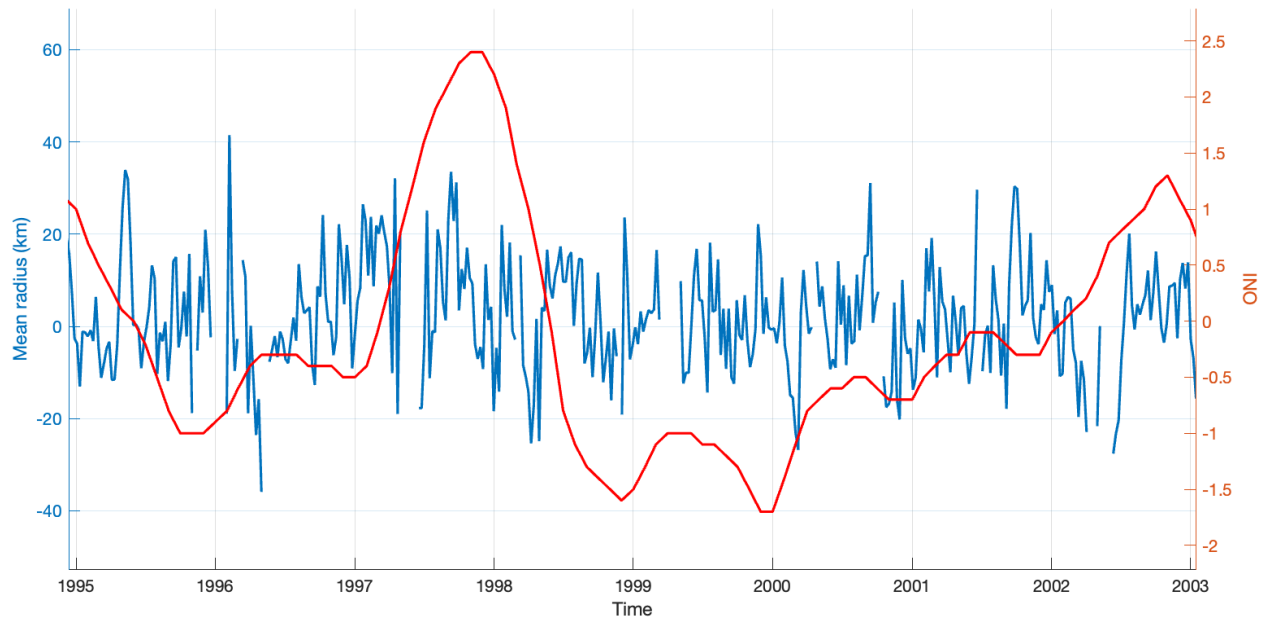


Figura 16. Series de tiempo para radio promedio (km) comparado con el ONI de la Zona 4, desde 1995 a 2003. Sin los datos que no presentaron ningún remolino.

Para identificar las frecuencias más importantes se realizaron periodogramas. Estos mostraron un periodo frecuente para los remolinos anticiclónicos de *8 semanas*, excepto en la Zona 2, donde el periodo fue de *9 semanas* (Fig. 17). En Zona 1, los periodos más importantes, en orden de importancia, son *8, 10 y 14 semanas*, mientras que en la Zona 2 son *9, 5 y 3 semanas*. La Zona 3 presenta periodos de *9, 8 y 12 semanas*; mientras que en la Zona 4 son de *19, 14 y 8 semanas*. En la región del sur, la Zona 5 presentó periodos de *8, 17 y 7 semanas*, y para la Zona 6 dominaron los ciclos de *8, 6 y 4 semanas*.

