CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS DEL NOROESTE, S.C.

Programa de Estudios de Posgrado

PROCESOS OCEANOGRÁFICOS DE MESOESCALA Y SU ASOCIACIÓN CON LA DISTRIBUCIÓN Y DISPONIBILIDAD A LA PESCA DE LA SARDINA MONTERREY *Sardinops sagax* (Girard, 1856) EN EL GOLFO DE CALIFORNIA.

T E S I S

Que para obtener el grado de

Doctor en Ciencias

Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales
(Orientación en Biología Marina)

P r e s e n t a

Edgardo Basilio Farach Espinoza

Guaymas, Sonora, diciembre de 2022.

ACTA DE LIBERACIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B. C. S., siendo las 11:45 horas del día 28 del Mes de Noviembre del 2022, se procedió por los abajo firmantes, miembros de la Comisión Revisora de Tesis avalada por la Dirección de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., a liberar la Tesis de Grado titulada:

"Procesos oceanográficos de mesoescala y su asociación con la distribución y disponibilidad a la pesca de la sardina monterrey *Sardinops sagax* (Girard, 1856) en el Golfo de California"

Presentada por el alumno:

Edgardo Basilio Farach Espinoza

Aspirante al Grado de DOCTOR EN CIENCIAS EN EL USO, MANEJO Y PRESERVACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES CON ORIENTACIÓN EN **Biología Marina**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron su **APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Dra. Juana López Martínez
Co-Directora de Tesis

Dr. Ricardo García Morales
Co-Director de Tesis

Dr. Manuel Otilio Nevárez Martínez
Co-Tutor de Tesis

Dra. Sofía Ortega García
Co-Tutora de Tesis

Dr. Daniel Bernardo Lluch Cota
Co-Tutor de Tesis

Dra. Gracia Alicia Gómez Anduro,
Directora de Estudios de Posgrado y
Formación de Recursos Humanos

La Paz, Baja California Sur, a 25 de noviembre de 2022.

Los miembros del comité de tesis del estudiante Edgardo Basilio Farach Espinoza del Programa de Doctorado en Uso, Manejo Y Preservación de los Recursos Naturales, revisamos el contenido de la tesis y otorgamos el Vo.Bo. dado que la tesis no representa un plagio de otro documento como lo muestra el reporte de similitud realizado:

- Herramienta antiplagio: **iThenticate**
- Filtros utilizados: **Bibliografía y referencias excluidas**
- Porcentajes de similitud: **17%**

INFORME DE ORIGINALIDAD

17%
ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	www.repositoriodigital.ipn.mx Internet	456 palabras — 2%
2	tesis.ipn.mx Internet	405 palabras — 1%
3	cicese.repositorioinstitucional.mx Internet	379 palabras — 1%
4	docplayer.es Internet	352 palabras — 1%
5	hdl.handle.net Internet	280 palabras — 1%
6	cibnor.repositorioinstitucional.mx Internet	216 palabras — 1%
7	www.inapesca.gob.mx Internet	210 palabras — 1%
8	repositoriodigital.ipn.mx Internet	153 palabras — 1%

Firmas del comité

Dra. Juana López Martínez Dr. Ricardo García Morales Dr. Manuel Otilio Nevárez Martínez

Dra. Sofía Ortega García Dr. Daniel Bernardo Lluch Cota

Conformación de Comités

Comité Tutorial

Dra. Juana López Martínez
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. Unidad Guaymas
Co-Directora de Tesis

Dr. Ricardo García Morales
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. Unidad Nayarit
Co-Director de Tesis

Dr. Manuel Otilio Nevárez Martínez
Centro Regional de Investigación Acuícola y Pesquera de Guaymas
Co-Tutor de Tesis

Dra. Sofía Ortega García
Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas del Instituto Politécnico Nacional
Co-Tutora de Tesis

Dr. Daniel Bernardo Lluch Cota
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.
Co-Tutor de Tesis

Comité Revisor de Tesis

Dra. Juana López Martínez
Dr. Ricardo García Morales
Dr. Manuel Otilio Nevárez Martínez
Dra. Sofía Ortega García
Dr. Daniel Bernardo Lluch Cota

Jurado de Examen

Dra. Juana López Martínez
Dr. Ricardo García Morales
Dr. Manuel Otilio Nevárez Martínez
Dra. Sofía Ortega García
Dr. Daniel Bernardo Lluch Cota

Suplentes

Dr. Eduardo Francisco Balart Páez
Dr. Hugo Herrera Cervantes

Resumen

El Golfo de California (GC) es un ecosistema productivo que alberga especies de importancia comercial como los pelágicos menores, destacando la sardina monterrey *Sardinops sagax* por volumen de captura. La variabilidad en la abundancia y disponibilidad a la pesca de la sardina monterrey en el GC se ha asociado con variables ambientales como la temperatura superficial del mar (TSM), el índice de surgencia costera y la concentración de clorofila *a* (Chl *a*) como indicador de disponibilidad de alimento. Sin embargo, procesos oceanográficos de mesoescala (POM) como los remolinos ciclónicos y anticiclónicos, surgencias costeras, filamentos y frentes por intrusión de masa de agua tropical superficial, son importantes mecanismos de retención o dispersión de huevos y larvas, con efectos en el reclutamiento de organismos como la sardina monterrey. Estos efectos podrían reflejarse tiempo después en la abundancia y disponibilidad a la pesca del recurso. Por lo tanto, en este estudio por medio de la detección de frentes en imágenes satelitales de TSM y de concentración de Chl *a* se identificó la presencia, la cantidad y duración de los POM en el GC durante 1998–2019. Se evaluó la variabilidad estacional por medio de análisis de agrupamientos y la variabilidad interanual por medio de anomalías estandarizadas. Además, se aplicó análisis de componentes principales para estimar la relación entre la variación interanual de los POM, con el Índice Multivariado de El Niño (MEI) y la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO). Se asociaron los POM con las capturas de sardina monterrey como proxy de la abundancia relativa, primero, definiendo el periodo reproductivo y de reclutamiento (PRR) con base a información sobre la biología y pesquería de la especie. Posteriormente, se delimitó espacialmente el análisis de los POM con base a la zona principal de desove de la sardina. La relación entre las variables se estimó por medio de modelos aditivos generalizados y se utilizó el criterio de información de Akaike para seleccionar el mejor modelo. Se encontró estacionalidad de los POM identificados en la región norte, centro y sur del GC, que está asociada a los agentes forzantes como el océano Pacífico y régimen de vientos; sin embargo, en la región sur del golfo, ambos tipos de remolinos no presentaron una clara estacionalidad, por la compleja interacción de masas de agua que ocurre la mayor parte del año en el área. Las surgencias costeras, filamentos y los remolinos anticiclónicos del norte y del centro se vieron inhibidos por eventos fuertes de El Niño y PDO positivo, mientras que, se presentó incremento en la presencia de intrusión de masa de agua tropical superficial. Todos los procesos estuvieron presentes durante la temporada de reproducción y reclutamiento de la especie. Una duración intermedia (~25-40 días) de los remolinos contribuyó a capturas anómalamente altas, mientras que una menor o mayor duración que este rango, contribuyó a capturas anómalamente bajas. Por otro lado, el incremento (disminución) del número de surgencias costeras y la disminución (incremento) de la presencia de intrusión de masa de agua, contribuyeron a altas (bajas) capturas promedio. Caracterizar los POM y evaluar su variabilidad en el GC, son importantes para entender mejor la ecología de la región y contribuye en valorar los efectos ambientales sobre los recursos marinos.

Palabras clave: Procesos de mesoescala, Imágenes satelitales, Detección de frentes, *Sardinops sagax*, Modelos aditivos generalizados.

ORCID: 0000-0002-4376-5666

Vo.Bo. Co-Directores de Tesis

Dra. Juana López Martínez

Dr. Ricardo García Morales

Summary

The Gulf of California (GC) is a productive ecosystem where commercially important species such as small forage fish inhabit, in which the Pacific sardine *Sardinops sagax* stands out for its volumes of catch. The variability in abundance and availability to fishing of the Pacific sardine in the GC has been associated with environmental variables such as sea surface temperature (SST), the coastal upwelling index and chlorophyll *a* (Chl *a*) as an indicator of food availability. However, mesoscale oceanographic processes (MOP) such as cyclonic and anticyclonic eddies, coastal upwelling, filaments and fronts due to intrusion of tropical surface water, are important mechanisms for the retention or dispersal of eggs and larvae, with effects on the recruitment of organisms such as the Pacific sardine. These effects could be reflected later in the abundance and availability to fishing of this resource. Therefore, in this study, front detection in SST and Chl *a* satellite images was applied to identify the presence, frequency and duration of MOP in the CG during 1998–2019. Seasonal variability was evaluated through cluster analysis and interannual variability through standardized anomalies. In addition, principal component analysis was applied to estimate the relationship between the interannual variation of the MOPs, with the Multivariate El Niño Index (MEI) and the Pacific Decadal Oscillation (PDO). MOPs were associated with the Pacific sardine catches as a proxy of relative abundance, first, by defining the reproduction and recruitment period (RRP) based on biological and fishery information of the species. Then, the spatial analysis of the MOPs was delimited based on the main spawning area of the sardine. The relationship between the variables was then estimated by means of generalized additive models, and the Akaike information criterion was applied to select the best model. Seasonality was identified in the MOPs from the northern, central and southern regions of the GC, which was associated to forcing agents such as the Pacific Ocean and the wind regime. In contrast, in the southern region of the GC, none of both types of eddies presented a clear seasonality, due to the complex interaction of water masses that occurs most of the year in the area. Coastal upwelling, filaments, and anticyclonic eddies identified in the northern and central GC were diminished by strong El Niño events and positive PDO, while there was an increase in the presence of water mass intrusion. All processes were present during the spawning and recruitment season of the species. Intermediate duration (~25-40 days) of eddies contributed to anomalously high catches, while durations shorter or longer than this range contributed to anomalously low catches. On the other hand, the increase (decrease) in the frequency of coastal upwelling and decrease (increase) in the presence of water mass intrusion, contributed to high (low) average catches. Characterizing the MOPs and evaluating their variability in the GC are important to better understand the ecology of the region and contributes to the assessment of the environmental effects on marine resources.

Keywords: Mesoscale processes, Satellite images, Front detection, *Sardinops sagax*, Generalized additive models.

ORCID: 0000-0002-4376-5666

Vo.Bo. Co-Directores de Tesis

Dra. Juana López Martínez

Dr. Ricardo García Morales

Dedicatoria

A mi esposa Estefani, por su amor y apoyo incondicional en todo momento.

A mis padres por siempre motivarme y apoyarme a salir adelante.

Agradecimientos

Al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C. por ser la institución receptora de mis estudios de posgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo otorgado a través de la beca doctoral No. 451695.

Al proyecto de investigación SEMARNAT-2018-13-S-77965 por el cual fue posible realizar este trabajo de investigación.

A mi Co-Directora de Tesis, Dra. Juana López Martínez por su apoyo y guía en todo este proceso. Gracias por la motivación constante y siempre compartir su conocimiento y consejos. Gracias por su paciencia y por su tiempo dedicado para mi formación.

A mi Co-Director de Tesis, Dr. Ricardo García Morales, gracias por siempre motivarme y apoyarme. Por compartir su experiencia y conocimiento. Gracias por los consejos y tener siempre el entusiasmo de enseñar durante todo este proceso.

Al Comité Tutorial, Dr. Manuel Otilio Nevárez Martínez por la información brindada, por todo el apoyo y sus atinadas observaciones que permitieron mejorar el trabajo de investigación. Dra. Sofía Ortega García, por sus acertados y valiosos comentarios y el tiempo dedicado para mejorar este trabajo. Dr. Daniel Bernardo Lluch Cota, por su tiempo, sus comentarios y observaciones que mejoraron este trabajo de investigación.

A la Dirección de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos por el apoyo brindado. A la Dra. Gracia Gómez Anduro, a la Lic. Osvelia Ibarra, Tania Verónica Núñez, a la Lic. Leticia González y la Lic. Raquel Herrera por la orientación, su amabilidad y apoyo para cumplir con los procedimientos académicos y administrativos. A la Lic. Ana María Talamantes por su ayuda en la edición de este documento.

A mis amigos y compañeros por el apoyo desde el inicio, por los momentos de aprendizaje y también de diversión.

Contenido

Resumen i
Summary ii
Dedicatoria iii
Agradecimientos iv
Contenido v
Lista de figuras vii
Lista de tablas xi
1. INTRODUCCIÓN 1
2. ANTECEDENTES 3
2.1 Eventos oceanográficos de mesoescala 3
2.2 Biología de la sardina monterrey *Sardinops sagax* 6
2.3 Efectos potenciales de los procesos oceanográficos de mesoescala en organismos pelágicos 7
2.4 Efecto de procesos de mesoescala en la distribución y abundancia de poblaciones de peces pelágicos 9
2.5 Variabilidad oceanográfica del Golfo de California 10
2.6 Eventos oceanográficos de mesoescala en regiones del Golfo de California 11
2.7 Efectos de procesos oceanográficos de mesoescala en especies de peces pelágicos en el Golfo de California 13
2.8 Influencia procesos de mesoescala en peces pelágicos menores en el Golfo de California 14
3. JUSTIFICACIÓN 17
4. HIPÓTESIS 18
5. OBJETIVOS 19
5.1 Objetivo general 19
5.2 Objetivos particulares 19
6. MATERIAL Y MÉTODOS 20
6.1 Área de estudio 20
6.2 Dinámica de procesos oceanográficos de mesoescala 21
6.3 Eventos oceanográficos de mesoescala e índices climáticos 27
6.4 Eventos oceanográficos de mesoescala y su relación con capturas de sardina monterrey 27
6.5 Análisis de capturas georreferenciadas 31
7. RESULTADOS 33
7.1 Análisis de los procesos oceanográficos de mesoescala (1998–2019) en el Golfo de California 33
7.2 Análisis de la variabilidad interanual de los procesos oceanográficos de mesoescala (1998–2019) en el Golfo de California e índices climáticos (MEI y PDOI) 55
7.3 Asociación de la frecuencia y duración de procesos oceanográficos de mesoescala con las capturas de sardina monterrey 60
8. DISCUSIÓN 81
9. CONCLUSIONES 93
10. LITERATURA CITADA 95
11. ANEXOS 112
Anexo A. Artículo Publicado.-Farach-Espinoza, E. B., López-Martínez, J., García-Morales, R., Nevárez-Martínez, M. O., Lluch-Cota, D. B. y Ortega-García, S. (2021). Temporal variability of

oceanic mesoscale events in the Gulf of California. *Remote Sensing*, 13(9): 1774. doi: 10.3390/rs13091774. 112
Anexo B. Artículo Publicado.-Farach-Espinoza, E. B., López-Martínez, J., García-Morales, R., Nevárez-Martínez, M. O., Ortega-García, S. y Lluch-Cota, D. B. (2022). Coupling oceanic mesoscale events with catches of the Pacific sardine (*Sardinops sagax*) in the Gulf of California. *Progress in Oceanography*, 206: 102858. doi: 10.1016/j.pocean.2022.102858. .. 112

Lista de figuras

Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio Golfo de California, México. División del área en tres subregiones, norte (NGC), centro (CGC) y sur (SGC). 21
Figura 2. Esquema de la identificación visual y detección de remolinos en imágenes de clorofila a por medio del uso de la subrutina Single Image Edge Detection (SIED) del programa WIMSoft®. 23
Figura 3. Esquema de la identificación visual y detección de surgencias costeras en imágenes de TSM por medio del uso de la subrutina Single Image Edge Detection (SIED) del programa WIMSoft®. 24
Figura 4. Esquema de la identificación visual y detección de filamentos en imágenes de TSM por medio del uso de la subrutina Single Image Edge Detection (SIED) del programa WIMSoft®. 25
Figura 5. Esquema de la identificación visual y detección de intrusión de masa de agua tropical superficial en imágenes de TSM por medio de la detección de la isoterma de 25 °C en el programa WIMSoft® y por medio de la isopicna < 34.6 g kg-1 en imágenes de salinidad superficial del mar de Copernicus Marine Service. 25
Figura 6. Relación entre la duración promedio de remolinos ciclónicos (A), de remolinos anticiclónicos (B), frecuencia de surgencias costeras (C), duración promedio de filamentos (D) y presencia de intrusión de masa de agua tropical superficial (E) con las capturas reportadas durante las temporadas 1999/2000–2015/2016 en el Golfo de California. 30
Figura 7. Imágenes satelitales de clorofila a (mg m-3), mostrando un año típico con la presencia de procesos de mesoescala en el norte del Golfo de California. (A) remolinos anticiclónicos, (C) remolinos ciclónicos, (S) surgencias costeras, (F) filamentos. 34
Figura 8. Comportamiento anual (panel izquierdo) y análisis de agrupamientos (panel derecho) del número de días con presencia de procesos oceanográficos de mesoescala en el norte del Golfo de California. 36
Figura 9. Comportamiento interanual del número de días con presencia de procesos oceanográficos de mesoescala en el norte del Golfo de California. La línea punteada indica la tendencia con promedio móvil de 12 meses. 37
Figura 10. Anomalías estandarizadas del número de días con la presencia, frecuencia y duración promedio de los procesos de mesoescala identificados en la región norte del Golfo de California durante 1998–2019. Valores inferiores o superiores a la línea punteada roja representan las anomalías estandarizadas a un 95% de nivel de confianza ($p < 0.05$). 38
Figura 11. Imágenes satelitales de clorofila a (mg m-3), mostrando un año típico con la presencia de procesos de mesoescala en el centro del Golfo de California. (A) remolinos anticiclónicos, (C) remolinos ciclónicos, (S) surgencias costeras, (F) filamentos, (I) intrusión masa de agua. 40
Figura 12. Comportamiento anual (panel izquierdo) y análisis de agrupamientos (panel derecho) del número de días con presencia de procesos oceanográficos de mesoescala en el centro del Golfo de California. 42
Figura 13. Comportamiento interanual del número de días con presencia de procesos oceanográficos de mesoescala en el centro del Golfo de California. La línea punteada indica la tendencia con promedio móvil de 12 meses. 43
Figura 14. Anomalías estandarizadas del número de días con presencia, frecuencia y duración promedio de los procesos de mesoescala identificados en la región centro del Golfo de

California durante 1998–2019. Valores inferiores o superiores a la línea punteada roja representan las anomalías estandarizadas a un 95% de nivel de confianza (p < 0.05). 45
Figura 15. Periodograma (panel izquierdo) y autocorrelación (panel derecho) de la serie de surgencias costeras y de la intrusión de la masa de agua tropical superficial en la región centro del Golfo de California. 46
Figura 16. Imágenes satelitales de clorofila a (mg m-3), mostrando un año típico con la presencia de procesos de mesoescala en el sur del Golfo de California. (A) remolinos anticiclónicos, (C) remolinos ciclónicos, (S) surgencias costeras, (F) filamentos, (I) intrusión masa de agua. 49
Figura 17. Comportamiento anual (panel izquierdo) y análisis de agrupamientos (panel derecho) del número de días con presencia de procesos oceanográficos de mesoescala en el sur del Golfo de California. 51
Figura 18. Comportamiento interanual del número de días con la presencia de procesos oceanográficos de mesoescala en el sur del Golfo de California. La línea punteada indica la tendencia con promedio móvil de 12 meses. 52
Figura 19. Anomalías estandarizadas del número de días con la presencia, frecuencia y duración promedio de los procesos de mesoescala identificados en la región sur del Golfo de California durante 1998–2019. Valores inferiores o superiores a la línea punteada roja representan las anomalías estandarizadas a un 95% de nivel de confianza (p < 0.05). 53
Figura 20. Índice Multivariado de El Niño (MEI), Índice de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDOI) y la variabilidad interanual en el norte del Golfo de California del número de días con la presencia de: (A) remolinos anticiclónicos y surgencias, (B) remolinos ciclónicos y filamentos. (C) contribución de los procesos oceanográficos de mesoescala y de los índices MEI y PDO a los primeros dos componentes (Dim1, Dim2) del análisis de componentes principales. (D) contribución de cada año (1998–2019) a los dos primeros componentes del análisis de componentes principales. 56
Figura 21. Índice Multivariado de El Niño (MEI), Índice de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDOI) y la variabilidad interanual en el centro del Golfo de California del número de días con la presencia de: (A) remolinos anticiclónicos y surgencias, (B) remolinos ciclónicos y filamentos. (C) contribución de los procesos oceanográficos de mesoescala y de los índices MEI y PDO a los primeros dos componentes (Dim1, Dim2) del análisis de componentes principales. (D) contribución de cada año (1998–2019) a los dos primeros componentes del análisis de componentes principales. 57
Figura 22. Índice Multivariado de El Niño (MEI), Índice de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDOI) y la variabilidad interanual en el sur del Golfo de California del número de días con la presencia de: (A) remolinos anticiclónicos y surgencias, (B) remolinos ciclónicos y filamentos. (C) contribución de los procesos oceanográficos de mesoescala y de los índices MEI y PDO a los primeros dos componentes (Dim1, Dim2) del análisis de componentes principales. (D) contribución de cada año (1998–2019) a los dos primeros componentes del análisis de componentes principales. 59
Figura 23. Capturas históricas de pelágicos menores en el Golfo de California. Datos proporcionados por el Centro Regional de Investigación Acuícola y Pesquera de Guaymas, Sonora. 60
Figura 24. Zonas tradicionales de pesca (números romanos) de las embarcaciones cerqueras de pelágicos menores en el Golfo de California. Adaptado de Nevárez-Martínez et al. (2001). 61

Figura 25. Correlación cruzada de la serie anual del número de días con la presencia de remolinos ciclónicos en el CGC y SGC con las capturas de sardina monterrey Sardinops sagax en el Golfo de California durante las temporadas 1999/2000 – 2016/2017. 62
Figura 26. Acoplamiento temporal de la presencia de los procesos oceanográficos de mesoescala registrados durante el periodo de reproducción-reclutamiento (noviembre–mayo) y las correspondientes temporadas de pesca de sardina monterrey Sardinops sagax. 63
Figura 27. Gráficas de efectos parciales de los modelos aditivos generalizados ajustados a la captura (log t) de sardina monterrey Sardinops sagax en el Golfo de California, durante las temporadas de pesca 1999/2000 – 2016/2017 (panel izquierdo); durante las temporadas de pesca con diferencia estadísticamente significativa a la captura media (panel central) y sin diferencia estadísticamente significativa a la captura media (panel derecho). Valores en el eje-y secundario indican los grados de libertad efectivos, relacionados al término de suavizado..... 65
Figura 28. Captura observada (línea negra); captura estimada (círculos); captura anómala estimada (triángulos); captura promedio estimada (cruces) de sardina monterrey Sardinops sagax durante las temporadas de pesca 1999/2000 – 2016/2017 en el Golfo de California. Líneas punteadas representan los intervalos de confianza de la captura media. Las capturas pronosticadas por los modelos aditivos generalizados aplicados a toda la serie temporal (círculos rojos), a las capturas promedio (cruces rojas), y a las anómalas (triángulos rojos)..... 66
Figura 29. Valores promedio de concentración de clorofila a y de temperatura superficial del mar de los procesos oceanográficos de mesoescala en función de su duración, frecuencia y persistencia en el Golfo de California. 69
Figura 30. Distribución bimensual de lances efectivos (%) y captura (t) de sardina monterrey Sardinops sagax dentro y fuera de las zonas tradicionales de pesca en el Golfo de California durante la temporada 2002–2003, sobrepuesta en imágenes de promedio bimensual de clorofila a superficial. Los valores de lances efectivos y de captura representan una fracción de la flota cerquera de pelágicos menores..... 70
Figura 31. Distribución bimensual de lances efectivos (%) y captura (t) de sardina monterrey Sardinops sagax dentro y fuera de las zonas tradicionales de pesca en el Golfo de California durante la temporada 2003–2004, sobrepuesta en imágenes de promedio bimensual de clorofila a superficial. Los valores de lances efectivos y de captura representan una fracción de la flota cerquera de pelágicos menores..... 71
Figura 32. Distribución bimensual de lances efectivos (%) y captura (t) de sardina monterrey Sardinops sagax dentro y fuera de las zonas tradicionales de pesca en el Golfo de California durante las temporadas 2012–2013 y 2013–2014, sobrepuesta en imágenes de promedio bimensual de clorofila a superficial. Los valores de lances efectivos y de captura representan una fracción de la flota cerquera de pelágicos menores. 72
Figura 33. Distribución bimensual de lances efectivos (%) y captura (t) de sardina monterrey Sardinops sagax dentro y fuera de las zonas tradicionales de pesca en el Golfo de California durante la temporada 2017–2018, sobrepuesta en imágenes de promedio bimensual de clorofila a superficial. Los valores de lances efectivos y de captura representan una fracción de la flota cerquera de pelágicos menores..... 73
Figura 34. Distribución bimensual de lances efectivos (%) y captura (t) de sardina monterrey Sardinops sagax dentro y fuera de las zonas tradicionales de pesca en el Golfo de California durante la temporada 2018–2019, sobrepuesta en imágenes de promedio bimensual de clorofila *a* superficial. Los valores de lances efectivos y de captura representan una fracción de la flota cerquera de pelágicos menores. 74

