

## 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	Ánalisis 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	
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, TPXO7, Observaciones y TPXO9.....	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	
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