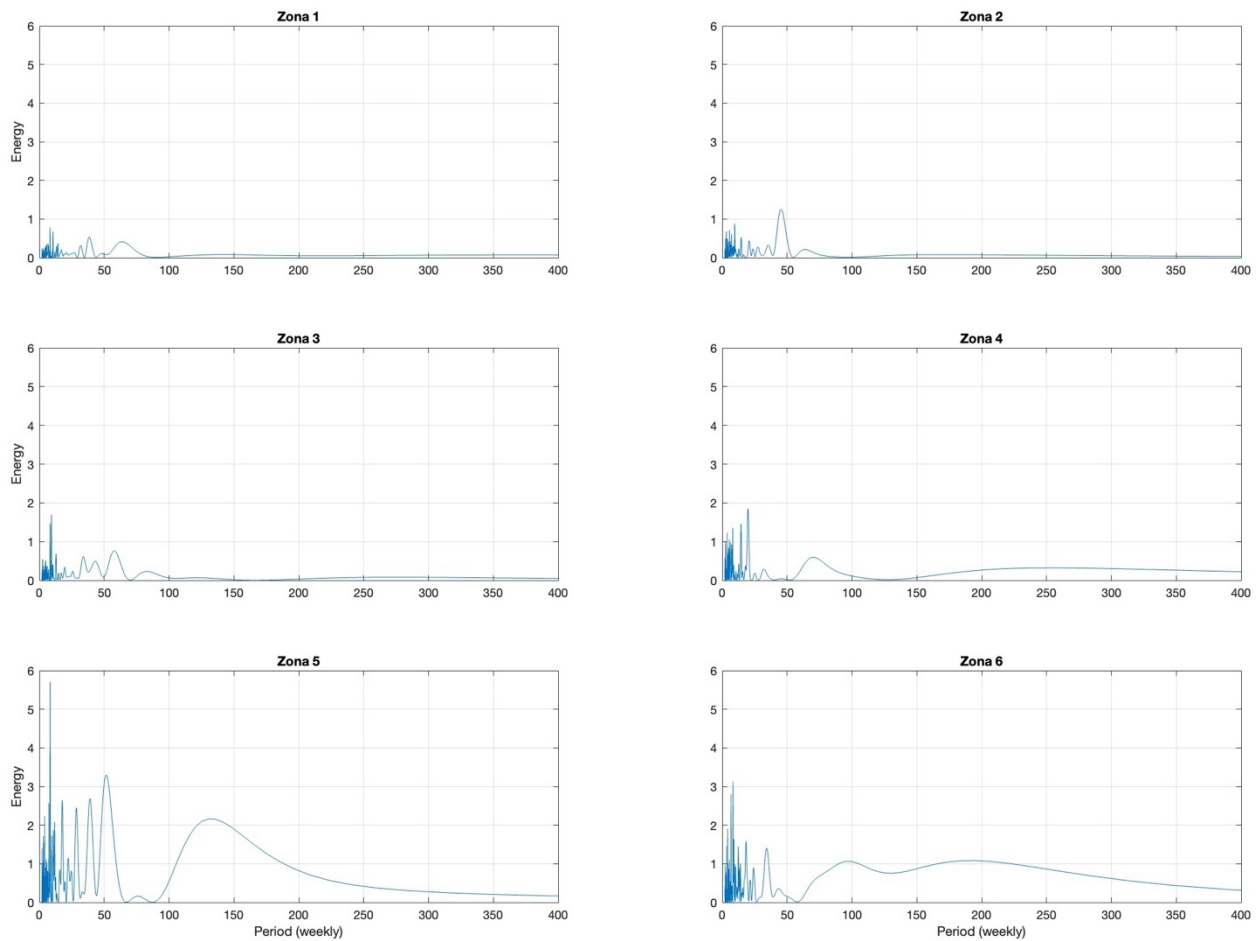


Figura 17. Periodograma de remolinos anticiclónicos.

El periodo más importante para los remolinos ciclónicos es de 8 semanas, ya que se presenta en todas las zonas (Fig. 18). En la región norte los periodos que dominan son 6 y 8 *semanas* en la Zona 1, mientras que en la Zona 2 son 8, 9 y 3 *semanas*. En la región central para la Zona 3 se presentaron periodos de 8, 4 y 3 *semanas*, y en la Zona 4 fueron de 8, 12 y 4 *semanas*. Para la región sur los periodos predominantes fueron 8, 9 y 6 *semanas* en la Zona 5, mientras que en la Zona 6 fueron de 8 y 7 *semanas*.

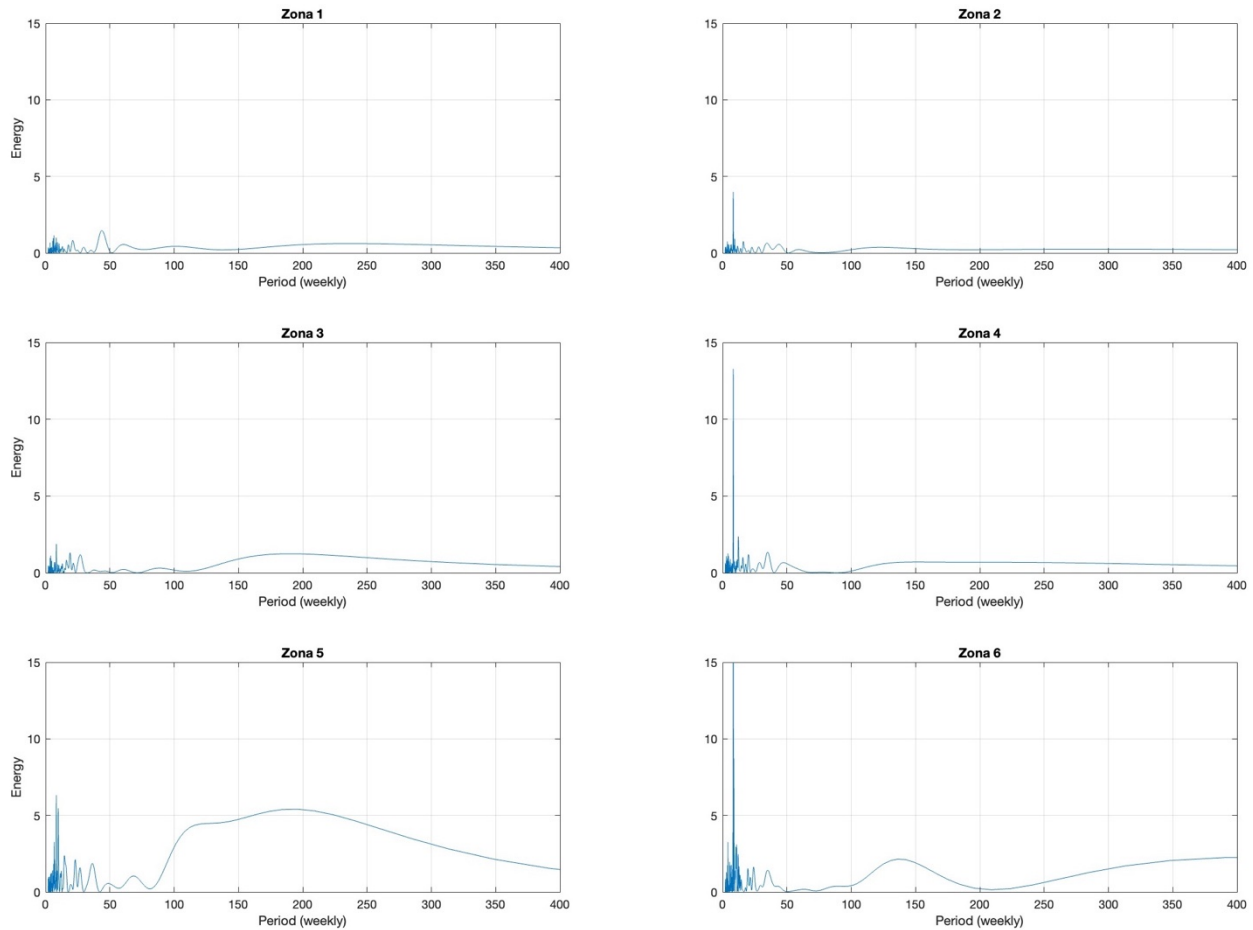


Figura 18. Peridogramas de remolinos ciclónica. En la zona 6 el pico llega hasta al valor 36 en el eje y.

