

La investigación reportada en esta tesis es parte de los programas de investigación del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California).

La investigación fue financiada por el CONAHCYT (Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías).

Todo el material contenido en esta tesis está 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 o titular de los Derechos de Autor.

**Centro de Investigación Científica y de Educación  
Superior de Ensenada, Baja California**



---

**Doctorado en Ciencias  
en Ecología Marina**

---

**Procesos oceanográficos asociados al desarrollo y dispersión  
de florecimientos de *Gymnodinium catenatum* en el norte del  
Golfo de California**

Tesis  
para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
Doctor en Ciencias

Presenta:

**Gabriela Reséndiz Colorado**

Ensenada, Baja California, México  
2023

Tesis defendida por  
**Gabriela Reséndiz Colorado**

y aprobada por el siguiente Comité

---

Dr. Ernesto García Mendoza  
Codirector de tesis

---

Dr. Antonio Almazán Becerril  
Codirector de tesis

**Dr. Rafael Ramírez Mendoza**

**Dr. Ismael de Jesús Mariño Tapia**

**Dr. Helmut Maske Rubach**

**Dr. Jushiro Carlos Adolfo Cepeda Morales**



---

**Dr. Rafael Andrés Cabral Tena**  
Coordinador del Posgrado en Ecología Marina

---

**Dra. Ana Denise Re Araujo**  
Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Gabriela Reséndiz Colorado** como requisito parcial para la obtención del grado de Doctor en Ciencias en Ecología Marina.

**Procesos oceanográficos asociados al desarrollo y dispersión de florecimientos algales nocivos de *Gymnodinium catenatum* en el norte del Golfo de California.**

Resumen aprobado por:

---

Dr. Ernesto García Mendoza  
Codirector de tesis

---

Dr. Antonio Almazán Becerril  
Codirector de tesis

Durante los últimos años, durante la temporada de invierno y primavera, se ha detectado la presencia de florecimientos algales nocivos (FAN) causados por el dinoflagelado *Gymnodinium catenatum* en el norte del golfo de California (NGC). Estos eventos tienen impactos ecológicos, económicos y sociales negativos porque *G. catenatum* es una especie productora de saxitoxina, la cual, está asociada al envenenamiento paralítico por consumo de mariscos, lo que origina que la autoridad sanitaria se vea en la necesidad de implementar vedas en áreas de extracción de almeja generosa en el NGC al detectar producto contaminado. Por lo tanto, es necesario conocer los procesos físicos que provocan la ocurrencia y recurrencia de estos eventos, así como contar con un sistema de monitoreo y alerta temprana que permita tomar decisiones y acciones oportunas de mitigación contra los efectos perjudiciales de estos fenómenos. En este trabajo se abordaron estas necesidades de investigación por medio de la implementación de un método de detección remota de estos FAN, utilizando la clasificación de máxima verosimilitud basada en los datos de dos eventos sucedidos en 2015 y 2017. Los resultados de este enfoque fueron satisfactorios al reproducir la temporalidad de la presencia de la especie documentada por medio de muestreos semanales en la bahía de San Felipe, así como de la detección geográfica en las áreas que se conocen que son afectadas recurrentemente. Para estudiar los procesos físicos asociados a estos FAN, se implementó un modelo hidrodinámico usando el Sistema de Modelación Oceánica Regional (ROMS) para el norte del golfo de California. A partir de este modelo se obtuvieron datos de variables como energía cinética turbulenta, temperatura, corrientes y se complementaron con datos de esfuerzo de fondo producido por oleaje estimados a partir de datos de la quinta generación del reanálisis atmosférico del clima global del ECMWF (ERA-5), los análisis de estas variables y la abundancia semanal de *G. catenatum* permitieron identificar que los principales procesos asociados a la formación de estos florecimientos es el incremento del esfuerzo de fondo asociado al oleaje y la turbulencia. Estos, a su vez, tienen una relación con el cambio en el patrón del viento que se caracteriza por ser del noroeste durante las temporadas de invierno y primavera. Respecto a la dispersión de los florecimientos algales, con base en los datos obtenidos del modelo hidrodinámico, se realizaron experimentos lagrangianos para estimar el transporte del florecimiento, obteniendo resultados en los que la ubicación modelada corresponde con la detección realizada con el método de detección implementado en este trabajo, para el evento del 2017. Los resultados obtenidos de este trabajo constituyen conocimiento base para la implementación de sistemas de monitoreo y alerta temprana de manera operacional y para el entendimiento del fenómeno de la recurrencia de estos florecimientos.

**Palabras clave:** *Gymnodinium catenatum*, florecimientos algales nocivos, percepción remota, modelación hidrodinámica, norte del golfo de California

Abstract of the thesis presented by **Gabriela Reséndiz Colorado** as a partial requirement to obtain the Doctor of Science degree in Marine Ecology

**Oceanographic processes associated with harmful algal blooms of *Gymnodinium catenatum* development and dispersal in the northern Gulf of California.**

Abstract approved by:

---

Dr. Ernesto García Mendoza  
Thesis Director

---

Dr. Antonio Almazán Becerril  
Thesis Director

During the recent winter and spring seasons, harmful algal blooms (HABs) caused by the dinoflagellate *Gymnodinium catenatum* have been detected in the northern Gulf of California (NGC). These events have negative ecological, economic, and social impacts because *G. catenatum* is a species producer of saxitoxin, which is associated with paralytic shellfish poisoning, which causes the need to implement bans by the health authority in extraction areas of generous clam in the NGC when detecting contaminated products. Therefore, it is necessary to identify the physical processes that cause the occurrence and recurrence of these events and have a monitoring and early warning system that allows timely decisions and mitigation actions to be taken against the harmful effects of these phenomena. In this work, these research gaps are approached by implementing a remote detection method for these HABs, using maximum likelihood classification based on data from two events in 2015 and 2017. The results of this approach were satisfactory by reproducing the temporality presence of *Gymnodinium catenatum* documented through weekly sampling in San Felipe Bay, as well as geographic detection in areas known to be recurrently affected. To study the physical processes associated with these HABs, a hydrodynamic model was implemented using the Regional Ocean Modeling System (ROMS) for the northern Gulf of California. From this model, variables such as turbulent kinetic energy, temperature, and currents were obtained and were complemented with data on bottom stress produced by waves estimated from the fifth generation ECMWF atmospheric reanalysis of the global climate (ERA-5) data. Analyzing these variables and the weekly abundance of *G. catenatum*, it was possible that the processes associated with forming these blooms are the increase in bottom stress related to waves and turbulence. These processes are related to the change in the wind pattern characterized by northwest winds during the winter and spring seasons. Regarding the dispersion of algal blooms, based on the data obtained from the hydrodynamic model, lagrangian experiments were carried out to estimate the transport of the HAB. The results showed that the modeled dispersion corresponds with the detection carried out with the remote sensing method implemented in this work for the 2017 event. The results obtained from this work are essential knowledge for the operational implementation of monitoring and early warning systems and for understanding the phenomenon of these blooms' recurrence.

**Keywords:** *Gymnodinium catenatum*, harmful algal bloom, remote sensing, hydrodynamic modeling, northern Gulf of California.

## Dedicatoria

**A los que nos rebelamos ante lo que se ve como nuestro inevitable destino.**

*A mi abuelo AGCB que siempre me decía:  
estudia tu Física, tus Matemáticas, tu Química.*

*A mamá, Luis (wicho) y a Rigel.*

## Agradecimientos

Agradezco al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California por abrirme sus puertas e instalaciones para continuar con mi formación académica y crecimiento profesional.

Al CONAHCYT por brindarme la beca No. 747180 para realizar estudios de doctorado, ya que sin este recurso no habría sido posible.

Al proyecto PRONAH 319104: “Atención de la problemática asociada a florecimientos algales nocivos en Baja California: integración del conocimiento a necesidades socioambientales y económicas”

Al posgrado en Ecología Marina del CICESE, por admitirme como estudiante y permitirme formarme en sus aulas, así como por el apoyo económico para los gastos de la publicación del artículo derivado de esta tesis.

A PERSEO, Unidad Especializada en Percepción Remota Satelital del Centro Nayarita de Innovación y Transferencia de Tecnología (CENITT) por brindarme las imágenes diarias del MODIS recortadas para mi área de estudio.

Al Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (ICAYCC) de la UNAM por la beca para estudiar el Diplomado en Meteorología y Climatología, cuyos conocimientos han sido útiles para concluir mi tesis.

Al Dr. Ernesto García Mendoza, por aceptarme como su estudiante y brindarme una oportunidad. Sobre todo, por compartir la información derivada de años de trabajo junto a su equipo, así como sus preguntas e ideas, por todas las discusiones para hacer crecer este trabajo y el esfuerzo invertido.

Dr. Antonio Almazán Becerril, gracias, por todas las discusiones al respecto de los datos y resultados obtenidos, por los consejos, por las llamadas de atención y por la motivación, porque así es este proceso. Sobre todo, siempre agradeceré que me acompañarás en este camino desde la maestría y te preocuparás por mí, por guiarme, por esperar mucho de mí y por animarme cuando hizo falta.

Dr. Rafael Ramírez Mendoza, se convirtió en otro tutor para mí, gracias por dedicarme de su tiempo, por compartir sus conocimientos, porque de cada reunión salía con mucho más conocimiento y también más preguntas (algunas aún no las podemos responder). Por recordarme lo cerca que estaba de la meta, ya hemos llegado.

Al Dr. Ismael Mariño Tapia por ayudarme a analizar los datos de series de tiempo y guiarme, por compartir sus conocimientos e ideas, muchas gracias por su disposición para reunirnos y ayudarme a enriquecer este trabajo.

Dr. Helmut Maske y Dr. Jushiro Cepeda muchas gracias por sus aportes, por su manera crítica de analizar los resultados obtenidos y por cada una de las preguntas derivadas, sin duda he aprendido de ustedes y me han ayudado a enriquecer este trabajo.

A la sociedad mexicana, que con su trabajo diario y contribución de impuestos hacen posible que existan recursos para que personas como yo, podamos acceder a una beca para continuar estudiando, gracias. Este trabajo no les puede retribuir todo, pero pretende ser un granito de arena a la atención de la problemática de florecimientos algales nocivos que año con año impacta a las poblaciones costeras.

Gracias, mamá, por todo, no estaría aquí de no ser por tu decisión y trabajo, por todo lo que caminaste durante años y todo tu esfuerzo.

A mi hermano, por estar, gracias por estar solo a una llamada de distancia, aunque estés a kilómetros, por tu amor, por escucharme y aconsejarme en los momentos más difíciles, todo mi amor.

A Rigel por compartir sus conocimientos, pero sobre todo por caminar de la mano conmigo, por acompañarnos en la pandemia, por quedarte, por hacernos un refugio en medio de la tormenta y sonreír juntos cuando sale el sol, por entender y ser paciente. Esto no hubiera sido posible sin tu apoyo.

A Damaris (Damita), por acompañarme a la distancia, por tú amistad, por todas las videollamadas, mensajes y memes, no sería lo mismo sin ti, por abrirme las puertas de tu casa siempre que lo he necesitado, que la vida nos de muchos años más de amistad y éxitos.

A Benjamín (Yino) porque a pesar de la distancia y los silencios (de parte de los dos) sé que eres un amigo en quien puedo confiar, por abrirme las puertas de tu hogar cuando lo necesité.

Dr. Edward M. Peters Recagno, por brindarme una oportunidad de crecimiento profesional al abrirme las puertas del CIGoM, por confiar en mis capacidades y escuchar mis ideas, así como por sus consejos. Por su apoyo para todo lo referente a mi doctorado.

Al Dr. Juan Carlos Herguera García por darme una oportunidad, aceptarme en el CIGoM y hacerme parte del equipo, por las consideraciones para que pudiera asistir a mis reuniones de comité y continuar con mi tesis.

A toda la familia CIGoM, Alejandro, Génesis, Gerardo, Jana, Leonor, Paty, Pilar, Víctor gracias por toda la buena onda durante el trabajo en la oficina, de cada uno de ustedes he aprendido y gracias por acompañarme también para mi doctorado y celebrar conmigo mis avances en este proceso.

A mis compañeros de generación: Ernesto, Miguel y Zuri, gracias por acompañarnos en este camino (y en los trámites), por las discusiones académicas y no tan académicas, por las salidas a comer.

A Berenisse García, Juan C. Cerda, Jorge Velasco y Miguel A. Robles, por las misiones juntos, por todo lo que he aprendido de ustedes, por todo lo que hemos podido trabajar, platicar y reírnos juntos.

A todos aquellos que fueron parte de este proceso de alguna manera, el espacio no alcanza para expresar a todos mi gratitud.

## Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	ix
Lista de tablas.....	xii
<b>Capítulo 1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes.....	2
1.1.1 Área de estudio.....	3
1.1.2 Florecimientos algales de <i>G. catenatum</i> en el norte del golfo de California.....	5
1.1.3 Detección y monitoreo de FAN usando percepción remota.....	6
1.1.4 Estudio de procesos físicos asociados a FAN.....	8
1.2 Justificación.....	9
1.3 Objetivos.....	9
1.3.1 Objetivo general.....	9
1.3.2 Objetivos específicos.....	9
<b>Capítulo 2. Metodología.....</b>	<b>11</b>
2.1 Detección de florecimientos algales nocivos de <i>Gymnodinium catenatum</i> por medio de percepción remota.....	11
2.1.1 Clasificador de máxima verosimilitud.....	11
2.1.2 Abundancia de <i>G. catenatum</i> durante dos FAN.....	12
2.1.3 Bases de datos satelitales.....	13
2.1.4 Selección de áreas de entrenamiento.....	14
2.1.5 Evaluación de los resultados de la clasificación.....	16
2.2 Procesos físicos asociados a florecimientos algales nocivos de <i>G. catenatum</i> .....	17

2.2.1	Sistema de modelación oceánica regional .....	18
2.2.2	Implementación del modelo al NGC .....	19
2.2.3	Validación .....	22
2.2.4	Análisis de series de tiempo .....	22
2.3	Transporte de florecimientos algales nocivos de <i>G. catenatum</i> .....	25
<b>Capítulo 3. Resultados .....</b>		<b>28</b>
3.1	Detección de florecimientos algales nocivos de <i>Gymnodinium catenatum</i> por medio de percepción remota.....	28
3.1.1	Clasificación basada en FAN 2015 y MODIS .....	28
3.1.2	Clasificación basada en el FAN 2017 y Sentinel-3 .....	31
3.2	Procesos físicos asociados a florecimientos algales nocivos de <i>G. catenatum</i> .....	34
3.2.1	Validación .....	34
3.2.2	Condiciones promedio del norte del golfo de California .....	36
3.2.3	Procesos físicos asociados a <i>G. catenatum</i> .....	40
3.3	Simulación numérica del transporte de florecimientos algales de <i>G. catenatum</i> .....	48
<b>Capítulo 4. Discusión.....</b>		<b>53</b>
<b>Capítulo 5. Conclusiones .....</b>		<b>59</b>
<b>Literatura citada .....</b>		<b>61</b>
<b>Anexos .....</b>		<b>70</b>

## Lista de figuras

Figura	Página
1. Diagrama general del ciclo de vida de especies que forman quistes de reposo (Peña-Manjarrez <i>et al.</i> 2016). .....	3
2. Ubicación y batimetría del golfo de California (profundidades en m). UGC=Alto golfo de California, NGC=norte del golfo de California, SGC=Sur del golfo de California (Lavín & Marinone, 2003).....	4
3. Distribución de quistes de <i>G. catenatum</i> en febrero de 2017 (Castañeda, 2021).....	6
4. Diagrama de flujo del proceso de implementación del clasificador de máxima verosimilitud para detección de FAN de <i>G. catenatum</i> . .....	12
5. Ubicación de los puntos de muestreo en el 2015 (puntos verdes), polígonos de extracción afectados en 2017 (polígonos anaranjado, verde y rosa), punto de muestreo semanal (estrella roja) y polígono usado para generar las series de tiempo de detección (polígono amarillo). 13	13
6. Ubicación de las áreas de entrenamiento usadas para generar las clases espectrales para la clasificación para MODIS (A) y Sentinel-3 (B).....	15
7. Dominio y batimetría del modelo implementado. ....	19
8. Serie de tiempo de nivel del mar comparando datos de REDMAR, TPX07, Observaciones y TPX09.....	21
9. Serie de tiempo interpolada (línea negra) y abundancia medida en el punto de monitoreo semanal en la costa de San Felipe (puntos rojos). ....	24
10. Principales módulos que componen el modelo OpenDrift.....	26
11. Distribución de la clase FAN del MODIS resultado de la clasificación para enero 17 del 2015. ....	29
12. Mapa de distribución y frecuencia de la clase FAN del MODIS para el periodo 2018-2020. Los colores indican la frecuencia en que un píxel fue clasificado como la clase correspondiente asociada al FAN, lo que indica áreas que son detectadas como FAN de manera recurrente. 30	30
13. Abundancia absoluta (A) y relativa (B) de <i>G. catenatum</i> en el punto de monitoreo en San Felipe, porcentaje de área clasificada como FAN para MODIS (C) para el periodo de 1 de enero de 2018 al 31 de diciembre del 2020. El sombreado verde indica un periodo sin datos satelitales debido a la alta nubosidad. ....	31
14. Distribución para el 18 de enero de 2017 de las clases de Sentinel-3 asociadas a <i>Gymnodinium catenatum</i> . ....	32
15. Distribución y frecuencia de la detección de <i>Gymnodinium catenatum</i> de las clasificaciones de Sentinel-3, clase 1 (A), clase 2 (B) y clase 3 (C). ....	33

16. Serie de tiempo de abundancia absoluta (A), abundancia relativa (B) de <i>Gymnodinium catenatum</i> , porcentaje de detección de la clase 1 (C), clase 2 (D) y la suma de los porcentajes de ambas detecciones (E). .....	34
17. Serie de marea medida y modelada para el periodo 01/07/1998 a 09/09/1998.....	35
18. Serie de tiempo de velocidad superficial de corriente. ....	35
19. Serie de temperatura superficial del mar en la bahía de san Felipe medida (línea continua azul) y modelada (puntos rojos). ....	36
20. Velocidad promedio mensual a 1m de profundidad para el periodo 1995-2021.....	37
21. Temperatura mensual a 1m de profundidad para el periodo 1995-2021. ....	38
22. Promedio mensual de salinidad a 1m de profundidad para el periodo 1995-2021. ....	39
23. Serie de tiempo de viento (A), temperatura y abundancia relativa de <i>G. catenatum</i> medida en la bahía de San Felipe (B). ....	40
24. Espectros de energía cinética turbulenta (izquierda) y abundancia de <i>G. catenatum</i> (derecha) Se muestra la superposición entre las series de 1 hr y 28 días para cada variable en las que se tiene la misma señal a la frecuencia 0.04 cpd. ....	41
25. Co-espectro, espectro de coherencia, espectro cruzado coherente para las señales de <i>G. catenatum</i> y energía cinética turbulenta.....	42
26. Espectros de estrés de fondo asociado al oleaje (izquierda) y abundancia de <i>G. catenatum</i> (derecha) Se muestra la superposición entre las series de 1 hr y 28 días para cada variable en las que se tiene la misma respuesta de energía a la frecuencia 0.084 cpd. ....	43
27. Co-espectro, espectro de coherencia (el límite de confianza se señala con una línea roja), espectro cruzado coherente y espectro de fase para las señales de <i>G. catenatum</i> y estrés de fondo producido por oleaje. ....	43
28. Series de tiempo de abundancia de <i>G. catenatum</i> (A), temperatura superficial del mar (B), viento (C) y energía cinética turbulenta (D) y estrés de fondo producido por oleaje (E). .....	45
29. Matriz de correlación de todas las variables analizadas: abundancia de <i>Gymnodinium catenatum</i> , nivel del mar (SSH), temperatura superficial del mar (SST), energía cinética turbulenta (TKE), componente zonal (U) y meridional (V) del viento.....	46
30. Correlación cruzada entre el promedio de dos días del viento meridional (v) y la abundancia de <i>G. catenatum</i> .....	46
31. Correlación cruzada entre el promedio de dos días del estrés de fondo y la abundancia de <i>G. catenatum</i> . ....	47
32. Ciclo propuesto de formación de florecimientos algales de <i>Gymnodinium catenatum</i> , el cual inicia con la resuspensión de quistes (A) debido al incremento de estrés de fondo (B), siguiendo con el desenquistamiento (C) hasta llegar al desarrollo del FAN (D) y su posterior decaimiento y depósito de quistes (E). ....	48

33. Trayectoria obtenida del transporte de partículas para el FAN de enero de 2017. Los puntos verdes indican las partículas sembradas, las líneas de colores la trayectoria y profundidad seguidas por las partículas y los puntos azules indican las partículas activas al final de la simulación. .... 49
34. Distribución de las partículas para la simulación del FAN 2017 a 1, 15 y 30 días..... 50
35. Ubicación del FAN estimado mediante la simulación del transporte de partículas (A) y detección de la presencia de las clases 1 y 2 asociadas al FAN (B) para el 30 de enero de 2017. .... 50
36. Trayectoria obtenida de la simulación de transporte de partículas para el verano. . Los puntos verdes indican las partículas sembradas, las líneas de colores la trayectoria y profundidad seguidas por las partículas y los puntos azules indican las partículas activas al final de la simulación. .... 51
37. Distribución de las partículas para la simulación del FAN 2017 a 1, 15 y 30 días..... 52

## Lista de tablas

Tabla	Página
1. Matriz de confusión para la clasificación del 17 de enero de 2015 con datos del MODIS.....	70
2. Matriz de confusión de la clasificación del día 18 de enero de 2017 con datos del Sentinel-3. .....	71
3. Lista de detecciones en las fechas de monitoreo semanal.....	71

## Capítulo 1. Introducción

---

El fitoplancton es indispensable para el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos al ser parte fundamental de la red trófica. Sin embargo, en condiciones particulares el crecimiento y acumulación de una o varias especies de fitoplancton puede dar lugar a un florecimiento algal. Algunas de estas acumulaciones tienen efectos negativos, por lo que se denominan florecimientos algales nocivos (Hallegraeff et al, 2004). Estos eventos representan un fenómeno cuya frecuencia y magnitud se han incrementado en prácticamente todas las zonas costeras y en una multitud de cuerpos acuáticos continentales (IOCCG, 2021). Los efectos nocivos están asociados a eventos de hipoxia o anoxia durante el decaimiento del FAN (IOGCC, 2021; Pettersson & Pozdnyakov, 2013), disminución de la calidad del agua o en el caso de las especies tóxicas al efecto de las toxinas, que aún con baja concentración de células pueden producir efectos negativos a la salud pública (Sellner et al., 2003, Kudela et al. 2015), pérdidas económicas asociadas a las afectaciones en las pesquerías por los cierres precautorios y afectaciones ecológicas causadas por la mortandad masiva de organismos (Larkin & Adams, 2007, IOCCG, 2021).

A nivel mundial existen diferentes grupos taxonómicos que forman florecimientos algales como cianobacterias, dinoflagelados, diatomeas y rafidofitas, entre ellos algunas especies tóxicas (Pettersson & Pozdnyakov, 2013). En las costas mexicanas existen documentados florecimientos algales causados por diferentes especies, entre las que destacan *Gymnodinium catenatum*, *Karenia brevis*, *Prorocentrum minimum*, *Alexandrium catenella*, *Pyrodinium bahamense var. compressum*, *Pseudo-nitzschia sp.*, *Prorocentrum lima*, *Cochlodinium polykrikoides*, *Pseudo-nitzschia pseudodelicatissima*, *P. pungens* y *Akashiwo sanguinea* (Ochoa et al. 2002; Band-Schmidt et al. 2011).

En el norte del golfo de California se presentan de manera recurrente florecimientos algales nocivos (FAN) producidos por *Gymnodinium catenatum* que es un dinoflagelado productor de toxinas paralizantes (PSTs) (Medina-Elizalde et al. 2018). Estos eventos han provocado mortandades masivas de peces, aves marinas, así como afectaciones a cultivos de especies marinas e intoxicaciones humanas; por lo que las autoridades sanitarias han tenido que implementar vedas sanitarias que desafortunadamente se traducen en pérdidas millonarias (Band-Schmidt 2011; Nuñez-Vázquez et al. 2011; Band-Schmidt et al. 2016; Nuñez-Vázquez, et al., 2016; Medina-Elizalde et al. 2018). Estas vedas se implementan debido a que en el ser humano el consumo de producto contaminado ocasiona la intoxicación paralizante por consumo de mariscos (PSP por sus siglas en inglés) que presenta una variedad de síntomas gastrointestinales y neurológicos, y que

en casos extremos puede ocasionar la muerte (Lewitus *et al.* 2012; Medina-Elizalde *et al.* 2018; Band-Schmith *et al.* 2019).

El primer evento de PSP provocado por *Gymnodinium catenatum* se presentó en 1979 y tuvo como consecuencia el fallecimiento de tres personas (Lewitus *et al.* 2012). Aunque las cifras de personas intoxicadas y de defunciones antes de 1990 es limitada, a partir de ese año hasta el presente los registros están bien documentados (Band-Schmidt *et al.* 2019).

Investigaciones recientes en el norte del golfo de California (NGC) sobre los FAN de *G. catenatum* han permitido establecer que la especie se presenta durante invierno y primavera cuando se registran las menores temperaturas (Ramírez, 2020). También se ha descrito el patrón de distribución geográfico de toxinas asociado a estos florecimientos algales y su evolución respecto al tiempo (Medina, 2021). Asimismo, se han identificado áreas específicas en donde los quistes de reposo de *G. catenatum* son más abundantes en los sedimentos. Esta zona de abundancia de quistes coincidió con el área en la que se presentó el florecimiento más intenso registrado para el NGC acaecido en enero de 2017 (Castañeda-Quezada, 2021).

Pese a que estos eventos tienen serias consecuencias que abarcan aspectos ecológicos y socioeconómicos, actualmente no se cuenta con un método de detección remota de estos FAN en la región, ni se conocen los procesos físicos asociados a la recurrencia y formación de estos florecimientos algales, aunque se ha planteado que influyen la temperatura, la resuspensión como algunos de los procesos relacionados (Ramírez, 2020; Castañeda, 2021), sin embargo persiste un vacío de información al respecto.

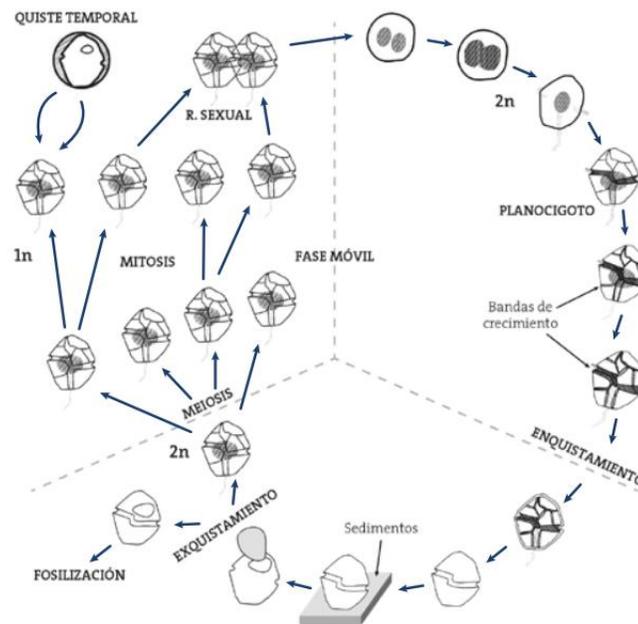
En este contexto, esta investigación se enfocará en diseñar e implementar un método de percepción remota de los florecimientos de *G. catenatum* en el Alto Golfo de California para contar con información sinóptica de estos fenómenos que nos permita conocer su iniciación, magnitud, duración y dispersión. Asimismo, se investigará la influencia de los procesos físicos involucrados en su génesis y dispersión.

## **1.1 Antecedentes**

En el norte del golfo de California los FAN causados por *Gymnodinium catenatum* son recurrentes y han resultado en la implementación de vedas sanitarias que pueden prolongarse por meses (Medina-Elizalde, 2018) con las consecuentes pérdidas económicas millonarias. Dos de los florecimientos con mayor impacto

se presentaron en enero de 2015 y enero de 2017, ocasionando afectaciones de salud pública, daños ecológicos, e impactos socioeconómicos derivados de los cierres sanitarios (Núñez-Vázquez *et al.* 2016; Medina-Elizalde *et al.* 2018, Castañeda-Quezada, 2021).

*Gymnodinium catenatum* es una especie de dinoflagelado desnudo que fue identificada por primera vez por Graham (1943) a partir de muestras del norte del golfo de California de un florecimiento algal que se presentó en marzo de 1939. Las condiciones ambientales reportadas de este florecimiento fueron temperaturas de entre 14 y 17°C y salinidades de 35.07 a 35.50 psu (Graham, 1943; Band-Schmidt *et al.* 2010). Esta especie se caracteriza por ser cosmopolita, ya que su rango de distribución es amplio, distribuyéndose en diferentes zonas del mundo y a diferentes condiciones ambientales (Band-Schmidt *et al.* 2004). El ciclo de vida de la especie está caracterizado por tener una fase vegetativa y una fase de quistes de reposo que se depositan en los sedimentos, lo que les permite sobrevivir en condiciones adversas hasta que existan condiciones favorables para su exquistamiento y crecimiento (Peña-Manjarrez *et al.* 2016, figura 1).