Figura 35. Proporción de lances efectivos, promedio de lances efectivos, proporción de captura y captura promedio de sardina monterrey Sardinops sagax de una fracción de la flota cerquera de pelágicos menores en el Golfo de California durante las temporadas de pesca 2002–2003, 2003–2004, 2012–2013, 2013–2014, 2017–2018 y 2018–2019. 76
Figura 36. Centros de gravedad longitudinales y latitudinales de los lances efectivos y de las capturas bimensuales de sardina monterrey Sardinops sagax de una fracción de la flota cerquera de pelágicos menores en el Golfo de California, durante las temporadas de pesca 2002–2003, 2003–2004, 2012–2013, 2013–2014, 2017–2018 y 2018–2019. 78

Lista de tablas

Tabla 1. Duración de cada etapa de la historia de vida de la sardina monterrey Sardinops sagax en el Golfo de California basado en estadios gnomónicos, adaptado de Martínez-Aguilar et al., (2005). 7
Tabla 2. Frecuencia, duración mínima, máxima y promedio de procesos oceanográficos de mesoescala en el norte del Golfo de California. 39
Tabla 3. Frecuencia, duración mínima, máxima y promedio de procesos oceanográficos de mesoescala en el centro del Golfo de California..... 48
Tabla 4. Frecuencia, duración mínima, máxima y promedio de procesos oceanográficos de mesoescala en el sur del Golfo de California. 54
Tabla 5. Variables asociadas ($p < 0.05$) dentro de los componentes principales 1 y 2 en el norte del Golfo de California..... 56
Tabla 6. Variables asociadas ($p < 0.05$) dentro de los componentes principales 1 y 2 en el centro del Golfo de California..... 58
Tabla 7. Variables asociadas ($p < 0.05$) dentro de los componentes principales 1 y 2 en el sur del Golfo de California..... 59
Tabla 8. Estadísticos de los Modelos Aditivos Generalizados tras aplicar análisis “selección hacia adelante”. 67
Tabla 9. Valores óptimos mínimos y máximos de temperatura superficial del mar y de clorofila a con mayor proporción de lances efectivos durante cada temporada de pesca. Temperatura y concentración de clorofila a media en surgencias costeras con presencia de lances efectivos bimensuales de sardina monterrey Sardinops sagax durante cada temporada de pesca. 79
Tabla 10. Valores óptimos mínimos y máximos de temperatura superficial del mar y de clorofila a con mayor proporción de lances efectivos de sardina monterrey Sardinops sagax, durante cada temporada de pesca. Temperatura y concentración de clorofila a media en remolino ciclónico con presencia de lances efectivos bimensuales durante cada temporada de pesca. ... 79
Tabla 11. Valores óptimos mínimos y máximos de temperatura superficial del mar y de clorofila a con mayor proporción de lances efectivos de sardina monterrey Sardinops sagax, durante cada temporada de pesca. Temperatura y concentración de clorofila a media en remolino anticiclónico con presencia de lances efectivos bimensuales durante cada temporada de pesca. 80
Tabla 12. Valores óptimos mínimos y máximos de temperatura superficial del mar y de clorofila a con mayor proporción de lances efectivos de sardina monterrey Sardinops sagax, durante cada temporada de pesca. Temperatura y concentración de clorofila a media en frente por intrusión de masa de agua y en filamentos con presencia de lances efectivos bimensuales durante cada temporada de pesca. 80

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos oceanográficos de mesoescala (POM) promueven procesos fisicoquímicos que contribuyen en la dinámica y estructura de ecosistemas marinos complejos que dan origen a zonas con alta productividad biológica. Por ejemplo, los sitios frontales producto de convergencia por intrusión de masas de agua, son zonas que pueden retener altas concentraciones de nutrientes y que eventualmente se convierten en áreas con alta productividad biológica. Estas regiones albergan una amplia diversidad de especies, importantes para la actividad pesquera en el planeta, que sirve de sustento para numerosas comunidades costeras. Sin embargo, dependiendo de su intensidad, temporalidad y frecuencia, los procesos de mesoescala también pueden ser mecanismos con efectos negativos en las poblaciones de especies marinas, afectando en la sobrevivencia de los primeros estadios del ciclo de vida de los organismos, con eventuales repercusiones en su reclutamiento.

Para facilitar el estudio de la variabilidad ambiental, y en este caso en particular la que ocurre en los océanos, los científicos han propuesto diversas escalas temporales y espaciales. Dentro de esas escalas está la que comprende a los procesos de mesoescala; espacialmente, éstos abarcan desde cientos de metros hasta unos centenares de kilómetros, y temporalmente pueden durar desde pocos días hasta varios meses, sus efectos se presentan a nivel local y regional. En el océano, estos procesos de mesoescala incluyen estructuras como los remolinos, la surgencia costera, los filamentos o jets, y los frentes provocados por convergencia de masas de agua, entre otros (Mann, 1992; Bakun, 1994; López-Martínez, 2008).

Los POM son importantes en la estructura de los ecosistemas, ya que pueden ser mecanismos de retención, transporte o dispersión de organismos que conforman el holoplancton y meroplancton (Apango-Figueroa *et al*., 2015). La variabilidad de estos procesos puede tener efectos en los patrones de distribución y abundancia de especies clave de importancia ecológica, que se traducen en cascada a otras poblaciones y finalmente genera un mosaico de respuestas diferentes en los ecosistemas. Entre las especies de mayor importancia se encuentran los peces pelágicos menores, los cuales son componentes clave en los ecosistemas costeros y pelágicos, conectando los niveles tróficos inferiores y superiores (Cury *et al*., 2000; Quattrocchi y Maynou, 2017).

El Golfo de California (GC), debido a su ubicación geográfica y su patrón de vientos, se caracteriza por presentar ambientes marinos notablemente variables. Asociada a esta variabilidad dentro del GC, ocurren procesos de mesoescala que contribuyen a que esta región sea altamente productiva, y albergue una considerable diversidad de especies de importancia ecológica y pesquera como camarones, calamares, almejas, ostiones, meros, jureles, tiburones, pelágicos menores entre otros (Arreguín-Sánchez *et al*., 2017). En el GC, la sardina monterrey *Sardinops sagax*, ha sido la principal especie en la pesquería de pelágicos menores que se desarrolla en sus aguas (Nevárez-Martínez *et al*., 2019), representando entre 60 a 90 % de la captura total (Arreguín-Sánchez *et al*., 2017; Petatán-Ramírez *et al*., 2019).

Diversas hipótesis se han propuesto para describir cómo el ambiente físico del GC puede tener influencia sobre los movimientos de los diferentes estadios de vida de la sardina monterrey (Sokolov, 1974; Hammann *et al*., 1988). Recientemente, con el uso de imágenes de satélite de TSM y de Chl *a*, se han podido identificar procesos oceánicos de mesoescala a lo largo del Golfo, los cuales presentan variabilidad estacional e interanual, con diferencias entre regiones del GC (García-Morales *et al*., 2017; Farach-Espinoza *et al*., 2021).

Se conoce poco sobre la potencial relación entre los procesos oceanográficos de mesoescala y la distribución y abundancia de sardina monterrey en el GC. Considerando que es una pesquería de varias especies de pelágicos menores, el número de viajes de pesca como esfuerzo pesquero no necesariamente se correlaciona con las capturas de sardina monterrey, cuando hay alta disponibilidad a la pesca, se debe en gran medida a condiciones ambientales favorables (Nevárez-Martínez *et al*., 2001, 2019), entonces la captura puede ser un proxy confiable de la abundancia (Froese *et al*., 2017). Por lo tanto, para describir y comprender la variabilidad de los procesos oceanográficos de mesoescala y su asociación con el periodo de reproducción-reclutamiento (PRR) de la especie, con eventuales efectos en la disponibilidad a la pesca, este estudio evalúa 18 años (1998–2016) de datos de captura anual, además de capturas georreferenciadas de seis temporadas de pesca (2002–2004, 2012–2014, 2017–2019) de una fracción de las embarcaciones cerqueras del GC, y 21 años (1998–2019) de imágenes de satélite de TSM y Chl *a* en el GC.

2. ANTECEDENTES

Entre los retos que se presentan en ecología está el de inferir las causas y predecir las consecuencias de la variabilidad ambiental en los ecosistemas marinos. La predicción de éstas requiere la interconexión de fenómenos o procesos que ocurren en diferentes escalas temporales, espaciales y de organización ecológica. Por lo tanto, no hay una sola escala natural en la que los procesos ecológicos deberían ser estudiados, ya que los sistemas generalmente muestran variabilidad en un amplio rango de escalas (Levin, 1992). Sin embargo, debido a diversas limitantes, los investigadores se ven en la necesidad de estudiar la mayoría de los procesos ambientales en escalas que les son más o menos manejables para su análisis.

En ese sentido, se han definido diferentes escalas espaciales que describen procesos que ocurren en unos cuantos milímetros a cientos de kilómetros y de escalas temporales que acontecen en unos segundos hasta milenios. De acuerdo con Mann (1992), las variaciones espaciales de mesoescala ocurren en un área que abarca desde cientos de metros a escasos centenares de kilómetros. Esta dinámica de mesoescala puede abarcar procesos que tienen lugar entre pocos días a pocos meses (López-Martínez, 2008), comprende procesos que pueden suceder a escala climática y a escala estacional, con efectos locales a regionales. Los procesos de mesoescala, que ocurren en periodos de días hasta algunos meses, también pueden verse influenciados por eventos temporales de mayor escala, como la interanual y la de régimen (López-Martínez, 2008).

2.1 Eventos oceanográficos de mesoescala

En general existen diversos procesos de mesoescala, mismos que se detallan a continuación:

a) **Los remolinos de mesoescala** son considerados como el “tiempo” del océano, éstos incluyen vórtices que se distinguen por anomalías de temperatura y salinidad, y poseen propiedades que les permiten transportar calor, sales, carbón y nutrientes (Fu *et al*., 2010). Pueden ser generados por inestabilidad barotrópica, proceso en el que la turbulencia de mesoescala utiliza la energía cinética del flujo medio para aumentar el crecimiento de estructuras de pequeña escala y formar remolinos oceánicos (Batchelor,

1967). Este proceso ocurre en regiones de fuertes corrientes oceánicas, como los límites occidentales y a lo largo del ecuador. También pueden ser generados por inestabilidad baroclínica, proceso en el que la turbulencia de mesoescala utiliza la energía potencial disponible contenida en los fluidos estratificados (Batchelor, 1967). Este proceso ocurre en regiones con grandes gradientes verticales de flotabilidad debido a las diferencias de temperatura y salinidad. Además, se pueden formar por forzamiento atmosférico y también por interacciones entre movimientos de masa de agua y los márgenes continentales irregulares, islas y cabos (Alpers *et al*., 2013; Cruz Gómez *et al*., 2008). Como concepción tradicional, los remolinos ciclónicos formados en el hemisferio norte presentan rotación en contra de las manecillas de reloj, y su centro contiene agua fría como consecuencia de una capa de mezcla abrupta y el ascenso de la termoclina; por su parte, los remolinos anticiclónicos presentan una rotación en sentido de las manecillas de reloj y su centro contiene agua más cálida que su periferia (Kahru *et al*., 2007a; Kahru *et al*., 2007b). Sin embargo, esta concepción ha sido cuestionada ya que se ha demostrado que remolinos anticiclónicos pueden presentar igual o mayor productividad que los remolinos ciclónicos, debido a una estratificación más débil de la columna de agua en los anticiclónicos, en particular durante verano (Dufois *et al*., 2016). Además, se ha identificado que los efectos de los remolinos de mesoescala sobre la concentración de pigmentos fotosintéticos dependen de la distancia con respecto al núcleo del remolino, ya que los anticiclónicos pueden exhibir concentraciones más altas de pigmentos dentro de su zona de transición (Wang *et al*., 2018).

b) **La surgencia costera** se origina del forzamiento del viento a lo largo de la línea de costa sobre un margen continental relativamente somero, provocando el movimiento ascendente de parcelas de agua dentro de la columna de agua que se mantiene durante periodos de varios días hasta algunas semanas (Kämpf y Chapman, 2016). Este desplazamiento vertical, transporta agua rica en nutrientes hacia la zona eufótica, promoviendo el crecimiento de fitoplancton y consecuentemente sustenta la presencia de zooplancton (González-Rodríguez *et al*., 2012; Harvey *et al*., 2021). De acuerdo con Kämpf y Chapman (2016), el mecanismo de surgencia costera consiste en el movimiento hacia fuera de la costa de la capa superficial de Ekman inducido por la tensión del

componente del viento paralelo a la costa. Esto provoca la reducción del nivel del mar costero en alrededor de 5–10 cm hasta alcanzar un equilibrio dinámico. Esta caída en el nivel del mar crea una fuerza por gradiente de presión hacia la costa que impulsa un chorro de afloramiento geostrófico a una velocidad de 20 a 50 cm s^{-1}. A su vez, el flujo geostrófico queda sujeto a los efectos de fricción por el fondo marino, esto crea un flujo hacia la costa en la capa inferior de Ekman, que tiene un espesor de unos 5 a 25 m. Este flujo cercano al fondo es el agente final del proceso de surgencia, a medida que se mueve cerca del fondo marino hacia la costa y asciende hacia la zona eufótica. La surgencia no es uniforme a lo largo de la costa, sino que los centros de surgencia se forman en ciertas zonas y están asociados con fuertes flujos frontales, como los jets, que pueden degradarse y convertirse en remolinos de mesoescala. Por otro lado, las sombras de surgencia, también conocidas como zonas de retención, son regiones relativamente inactivas ubicadas en ensenadas protegidas, típicamente aguas abajo de los centros de surgencia, y son sitios importantes de desove y crianza de peces pelágicos (Kämpf y Chapman, 2016).

c) **Los filamentos,** su formación es un proceso breve muchas veces asociado a las surgencias y a los remolinos que se originan a partir de ellas. Son estructuras alargadas y estrechas, con temperatura y salinidad distintiva (Strub *et al*., 1991; Artal *et al*., 2019), los cuales transportan agua con altas concentraciones de clorofila y materia orgánica hacia zonas alejadas de la costa (Jones *et al*., 1991; Arístegui *et al*., 1997; Artal *et al*., 2019). Una característica conspicua de los filamentos de aguas frías es que son bandas estrechas de agua con temperatura, densidad y concentración de pigmentos bien definidas que pueden extenderse por varios kilómetros (Flament *et al*., 1985; Li *et al*., 2017). Estos filamentos han sido asociados con corrientes oceánicas, y contribuyen sustancialmente al intercambio de material entre las aguas costeras ricas en nutrientes y el mar abierto relativamente oligotrófico (Washburn *et al*., 1993; Li *et al*., 2017).

d) **Los frentes térmicos** en el océano son zonas con gradientes bien definidos de temperatura superficial del mar, que usualmente están asociados con gradientes de otras propiedades como salinidad, nutrientes, plancton y sedimento en suspensión (Cyr

y Larouche, 2015). Estas regiones frontales constituyen una convergencia entre distintas masas de agua con diferentes características las cuales pueden funcionar como barrera físico-biológica, lo que puede provocar parches de productividad por medio de convergencia y mezcla vertical. Son zonas de importancia ecológica ya que representan hábitats idóneos con alta disponibilidad de alimento para especies de interés comercial, ayudando a optimizar la actividad pesquera (Bakun, 2006; Woodson y Litvin, 2015).

2.2 Biología de la sardina monterrey *Sardinops sagax*

Esta especie se distribuye desde Alaska hasta el Golfo de California, puede llegar a extenderse hasta el sur de Sinaloa durante años fríos (Nevárez-Martínez *et al*., 2014). Por lo general habita en regiones costeras con alta productividad biológica (Nevárez-Martínez *et al*., 2014). Se alimenta por medio de filtración de fitoplancton y zooplancton, principalmente de copépodos y larvas de braquiuros (López-Martínez *et al*., 1999).

Son organismos ovíparos, con huevos y larvas pelágicas (Culley, 1971; Simón-Díaz, 2009) y realizan desoves múltiples durante la época reproductiva, llegando a desovar cada 15 días (Macewicz *et al*., 1996). En el GC, por lo general, se reproduce en otoño e invierno, a veces hasta finales de primavera (Hammann *et al*., 1998). Durante la temporada reproductiva, la distribución de desoves parece estar determinada por bajas temperaturas y por las surgencias costeras (Lynn, 2003; Nevárez-Martínez *et al*., 2014). Además, los desoves en el GC pueden variar latitudinalmente por preferencias térmicas de la especie, principalmente desovan en las costas de Sonora y en toda la región central del golfo (Hammann *et al*., 1998; Nevárez-Martínez *et al*., 2014). Martínez-Aguilar *et al*. (2005) han definido la duración de las etapas de la historia de vida de la especie basados en estadios gnomónicos, estimando que en el GC la especie puede alcanzar una longevidad de 7 años (Tabla 1).

Tabla 1. Duración de cada etapa de la historia de vida de la sardina monterrey Sardinops sagax en el Golfo de California basado en estadios gnomónicos, adaptado de Martínez-Aguilar et al., (2005).

	Duración mínima (días)	Duración media (días)	Duración máxima (días)	Duración media acumulada en días
Huevo (H)	1.5	2.5	4	2.5
Larva vit. (LV)	2	3	4.2	5.5
Larva temprana (LTe)	4	6	9	11.5
Larva tardía (LT)	10	14	18	25.5
Juvenil temprano (JT)	23	29	36	54.5
Juvenil I (JI)	53	63	74	117.5 (~ 4 meses)
Pre-recluta (PR)	120	136	152	253.5 (~ 8 meses)
Adulto joven (AJ)	275	294	311	547.5 (1.5 años)
Adulto (A)	629	635	638	1182.5 (3.2 años)
Adulto tardío (AT)	1309	1372	1437	2554.5 (7 años)

Por otro lado, la abundancia y distribución de la especie puede estar determinada por condiciones ambientales con efectos en su disponibilidad a la pesca, que se ha asociado con la TSM, la surgencia costera (Nevárez-Martínez *et al*., 2001) y la Chl *a* (Lanz *et al*., 2009).

2.3 Efectos potenciales de los procesos oceanográficos de mesoescala en organismos pelágicos

Los procesos de mesoescala que ocurren en el océano incluyen la termoclina estacional, la circulación inducida por el viento, los frentes de densidad, los remolinos o giros, las inestabilidades en la circulación por efecto de la topografía del fondo, de los aportes continentales o del viento (Mann, 1992; López-Martínez, 2008). En esta escala también se incluyen procesos como las ondas internas generadas por tormentas tropicales (Merrefield y Winant, 1989; López-Martínez, 2008). Asimismo, los procesos de mesoescala que ocurren dentro de la escala temporal climática y estacional incluyen los procesos de enriquecimiento, como las surgencias y la mezcla turbulenta, los procesos de concentración de partículas tales como la estabilización de la columna de agua, y los frentes (Bakun, 1994).

Se ha propuesto que los POM pueden afectar la distribución tanto horizontal como vertical de huevos y larvas de peces, crustáceos y moluscos, así como de otros organismos planctónicos (Lasker, 1981; Parrish, 1999; Bakun, 2006; Rodríguez *et al*., 2006; Apango-Figueroa *et al*., 2015). Los procesos como los frentes, los remolinos y las surgencias son factores determinantes en la distribución espacial y estructural de la comunidad zooplanctónica en escala de cuenca y local (Hinrichsen, 2009; Avendaño-Ibarra *et al*., 2013). Los remolinos y frentes pueden ser mecanismos de retención y concentración de huevos, larvas y juveniles de diversos organismos (Iles y Sinclair, 1982; Bolz y Lough, 1984; Wroblewski y Cheney, 1984; Kiørboe *et al*., 1988; Lobel y Robinson, 1988; Sournia, 1994; Rodríguez *et al*., 2004; Avendaño-Ibarra *et al*., 2013); mientras que los filamentos que se desprenden de eventos de surgencias, como también de los remolinos, pueden ser mecanismos de dispersión (Flierl y Wroblewski, 1985; Myers y Drinkwater, 1989; Roy, 1998; Smith y Suthers, 1999; Bécognée *et al*., 2009; Avendaño-Ibarra *et al*., 2013).

Por otra parte, los eventos climáticos que suceden en escala de días y que afectan desde la mesoescala a la escala regional, como las ondas internas generadas por tormentas tropicales (Merrefield y Winant, 1989; López-Martínez, 2008), pueden afectar la estabilidad de la columna de agua provocando la formación de parches de plancton, alterando la disponibilidad de alimento para larvas de pelágicos menores (Rothschild y Osborn, 1988; López-Martínez, 2008). Además, los procesos de enriquecimiento de surgencias y mezcla de nutrientes pueden afectar la red trófica de los ecosistemas marinos. También se ha mencionado que los procesos de concentración de partículas (giros y corrientes) generan condiciones favorables para el desove, sobrevivencia y dispersión larval de organismos planctónicos (Lluch-Cota *et al*., 2008; Sánchez-Velasco *et al*., 2013; Coria-Monter *et al*., 2014; Sánchez-Velasco *et al*., 2014; García-Morales *et al*., 2017). En la escala de variabilidad ambiental estacional, puede haber variaciones en el crecimiento de diversos organismos (Pitcher y Hart, 1982; Van Winkle *et al*., 1997), en el desarrollo de reservas energéticas (Lam, 1983), y en los desoves y éxitos reproductivos (Lam, 1983; Cury y Roy, 1989; Bakun, 1994; Van Winkle *et al*., 1997; López-Martínez, 2008).

2.4 Efecto de procesos de mesoescala en la distribución y abundancia de poblaciones de peces pelágicos

Debido a eventos de surgencias, al forzamiento del viento o al ingreso de masa de agua con diferentes propiedades, los sitios de frentes térmicos pueden funcionar como áreas de acumulación y retención de nutrientes y presentar alta disponibilidad de alimento para organismos como los peces pelágicos (Laurs *et al*., 1984; Podestá *et al*., 1993; Yoshida-Hernández, 2015). Las variaciones en la biomasa de estas especies han sido atribuidas a factores abióticos, que son capaces de alterar la mortalidad natural de las primeras etapas de vida, con efectos en las nuevas generaciones de reclutas a las poblaciones de organismos adultos (Cury y Roy, 1989; Torri *et al*., 2018). Los huevos y larvas de pelágicos menores pueden estar expuestos a fuertes corrientes a lo largo de la costa en ecosistemas de surgencias costeras, lo que puede incrementar la deriva larval hacia zonas con reducida disponibilidad de alimento, con eventuales efectos en el reclutamiento (Rojas, 2014).

En las costas de California, la distribución latitudinal de los diferentes stocks de *Sardinops sagax* se debe a la temperatura superficial del mar, mientras que la distribución longitudinal está asociada a las concentraciones de clorofila *a* y a la presencia de giros, surgencias y filamentos que también son determinantes en la abundancia y distribución de la especie en esta región (García-Morales, 2012).