Para la amplitud promedio, el periodo más importante es de 8 *semanas*, ya que aparece en todas las zonas (Fig. 19). En la región norte los periodos que dominan en la Zona 1 son de 8 , 6 y 5 *semanas*, mientras que en la Zona 2 son 8 y 9 *semanas*. En la región central, la Zona 3 presenta periodos importantes de 18 , 8 y 4 *semanas*, y en la Zona 4 fueron de 8 , 20 y 11 *semanas*. En la región sur, los periodos clave son 23 , 8 y 10 *semanas* en la Zona 5, mientras que en la Zonas 6 son 8 , 12 y 6 *semanas*.

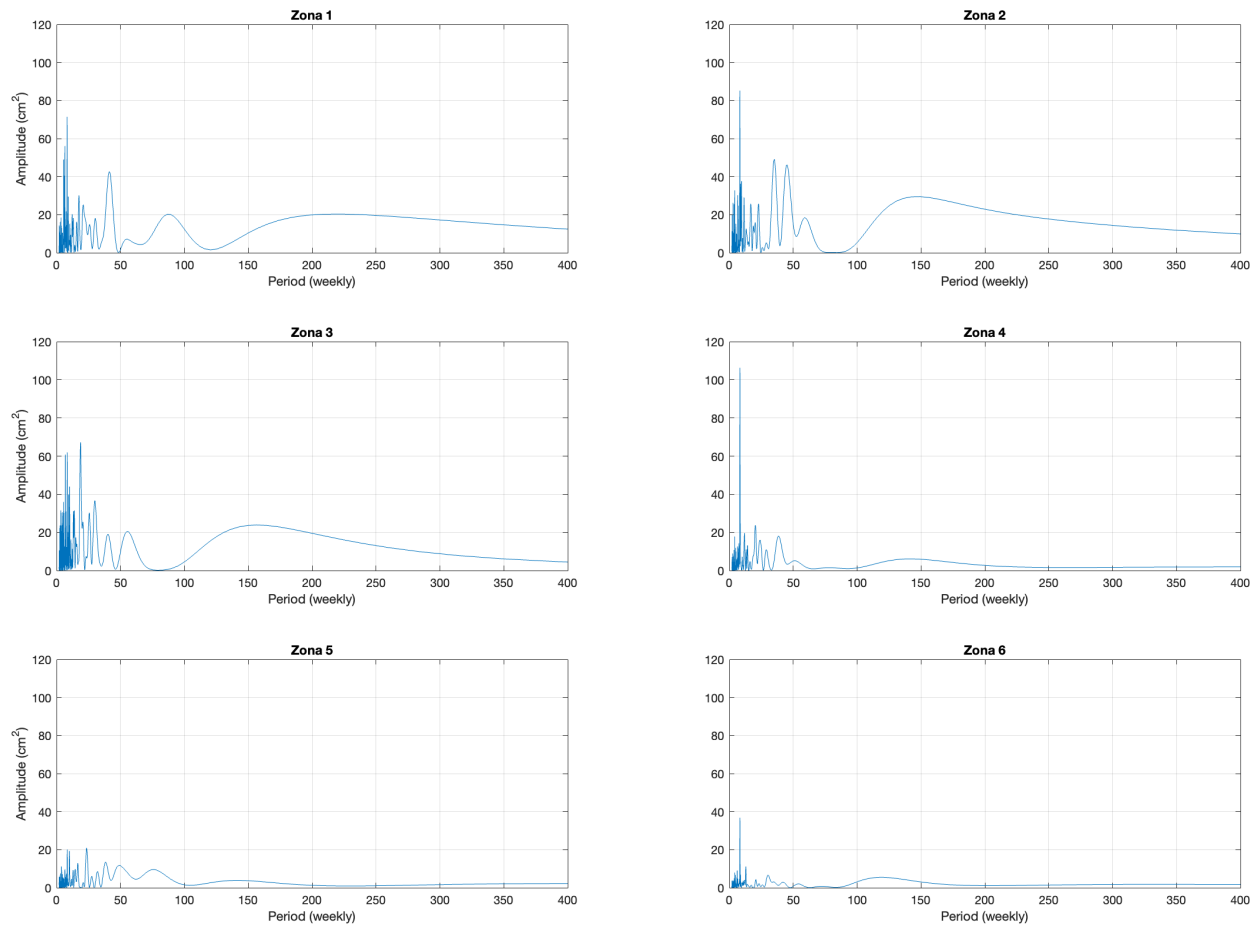


Figura 19. Periodograma de la amplitud para todos los remolinos.

Para las frecuencias del radio promedio, el ciclo más importante fue de *8 semanas*, excepto en la Zona 5 (Fig. 20). En la región norte los periodos más importantes fueron de *8, 5 y 21 semanas* para la Zona 1, mientras que en la Zona 2 fueron de *8, 17 y 11 semanas*. En la región central, la Zona 3 presentó ciclos de *8, 18 y 14 semanas*, y en la Zona 4 fueron de *8, 16 y 20 semanas*. En la región del sur los ciclos más importantes son de *13, 16 y 10 semanas* para la Zona 5, mientras que en la Zona 6 son de *8, 12 y 3 semanas*.