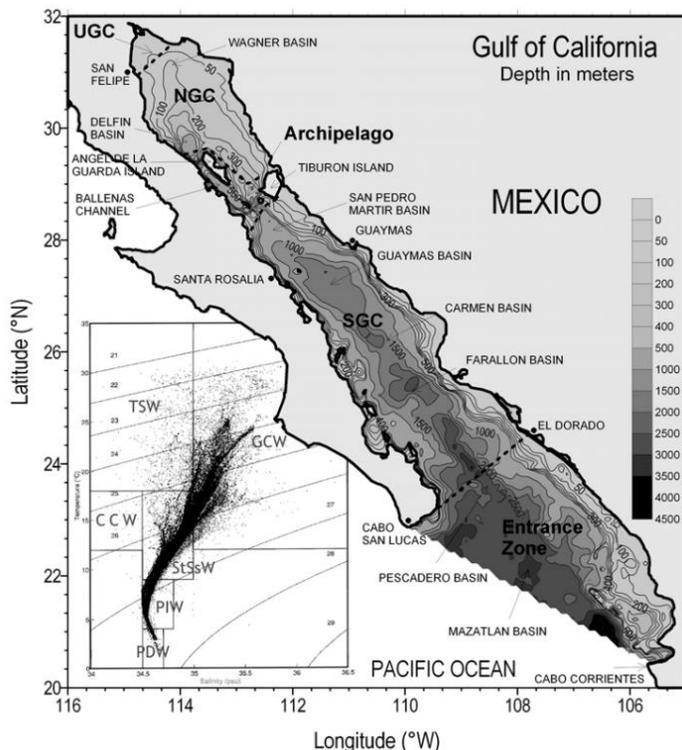


**Figura 1** Diagrama general del ciclo de vida de especies que forman quistes de reposo (Peña-Manjarrez *et al.* 2016).

### 1.1.1 Área de estudio

El golfo de California conocido también como mar de Cortés se ubica entre los 20°N y 32°N y los 105.5°O y 114.5°O. Se trata de un mar subtropical semicerrado que se extiende 1400 km de largo y tiene un ancho

de 150 km a 200 km en la zona central. Se caracteriza por una batimetría cuya profundidad incrementa hacia el sur variando de ~50 m en el Alto golfo de California a ~3600 m en el sur donde se conecta con el Océano Pacífico Tropical (Lavín & Marinone, 2003). Es reconocido como una de las áreas más productivas del mundo en la que se han documentado 79 especies endémicas de peces (Wilkinson *et al.* 2009; Palacios-Salgado *et al.* 2012).



**Figura 2** Ubicación y batimetría del golfo de California (profundidades en m). UGC=Alto golfo de California, NGC=norte del golfo de California, SGC=Sur del golfo de California (Lavín & Marinone, 2003).

El norte del golfo de California (NGC) es una plataforma marina con profundidades que varían entre los 50 m y 500 m, mientras que el área conocida como el Alto golfo de California es la zona más norteña del golfo de California (Figura 2), esta se considera como el área que se encuentra al norte de los 31°N y se caracteriza por ser somera con profundidades menores de 30 m (Lavín & Marinone, 2003).

La circulación en el golfo de California tiene un fuerte componente estacional, con un forzamiento en el sur generado por la entrada de las masas de agua del Pacífico Tropical, y la cooscilación de mareas con las del Océano Pacífico, mientras que los forzamientos atmosféricos ejercen una importante influencia principalmente en las zonas someras del norte (Lavín & Marinone 2003; Marinone, 2003).

Una de las características mejor documentadas de la circulación del golfo de California es la existencia de un giro cuya dirección varía estacionalmente: de junio a septiembre es un giro ciclónico y anticiclónico de noviembre a abril (Lavín & Marinone, 2003, Palacios-Hernández *et al.*, 2002). Otra característica estacional importante que se presentan en el golfo de California es la reversibilidad del patrón de vientos, cuya dirección es predominantemente de sureste a noroeste durante los meses de verano y durante la temporada de invierno-primavera la dirección cambia de noroeste a sureste (Badan-Dangon, 1991; Parés-Sierra *et al.* 2003).

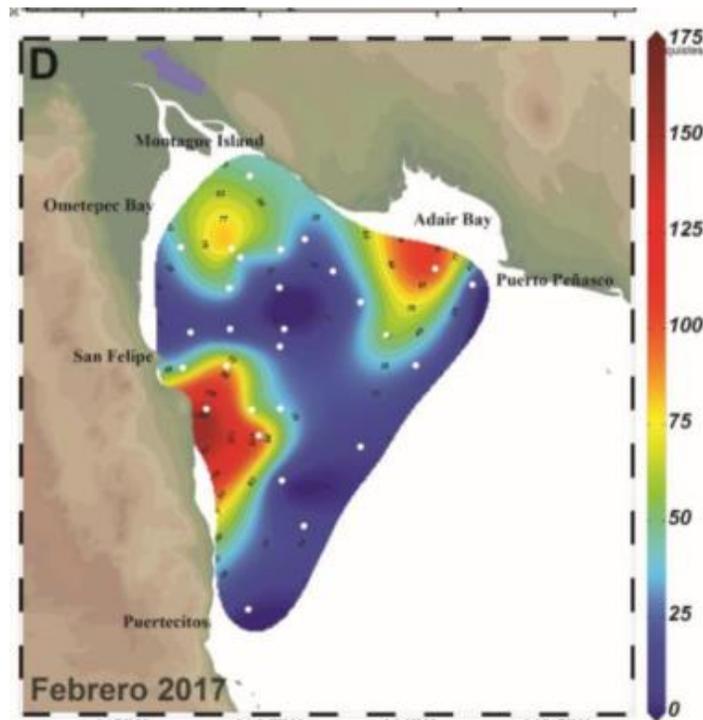
Respecto a su productividad, el área del norte del golfo de California es altamente productiva siendo hábitat de numerosas especies endémicas entre las que se encuentran la vaquita marina (*Phocoena sinus*), la totoaba (*Totoaba macdonaldi*) y la curvina golfina (*Cynoscion othonopterus*), las dos primeras en peligro de extinción (Wilkinson *et al.* 2009; PROFEPA, 2019). De acuerdo con datos oficiales del gobierno de México el Alto golfo de California sostiene una de las pesquerías más importantes del país, enfocada en la pesca de aproximadamente 70 especies entre las que destacan el camarón azul, almeja, mejillón, ostión callos, caracol, pulpo, calamar, camarón café, jaiba, baquetas, lisa, sierra y la que más destaca la curvina golfina (PROFEPA, 2019).

Debido a su importancia ecológica y económica el Alto golfo de California forma parte de la Reserva Natural Alto golfo de California y Delta del Río Colorado. Esta reserva fue decretada en 1993 y consta de una superficie de 934,756.25 ha. En 1995 fue incluida en el programa el Hombre y la Biosfera (MAB) de la UNESCO y en 2005 fue considerada como Sitio de Patrimonio Natural de la Humanidad por la UNESCO, adicionalmente es considerada sitio RAMSAR (CONANP, 2007).

### 1.1.2 Florecimientos algales de *G. catenatum* en el norte del golfo de California

Como se ha mencionado anteriormente, en el norte del golfo de California se han reportado de manera recurrente FAN asociados a esta especie, y de acuerdo con los monitoreos realizados por el laboratorio FICOTOX de CICESE en bahía San Felipe entre noviembre de 2017 y enero del 2021, estos florecimientos se presentan en los meses de invierno, cuando se experimenta también la menor temperatura (Ramírez Castillo, 2020). La presencia de camas de quistes de la especie en el área de San Felipe a Punta Estrella fue documentada en el norte del golfo de California en años recientes posterior a la ocurrencia de un FAN de *G. catenatum* en enero de 2017 (Castañeda-Quezada *et al.*, 2021, figura 3).

La presencia de toxinas paralizantes en mariscos durante 2015 a 2019 fue analizada por Medina Elizalde (2021), cuyos resultados mostraron que el patrón de distribución espacial de las toxinas se ubica en la región de la bahía de San Felipe, así como en el sur, hacia Puertecitos, donde se localizó la cama de quistes (Castañeda-Quezada, 2021). La dinámica de la distribución y la permanencia de estas toxinas varía de acuerdo con las áreas a las que se desarrolla el FAN, así como la duración de este pero la afectación socioeconómica a la zona es recurrente, llegando a ocasionar el cierre de áreas de extracción de almeja por meses, ocasionando la pérdida de empleos, pérdidas millonarias e incluso la declaración de bancarrota por parte de algunos productores (Medina Elizalde, 2021).



**Figura 3** Distribución de quistes de *G. catenatum* en febrero de 2017 (Castañeda, 2021).

### 1.1.3 Detección y monitoreo de FAN usando percepción remota

Si bien hasta el momento no se han implementado métodos para el monitoreo por medio de percepción remota de *G. catenatum* en el norte del golfo de California, sí existen variadas aproximaciones al monitoreo y detección de FAN de otras especies. Una de las herramientas con más potencial para el estudio y monitoreo de los florecimientos algales de forma indirecta es el análisis de la información proveniente de los satélites. Esta información permite el análisis de datos históricos y el monitoreo remoto en tiempo casi real, con tan solo algunas horas de retraso.

Uno de los análisis más útiles es el monitoreo de las anomalías de clorofila-*a* (Tomlinson *et al.* 2009), sin embargo, una de las dificultades del uso de las variaciones de clorofila-*a* para monitorear los florecimientos algales es que se detecta la biomasa de fitoplancton sin la posibilidad de dar seguimiento a una especie en particular (Pettersson & Pozdnyakov, 2013; Glibert *et al.* 2018). Lo anterior ha dado paso al desarrollo de distintos algoritmos para la identificación de florecimientos algales basados en la idea de que a un florecimiento algal nocivo específico le corresponde una señal espectral característica (Shen *et al.* 2012). Derivado de esta idea existen múltiples trabajos en los que se proponen métodos para el monitoreo de florecimientos algales de distintas especies y en diferentes regiones del mundo. Estas técnicas pueden recurrir al uso de una banda espectral en particular, al cálculo de la diferencia o proporción entre dos bandas y al desarrollo de algoritmos que recurren al uso de múltiples bandas (Shen *et al.* 2012; Sakuno *et al.* 2019).

Otro tipo de método que ha sido utilizado para la detección de algunos florecimientos algales es la clasificación supervisada (Miller *et al.* 2006; Ahn *et al.* 2006; Kurekin *et al.* 2014). La clasificación supervisada permite al usuario definir las clases espectrales de su interés, por lo que el analista tiene la capacidad de caracterizarlas y también de usar la clasificación para determinar la existencia de la clase espectral en una imagen de satélite. La generación de estas clases está basada en la selección de zonas de entrenamiento. Estas son zonas geográficas que poseen rasgos específicos en las que se espera que puedan ser detectadas características espectrales distintivas (Khorran *et al.* 2012). Estas clases se generan de acuerdo con el conocimiento del área de estudio, ya sea por la existencia de datos previos o visitas de campo que permitan identificar en una imagen satelital las áreas que en campo fueron caracterizadas. De esta forma el analista es responsable totalmente de la generación de las clases espectrales para la realización de la clasificación (Khorran *et al.* 2012).

El algoritmo de máxima verosimilitud es un método de clasificación supervisada que ha tenido buenos resultados en la identificación de mantos de *Macrocystis* en aguas de alta turbidez (Casal *et al.* 2011), en el mapeo de comunidades de macroalgas (Casal *et al.*, 2011), estudios de cambio de uso de suelo y de la cobertura de manglar (Gevana *et al.* 2015), así como para documentar variaciones en la extensión y vegetación flotante de cuerpos de agua continentales a través del tiempo (Hossen y Negm, 2016). Este algoritmo determina la probabilidad de que un píxel pertenezca a una clase espectral específica de entre un grupo de clases previamente generadas por medio de zonas de entrenamiento y lo asigna a la clase a la que tiene la máxima probabilidad de pertenecer (Richards, 2022; Hogland, 2013). Si bien este método no ha sido implementado para la identificación de FAN puede tener interesantes aplicaciones en este campo, por lo que en este trabajo se recurre a la implementación de este algoritmo de clasificación.

#### 1.1.4 Estudio de procesos físicos asociados a FAN

A nivel mundial uno de los temas de estudio que se han desarrollado referente a los FAN es el concerniente a la identificación de los procesos asociados a la formación de estos fenómenos. Eventos asociados a diferentes especies y en diferentes regiones han sido analizados por medio de datos históricos medidos *in-situ*, modelación numérica y percepción remota. El objetivo común es lograr el entendimiento de las condiciones o procesos detonantes de estos fenómenos con la intención de poder avanzar hacia su predicción.

Una de las herramientas usadas para el estudio de los FAN es la modelación numérica para representar la hidrodinámica, así como los procesos físico-biológicos con el fin de reproducir la dinámica de estos eventos y estudiar de forma detallada los procesos físicos asociados a su formación. Existen diversas formas de usar la modelación hidrodinámica para estudiar los FAN. Desde la combinación de información de muestreos, satelital y de modelación hidrodinámica para su predicción (Anderson *et al.*, 2011), el ensamble de modelos físicos y modelos biológicos que describen la dinámica de crecimiento de la especie de interés, incluso existen modelos que consideran la capacidad de la especie de formar quistes y esta influencia en la dinámica del florecimiento (Stock *et al.* 2005; He *et al.* 2008; Yñiguez *et al.* 2018)

Otra de las aplicaciones de los modelos numéricos, de una forma un poco más simple pero también muy eficiente es la modelación hidrodinámica para el estudio del transporte de estos florecimientos, esto se logra mediante la simulación del transporte de partículas por medio de elementos lagrangianos (Kavanaugh *et al.* 2015, Wynne *et al.* 2011). Este tipo de aproximación fue usada por Pinto *et al.* (2016) para estudiar la evolución del transporte de un FAN de *G. catenatum* en la península Ibérica, cuyos resultados fueron consistentes con la información obtenida de los monitoreos. Una aproximación similar contenida en el paquete Ichthyop fue usada para analizar el decaimiento de un florecimiento de *Dinophysis acuminata* en el golfo de Vizcaya (Velo-Suárez *et al.* 2010).

De acuerdo con lo anterior, la integración de la información derivada de modelos numéricos hidrodinámicos, así como la proveniente de los acoplamientos físico-biológicos más el uso de elementos lagrangianos, ofrecen amplias posibilidades para abordar el estudio de los florecimientos algales y, con ello, contar con información que nos permita mitigar sus impactos. No obstante, el estudio de las condiciones ambientales y procesos físicos que originan los florecimientos de *G. catenatum* se encuentra en sus primeras etapas. Por los trabajos realizados en los años recientes se conoce que la presencia de la especie en las áreas afectadas de manera recurrente está limitada a los meses de primavera y verano en

los que se presentan las menores temperaturas en el NGC (Ramírez, 2020, Medina, 2021), también se han realizado algunos experimentos numéricos referentes al transporte de quistes (Castañeda-Quezada et al., 2021), pero no se han realizado otros estudios al respecto de las condiciones que pueden estar provocando la recurrencia de estos florecimientos y la particular área de afectación.

## **1.2 Justificación**

La ocurrencia de florecimientos algales nocivos causados por este dinoflagelado, en el norte del golfo de California requiere investigación multidisciplinaria que permita abordar las diferentes aristas de esta problemática, que van desde lo ecológico hasta lo socioeconómico en el contexto de un sistema costero de características complejas. Entre los aspectos relevantes para afrontar este tema se encuentran la implementación de métodos que permitan realizar monitoreos remotos y detecciones tempranas de la formación de un FAN de *Gymnodinium catenatum*, así como la identificación de procesos físicos asociados a la formación de estos florecimientos, que son los principales intereses de este trabajo. Este conocimiento brindará bases que permitan avanzar hacia la implementación de sistemas de monitoreo y predicción que pueden funcionar como un componente de atención ante estos fenómenos que afectan no solo a nivel ecológico, sino que se han convertido en un problema que afecta a la sociedad y el desarrollo económico de la región del norte del golfo de California.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

Generar las bases de un sistema de monitoreo de FAN de *G. catenatum* a partir de la percepción remota y uso de modelación hidrodinámica.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

1.- Implementar un método que permita detectar espacial y temporalmente FAN de *G. catenatum* con datos satelitales.

- 2.- Identificar los procesos físicos asociados a la formación de florecimientos algales de *G. catenatum*.
  
- 3.- Describir el posible proceso de transporte de un florecimiento algal de *G. catenatum*.

## Capítulo 2. Metodología

---

Este capítulo describe la metodología seguida para cumplir con cada uno de los objetivos de esta investigación, se divide en tres secciones que mantienen el orden en el que fueron planteados los objetivos.

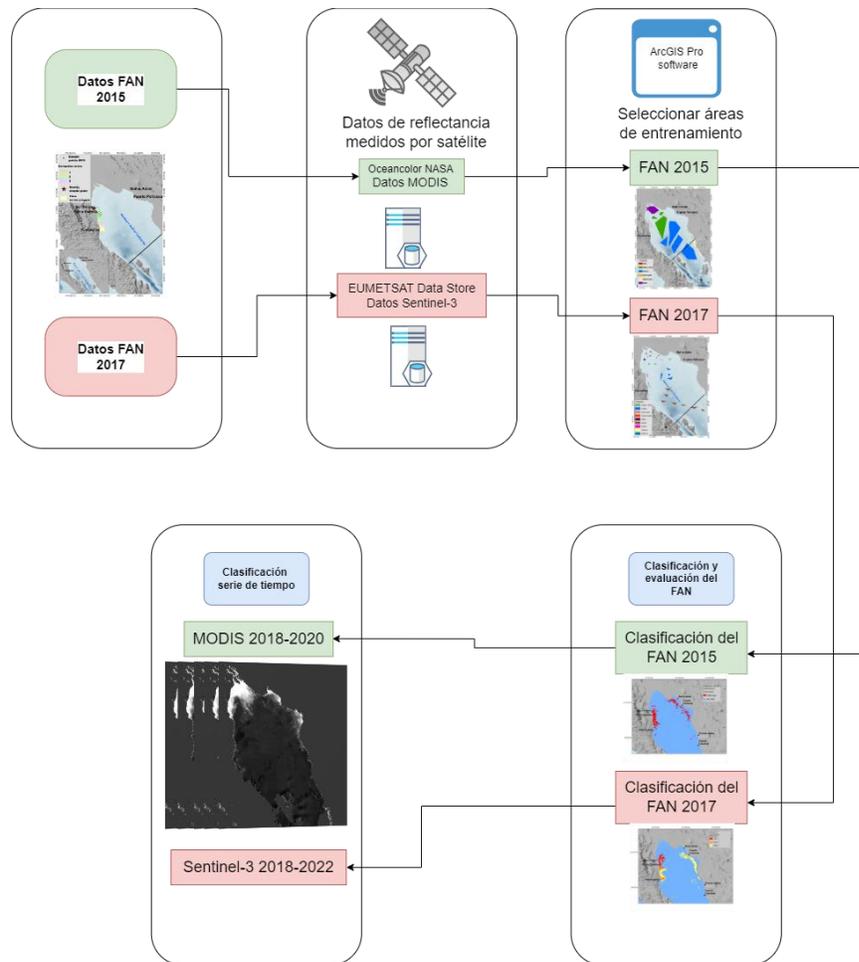
### 2.1 Detección de florecimientos algales nocivos de *Gymnodinium catenatum* por medio de percepción remota

Para cumplir con el primer objetivo de este trabajo el cual se centró en la detección de los florecimientos algales por medio de la percepción remota, se implementó el uso del método de clasificación supervisada de imágenes de satélite por medio del método de clasificación de máxima verosimilitud para detectar FAN de *G. catenatum* en el área de estudio.

#### 2.1.1 Clasificador de máxima verosimilitud

El clasificador de máxima verosimilitud usado es un método basado en la clasificación bayesiana que determina la probabilidad de que un píxel pertenezca a una de las clases espectrales generadas por el analista (Hogland et al. 2013, Richards, 2022), este método de clasificación fue implementado por medio del software ArcGIS Pro 2.5.

Para usar este método se requiere generar un archivo de firmas que contiene toda la información de las clases espectrales. Las clases espectrales son generadas con base en las zonas de entrenamiento y describen las características espectrales de un área de la imagen satelital. En este trabajo las clases espectrales asociadas al FAN de *G. catenatum* se basaron en información de dos campañas de muestreo que se realizaron durante un FAN en 2015 y uno en 2017, en el norte del golfo de California. El diagrama de flujo del proceso general para la implementación de la clasificación (figura 4) resume los pasos para llevar a cabo la clasificación, en las secciones siguientes se abordarán los detalles de cada etapa de la implementación.

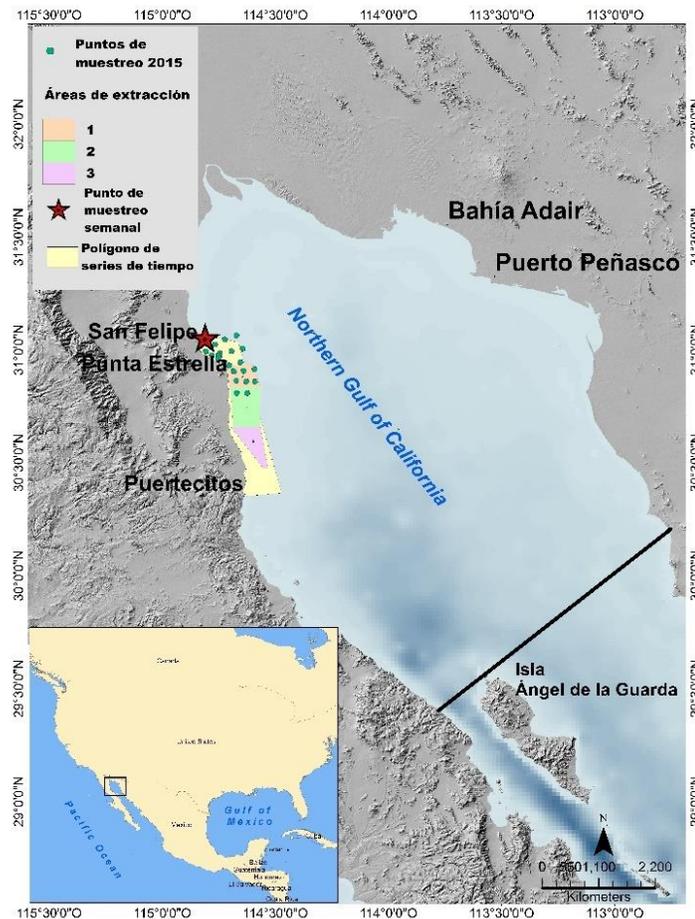


**Figura 4** Diagrama de flujo del proceso de implementación del clasificador de máxima verosimilitud para detección de FAN de *G. catenatum*.

### 2.1.2 Abundancia de *G. catenatum* durante dos FAN

Los datos de abundancia de *G. catenatum* en los que se basaron las zonas de entrenamiento asociadas al FAN, provienen de muestreos correspondientes a dos eventos que se presentaron en el norte del golfo de California. El primero se presentó los días 17 y 18 de enero de 2015 en la zona de San Felipe-Punta Estrella, y se recolectaron muestras en 22 sitios (puntos verdes en figura 5). El segundo muestreo correspondió a un evento ocurrido en enero de 2017 que afectó algunos polígonos de extracción de almeja generosa al sur de San Felipe, se obtuvieron muestras de tres de estos polígonos (figura 5). Las muestras fueron tomadas el 17 de enero para los polígonos 1 y 2 y el 19 de enero para el polígono 3. Las abundancias de *G. catenatum* registradas en superficie en cada polígono fueron de 311,000 cel/l, 149,200 cel/l y 95,400 cel/l (Castañeda-Quezada *et al.* 2021).

Adicionalmente, desde finales de 2017 el laboratorio FICOTOX del CICESE mantiene un muestreo semanal en la costa este del Alto golfo de California, en una zona costera de la bahía de San Felipe (figura 5, estrella roja). En este punto de monitoreo se obtienen datos diarios de temperatura superficial del mar y muestras semanales de agua con las que se determina la estructura de la comunidad fitoplanctónica.



**Figura 5** Ubicación de los puntos de muestreo en el 2015 (puntos verdes), polígonos de extracción afectados en 2017 (polígonos anaranjado, verde y rosa), punto de muestreo semanal (estrella roja) y polígono usado para generar las series de tiempo de detección (polígono amarillo).

### 2.1.3 Bases de datos satelitales

Para analizar el florecimiento de 2015 se usaron datos provenientes del MODIS correspondientes a datos de reflectancia en las bandas de 412, 443, 469, 488, 531, 547, 555, 645, 667, y 678 nm. Esta base de datos fue provista por la Unidad Especializada en Percepción Remota Satelital De La Universidad De Nayarit y corresponden a datos de nivel 2 que cuentan con una resolución de 1 km. La base de datos usada corresponde a datos de los días del FAN del 2015 y una serie de imágenes diarias del periodo 2018 a 2020.

Las imágenes diarias disponibles fueron filtradas por nubes de manera automática con un código implementado en Matlab® para obtener imágenes con un mínimo de 80% de datos, además se aplicó un criterio de calidad en las que se excluyeron imágenes ruidosas o bandeadas que podían provocar errores en la clasificación. Con este procedimiento se obtuvo una serie de 353 imágenes que cumplieron los criterios de calidad para el periodo de 2018-2020.

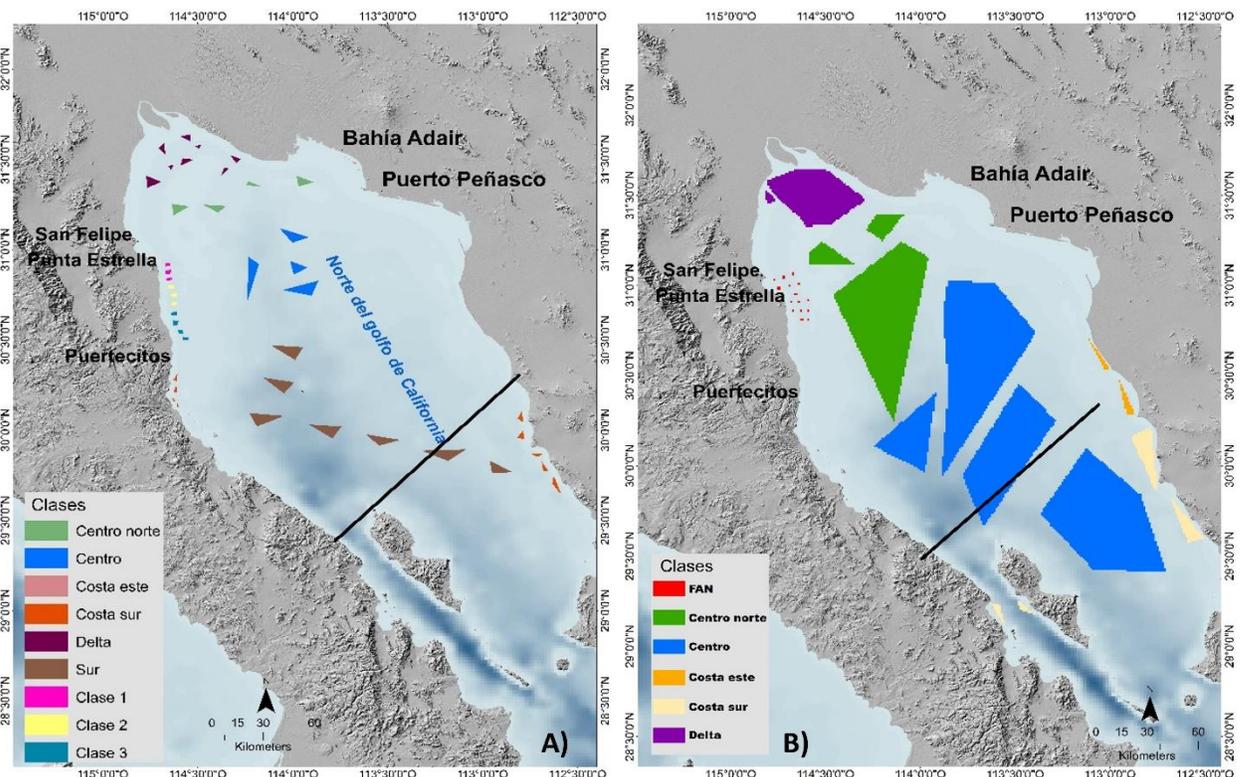
El FAN de 2017 se estudió con datos de imágenes satelitales del sensor OLCI de los satélites Sentinel-3 A y B por su mayor resolución espacial (300 m), se consideraron los datos de reflectancia en las bandas de 412.5, 442.5, 490, 510, 560, 620, 665, 673.75, 681.25 y 708.75 nm. Para esta base de datos se descargaron las escenas diarias que cubren el área de estudio, del producto nivel 2 (Level 2, Water Full Resolution). Estas escenas diarias fueron descargadas a través del EUMETSAT data centre (<https://www.eumetsat.int/eumetsat-data-centre>) por medio de la implementación de un código de descarga automatizada. Para procesar estas escenas y obtener una sola imagen del NGC se usó el software de acceso gratuito SNAP, el cual es proveído por la Agencia Espacial Europea (por sus siglas en inglés) (<https://step.esa.int/main/download/snap-download/>). El proceso consiste en el recorte, reproyección geográfica y generación de mosaicos. Con el objetivo de hacer eficiente el proceso se desarrollaron códigos usando bash, Python y la opción de línea de comandos del software SNAP. Estas imágenes se filtraron de manera automática con un código implementado en Matlab® para obtener imágenes que contaran con un mínimo de 70% de datos en el área de estudio, obteniendo 317 imágenes para el periodo del 2018-2020 y 432 para el periodo del 2018 al 17 de marzo 2022.

#### 2.1.4 Selección de áreas de entrenamiento

Para la clasificación referente al FAN de enero de 2015 se utilizaron los datos provenientes del sensor MODIS Aqua del 17 de enero del 2015 para generar las clases espectrales. Cada una de las ubicaciones puntuales del muestreo fue considerada como un polígono de entrenamiento para la clase FAN 2015, a excepción de los puntos localizados muy cercanos a la costa por la alta probabilidad de que los datos fueran ruidosos. Por lo anterior, se usaron 18 ubicaciones para generar la clase (figura 6A, puntos rojos). La clase generada con estas zonas de entrenamiento se consideró representativa de un FAN causado por *G. catenatum*.

Para el florecimiento del 2017 se usaron datos del Sentinel-3, considerando que los muestreos se realizaron los días 17 y 19 de enero y en ambos se reportó la presencia de *G. catenatum* se usó la imagen

disponible del 18 de enero para generar las clases espectrales correspondientes a este FAN. Se generaron tres clases asociadas al FAN (figura 6B), cada una corresponde a un área concesionada para la extracción de *Panopea sp.* (almeja generosa) que fueron etiquetadas como Clase 1, Clase 2 y Clase 3, cada clase está asociada a un polígono de extracción en los cuales se reportaron abundancias celulares de 311,000, 149,200 y 95,400 cel/L respectivamente. Se seleccionaron áreas de entrenamiento dentro de cada polígono de extracción donde se detectó una mayor concentración de clorofila, así se generaron tres pequeñas áreas de entrenamiento en el interior de cada polígono de extracción (figura 6B).



**Figura 6** Ubicación de las áreas de entrenamiento usadas para generar las clases espectrales para la clasificación para MODIS (A) y Sentinel-3 (B).

Para ambos casos (MODIS, 2015 y Sentinel-3, 2017) se generaron otras clases espectrales con el objetivo de caracterizar áreas del norte del golfo de California (figura 6A y B) donde no se tuvieron indicios de la presencia de la especie, ni altas concentraciones de clorofila satelital, o que se conoce que tienen características hidrográficas o ambientales diferentes a la costa oeste donde se presentó el FAN de *G. catenatum*. Se generó una clase espectral en la zona del delta del río Colorado en el Alto golfo de California que es una zona somera con alta turbidez debido al aporte de material terrígeno. De forma similar, se generaron varias clases espectrales de norte a sur en el centro del NGC, en áreas con profundidades que

varían entre los 50 y 200 m, en las que se presentó una menor concentración de clorofila estimada por satélite.