Además, se ha identificado una asociación significativa entre la sobrevivencia de larvas de sardina encontradas alejadas de la costa con remolinos de mesoescala, que son hábitats ricos en alimento en el que densidades óptimas de remolinos se asocian con alta abundancia de larvas (Logerwell y Smith, 2001). De igual manera, los remolinos en varios sistemas marinos han demostrado jugar un rol importante en la distribución de larvas de peces y de organismos de niveles tróficos más altos, como las larvas de bacalao *Theragra chalcogramma* en el Golfo de Alaska, y en la concentración de salmones alrededor de la isla de Vancouver en Canadá (Logerwell y Smith, 2001).

2.5 Variabilidad oceanográfica del Golfo de California

El GC combina dos propiedades importantes: generalmente se encuentra libre de nubosidad, lo que lo hace ideal para estudios con imágenes satelitales (Badan-Dangon *et al*., 1985; Lluch-Cota *et al*., 2000); y constituye una cuenca de dimensiones adecuadas como para realizar pruebas de modelación de mesoescala y climáticas (Ripa, 1997; Lluch-Cota *et al*., 2000). Por lo tanto, se han llevado a cabo varios estudios con diversos métodos en diferentes regiones del golfo durante distintos periodos del año.

En la entrada del GC, que va del extremo sur de la península de Baja California Sur a Cabo Corrientes (Lavín y Marinone, 2003), hay una comunicación abierta con el Océano Pacífico Oriental Tropical, que es el principal agente forzante de la estacionalidad que sucede dentro del golfo (Baumgartner y Christensen, 1985; Strub y James, 2002; Lavín y Marinone, 2003). En verano hay intrusión de masa de agua superficial tropical, y durante el invierno la presencia de agua del GC proveniente del norte del golfo; así como de la presencia de agua de la Corriente de California, y las tres masas de agua se entremezclan en los primeros 150-200 metros de profundidad (Lavín y Marinone, 2003). Aplicando una versión regional del Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM) configurado para el GC, se ha observado durante el verano (agosto) la llegada de la Corriente Costera Mexicana, la cual interactúa con la línea de costa y la batimetría de la zona, generando la formación de una serie de remolinos con dirección de rotación variable que dominan la circulación de esta zona durante 2-3 meses (Zamudio *et al*., 2008).

Utilizando datos in situ del sur del GC, se determinó la variación interanual que se presenta producto de la señal de El Niño, la cual afecta la profundidad de la capa de mezcla y de la termoclina, aumentándola 50 metros con respecto a la profundidad en años no El Niño, con un incremento de hasta 4 °C de la TSM y una disminución de la salinidad por la intrusión de la masa de agua superficial tropical (Lavín *et al*., 1997; Castro *et al*., 2000). El intercambio de masas de agua entre el norte y el sur del GC ocurre en los estrechos del archipiélago, donde el agua subtropical subsuperficial entra hacia el norte del golfo por debajo de la capa superficial, mientras que el agua del Golfo de California es transportada hacia el sur en las capas superficiales (Lavín y Marinone, 2003).

En el norte del GC, la masa de agua que predomina en los primeros 150 metros es la del GC por encima del agua subsuperficial subtropical (Romero-Centeno, 1995). Para el norte del GC, se ha sugerido que las corrientes de gravedad pueden ser importantes, y que éstas podrían estar moduladas por el ciclo de marea muerta de primavera (Lavín *et al*., 1997). Aplicando un diagrama vectorial progresivo, obtenido por medio de un medidor de corriente lanzado al centro de esta región durante el verano de 1999, se evidenció la existencia y modulación de las corrientes por gravedad en esta zona. Durante el tiempo de mareas vivas, hay un débil flujo residual hacia el este, mientras que durante temporada de mareas muertas hay un fuerte flujo hacia el sur (Lavín y Marinone, 2003).

2.6 Eventos oceanográficos de mesoescala en regiones del Golfo de California

Dentro de la variabilidad oceanográfica en el GC se encuentra la variabilidad estacional, la cual está impulsada por agentes forzantes como la entrada del Océano Pacífico Tropical Oriental al golfo por medio de la corriente costera mexicana (Castro *et al*., 1994; Ripa, 1997; Gutiérrez *et al*., 2004, Zamudio *et al*., 2008), el régimen de vientos con características monzónicas (Badan-Dangon *et al*., 1991; Gutiérrez *et al*., 2004), y el intercambio calórico atmósfera-océano (Beier, 1997; Marinone, 2003; Gutiérrez *et al*., 2004). La acción de estos forzamientos, y su interacción con la línea de costa, promueven la formación de POM en el golfo como las surgencias costeras, los giros ciclónicos y anticiclónicos, los remolinos, los frentes, los procesos de mezcla por viento y mareas, la intrusión de masas de agua y los filamentos (Emilsson y Alatorre, 1997; Lavín *et al*., 1997; Lavín y Marinone, 2003; Zamudio *et al*., 2008; García-Morales *et al*., 2017).

En la boca y la región sur del GC, de acuerdo con imágenes de satélite, frecuentemente se presentan giros de mesoescala, visibles por el contraste en la temperatura entre las masas de agua (Lavín y Marinone, 2003). Esta región del GC presenta varios procesos que generan POM; debido al patrón anual de los vientos durante invierno, se pueden observar procesos de surgencias en la región continental del golfo (Badan-Dangon *et al*., 1985; Santamaría-del-Ángel *et al*., 1994; Lluch-Cota, 2000; García-Morales *et al*., 2017). Durante verano, ocurren los procesos de surgencias en la costa de la península, sin embargo, éstos son más debiles que los que ocurren durante invierno, posiblemente debido a vientos menos intensos (Badan, 2003;

Lavín y Marinone, 2003), a una termoclina más profunda, a una plataforma continental más angosta, y a que la dirección del viento y de la corriente superficial del mar fluyen en direcciones opuestas (Lluch-Cota, 2000). También, por medio de imágenes de satélite, se han observado una serie de giros de diámetro variable (50-150 km) en esta región del golfo (Badan-Dangon *et al*., 1985; Pegau *et al*., 2002; Navarro-Olache *et al*., 2004; Lavín y Marinone, 2003). Se dice que estos giros son un componente importante en la circulación del golfo y que ejercen efectos importantes en la circulación media y estacional, y que podrían dominar a nivel de mesoescala en la región lejana a la costa (Figueroa *et al*., 2003; Lavín y Marinone, 2003). También observables por medio de imágenes satelitales, los filamentos y plumas con una duración más corta que los giros (Badan-Dangon *et al*., 1985; Pegau *et al*., 2002) parecen estar asociados a éstos, apareciendo en sus bordes, y también están asociados a las surgencias y a los frentes de temperatura inducidos por mezcla de marea (Lavín y Marinone, 2003), por lo que presentan altas concentraciones de clorofila *a* (Navarro-Olache *et al*., 2004; Lavín *et al*., 2006; Zamudio *et al*., 2008; García-Morales *et al*., 2017). En la región central del GC, García-Morales *et al*. (2017), mediante imágenes satelitales de TSM y clorofila, identificaron que febrero y julio son los meses en los que se observan mayor cantidad de giros ciclónicos, surgencias e intrusiones de masas de agua en esta región del golfo, con una alta variabilidad interanual durante el periodo de estudio (2002 – 2015).

En la región del archipiélago, la característica más apreciable es la presencia de mezcla de marea fuerte y extensa por fricción con el fondo y por inestabilidades internas (Argote *et al*., 1995; Lavín y Marinone, 2003). Debido a esto, ocurren constantes surgencias que aportan agua más fría hacia la superficie, y por lo tanto en esta región se encuentra la TSM más baja de todo el GC (Badan-Dangon *et al*., 1985; Paden *et al*., 1991).

Por medio de mediciones obtenidas con flotadores monitoreados por satélite, se ha determinado que en el norte del GC se presenta un giro ciclónico durante verano y uno anticiclónico durante invierno; de hecho, se ha observado que en esta área está establecida una circulación estacional (Beier, 1997; Lavín *et al*., 1997; Carrillo y Palacios-Hernández, 2002; Palacios-Hernández *et al*., 2002). Se ha determinado que el giro ciclónico se presenta de junio a septiembre, mientras que el anticiclónico se observa de noviembre a abril, con periodos de

transición durante mayo/junio y octubre (Marinone, 2003). Por medio de un modelo lagrangiano, Gutiérrez *et al*. (2004), en un estudio realizado durante el 2001, también describieron la circulación superficial determinando que es anticiclónica de octubre a mayo y ciclónica durante julio y agosto, y que también está dominada por un giro en el centro de la región.

2.7 Efectos de procesos oceanográficos de mesoescala en especies de peces pelágicos en el Golfo de California

Dentro de la diversidad biológica en el GC se presentan los peces pelágicos menores de importancia económica, de los cuales se han realizado diversos estudios, entre ellos los que relacionan a las especies con la variabilidad ambiental. Se sabe que las grandes concentraciones de pelágicos menores en el GC están asociadas a zonas de surgencias costeras (Nevárez-Martínez *et al*., 2001). En el GC se presentan giros ciclónicos (enero), donde se han registrado las mayores abundancias, riqueza en especies y volumen de zooplancton, en comparación con áreas de giros anticiclónico (marzo) y otro ciclónico (septiembre). En la región de las grandes islas, durante enero y julio, los frentes termales juegan un papel importante en la distribución de especies (Avendaño-Ibarra *et al*., 2013).

El patrón en la distribución y abundancia del ictioplancton en el GC durante primavera y otoño responde a un gradiente latitudinal, donde ocurren dos complejos faunísticos larvales, uno al norte (templado) y otro al sur (tropical), los cuales contraen o expanden su distribución de acuerdo con el movimiento latitudinal de la isolínea de temperatura del mar de 21 °C (Urías-Leyva *et al*., 2018). Sin embargo, este patrón general se desestabiliza cuando ocurren procesos de mesoescala como surgencias y giros, los cuales incrementan la deriva larval desde las costas hasta la región central del golfo, particularmente durante noviembre-diciembre. Los frentes térmicos y de pigmentos tienen un efecto en la distribución superficial del ensamblaje larval de peces, mientras que la intrusión hacia el sur de agua más salada proveniente del norte del GC promueve cambios en la distribución vertical de larvas de peces, procesos hidrográficos asociados a la circulación estacional y termohalina del golfo afectan la distribución horizontal y vertical de larvas de peces (Danell-Jiménez *et al*., 2009).

La variabilidad y la tendencia de procesos como las surgencias costeras ha sido objeto de estudio de cara al cambio climático, ya que son procesos que en gran medida determinan la productividad de muchas regiones del océano (García-Reyes *et al*., 2015; Xiu *et al*., 2018), incluyendo al GC (Douglas *et al*., 2007). Además, sus efectos podrían incluir cambios en todos los niveles tróficos, como la redistribución de poblaciones por cambios en el hábitat, acidificación y desoxigenación con impactos en especies marinas (Bakun *et al*., 2015). Adicionalmente, los cambios en la dinámica de remolinos de mesoescala y de los jets y filamentos en el GC, pueden tener efectos en la redistribución de aguas ricas en nutrientes originadas por surgencias costeras y en organismos fitoplanctónicos a lo largo y ancho del Golfo (Douglas *et al*., 2007).

2.8 Influencia procesos de mesoescala en peces pelágicos menores en el Golfo de California

Los giros, durante su formación y desarrollo, pueden mostrar un movimiento ciclónico o un movimiento anticiclónico (Cruz-Gómez *et al*., 2008). En el norte del GC, a medida que se presentan los giros ciclónicos, aumenta la abundancia de larvas de *O. libertate y E. mordax*, desplazando a larvas de especies demersales. Mientras que, cuando se presentan giros anticiclónicos, las abundancias de larvas disminuyen, y al cabo de un tiempo, dominan las larvas de *E. mordax*. Ello sugiere que este cambio estacional en la circulación promueve el desove estacional de especies dominantes en el área, teniendo un rol importante en la funcionalidad del ecosistema pelágico de la zona (Sánchez-Velasco *et al*., 2009). Por otra parte, en el centro del GC, durante condiciones de verano en el año 2011, un giro ciclónico concentró la mayor abundancia y diversidad de larvas de especies como *O. libertate, Anchoa spp.* y *Syacium sp*. en los bordes cercanos y alejados de la costa, así como también en la capa de la termoclina, lo que sugiere que el giro captura larvas cercanas a las costas y las transporta, permitiendo el reclutamiento de larvas en ambas costas (Sánchez-Velasco *et al*., 2013).

Para que ocurran desoves exitosos de los pelágicos menores como la sardina, deben suceder complejas interacciones de varios factores físicos y biológicos a diferentes escalas espaciotemporales (Bakun y Parrish, 1990; Sánchez-Velasco *et al*., 2002), sugiriendo que los cambios en las abundancias están asociados a las alteraciones en el ambiente y los ciclos de vida

de estas especies (Cisneros-Mata *et al*., 1995; Cisneros-Mata *et al*., 1997; Sánchez-Velasco *et al*., 2002). El desove de la especie dentro del golfo ocurre durante noviembre a mayo, y se ha sugerido que está limitado por una marcada estacionalidad, en cierta medida influenciada por la intrusión durante el verano de la masa de agua subtropical. Aunado a ésto, las larvas y los huevos parecen ser retenidos por un giro anticiclónico, que ocurre durante invierno en la región central del golfo (Hammann *et al.*, 1998). Se ha determinado que la especie presenta variaciones en el reclutamiento cuando hay temperaturas mayores a 19.3 °C (Morales-Bojórquez *et al*., 2003). Además, se ha identificado alta abundancia de huevos de sardina monterrey en los gradientes producidos por remolinos anticiclónicos en la región central del golfo, y que la advección de larvas a lo largo del centro del golfo está inducida por las surgencias costeras, filamentos o jets, y por los remolinos (Aceves-Medina *et al*., 2009).

Por medio de bio-simulación, se estimaron cambios en la distribución y abundancia de la especie que se correlacionan con un desfase de dos meses con los cambios en TSM y Chl *a* (Heras-Sánchez *et al*., 2018). Otros autores mencionan que la abundancia de pelágicos menores, incluyendo sardina monterrey, está más relacionada con la distribución de la Chl *a* que de la TSM; además de que son más abundantes dentro de ciertos intervalos de TSM y de concentración de pigmentos (Lanz *et al*., 2009). De igual manera, su distribución puede ampliarse o verse disminuida debido a la variabilidad tanto de la TSM como del índice de surgencias, encontrándose mayor abundancia en intervalos específicos (Nevárez-Martínez *et al*., 2001). Esto es que esta especie, así como otros pelágicos menores, han sufrido variaciones en su distribución y abundancia, asociadas a las fluctuaciones ambientales (Shannon *et al*., 1988; Lluch-Belda *et al*., 1989, 1992; Baumgartner *et al*., 1992; Holmgren-Urba y Baumgartner, 1993; Kawasaki, 1993; Nevárez-Martínez *et al*., 2001).

Además, los procesos como los remolinos son importantes en definir hábitats de larvas de peces, lo que modifica la estructura y abundancia de larvas, lo que sugiere que la abundancia de ciertas especies de pelágicos menores se ve favorecida por remolinos anticiclónicos (Sánchez-Velasco *et al*., 2009, 2013). Otro evento importante es la intrusión de agua tropical superficial, la cual se desplaza estacionalmente dentro y fuera del Golfo, cambiando significativamente la composición de organismos planctónicos; por lo tanto, durante su presencia en el Golfo

dominan especies con afinidad tropical (Brinton *et al*., 1986). También, esta intrusión de agua crea frentes termohalinos y de producción primaria, en los cuales las larvas de sardina y anchoveta se pueden concentrar dentro de la capa de mezcla (Sánchez-Velasco *et al*., 2007; Inda-Díaz *et al*., 2010).

Además de las variaciones y los efectos en el ambiente y en la distribución y abundancia de pelágicos menores a nivel de mesoescala e interanual, también se presentan fluctuaciones a escala temporal de varias décadas en las capturas de sardina y anchoveta en los principales sistemas de surgencias, las cuales aparentemente están dominadas por variaciones ambientales de largo plazo, probablemente asociadas con cambios a escala oceánica y global. Estas variaciones provocan cambios conspicuos y prolongados en sus abundancias, lo que da lugar a los “regímenes” de sardina y anchoveta; ésto se refleja en la concordancia de las tendencias en varios stocks de sardina a escala oceánica (Lluch-Belda *et al*., 1989).

3. JUSTIFICACIÓN

Las capturas de pelágicos menores, y en particular de sardina monterrey, han experimentado grandes fluctuaciones a lo largo de las temporadas de pesca, atribuidas en gran medida a la variación en el ambiente. Sin embargo, hay fluctuaciones atípicas en las capturas que difícilmente han sido explicadas por variables como la temperatura, la clorofila u otros índices climáticos. Es así como surge la interrogante de qué factores ambientales pudieran estar incidiendo.

Además, se ha documentado la importancia que pueden tener procesos oceanográficos de mesoescala como los remolinos, las surgencias costeras, los frentes y los filamentos sobre la deriva de huevos y larvas de sardina, y de cómo podrían tener efectos en su sobrevivencia, crecimiento y reclutamiento. Estos estudios constituyen la base para realizar análisis ambiente — recurso.

4. HIPÓTESIS

1. El incremento en la presencia de remolinos ciclónicos y anticiclónicos, surgencias costeras y filamentos que ocurren durante los once meses previos al reclutamiento a la pesquería, presentará efectos positivos en el período de reproducción y reclutamiento de los organismos, que se verán reflejados en altas capturas.

2. El incremento en la persistencia de la intrusión de masa de agua con TSM > 25 °C durante los once meses previos al reclutamiento a la pesquería, tendrá efectos negativos en el período de reproducción y reclutamiento, que se verán reflejados en bajas capturas.

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Analizar la variación estacional e interanual en la distribución e índice de abundancia de *Sardinops sagax* y su relación con procesos oceanográficos de mesoescala en el Golfo de California.

5.2 Objetivos particulares

1. Determinar la presencia y frecuencia estacional e interanual de procesos oceanográficos de mesoescala (remolinos, surgencias, intrusión de masa de agua, filamentos) en el GC durante los años de 1998 al 2019.
2. Evaluar la distribución e índice de abundancia de la especie durante las temporadas del 2002–2004, 2012–2014 y 2017–2019 en el GC.
3. Evaluar la relación entre la distribución e índice de abundancia de la especie con procesos oceanográficas de mesoescala en el GC.

6. MATERIAL Y MÉTODOS

6.1 Área de estudio

El GC es un mar semi cerrado rodeado por elevaciones topográficas casi en su totalidad, y conectado al Océano Pacífico (OP) únicamente por su extremo sur (Lluch-Cota y Arias-Aréchiga 2000). Se ubica en la zona de transición templado-tropical, por lo que presenta características climáticas, oceanográficas y ecológicas complejas (Lluch-Cota *et al*., 2010). La circulación general del GC está inducida por el forzamiento del OP, los vientos sobre la superficie del mar, el flujo de corrientes y la circulación termohalina (Beier, 1997; Gutiérrez *et al*., 2004; Jiménez *et al*., 2005). La regionalización del Golfo no es objeto de este trabajo; sin embargo, para el análisis de la variabilidad en la TSM, Chl *a* y estructuras de mesoescala, el área de estudio se dividió con base a las tres regiones propuestas por Soto-Mardones *et al*. (1999), Lluch-Cota y Arias-Aréchiga (2000). Por lo tanto, el área de estudio queda delimitada entre los 31° 30’ N, 114° 48’ W hasta los 22° 00’ N, 105° 40’ W (Fig. 1).

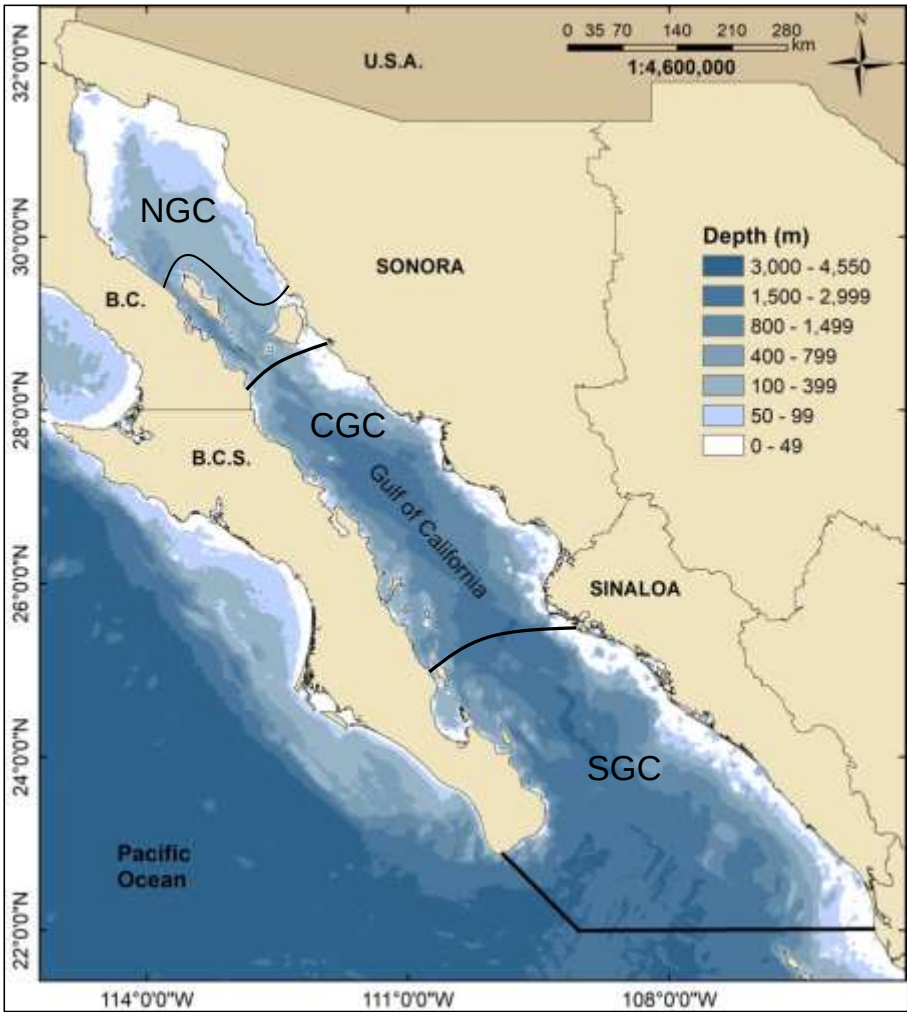


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio Golfo de California, México. División del área en tres subregiones, norte (NGC), centro (CGC) y sur (SGC).

6.2 Dinámica de procesos oceanográficos de mesoescala

Para el análisis de los POM se utilizaron imágenes compuestas de cinco días de TSM de los años 2001–2019, con resolución espacial de 1 km de los sensores Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS-Aqua y Terra) y del Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS); asimismo se utilizaron imágenes compuestas de cinco días de Chl *a* de 1998 – 2019 de los sensores MODIS-Aqua y Terra, VIIRS, Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor (SeaWiFS) y el Ocean and Land Colour Instrument (OLCI). Las imágenes compuestas tanto de TSM como de Chl *a* fueron procesadas por Dr. Mati Kahru del Scripps Institution of Oceanography, disponibles en http://www.wimsoft.com/CAL/ en formato HDF (Hierarchical Data Format). Se utilizó esta resolución temporal debido a que las imágenes presentaron menor nubosidad en comparación

con imágenes diarias, además de facilitar la detección de gradientes y frentes de TSM y Chl *a*, necesarios para su identificación; ésto permitió estimar la duración de cada tipo de estructura con mejor precisión. Los remolinos se determinaron utilizando criterios de trabajos previos de Pegau *et al*. (2002), Kahru *et al*. (2007a,b) y García-Morales *et al*. (2017). Además, se utilizó el método de detección de bordes (Cayula y Cornillon, 1992), por medio de la subrutina Single Image Edge Detection (SIED) que se encuentra en el WIMSoft®. El método utiliza ventanas sobrepuestas para explorar la probabilidad estadística de un borde, primero calculando el histograma y detectando la bimodalidad del histograma, posteriormente detectando la cohesión del borde potencial, y finalmente aplicando la modificación propuesta por Diehl *et al*. (2002) que utiliza análisis de variogramas en dos direcciones para encontrar el mejor tamaño de ventana en direcciones horizontales y verticales en lugar de un tamaño fijo de ventana (Fig. 2). Una vez detectados los bordes en las imágenes de Chl *a*, éstos se sobreponen a las imágenes de TSM para determinar la temperatura del centro del remolino, que de acuerdo con Cruz-Gómez *et al*. (2008), si presenta menor temperatura que su borde tiene sentido ciclónico, y si presenta mayor temperatura en el centro con respecto a su borde es anticiclónico.