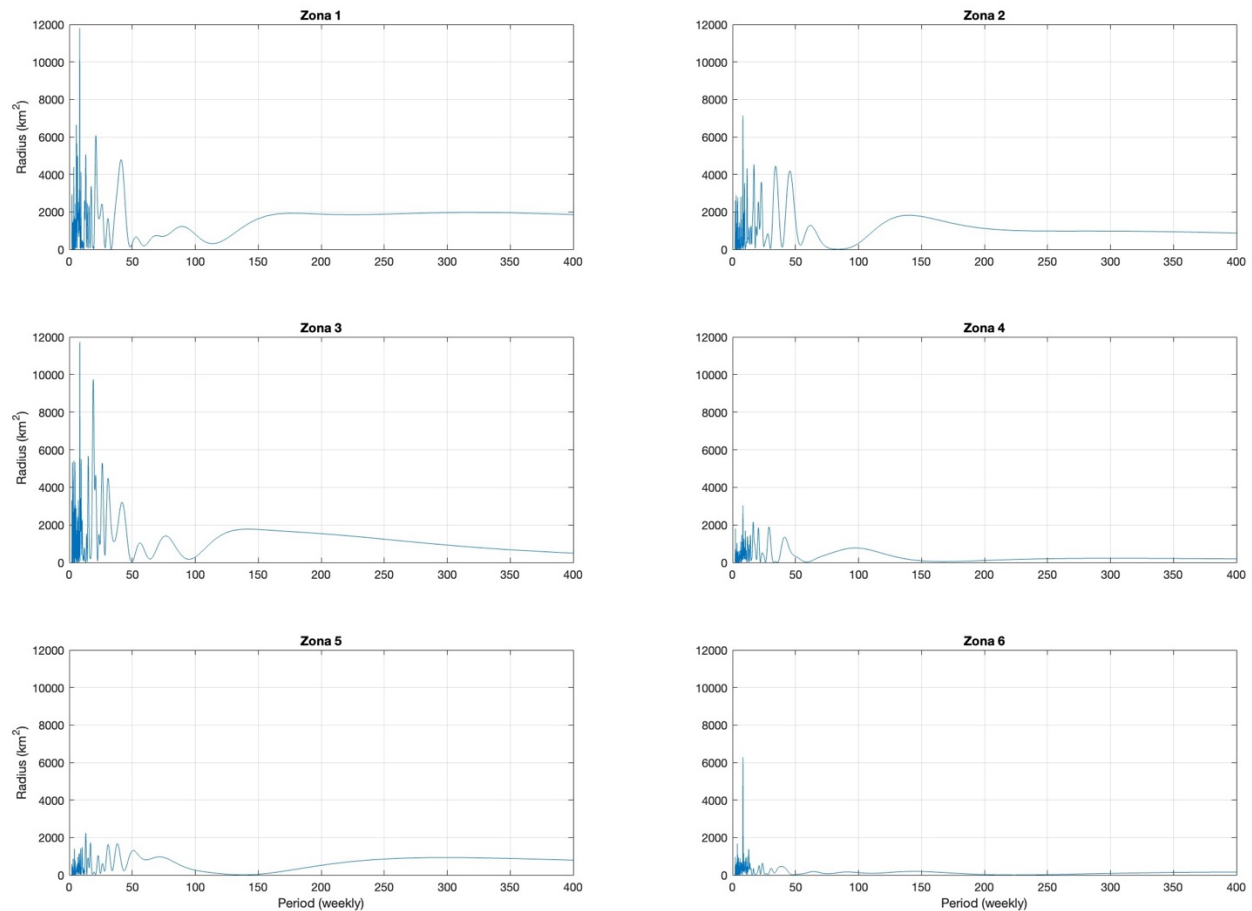


Figure 20. Periodograma del radio para todos los remolinos.

Discusión

La aplicación del parámetro de OW y la función “SimpleEddyDetection” (Xu 2020) aplicada a los datos sintéticos nos permitió identificar remolinos de mesoescala. Ambas aproximaciones detectaron los centros de los remolinos, mientras que la función nos brindó información descripciones cuantitativas, como la amplitud, radio, perímetro, número de remolinos, y tipo de rotación (cyclónico o anticiclónico). Estos resultados demuestran la efectividad de combinar herramientas para detectar remolinos con datos reales. Sin embargo, Kurczyn et al. (2012) mencionan que el parámetro de OW tiene algunas limitaciones, como la identificación de estructuras que no son remolinos, y por esa razón utilizaron el método de *vector-geometry* y

anomalías del nivel del mar para detectar y obtener trayectorias de los remolinos. A pesar de esas desventajas o discrepancias, se han realizado análisis de la variabilidad temporal de los remolinos en respuesta al cambio climático usando el parámetro de OW (Li et al. 2022).

Como mencionó Kurian et al. (2011), “no hay un mejor método universalmente aceptado para detectar remolinos”, y el rendimiento de diferentes algoritmos variará dependiendo de la sensibilidad y de los supuestos que utilicen. De hecho, algunos métodos tienen a sobreestimar o subestimar el número y mediciones de los remolinos (Xing y Yang 2021). Por esta razón, utilizamos dos diferentes metodologías en este estudio, para mejorar la robustez del proceso de detección de remolinos.

En el OPNM durante primavera y verano la concentración de *Chl-a* presenta valores elevados y una amplia cobertura espacial; sin embargo, estas grandes concentraciones permanecen cercanas a la zona costera (Fig. 7). A pesar de las elevadas concentraciones de *Chl-a* en regiones costeras en el año, se han observado tendencias a largo plazo positivas en la zona costera y oceánica. Notablemente se observa una banda de tendencias negativas de *Chl-a* entre la zona costera y oceánica, particularmente en la región norte y sur del área de estudio, con tendencias negativas y positivas intercaladas (Fig. 12). Estos resultados se alinean parcialmente con los reportados por Kahru et al. (2012), que identificaron tendencias positivas de *Chl-a* a lo largo de la costa y en la zona norte, y una tendencia negativa y positiva en la parte central. Este patrón puede ser influenciado por la dinámica del giro sur de California (o *Southern California Bight*), el cual contribuye a la generación del Frente de Ensenada, la cual es una característica oceanográfica importante, que delimita la zona eutrófica en el norte de las condiciones oligotróficas del sur.