Aunado a lo anterior y con el fin de obtener clases espectrales en condición de FAN y cuando *G. catenatum* no se presenta en la región (condición No FAN) se definieron zonas de entrenamiento en los mismos polígonos de las clases generadas con anterioridad con excepción de las áreas FAN, pero para la temporada de verano en la cual no se tiene documentada la presencia de la especie en la zona (Ramírez, 2019), para esto se utilizó una imagen del 3 de junio del 2018.

### 2.1.5 Evaluación de los resultados de la clasificación

Los resultados de cada clasificación fueron evaluados usando el coeficiente kappa ( $\hat{K}$ ). Para calcular kappa es necesario estimar la matriz de confusión, esta es una matriz cuadrada que expresa la cantidad de píxeles que fueron asignadas a una clase en particular durante la clasificación. Columnas y filas indican las clases, la diagonal indica el número de píxeles que se clasificaron correctamente es decir fueron asignadas a las mismas clases en las que se etiquetaron durante el entrenamiento, mientras que las demás celdas indican en que otras clases fueron asignadas las muestras y por tanto los errores cometidos por la clasificación.

Kappa se estima de acuerdo con la ecuación (1), desarrollado por Cohen (1960). Este es una técnica discreta multivariada para medir la proporción de concordancia después de que las concordancias aleatorias fueron removidas (Banko, 1998). Para calcular el coeficiente kappa se usaron las siguientes ecuaciones (Congalton y Green, 2019, Banko, 1998):

$$\rho_o = \frac{\sum X_{ii}}{N} \quad (1)$$

$$\rho_c = \frac{\sum X_i + X_{+i}}{N^2} \quad (2)$$

$$\hat{K} = \frac{\rho_o - \rho_c}{1 - \rho_c} \quad (3)$$

Donde (1) indica la precisión de acuerdo con lo observado y (2) indica la precisión aleatoria.  $X_{ii}$  es la observación en la fila  $i$  la columna  $i$ .  $X_{i+}$  es el total marginal de la fila  $i$ , y  $X_{+i}$  es el total marginal de las

columnas y  $N$  es el total de observaciones. Un valor de  $\hat{K} = 1$  indica una coincidencia perfecta entre la clase etiquetada durante el entrenamiento y como fue clasificada, un  $\hat{K} = 0$  indica nula concordancia (Banko, 1998, Congalton & Green, 2019, Landis & Koch, 1997).

Después de evaluar el resultado de cada clasificación, se aplicó la clasificación a los datos diarios de MODIS Aqua del periodo 2018-2020 y del Sentinel-3 para el periodo 2018-2022. Para identificar las zonas que fueron clasificadas de manera recurrente como clases asociadas al FAN de *G. catenatum* se estimó la cantidad de veces que un mismo píxel fue clasificado como clase FAN. Con esta información se generaron mapas de frecuencia que permiten identificar las zonas en las que las clases se detectaron de manera recurrente y compararlas con zonas que está documentado son afectadas cada año. Para evaluar la calidad de esta detección de *Gymnodinium catenatum* a lo largo del tiempo utilizando la clasificación de máxima verosimilitud con la serie de imágenes MODIS y Sentinel-3, se utilizó una base de datos de una serie temporal de *G. catenatum*. Esta base de datos corresponde al programa de monitoreo del laboratorio FICOTOX del CICESE. Para generar la serie temporal de resultados de clasificación de imágenes se delimitó un polígono de San Felipe a Punta Estrella y 15 km costa afuera (figura 2, polígono amarillo). A partir de los datos de este polígono se calculó el porcentaje de esta área clasificada como una clase asociada al FAN para cada imagen.

Además, se comparó cuantitativamente la detección de *G. catenatum* con las clases Sentinel-3 cuando la abundancia relativa de *G. catenatum* fue igual o superior al 5% de la comunidad fitoplanctónica en San Felipe, ya que se consideró este límite como la abundancia mínima que podría ser un indicador de la presencia de un FAN de la especie en la zona. Esta comparación se realizó considerando la clasificación de las imágenes disponibles del día de la toma de la muestra en San Felipe, un día antes y un día después. Por lo tanto, se obtuvieron los datos cuando se registró *G. catenatum* y las imágenes Sentinel-3 estaban disponibles (Anexos, Tabla A1). Para considerar la detección de las clases de Sentinel-3 relacionadas con la presencia detectada de la especie, se estableció una distancia máxima de 15 km desde el sitio de muestreo de San Felipe.

## **2.2 Procesos físicos asociados a florecimientos algales nocivos de *G. catenatum***

Para estudiar los procesos físicos asociados a los florecimientos algales nocivos de *Gymnodinium catenatum* se implementó un modelo hidrodinámico del norte del golfo de California, usando el sistema

de modelación oceánica regional (ROMS por sus siglas en inglés), los detalles de la implementación y validación serán abordados en las siguientes secciones.

### 2.2.1 Sistema de modelación oceánica regional

El Sistema de Modelación Oceánica Regional (ROMS) es un modelo tridimensional de superficie libre que resuelve las ecuaciones primitivas considerando la aproximación hidrostática y de Boussinesq. Es ampliamente aceptado y usado por la comunidad científica en diversas aplicaciones desde el estudio de transporte de plásticos hasta el estudio de florecimientos algales nocivos (Li *et al.* 2021, Liu *et al.* 2023; Stock *et al.* 2005, He *et al.* 2008, Giddings *et al.* 2014).

Las ecuaciones primitivas en coordenadas cartesianas que resuelve el modelo son las siguientes (Hedström, 2018).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla u - fv = -\frac{\partial \phi}{\partial x} + F_u + D_u \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla v + fu = -\frac{\partial \phi}{\partial y} + F_v + D_v \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T = F_T + D_T \quad (6)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla S = +F_S + D_S \quad (7)$$

$$\rho = \rho(T, S, P) \quad (8)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = -\frac{\rho g}{\rho_0} \quad (9)$$

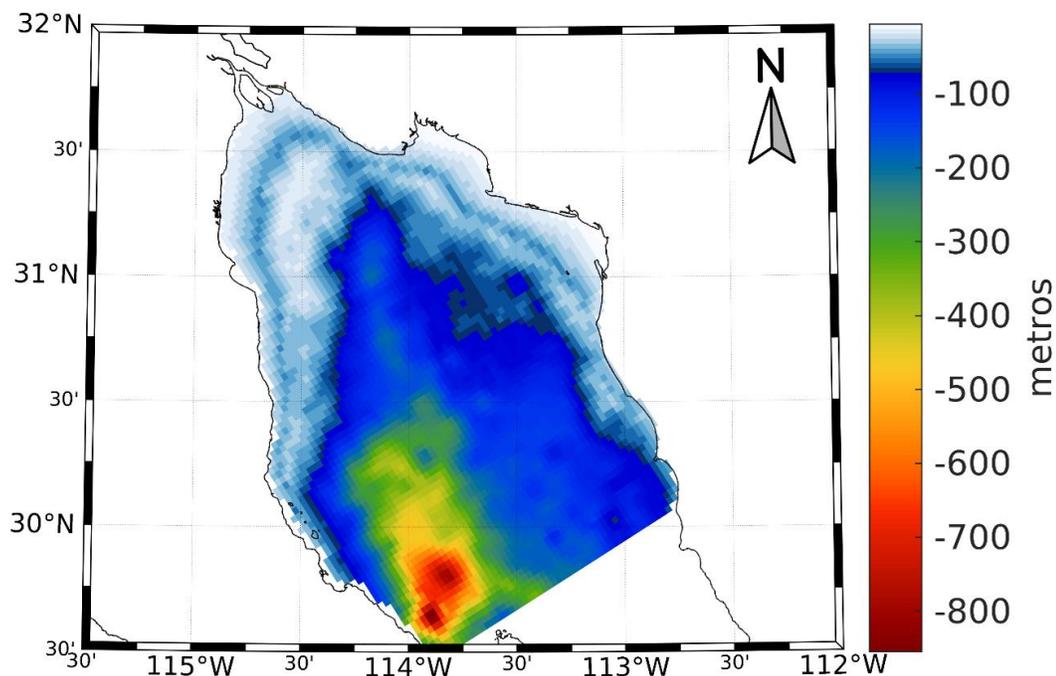
$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

$u, v, w$  son las componentes del vector de velocidad  $\vec{v}$ ,  $T$  es la temperatura potencial,  $S$  es la salinidad total,  $\rho_0 + \rho(x, y, z, t)$  es la densidad total con una  $\rho_0$  de referencia,  $\phi$  es la energía asociada a la presión dinámica  $P$ ,  $f(x, y)$  es el parámetro de coriolis,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $D_u, D_v, D_T, D_S$  son los términos de difusión y  $F_u, F_v, F_T, F_S$  son los términos de forzamiento.

Las ecuaciones (4) y (5) corresponden al momentum en la dirección zonal (x o longitud) y meridional (y o latitud), considerando los términos del parámetro de Coriolis y los términos de forzamiento superficial y difusión. Las ecuaciones (6) y (7) describen los balances de temperatura y salinidad respectivamente, que son determinados por la advección y difusividad. Las variables que se resuelven en las ecuaciones son el campo de velocidad y la densidad; para resolver esta última se recurre a la ecuación (8), que es la ecuación de estado del agua de mar, que describe la densidad como función de la salinidad, temperatura y la presión (Dijkstra, 2008). La ecuación (9) describe el equilibrio hidrostático en la vertical. La ecuación (10) es la ecuación de continuidad para un fluido incompresible.

### 2.2.2 Implementación del modelo al NGC

Para el modelo se consideró un dominio que abarca el norte del golfo de California, que se definió de la longitud -112 a -115.5, y la latitud 29 a 32 (figura 7). La malla se construyó con la herramienta de uso gratuito GridBuilder (<https://austides.com/downloads/>) y se configuró con una resolución que varía entre 2.5 a 2.9 km en la horizontal y cuenta con 15 niveles en la vertical. Esta malla se roto un ángulo de 32.4° para optimizar el número de nodos respecto al área del dominio. Con esto se obtuvo una malla de 109x80 puntos. La batimetría usada proviene de ETOPO1 que cuenta con aproximadamente 2 km de resolución (Amante, C. y B.W. Eakins, 2009). Esta batimetría se cargó al software Gridbuilder para realizar la interpolación, suavizado y cumplir con los parámetros requeridos por el modelo (figura 7).



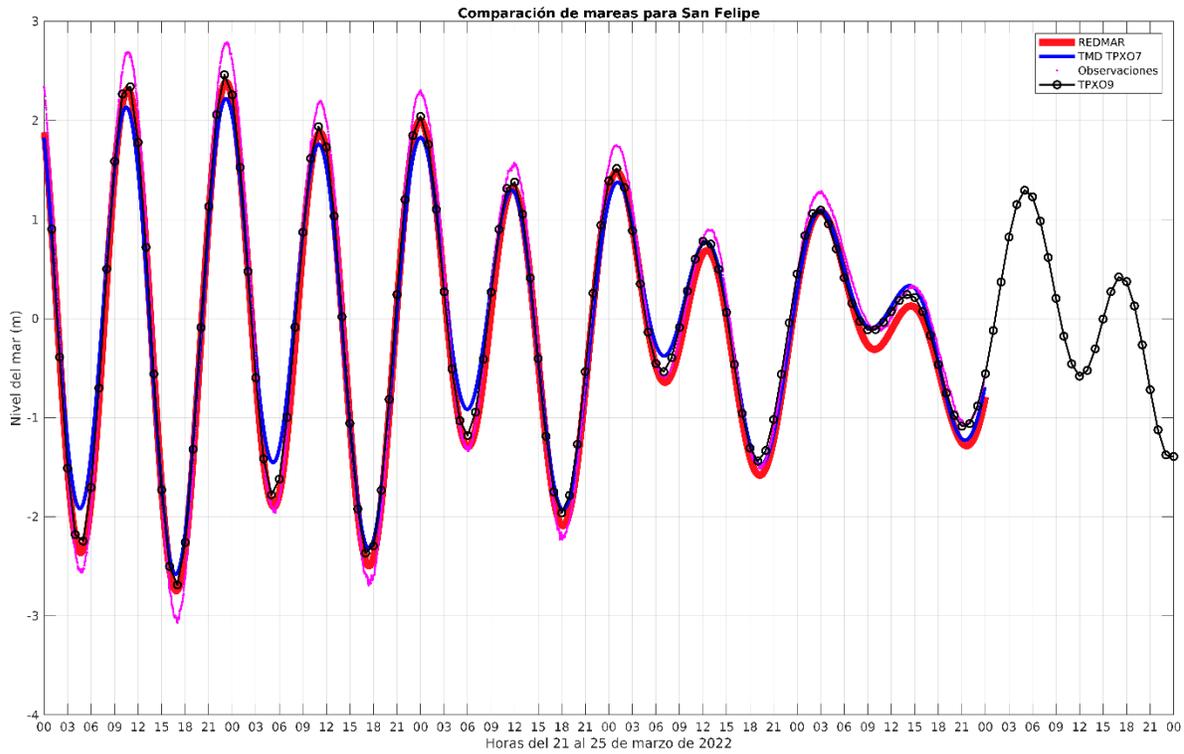
**Figura 7** Dominio y batimetría del modelo implementado.

El modelo cuenta con una frontera abierta en el sur, en esta se impusieron datos de temperatura, salinidad, corrientes (componentes  $u$  y  $v$ ) provenientes del modelo GLORYS12V1 (<https://doi.org/10.48670/moi-00021>) para el periodo 1993 a 2020 y del modelo Mercator (<https://doi.org/10.48670/moi-00016>) para el año 2021. Los datos de estos modelos se encuentran disponibles en la página web Copernicus Marine Service (CMEMS) y cuentan con una resolución horizontal de  $1/12^\circ$  ( $\sim 8$  km) y 50 niveles en la vertical. Debido a la cantidad de datos requeridos se generaron códigos para automatizar la descarga de usando Python 3 (G. Van Rossum, 1995) y la librería Motu client (<https://github.com/clstoulouse/motu-client-python>). Los datos fueron interpolados a la malla del modelo usando rutinas escritas en Matlab®. Para lo cual se siguieron dos pasos, el primero consistió en interpolar la malla del modelo global del CMEMS al modelo del NGC en cada uno de los niveles, para posteriormente interpolar en la vertical de las profundidades del modelo global a cada una de las profundidades de la frontera sur del modelo del NGC. La primera interpolación se realizó usando el método griddata de Matlab, la segunda se realizó usando la rutina de mapeo objetivo de Barnes (S. Pierce, 2010).

A partir de los datos de las componentes de velocidad de los modelos globales se calcularon los componentes barotrópicos de velocidad ( $u_{bar}$  y  $v_{bar}$ ) para lo que se usó una rutina específica que fue extraída y adaptada del ROMSTOOLS (Penven et al. 2008). El nivel del mar para la frontera fue calculado con la herramienta TMD (Egbert y Svetlana, 2002) a partir de datos del TPXO9atlas (Egbert y Svetlana, 2002). Para determinar si estos datos eran estimados correctamente se compararon los resultados de datos medidos en la estación mareográfica de San Felipe, los datos obtenidos por el pronóstico REDMAR del CICESE, así como los obtenidos con TPXO 7 y TPXO9 (Egbert y Svetlana, 2002) para el periodo del 21 al 25 de marzo de 2022 (figura 8). Se observó que se tiene una buena representación de las mareas con los datos del TPXO 9, aunque se subestiman un poco los valores extremos. Considerando que estos datos representan adecuadamente el comportamiento de marea se procedió a generar los datos de frontera de nivel del mar.

Debido a que existe una interacción entre atmósfera y océano es necesario imponer forzamientos en la superficie del modelo. El ROMS permite imponer estos forzamientos de manera directa como datos del esfuerzo del viento, el flujo de calor neto o el flujo de agua dulce, sin embargo, también existe la posibilidad de que estos sean calculados de manera interna de acuerdo con la dinámica del modelo por medio del módulo "bulk\_fluxes" (<https://www.myroms.org/index.php?page=forcing>). Este módulo usa los métodos descritos por Liu *et al.* (1979) y Fairall *et al.* (1996a, 1996b) para la estimación de los forzamientos. Para ello es necesario proporcionar las componentes del viento zonal y meridional, temperatura del aire, presión del aire, tasa de precipitación neta, radiación de onda corta y humedad relativa. Los datos de las

componentes zonal y meridional del viento, temperatura del aire, presión del aire, tasa de precipitación neta y radiación de onda corta fueron tomados del reanálisis atmosférico global ERA-5 (Hersbach *et al.* 2020) con una frecuencia de un dato cada 3 horas. Estos datos cuentan con una resolución de  $0.25^\circ$  y se interpolaron a la malla del modelo con rutinas de Matlab<sup>®</sup> usando el método `griddata`.



**Figura 8** Serie de tiempo de nivel del mar comparando datos de REDMAR, TPX07, Observaciones y TPX09.

La humedad relativa que es una variable derivada de los datos del ERA-5 fue calculada a partir de la ecuación de Bolton, (1980):

$$e_s = 6.112 * \exp((17.67 * Ta) / (Ta + 243.5)) \quad (11)$$

$$e = 6.112 * \exp(17.67 * Td) / (Td + 243.5) \quad (12)$$

$$RH = 100 * (e / e_s) \quad (13)$$

Donde  $e_s$  es presión de saturación de vapor en mb,  $e$  es presión de vapor en mb,  $Td$  es la temperatura de punto de rocío en  $^\circ\text{C}$ ,  $Ta$  es la temperatura del aire en  $^\circ\text{C}$  y  $RH$  es humedad relativa en porcentaje.

El modelo se ejecutó de 1993 a 2021, los primeros dos años se usaron como periodo de ajuste y los resultados de 1995 a 2021 fueron considerados como datos válidos para los análisis. Este periodo fue configurado para contar con una salida promedio diaria. El modelo se corrió nuevamente para el periodo 2018-2021 y para junio-septiembre de 1998 para contar con salidas horarias con el objetivo de usarlas para análisis que requirieron mayor resolución temporal.

### 2.2.3 Validación

La marea y velocidades del modelo fueron comparadas con las obtenidas a partir de datos in situ tomados durante el periodo 1 de julio a 9 de septiembre de 1998. Estos datos se midieron con un ADP anclado al fondo, que fue configurado con 50 celdas con un tamaño de celda de 0.50 m y para realizar una medición cada 600 segundos. Estos datos se procesaron para obtener la curva de nivel del mar y para eliminar datos ruidosos de las componentes de velocidad. De esta serie se extrajeron datos horarios que fueron comparados con los datos provenientes de las salidas horarias del modelo, a partir de estos datos se estimó la correlación y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (\hat{y}_t - y_t)^2}{N}} \quad (14)$$

Donde  $\hat{y}_t$  es el valor modelado mientras que  $y_t$  es el valor medido y  $N$  es el número total de mediciones.

Se usó también una serie de temperatura superficial del mar de 2018 a 2020 del punto de muestreo en la bahía de San Felipe, esta serie cuenta con datos cada hora. Los datos de temperatura superficial del modelo fueron extraídos para el mismo periodo de la serie medida y fueron comparados, se estimó también la correlación y el error.

### 2.2.4 Análisis de series de tiempo

Para identificar la relación de las diferentes variables físicas con la presencia de la microalga, se compararon las series de tiempo de la especie (monitoreo semanal) con series de tiempo de temperatura, nivel del mar, energía cinética turbulenta superficial, obtenidas del modelo ROMS; así como series de

tiempo de viento y esfuerzo de fondo asociado al oleaje provenientes de datos del reanálisis de ERA-5, los mismos usados para configurar el modelo hidrodinámico.

Dado que el modelo implementado en este trabajo (ROMS) no considera el oleaje, se estimó el esfuerzo de fondo generado por oleaje usando el método descrito en Soulsby (1997), de acuerdo con las ecuaciones siguientes.

$$\tau_w = \frac{1}{2} \rho f_w U_w^2 \quad (15)$$

$$f_w = 1.39 \left( \frac{A_w}{z_o} \right)^{-0.52} \quad (16)$$

$$U_w = \frac{\pi H_s}{T_p \sinh(kh)} \quad (17)$$

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (18)$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(kh) \quad (19)$$

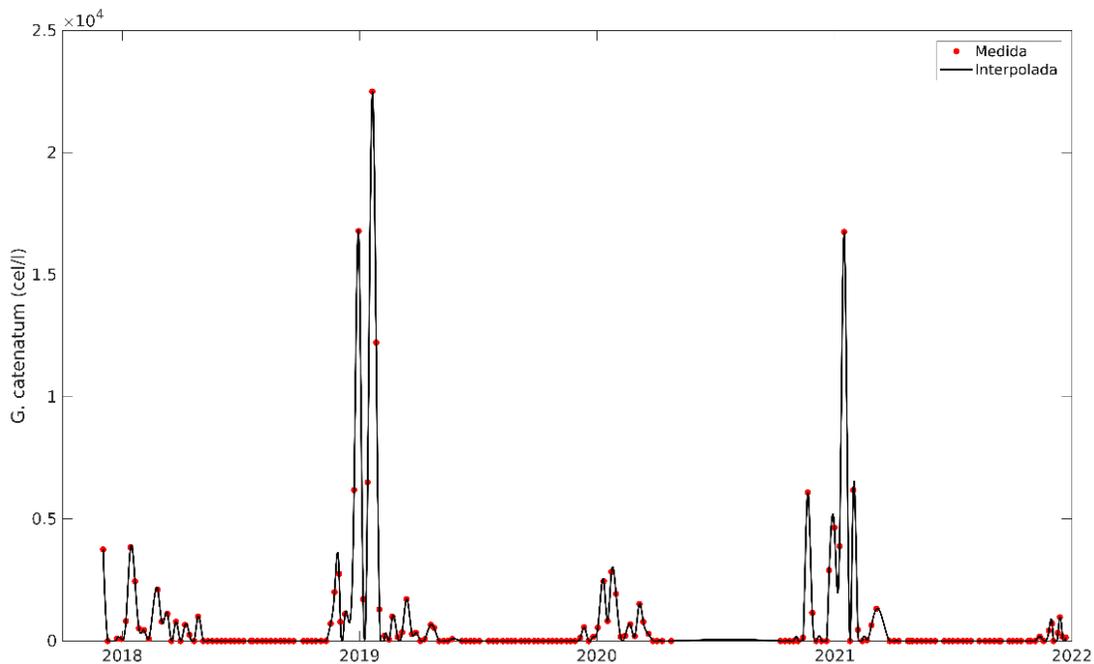
$$L_o = 1.56T_p^2 \quad (20)$$

Donde  $H_s$  es la altura de ola significativa proveniente de ERA 5,  $f_w$  es un factor de fricción de oleaje,  $U_w$  es la amplitud de la velocidad orbital de la onda en el fondo marino dada por (18),  $A_w$  es la amplitud orbital de la onda en el fondo dada por  $H_s/2$ ,  $k$  es el número de onda obtenido de la ecuación (19).  $L$  es la longitud de onda calculada con un método iterativo a partir del periodo pico espectral ( $T_p$ ) y la profundidad ( $h$ ), utilizando la ecuación para aguas transicionales (20). El valor semilla de la iteración se obtiene con la ecuación (21), cálculo para aguas profundas. Una vez obtenida  $L$  se calcula  $k$ ,  $U_w$  y el estrés de fondo asociado al oleaje (16). El valor de estrés de fondo se calculó para una serie de tiempo que abarca el mismo tiempo que el monitoreo semanal de *G. catenatum* en San Felipe.

Para determinar si existe una relación entre la temporalidad de *G. catenatum* y la energía cinética turbulenta se realizó un análisis detallado de estas dos variables. El primer paso fue unificar las frecuencias de muestreo, para lo que se realizó una interpolación a datos cada hora, ya que en la serie de monitoreo semanal existen fechas en las que no fue posible obtener datos por condiciones meteorológicas o que la

muestra se tomó en un tiempo menor de una semana respecto al muestreo anterior. Los faltantes o huecos de muestreo tienen un mayor efecto en series de datos cortas, además de que la mayoría de los análisis requieren que las frecuencias de muestreo sean las mismas en ambas series (Emery & Thompson, 2014). Esta interpolación se realizó mediante el método Spline del software Matlab® y se verificó que la tendencia que se observaba en los muestreos semanales se mantuviera (figura 9).

Una vez que las series de tiempo tenían frecuencias de muestreo uniformes, con un dato cada hora, se removi6 la tendencia lineal de ambas series de tiempo con la funci6n detrend de Matlab y se aplic6 un filtro de Fourier para obtener solo las oscilaciones de baja frecuencia, m6s acorde con el muestreo semanal de *G. catenatum*. Lo que permiti6 calcular la correlaci6n entre el esfuerzo de fondo, la energ6a cin6tica turbulenta y *G. catenatum*. Posteriormente se calcularon los espectros de densidad de potencia usando el m6todo de Welch que es una generalizaci6n del m6todo de Barlett (Hayes, 1996) por medio de la funci6n pwelch de Matlab. Se estim6 tambi6n el espectro cruzado, que incluye el co-espectro, el espectro de coherencia y fase, que indican como est6n relacionadas dos se6ales en el dominio de la frecuencia (Emery & Thompson, 2014, N6ñez Fern6ndez, 2012).



**Figura 9** Serie de tiempo interpolada (línea negra) y abundancia medida en el punto de monitoreo semanal en la costa de San Felipe (puntos rojos).

Para estos cálculos se configur6 un límite de confianza del 95% para considerar que la relaci6n obtenida entre los datos es estad6sticamente v6lida, se usaron como base las funciones cpsd y mscoherence de

Matlab, más detalles de esta metodología pueden ser consultados en Mariño Tapia (2003) y Núñez Fernández (2012).

Además de los análisis espectrales se realizaron análisis de correlaciones cruzadas que permiten estimar que tan relacionados están entre sí dos series de tiempo considerando desfases entre ellas, este análisis puede ser un mejor método para analizar series de tiempo que la regresión tradicional (Emery & Thompson, 2014). Estas correlaciones se realizaron con el software R (R Core Team, 2023) y por medio del paquete “psych” (William, 2023) se generó una matriz de correlación para todas las variables. Las variables consideradas para estos análisis fueron nivel del mar, temperatura, energía cinética turbulenta de superficie, las componentes del viento  $U$  y  $V$ , así como el estrés de fondo del oleaje, para lo que se generaron series de tiempo de promedios del día del muestreo y del día anterior para las variables.

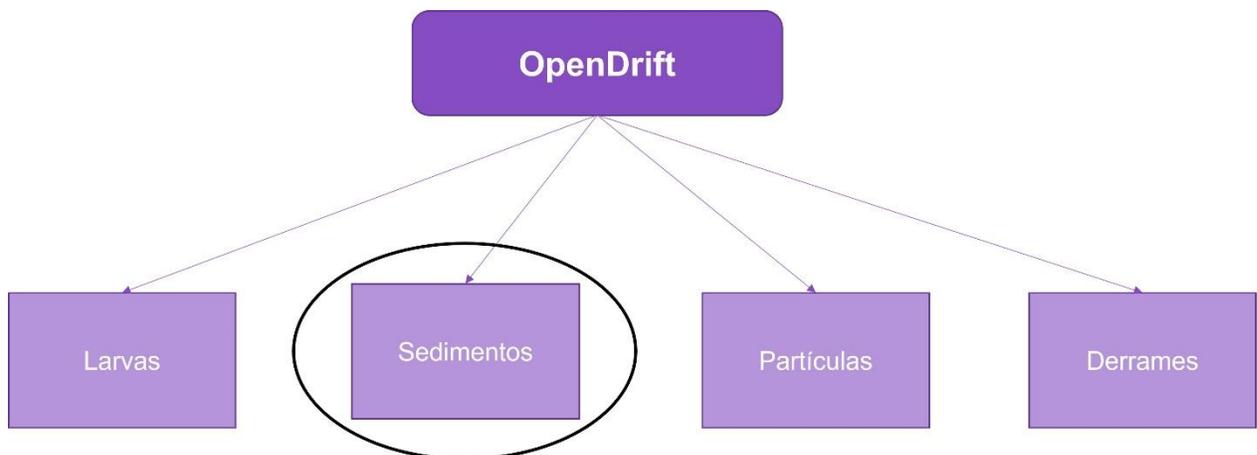
### 2.3 Transporte de florecimientos algales nocivos de *G. catenatum*

Para estudiar el transporte de florecimientos algales nocivos se revisaron las características herramientas que permiten simular la trayectoria de partículas como Oceanparcels, OpenDrift y PyGnome, estos tres paquetes se caracterizan por ser de código libre, estar escritos en Python y ser modelos que permiten simular la trayectoria de partículas en el océano. El modelo Oceanparcels (Delandmeter & van Sebille, 2019) permite la simulación de partículas inertes, se encuentra en desarrollo constante y permite usar salidas de varios modelos oceánicos. Ha sido usado entre otras cosas, para simular trayectorias de basura flotante en el Mar Negro (Castro-Rosero *et al.* 2023) así como para estudiar la conectividad entre poblaciones de *Phakellia ventilabrum* (Taboada *et al.* 2023). El modelo Pygnome fue desarrollado por la NOAA (<https://gnome.orr.noaa.gov/doc/pygnome/index.html>) y fue precedido por la versión de escritorio GNOME cuyo desarrollo inició en a finales de la década de 1990's. Este modelo fue desarrollado específicamente para simular las trayectorias de derrames de hidrocarburos por lo que las herramientas de este paquete están enfocadas en dicha tarea, sin embargo, ha sido usado por la NOAA también para modelar la deriva oceánica de larvas de peces, contaminantes marinos, mamíferos marinos y el movimiento de FAN (NOAA, 2011, Kavanaugh *et al.*, 2015).

Por otro lado, el modelo OpenDrift cuenta con varios módulos de simulación como se muestra en el diagrama de la figura 10, todos los módulos parten de la misma base pero tienen adaptaciones específicas para la simulación de larvas, sedimentos, derrames de hidrocarburos y es ampliamente usado con diferentes fines en la comunidad científica, como el estudio de la deriva de plásticos (Nguyen *et al.* 2023),

el transporte de aluminio en un fiordo estuarino (Simonsen et al. 2023), el estudio de escenarios de derrames de hidrocarburo en el golfo de México (Pérez-Brunis y Aguirre-Macedo, 2020). Además de contar con varios módulos este modelo incluye funciones que permiten contar con una amplia compatibilidad para trabajar con salidas de diferentes modelos tanto globales como de implementación regional como el Finite Volume Community Ocean Model (FVCOM) y el ROMS (<https://opendrift.github.io/index.html>).