La mayoría de los productos satelitales de altimetría del mar tienen resolución espacial de 0.25° longitud/latitud, limitando la detección de remolinos en el GC ya que éste presenta una extensión zonal promedio de $\sim$ 150 km. Sin embargo, actualmente se cuenta con modelos de circulación oceánica del GLORYS12V1 de los productos de Copernicus Marine Service disponibles en https://resources.marine.copernicus.eu, los cuales fueron utilizados para ayudar en la validación de los remolinos identificados.

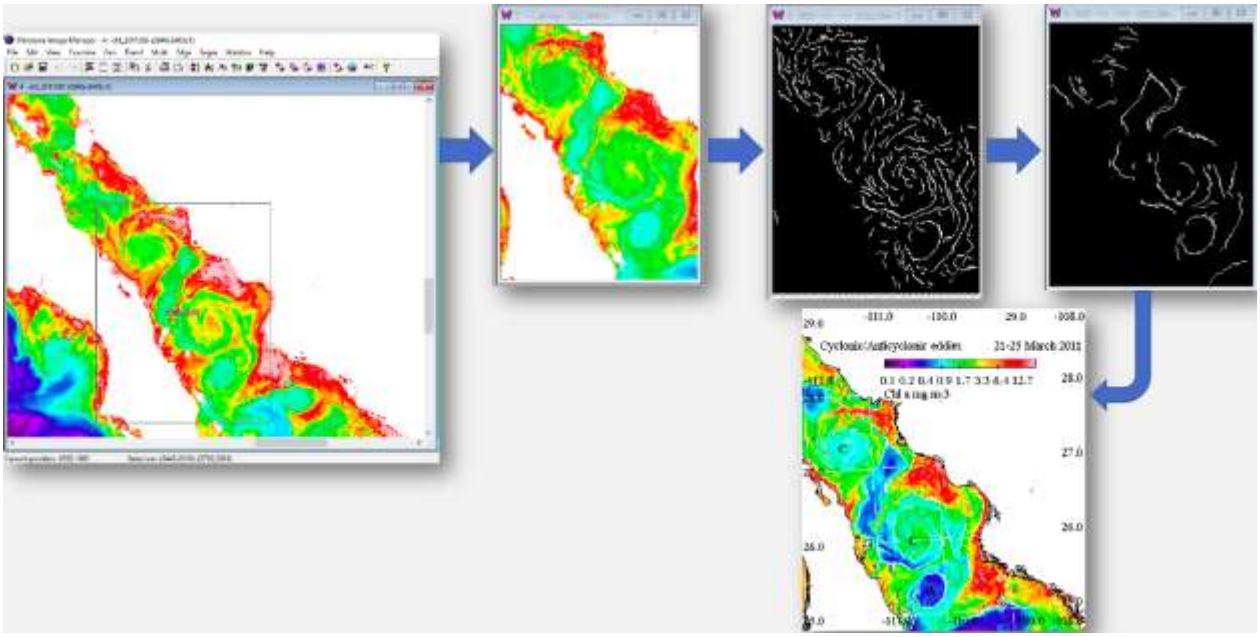


Figura 2. Esquema de la identificación visual y detección de remolinos en imágenes de clorofila a por medio del uso de la subrutina Single Image Edge Detection (SIED) del programa WIMSoft®.

Basándose en métodos similares de García-Reyes *et al*. (2015) y de Dabuleviciene *et al*. (2018), los procesos de surgencias de la costa oriental del GC se identificaron por medio de las imágenes de TSM de cinco días ubicando los sitios donde se mostró gradiente de temperatura ≥ 1 °C entre el agua adyacente a la costa con relación al agua oceánica a la misma latitud, indicativo de agua sub-superficial con temperatura más fría que ha sido transportada hacia la superficie. Adicionalmente, se aplicó la detección de frentes de producción primaria aplicando la subrutina SIED del WIMSoft® en las imágenes de Chl *a* de cinco días, como consecuencia del aporte de nutrientes del agua subsuperficial (Fig. 3).

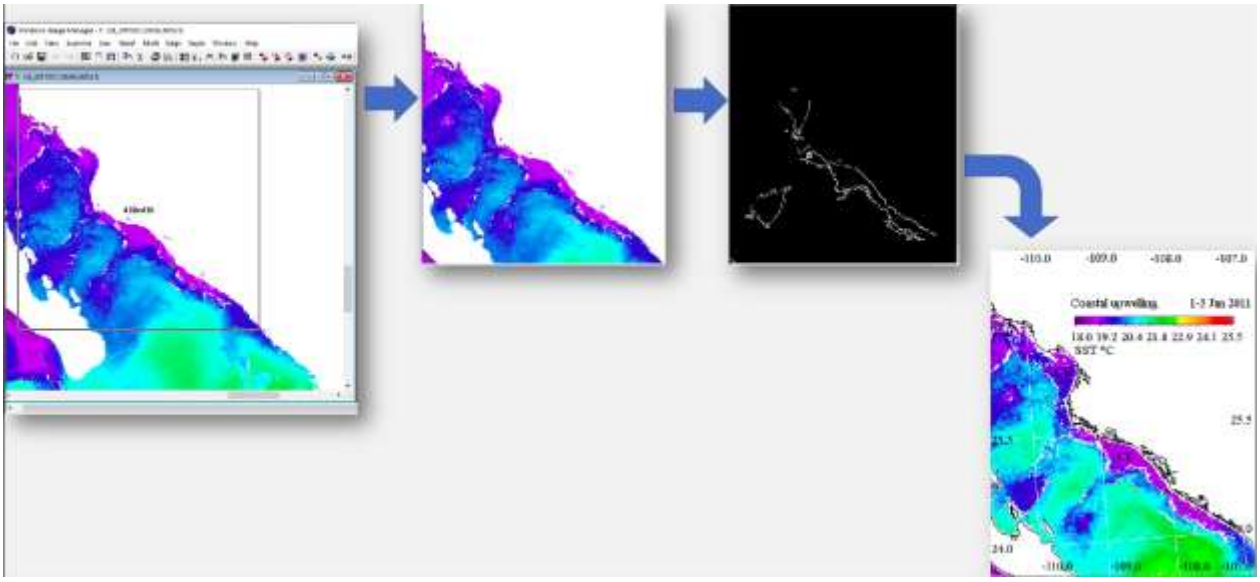


Figura 3. Esquema de la identificación visual y detección de surgencias costeras en imágenes de TSM por medio del uso de la subrutina Single Image Edge Detection (SIED) del programa WIMSoft®.

Los filamentos se determinaron primero elevando los valores de Chl *a* al cuadrado para resaltar las áreas con concentraciones mayores a 1 mg m^{-3}, características de condiciones eutróficas, y posteriormente por medio de la detección de frentes (SIED) que se forman de las proyecciones longitudinales derivadas de las surgencias (Fig. 4). Éstas se diferenciaron de las plumas que derivan de la descarga de ríos, generalmente presentes en el sur de la costa oriental del Golfo, por medio de las imágenes de TSM, ya que en esta región los filamentos presentan una menor temperatura con respecto al agua a su alrededor mientras que, de acuerdo con Martínez-Flores *et al*. (2011), las plumas presentan una temperatura más cálida que su alrededor.

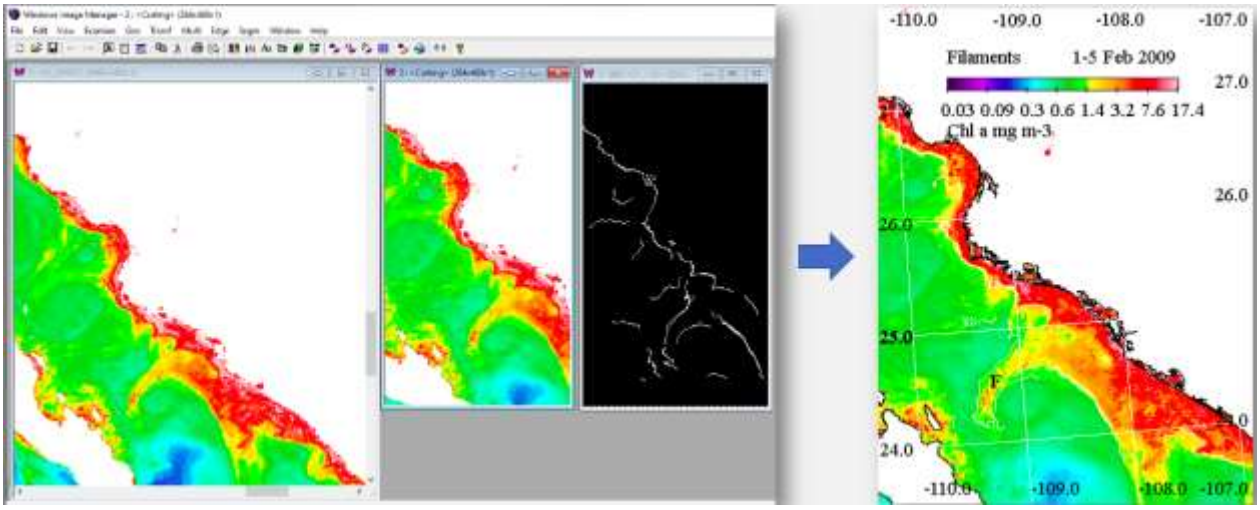


Figura 4. Esquema de la identificación visual y detección de filamentos en imágenes de TSM por medio del uso de la subrutina Single Image Edge Detection (SIED) del programa WIMSoft®.

La intrusión de masa de agua relativamente cálida y oligotrófica proveniente de la Corriente Costera Mexicana (CCM) se identificó por medio de la isoterma de los 25 °C en las imágenes de TSM de cinco días, y por medio de la isolínea < 34.6 g kg^{-1} de imágenes de la salinidad superficial del mar disponibles en https://marine.copernicus.eu; esta temperatura y salinidad son características de la masa de agua superficial del Pacífico Tropical Oriental (Fiedler y Talley, 2006; Portela *et al*., 2016) (Fig. 5).

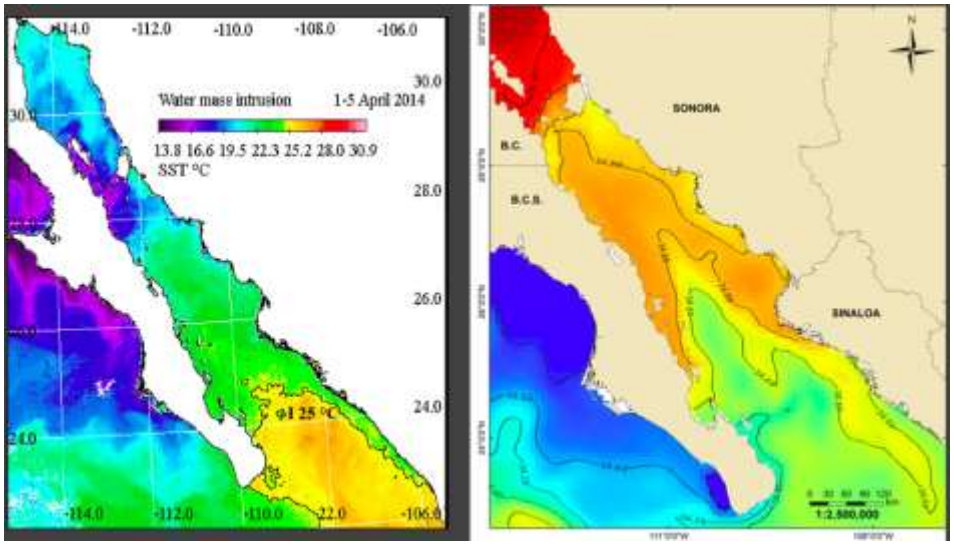


Figura 5. Esquema de la identificación visual y detección de intrusión de masa de agua tropical superficial en imágenes de TSM por medio de la detección de la isoterma de 25 °C en el programa WIMSoft® y por medio de la isopicna < 34.6 g kg-1 en imágenes de salinidad superficial del mar de Copernicus Marine Service.

Para estimar la frecuencia anual de los remolinos y filamentos en las regiones del GC, se identificó y contabilizó cada uno de ellos durante el año. Generalmente la duración de los remolinos de mesoescala oscila entre los 10–100 días (Morrow y Le Traon, 2012; Faghmous et al., 2015). Para reducir el sesgo en la determinación del número de remolinos, en este estudio se consideraron aquellos que estuvieron presentes en al menos tres imágenes consecutivas. Así mismo, se estimó la duración mínima, máxima y promedio de los remolinos y filamentos, además se obtuvo el número de días en el mes y en el año con presencia de estas estructuras. Respecto a los procesos de surgencias, los datos se agruparon quincenalmente, analizando grupos de tres imágenes para cada uno; se consideró una observación cuando hubo presencia en al menos dos de las tres imágenes que conforman la quincena. En el caso de las quincenas que presentaron solamente una observación en la última imagen, pero acompañada de una observación efectiva al inicio de la siguiente quincena, se consideró también como una observación. Se estimó la persistencia anual de la intrusión de masa de agua que correspondió al número de días que permaneció desde su ingreso hasta su retiro en cada región.

Para estimar diferencias en el número de días con presencia de procesos entre los meses, y dado que los datos carecen de normalidad y homocedasticidad, se aplicó un análisis de varianza avanzado con las pruebas de generalización avanzada de Welch y Box, y las comparaciones avanzadas con la función lincon que se encuentran en el paquete WRS (Wilcox Robust Statistic) del R Project (Mairs y Wilcox, 2020). Adicionalmente, la climatología de cada POM se visualizó por medio de la presencia acumulada de cinco días a lo largo del año. Para agrupar los meses con presencia acumulada similar, e identificar estacionalidad para cada tipo de evento, se aplicó análisis jerárquico de agrupamientos. La matriz de similitud se estimó por medio del método de distancias euclidianas; posteriormente, el agrupamiento jerárquico se obtuvo aplicando el método para aglomeración de la mínima varianza de Ward. El número de grupos se determinó por medio de la matriz negativa de distancias cuadradas de los datos. El análisis se ejecutó utilizando la librería apcluster de la paquetería APCluster versión 1.4.8 de R Project (Bodenhofer *et al*., 2011). Se estimó el número de días con presencia y la frecuencia interanual de los remolinos, filamentos y de surgencias costeras; finalmente se obtuvo la persistencia interanual de la intrusión de la masa de agua tropical superficial. La evaluación de las variaciones interanuales de los procesos de mesoescala se realizó por medio de estimaciones modificadas

de anomalías estandarizadas, las cuales utilizan la mediana de los datos ya que es menos sensible a datos inusualmente bajos o altos en comparación con su media (Iglewicz y Hoaglin, 1993).

6.3 Eventos oceanográficos de mesoescala e índices climáticos

Para evaluar potenciales relaciones entre la frecuencia y número de días con presencia interanual de cada tipo de POM con eventos climáticos, se utilizó el Índice Multivariado de El Niño (MEI, por sus siglas en inglés), ya que integra variables como la TSM, la presión a nivel del mar, componentes del viento en superficie y radiación emitida de onda larga. Además, se utilizó el Índice de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés), ya que estima patrones de la variabilidad del clima en la cuenca del Pacífico norte incorporando anomalías de la TSM del océano Pacífico al norte de los 20°N (Davis, 1976; Mantua et al., 1997; Schneider y Cornuelle, 2005). Además de que éste índice controla un modo de la variabilidad ambiental asociada a los vientos en el GC (Bernal *et al*., 2001), y que algunas variables ambientales presentan coherencia con la tendencia del PDO y que la variabilidad de éstas está dominada por la interacción del PDO y el ENOS (Lluch-Cota *et al*., 2010). Ambos índices se encuentran disponibles en https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/. Se aplicó análisis de componentes principales (ACP) que realiza transformaciones lineales que redistribuyen la varianza, lo que posibilita conservar las dimensiones con la mayor varianza e ignorar las demás, cuando en efecto hay correlaciones significativas entre las variables originales (Jolliffe y Cadima, 2016). Además, permite identificar patrones ocultos en el set de datos e identificar correlaciones fundamentales entre las variables (Abdi y Williams, 2010). El ACP se aplicó por medio de la paquetería factoextra versión 1.0.7 (Kassambara y Mundt, 2021) y del paquete FactoMineR versión 1.34 (Lê *et al*., 2008) de R project. Los datos fueron estandarizados y el número de componentes principales para el análisis se limitó a los que sumaron el 70% de la varianza acumulada explicada y con eigenvalores mayores a 1.

6.4 Eventos oceanográficos de mesoescala y su relación con capturas de sardina monterrey

Se cuenta con dos series de datos pesqueros, una que contiene datos anuales de las capturas históricas de pelágicos menores, desde la temporada 1969/1970 hasta 2016/2017, que incluye

la captura total en toneladas por especie. Los datos fueron proporcionados por el grupo de pelágicos menores del Centro Regional de Investigación Acuícola y Pesquera de Guaymas. La segunda serie de datos contiene lances georreferenciados de captura de pelágicos menores de las temporadas 2002/2003, 2003/2004, 2012/2013, 2013/2014, 2017/2018 y 2018/2019, llevadas a cabo por una fracción de la flota cerquera de pelágicos menores en el Golfo de California.

Por lo tanto, se abordaron los análisis de acuerdo con la naturaleza de los datos pesqueros. En el primer caso, la serie de datos de los registros de captura anual de sardina monterrey, se analizaron con los datos de frecuencia y duración de los POM a partir del año con el que se cuenta con información de estos procesos (1998). Para el análisis de la asociación entre el ambiente y el recurso, se tomaron en cuenta algunas consideraciones, basadas en:

1. La captura de la sardina monterrey en el GC es un proxy del índice de abundancia de la especie (Hilborn y Walters, 1992; Nevárez-Martínez *et al*., 2019).
2. La abundancia es dependiente del éxito reproductivo y de reclutamiento, los cuales se ven afectados, entre otros factores, por cambios en el ambiente oceanográfico (Cury *et al*., 2000; Quattrocchi y Maynou, 2017).
3. Los estadios tempranos del ciclo de vida de la especie están expuestos a los efectos de los POM, los cuales se verán reflejados varios meses después en las capturas.

Tomando como base estos supuestos, la asociación entre los POM y las capturas se abordaron evaluando el ambiente en términos de los procesos de mesoescala durante el periodo reproductivo y de reclutamiento (PRR); por lo tanto, asumiendo un efecto sobre las etapas de huevo y larva de la especie. El PRR representa el periodo en el cual la especie comienza y culmina su reproducción en el GC, que va de noviembre a mayo, y que en su mayoría ocurre en el centro y sur del golfo (Hammann *et al*., 1998), sumado a la duración de las primeras etapas de vida de la especie evaluada por Martínez-Aguilar *et al*. (2005), que estiman que en promedio le toma al huevo alrededor de 18–35 días para alcanzar la etapa de larva tardía (Tabla 1).

Considerando que la temporada de pesca de pelágicos menores comienza en octubre, y finaliza entre agosto–septiembre del siguiente año, si se comienza con la temporada de pesca

1999/2000, la captura sería el resultado de los efectos aditivos que los procesos de mesoescala presentes durante noviembre de 1998 a mayo de 1999 tuvieron sobre el PRR, expresado como:

$$Captura_{99/00} = PRR_t \times (RC_t + RA_t + SC_t + F_t + I_t) \quad (1)$$

Dónde, t: periodo de noviembre 1998 a mayo 1999 (retraso temporal); PRR: periodo de reproducción y reclutamiento; RC: duración promedio de remolinos ciclónicos; RA: duración promedio de remolinos anticiclónicos; SC: frecuencia de surgencias costeras (número de procesos por quincena); F: duración promedio de filamentos; I: número de días con la presencia de intrusión de masa de agua.

El mismo procedimiento se aplicó para las siguientes temporadas de pesca (2000/2001–2016/2017), en el que durante la temporada 2000/2001, t corresponde al periodo de noviembre 1999 a mayo 2000 y así sucesivamente para las temporadas posteriores. Lo anterior es la representación de la unión temporal entre los procesos de mesoescala y las capturas subsecuentes.

Adicionalmente, por medio de R project se aplicó correlación cruzada entre las series temporales del número de días con presencia de POM y de capturas para explorar posibles asociaciones con o sin retraso entre las series; además de que se puede identificar posible colinealidad entre las variables predictoras (POM). Sin embargo, este método fue exploratorio y posee la limitante de que estima nada más relaciones o asociaciones lineales. Por lo tanto, la relación entre los POM y las capturas se estimó aplicando modelos aditivos generalizados (GAMs por sus siglas en inglés) (Hastie y Tibshirani, 1986), dado que la relación entre las variables predictoras y la captura es no lineal (Fig. 6) y sigue una distribución de tipo Poisson ya que los valores de captura son valores discretos positivos (Martínez-Rincón *et al*., 2019). Los valores de captura fueron transformados a logaritmo natural y, para evitar sobreajuste, el término de suavizado para cada predictor se estableció en tres.

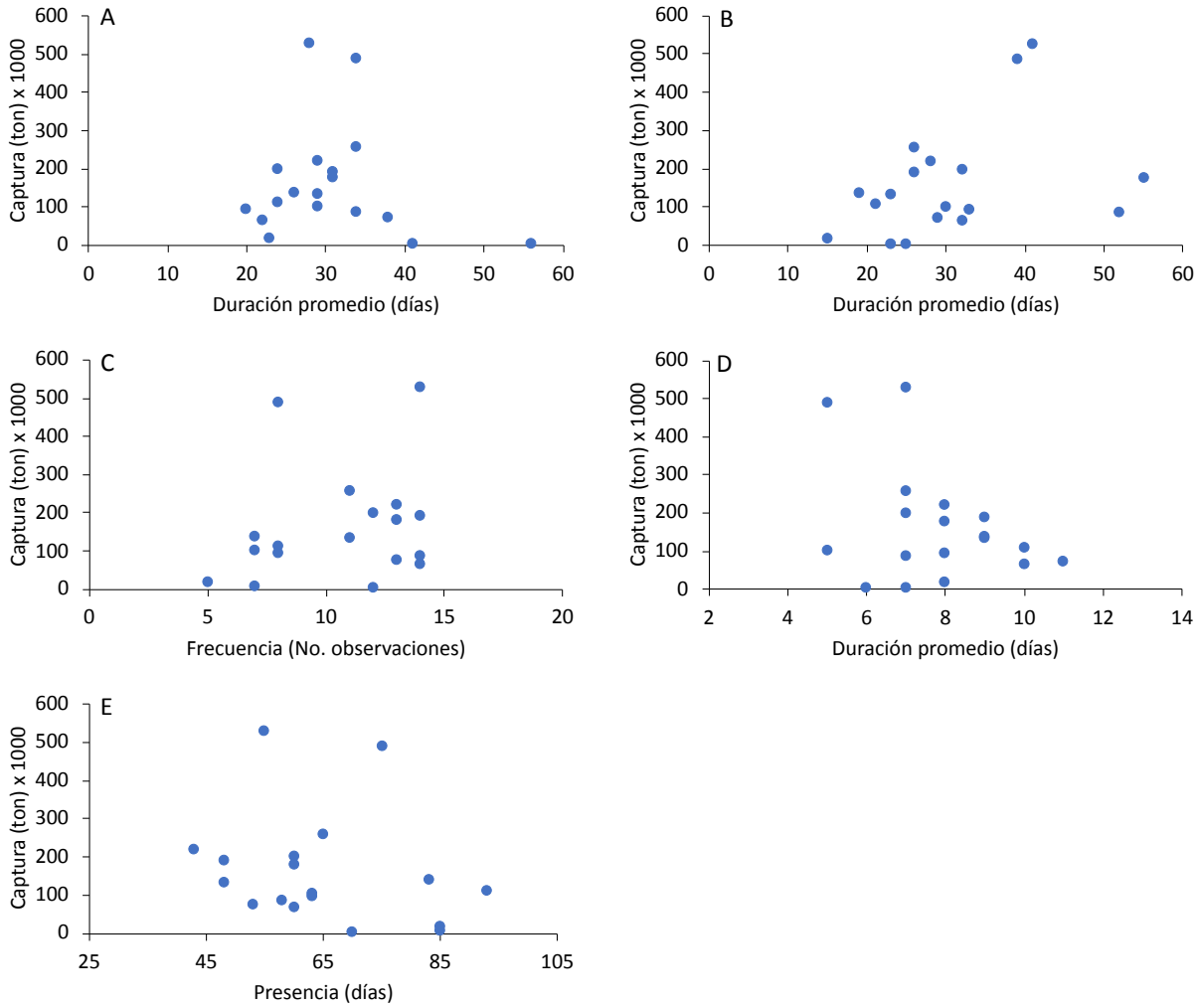


Figura 6. Relación entre la duración promedio de remolinos ciclónicos (A), de remolinos anticiclónicos (B), frecuencia de surgencias costeras (C), duración promedio de filamentos (D) y presencia de intrusión de masa de agua tropical superficial (E) con las capturas reportadas durante las temporadas 1999/2000–2015/2016 en el Golfo de California.