La SST presenta una clara estacionalidad (Fig. 5), siendo el invierno y primavera las estaciones más frías, mientras que verano y otoño las cálidas. En este estudio se encontraron tendencias a largo plazo positivas de SST, con grandes tasas de calentamiento observadas cerca de la costa en la región norte y en una banda latitudinal entre 120–112° O (Fig. 10). Estos resultados fueron consistentes con lo que encontraron Yang et al. (2023), con tendencias positivas en las mismas áreas. Sin embargo, la magnitud de las tendencias calculadas en nuestro análisis fueron relativamente bajas.

La distribución estacional de la SSH durante otoño revela bajos valores de elevación, predominando en la región norte y central de la PBC (Fig. 6). Este patrón coincide con los elevados valores estacionales de SST, sugiriendo intrusión de Agua Transicional causando expansión térmica del agua de mar en respuesta a la temperatura. Sin embargo, en el estudio realizado por López-Aviles et al. (2024) con datos *in situ* y satelitales del 2010–2012, se mostró una estacionalidad predominante de la Corriente superficial durante verano, y durante otoño predomina la Contracorriente subsuperficial de California, ambas con un flujo hacia el norte. El análisis de las tendencias de SSH en este estudio indican tasas negativas en la región norte, mientras que las positivas se presentan en el sur del área de estudio (Fig. 11). Sin embargo, nuestros resultados difieren de los reportados, sin tendencias positivas, para la misma área, y sin valores negativos significantes (ECCO group 2025; Lindsey 2024; Sea Level Center 2024).

Cuando comparamos el número de remolinos en el área de estudio (Fig. 13) con la varianza explicada de SST (Fig. 8) y SSH (Fig. 9), se pueden observar zonas donde el número de remolinos es alto a lo largo de la península, con una varianza explicada de SST va de 55–70%, mientras que en la entrada del Golfo de California incrementa a 75–85%. En contraste, se presenta una varianza

explicada de SSH menor al 10% de eventos anuales y semianuales en la zona norte, al igual que un corredor paralelo a la costa de la PBC. Esta región coincide con las zonas que presentan más remolinos, resaltando su importancia en la variabilidad de SSH. El corredor coincide con las zonas de generación de los remolinos descrita por Kurczyn et al. (2012).

Para las *Chl-a* no se generó suficiente información de varianza explicada para una frecuencia anual y semianual, sugiriendo que otros periodos son más importantes. Sin embargo, Espinosa-Carreón et al. (2004) encontraron que para el periodo de 1997 a 2002 se registró una gran varianza explicada (~80%) cerca de la costa en la parte central del BCP, y ~50% en la parte oceánica norte, esto para frecuencias estacionales.

No se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.1$) para la amplitud promedio o radio promedio en ninguna fase del ONI. Cuando se analizó el efecto del ONI en los parámetros de los remolinos, se encontró un patrón similar al observado cuando se realizaron estadísticos del área dividida en seis zonas. Ninguno de los parámetros mostró correlaciones con el ONI. Sin embargo, la Zonas 2 fue la única que presentó correlaciones negativas.

Respecto a la división del área de estudio en zonas (Fig. 14), observamos que al analizar las variables (remolinos ciclónicos y anticiclónicos, amplitud promedio, y radio promedio) en la zona 1 se presentaron tendencias negativas estadísticamente significativas ($p\text{-value} < 0.1$). Esta zona también corresponde a la de menor presencia de remolinos. Al contrario de la Zona 5, en la que se registró la mayor cantidad de remolinos del estudio, y que mostró tendencias estadísticamente significativas para el radio promedio y la amplitud promedio. Las tendencias de estos parámetros difieren en signo: la amplitud promedio muestra una tendencia positiva y el radio promedio una tendencia negativa. Todas las zonas presentaron una tasa de cambio negativa para

el radio promedio, cuando fueron estadísticamente significativas, lo cual es similar a los resultados de Li et al. (2022); sin embargo es contrario a lo encontrado por Yun et al. (2024).

Las zonas costeras y oceánicas presentan tendencias negativas. Las zonas costeras (2,4 y 6) poseen más tendencias estadísticamente significativas para los parámetros de los remolinos, a comparación de las zonas oceánicas (1, 3 y 5). En la región norte (Zona 1 y 2) todas las tendencias son negativas, indicando un decremento en la ocurrencia y tamaño (radio y amplitud) de los remolinos. En la región central (Zona 2 y 3), la mayoría de los remolinos mostró tendencias positivas en sus propiedades, excepto en remolinos anticiclónicos. Mientras que en la región al sur (Zona 5 y 6) la amplitud promedio fue el único parámetro con tendencias negativas.

La distribución observada y tendencias para la actividad de los remolinos sugiere que en la región norte y central del área de estudio, los remolinos de mesoescala son generados localmente. En contraste, la región sur parece estar influenciada por remolinos que se forman afuera del área de estudio, originados en latitudes más al sur del área de estudio y subsecuentemente viajan hacia el norte entrando en el área. Estos resultados coinciden con los encontrados por Kurczyn et al. (2012), que identificaron zonas de generación a lo largo de la costa, y estos remolinos viajan hacia el oeste y el norte.

El análisis de las similitudes espaciales en el radio y amplitud promedio de los remolinos, mostró que en todas las zonas son significativamente diferentes para el radio promedio, indicando diferentes escalas espaciales de los remolinos en el área de estudio. Algo similar sucede con la amplitud promedio; sin embargo la Zona 2 y 3 presentan valores comparables. El análisis temporal de la trayectoria de los remolinos demostró que los remolinos generados en la Zona 2 generalmente viajan hacia la Zona 3, sugiriendo dinámicas compartidas entre estas zonas. Este patrón implica

que los remolinos formados en la Zona 2 pueden retener características energéticas mientras migran.