Considerando la compatibilidad del OpenDrift para trabajar con las salidas del ROMS y los módulos con los que cuenta se optó por trabajar con este modelo y realizar pruebas para determinar el módulo que se usaría para la simulación de transporte de FAN de *Gymnodinium catentum*. La revisión de cada uno de los módulos del OpenDrift permitió identificar las características principales que permiten simular, siendo el módulo de derrames el único que se descartó desde la fase inicial por no tener relación con el objetivo de este trabajo. Los otros tres módulos fueron revisados de manera detallada revisando el código fuente de cada uno de ellos. La base sobre la que cada módulo está construido es el módulo OceanDrift que permite simular partículas inertes, que se mueven únicamente por acción de las corrientes e influencia superficial del viento. El módulo de larvas permite simular las variaciones de flotabilidad de estas de acuerdo con Sundby (1983), debido a esta consideración se descartó el uso de este módulo, debido a que *G. catentum* tiene la capacidad de nadar, por lo que el valor de flotabilidad asignado no puede considerarse directamente dependiente de los parámetros físicos como salinidad como en el caso de la simulación de las larvas en el módulo de OpenDrift.



**Figura 10** Principales módulos que componen el modelo OpenDrift.

Considerando que el ciclo de vida de *Gymnodinium catentum* incluye una fase en la que se forman quistes y una fase vegetativa en la cual las células se encuentran en la columna de agua, se seleccionó el módulo de sedimentos. Este permite establecer la resuspensión en el fondo dependiente de la corriente y

configurar un valor de velocidad de caída o resuspensión de las partículas (en este caso fitoplancton) en la columna de agua (<https://opendrift.github.io>). Considerando la capacidad de formación de quistes de reposo y de nado vertical en su fase de célula vegetativa el modelo se configuró con la resuspensión en función de la velocidad en el fondo activada, y una velocidad vertical de caída de 0.00044 m/s (Fraga et al. 1988) que corresponde a la velocidad de nado de una cadena de varias células de *G. catenatum*. Se configuró también la desactivación de partículas al tocar las costas, el experimento se corrió para 30 días de simulación.

Se realizó un experimento para simular el probable transporte del florecimiento algal que se presentó en enero de 2017. En este experimento se configuró el área de los tres polígonos afectados señalados en la figura 5, como área inicial y se liberaron 30 mil partículas que representaron las células vegetativas. Además del experimento para reproducir el FAN de 2017 se realizó una simulación durante el verano del mismo año, se utilizó la misma configuración, solo que para esta simulación la fecha de inicio fue el 17 de julio. Este experimento se realizó para contrastar el transporte en ambas estaciones del año.

A partir de los resultados se generaron animaciones para visualizar la evolución de la trayectoria de las partículas respecto del tiempo, así como mapas para visualizar la trayectoria total de las partículas y su trayectoria a los días 1, 15 y 30 de la simulación. Para la simulación del FAN con el objetivo de contrastar la trayectoria simulada con la detectada por medio de la clasificación de imágenes de satélite se usaron los resultados del día 30 de enero de 2017 y se generaron mapas de ambos resultados.

## Capítulo 3. Resultados

---

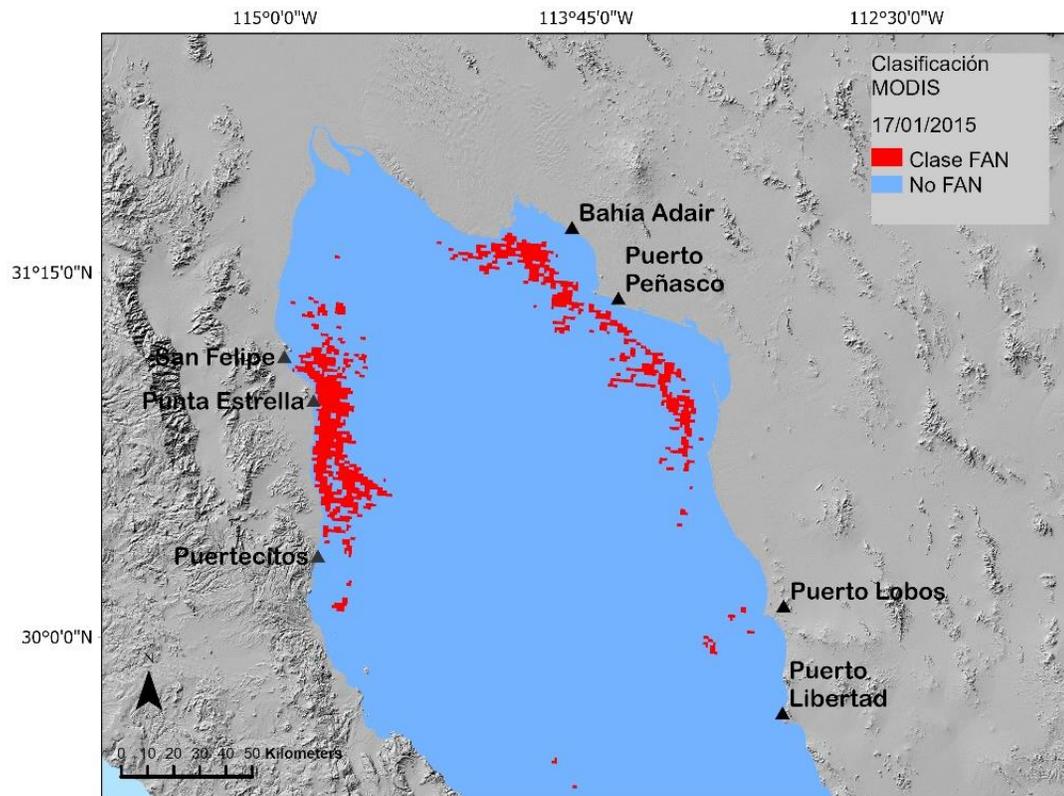
Los resultados de esta investigación se presentan en tres secciones, que abordan los tres objetivos específicos de este trabajo y siguen la estructura presentada en los métodos. La primera sección aborda los resultados de la detección que se realizó por medio de la clasificación supervisada de imágenes satelitales, la segunda sección aborda los procesos físicos que se relacionaron con la presencia de *Gymnodinium catenatum* y la última sección presenta los resultados de los experimentos de transporte de un florecimiento algal analizado por medio de simulación numérica.

### 3.1 Detección de florecimientos algales nocivos de *Gymnodinium catenatum* por medio de percepción remota

#### 3.1.1 Clasificación basada en FAN 2015 y MODIS

El valor del coeficiente kappa para la clasificación obtenida con la imagen del MODIS fue 0.72, que de acuerdo con Landis & Koch (1977) corresponde a una alta concordancia entre el área usada para entrenar la clase FAN y como fue clasificada dicha área. La precisión general fue de 78% para el MODIS, y el análisis de la matriz de confusión mostró que la clase asociada al FAN fue la que presentó menores errores de clasificación (Anexos, tabla 1).

Los resultados de la clasificación del día 17 de enero del 2015 realizada con datos provenientes del MODIS permitieron identificar el área estimada de distribución del florecimiento algal para este día (figura 11). La clase asociada al FAN se distribuyó en la costa oeste, entre San Felipe y Punta Estrella, zona en la que se realizó la campaña de muestreo. La clase mostró una distribución costera en esta zona. En la región este, la clase se detectó frente a Bahía Adair y Puerto Peñasco, pero más alejada de la costa en comparación con el área de detección en la costa de Baja California (figura 11). Fuera de estas áreas no se tiene una presencia importante de la clase, lo que indicó que, para ese día, el FAN se presentó principalmente en el área de San Felipe-Punta Estrella.

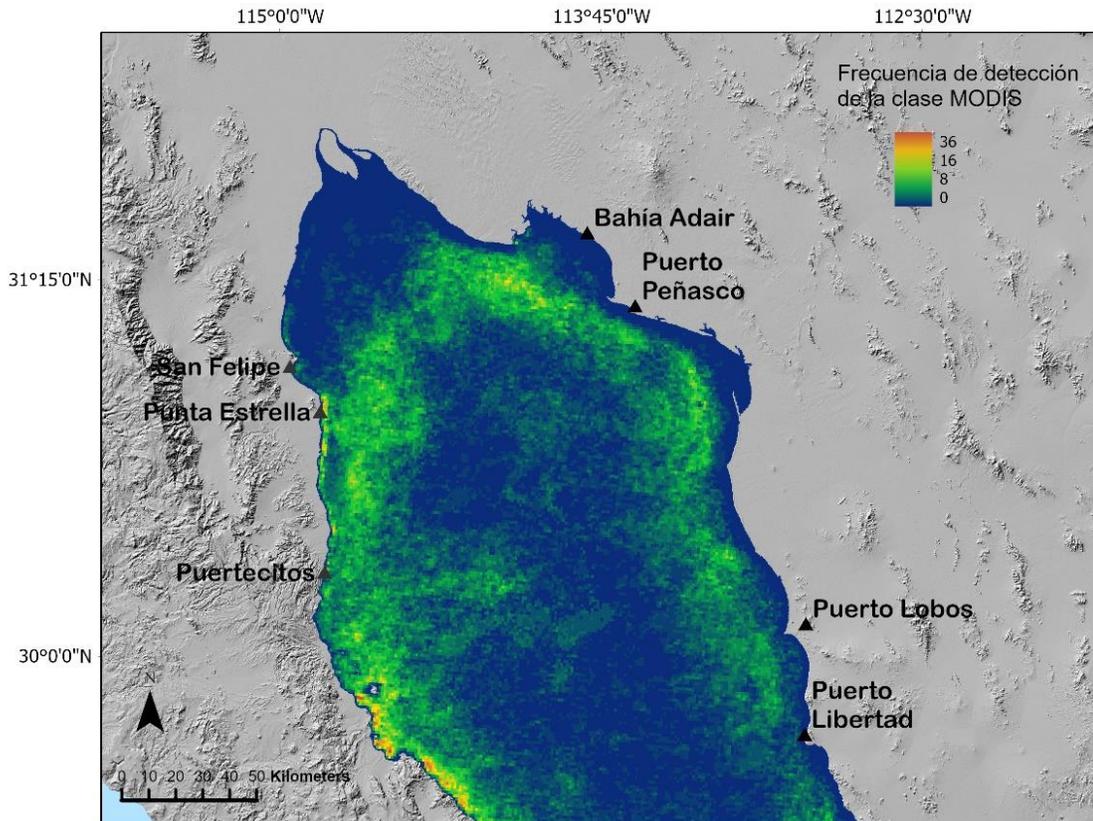


**Figura 11** Distribución de la clase FAN del MODIS resultado de la clasificación para enero 17 del 2015.

Con el objetivo de evaluar las detecciones y su distribución espacial a través del tiempo se realizó una clasificación de imágenes del MODIS correspondientes al periodo 2018 a 2020, a partir de lo que se generó el mapa de frecuencia de detección de la clase en un mismo píxel (figura 12). Este mapa indica las zonas que se estimó fueron afectadas de forma recurrente por estos eventos en el periodo analizado. La mayor frecuencia de detección de la clase asociada al FAN-MODIS fue la zona de San Luis Gonzaga (36). Otras áreas con altas frecuencias fueron Punta Estrella y Bahía Adair. Se observó también una distribución de frecuencias de aproximadamente entre 8 y 10 hacia el sureste hasta Puerto Lobos y Puerto Libertad.

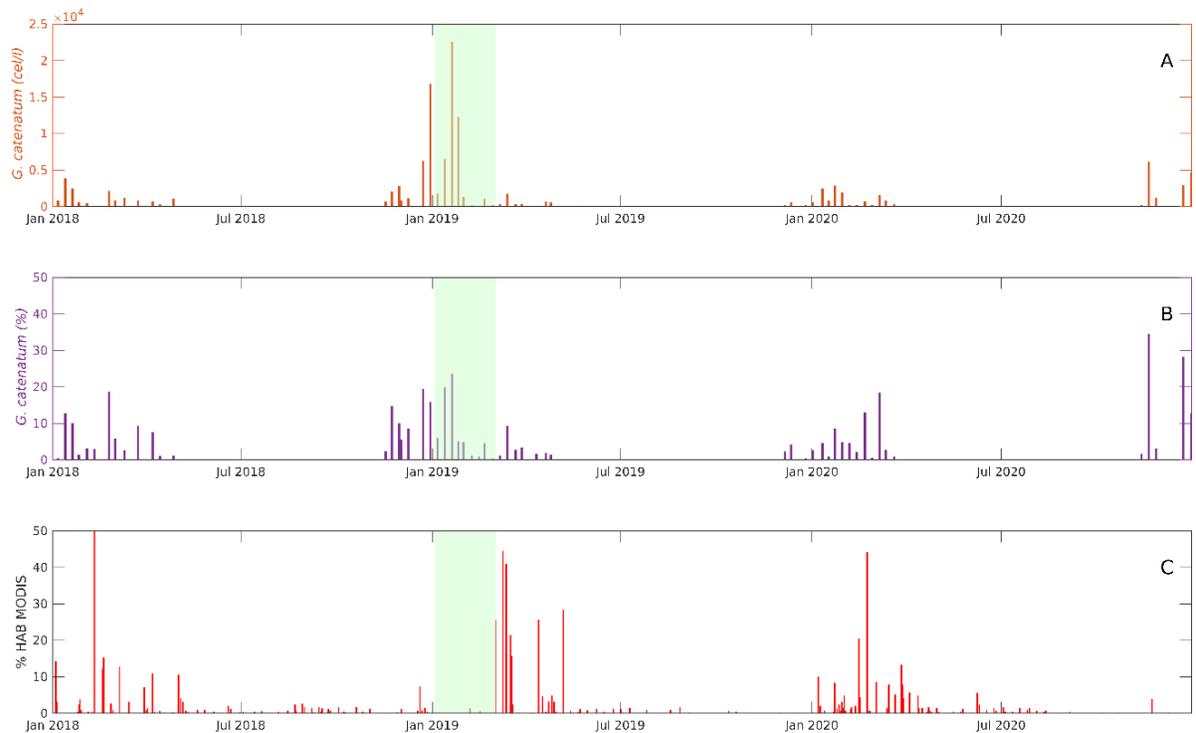
Se evaluaron los resultados de la clasificación supervisada al comparar cualitativamente el comportamiento de la detección de la presencia de *G. catenatum* con la clase generada con los datos MODIS con la presencia de esta especie en la Bahía de San Felipe del 1 de enero de 2018 al 31 de diciembre del 2020 (figura 13). Los resultados del proceso de clasificación se representaron como el porcentaje de área clasificada como FAN de las dos aproximaciones respecto al área costera entre San Felipe a Puertecitos y hasta 15 km hacia el este (figura 5, polígono amarillo). Este porcentaje de área clasificado como clase FAN es un indicador de la posible extensión de los florecimientos de *G. catenatum*.

*G. catenatum* se presentó de manera recurrente en otoño a primavera durante todos los años muestreados, con abundancias máximas de 23,000 cel/l en el 2019 (figura 13A), esta abundancia representó una abundancia relativa máxima de ~ 25% (figura 13B).



**Figura 12** Mapa de distribución y frecuencia de la clase FAN del MODIS para el periodo 2018-2020. Los colores indican la frecuencia en que un píxel fue clasificado como la clase correspondiente asociada al FAN, lo que indica áreas que son detectadas como FAN de manera recurrente.

Por otro lado, el mayor porcentaje de área clasificada como clase FAN del MODIS (>30%) se presentó en los meses de noviembre a marzo/abril, mientras que en verano se presentaron porcentajes menores a 10% del área (figura 13C). Los mayores porcentajes alcanzaron entre 40% y 50% del área clasificada como FAN y se presentaron durante las primeras semanas de cada año del periodo analizado, con el máximo (50%) en el 2018. Durante el periodo de diciembre de 2018 a marzo de 2019 se presentaron las abundancias absolutas más altas registradas en el punto de monitoreo en San Felipe, sin embargo, durante ese periodo no se contó con imágenes satelitales adecuadas debido a la alta nubosidad en la zona por lo que existe un evidente vacío en la detección (figura 13).

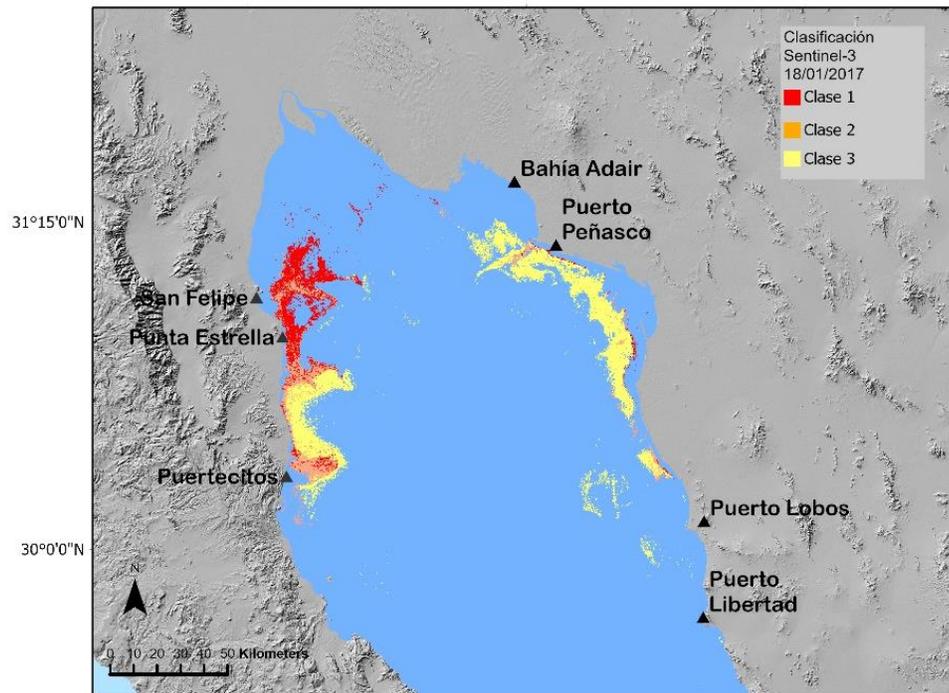


**Figura 13** Abundancia absoluta (A) y relativa (B) de *G. catenatum* en el punto de monitoreo en San Felipe, porcentaje de área clasificada como FAN para MODIS (C) para el periodo de 1 de enero de 2018 al 31 de diciembre del 2020. El sombreado verde indica un periodo sin datos satelitales debido a la alta nubosidad.

### 3.1.2 Clasificación basada en el FAN 2017 y Sentinel-3

Para la clasificación de Sentinel-3, tres clases asociadas al FAN de *G. catenatum* fueron generadas basados en el FAN de 2017. El coeficiente kappa derivado de la clasificación aplicada para la imagen del 18 de enero de 2017 fue de 0.70 y la precisión general fue de 74%. La matriz de confusión para esta clasificación (Anexos, tabla 2) mostró pocos errores en la identificación de las clases 1 y 2, no obstante, los errores consistieron en que los píxeles fueron etiquetados como otra de las clases asociadas al FAN. La distribución de las clases 1, 2 y 3 asociadas con la presencia de *G. catenatum* para el 18 de enero de 2017 fue progresiva desde la zona de San Felipe hasta Puertecitos (figura 14), mientras que la clase 3 se detectó también en la zona del sur de Bahía Adair hacia el sur hasta el Norte de Puerto Lobos.

Las imágenes de enero de 2018 a abril de 2021 fueron clasificadas y se generaron mapas de frecuencia para identificar las áreas de detección recurrente de acuerdo con los resultados para Sentinel-3 (figura 15). La clase 1 y 2 revelaron un patrón de distribución similar entre sí, con detecciones entre San Felipe y Puertecitos en la costa oeste, en la zona central del alto golfo de California tuvieron un patrón de distribución del norte de San Felipe hacia Bahía Adair (figura 15 A y B).



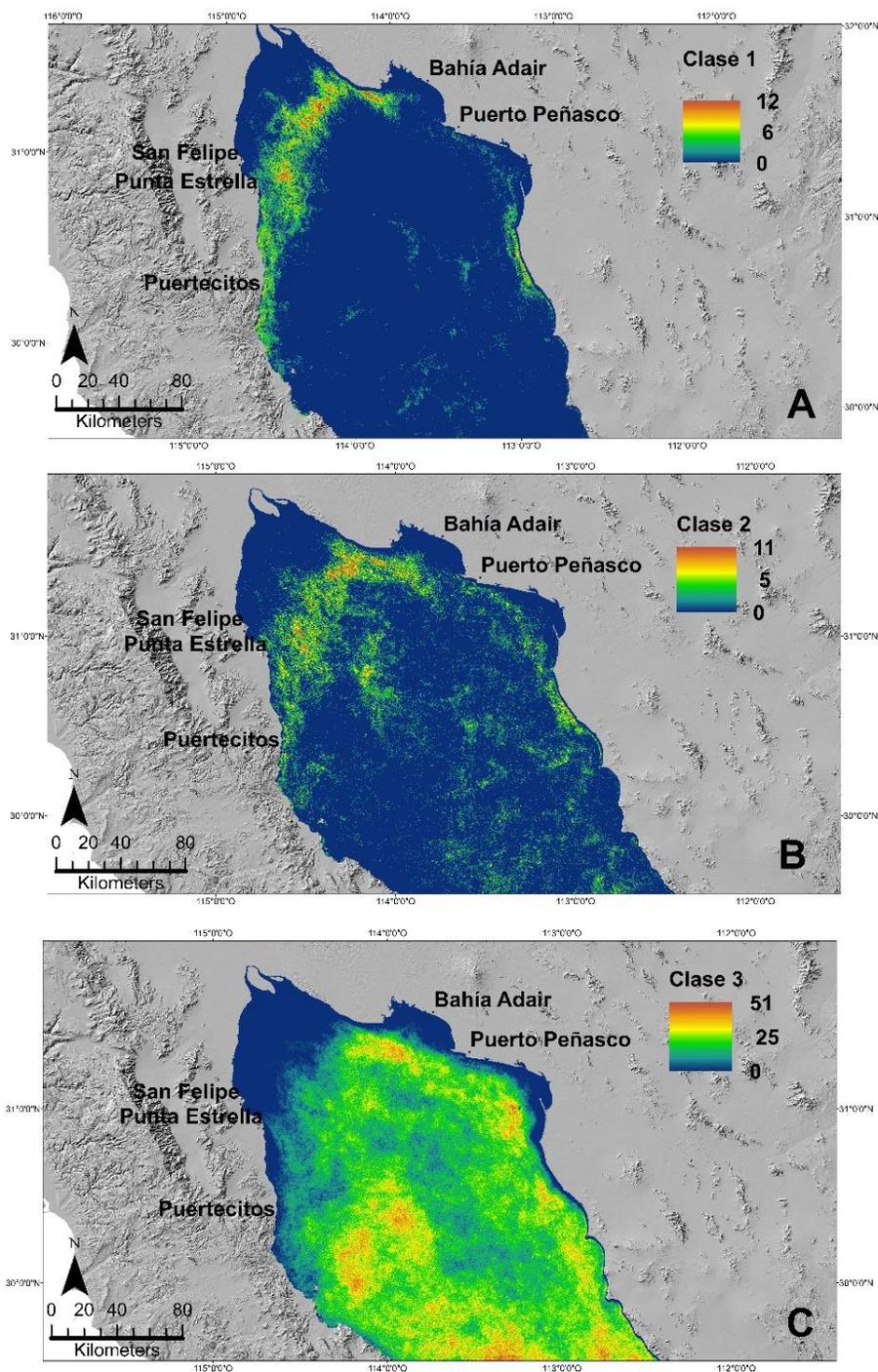
**Figura 14** Distribución para el 18 de enero de 2017 de las clases de Sentinel-3 asociadas a *Gymnodinium catenatum*.

En esta zona, la clase 2 tuvo una distribución hacia el sur de Bahía Adair, lo que no se presenta en la clase 1. La clase 1 tuvo una frecuencia máxima de 12 y la clase 2 una frecuencia máxima de 11, en ambos casos las mayores frecuencias fueron en la zona frente a San Felipe y hacia Bahía Adair, las frecuencias medias se presentaron de San Felipe hacia Puertecitos. En el resto del norte del golfo de California las detecciones fueron mínimas. En contraste la clase 3 (figura 15C) se distribuyó en la mayor parte del norte del golfo de California a excepción de la zona del alto golfo de California, principalmente en la zona del delta.

De forma similar a los resultados del MODIS se evaluaron los resultados de la clasificación supervisada de las imágenes del Sentinel-3 generando series de tiempo de la clase 1 y clase 2, para comparar las detecciones con la presencia de la especie en la Bahía de San Felipe del 1 de enero de 2018 al 31 de diciembre del 2020 (figura 16). Los resultados del proceso de clasificación se representaron como el porcentaje de área clasificada como FAN respecto al área costera entre San Felipe a Puertecitos y hasta 15 km hacia el este. Este porcentaje es un indicador de la temporalidad y posible extensión de los florecimientos de *G. catenatum*.

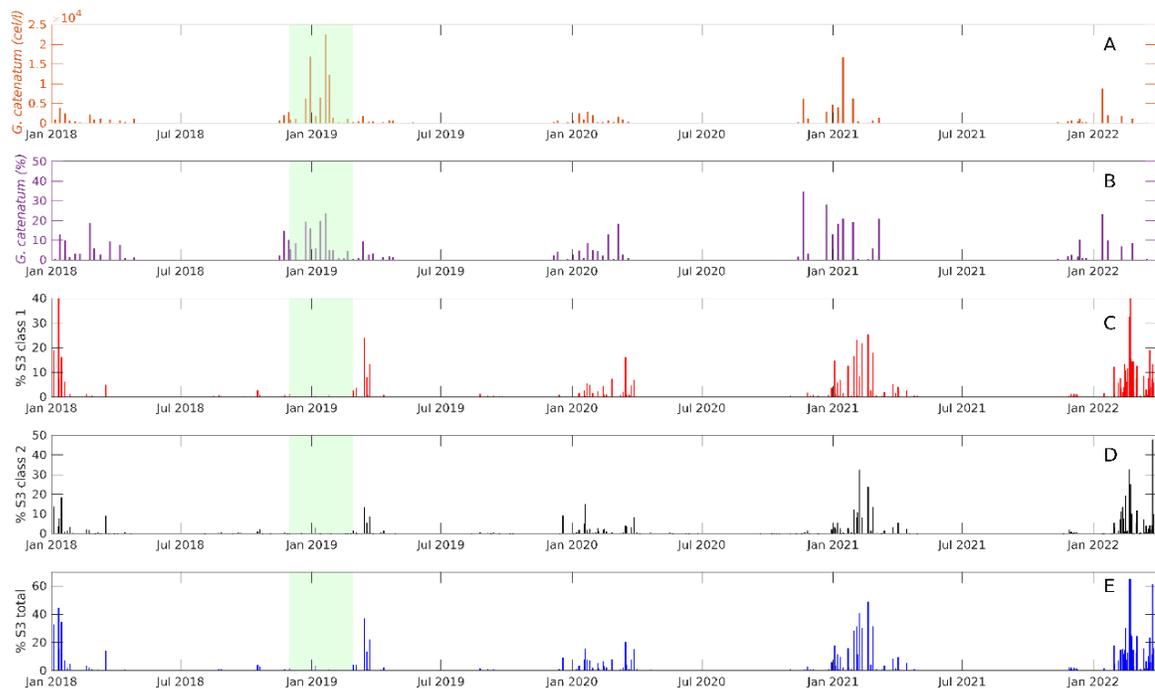
Las series de tiempo se generaron para la clase 1 y 2 que son las que representaron la distribución espacial conocida de la especie, y se determinó no generarla para la clase 3 porque su distribución no representó

la presencia conocida de la especie y por lo tanto no es de interés para detectar los FAN. Los porcentajes del área clasificada como clase 1 o 2 presentaron los mayores valores durante la temporada de invierno y primavera, misma en la que se detectó la presencia de la especie en el punto de monitoreo semanal en San Felipe.



**Figura 15** Distribución y frecuencia de la detección de *Gymnodinium catenatum* de las clasificaciones de Sentinel-3, clase 1 (A), clase 2 (B) y clase 3 (C).

Las series de tiempo hicieron posible identificar que la detección en la temporalidad de la ocurrencia de los FAN es adecuada, la serie mantiene la recurrencia anual de la presencia de la especie (figura 16C y D). La suma del porcentaje de la clase 1 y 2, representó el porcentaje total del área analizada en la que se identificó el FAN para un día (figura 16D). En 2019 a pesar de que se tuvo la mayor abundancia de la especie, no se cuenta con detección debido a que fue una temporada en la que se presentó alta nubosidad en el área de estudio, por lo que no se contó con suficientes imágenes para realizar la detección. La comparación entre la serie de registros del monitoreo semanal de *G. catenatum* y las detecciones por medio de datos provenientes de satélite tuvieron una concordancia de 75% (Anexos, tabla 3).



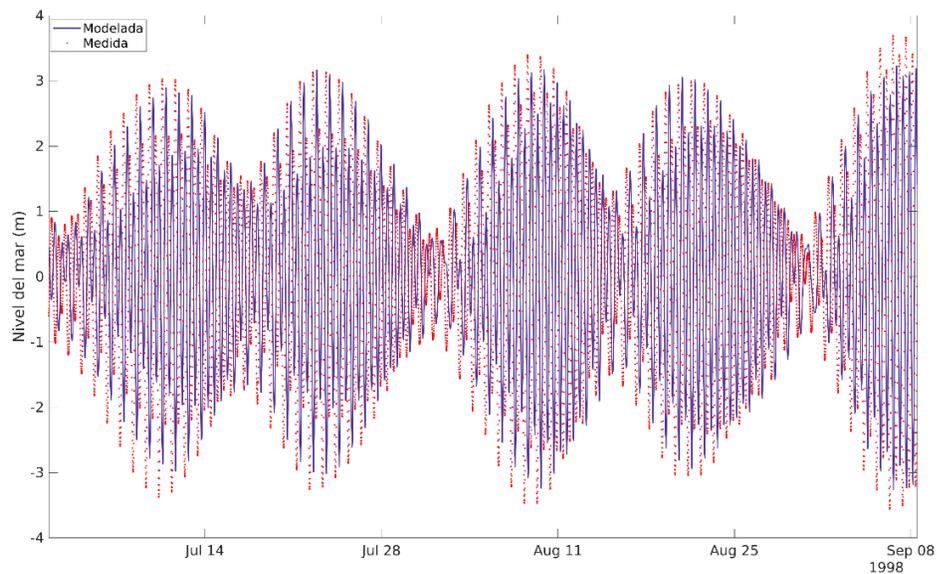
**Figura 16** Serie de tiempo de abundancia absoluta (A), abundancia relativa (B) de *Gymnodinium catenatum*, porcentaje de detección de la clase 1 (C), clase 2 (D) y la suma de los porcentajes de ambas detecciones (E).