Para medir el efecto parcial de cada variable predictora sobre la captura, las curvas de respuesta del modelo aditivo mejor ajustado fueron examinadas para describir la relación de cada evento de mesoescala con el valor predicho de captura. El GAM se expresó como:

$$Log(y) = a + f_1(CiclónicoR) + f_2(AnticiclónicoR) + f_3(SurgenciaR) + f_4(FilamentoR) + f_5(IntrusiónR) \quad (2)$$

Dónde a = intercepto; f = función de suavizado (“thin plate regression spline”); R = retraso aplicado a la duración/frecuencia media de cada evento de mesoescala.

El análisis de modelos aditivos generalizados se llevó a cabo por medio del paquete mgcv versión 1.8-36 (Wood, 2017) de R Project. Una metodología de ajuste en la que se van incorporando variables predictoras una a una, conocida en inglés como “forward stepwise” se utilizó para seleccionar el mejor modelo basado en el criterio de información de Akaike (AIC) (Wood, 2017).

6.5 Análisis de capturas georreferenciadas

En el caso de los datos de lances georreferenciados, se estimó el porcentaje de lances efectivos y la captura de sardina monterrey cada cinco días, para que correspondiera con la temporalidad de los datos ambientales (TSM, Chl *a* y POM). Posteriormente, se estimó el porcentaje de lances efectivos bimensuales y anuales, como también la captura bimensual y anual como indicador indirecto de la abundancia de la sardina monterrey. Para identificar los lances asociados a POM, los lances agrupados cada cinco días se sobrepusieron a las imágenes de TSM y de Chl *a* correspondientes a las mismas fechas; asimismo, se extrajeron los valores puntuales de la TSM y de Chl *a* de cada lance. Se construyeron distribuciones de frecuencias bimensuales de los porcentajes de lances efectivos y de la captura de sardina monterrey con relación a la latitud y longitud de los lances. Una vez construidas las distribuciones, se identificó la variación espacial y temporal de los lances efectivos y de las capturas, y se estimaron sus localizaciones (latitudinal y longitudinal) medias por medio de centros de gravedad, empleando la siguiente fórmula (Abdelouahab *et al*., 2021):

$$\bar{X} = \frac{\sum_i fixi}{\sum_i fi} \qquad \bar{Y} = \frac{\sum_i fiyi}{\sum_i fi} \tag{3}$$

$\bar{X}$ y $\bar{Y}$ = longitud y latitud media, respectivamente; fi = porcentaje de lance efectivo/captura de sardina monterrey en el lance i; xi y yi = longitud y latitud respectivamente, de cada lance.

Además, se construyeron distribuciones de frecuencias del porcentaje de lances efectivos y de las capturas con relación a la TSM y Chl *a* de cada lance. Posteriormente, se determinó el intervalo óptimo de TSM y Chl *a* en el que se registraron los mayores porcentajes de lances

efectivos y de capturas, basándose en los criterios de Li *et al*. (2014) e Yu *et al*. (2016). Estos establecen que, dentro de una escala de 0.1 a 1.0, un valor a partir de 0.6 es considerado como óptimo para varias especies de peces pelágicos, por lo tanto, intervalos de TSM y de Chl *a* que representen un valor igual o mayor a 0.6 de lances efectivos y de captura fueron considerados como óptimos. Su estimación se realizó por medio de la siguiente expresión (Yu *et al*., 2016):

$$RO_{lance} = \frac{Lance_i}{Lance_{i,max}} \quad ; \quad RO_{captura} = \frac{Captura_i}{Captura_{i,max}} \tag{4}$$

Dónde $Lance_i$ y $Captura_i$ = total del porcentaje de lances efectivos y de capturas, respectivamente, que se encuentran en el $i$vo intervalo de la variable ambiental; $Lance_{i,max}$ y $Captura_{i,max}$ = valores máximos del porcentaje de lances efectivos y de capturas en el $i$vo intervalo de la variable ambiental.

Posteriormente, se determinó si los lances efectivos y las capturas que ocurrieron en POM presentaron intervalos óptimos de TSM y de Chl *a*, de tal manera que se pudiera inferir si estos procesos representaron sitios idóneos para la especie en términos de estas dos variables ambientales.

7. RESULTADOS

7.1 Análisis de los procesos oceanográficos de mesoescala (1998–2019) en el Golfo de California

La Fig.7 muestra imágenes de clorofila *a* en la que se exhiben gradientes de pigmentos que facilitan la identificación de los procesos de mesoescala en la región norte del GC (NGC); en un año típico se observa que los remolinos anticiclónicos están presentes durante el otoño e invierno y que la concentración de pigmentos dentro de estos remolinos es mayor cuándo la mezcla vertical es más intensa y cuando aumenta la frecuencia de surgencias costeras. Por otro lado, los remolinos ciclónicos prevalecen durante el verano. Justo antes de la formación de remolinos ciclónicos en el verano, largos filamentos se originan de la región de las grandes islas.

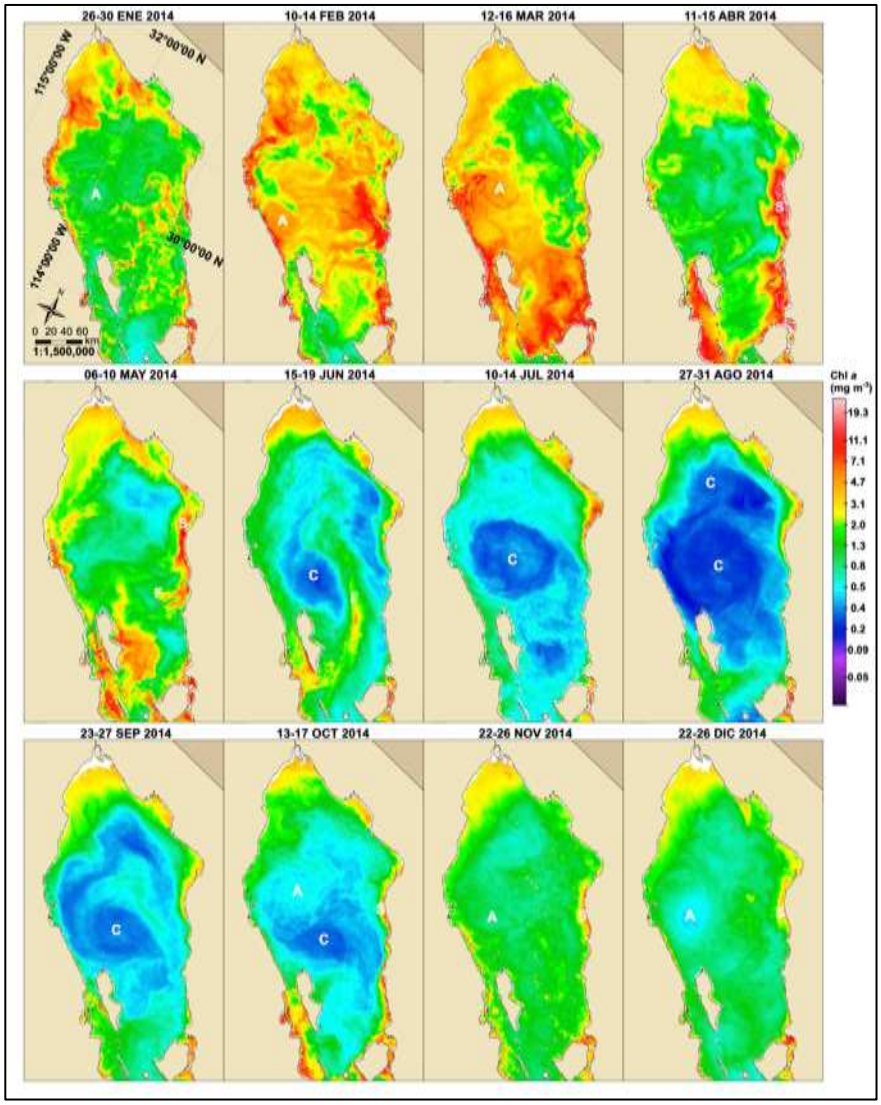
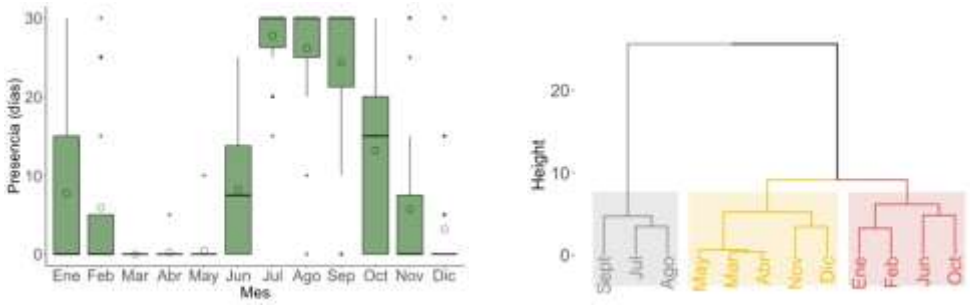


Figura 7. Imágenes satelitales de clorofila a (mg m-3), mostrando un año típico con la presencia de procesos de mesoescala en el norte del Golfo de California. (A) remolinos anticiclónicos, (C) remolinos ciclónicos, (S) surgencias costeras, (F) filamentos.

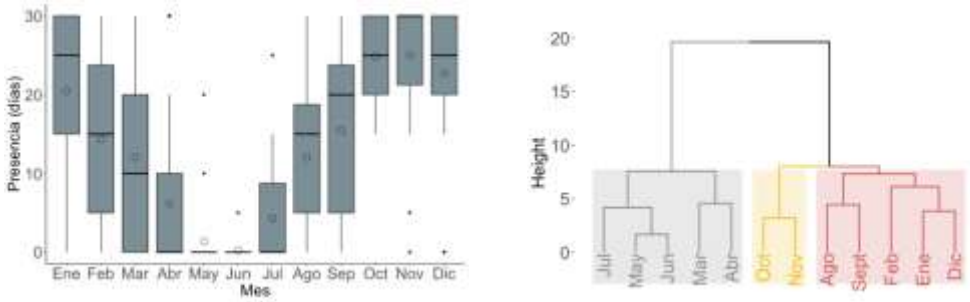
Durante el periodo de estudio, en el NGC se identificaron 44 remolinos ciclónicos, presentándose dos remolinos por año durante la mayoría de los años de estudio. Alrededor del 82% de la presencia de estos remolinos ocurrió de junio a octubre. El análisis de clústeres agrupa los meses de julio a septiembre con el mayor número de días con presencia, seguidos de junio, octubre, enero y febrero. Se identificaron 99 remolinos anticiclónicos, los cuales mostraron mayor actividad durante octubre a enero, lo que corresponde al 57% del total, seguida de septiembre y febrero. De acuerdo con el análisis de agrupamientos, los meses de octubre y noviembre presentaron el mayor número de días con presencia de estos remolinos, seguidos de agosto, septiembre y diciembre a febrero. Los procesos de surgencias presentaron

mayor número de días con presencia durante octubre a mayo (93% de la frecuencia total). El análisis de agrupamientos mostró que los de días con presencia de estos procesos se puede dividir en tres periodos: uno con muy alto número de días con presencia de octubre a marzo, uno con muy bajo número de días con presencia de julio a septiembre, y un periodo intermedio de abril a junio. Se identificaron filamentos durante todos los meses del año; sin embargo, fue durante mayo a julio cuando se presentó el mayor número de días con presencia, representando alrededor del 59% del total (Fig. 8).

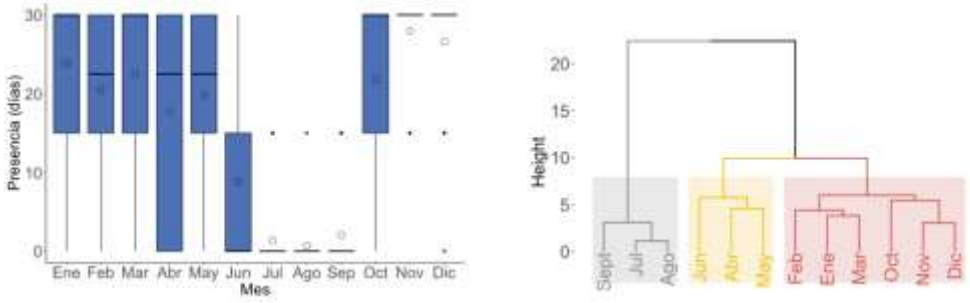
Remolinos ciclónicos



Remolinos anticiclónicos



Surgencias costeras



Filamentos

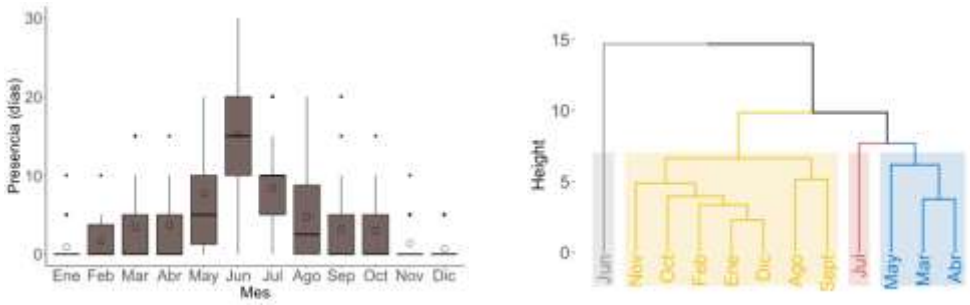
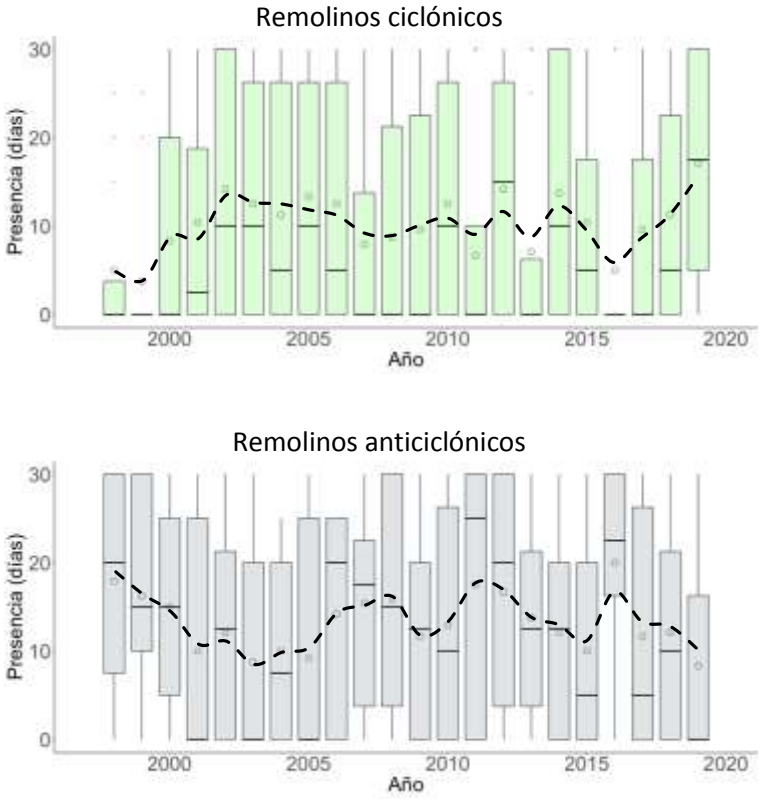


Figura 8. Comportamiento anual (panel izquierdo) y análisis de agrupamientos (panel derecho) del número de días con presencia de procesos oceanográficos de mesoescala en el norte del Golfo de California.

El número de días con la presencia de estos procesos en el NGC registró fluctuaciones interanuales (Fig.9); los remolinos y las surgencias costeras fueron los procesos que presentaron mayores oscilaciones. Sin embargo, esta variabilidad no presentó diferencias estadísticamente significativas, a pesar de que los remolinos ciclónicos estuvieron presentes muy pocos días en 1998, 1999 y 2016. Las líneas discontinuas representan la tendencia con media móvil de 12 meses, en la que se observa que los procesos presentan caídas e incrementos durante el periodo de estudio.



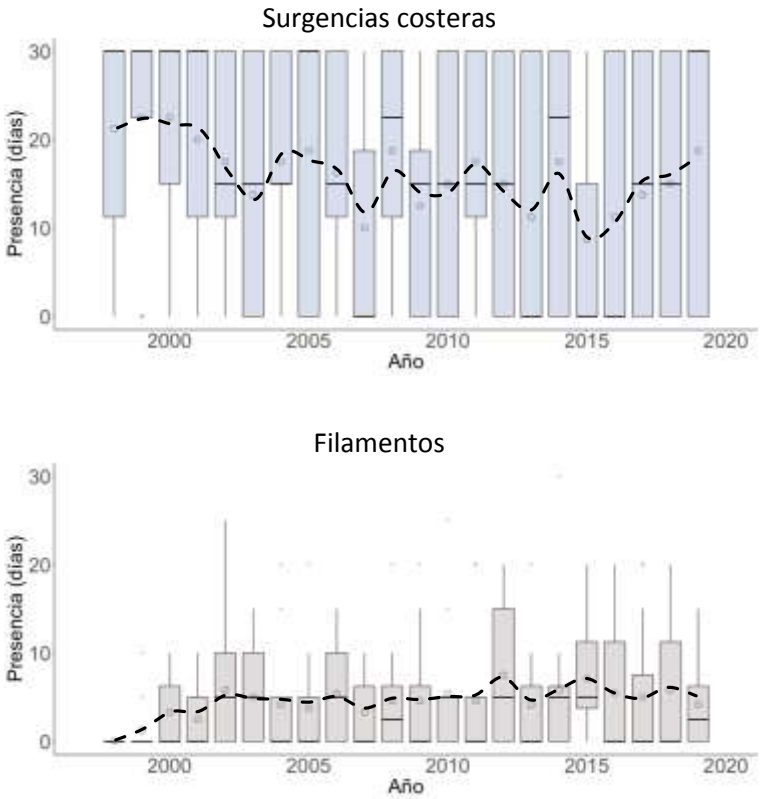


Figura 9. Comportamiento interanual del número de días con presencia de procesos oceanográficos de mesoescala en el norte del Golfo de California. La línea punteada indica la tendencia con promedio móvil de 12 meses.

Las anomalías estandarizadas mostraron una alta variabilidad interanual en la frecuencia, número de días con presencia y duración promedio de los procesos de mesoescala identificados en la región norte. En particular, la duración promedio de los remolinos ciclónicos mostró altos valores en 2002, 2008 y 2009; mientras que la frecuencia de los remolinos anticiclónicos en 2003, 2005, 2009 y 2018, las surgencias costeras en 2015, y los filamentos en 1998, 2003 y 2015 presentaron fluctuaciones significativas a lo largo de la serie (Fig. 10).

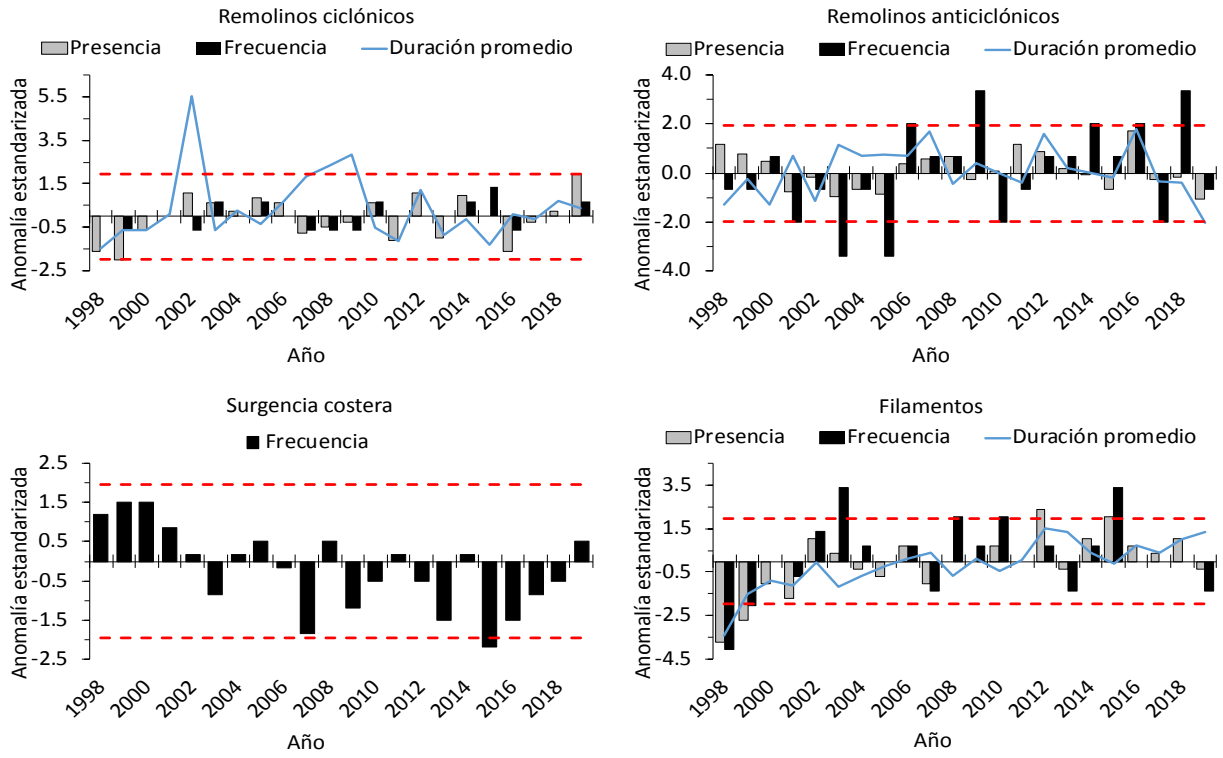


Figura 10. Anomalías estandarizadas del número de días con la presencia, frecuencia y duración promedio de los procesos de mesoescala identificados en la región norte del Golfo de California durante 1998–2019. Valores inferiores o superiores a la línea punteada roja representan las anomalías estandarizadas a un 95% de nivel de confianza ($p < 0.05$).

La tabla 2 muestra la frecuencia, la duración mínima, la duración máxima y la duración promedio de los remolinos, surgencias costeras y filamentos identificados en el NGC durante el periodo 1998–2019. La duración máxima (180 días) de un remolino ciclónico tuvo lugar en el año 2019, mientras que la duración máxima (130 días) de un remolino anticiclónico se registró en el 2011. La duración máxima (35 días) de un filamento ocurrió en el 2014, mientras que las surgencias costeras presentaron su menor frecuencia en el 2015.

Tabla 2. Frecuencia, duración mínima, máxima y promedio de procesos oceanográficos de mesoescala en el norte del Golfo de California.