El análisis de las series de tiempo para amplitud promedio (Fig. 15) y radio promedio (Fig. 16), nos indican fluctuaciones en las propiedades de los remolinos que ocasionalmente coinciden con alguna fase específica del ONI. Sin embargo, el análisis estadístico reveló que ninguna de las fases del ONI ejerce algún efecto sobre las propiedades de los remolinos en el área de estudio. Estos resultados coinciden con los de Kurczyn et al. (2012), los cuales no encontraron un claro efecto de eventos interanuales en la generación de remolinos. Esto contrasta con los resultados de Payandeh et al. (2023), que reportaron un notable incremento en la actividad de los remolinos asociada al evento de El Niño frente a las costas de California. Esto resalta que la variabilidad regional es diferente en cada zona y tienen diferentes influencias de las oscilaciones climáticas interanuales.

En el OPNM los periodos más importantes para los parámetros de los remolinos son de 3 a 33 semanas, siendo 8 semanas el más frecuente. El periodograma de los remolinos anticiclónicos (Fig. 17) mostró gran energía en frecuencias clave en la región sur (Zona 5 y 6). Un patrón similar se observó para los remolinos ciclónicos, con un pico adicional en la Zonas 4 (Fig. 18). Sin embargo, para la amplitud y radio promedio, la mayor energía fue encontrada en la región norte y central, excepto para el radio, que mostró baja energía en la Zona 4.

El periodo más grande detectado (23 semanas) está asociado a la variabilidad interanual, y es mayormente evidente para la señal de la amplitud en la Zona 5 (Fig. 19). Estos resultados concuerdan espacialmente con las regiones que presentan mayor varianza explicada de SST y SSH,

donde los componentes anuales y semianuales presentan un porcentaje de 75% y 35%, respectivamente.

Conclusiones

En este estudio se analizaron las características espaciales y temporales de los remolinos de mesoescala en el Océano Pacífico Norte Mexicano, enfocándonos en los parámetros de los remolinos como amplitud, radio y dirección de giro, así como la relación con diferentes variables oceanográficas incluyendo la *Chl-a*, SST y SSH. Nuestros resultados revelaron distintas distribuciones espaciales y temporales, con un incremento progresivo del número de remolinos de norte a sur. En la región sur, varios de los remolinos que se presentan se generaron fuera del área de estudio. En contraste, los remolinos de la zona norte y central que se generan en la zona exhiben gran presencia cerca de la costa. Entre los parámetros de los remolinos evaluados, el único que presentó consistentemente tendencias negativas con un p -value < 0.1 fue el radio promedio.

La influencia de la variabilidad anual y semianual presentó valores elevados de varianza explicada en la SST para el área de estudio, mayor a 60%, indicando una fuerte señal de estas frecuencias. En contraste, SSH presentó una heterogeneidad espacial, con ciertas regiones que responden a los periodos anuales y semianuales, mientras que otras no se ven influenciadas. La *Chl-a* no presentó suficiente información de varianza explicada, lo que nos puede sugerir que está dominada por procesos de otro tipo de frecuencias, como por ejemplo la estacional.

No se encontraron diferencias significativas ($p < 0.1$) en los parámetros de los remolinos (amplitud y radio promedio) con alguna fase del ONI (La Niña, El Niño, Normal), indicando una limitada influencia interanual en los remolinos de mesoescala en el OPNM. Esto contrasta con

otras regiones del Sistema de la Corriente de California en donde si se vieron afectados los remolinos por el ONI. La influencia del efecto del cambio climático en la frecuencia e intensidad de El Niño en las décadas recientes es evidente. Sin embargo, en el alcance de este estudio, no se detectaron hasta ahora efectos significativos de la variabilidad interanual climática en las propiedades de los remolinos de mesoescala en el área de estudio.

Para la SST y SSH, se presentaron zonas asociadas a una gran varianza explicada por frecuencias anuales y semianuales, principalmente en la porción oceánica al sur del área de estudio. Se observaron patrones estacionales muy claros para *Chl-a*, SST y SSH. Las mayores concentraciones de *Chl-a* presentaron una amplia cobertura durante primavera; sin embargo, estas concentraciones se mantuvieron confinadas a regiones cerca de la costa. Las tendencias reportadas para la clorofila en la zona oceánica y costera fue positiva, mientras que entre estas dos zonas se presentaron regiones con tendencias positivas y negativas. Los ciclos estacionales de la SST se mostraron bien definidos, con tendencias a largo plazo únicamente positivas, con mayores valores en la región costera del norte. El patrón estacional presentado por la SSH sugiere una intrusión de Agua Transicional en otoño. Además se presentaron tendencias negativas en el norte y positivas en el sur.

En la región norte del área de estudio, los remolinos de mesoescala presentaron tendencias a disminuir en el número de remolinos y en sus propiedades físicas, causado por el cambio climático. A comparación de la región central y sur, que presenta mayor variabilidad en sus patrones, el número de remolinos anticiclónicos y el radio promedio tienden a disminuir, mientras que la amplitud promedio y número de remolinos ciclónicos tiende a incrementar, mostrando diferencias regionales en la respuesta dinámica a los cambios ambientales de largo plazo.