## 3.2 Procesos físicos asociados a florecimientos algales nocivos de *G. catenatum*

### 3.2.1 Validación

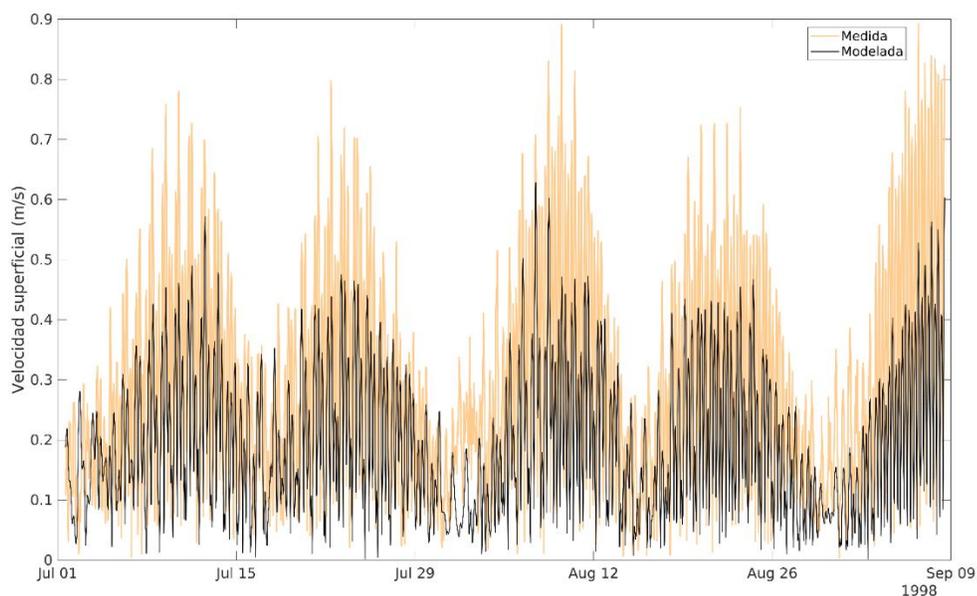
Los resultados de la validación del modelo implementado permitieron establecer que los resultados obtenidos fueron suficientemente buenos para ser utilizados en el análisis de las condiciones físicas asociadas a la presencia de *G. catenatum* durante invierno y primavera. Se observó una buena

concordancia en la comparación de la serie de marea medida y modelada (figura 17) del primero de julio al nueve de septiembre de 1998, la correlación entre estas series fue de 0.98 y el error cuadrático medio de 0.28 m.



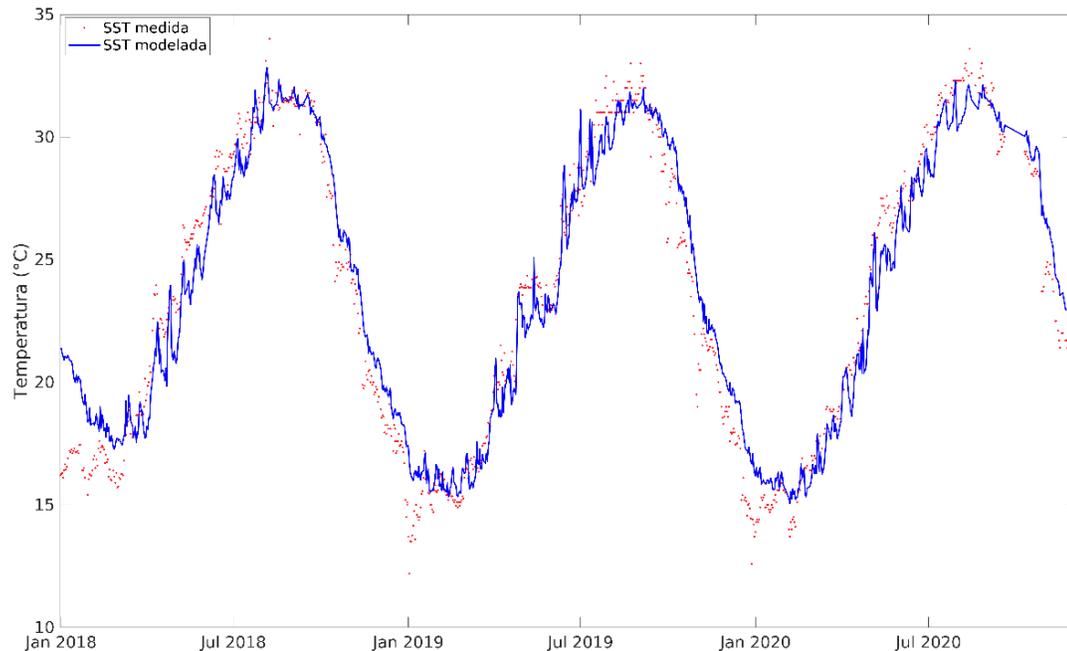
**Figura 17** Serie de marea medida y modelada para el periodo 01/07/1998 a 09/09/1998.

Para el mismo periodo se compararon las series de velocidad superficial, con una correlación de  $r=0.75$  y un error cuadrático medio de 0.15 m/s. En las series de tiempo se observó que el modelo subestima la magnitud (figura 18) aunque mantiene una variación temporal similar a la de los datos medidos.



**Figura 18** Serie de tiempo de velocidad superficial de corriente.

Se contó también con datos de temperatura medidos en la bahía de San Felipe, en el mismo punto del monitoreo semanal de la comunidad fitoplanctónica. Estos datos fueron tomados con una frecuencia de un dato cada hora y de manera similar para el modelo para el píxel del modelo más cercano al punto de muestreo (figura 19), la correlación entre estas series fue de  $r=0.97$  y el error cuadrático medio de  $1.47\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

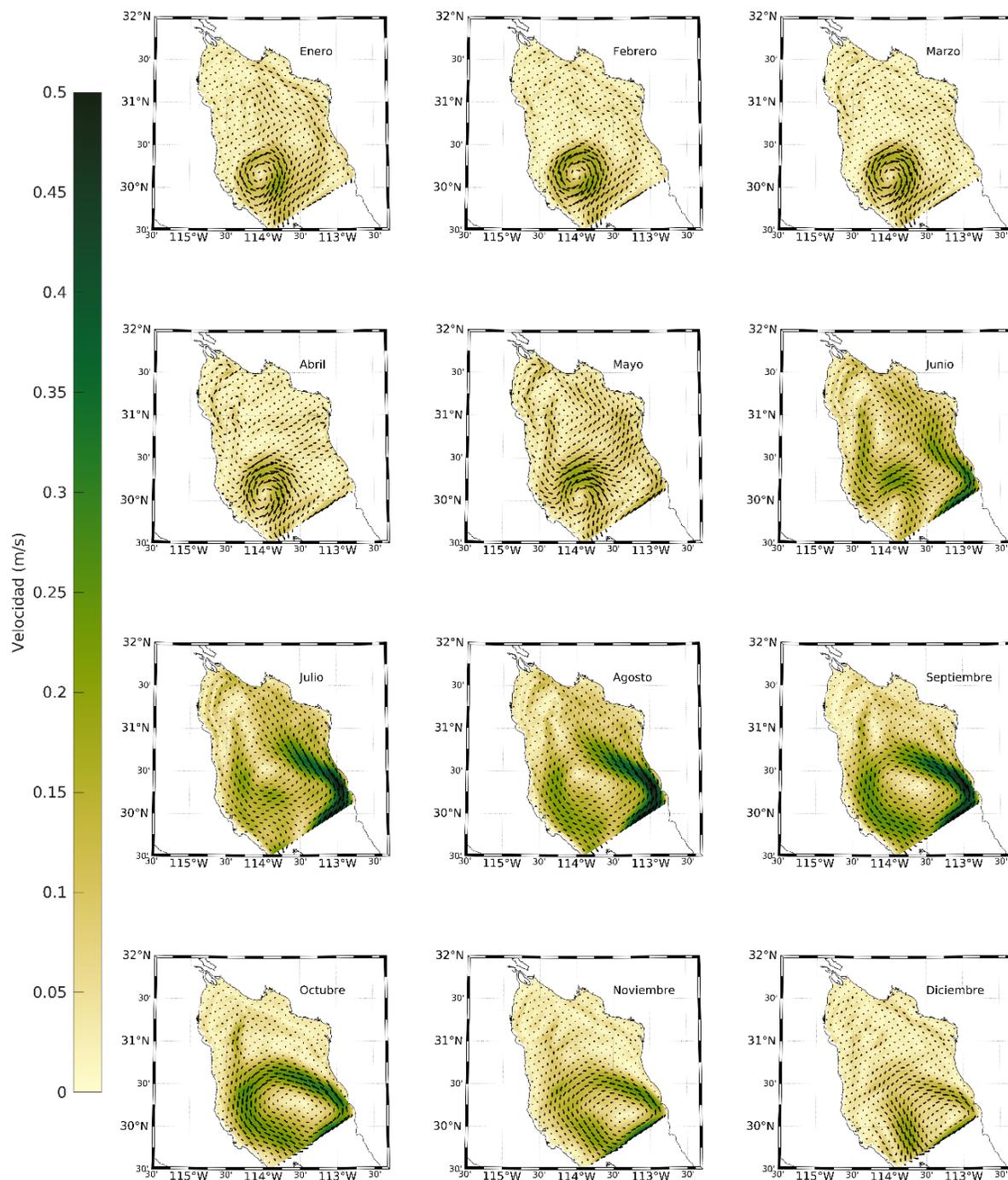


**Figura 19** Serie de temperatura superficial del mar en la bahía de san Felipe medida (línea continua azul) y modelada (puntos rojos).

### 3.2.2 Condiciones promedio del norte del golfo de California

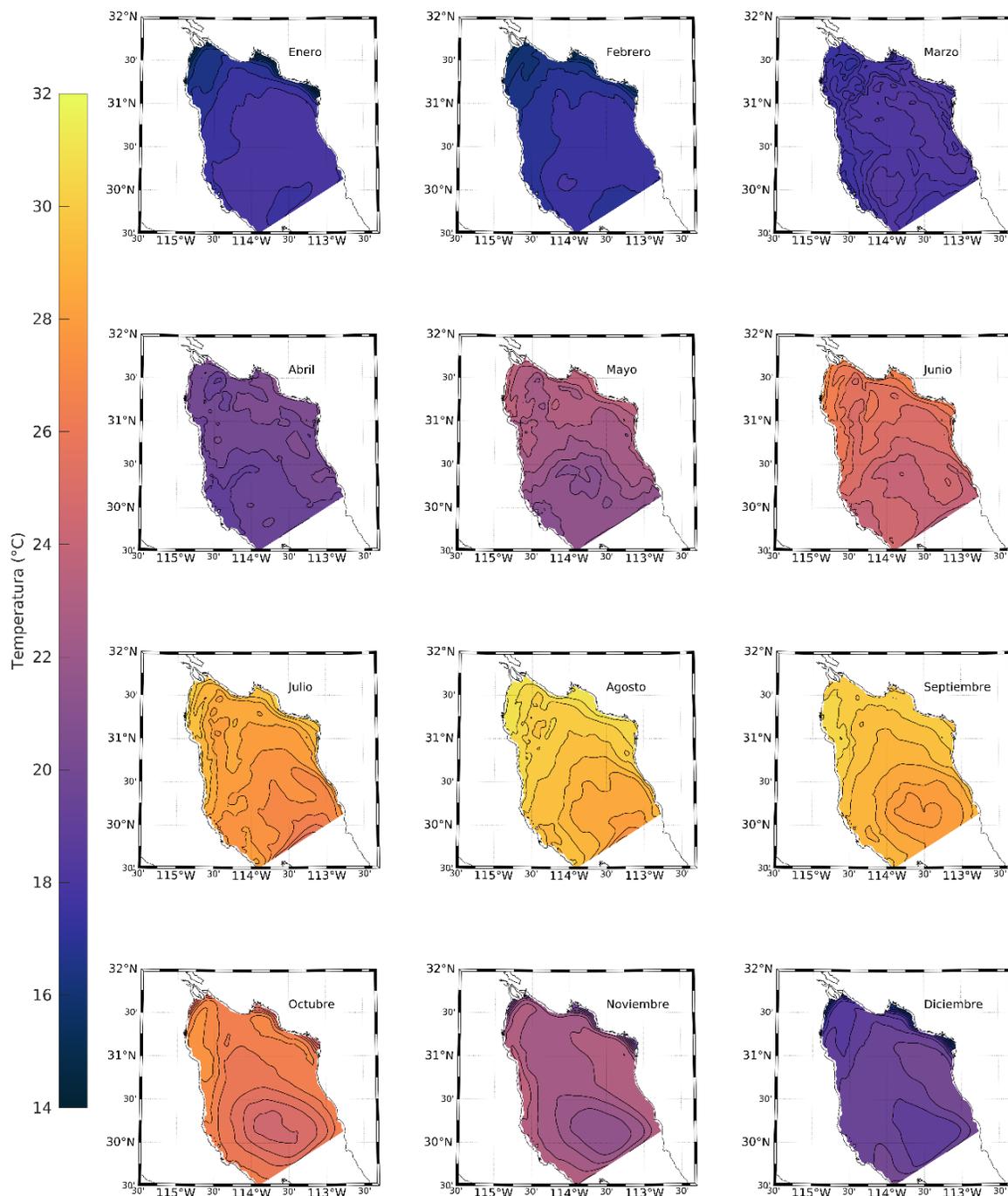
A partir de los resultados obtenidos con el modelo se establecieron las condiciones promedio de circulación, temperatura y salinidad para el área de estudio considerando el periodo 1995 a 2021. En los mapas de velocidad promedio a 1 m de profundidad (figura 20) se observó de marzo a abril un giro anticiclónico bien definido en la zona suroeste del dominio del modelo, para los meses de mayo y junio del giro se desprende un filamento que modifica la circulación en la zona del alto golfo de California. Este giro está bien documentado en la literatura como una de las características hidrodinámicas del golfo de California con magnitudes entre  $0.2\text{ ms}^{-1}$  (Lavín y Marinone, 2003). Para los meses de junio y julio se tiene un periodo de transición en el que el giro revierte su dirección, para formar un giro ciclónico en los meses de verano con velocidades máximas de  $0.4$  a  $0.5\text{ m/s}$ , estas velocidades han sido reportadas en la literatura como  $0.2$  a  $0.3\text{ m/s}$  (Lavín y Marinone, 2003), la diferencia con el modelo puede observarse que es principalmente en la zona de la frontera sur, por lo que estas velocidades máximas son reflejo de los datos

de la frontera y su efectos en esta zona. De forma general los resultados obtenidos con el modelo son similares a lo documentado por Palacios Hernandez (2001) y Ticse De la Torre (2021).



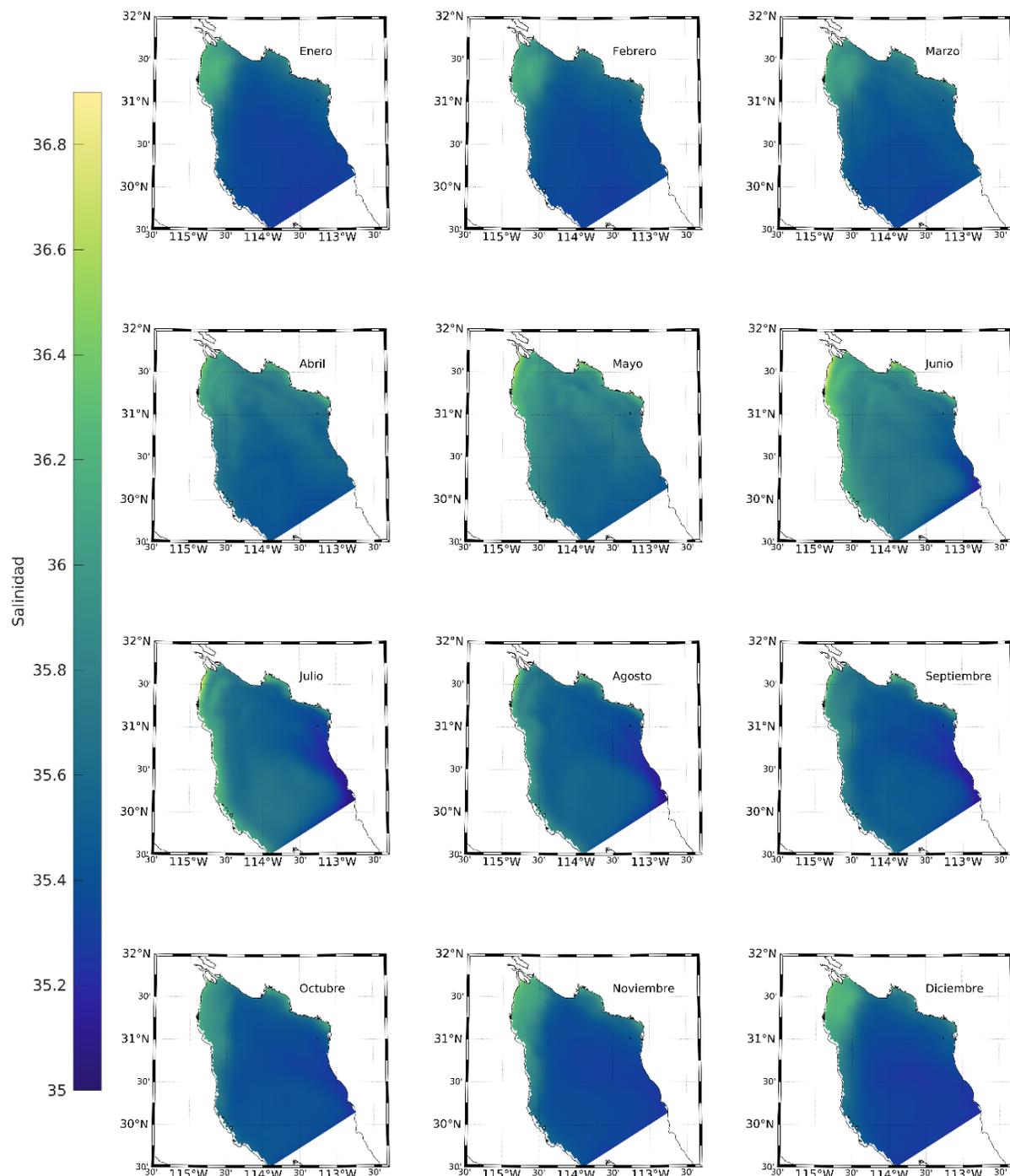
**Figura 20** Velocidad promedio mensual a 1m de profundidad para el periodo 1995-2021.

Los resultados del promedio mensual de temperatura superficial a 1 m de profundidad (figura 21) mostraron un claro patrón estacional, en la que la menor temperatura se presenta en los meses de inviernos con valores en el rango de los 14 a 17°C, con un calentamiento progresivo hasta los meses de agosto y septiembre en los que se presentan las mayores temperaturas alcanzando 32°C, este ciclo anual está bien documentado (Robles-Tamayo et al. 2018).



**Figura 21** Temperatura mensual a 1m de profundidad para el periodo 1995-2021.

Este ciclo es similar para la salinidad, en el área se tienen salinidades que varían desde 35 en el sur del dominio hasta  $\sim 37$  en la zona del delta del río Colorado, la mayor salinidad se presentó durante los meses de mayo y junio (figura 22). Las salinidades más altas en la zona del delta son características debido a su batimetría y a su alta evaporación, lo que genera que en verano en la zona del delta se reporten salinidades de hasta 39 psu.

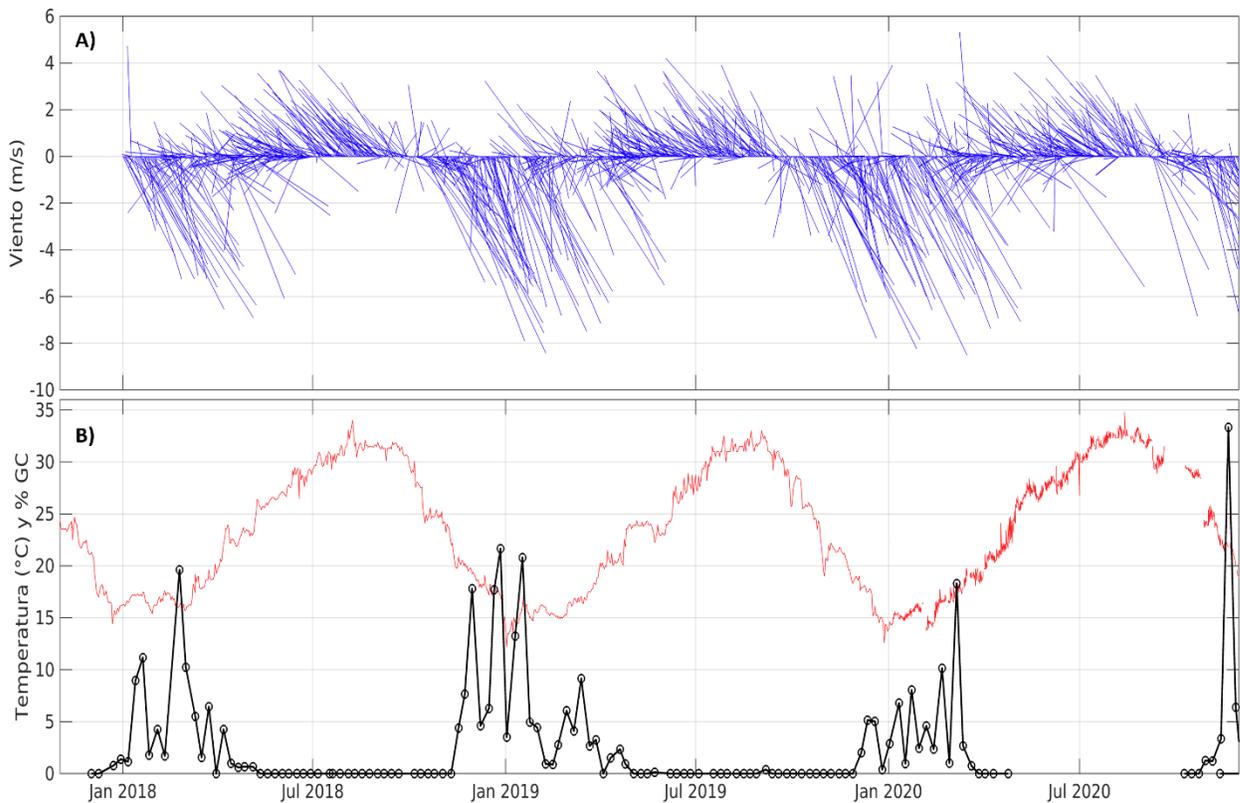


**Figura 22** Promedio mensual de salinidad a 1m de profundidad para el periodo 1995-2021.

### 3.2.3 Procesos físicos asociados a *G. catenatum*

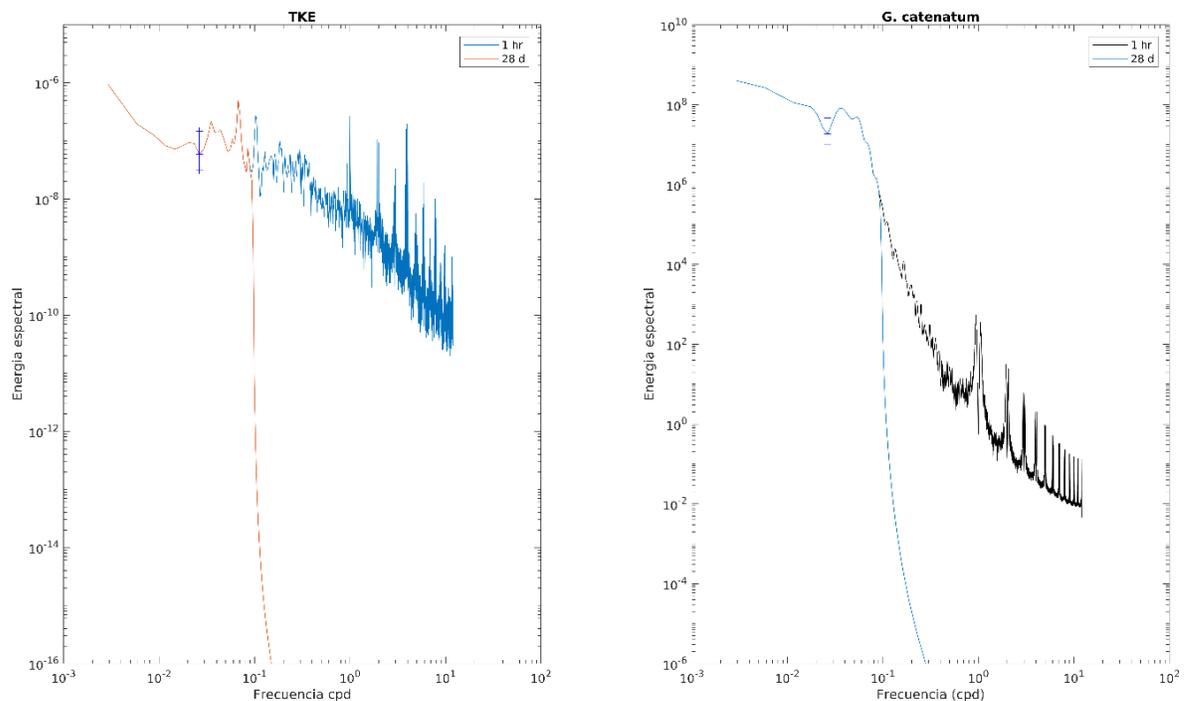
Las condiciones asociadas a la formación de florecimientos algales de la especie de interés de este trabajo fueron analizadas por medio de series temporales asociadas a la serie semanal obtenida del monitoreo en la bahía de San Felipe.

La primera condición que ya ha sido identificada y se ha caracterizado es la presencia de esta especie durante la temporada en la que se presenta la menor temperatura (Ramírez, 2020), lo cual se constató con una serie de tiempo más larga, con lo que se comprobó que esta tendencia se mantiene cada año en los que se cuenta con datos medidos (figura 23b). Esta serie se complementó como una primera aproximación a la identificación de variaciones de variables físicas que podrían tener una relación con el fenómeno con una serie de astillas del viento (figura 23a). Estas series permitieron identificar que la presencia de la especie y disminución de temperatura ocurre en los periodos en los que se tiene viento del noroeste.



**Figura 23** Serie de tiempo de viento (A), temperatura y abundancia relativa de *G. catenatum* medida en la bahía de San Felipe (B).

Considerando la intensificación del viento durante el periodo de presencia de la especie de interés y que el viento actúa como forzamiento en la circulación de zonas costeras, además de que puede originar cambios en la turbulencia, se analizó esta variable en superficie obtenida por medio del modelo numérico implementado con ROMS. Los espectros de energía potencial de la turbulencia y abundancia de *G. catenatum* (figura 24), permitieron determinar que se tiene una respuesta de la energía espectral que sucede a la misma frecuencia para ambas series de tiempo. Esta respuesta es observable a la frecuencia de 0.04 ciclos por día, lo que indica que existe una relación entre ambas variables.

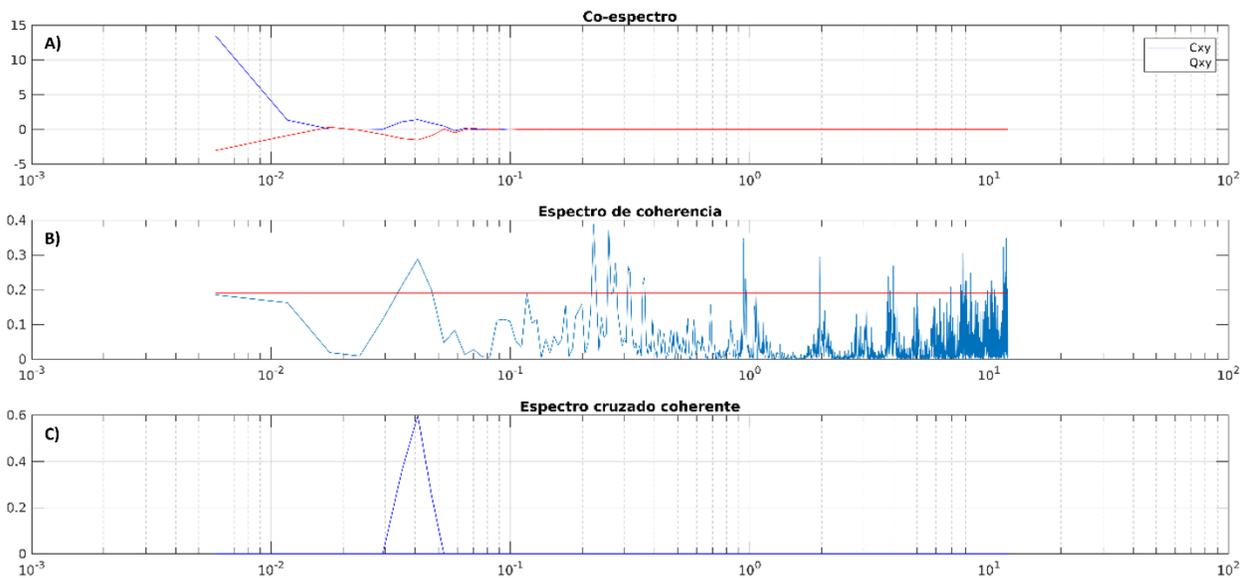


**Figura 24** Espectros de energía cinética turbulenta (izquierda) y abundancia de *G. catenatum* (derecha) Se muestra la superposición entre las series de 1 hr y 28 días para cada variable en las que se tiene la misma señal a la frecuencia 0.04 cpd.

El análisis del co-espectro permitió constatar que existe una correlación entre ambas señales (figura 25A) a la frecuencia de 0.04 cpd (24 días aproximadamente), tal como se observó en los espectros se tiene una respuesta espectral en ambas series (figura 24). El espectro de coherencia permitió corroborar que esta respuesta se encuentra en el intervalo de confianza (indicado por la línea roja, figura 25B). Mientras que el valor del espectro cruzado coherente es de 0.6 lo que indica una correlación entre ambas señales, al obtener valores positivos y correlacionados, estos análisis permitieron establecer que existe una relación entre la presencia de *G. catenatum* y el incremento de energía cinética turbulenta en la zona de San Felipe.