Eventos oceanográficos de mesoescala en el norte del Golfo de California													
	Remolino ciclónico				Remolino anticiclónico				Surgencia costera	Filamento			
	Fr	Dmi	Dma	Dp	Fr	Dmi	Dma	Dp	Frecuencia (No. de procesos)	Fr	Dmi	Dma	Dp
1998	2	25	40	33	4	30	100	54	17	0	0	0	0
1999	1	–	50	–	4	20	75	49	18	3	5	5	5
2000	2	30	70	50	5	15	80	36	18	6	5	10	7
2001	2	35	95	65	3	15	75	38	16	5	5	10	6
2002	1	–	175	–	4	15	50	36	14	8	5	30	9
2003	3	40	55	50	2	35	70	53	11	11	5	10	6
2004	2	40	95	68	4	15	40	30	14	7	5	20	7
2005	3	25	110	55	2	15	95	55	15	6	5	20	8
2006	2	30	125	78	6	25	40	29	13	7	5	15	9
2007	1	–	100	–	5	15	105	37	8	4	5	15	10
2008	1	–	110	–	5	15	120	38	15	9	5	15	7
2009	1	–	120	–	7	15	35	21	10	7	5	15	9
2010	3	15	100	52	3	15	105	53	12	9	5	25	8
2011	2	30	50	40	4	20	130	54	14	6	5	20	9
2012	2	50	125	88	5	15	80	44	12	7	5	25	13
2013	2	35	55	45	5	20	55	33	9	4	5	20	13
2014	3	35	95	60	6	15	45	24	14	7	5	35	10
2015	4	15	100	36	5	15	40	24	7	11	5	20	9
2016	1	–	65	–	6	15	105	43	9	6	5	30	11
2017	2	15	105	60	3	25	70	47	11	6	5	15	10
2018	2	15	125	78	7	15	50	28	12	6	10	15	12
2019	3	15	180	70	4	15	45	25	15	4	10	15	13

Notas. Fr: Frecuencia (no. de procesos), Dmi: Duración mínima (días), Dma: Duración máxima (días), Dp: Duración promedio (días).

La Fig. 11 representa un año con condiciones típicas en el CGC; en esta región se observa una serie de remolinos con diferente sentido de rotación. La concentración de Chl *a* contenida en los remolinos depende de la temporada del año, ya que los remolinos de verano muestran bajas concentraciones de pigmentos, independientemente si son ciclónicos o anticiclónicos, mientras que los remolinos presentes durante el periodo con alta frecuencia de surgencias costeras contienen mayores concentraciones de Chl *a*. También se observan filamentos que se originan en la zona con influencia de surgencias costeras (costa oriental); estos filamentos muchas veces adquirían vorticidad para eventualmente formar un remolino.

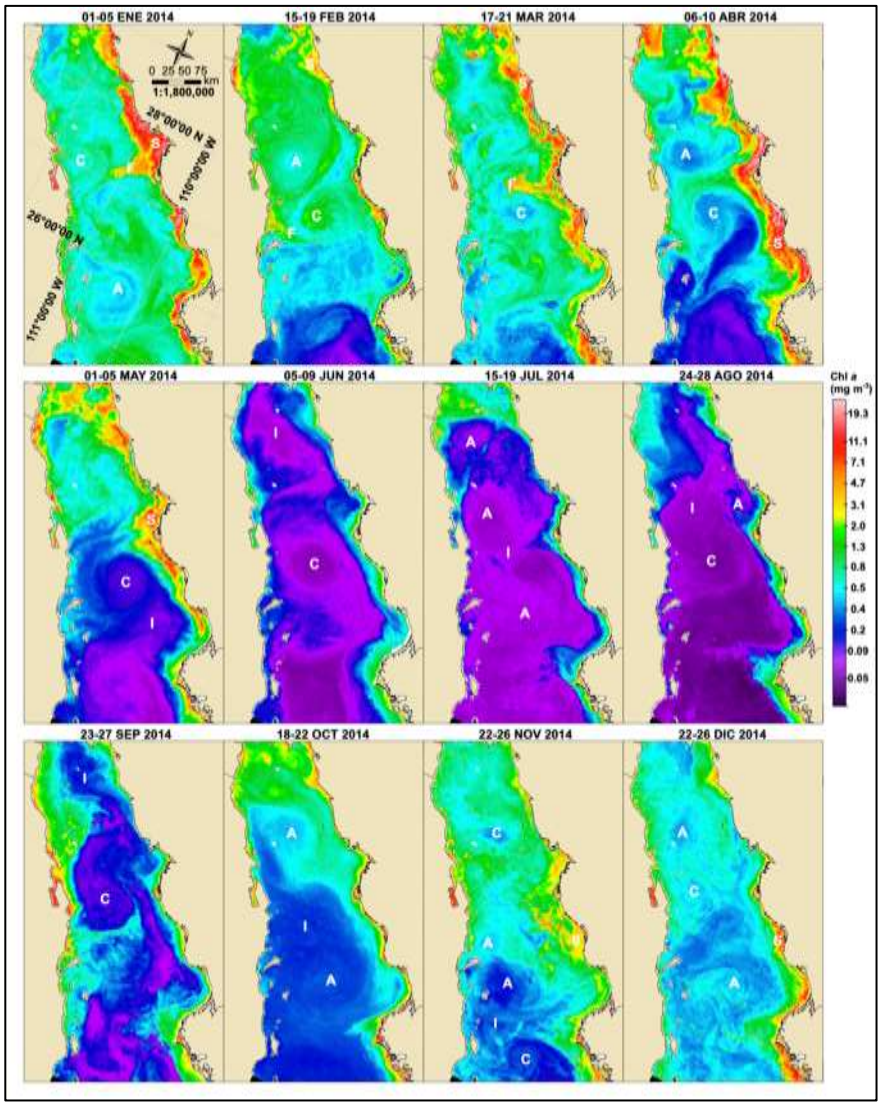
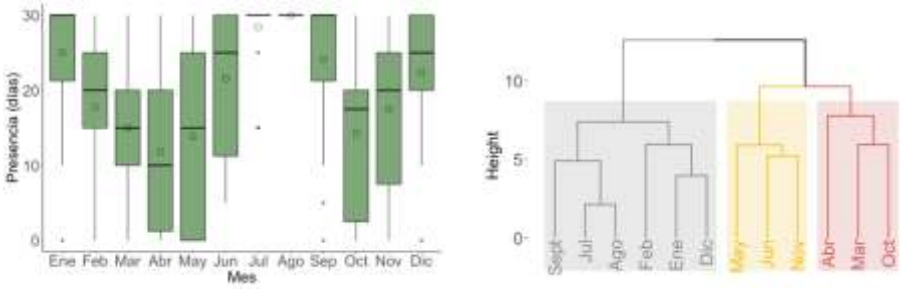


Figura 11. Imágenes satelitales de clorofila a (mg m-3), mostrando un año típico con la presencia de procesos de mesoescala en el centro del Golfo de California. (A) remolinos anticiclónicos, (C) remolinos ciclónicos, (S) surgencias costeras, (F) filamentos, (I) intrusión masa de agua.

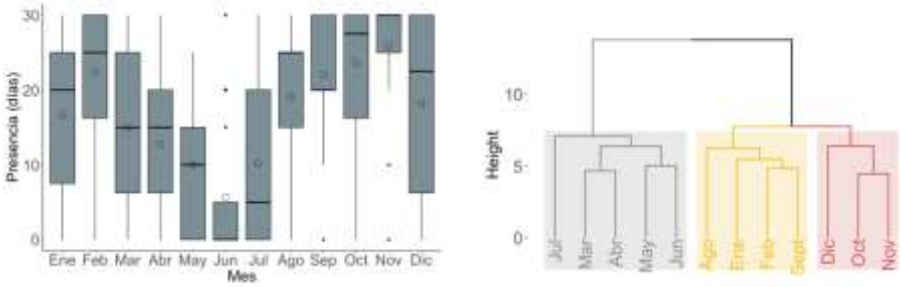
En la región central del golfo se observó un total de 209 remolinos ciclónicos. La Fig. 12 muestra que el mayor número de días con presencia fue de julio a septiembre y de diciembre a febrero, y un menor número de días con presencia en marzo, abril y octubre, tal como lo exhibe el análisis de agrupamientos. Un total de 203 remolinos anticiclónicos fueron identificados, exhibieron mayor número de días con presencia de octubre a diciembre y menor días con presencia de abril a julio. El análisis de agrupamientos muestra que el número de días con presencia de estos remolinos se puede dividir en periodos con muy alto, intermedio y bajo número de días con presencia (Fig. 12). En cuanto a la frecuencia de surgencias costeras, se

identificaron 271 procesos. Exhibieron mayor número de días con presencia de noviembre a abril, representando el 80% del total. De acuerdo con el análisis de agrupamientos se muestran tres periodos (alto, medio y bajo número de días con presencia) (Fig. 12). Un total de 298 filamentos fueron identificados, los cuales exhibieron mayor (menor) número de días con presencia durante marzo y abril (agosto a octubre). Se observaron tres periodos del número de días con presencia de estos procesos (Fig. 12): uno alto (marzo a mayo), uno intermedio (noviembre, enero y febrero) y uno bajo (junio a octubre). La intrusión de masa de agua se identificó en todos los años del periodo de estudio. Exhibió un mayor (menor) número de días con presencia de junio a octubre (diciembre a abril), y con número intermedio de días con presencia en mayo y noviembre (Fig. 12).

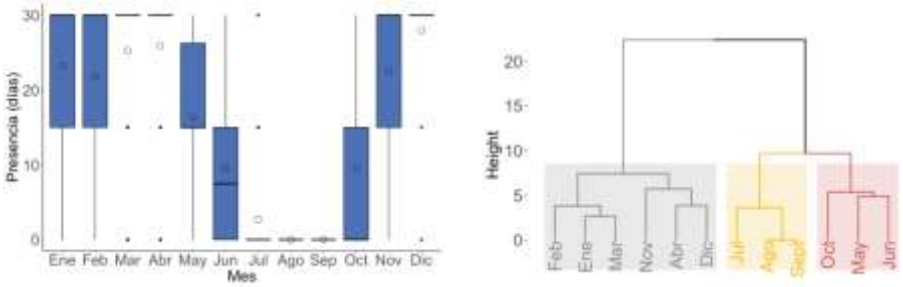
Remolinos ciclónicos



Remolinos anticiclónicos



Surgencias costeras



Filamentos

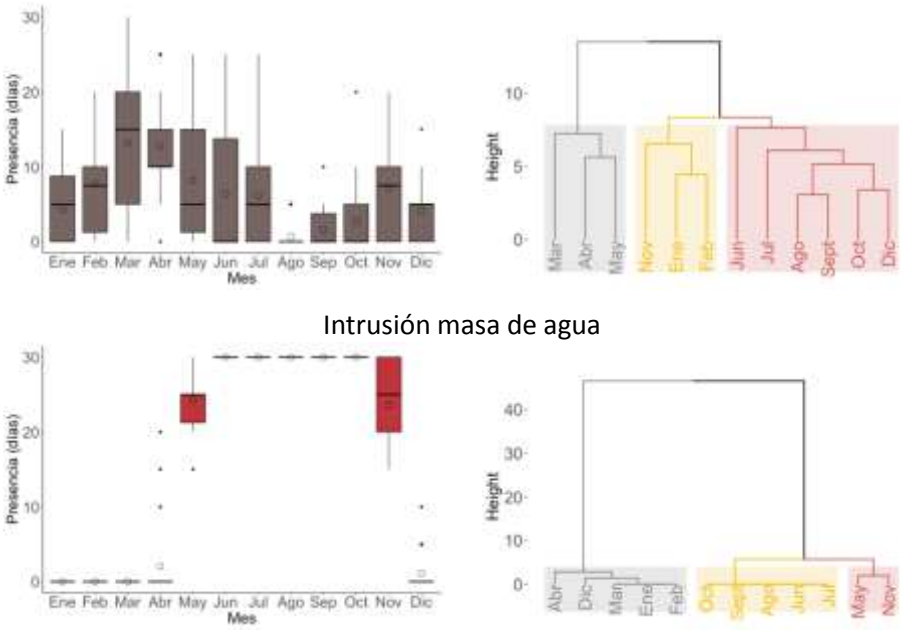
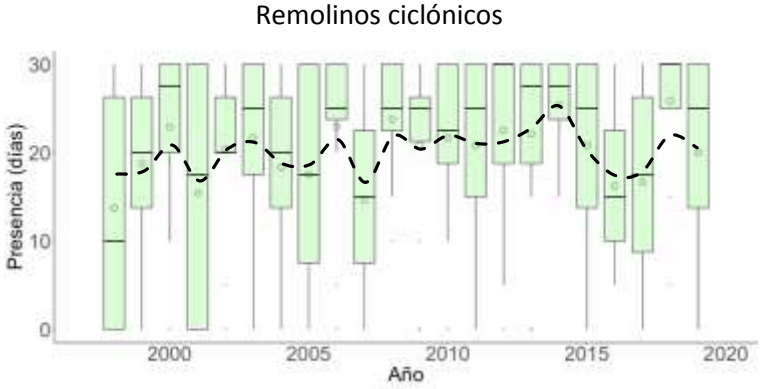
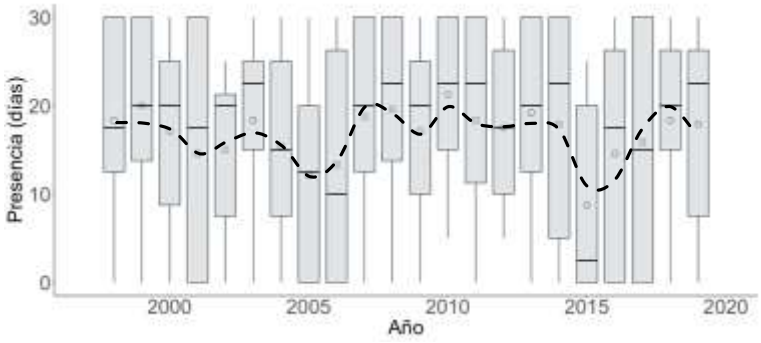


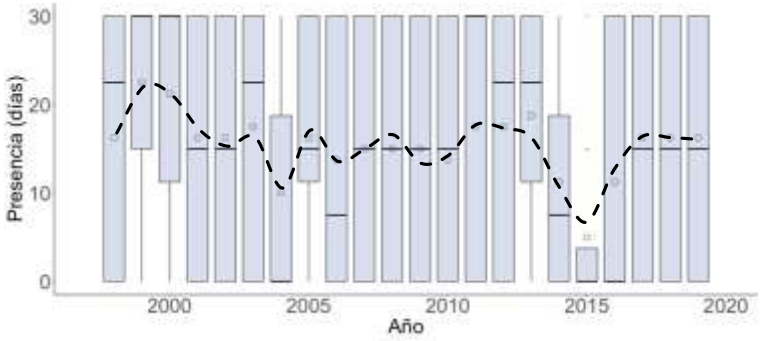
Figura 12. Comportamiento anual (panel izquierdo) y análisis de agrupamientos (panel derecho) del número de días con presencia de procesos oceanográficos de mesoescala en el centro del Golfo de California.

La Fig. 13 presenta el comportamiento interanual del número de días con presencia de cada uno de los procesos en esta región central del golfo, junto con la tendencia de medias móviles de 12 meses. Se aprecian las fluctuaciones a lo largo del periodo de estudio, con aumentos y declives notables de los remolinos, surgencias y filamentos. Sin embargo, solamente el número de días con presencia de surgencias costeras presentó diferencias estadísticamente significativas ($p = 0.006$), entre los años 1999, 2000 y 2013 (alto número de días con presencia) con el año 2015 (muy bajo número de días con presencia).

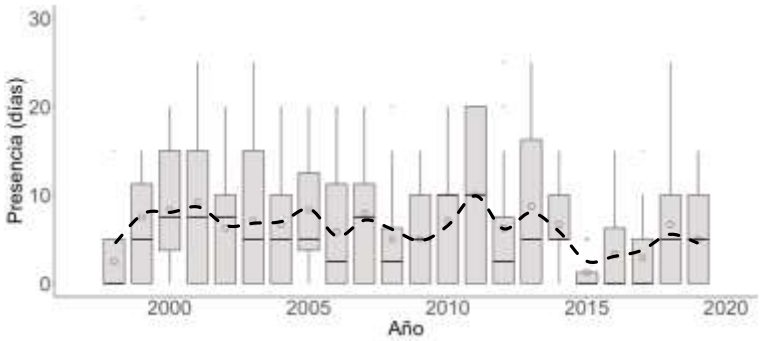




Surgencias costeras



Filamentos



Intrusión masa de agua

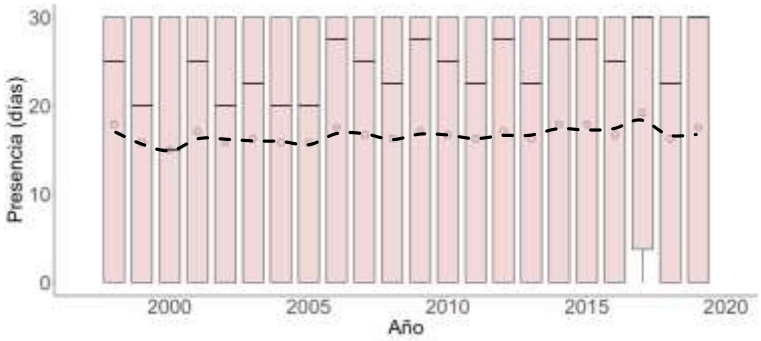
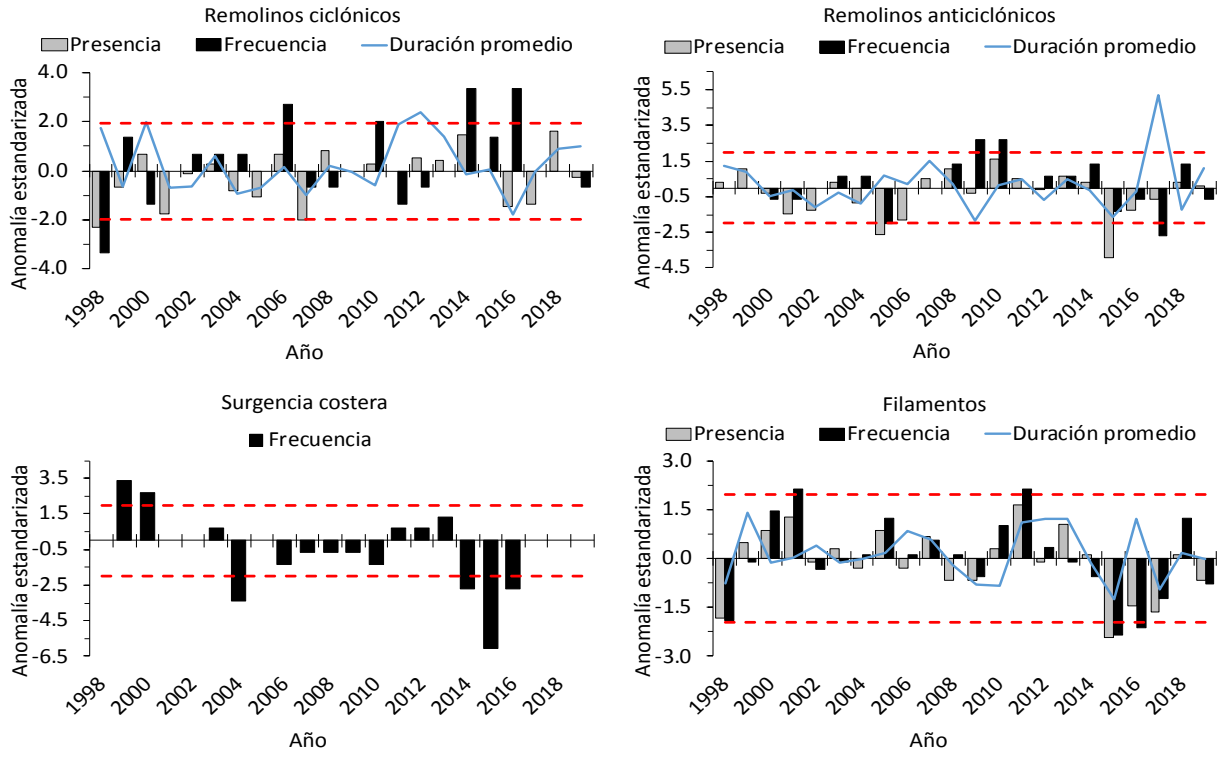


Figura 13. Comportamiento interanual del número de días con presencia de procesos oceanográficos de mesoescala en el centro del Golfo de California. La línea punteada indica la tendencia con promedio móvil de 12 meses.

Se observó una alta variabilidad interanual en la frecuencia, el número de días con presencia y en la duración promedio de los procesos de mesoescala identificados en la región central del golfo. El número de días con presencia en 1998 y 2007, la frecuencia en 1998, 2006, 2010, 2014 y 2016, y la duración promedio en 2000 y 2012 de los remolinos ciclónicos, presentaron fluctuaciones significativas. Se presentaron variaciones importantes del número de días con presencia en 2005 y 2015, de la frecuencia en 2005, 2009, 2010 y 2017, y de la duración promedio en 2017 de los remolinos anticiclónicos. La frecuencia de surgencias costeras mostró anomalías positivas significativas en 1999 y 2000, mientras que se presentaron anomalías negativas en 2004, 2014, 2015 y 2016. Los filamentos presentaron anomalías importantes en el número de días con presencia en 2015 y en su frecuencia en 2001, 2011, 2015 y 2016. El número de días con la presencia de intrusión de agua tropical superficial mostró una anomalía significativa en 2017 (Fig. 14).



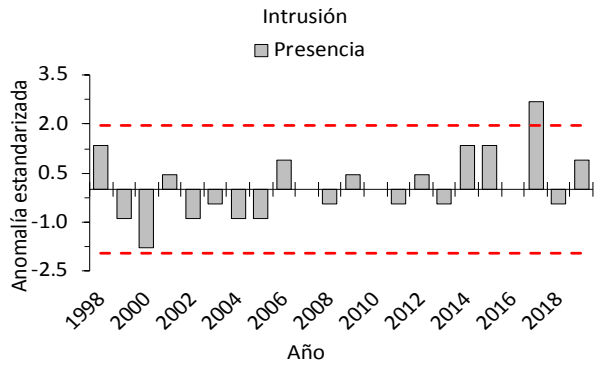
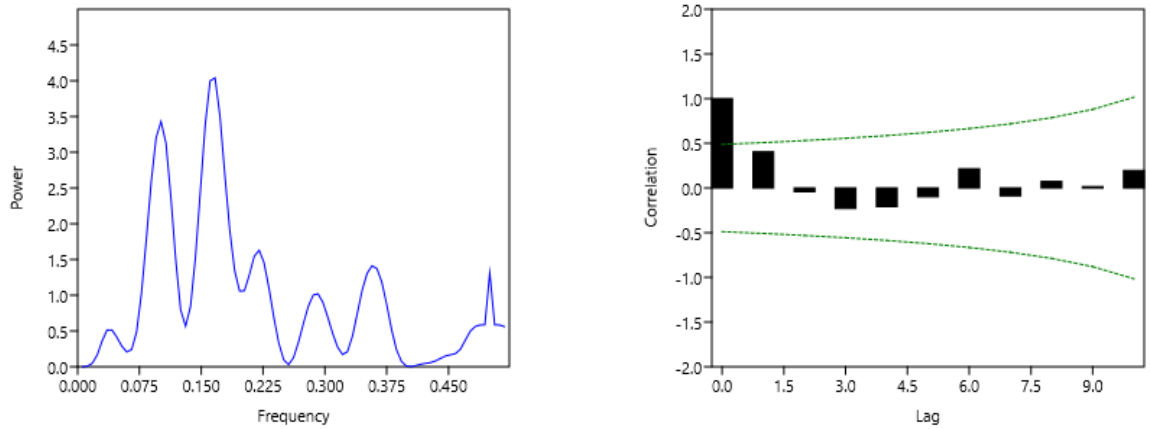


Figura 14. Anomalías estandarizadas del número de días con presencia, frecuencia y duración promedio de los procesos de mesoescala identificados en la región centro del Golfo de California durante 1998–2019. Valores inferiores o superiores a la línea punteada roja representan las anomalías estandarizadas a un 95% de nivel de confianza ($p < 0.05$).