Referencias

- Alvarado-Graef, Patricia, Beatriz Martín-Atienza, Ramón Sosa-Ávalos, Reginaldo Durazo, y Rafael Hernández-Walls. 2024. “Evaluation of Ocean Color Algorithms to Retrieve Chlorophyll-a Concentration in the Mexican Pacific Ocean off the Baja California Peninsula, Mexico”. *Remote Sensing* 16 (10). <https://doi.org/10.3390/rs16101748>.
- Beech, Nathan, Thomas Rackow, Tido Semmler, Sergey Danilov, Qiang Wang, y Thomas Jung. 2022. “Long-term evolution of ocean eddy activity in a warming world”. *Nature Climate Change* 12 (10): 910–17. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01478-3>.
- Calin Iulian, Martin. 2018. “On the Vorticity of Mesoscale Ocean Currents”. *Oceanography* 31 (3): 28–35. www.opc.ncep.noaa.gov/gridded_wind_vectors.php.
- Checkley, David M., y John A. Barth. 2009. “Patterns and processes in the California Current System”. *Progress in Oceanography* 83 (1–4): 49–64. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.07.028>.
- Chelton, Dudley B., Michael G. Schlax, y Roger M. Samelson. 2011. “Global observations of nonlinear mesoscale eddies”. *Progress in Oceanography* 91 (2): 167–216. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2011.01.002>.
- Chiappa-Carrara, Xavier, Cecilia Enríquez, Vanesa Papiol, Ismael Mariño-Tapia, y Cristóbal Reyes-Hernández. 2019. “Pacific coast of Mexico”. En *World Seas: An Environmental Evaluation Volume I: Europe, the Americas and West Africa*, 1:655–71. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805068-2.00045-0>.

Cushman-Roisin, Benoit, y Jean-Marie Beckers. 2006. *Introduction to Geophysical Fluid*

Dynamics Physical and Numerical Aspects. Academic Press. Hanover.

<https://mcirano.ufba.br/ftp/books/cushman06/gfd2.pdf>.

Doney, Scott C., Mary Ruckelshaus, J. Emmett Duffy, James P. Barry, Francis Chan, Chad A.

English, Heather M. Galindo, et al. 2012. “Climate change impacts on marine ecosystems”.

Annual Review of Marine Science 4:11–37. [https://doi.org/10.1146/annurev-marine-](https://doi.org/10.1146/annurev-marine-041911-111611)

041911-111611.

Doney, Scott C, D Shallin Busch, Sarah R Cooley, y Kristy J Kroeker. 2020. “Annual Review of

Environment and Resources The Impacts of Ocean Acidification on Marine Ecosystems and

Reliant Human Communities”. *Annual Review of Environment and Resources*, núm. 45,

83–112. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320>.

Durazo, Reginaldo. 2015. “Seasonality of the transitional region of the California Current

System off Baja California”. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2813–25.

<https://doi.org/10.1002/2014JC010405>.Received.

Durazo, Reginaldo, A. M. Ramírez-Manguilar, L. E. Miranda, y L. A. Soto-Mardones. 2010.

“Climatología de variables hidrográficas”. En *Dinámica del ecosistema pelágico frente a*

Baja California 1997-2007, editado por Gilberto Gaxiola-Castro y Reginaldo Durazo, 25–

57. México D.F.: SEMARNAT.

ECCO group. 2025. “Sea Surface Height Linear Trend: 1993-2017”. NASA. 2025. [https://ecco-](https://ecco-group.org/ssh-linear-trend.htm)

[group.org/ssh-linear-trend.htm](https://ecco-group.org/ssh-linear-trend.htm).

- Espinosa-Carreón, T. Leticia, P. T. Strub, Emilio Beier, Francisco Ocampo-Torres, y Gilberto Gaxiola-Castro. 2004. “Seasonal and interannual variability of satellite-derived chlorophyll pigment, surface height, and temperature off Baja California”. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 109 (3). <https://doi.org/10.1029/2003jc002105>.
- Flores, Tapia K.M., Utrera A. Zárate, y Tejeda A. Martínez. 2022. “Analysis of Trends in Sea Level in the Central Coast of the Gulf of Mexico, 1999-2018”. *Investigaciones Geográficas*, núm. 108 (agosto). <https://doi.org/10.14350/rig.60525>.
- Flores-Morales, A. L., A. Parés-Sierra, y S. G. Marinone. 2009. “Factors that modulate the seasonal variability of the sea surface temperature of the Eastern Tropical Pacific”. *Geofísica Internacional* 48 (3): 337–49. <http://www.aviso.oceanobs.com/en/data/products/>.
- García-Morales, Ricardo, Edgardo B. Farach-Espinoza, Hugo Herrera-Cervantes, Manuel O. Nevárez-Martínez, y Juana López-Martínez. 2025. “Long-term variability in sea surface temperature and chlorophyll-a concentration in the Pacific region off Baja California”. *Marine Environmental Research* 208 (junio). <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2025.107156>.
- Godínez, Victor M., E. Beier, M. F. Lavín, y J. A. Kurczyn. 2010. “Circulation at the entrance of the Gulf of California from satellite altimeter and hydrographic observations”. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 115 (4). <https://doi.org/10.1029/2009JC005705>.
- Gómez-Villerías, Ramiro Salvador, Adalberto Tejeda-Martínez, Ana Cecilia Conde Álvarez, Maximino Reyes Umaña, José Luis Rosas-Acevedo, Manuel Ignacio Ruz Vargas, y Erick

- Alfonso Galán Castro. 2022. “Potential Sea Level Rise Impacts in Acapulco Diamante, Mexico”. *Climate* 10 (3). <https://doi.org/10.3390/cli10030045>.
- Hang, Renlong, Gang Li, Mei Xue, Changming Dong, y Jianfen Wei. 2022. “Identifying Oceanic Eddy With an Edge-Enhanced Multiscale Convolutional Network”. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 15:9198–9207. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2022.3215696>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2019. “Technical Summary”. *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157964.002>.
- Kahru, Mati, Raphael M. Kudela, Marlenne Manzano-Sarabia, y B. Greg Mitchell. 2012. “Trends in the surface chlorophyll of the California Current: Merging data from multiple ocean color satellites”. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 77–80 (noviembre):89–98. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.04.007>.
- Kurczyn, J. A., E. Beier, M. F. Lavín, y A. Chaigneau. 2012. “Mesoscale eddies in the northeastern pacific tropical-subtropical transition zone: Statistical characterization from satellite altimetry”. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 117 (C10): 1–17. <https://doi.org/10.1029/2012JC007970>.
- Kurian, Jaison, Francois Colas, Xavier Capet, James C. McWilliams, y Dudley B. Chelton. 2011. “Eddy properties in the California Current System”. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 116 (8). <https://doi.org/10.1029/2010JC006895>.