Los resultados de los espectros de estrés de fondo generado por oleaje y abundancia de *G. catenatum* (figura 26), permitieron identificar una respuesta a la frecuencia de 0.084 cpd (11.9 días aproximadamente), que se presenta en ambos espectros.

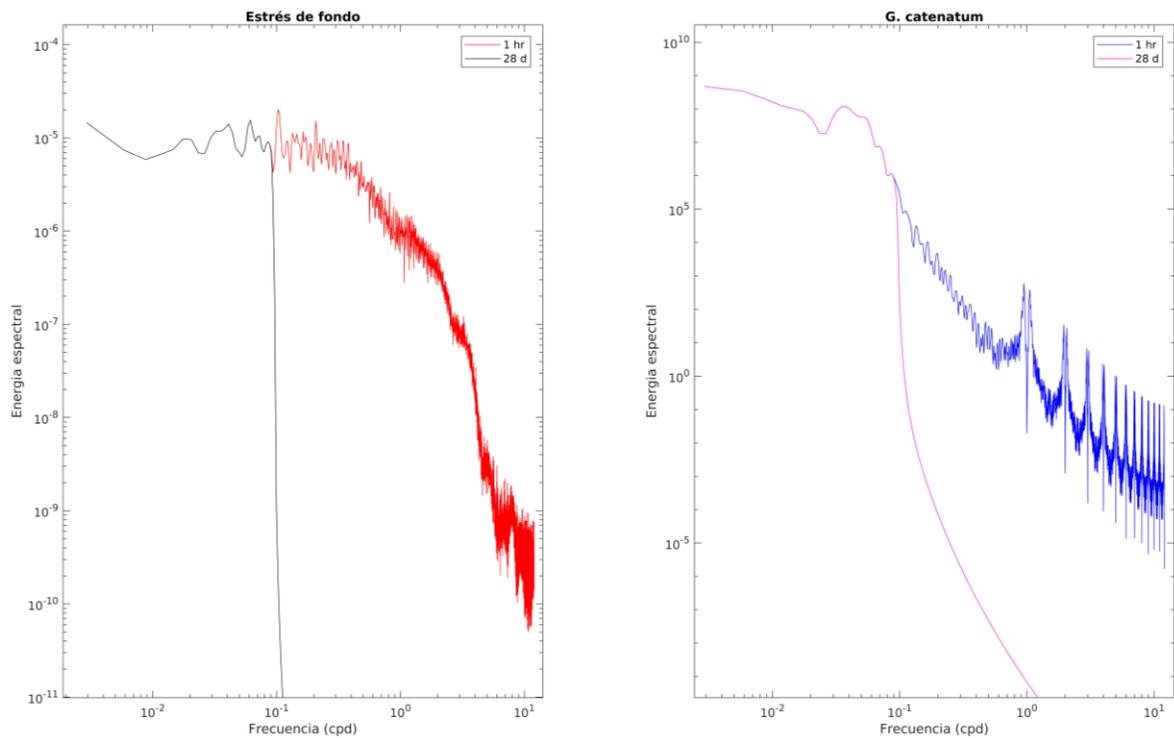
Es importante resaltar que los espectros de las series a 1 hr y en un filtrado de 28 días están superpuestas, por lo que se observa esta respuesta para ambas series. De forma similar a lo que se obtuvo con la energía cinética turbulenta la existencia de una respuesta de energía a la misma frecuencia indica que ambas variables están relacionadas. El hecho de que la relación de *G. catenatum* con la energía cinética y el estrés de fondo ocurran a frecuencias diferentes es indicador de que estos procesos tienen influencia en diferentes momentos sobre la abundancia de la microalga.



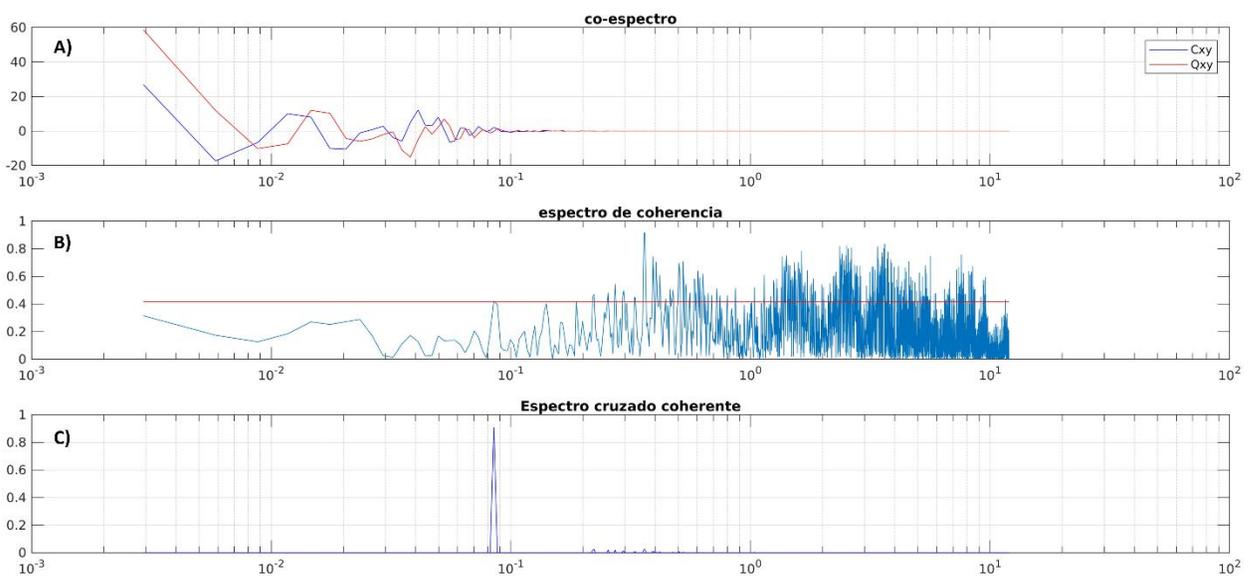
**Figura 25** Co-espectro, espectro de coherencia, espectro cruzado coherente para las señales de *G. catenatum* y energía cinética turbulenta.

El análisis del co-espectro (figura 27A) permite corroborar que a la frecuencia de 0.084 cpd se tiene la relación entre ambas variables. De acuerdo con el espectro coherente esta señal (0.084 cpd) se encuentra en el límite de confianza establecido al 95% (figura 27B), mientras que el espectro cruzado coherente (figura 27C) indica una alta correlación entre las variables (0.9). Las series de tiempo de *G. catenatum*, temperatura, viento turbulencia y esfuerzo del fondo provocado por oleaje (figura 28) permitieron establecer que la presencia de la especie de interés coincide temporalmente además de con el viento de noroeste y la disminución de la temperatura, con el incremento de energía cinética turbulenta, lo que es congruente con los resultados descritos previamente.

Además de esto se pudo observar que para algunos de los años de la serie se tiene un incremento en la magnitud del esfuerzo del fondo asociado al oleaje en días previas al inicio de la presencia de la especie lo que concuerda también con los resultados de los análisis espectrales (figura 28D).



**Figura 26** Espectros de estrés de fondo asociado al oleaje (izquierda) y abundancia de *G. catenatum* (derecha) Se muestra la superposición entre las series de 1 hr y 28 días para cada variable en las que se tiene la misma respuesta de energía a la frecuencia 0.084 cpd.



**Figura 27** Co-espectro, espectro de coherencia (el límite de confianza se señala con una línea roja), espectro cruzado coherente y espectro de fase para las señales de *G. catenatum* y estrés de fondo producido por oleaje.

De las variables físicas analizadas y la abundancia de *G. catenatum* semanal se obtuvo una matriz de correlación (figura 29), para esta estimación, el viento se analizó como sus componentes meridional y zonal y se analizó también el nivel del mar derivado del modelo. La mayor correlación es con la componente meridional ( $V$ ) del viento con  $-0.39$ , seguida de la temperatura con una correlación de  $-0.34$ , mientras que las correlaciones con el nivel del mar (SSH) y estrés de fondo fueron las menores.

También se pueden identificar relaciones entre varias variables físicas, la correlación más alta como se podría esperar es entre las componentes del viento, seguida de las componentes del viento y la energía cinética turbulenta que es respuesta al forzamiento del viento. La mayor correlación de forma similar a la abundancia de *G. catenatum* se presenta con la componente meridional ( $V$ ) del viento con  $r=-0.67$ , esto indica que cuando la componente meridional tiene dirección hacia el sur la turbulencia aumenta, mientras que cuando la dirección es hacia el norte disminuye. Con la componente ( $U$ ) tiene una correlación menor de  $r=0.57$ , lo que indica que existe una relación también con la turbulencia principalmente cuando el valor de  $U$  es positivo, es decir con dirección este.

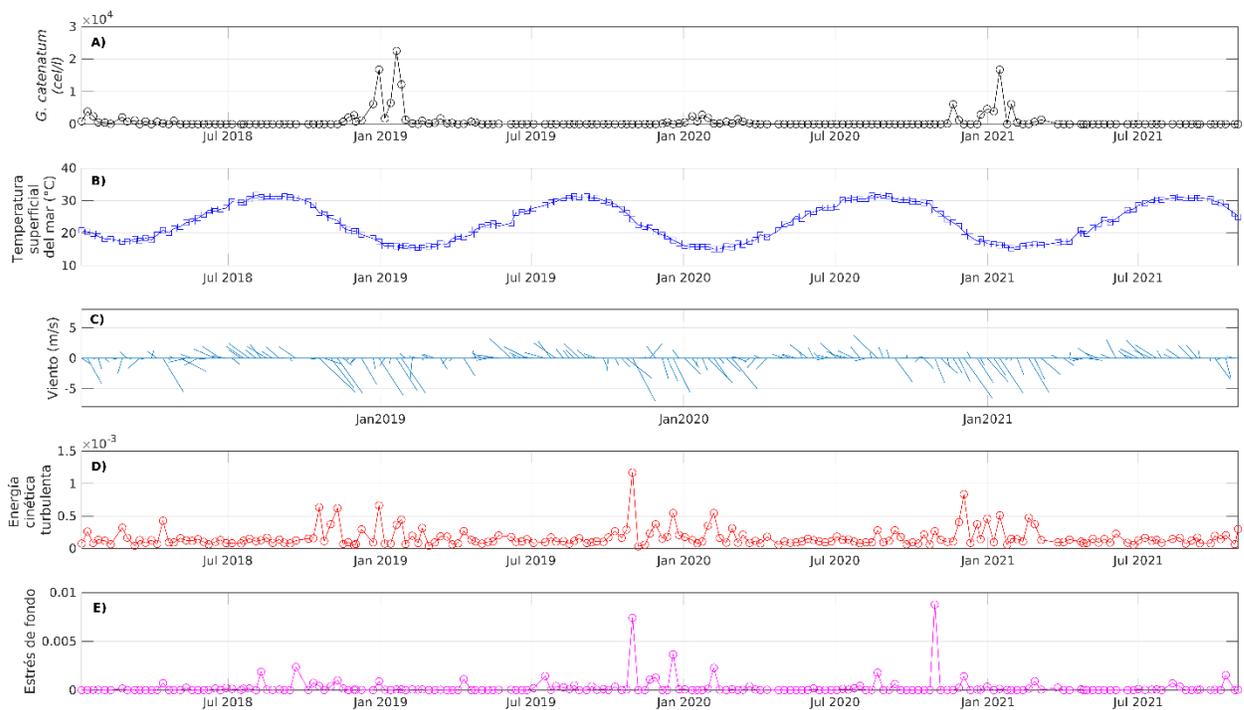
Otra correlación que destaca entre las variables físicas es la del estrés de fondo con la turbulencia, siendo  $r=0.52$ , lo que indica que estas variables tienen una variación similar, aunque la correlación no es fuerte, ya que si bien existen respuestas similares en algunos periodos de tiempo el oleaje tiende a tener un retraso respecto a la energía cinética turbulenta (figura 28 C y D).

Debido a que los resultados de la matriz de correlación solo consideran datos sin ningún desfase y la respuesta de la especie a un proceso físico puede no verse reflejado de manera instantánea, se realizaron correlaciones cruzadas entre la especie y cada una de las variables, se presentan los resultados más importantes de estas correlaciones.

Considerando que la mayor correlación entre la especie fue con la componente de viento meridional ( $V$ ) se estimó la correlación cruzada (figura 30), para determinar si existía un desfase al que la correlación aumentara, la mayor correlación fue de  $-0.39$  y se obtuvo con un desfase cero, que para un proceso biológico en asociación directa a una variable puede considerarse importante.

Otro de los procesos importantes a considerar es el estrés de fondo tal como se determinó con los resultados del análisis espectral, como se observa en las series de tiempo (figura 28A y D) previo a la presencia de *G. catenatum* se presentan incrementos en la magnitud del esfuerzo del fondo asociado al

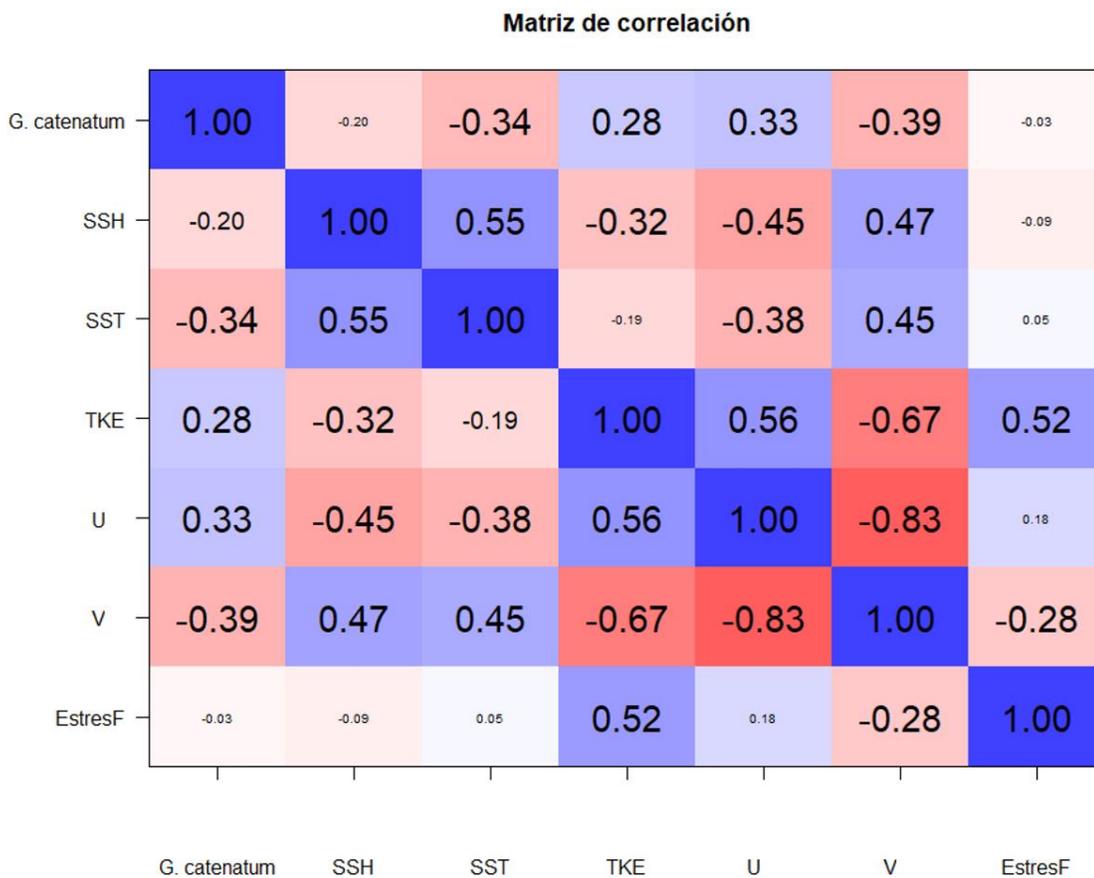
oleaje, que en conjunto con el resultado del análisis de espectros cruzados permite sugerir que existe un efecto de este sobre la presencia de la especie.



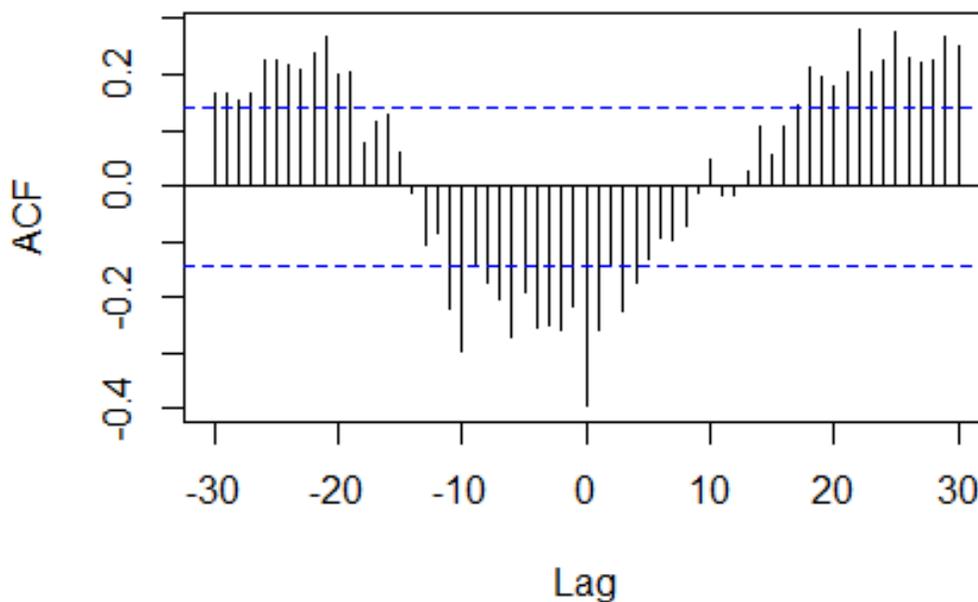
**Figura 28** Series de tiempo de abundancia de *G. catenatum* (A), temperatura superficial del mar (B), viento (C) y energía cinética turbulenta (D) y estrés de fondo producido por oleaje (E).

De la correlación cruzada entre estas dos series (figura 31) destaca que existe una correlación positiva en el retraso de 11 días periodo similar a la frecuencia de 0.084 cpd estimada por medio del análisis espectral, esta correlación es de 0.33, lo que indica que existe una correlación débil entre el incremento del estrés de fondo y el incremento de *G. catenatum*.

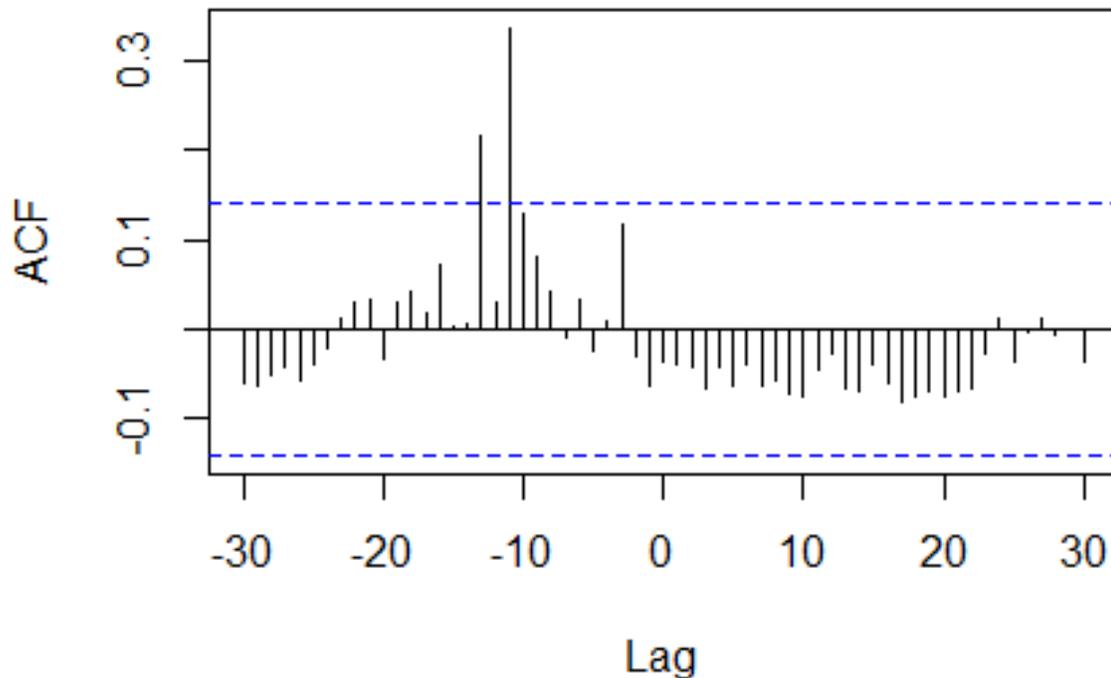
El hecho de que la correlación obtenida, sea débil no implica que este proceso no tenga influencia sobre la presencia de la especie y la formación de los florecimientos algales, sino que permite establecer que estos eventos no son provocados por un único proceso o forzamiento, sino que el conjunto de procesos asociados contribuyen en diferentes tiempos y medidas a la formación de estos FAN y su recurrencia hasta el momento puede establecerse debido a que estos procesos se encuentran enmarcados en la estacionalidad del norte del golfo de California.



**Figura 29** Matriz de correlación de todas las variables analizadas: abundancia de *Gymnodinium catenatum*, nivel del mar (SSH), temperatura superficial del mar (SST), energía cinética turbulenta (TKE), componente zonal (U) y meridional (V) del viento.



**Figura 30** Correlación cruzada entre el promedio de dos días del viento meridional (v) y la abundancia de *G. catenatum*.



**Figura 31** Correlación cruzada entre el promedio de dos días del estrés de fondo y la abundancia de *G. catenatum*.

Derivado de los resultados de los análisis realizados se propone que el proceso de formación de los florecimientos algales está influenciado por varios procesos físicos sin existir uno que sea el dominante, sino que es una conjunción de los que se ha determinado tiene una mayor relación con la presencia de la especie, por lo que se propone que esto ocurre en un ciclo durante la temporada de invierno y verano (figura 32).

Esto se daría de la siguiente forma, ocurre la resuspensión de los quistes desde los sedimentos causado por el incremento en el estrés de fondo asociado al oleaje, como se conoce hay un desfase entre este y la presencia de la especie (Aproximadamente 11 días), que puede explicarse por el tiempo en el que el organismo responde a las condiciones ambientales y ocurre el desenquistamiento para pasar a la etapa de célula vegetativa. Estos quistes se mantienen en la columna de agua debido al incremento de la turbulencia que permite se mantengan suspendidos durante el periodo de desenquistamiento (aunque el estrés de fondo haya disminuido), posterior a esto se tiene un crecimiento en fase vegetativa ya que las condiciones ambientales lo permiten. Cuando las condiciones ambientales cambian, disminuyéndose la turbulencia y cuando ya no se tienen incrementos en el estrés de fondo que permitan el aporte de células vegetativas provenientes de los quistes, el florecimiento decae y algunas de las células vegetativas forman quistes de reposo.

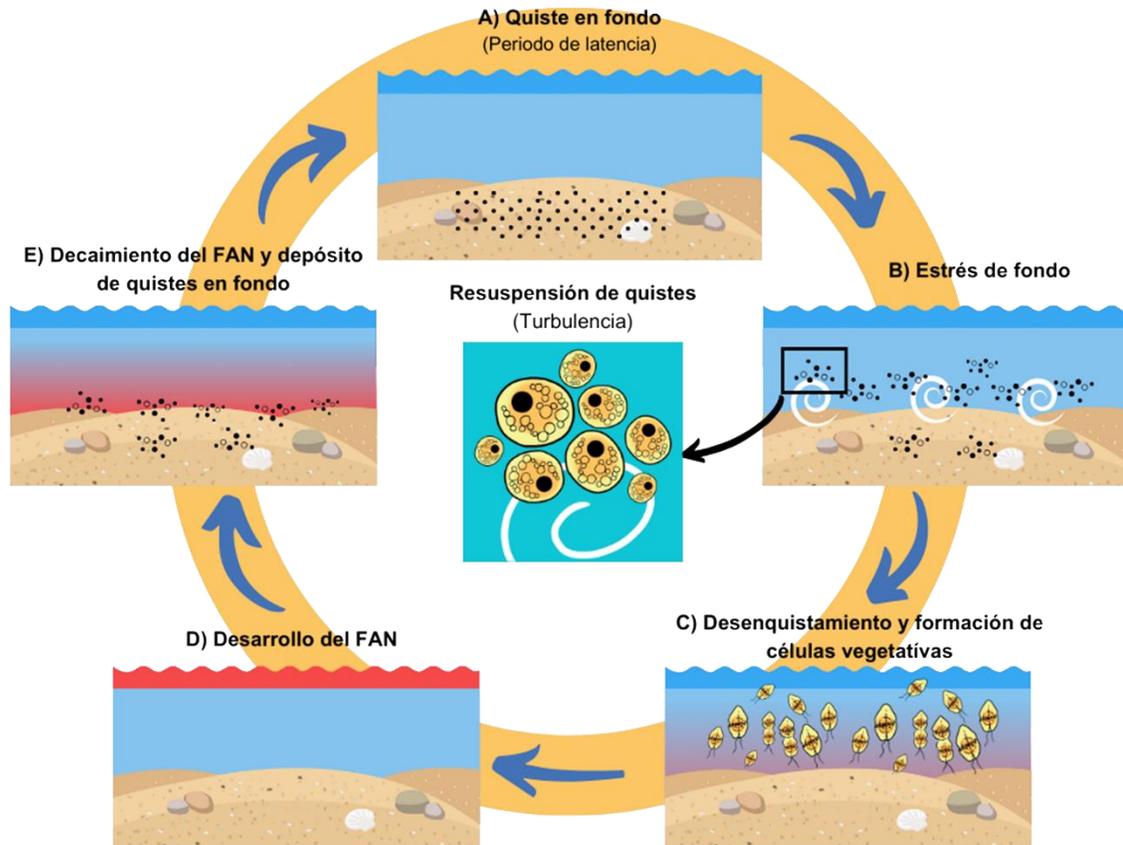


Ilustración: Mercedes Y. Chi-Chan, 2023.

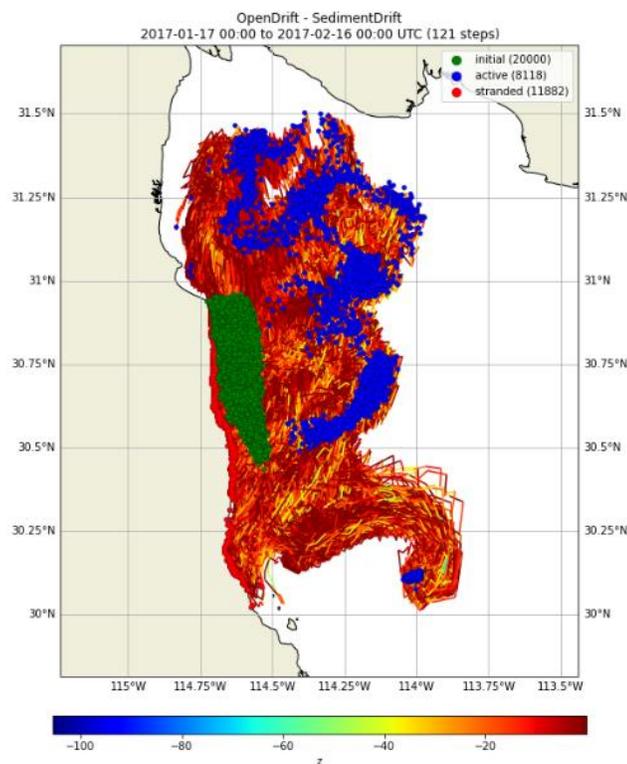
**Figura 32** Ciclo propuesto de formación de florecimientos algales de *Gymnodinium catenatum*, el cual inicia con la resuspensión de quistes (A) debido al incremento de estrés de fondo (B), siguiendo con el desenquistamiento (C) hasta llegar al desarrollo del FAN (D) y su posterior decaimiento y depósito de quistes (E).

### 3.3 Simulación numérica del transporte de florecimientos algales de *G. catenatum*

El transporte para la simulación del FAN de 2017 muestra que las partículas se mantienen cerca de costa en la zona en la que fueron liberadas durante la mayoría de los días de la simulación, dispersándose hacia el norte de San Felipe algunas partículas. La distribución de partículas que se mantiene hasta la zona de Puertecitos lo cual es coherente con las zonas afectadas durante el FAN que fueron polígonos de extracción de almeja generosa en esa zona.

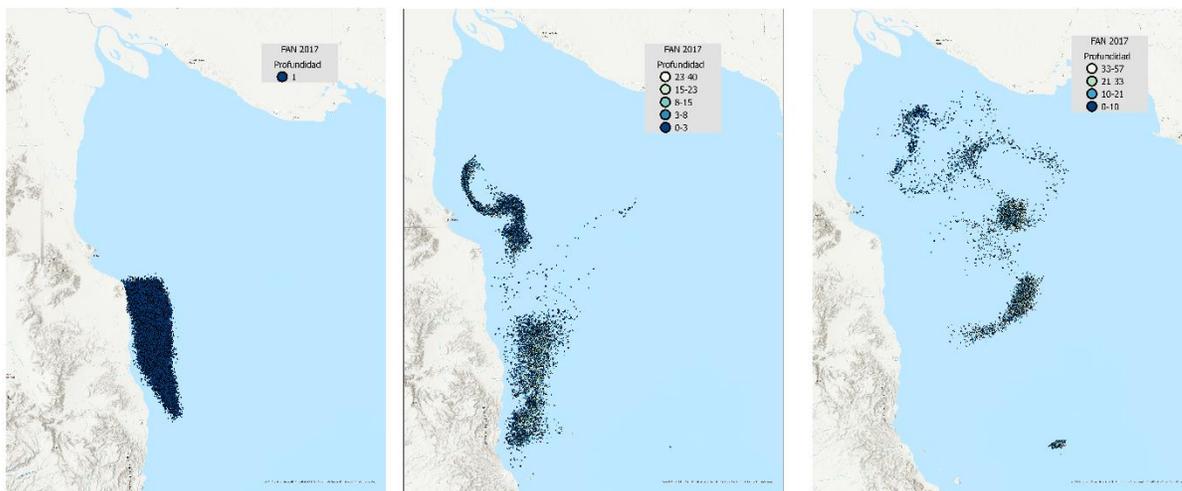
La evolución de la trayectoria de las partículas para la simulación del FAN (figura 33). El día 1 las partículas fueron liberadas en los polígonos de extracción a 1 m de profundidad (figura 34a). Para el día 15 de la

simulación, es decir la mitad del periodo, las partículas se han dividido en dos grandes grupos (figura 34b), uno que permanece en la zona cercana a los polígonos de extracción y otro que se ha desplazado hacia el norte y se encuentra localizado enfrente de la bahía de San Felipe, hay partículas a diferentes profundidades en la columna de agua, pero en su mayoría se mantienen en superficie. Para el último día de la simulación las partículas activas se concentran en la zona central del alto golfo de California con profundidades que oscilan entre la superficie y los 57 m (figura 34c), aunque la mayor parte de partículas se mantienen en los primeros metros de la columna de agua. La animación de esta simulación puede consultarse para observar la evolución del transporte con respecto al tiempo: <https://youtube.com/shorts/jchrPcUOWNU?feature=share>.