Además, por medio de métodos basados en el algoritmo del periodograma de Lomb del paquete estadístico Past, se exploró la presencia de ciclos en las series interanuales de los procesos. En algunos casos se encontraron ciclos importantes en la serie de surgencias costeras (6 y 9 años) y en la serie de la intrusión de la masa de agua tropical (3 y 8 años) en el CGC (Fig. 15). Sin embargo, al contrastar el valor del poder espectral de los picos en ambas series, contra la hipótesis nula de que los valores de los datos son ruido Gaussiano independiente "ruido blanco", éstos no fueron significativos ($p>0.05$). Adicionalmente, se realizó análisis de autocorrelación a ambas series (Fig 15), en el que se obtienen los intervalos de confianza de la aleatoriedad al 95% "ruido blanco" (líneas verdes) para estimar la significancia de cada retraso o "lag". Se observó que ningún retraso mostró significancia, lo que refuerza lo obtenido por el análisis espectral, de que no hay periodicidad significativa en estas dos series. Se sugiere entonces el monitoreo continuo de estas variables para ampliar las series y estimar ciclos con mayor certidumbre.

Surgencias costeras



Intrusión masa de agua tropical superficial

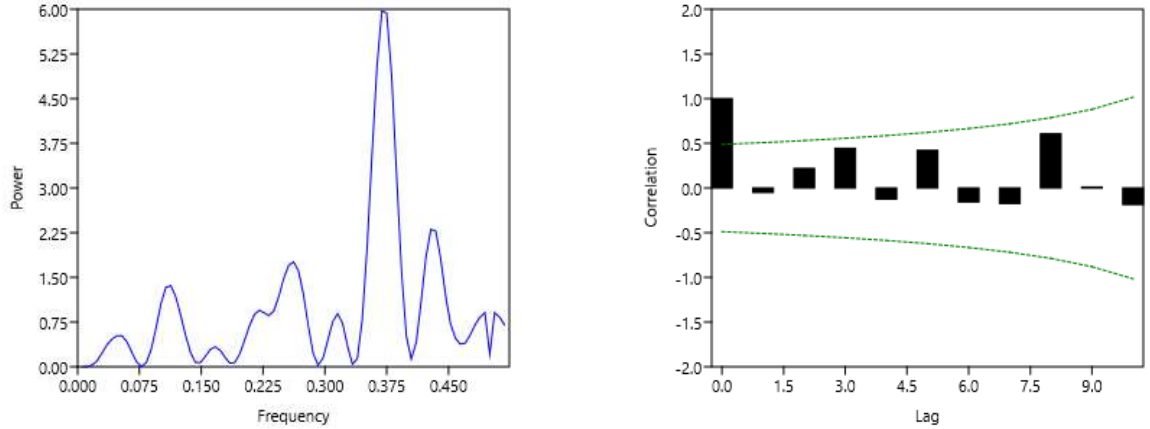


Figura 15. Periodograma (panel izquierdo) y autocorrelación (panel derecho) de la serie de surgencias costeras y de la intrusión de la masa de agua tropical superficial en la región centro del Golfo de California.

En la tabla 3 se muestra que la mayor frecuencia de remolinos ciclónicos se presentó en 2014 y 2016, mientras que la máxima duración de este evento ocurrió en 2018. La mayor frecuencia de remolinos anticiclónicos se exhibió en 2009 y 2010, y la máxima duración de un remolino anticiclónico se presentó en 2017. Las mayores frecuencias de surgencias costeras ocurrieron en 1999 y 2000, mientras que la menor fue en 2015. Los filamentos se presentaron con mayor frecuencia en 2001 y 2011 y la mayor duración se exhibió en el 2013. Por otra parte, la menor duración de la intrusión de masa de agua fue en el 2000 y la más alta se observó en 2017.

En la región SGC en el año 2014, como se observa en la Fig. 16, se identificaron una serie de remolinos ciclónicos y anticiclónicos; sin embargo, ese año fue atípico en la región debido a la baja frecuencia de surgencias costeras, filamentos y baja productividad primaria, mientras que se presentó una alta persistencia de la intrusión de masa de agua. En esta región, un total de 283 remolinos ciclónicos fueron observados, el menor número de días con presencia se observó en octubre y noviembre, mientras que el resto del año el número de días con presencia es similar, con picos de julio a septiembre, como se aprecia en el análisis de agrupamientos (Fig. 17); a partir del 2008, el número de días con presencia de estos procesos se incrementó particularmente en abril y mayo. Se identificaron 229 remolinos anticiclónicos que exhibieron alto número de días con presencia a lo largo del año, con excepción de junio y julio, como se aprecia en el análisis de agrupamientos. Por otro lado, se identificaron 203 procesos de surgencias, el número de días con presencia se puede dividir en tres periodos: uno alto (enero a marzo), uno bajo (julio a octubre) e intermedio el resto de los meses (Fig. 17). Los filamentos identificados en esta región fueron 164, los cuales exhibieron mayor número de días con presencia en marzo y abril. El número de días con presencia de estos procesos se puede dividir en dos periodos: alto (enero a mayo) y bajo (junio a noviembre). Por otro lado, la intrusión de masa de agua presentó su persistencia más baja en enero y febrero y la más alta de mayo a noviembre (Fig. 17).

Tabla 3. Frecuencia, duración mínima, máxima y promedio de procesos oceanográficos de mesoescala en el centro del Golfo de California.

Eventos oceanográficos de mesoescala en el centro del Golfo de California

	Remolino ciclónico				Remolino anticiclónico				Surgencia costera	Filamento				Intrusión masa de agua
	Fr	Dmi	Dma	Dp	Fr	Dmi	Dma	Dp	Frecuencia (No. de procesos)	Fr	Dmi	Dma	Dp	Duración (días)
1998	4	20	105	54	9	20	75	41	13	5	5	10	6	220
1999	11	20	75	33	9	15	70	39	18	13	5	25	10	195
2000	7	20	130	56	8	15	80	30	17	20	5	15	7	185
2001	9	15	90	32	8	15	55	33	13	23	5	25	8	210
2002	10	15	110	33	9	15	40	26	13	12	5	20	8	195
2003	10	15	85	44	10	15	60	32	14	13	5	15	7	200
2004	10	15	100	30	10	15	60	28	8	14	5	20	8	195
2005	9	15	75	32	6	15	80	38	13	19	5	25	8	195
2006	13	15	110	40	9	15	60	34	11	14	5	25	9	215
2007	8	20	45	29	9	15	75	43	12	16	5	30	9	205
2008	8	15	110	40	11	15	75	35	12	14	5	15	7	200
2009	9	15	65	38	13	15	40	22	12	11	5	10	6	210
2010	12	15	95	33	13	15	95	34	11	18	5	10	6	205
2011	7	15	130	55	9	15	80	36	14	23	5	25	10	200
2012	8	15	120	59	10	15	65	29	14	15	5	30	10	210
2013	9	20	140	51	10	15	95	36	15	13	5	40	10	200
2014	14	15	155	37	11	15	65	32	9	11	5	15	7	220
2015	11	15	65	39	7	15	40	23	4	3	5	5	5	220
2016	14	15	45	23	8	15	55	32	9	4	5	15	10	205
2017	9	15	75	38	5	20	130	66	13	8	5	10	6	235
2018	9	15	195	46	11	15	45	25	13	19	5	25	8	200
2019	8	15	150	47	8	15	100	40	13	10	5	15	8	215

Notas. Fr: Frecuencia (no. de procesos), Dmi: Duración mínima (días), Dma: Duración máxima (días), Dp: Duración promedio (días)

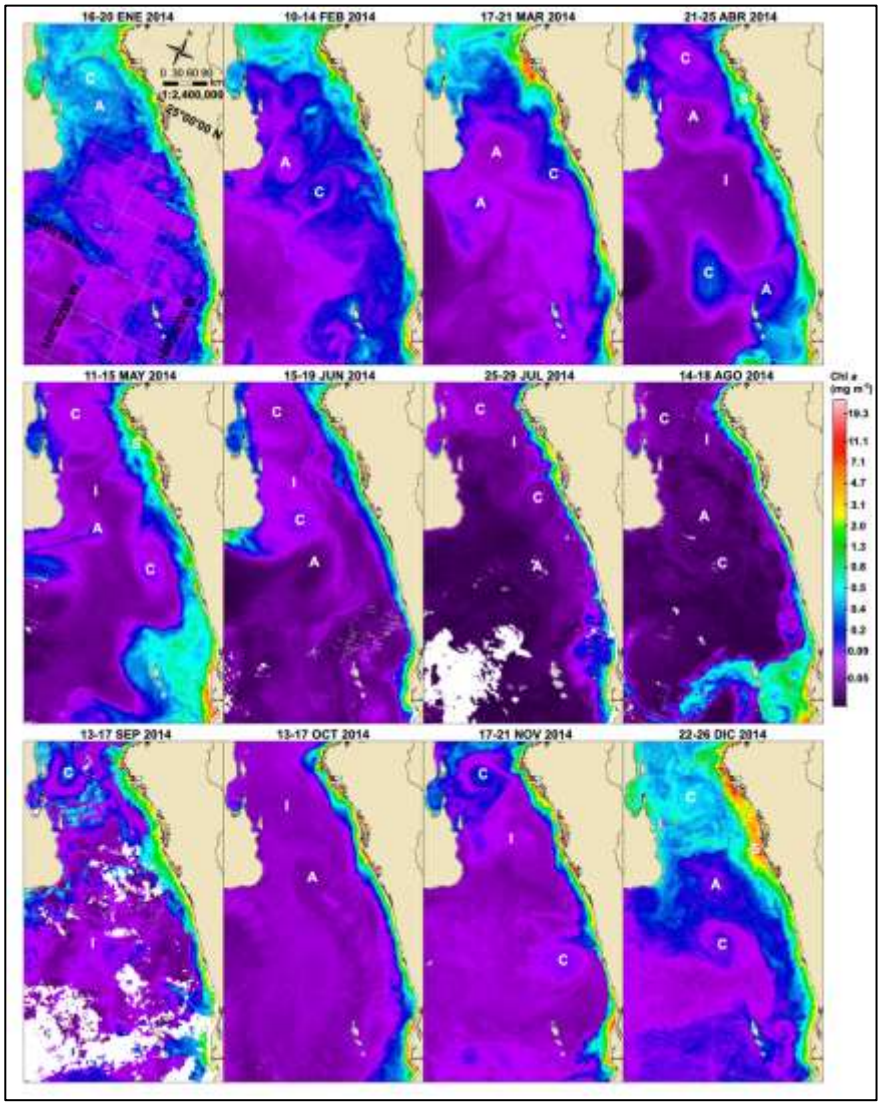
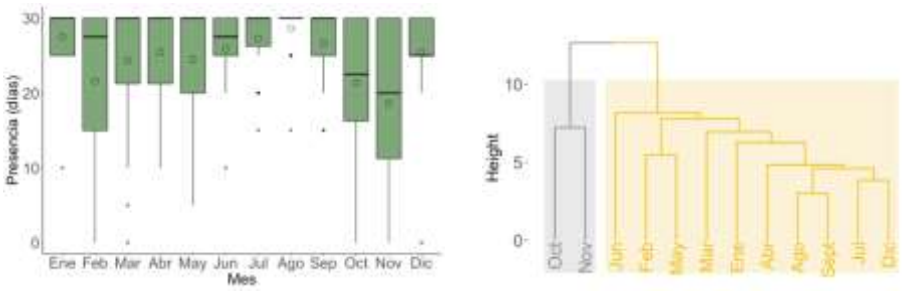


Figura 16. Imágenes satelitales de clorofila a (mg m-3), mostrando un año típico con la presencia de procesos de mesoescala en el sur del Golfo de California. (A) remolinos anticiclónicos, (C) remolinos ciclónicos, (S) surgencias costeras, (F) filamentos, (I) intrusión masa de agua.

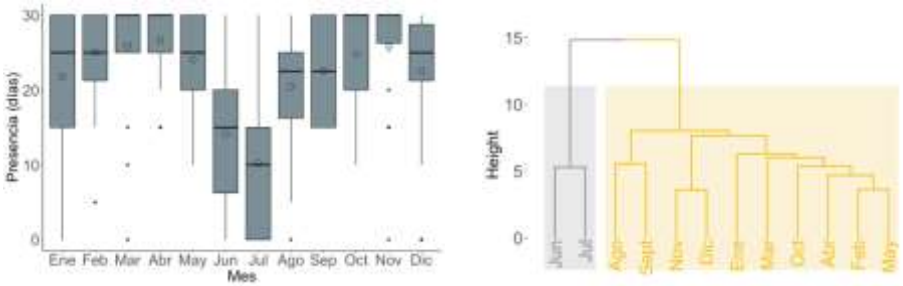
En la región sur (Fig. 18), destaca la tendencia descendente del número de días con presencia interanual de remolinos ciclónicos en el periodo 2000 a 2007, para luego presentarse una tendencia ascendente de 2007 a 2014. Las surgencias costeras mostraron diferencias estadísticamente significativas en el número de días con presencia, donde los años con un alto número de días con presencia, como 1999 y 2007, presentaron diferencias respecto de 2015. Además, por medio de la tendencia de medias móviles, se aprecia la reducción del número de días con presencia interanual, sobresaliendo 2014 y 2015 con muy baja ocurrencia de este evento. Los filamentos mostraron, por medio de la tendencia de medias móviles, cierta

periodicidad, en la que entre ciclos de alrededor de 5 años se reducen notablemente su ocurrencia (Fig. 18).

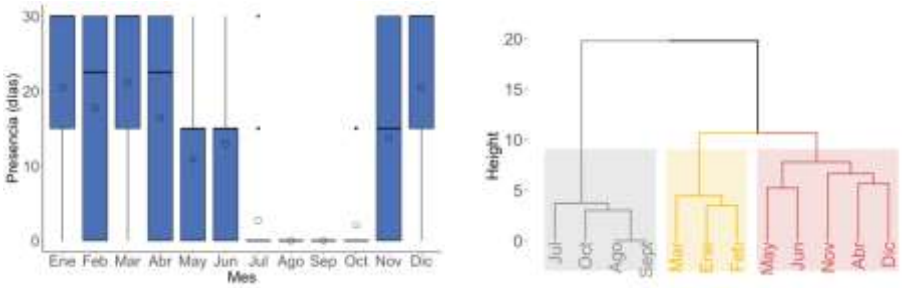
Remolinos ciclónicos



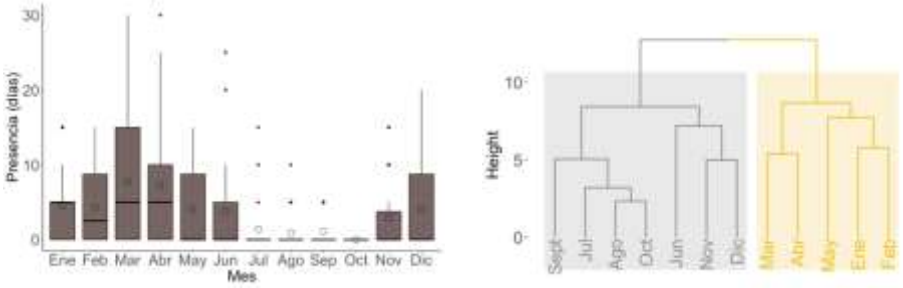
Remolinos anticiclónicos



Surgencias costeras



Filamentos



Intrusión masa de agua

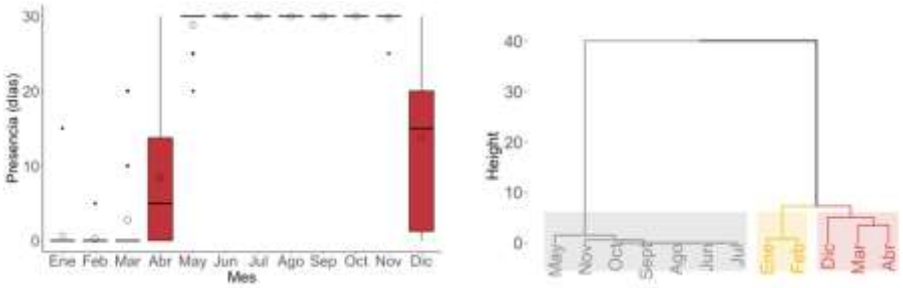
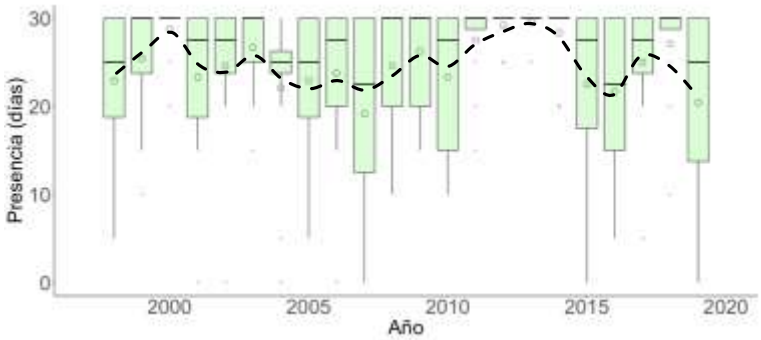
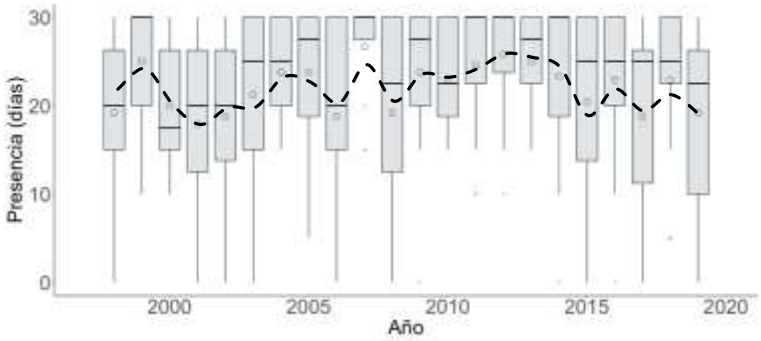


Figura 177. Comportamiento anual (panel izquierdo) y análisis de agrupamientos (panel derecho) del número de días con presencia de procesos oceanográficos de mesoescala en el sur del Golfo de California.

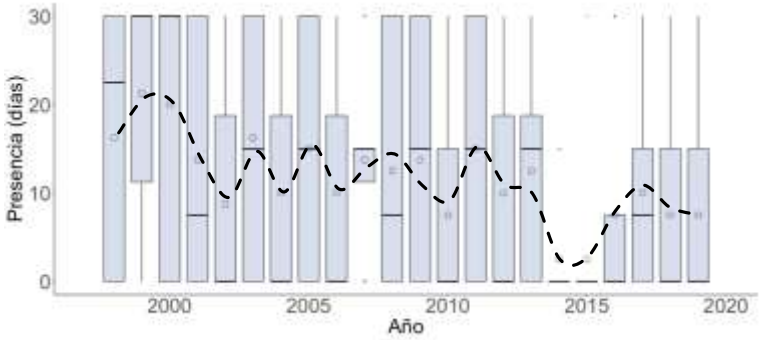
Remolinos ciclónicos



Remolinos anticiclónicos



Surgencias costeras



Filamentos

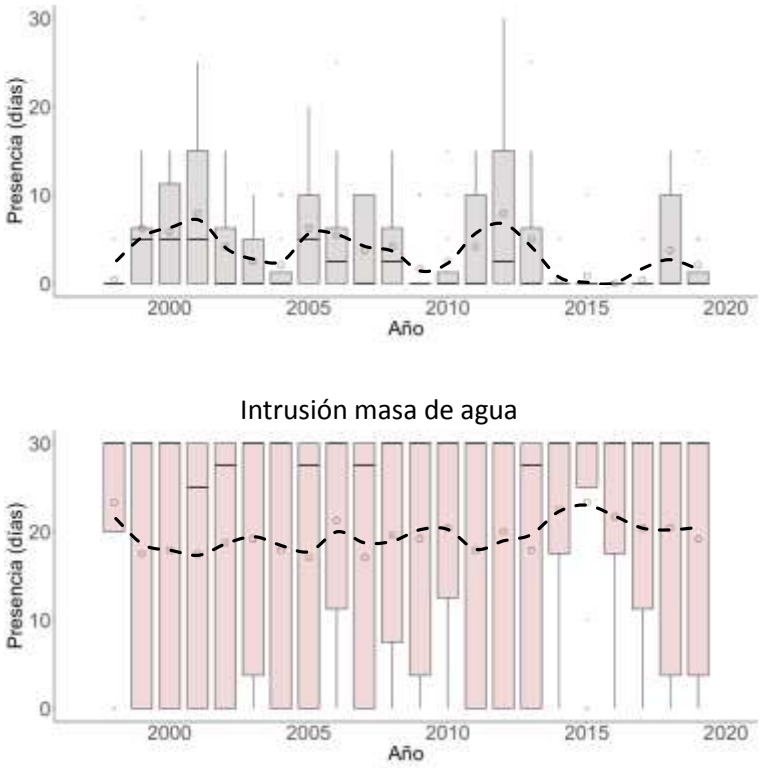


Figura 18. Comportamiento interanual del número de días con la presencia de procesos oceanográficos de mesoescala en el sur del Golfo de California. La línea punteada indica la tendencia con promedio móvil de 12 meses.

Se observó una alta variabilidad interanual en la frecuencia, el número de días con la presencia y la duración promedio de los procesos de mesoescala identificados en la región sur del golfo. La duración promedio en 2000, 2002 y 2012 de los remolinos ciclónicos, presentó anomalías significativas. Se presentaron anomalías importantes de la frecuencia de los remolinos anticiclónicos en 1999, 2011 y 2019, y de la duración promedio en 2019. Los filamentos presentaron anomalías importantes de su duración promedio en 2013 y 2016. El número de días con la presencia de intrusión de agua tropical superficial mostró una anomalía significativa en 1998 y 2015 (Fig. 19).