- Li, Geng, Zhankun Wang, y Binbin Wang. 2022. “Multidecade Trends of Sea Surface Temperature, Chlorophyll-a Concentration, and Ocean Eddies in the Gulf of Mexico”. *Remote Sensing* 14 (15). <https://doi.org/10.3390/rs14153754>.
- Lima, Fernando P., y David S. Wetthey. 2012. “Three decades of high-resolution coastal sea surface temperatures reveal more than warming”. *Nature Communications* 3. <https://doi.org/10.1038/ncomms1713>.
- Lindsey, Rebecca. 2024. “Climate Change: Global Sea Level”. NOAA. 2024. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-sea-level>.
- Lluch-Cota, S. E., M. Tripp-Valdez, D. B. Lluch-Cota, D. Lluch-Belda, J. Verbesselt, H. Herrera-Cervantes, y J. J. Bautista-Romero. 2013. “Recent trends in sea surface temperature off Mexico”. *Atmósfera* 26 (4): 537–46. <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>.
- López-Aviles, Brandon, Emilio Beier, Rodrigo Duran, José Gómez-Valdés, Rubén Castro, y Laura Sánchez-Velasco. 2024. “The California current system off Baja California Sur”. *Progress in Oceanography* 222 (marzo). <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2024.103225>.
- Mann, K. H., y J. R. N. Lazier. 2006. *Dynamics of Marine Ecosystems*. 3a ed. Nova Scotia: Blackwell.
- Mirabal-Gómez, Uriel, Saúl Álvarez-Borrego, y José Rubén Lara-Lara. 2017. “Variabilidad de la biomasa y la producción fitoplanctónicas, derivadas de satélite, en 2 áreas costeras contrastantes: Frente al sur de California y frente al norte de Baja California”. *Ciencias Marinas* 43 (4): 229–48. <https://doi.org/10.7773/cm.v43i4.2763>.

- Nagai, Takeyoshi, Nicolas Gruber, Hartmut Frenzel, Zouhair Lachkar, James C. McWilliams, y Gian Kasper Plattner. 2015. “Dominant role of eddies and filaments in the offshore transport of carbon and nutrients in the California Current System”. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 120 (8): 5318–41. <https://doi.org/10.1002/2015JC010889>.
- Payandeh, A. R., L. Washburn, B. Emery, y J. C. Ohlmann. 2023. “The Occurrence, Variability, and Potential Drivers of Submesoscale Eddies in the Southern California Bight Based on a Decade of High-Frequency Radar Observations”. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 128 (10). <https://doi.org/10.1029/2023JC019914>.
- Portela, Esther, Emilio Beier, Eric D. Barton, Rubén Castro, Victor Godínez, Emilio Palacios-Hernández, Paul C. Fiedler, Laura Sánchez-Velasco, y Armando Trasviña. 2016. “Water masses and circulation in the tropical pacific off central Mexico and surrounding areas”. En *Journal of Physical Oceanography*, 46:3069–81. American Meteorological Society. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-16-0068.1>.
- Quetz-Que, Santiago J., Saúl Álvarez-Borrego, José Rubén Lara-Lara, Ma Elena Solana-Arellano, y Alejandro Parés-Sierra. 2022. “Variabilidad estacional e interanual de la concentración de clorofila y de la productividad primaria frente al estado de Campeche, golfo de México”. *Ciencias Marinas* 48 (marzo). <https://doi.org/10.7773/cm.y2022.3168>.
- Sea Level Center. 2024. “Recent Sea Level Trends”. University of Hawai’i. 2024. <https://uhslc.soest.hawaii.edu>.
- Siedlecki, Samantha A., Darren Pilcher, Evan M. Howard, Curtis Deutsch, Parker MacCready, Emily L. Norton, Hartmut Frenzel, et al. 2021. “Coastal processes modify projections of

some climate-driven stressors in the California Current System”. *Biogeosciences* 18 (9): 2871–90. <https://doi.org/10.5194/bg-18-2871-2021>.

Talley, L. D., R. A. Feely, B. M. Sloyan, R. Wanninkhof, M. O. Baringer, J. L. Bullister, C. A. Carlson, et al. 2016. “Changes in Ocean Heat, Carbon Content, and Ventilation: A Review of the First Decade of GO-SHIP Global Repeat Hydrography”. *Annual Review of Marine Science* 8 (enero):185–215. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-052915-100829>.

Wells, Brian K, Isaac D Schroeder, Steven J Bograd, Elliott L Hazen, Michael G Jacox, Andrew Leising, Nathan Mantua, et al. 2017. “State of the California Current 2016-17: still anything but ‘normal’ in the North”. Vol. 58.

Wells, Brian K, Isaac D Schroeder, Jarrod A Santora, Elliott L Hazen, Steven J Bograd, Eric P Bjorkstedt, Valerie J Loeb, et al. 2013. “State of the California Current 2012-13: no such thing as an ‘average’ year state of the California Current CalCOFI Report”. Vol. 54. <http://calcofi.org/>.

Xing, Tao, y Yikai Yang. 2021. “Three mesoscale eddy detection and tracking methods: Assessment for the South China sea”. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 38 (2): 243–58. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-20-0020.1>.

Xu, Chi. 2020. “SimpleEddyDetection”. <https://github.com/chouj/SimpleEddyDetection>.

Yang, Kai, Amelie Meyer, Peter G. Strutton, y Andrew M. Fischer. 2023. “Global trends of fronts and chlorophyll in a warming ocean”. *Communications Earth and Environment* 4 (1). <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01160-2>.

Yun, Junghee, Kyung Ja Ha, y Sun Seon Lee. 2024. “Impact of greenhouse warming on mesoscale eddy characteristics in high-resolution climate simulations”. *Environmental Research Letters* 19 (1). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad114b>.