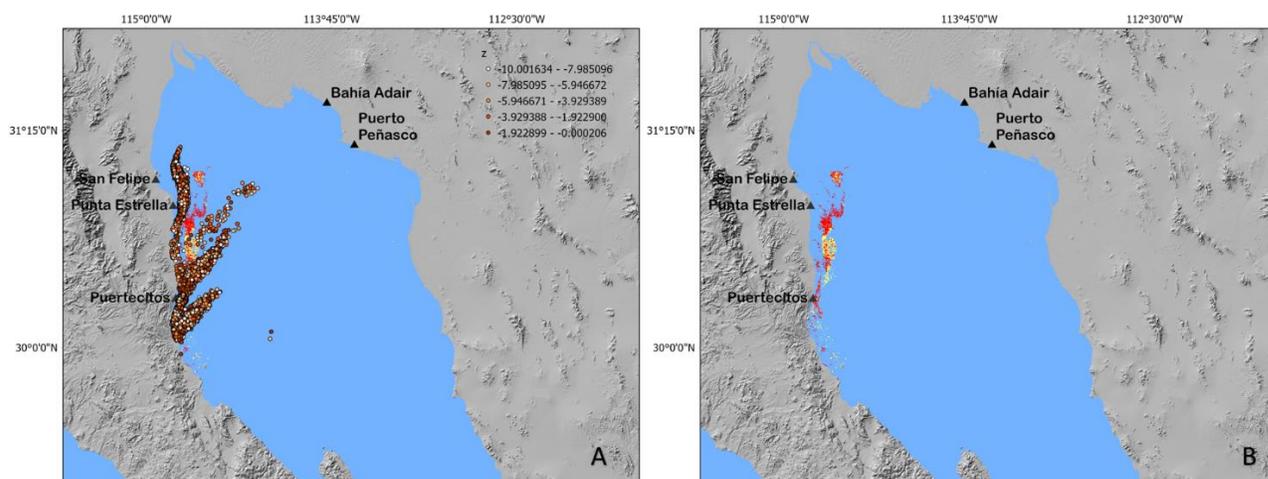


**Figura 33** Trayectoria obtenida del transporte de partículas para el FAN de enero de 2017. Los puntos verdes indican las partículas sembradas, las líneas de colores la trayectoria y profundidad seguidas por las partículas y los puntos azules indican las partículas activas al final de la simulación.

Los resultados de la simulación y la detección por satélite para el 30 de enero tuvieron una distribución similar tanto en el transporte de partículas como en la presencia de las clases asociadas al FAN (figura 35), ambas distribuciones concentradas en la zona de San Felipe hasta Puertecitos, aunque las partículas se mantienen algo más cercanas a costa respecto a la detección lo que puede estar asociado a las resoluciones espaciales del modelo hidrodinámico y las imágenes satelitales.



**Figura 34** Distribución de las partículas para la simulación del FAN 2017 a 1, 15 y 30 días.

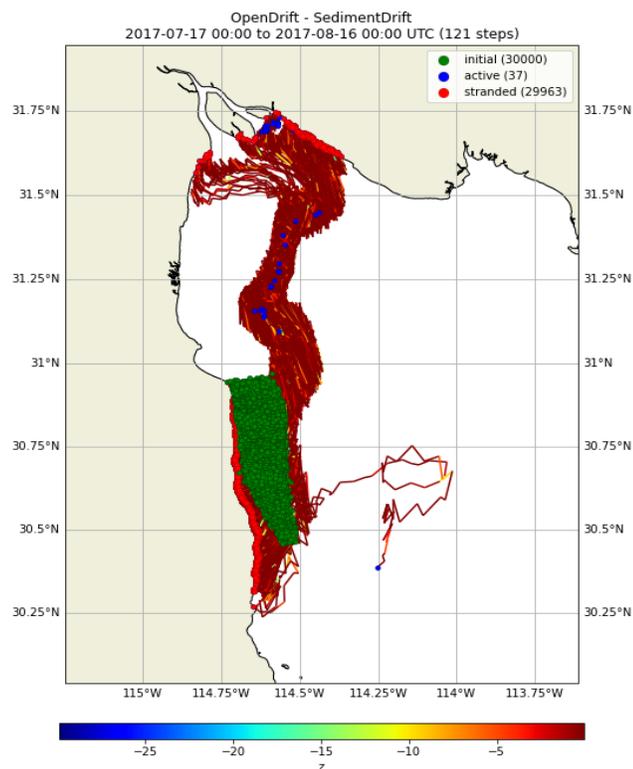


**Figura 35** Ubicación del FAN estimado mediante la simulación del transporte de partículas (A) y detección de la presencia de las clases 1 y 2 asociadas al FAN (B) para el 30 de enero de 2017.

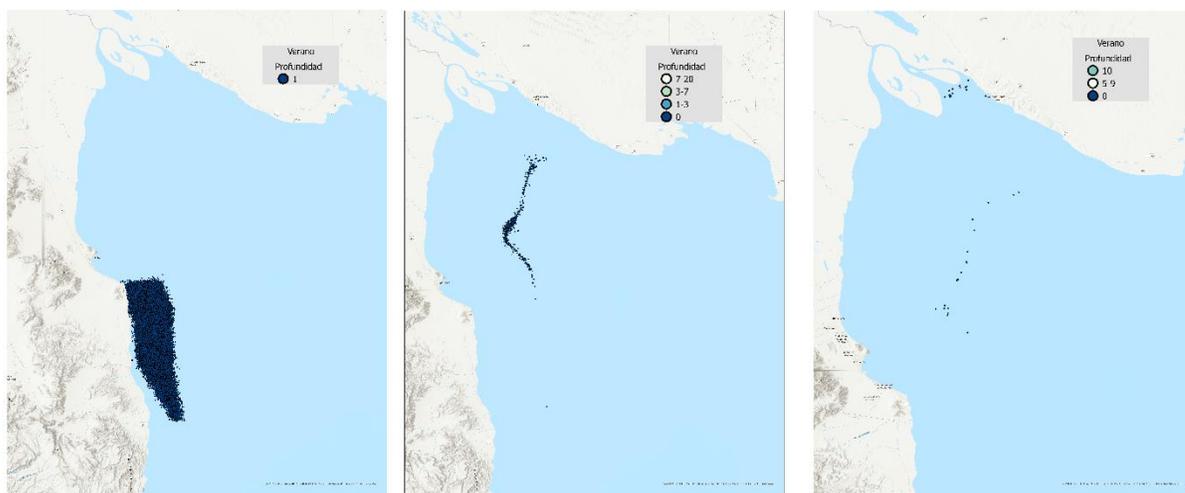
La trayectoria de las partículas durante el verano es considerablemente diferente al comportamiento durante el FAN. En la época de verano una cantidad considerable de partículas se desactivan en los primeros días al chocar con costa mientras que las restantes son rápidamente transportadas hacia el norte del alto golfo, hacia la zona este del delta del río Colorado (figura 36). En esta zona al llegar a costa se desactivan. Al final del periodo de simulación existen pocas partículas activas. En esta temporada destaca el poco tiempo de residencia de las partículas en la zona de San Felipe y Puertecitos, lo cual indica que a diferencia de la época del FAN el transporte costa afuera en esta época sería muy rápida.

Se muestra la posición de las partículas para el día 1, 15 y 30 de la simulación del periodo de verano (figura 35). La posición al día 1 es la misma que en la simulación del día del FAN (figura 37a), para el día 15 de la simulación se observa una cantidad de partículas considerablemente menor a las 30,000 con las que se inició la simulación lo que implica que estas se desactivaron durante los días previos, las que se mantienen activas se distribuyen entre los 20 y los 7 m de profundidad (figura 37b), aunque se observa que en su mayoría se encuentran en superficie, la ubicación es contrastante si se compara con la simulación del FAN ya que las partículas ya se han desplazado al centro del alto golfo. Para el día 30 (figura 37c) la mayoría de las partículas se han desactivado y las que se mantiene activas han llegado a la zona del delta y algunas se mantienen en el centro del alto golfo, en posiciones similares a las del día 15 pero son escasas las partículas en esa posición por lo que para esta simulación puede considerarse que las partículas tienden a ser transportadas a costas donde se desactivan.

La animación de esta simulación puede consultarse para observar la evolución del transporte con respecto al tiempo: [https://youtube.com/shorts/jN\\_W8nGeb6g?feature=share](https://youtube.com/shorts/jN_W8nGeb6g?feature=share).



**Figura 36** Trayectoria obtenida de la simulación de transporte de partículas para el verano. . Los puntos verdes indican las partículas sembradas, las líneas de colores la trayectoria y profundidad seguidas por las partículas y los puntos azules indican las partículas activas al final de la simulación.



**Figura 37** Distribución de las partículas para la simulación del FAN 2017 a 1, 15 y 30 días.

## Capítulo 4. Discusión

---

Este trabajo abordó el estudio de los florecimientos algales causados por *Gymnodinium catenatum* en el norte del golfo de California basado en la necesidad de contar con un sistema de monitoreo y detección temprana de estos FAN ante su recurrencia e impactos negativos en la región, por lo cual se abordaron tres objetivos de relevancia para el estudio de estos fenómenos: aplicación de un método de detección por percepción remota, estudio de los procesos físicos asociados a la ocurrencia de estos florecimientos y la simulación del transporte de los mismos.

Para lograr el primer objetivo se implementó un método de clasificación supervisada de imágenes de satélite para la detección de florecimientos algales nocivos causados por *Gymnodinium catenatum*, se analizaron las variables físicas asociadas a su formación y se estudió el posible transporte en el norte del golfo de California.

Los resultados obtenidos permitieron demostrar que el método de clasificación de máxima verosimilitud implementado tiene un alto potencial de aplicarse para el seguimiento de florecimientos algales de *Gymnodinium catenatum* en el norte del golfo de California. Se obtuvo un  $k=0.72$  para MODIS y  $k=0.70$  para Sentinel-3, lo que indica una alta concordancia entre las zonas etiquetadas y como fueron clasificadas para ambas clasificaciones de acuerdo con la escala propuesta por Landis y Koch (1977). Además de esto, la validación realizada por medio de la comparación directa entre muestreos y detecciones tuvo un 75% de concordancia, lo que puede considerarse un buen nivel de identificación comparado con otras aproximaciones realizadas para otras áreas de estudio, especies y bases de datos más amplias. Por ejemplo, métodos de clasificación supervisada han tenido resultados que varían entre el 88% y 97% de concordancia en especies como *Karenia mikimotoi* o *Phaeocystis globosa* (Miller et al. 2006, Kurekin et al. 2014). Aproximaciones mucho más complejas como el aprendizaje automático (machine learning) mediante minería de datos espaciotemporales, el análisis de componentes principales de kernel (KPCA) y la clasificación de máquinas de soporte vectoriales (SVM) con el kernel de Heavy-Tailed Radial Basis Function (HTRBF) fueron implementadas para la detección de FAN obteniendo resultados de coeficiente kappa para validación cruzada de  $k=0.75$  para SeaWiFS y  $k=0.60$  para MODIS-Aqua (Gokaraju et al. 2011).

Otro resultado que soporta el uso de la técnica es que la clasificación realizada con datos provenientes del MODIS detecta adecuadamente el área que fue afectada por el FAN de 2015. Asimismo, para el FAN de 2017, la clasificación implementada con la información del Sentinel-3, indica la presencia de *G. catenatum*

en los polígonos usados como área de entrenamiento y la zona de San Felipe que es afectada de manera recurrente por estos eventos (Medina-Elizalde et al. 2018, Castañeda-Quezada, 2021). Las frecuencias de detección de las clases 1 y 2 del Sentinel-3 se concentran en la zona de Punta Estrella a Puertecitos. Esta área ha sido afectada de manera recurrente por FAN de *G. catenatum* causando el cierre temporal de la extracción de moluscos bivalvos por la presencia de saxitoxina por arriba del límite máximo permitido en la legislación nacional (COFEPRIS, 2022).

Aunado a lo anterior los resultados de la detección basada en la clasificación de máxima verosimilitud con datos del Sentinel-3 de 2018 a 2022 presenta una temporalidad coherente con la presencia de *G. catenatum* en el punto de muestreo de San Felipe. Esta especie se detecta desde octubre-noviembre hasta abril-mayo de cada año y durante el verano no está presente (Ramírez, 2020).

Los problemas de la clasificación se presentan cuando se clasifican datos del MODIS para el periodo 2018-2020 ya que se presentan altas frecuencias de detección y distribución en áreas en las que no se ha reportado la presencia de la especie. La clase FAN MODIS indica la presencia de *G. catenatum* en los meses de verano, periodo en el que no se tiene registrada la ocurrencia de esta especie (Medina-Elizalde et al. 2018, Castañeda-Quezada, 2021, COFEPRIS, 2022). De forma similar la clase 3 del Sentinel-3 no concuerda con la presencia registrada de la especie tanto espacial como temporalmente. Por lo tanto, estas dos clases (FAN MODIS y clase 3 de Sentinel-3) no están representando el comportamiento espacial y temporal conocido de *G. catenatum* en la región. Esto se explica, probablemente, porque la zona de entrenamiento de la clase FAN MODIS se realizó en un área con una abundancia heterogénea de la especie con un promedio de 33,984 cel/l. Por otro lado, la clase 3 de Sentinel-3 se generó con una zona de entrenamiento donde se detectó la menor abundancia de *G. catenatum* (95,000 cel/l) durante el FAN de 2017. La falla en la detección de *G. catenatum* por estas clasificaciones en la zona puede estar asociado a que probablemente existen otros componentes en agua que influyen más en las características ópticas de la columna de agua (superficie) que la presencia de la especie. Parece que el área de entrenamiento para la definición de una clase que caracterice a un FAN de *G. catenatum* debe contener una alta abundancia relativa y/o absoluta de la especie, lo cual representa una desventaja de este método. En el caso de los FAN de *G. catenatum* en el NGC la abundancia para definir una clase adecuadamente sería de al menos ~150,000 cel/l o 89 % de representación de la especie en la comunidad fitoplanctónica (clase 2, Sentinel-3). Sin embargo, la implementación realizada en este trabajo representa una primera aproximación de uso de información satelital para la detección y monitoreo de FAN de *G. catenatum* en el norte del golfo de California.

La aplicación del método de clasificación de máxima verosimilitud tiene un potencial importante para ser incorporado a un sistema de alerta temprana (SiAT) para una región remota que representa un reto para su monitoreo. Pero debido a la limitante de la abundancia mínima necesaria para generar las clases (150,000 cel/l, para este trabajo) es necesario realizar una validación más robusta mediante la implementación de muestreos con más representatividad espacial, principalmente en el área donde son recurrentes estos fenómenos. Esto ayudará a establecer los límites de abundancia mínima de detección mediante esta aproximación. Un nivel de detección solo a abundancias altas limitaría el uso de esta técnica ya que no se podría aplicar como una herramienta de detección temprana de un FAN. El límite que determinamos en este trabajo parece ser alto, sin embargo, la concordancia entre la detección de la clase y de la especie en el punto de muestreo con abundancias mucho más bajas indica que el método puede utilizarse para la detección temprana de la formación de FAN de *G. catenatum* en el norte del golfo de California.

El método de clasificación implementado y discutido previamente permitió identificar la distribución espaciotemporal de las detecciones de los FAN, pero no brinda información respecto a los procesos físicos que están asociados a la ocurrencia y recurrencia de estos florecimientos, información es necesaria para entender no solo la dinámica del fenómeno sino para los sistemas de monitoreo y alerta temprana. Debido a que no existen trabajos previos que estudien estos procesos en este trabajo de investigación se abordó este tópico a fin de aportar conocimiento al respecto. Se conoce que la temporada en que ocurren estos FAN es en invierno y primavera, cuando se presentan las menores temperaturas en el NGC, con un rango entre 15 a 18°C (Ramírez, 2020), estos resultados son consistentes con los resultados obtenidos.

Sin embargo, en esta investigación se buscó identificar específicamente qué procesos físicos determinan la presencia de la especie las temporadas de invierno y primavera. Derivado de los análisis de variables físicas realizados se pueden considerar como los principales factores que influyen en la presencia de la especie el cambio de magnitud en la componente meridional ( $V$ ) del viento, el estrés de fondo producido por el oleaje y la turbulencia.

Por ejemplo, el análisis espectral mostró que la energía cinética turbulenta y el oleaje tiene una respuesta en la misma frecuencia que la abundancia de *G. catenatum*. Estos resultados aunados a los valores de correlación simple y correlación cruzada permitieron sugerir que existen procesos interdependientes que no actúan en el mismo que periodo en que se presenta la especie, sino que tienen un desfase de tiempo como es el caso del estrés del fondo causado por el oleaje. El incremento del estrés de fondo puede estar causando una resuspensión mayor de quistes desde el sedimento, proceso que los pone en la columna de

agua en condiciones ambientales favorables para su crecimiento. Este proceso es importante para la formación de florecimientos algales de *Alexandrium fundyense* en el golfo de Maine (Butman et al. 2014), aunque esta especie es diferente respecto a la cantidad de quistes que produce comparado con *G. catenatum*, la presencia de quistes en las zonas de FAN permitieron proponer el posible origen autóctono de estos en el NGC (Castañeda-Quezada, 2021), lo que es coherente con los resultados obtenidos y forma parte del ciclo de formación propuesto en este trabajo.

Otro de los procesos que de acuerdo con los resultados de este trabajo tienen relación con la formación de estos florecimientos algales es la turbulencia, que se analizó como energía cinética turbulenta, el incremento de esta puede mantener los quistes resuspendidos en la columna de agua mientras se desarrolla el proceso de exquistamiento. Esta variable al tener su mayor correlación sin desfase respecto a la abundancia de la especie sugiere que el crecimiento sucede mientras se incrementa la turbulencia. Aunque esto pueda parecer contrario al conocimiento general de que los dinoflagelados requieren menor turbulencia tal como sugirió Margalef (1979) puede no ser aplicable para todas las especies tal como han sugerido Smayda y Reynolds (2001), quienes proponen nueve grupos para clasificar a especies de dinoflagelados formadoras de FAN de acuerdo con el gradiente costa-aguas abiertas, disminución de nutrientes, mezcla y profundidad de zona eufótica. Para estos autores *Gymnodinium catenatum* es una especie adaptada para sobrevivir a la turbulencia. El planteamiento de la mayor tolerancia a la turbulencia es coincidente con los resultados encontrados por Sullivan y Swift (2003) quienes documentan que en experimentos de laboratorio *G. catenatum* aumentó su tasa de crecimiento al ser sometido a una condición de turbulencia moderada. Además de la tolerancia a la turbulencia y del posible incremento en su tasa de crecimiento, la capacidad de formar cadenas le permite a este dinoflagelado tener una mayor velocidad de nado que en forma de células solitarias lo que le confiere una mayor tolerancia a la turbulencia al poder evitar el hundimiento causado por esta (Fraga et al. 1989). Lo anterior deja de manifiesto que los resultados obtenidos en este trabajo respecto a la existencia de una relación entre la turbulencia y la presencia de *G. catenatum* son coherentes con la información reportada en la literatura, lo que permite sugerir que, para el caso del norte del golfo de California, estos procesos no afectan a la especie, sino que la benefician. Si se busca el origen del incremento de la turbulencia, se puede sugerir que para el área de estudio son los cambios en el patrón de vientos entre invierno que provienen del noroeste y verano que provienen del sureste, presentándose en el invierno vientos del noroeste principalmente con magnitudes mayores que las del viento del sureste que se presenta durante el verano, por lo que este puede ser uno de los factores determinante en el proceso de formación de florecimientos algales de *G. Catenatum*.

Si bien en el norte del golfo de California no se ha documentado la existencia de surgencias en el lado oeste, que coincida con la condición de relajación de surgencia que se ha sugerido puede favorecer la formación de florecimientos de *Gymnodinium catenatum* en lugares como Rías, España (Fraga et al. 1988, Smayda y Reynolds, 2001), los experimentos de dispersión de partículas de este trabajo han permitido contrastar las condiciones de un evento de FAN (enero, 2017) y el verano del mismo año. Lo que permitió identificar que aún sin la existencia de una surgencia existe un proceso que puede ser similar al descrito por Fraga et al. (1988) en el que las células vegetativas son mantenidas cerca de la costa durante la relajación de surgencia promoviendo la formación del FAN. En el caso del NGC los resultados de la simulación del florecimiento algal han mostrado que las partículas permanecen cercanas a las costas durante la mayor parte de la simulación, manteniéndose durante días en las zonas que son recurrentemente afectadas, San Felipe a Puertecitos y en la que se registró la presencia de quistes de reposo después de este florecimiento algal (Medina-Elizalde, 2018, Castañeda-Quezada, 2021), mientras que en verano gran parte de las partículas se desactivan rápidamente y las que no, son dispersadas en los primeros días hacia el centro y el delta del río Colorado. Esta permanencia en costa y en superficie, puede ser un factor que este jugando un papel importante en la presencia recurrente de la especie durante el invierno y primavera.

Además de lo anterior, la simulación del FAN del 2017 permitió estudiar el posible proceso de transporte de este, de acuerdo con los resultados la simulación permite reproducir adecuadamente el transporte del florecimiento algal tal como sugiere la detección realizada por satélite y la zona de afectación recurrente de estos florecimientos algales, así como el área de depósito de los quistes de reposo posterior al FAN (Medina-Elizalde, 2018, Castañeda-Quezada, 2021). La aproximación usada en este trabajo, es sencilla comparada con otros trabajos desarrollados para simular el proceso de un florecimiento algal de una especie específica tal como el realizado por Stock *et al.* (2005) quienes implementaron un modelo acoplado físico biológico para estudiar un florecimiento algal de *Alexandrium fundyense* en el golfo de Maine o el trabajo de Yñiguez et al. (2018), quienes también recurren a la modelación hidrodinámica acoplada con un modelo de crecimiento de *Pyrodinium bahamense* que considera nutrientes, influencia de quistes, células vegetativas y la consecuente toxicidad de mariscos en cultivados en la bahía Sorsogon, para estudiar de manera integrada estos FAN. El método aplicado en este trabajo, si bien no contempla procesos como la resuspensión de quistes, enquistamiento, tasas de mortalidad y reproducción, es una aproximación simplificada respecto al ciclo de vida y proceso de formación de un FAN de *G. catenatum* que permite avanzar hacia la simulación de estos fenómenos por medio de un método que ha mostrado buenos resultados en otros trabajos que usan la simulación de trayectorias de partículas por medio de

elementos lagrangianos para el estudio del transporte de FAN (Wynne et al. 2011, Kavanaugh *et al.*, 2015, Pinto et al. 2016).

El conjunto de resultados obtenidos en este trabajo constituye un avance en el estudio de los florecimientos algales nocivos causados por *G. catenatum* en el norte del golfo de California debido a que, aunque la problemática de FAN de esta especie es recurrente aún no existe un sistema de monitoreo basado en percepción remota ni se habían identificado de manera particular los procesos que causan estos florecimientos.

Por lo anterior, esta investigación aporta conocimiento valioso sobre métodos que pueden ser utilizados para el monitoreo remoto de estos FAN, la identificación del inicio de condiciones que los promueven y para la estimación de su transporte. Si bien los métodos utilizados tienen limitantes, son la base para el desarrollo de trabajo futuro para la implementación de sistemas de monitoreo y alerta temprana por medio de percepción remota, pronóstico hidrodinámico y de trayectoria de un FAN, de manera operativa. De forma similar los procesos físicos identificados y relacionados con la presencia de *G. catenatum* ofrecen un primer acercamiento a la explicación de la formación de estos florecimientos algales nocivos y de su recurrencia en el norte del golfo de California.

Es importante mencionar que una de las limitantes de este trabajo, es que las detecciones y el pronóstico de trayectorias no pudieron realizarse en tiempo real, sino fueron análisis de eventos pasados por lo que es importante realizar trabajo futuro para la integración de la información generada y métodos implementados en esta investigación en un sistema operativo de alerta temprana, que permita realizar la detección diaria por medio de imágenes de satélite, así como el pronóstico de condiciones atmosféricas y oceánicas para identificar cuando se presenten condiciones favorables para la formación de FAN de *G. catenatum*. Es necesario, además, conociendo los procesos que se identificaron como más relevantes realizar análisis con métodos más complejos que permitan realizar predicciones de la presencia de la especie. Así como seguir realizando el trabajo de monitoreo semanal a fin de tener más información para estudiar el fenómeno, así como realizar más trabajo de validación tanto para las detecciones como para la estimación de transporte del FAN, por medio de monitoreos in situ más extensos. La realización de esta investigación futura con base en lo desarrollado en esta investigación traerá consigo importantes avances a la atención de la problemática de florecimientos algales nocivos de *G. catenatum* en el norte del golfo de California.

## Capítulo 5. Conclusiones

---

Este trabajo de investigación ha estudiado los florecimientos algales de *Gymnodinium catenatum* abordando tres objetivos, detección por medio de percepción remota, identificación de los procesos físicos asociados a su formación y análisis del transporte de estos FAN.

Los resultados obtenidos demuestran que es posible realizar por medio de clasificación supervisada de imágenes satelitales la detección de FAN de *Gymnodinium catenatum* en el norte del golfo de California, pero que de acuerdo con las abundancias de la especie en las áreas de entrenamiento y de la calidad de las imágenes de satélite los resultados pueden no ser adecuados. En el caso de la clasificación de MODIS se concluye que esta no es adecuada para realizar la detección de florecimientos algales de la especie de interés en el norte del golfo de California, ya que además de requerir un filtrado visual para determinar si la imagen tiene la calidad necesaria los resultados presentan detecciones en una temporada en la que no debería detectarse. Por lo tanto, se concluye que para la detección de florecimientos algales de la especie de interés en el norte del golfo de California el método de clasificación de máxima verosimilitud usando imágenes de reflectancia provenientes del Sentinel-3 con 300 m de resolución ofrecen los mejores resultados. Además de ofrecer la ventaja de que la disponibilidad de estas imágenes es diaria, pocas horas después del pase del satélite por el área de estudio.

Los procesos físicos asociados a la formación de florecimientos algales nocivos identificados están fuertemente relacionados con el patrón del viento que sucede en la temporada de invierno y primavera, que es inverso al que se presenta durante de los meses de verano, siendo la componente meridional del viento la que tiene mayor efecto directo sobre la presencia de la especie. Sin embargo, este factor no es el único que influye en la presencia de la especie, sino que la turbulencia provocada por el viento guarda también una relación con el proceso de formación del FAN. Otro de los procesos físicos que es relevante es el incremento en el estrés de fondo en días previos al inicio de la detección de la especie en el punto de monitoreo, este al tener relación con la resuspensión indica que la probabilidad de que los FAN de *G. catenatum* sean autóctonos es alta. La correlación encontrada con la temperatura (-0.34) permite sugerir que, aunque no es el único factor sí mantiene una influencia en la presencia de la especie, por lo que es una variable que debe seguir siendo monitoreada.

La formación de los FAN de *G. catenatum* es resultado de la ocurrencia de varios procesos físicos, por lo que la ocurrencia de manera recurrente parecen responder a los cambios estacionales en las condiciones

de oleaje, viento y resuspensión en el norte del golfo de California, lo que hace necesario realizar análisis retrospectivos con el objetivo de identificar si ha habido un cambio en las condiciones que provocaran el incremento en la ocurrencia de los FAN en los últimos años o es un fenómeno que pudo estar ocurriendo sin ser documentado.

El uso de simulación de trayectorias de partículas por medio de elementos lagrangianas con el módulo de sedimentos del paquete OpenDrift con la configuración usada en este trabajo constituye una herramienta útil y con buenos resultados para realizar el análisis del probable transporte de un FAN en el norte del golfo de California.

La implementación de métodos de detección por medio de percepción remota y modelos hidrodinámicos regionales constituye una herramienta fundamental para el estudio de FAN en zonas complejas y de acceso limitado como lo es el norte del golfo de California.

## Literatura citada

- Ahn, Y. H., & Shanmugam, P. (2006). Detecting the red tide algal blooms from satellite ocean color observations in optically complex Northeast-Asia Coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 103(4), 419–437. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.04.007>
- Amante, C., & Eakins, B. W. (2009). *ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis* [dataset]. National Geophysical Data Center, NOAA. <https://doi.org/10.7289/V5C8276M>
- Anderson, C. R., Kudela, R. M., Benitez-Nelson, C., Sekula-Wood, E., Burrell, C. T., Chao, Y., Langlois, G., Goodman, J., & Siegel, D. A. (2011). Detecting toxic diatom blooms from ocean color and a regional ocean model: remote detection of toxic diatom blooms. *Geophysical Research Letters*, 38(4), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2010GL045858>
- Badan-Dangon, A., Dorman, C. E., Merrifield, M. A., & Winant, C. D. (1991). The lower atmosphere over the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 96(C9), 16877–16896. <https://doi.org/10.1029/91JC01433>
- Band-Schmidt, C. J., Morquecho, L., Lechuga-Devéze, C. H., Anderson, D. M. (2004). Effects of growth medium, temperature, salinity, and seawater source on the growth of *Gymnodinium catenatum* (Dinophyceae) from Bahia Concepcion, Gulf of California, Mexico. *Journal of Plankton Research*, 26(12), 1459–1470. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbh133>
- Band-Schmidt, C. J., Bustillos-Guzmán, J. J., López-Cortés, D. J., Gárate-Lizárraga, I., Núñez-Vázquez, E. J., & Hernández-Sandoval, F. E. (2010). Ecological and Physiological Studies of *Gymnodinium catenatum* in the Mexican Pacific: A Review. *Marine Drugs*, 8(6), 1935–1961. <https://doi.org/10.3390/md8061935>
- Band-Schmidt, C. J., Bustillos-Guzmán, J. J., López-Cortés, D. J., Núñez-Vázquez, E., & Hernández-Sandoval, F. E. (2011). *El estado actual del estudio de florecimientos algales nocivos en México The actual state of the study of harmful algal blooms in Mexico*. 21(3). [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-88972011000300013](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-88972011000300013)
- Band-Schmidt, C. J., Bustillos-Guzmán, J. J., Durán-Riveroll, L. M., López-Cortés, D. J., Hernández-Sandoval, F. E., & Nuñez-Vázquez, E. (2016). Autoecología de microalgas nocivas aisladas del Golfo de California. En E. García-Mendoza, S. I. Quijano-Scheggi, A. Olivos-Ortiz, & E. Nuñez-Vázquez (Eds.), *Florecimientos algales nocivos en México* (pp. 180-195). CICESE. [https://www.researchgate.net/publication/314174912\\_Florecimientos\\_Algaes\\_Nocivos\\_en\\_Mexico](https://www.researchgate.net/publication/314174912_Florecimientos_Algaes_Nocivos_en_Mexico)
- Band-Schmidt, C. J., Durán-Riveroll, L. M., Bustillos-Guzmán, J. J., Leyva-Valencia, I., López-Cortés, D. J., Núñez-Vázquez, E. J., Hernández-Sandoval, F. E., & Ramírez-Rodríguez, D. V. (2019). Paralytic Toxin Producing Dinoflagellates in Latin America: Ecology and Physiology. *Frontiers in Marine Science*, 6, 42. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00042>
- Banko, G. (1998). *A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data and of Methods Including Remote Sensing Data in Forest Inventory*. International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). <https://core.ac.uk/reader/33897040>

- Bolton, D. (1980). The Computation of Equivalent Potential Temperature. *Monthly Weather Review*, 108(7), 1046–1053. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1980\)108<1046:TCOEPT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1980)108<1046:TCOEPT>2.0.CO;2)
- Butman, B., Aretxabaleta, A. L., Dickhudt, P. J., Dalyander, P. S., Sherwood, C. R., Anderson, D. M., Keafer, B. A., & Signell, R. P. (2014). Investigating the importance of sediment resuspension in Alexandrium fundyense cyst population dynamics in the Gulf of Maine. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 103, 79–95. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2013.10.011>
- Casal, G., Kutser, T., Domínguez-Gómez, J. A., Sánchez-Carnero, N., & Freire, J. (2011). Mapping benthic macroalgal communities in the coastal zone using CHRIS-PROBA mode 2 images. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 94(3), 281–290. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.07.008>
- Casal, G., Sánchez-Carnero, N., Sánchez-Rodríguez, E., & Freire, J. (2011). Remote sensing with SPOT-4 for mapping kelp forests in turbid waters on the south European Atlantic shelf. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 91(3), 371–378. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2010.10.024>
- Castañeda, J. R. (2021). *Identificación y distribución de quistes de reposo de Gymnodinium catenatum Graham en sedimentos superficiales de la parte norte del Golfo de California*. [Tesis de doctorado, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. Repositorio institucional <http://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/3652>
- Castañeda-Quezada, R., García-Mendoza, E., Ramírez-Mendoza, R., Helenes, J., Rivas, D., Romo-Curiel, A. E., & Lago-Lestón, A. (2021). Distribution of *Gymnodinium catenatum* Graham cysts and its relation to harmful algae blooms in the northern Gulf of California. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 101(6), 895–909. <https://doi.org/10.1017/S0025315421000795>
- Castro-Rosero, L. M., Hernandez, I., Alsina, J. M., & Espino, M. (2023). Transport and accumulation of floating marine litter in the Black Sea: Insights from numerical modeling. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1213333. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1213333>
- COFEPRIS. (17 de octubre de 2022). Vedas sanitarias 2013-2023, cierres precautorios y eventos de marea roja en áreas sin producción de moluscos bivalvos 2023. *Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios*. <https://www.gob.mx/cofepris/documentos/tarjetas-informativas-sobre-eventos-de-floreCIMIENTO-algales-sin-produccion-de-moluscos-bivalvos-2022?state=published>
- Cohen, J. (1960). A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), 37–46. <https://doi.org/10.1177/001316446002000104>
- CONANP. (2007). *Programa de Conservación y manejo reserva de la Biosfera alto golfo de California y delta del río Colorado*. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). [https://simec.conanp.gob.mx/pdf\\_libro\\_pm/2\\_libro\\_pm.pdf](https://simec.conanp.gob.mx/pdf_libro_pm/2_libro_pm.pdf)
- Congalton, R. G., & Green, K. (2019). *Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices* (3<sup>rd</sup>. ed). CRC Press.
- Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. (2014). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-66362-0>
- Delandmeter, P., & van Sebille, E. (2019). The Parcels v2.0 Lagrangian framework: New field interpolation schemes. *Geoscientific Model Development*, 12(8), 3571–3584. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-3571-2019>

- Dijkstra, H. A. (2008). *Dynamical Oceanography*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-76376-5>
- Egbert, G. D., & Erofeeva, S. Y. (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(2). [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2002\)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2)
- European Union-Copernicus Marine Service. (2016). *Global Ocean 1/12° Physics Analysis and Forecast updated Daily* [Dataset]. Mercator Ocean International. <https://doi.org/10.48670/MOI-00016>
- European Union-Copernicus Marine Service. (2018). *Global Ocean Physics Reanalysis* [Dataset]. Mercator Ocean International. <https://doi.org/10.48670/MOI-00021>
- Fairall, C. W., Bradley, E. F., Godfrey, J. S., Wick, G. A., Edson, J. B., & Young, G. S. (1996). Cool-skin and warm-layer effects on sea surface temperature. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C1), 1295–1308. <https://doi.org/10.1029/95JC03190>
- Fairall, C. W., Bradley, E. F., Rogers, D. P., Edson, J. B., & Young, G. S. (1996). Bulk parameterization of air-sea fluxes for Tropical Ocean-Global Atmosphere Coupled-Ocean Atmosphere Response Experiment. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C2), 3747–3764. <https://doi.org/10.1029/95JC03205>
- Fraga, S., Anderson, D. M., Bravo, I., Reguera, B., Steidinger, K. A., & Yentsch, C. M. (1988). Influence of upwelling relaxation on dinoflagellates and shellfish toxicity in Ria de Vigo, Spain. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 27(4). [https://doi.org/10.1016/0272-7714\(88\)90093-5](https://doi.org/10.1016/0272-7714(88)90093-5)
- Fraga, S., Gallager, S. M., & Anderson, D. (1989). *Chain-forming dinoflagellates. An adaptation to red tides*. [https://www.researchgate.net/publication/230793454\\_Chain-forming\\_Dinoflagellates\\_An\\_adaptation\\_to\\_Red\\_Tides](https://www.researchgate.net/publication/230793454_Chain-forming_Dinoflagellates_An_adaptation_to_Red_Tides)
- Gevana, D., Camacho, L., Carandang, A., Camacho, S., & Im, S. (2015). Land use characterization and change detection of a small mangrove area in Banacon Island, Bohol, Philippines using a maximum likelihood classification method. *Forest Science and Technology*, 11(4), 197–205. <https://doi.org/10.1080/21580103.2014.996611>
- Giddings, S. N., MacCready, P., Hickey, B. M., Banas, N. S., Davis, K. A., Siedlecki, S. A., Trainer, V. L., Kudela, R. M., Pelland, N. A., & Connolly, T. P. (2014). Hindcasts of potential harmful algal bloom transport pathways on the Pacific Northwest coast. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(4), 2439–2461. <https://doi.org/10.1002/2013JC009622>
- Glibert, P. M., Berdalet, E., Burford, M. A., Pitcher, G. C., & Zhou, M. (Eds.). (2018). *Global Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms* (Vol. 232). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-70069-4>
- Gokaraju, B., Durbha, S. S., King, R. L., & Younan, N. H. (2011). A Machine Learning Based Spatio-Temporal Data Mining Approach for Detection of Harmful Algal Blooms in the Gulf of Mexico. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 4(3), 710–720. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2010.2103927>
- Graham, H. W. (1943). *Gymnodinium catenatum*, a New Dinoflagellate from the Gulf of California. *Transactions of the American Microscopical Society*, 62(3), 259. <https://doi.org/10.2307/3223028>

- Hallegraef, G. M., & et al. (2004). *Manual on Harmful Marine Microalgae. 2nd revised edition.* Unesco. <https://doi.org/10.25607/OBP-1370>
- Hayes, M. H. (1996). *Statistical digital signal processing and modeling.* John Wiley & Sons. [https://books.google.com.mx/books?id=IJWdEAAAQBAJ&lpg=PA1&ots=5JQGF\\_I30T&dq=Statistical%20Digital%20Signal%20Processing%20and%20Modeling.&lr&hl=es&pg=PA1#v=onepage&q=Statistical%20Digital%20Signal%20Processing%20and%20Modeling.&f=false](https://books.google.com.mx/books?id=IJWdEAAAQBAJ&lpg=PA1&ots=5JQGF_I30T&dq=Statistical%20Digital%20Signal%20Processing%20and%20Modeling.&lr&hl=es&pg=PA1#v=onepage&q=Statistical%20Digital%20Signal%20Processing%20and%20Modeling.&f=false)
- He, R., McGillicuddy, D. J., Keafer, B. A., & Anderson, D. M. (2008). Historic 2005 toxic bloom of *Alexandrium fundyense* in the western Gulf of Maine: 2. Coupled biophysical numerical modeling. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C7), 2007JC004602. <https://doi.org/10.1029/2007JC004602>
- Hedstrom, K. (2018). *Technical Manual for a Coupled Sea-Ice/Ocean Circulation Model (Version 5).* US Dept. of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management, Alaska OCS Region. OCS Study BOEM 2018-007.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hogland, J., Billor, N., & Anderson, N. (2013). Comparison of standard maximum likelihood classification and polytomous logistic regression used in remote sensing. *European Journal of Remote Sensing*, 46(1), 623–640. <https://doi.org/10.5721/EuJRS20134637>
- Hossen, H., & Negm, A. (2016). Change Detection in the Water Bodies of Burullus Lake, Northern Nile Delta, Egypt, Using RS/GIS. *Procedia Engineering*, 154, 951–958. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.529>
- IOGCC. (2021). *Observation of Harmful Algal Blooms with Ocean Colour Radiometry.* International Ocean Colour Coordinating Group (IOCCG). <https://doi.org/10.25607/OBP-1042>
- Kavanaugh, K. E., Derner, K., Davis, E., & Urizar, C. (2015). *Assessment of the Western Gulf of Mexico Harmful Algal Bloom Operational Forecast System (GOMX HAB-OFS): An Analysis of Forecast Skill and Utilization from October 1, 2010, to April 30, 2014* (NOAA Technical Report NOS CO-OPS 080). NOAA. [https://tidesandcurrents.noaa.gov/publications/NOAA\\_Technical\\_Report\\_NOS\\_COOPS\\_080.pdf](https://tidesandcurrents.noaa.gov/publications/NOAA_Technical_Report_NOS_COOPS_080.pdf)
- Khorram, S., Koch, F. H., Van der Wiele, C. F., & Nelson, S. A. (2012). *Remote sensing.* Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3103-9>
- Kudela, R. M., Berdalet, E., Bernard, S., Burford, M., Fernand, L., Lu, S., Tester, P., Usup, G., Magnien, R., Anderson, D. M., Cembella, A., Chinain, M., Hallegraef, G., Reguera, B., Zingone, A., Enevoldsen, H., & Urban, E. (2015). *Harmful Algal Blooms: A scientific summary for policy makers.* UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000233419>
- Kurekin, A. A., Miller, P. I., & Van Der Woerd, H. J. (2014). Satellite discrimination of *Karenia mikimotoi* and *Phaeocystis* harmful algal blooms in European coastal waters: Merged classification of ocean colour data. *Harmful Algae*, 31, 163–176. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2013.11.003>

- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). *The measurement of observer agreement for categorical data*. *Biometrics*. <https://doi.org/10.2307/2529310>
- Larkin, S. L., & Adams, C. M. (2007). Harmful Algal Blooms and Coastal Business: Economic Consequences in Florida. *Society & Natural Resources*, 20(9), 849–859. <https://doi.org/10.1080/08941920601171683>
- Lavín, M. F., & Marinone, S. G. (2003). An Overview of the Physical Oceanography of the Gulf of California. En O. U. Velasco Fuentes, J. Sheinbaum, & J. Ochoa (Eds.), *Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics* (pp. 173–204). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-010-0074-1\\_11](https://doi.org/10.1007/978-94-010-0074-1_11)
- Lewitus, A. J., Horner, R. A., Caron, D. A., Garcia-Mendoza, E., Hickey, B. M., Hunter, M., Huppert, D. D., Kudela, R. M., Langlois, G. W., Largier, J. L., Lessard, E. J., RaLonde, R., Jack Rensel, J. E., Strutton, P. G., Trainer, V. L., & Tweddle, J. F. (2012). Harmful algal blooms along the North American west coast region: History, trends, causes, and impacts. *Harmful Algae*, 19, 133–159. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2012.06.009>
- Li, M., Zhang, F., & Glibert, P. M. (2021). Seasonal life strategy of *Prorocentrum minimum* in Chesapeake Bay, USA: Validation of the role of physical transport using a coupled physical–biogeochemical–harmful algal bloom model. *Limnology and oceanography*, 66(11). <https://doi.org/10.1007/s00128-020-02820-1>
- Liu, R., Wang, T., Li, J., Liu, X., & Zhu, Q. (2023). Simulation of seasonal transport of microplastics and influencing factors in the China Seas based on the ROMS model. *Water Research*, 244, 120493. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120493>
- Liu, W. T., Katsaros, K. B., & Businger, J. A. (1979). Bulk Parameterization of Air-Sea Exchanges of Heat and Water Vapor Including the Molecular Constraints at the Interface. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 36(9), 1722–1735. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1979\)036<1722:BPOASE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1979)036<1722:BPOASE>2.0.CO;2)
- Margalef, R., Estrada, M., & Blasco, D. (1979). Functional morphology of organisms involved in red tides, as adapted to decaying turbulence. En D. L. Taylor & H. H. Seliger (Eds.), *Toxic Dinoflagellate Blooms*. Elsevier.
- Mariño, I. D. J. (2003). *Cross-shore sediment transport processes on natural beaches and their relation to sand bar migration patterns*. [Tesis de doctorado, University of Plymouth]. <https://doi.org/10.24382/3532>
- Marinone, S. G. (2003). A three-dimensional model of the mean and seasonal circulation of the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C10), 2002JC001720. <https://doi.org/10.1029/2002JC001720>
- Medina, J. (2021). *Effects of Paralytic Shellfish Toxins on marine mammals, seabirds and geoduck fisheries in the Northern Gulf of California during 2015-2019* [Tesis de doctorado, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. Repositorio Institucional <https://biblioteca.cicese.mx/catalogo/tesis/ficha.php?id=25966>
- Medina-Elizalde, J., García-Mendoza, E., Turner, A. D., Sánchez-Bravo, Y. A., & Murillo-Martínez, R. (2018). Transformation and Depuration of Paralytic Shellfish Toxins in the Geoduck Clam *Panopea globosa* From the Northern Gulf of California. *Frontiers in Marine Science*, 5, 335. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00335>

- Miller, P. I., Shutler, J. D., Moore, G. F., & Groom, S. B. (2006). SeaWiFS discrimination of harmful algal bloom evolution. *International Journal of Remote Sensing*, 27(11), 2287–2301. <https://doi.org/10.1080/01431160500396816>
- Nguyen, D. M., Hole, L. R., Breivik, Ø., Nguyen, T. B., & Pham, N. Kh. (2023). Marine Plastic Drift from the Mekong River to Southeast Asia. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(5), 925. <https://doi.org/10.3390/jmse11050925>
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2011). *National harmful algal bloom (HAB) forecast system great lakes*. [https://aambpublicoceanservice.blob.core.windows.net/oceanserviceprod/ecoforecasting/hab\\_great\\_lakes.pdf](https://aambpublicoceanservice.blob.core.windows.net/oceanserviceprod/ecoforecasting/hab_great_lakes.pdf)
- Núñez Fernández, T. (2012). *Contribuciones de las componentes astronómicas, meteorológicas y oceanográficas en el nivel del mar en el noroeste de la Península de Yucatán* [Tesis de maestría, Centro de investigación y de estudios avanzados del instituto politécnico nacional]. [https://www.researchgate.net/publication/352052460\\_Contribuciones\\_de\\_las\\_componentes\\_astronomicas\\_meteorologicas\\_y\\_oceanograficas\\_en\\_el\\_nivel\\_del\\_mar\\_en\\_el\\_noroeste\\_de\\_la\\_Peninsula\\_de\\_Yucatan](https://www.researchgate.net/publication/352052460_Contribuciones_de_las_componentes_astronomicas_meteorologicas_y_oceanograficas_en_el_nivel_del_mar_en_el_noroeste_de_la_Peninsula_de_Yucatan)
- Núñez Vázquez, E. J., Lizarraga, I. G., Schmidt, C. J. B., Tapia, A. C., Cortes, D. J. L., Sandoval, F. E. H., Tapia, A. H., & Guzman, J. J. B. (2011). Impact of harmful algal blooms on wild and cultured animals in the Gulf of California. *Journal of Environmental Biology*, 32(4), 413–423. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22315821/>
- Núñez-Vázquez, E., Band-Schmidt, C. J., Hernández-Sandoval, F. E., Bustillos-Guzmán, J. J., López-Cortés, D. J., Cordero-Tapia, A., García-Mendoza, E., Peña-Manjarrez, J. L., Ruíz-de la Torre, M. C., & Medina-Elizalde, J. (2016). Impactos de los FAN en la salud pública y animal (silvestres y de cultivo) en el Golfo de California. En E. García-Mendoza, S. I. Quijano-Scheggi, A. Olivos-Ortiz, & E. Nuñez-Vázquez (Eds.), *Florecimientos Algaes Nocivos en México*. (pp. 196-211). CICESE.
- Ochoa, J. L., Hernández-Becerril, D. U., Lluch-Cota, S., Arredondo-Vega, B. O., Nuñez-Vázquez, E., Heredia-Tapia, A., Pérez-Linares, J., & Alonso-Rodríguez, R. (2002). Marine Biotoxins and harmful algal blooms in Mexico's Pacific littoral. En *Harmful algal blooms in the PICES region of the North Pacific*. <http://hdl.handle.net/1834/19125>
- Palacios Hernández, E. (2001). *Circulación de la Región Norte del Golfo de California: Estacional y anomalías*. [Tesis de doctorado, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. Repositorio Institucional <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/2286>
- Palacios-Hernández, E., Beier, E., Lavín, M. F., & Ripa, P. (2002). The Effect of the Seasonal Variation of Stratification on the Circulation of the Northern Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography*, 32(3), 705–728. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2002\)032<0705:TEOTSV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2002)032<0705:TEOTSV>2.0.CO;2)
- Palacios-Salgado, D. S., Burnes-Romo, L. A., Tavera, J. J., & Ramírez-Valdez, A. (2012). Endemic Fishes of the Cortez Biogeographic Province (Eastern Pacific Ocean). *Acta Ichthyologica Et Piscatoria*, 42(3), 153–164. <https://doi.org/10.3750/AIP2011.42.3.01>

- Parés-Sierra, A., Mascarenhas, A., Marinone, S. G., & Castro, R. (2003). Temporal and spatial variation of the surface winds in the Gulf of California: wind at the gulf of california. *Geophysical Research Letters*, 30(6). <https://doi.org/10.1029/2002GL016716>
- Penven, P., Marchesiello, P., Debreu, L., & Lefevre, J. (2008). Software tools for pre-and post-processing of oceanic regional simulations. *Environmental Modelling & Software*, 23(5). <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2007.07.004>
- Peña-Manjarrez, J. L., Flores-Trujillo, J. G., & Helenes-Escamilla, J. (2016). Quistes de dinoflagelados de pared orgánica en las costas de México. En E. García-Mendoza, S. I. Quijano-Scheggi, A. Olivos-Ortiz, & E. Nuñez-Vázquez (Eds.), *Florecimientos Algaes Nocivos en México*. (pp. 108-123). CICESE.
- Pérez Brunius, P., & Aguirre Macedo, M. L. (2020). *Escenarios oceánicos y atmosféricos de un derrame de petróleo en aguas profundas del golfo de México: TOMO I*. CICESE.
- Pettersson, L. H., & Pozdnyakov, D. (2013). *Monitoring of Harmful Algal Blooms*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-68209-7>
- Pinto, L., Mateus, M., & Silva, A. (2016). Modeling the transport pathways of harmful algal blooms in the Iberian coast. *Harmful Algae*, 53, 8–16. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2015.12.001>
- PROFEPA. (2019, octubre 21). *La Importancia del Alto Golfo*. [Gobierno de México]. <https://www.gob.mx/profepa/articulos/la-importancia-del-alto-golfo?idiom=es#:~:text=El%20Alto%20Golfo%20de%20California%20es%20una%20de%20las%20zonas,Santa%20Clara%20y%20San%20Felipe>.
- R Core Team. (2023). *R: A language and environment for statistical computing*. [Software]. <http://www.R-project.org/>
- Ramírez, A. M. (2020). *Comunidad fitoplanctónica y presencia de *Gymnodinium catenatum* con relación a la temperatura en la Bahía de San Felipe, Baja California, México* [Tesis de licenciatura, Universidad de Colima].
- Richards, J. A. (2022). *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-82327-6>
- Sakuno, Y., Maeda, A., Mori, A., Ono, S., & Ito, A. (2019). A Simple Red Tide Monitoring Method using Sentinel-2 Data for Sustainable Management of Brackish Lake Koyama-ike, Japan. *Water*, 11(5), 1044. <https://doi.org/10.3390/w11051044>
- Sellner, K. G., Doucette, G. J., & Kirkpatrick, G. J. (2003). Harmful algal blooms: Causes, impacts and detection. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 30(7), 383–406. <https://doi.org/10.1007/s10295-003-0074-9>
- Shen, L., Xu, H., & Guo, X. (2012). Satellite Remote Sensing of Harmful Algal Blooms (HABs) and a Potential Synthesized Framework. *Sensors*, 12(6), 7778–7803. <https://doi.org/10.3390/s120607778>
- Simonsen, M., Albretsen, J., Saetra, Ø., Asplin, L., Lind, O. C., & Teien, H.-C. (2023). High resolution modeling of aluminium transport in a fjord estuary with focus on mean circulation and irregular flow events. *Science of The Total Environment*, 867, 161399. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161399>

- Smayda, T. J. (2002). Turbulence, watermass stratification and harmful algal blooms: An alternative view and frontal zones as “pelagic seed banks”. *Harmful Algae*, 1(1), 95–112. [https://doi.org/10.1016/S1568-9883\(02\)00010-0](https://doi.org/10.1016/S1568-9883(02)00010-0)
- Smayda, T. J., & Reynolds, C. S. (2001). Community Assembly in Marine Phytoplankton: Application of Recent Models to Harmful Dinoflagellate Blooms. *Journal of Plankton Research*, 23(5), 447–461. <https://doi.org/10.1093/plankt/23.5.447>
- Soulsby, R. (1997). *Dynamics of marine sands*. T. Telford.
- Stephen Pierce (2023). Barnes objective analysis, MATLAB Central File Exchange. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/28666-barnes-objective-analysis>
- Stock, C. A., McGillicuddy, D. J., Solow, A. R., & Anderson, D. M. (2005). Evaluating hypotheses for the initiation and development of Alexandrium fundyense blooms in the western Gulf of Maine using a coupled physical–biological model. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 52(19–21), 2715–2744. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2005.06.022>
- Stumpf, R. P. (2015). *Harmful Algal Bloom Prediction to Benefit Public Health and Coastal Economies*. NOAA. <https://aambpublicoceanservice.blob.core.windows.net/oceanserviceprod/GLIMO/outreach/redtide3.pdf>
- Sullivan, J. M., & Swift, E. (2003). Effects of small-scale turbulence on net growth rate and size of ten species of marine dinoflagellates <sup>1</sup>. *Journal of Phycology*, 39(1), 83–94. <https://doi.org/10.1046/j.1529-8817.2003.02094.x>
- Sundby, S. (1983). A one-dimensional model for the vertical distribution of pelagic fish eggs in the mixed layer. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 30(6), 645–661. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(83\)90042-0](https://doi.org/10.1016/0198-0149(83)90042-0)
- Taboada, S., Whiting, C., Wang, S., Ríos, P., Davies, A. J., Mienis, F., Kenchington, E., Cárdenas, P., Cranston, A., Koutsouveli, V., Cristobo, J., Rapp, H. T., Drewery, J., Baldó, F., Morrow, C., Picton, B., Xavier, J. R., Arias, M. B., Leiva, C., & Riesgo, A. (2023). Long distance dispersal and oceanographic fronts shape the connectivity of the keystone sponge *Phakellia ventilabrum* in the deep northeast Atlantic. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1177106. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1177106>
- Thomson, R. E., & Emery, W. J. (2014). *Data analysis methods in physical oceanography*. Newnes. <https://www.sciencedirect.com/book/9780123877826/data-analysis-methods-in-physical-oceanography>
- Ticse De la Torre, K. E. (2021). *Efecto del Río Colorado sobre la hidrografía del norte del Golfo de California – Un estudio numérico* [Maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/3599>
- Tomlinson, M. C., Wynne, T. T., & Stumpf, R. P. (2009). An evaluation of remote sensing techniques for enhanced detection of the toxic dinoflagellate, *Karenia brevis*. *Remote Sensing of Environment*, 113(3), 598–609. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.11.003>
- Van Rossum, G. (1995). *Python tutorial, Technical Report CS-R9526* [Software]. Centrum voor Wiskunde e Informatica (CWI).

- Velo-Suárez, L., Reguera, B., González-Gil, S., Lunven, M., Lazure, P., Nézan, E., & Gentien, P. (2010). Application of a 3D Lagrangian model to explain the decline of a *Dinophysis acuminata* bloom in the Bay of Biscay. *Journal of Marine Systems*, 83(3–4), 242–252. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2010.05.011>
- Wilkinson, T., Wiken, E., Bezaury Creel, J., Hourigan, T., Agardy, T., Herrmann, H., Janishevski, L., Madden, C., Morgan, L., & Padilla, M. (2009). *Ecorregiones marinas de América del Norte*. Comisión para la Cooperación Ambiental. <http://www.cec.org/files/documents/publications/3256-marine-ecoregions-north-america-es.pdf>
- William, R. (2023). *psych: Procedures for Psychological, Psychometric, and Personality Research*. (R package version 2.3.9) [Software]. Northwestern University. <https://CRAN.R-project.org/package=psych>
- Wynne, T. T., Stumpf, R. P., Tomlinson, M. C., Schwab, D. J., Watabayashi, G. Y., & Christensen, J. D. (2011). Estimating cyanobacterial bloom transport by coupling remotely sensed imagery and a hydrodynamic model. *Ecological Applications*, 21(7), 2709–2721. <https://doi.org/10.1890/10-1454.1>
- Yñiguez, A. T., Maister, J., Villanoy, C. L., Deauna, J. D., Peñaflores, E., Almo, A., David, L. T., Benico, G. A., Hibay, E., Mora, I., Arcamo, S., Relox, J., & Azanza, R. V. (2018). Insights into the dynamics of harmful algal blooms in a tropical estuary through an integrated hydrodynamic-Pyrodinium-shellfish model. *Harmful Algae*, 80, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2018.08.010>

## Anexos

La clase señalada en color beige corresponde a la clase MODIS, las clases señaladas en gris son las otras clases usadas para caracterizar el norte del golfo de california.

**Tabla 1** Matriz de confusión para la clasificación del 17 de enero de 2015 con datos del MODIS.

Clase	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	21	0	0	1	2	0	0	0	0	0	27	0	0
2	0	1040	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	2	23	0	0	4	0	0	33	0	0	18	0
4	0	0	0	1948	778	0	0	0	0	0	10	0	0
5	0	0	0	851	6967	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	46	389	0	0	0	0	0	2	0
7	0	0	0	4	0	1	63	0	0	0	16	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	22	52	38	0	0	0
9	0	18	0	0	0	0	0	0	972	40	21	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2318	2824	9	0
11	0	0	0	8	10	0	0	0	0	424	4893	46	0
12	1	0	0	0	4	0	0	0	0	0	15	311	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	8	59

Las clases señaladas en beige corresponden con la clase 1, 2 y 3 de Sentinel-3 respectivamente, las clases señaladas en gris son el resto de las clases generadas para caracterizar el norte del golfo de California. Las clases asociadas con el FAN fueron clasificadas como alguna de las clases FAN, sin embargo, el error en algunas de estas clases es que algunos píxeles fueron asignados a otras clases asociadas al FAN, lo cual indica cercanía entre las clases.

**Tabla 2** Matriz de confusión de la clasificación del día 18 de enero de 2017 con datos del Sentinel-3.

Clases	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	146	29	0	0	9	92	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	23	133	7	0	3	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0
3	0	30	253	0	0	2	1	3	0	0	0	8	0	0	0
4	0	0	0	41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	1	558	16	0	0	0	7	0	0	0	0	0
6	5	4	0	0	365	769	6	0	32	46	0	7	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	1595	718	15	0	0	0	0	42	13
8	0	0	0	0	0	0	914	3996	31	0	0	0	0	23	3
9	0	0	1	0	0	122	10	20	538	12	0	4	0	26	29
10	0	0	0	0	2	0	0	0	3	824	1	1	0	0	1
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	38	0	0	0	0
12	0	0	0	0	2	10	1	0	2	49	0	949	4	8	9
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2155	1707	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	379	2749	29
15	0	0	0	0	0	3	10	7	30	3	0	64	0	168	537

**Tabla 3** Lista de detecciones en las fechas de monitoreo semanal.

Fecha	Abundancia absoluta	Abundancia relativa	Detección con Sentinel-3
13/01/2018	3830	12.73	5.47 km NE
20/01/2018	2444	9.98	8.44 km
24/02/2018	2100	18.58	5-6 km NE
02/03/2018	794	5.69	No detectado
24/03/2018	788	9.26	15 km S
23/11/2018	2000	14.70	No detectado
02/12/2018	786	5.42	5 km S
09/12/2018	1107	8.47	No detectado
23/12/2018	6184	19.30	8-15 km S
06/01/2019	1714	5.91	13-15 km SE
14/03/2019	1717	9.20	9.06 km E
31/12/2020	4643	12.77	15 km S, P.E.
08/01/2021	3887	18.37	1 km E
29/01/2021	6184	18.96	15 km S, PE
26/02/2021	643	5.61	13 km SE
06/03/2021	1321	20.67	No detectado
13/12/2021	974	10.21	No detectado
21/01/2022	2000	9.96	15 km SE
10/02/2022	1667	6.83	2.8 km S
25/02/2022	1071	8.45	5 km S, P.E.