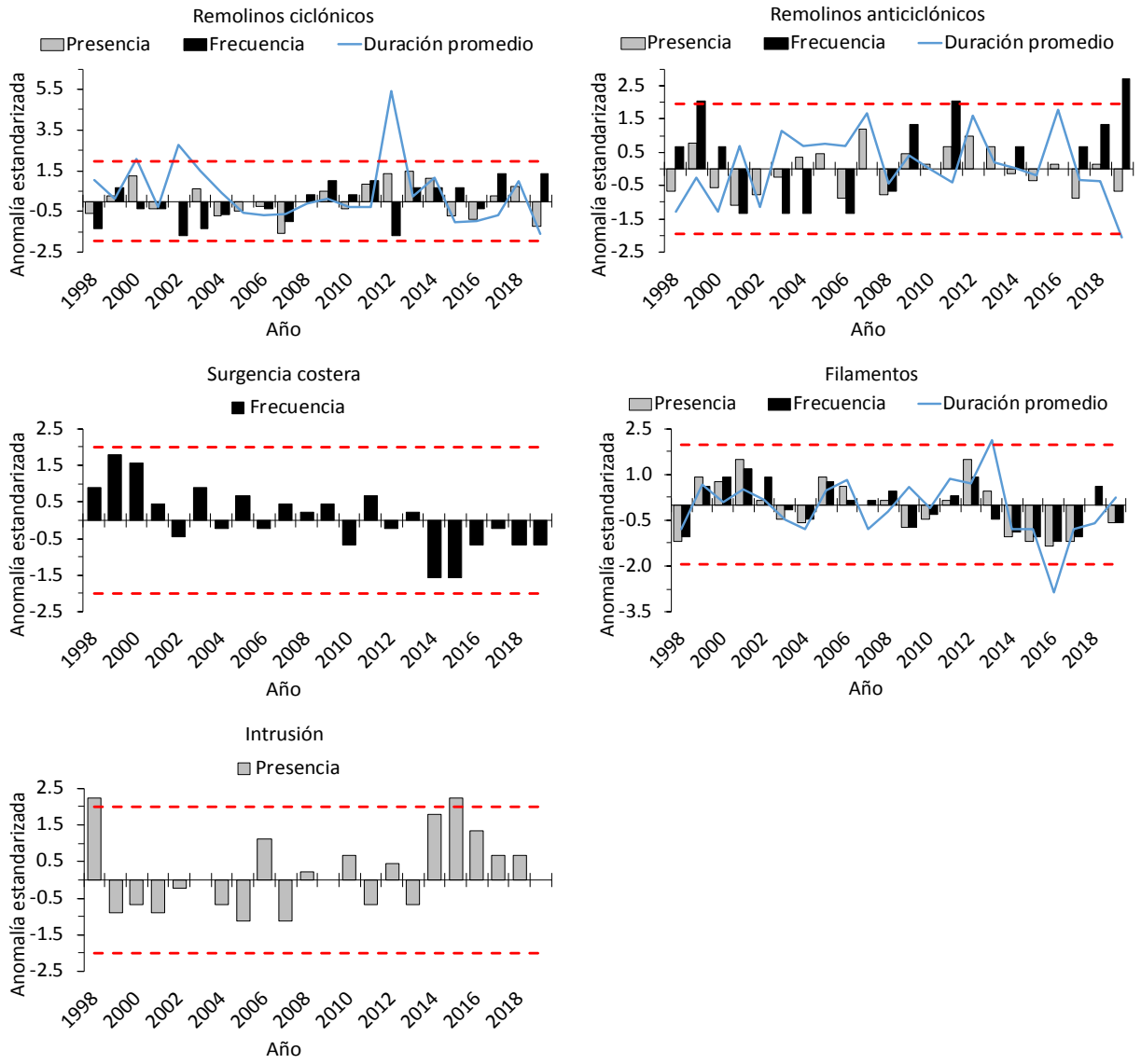


Figura 19. Anomalías estandarizadas del número de días con la presencia, frecuencia y duración promedio de los procesos de mesoescala identificados en la región sur del Golfo de California durante 1998–2019. Valores inferiores o superiores a la línea punteada roja representan las anomalías estandarizadas a un 95% de nivel de confianza ($p < 0.05$).

La tabla 4 muestra que la mayor frecuencia de remolinos ciclónicos en el SGC se presentó en 2009 y 2011, y la mayor duración de un remolino fue en el 2000. Los remolinos anticiclónicos presentaron mayor frecuencia en 2019, y la mayor duración de este evento se presentó en 2005. La mayor frecuencia de surgencias costeras ocurrió en 1999 y 2000, mientras que la menor frecuencia se presentó en 2014 y 2015. La mayor frecuencia de filamentos ocurrió en 2001, mientras que no se detectaron en 2016. La máxima persistencia de intrusión de masa de agua se exhibió en 1998 y 2015, seguido de 2014.

Tabla 4. Frecuencia, duración mínima, máxima y promedio de procesos oceanográficos de mesoescala en el sur del Golfo de California.

Eventos oceanográficos de mesoescala en el sur del Golfo de California

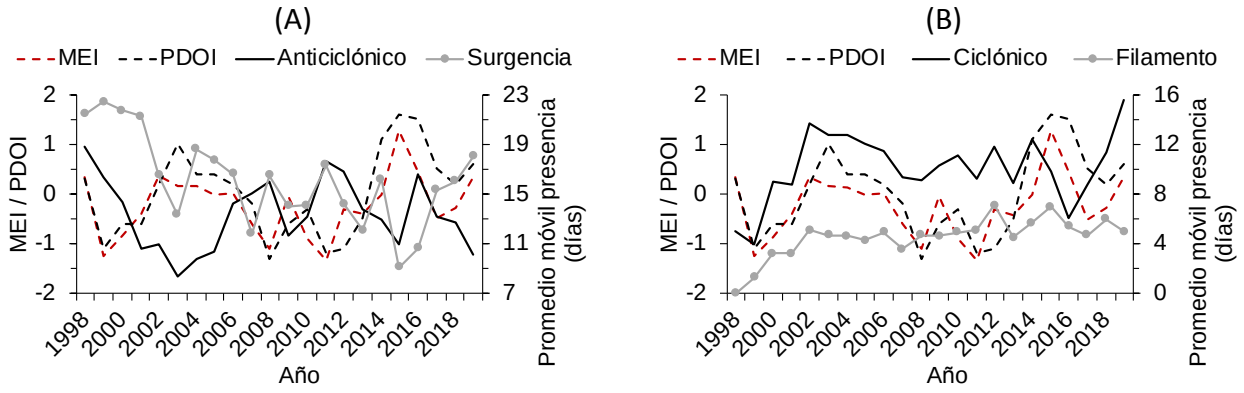
	Remolino ciclónico				Remolino anticiclónico				Surgencia costera	Filamento				Intrusión masa de agua
	Fr	Dmi	Dma	Dp	Fr	Dmi	Dma	Dp	Frecuencia (No. de procesos)	Fr	Dmi	Dma	Dp	Duración (días)
1998	9	20	110	42	11	15	70	28	13	1	–	5	–	285
1999	15	15	80	36	13	15	55	33	17	10	5	30	9	215
2000	12	15	165	50	11	15	60	28	16	14	5	20	7	220
2001	12	15	105	33	8	15	85	38	11	16	5	20	8	215
2002	8	15	115	54	10	15	75	29	7	13	5	10	7	230
2003	9	15	130	46	8	15	75	41	13	7	5	10	6	235
2004	11	15	65	38	8	15	55	38	8	5	5	10	5	220
2005	13	15	75	31	10	15	145	39	12	13	5	20	8	210
2006	12	15	65	30	8	15	65	38	8	9	5	25	9	260
2007	10	15	75	31	10	20	90	44	11	9	5	5	5	210
2008	14	15	55	34	9	15	70	32	10	11	5	10	6	240
2009	16	15	100	36	12	15	75	37	11	3	5	10	8	235
2010	14	15	75	33	10	15	80	35	6	6	5	10	7	250
2011	16	15	60	33	13	15	110	32	12	10	5	15	9	220
2012	8	15	135	73	10	15	120	43	8	14	5	35	9	245
2013	15	15	125	37	10	15	85	36	10	5	5	40	12	220
2014	15	15	95	43	11	15	125	35	2	2	5	5	5	275
2015	15	15	60	27	10	15	75	34	2	1	–	5	–	285
2016	12	15	60	28	10	15	100	44	6	0	0	0	0	265
2017	17	15	65	30	11	15	65	33	8	1	–	5	–	250
2018	13	15	100	42	12	15	70	33	6	12	5	10	5	250
2019	17	15	60	24	14	15	55	24	6	4	5	15	8	235

Notas. Fr: Frecuencia (no. de procesos), Dmi: Duración mínima (días), Dma: Duración máxima (días), Dp: Duración promedio (días).

7.2 Análisis de la variabilidad interanual de los procesos oceanográficos de mesoescala (1998–2019) en el Golfo de California e índices climáticos (MEI y PDOI)

En el NGC, el número de días con la presencia de remolinos anticiclónicos y de surgencias costeras presentó relación negativa con eventos fuertes de El Niño y con las fases positivas del PDO como en el 2003 y 2015, mientras que bajo condiciones fuertes de La Niña y fases negativas del PDO el número de días con la presencia de estos dos procesos se vio favorecido (Fig. 20A, D). La Fig. 20B muestra que la relación entre el MEI, la PDO, y el número de días con la presencia de anticiclónicos y surgencias costeras está explicada en un 51% por el primer componente principal; en la tabla 5 se presentan las correlaciones fuertes ($p < 0.05$) entre estos dos índices con estos dos procesos de mesoescala, dentro del primer componente principal (Dim1). Por otra parte, el número de días con la presencia de remolinos ciclónicos y filamentos presentó relación positiva con eventos El Niño fuertes (2015, 2003, 2019) y fases positivas del PDO, y lo opuesto ocurre durante condiciones de La Niña fuerte (1999, 2000, 2008, 2011) y fases negativas del PDO; en el que dentro del primer componente principal (Dim1) se explica el 51% de esta variabilidad (Fig. 20B, C, D). Las correlaciones entre estas variables dentro de este componente son fuertes ($r > 0.7$)

y significativas ($p < 0.05$) (Tabla 5).



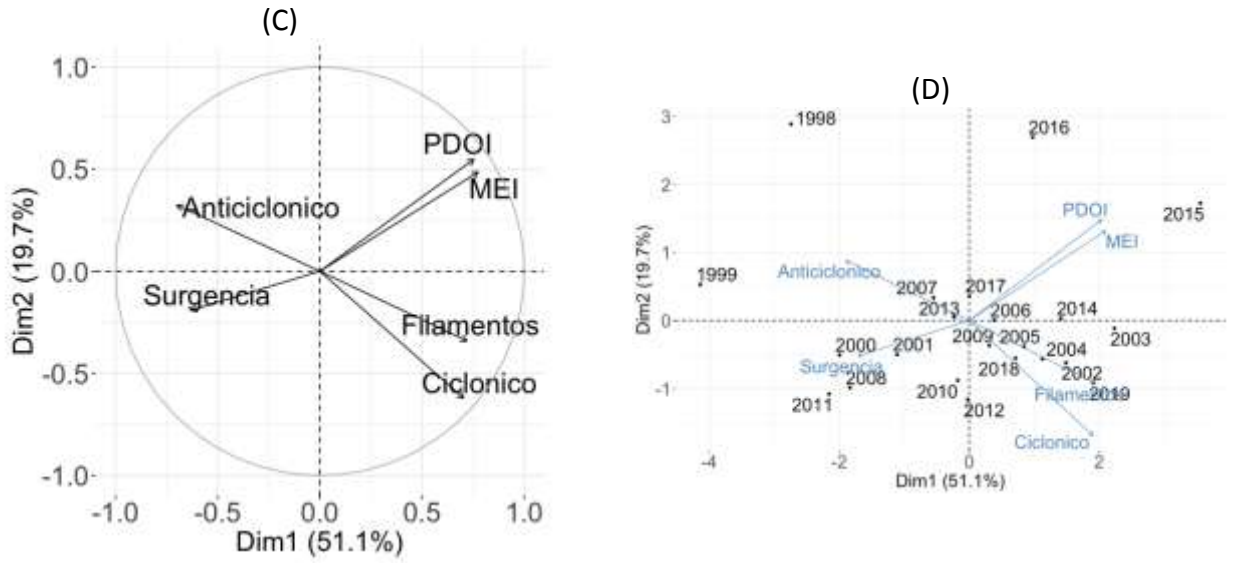


Figura 190. Índice Multivariado de El Niño (MEI), Índice de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDOI) y la variabilidad interanual en el norte del Golfo de California del número de días con la presencia de: (A) remolinos anticiclónicos y surgencias, (B) remolinos ciclónicos y filamentos. (C) contribución de los procesos oceanográficos de mesoescala y de los índices MEI y PDO a los primeros dos componentes (Dim1, Dim2) del análisis de componentes principales. (D) contribución de cada año (1998–2019) a los dos primeros componentes del análisis de componentes principales.

Tabla 5. Variables asociadas ($p < 0.05$) dentro de los componentes principales 1 y 2 en el norte del Golfo de California.

PC1 (Dim1)		
Variable	**Correlación**	***p*-Valor**
MEI	0.77	2.305E-05
PDOI	0.75	5.217E-05
Filamentos	0.72	1.607E-04
Remolinos ciclónicos	0.70	2.607E-04
Surgencias costeras	-0.63	1.680E-03
Remolinos anticiclónicos	-0.70	2.851E-04
PC2 (Dim2)		
Variable	**Correlación**	***p*-Valor**
PDOI	0.55	0.008
MEI	0.49	0.022
Remolinos ciclónicos	-0.62	0.002

En la Fig. 21A–D se observa que, en el CGC, el número de días con la presencia de remolinos anticiclónicos, surgencias costeras y filamentos presentó relación negativa con eventos fuertes de El Niño (2014, 2015, 2016) y fases positivas del PDO, mientras que presentó relación positiva

con eventos fuertes de La Niña (1999, 2000, 2011, 2008) y fases negativas del PDO. Esta variabilidad se ve explicada por un 54% en el primer componente principal (Dim1). Por su parte, la intrusión de masa de agua presentó relación positiva con condiciones fuertes de El Niño y valores positivos del PDO. La tabla 6 muestra la fuerte y significativa correlación de estas variables en el primer componente principal (Dim1), destacando la fuerte correlación inversa entre los índices climáticos con las surgencias costeras y los filamentos.

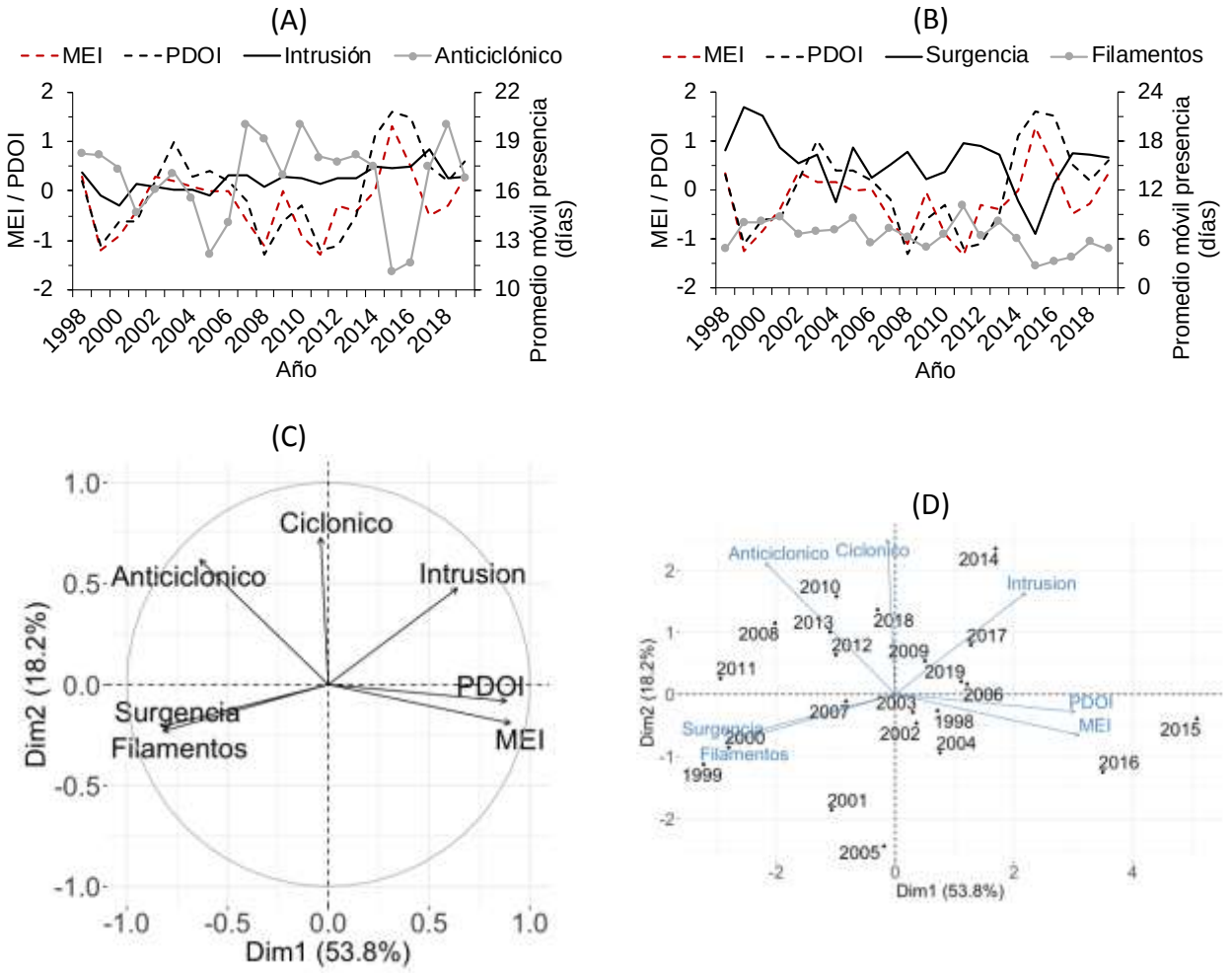


Figura 201. Índice Multivariado de El Niño (MEI), Índice de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDOI) y la variabilidad interanual en el centro del Golfo de California del número de días con la presencia de: (A) remolinos anticiclónicos y surgencias, (B) remolinos ciclónicos y filamentos. (C) contribución de los procesos oceanográficos de mesoescala y de los índices MEI y PDO a los primeros dos componentes (Dim1, Dim2) del análisis de componentes principales. (D) contribución de cada año (1998–2019) a los dos primeros componentes del análisis de componentes principales.

Tabla 6. Variables asociadas (p < 0.05) dentro de los componentes principales 1 y 2 en el centro del Golfo de California.

PC1 (Dim1)		
Variable	**Correlación**	***p*-Valor**
MEI	0.90	9.037E-09
PDOI	0.88	4.903E-08
Intrusión	0.64	1.357E-03
Remolinos anticiclónicos	-0.64	1.424E-03
Filamentos	-0.82	2.839E-06
Surgencias costeras	-0.83	2.183E-06
PC2 (Dim2)		
Variable	**Correlación**	***p*-Valor**
Remolinos ciclónicos	0.73	1.262E-04
Remolinos anticiclónicos	0.62	0.002
Intrusión	0.48	0.025

La Fig. 22A–D muestra que, en el SGC, la relación entre los procesos de mesoescala y los índices climáticos es bastante similar a la del CGC, en el que el número de días con la presencia de surgencias costeras y filamentos presentó relación negativa con eventos fuerte de El Niño y valores positivos del PDO y lo inverso sucede con eventos fuertes de La Niña y valores negativos del PDO. Por otro lado, la intrusión de masa de agua presentó relación positiva con El Niño fuerte y valores positivos de PDO y lo opuesto ocurre con fases negativas del PDO y La Niña fuerte. Esta variabilidad se ve explicada en un 56% dentro del primer componente principal (Dim1), un poco más alto que en la región central y norte del golfo, lo que indica correlaciones más fuertes entre estas variables dentro de este componente principal (Tabla 7). Sin embargo, los remolinos parecen no estar asociados con estos índices climáticos, ya que su variabilidad está mejor explicada dentro del segundo componente principal.

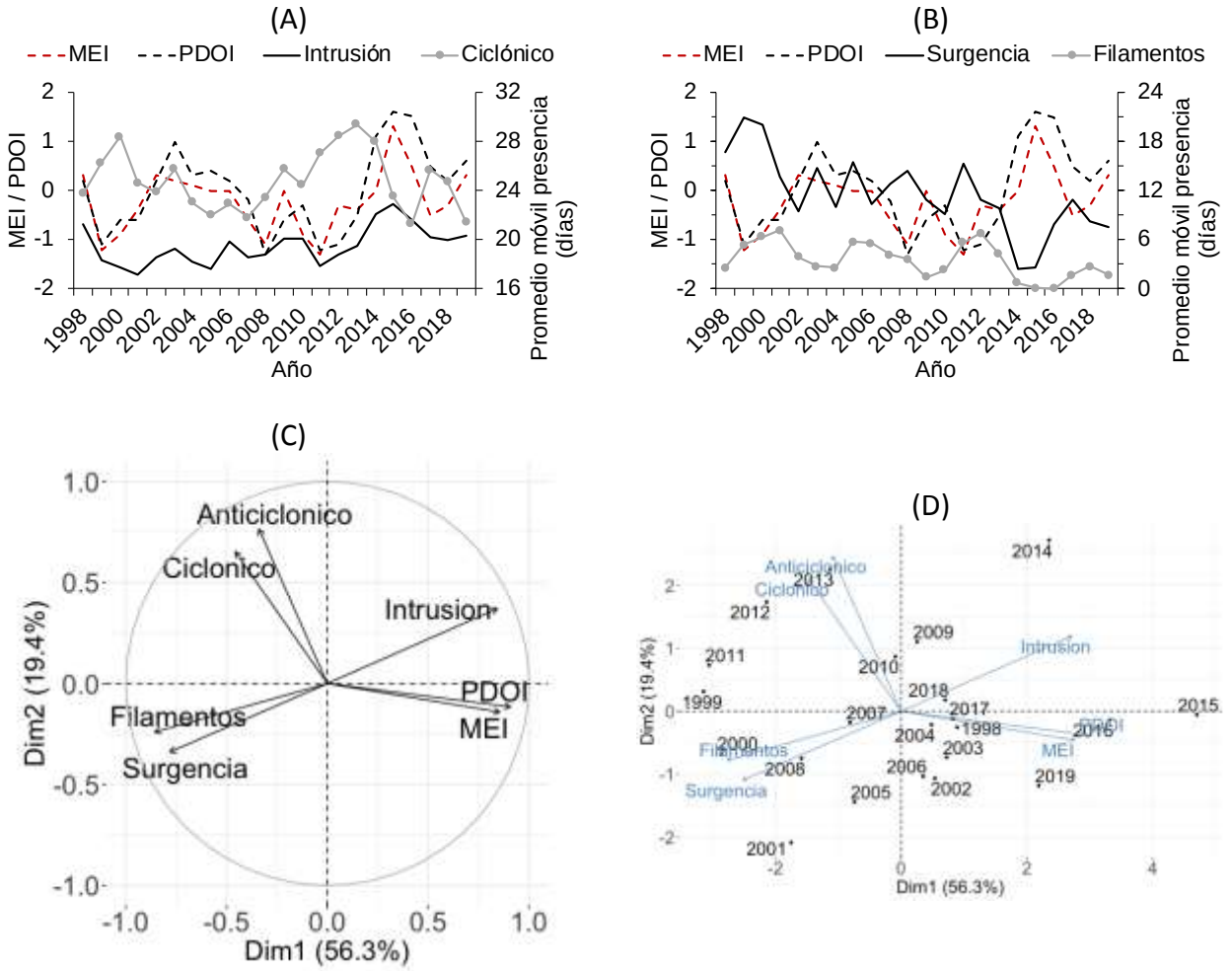


Figura 212. Índice Multivariado de El Niño (MEI), Índice de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDOI) y la variabilidad interanual en el sur del Golfo de California del número de días con la presencia de: (A) remolinos anticiclónicos y surgencias, (B) remolinos ciclónicos y filamentos. (C) contribución de los procesos oceanográficos de mesoescala y de los índices MEI y PDO a los primeros dos componentes (Dim1, Dim2) del análisis de componentes principales. (D) contribución de cada año (1998–2019) a los dos primeros componentes del análisis de componentes principales.

Tabla 7. Variables asociadas ($p < 0.05$) dentro de los componentes principales 1 y 2 en el sur del Golfo de California.

PC1 (Dim1)		
Variable	**Correlación**	***p*-Valor**
PDOI	0.91	5.190E-09
MEI	0.86	3.951E-07
Intrusión	0.84	8.273E-07
Remolinos ciclónicos	-0.46	3.224E-02
Surgencias costeras	-0.78	1.704E-05
Filamentos	-0.86	3.572E-07

PC2 (Dim2)		
Variable	**Correlación**	***p*-Valor**
Remolinos anticiclónicos	0.76	3.282E-05
Remolinos ciclónicos	0.65	9.901E-04

7.3 Asociación de la frecuencia y duración de procesos oceanográficos de mesoescala con las capturas de sardina monterrey

En la Fig. 23 se muestran las capturas históricas de pelágicos menores en el GC, se aprecia la dominancia de la sardina monterrey en los volúmenes de desembarques, además de que en muchas de las temporadas el comportamiento de las capturas está ligado al esfuerzo nominal. Sin embargo, se aprecia que a partir de la temporada 2004/2005 los volúmenes de desembarco de sardina monterrey ya no siguen tan bien el comportamiento del esfuerzo nominal, lo que indica que durante varias temporadas las capturas estuvieron orientadas hacia otras especies, como la sardina bocona y sardina crinuda, lo que refleja la variabilidad en la disponibilidad de la sardina monterrey a la pesquería.

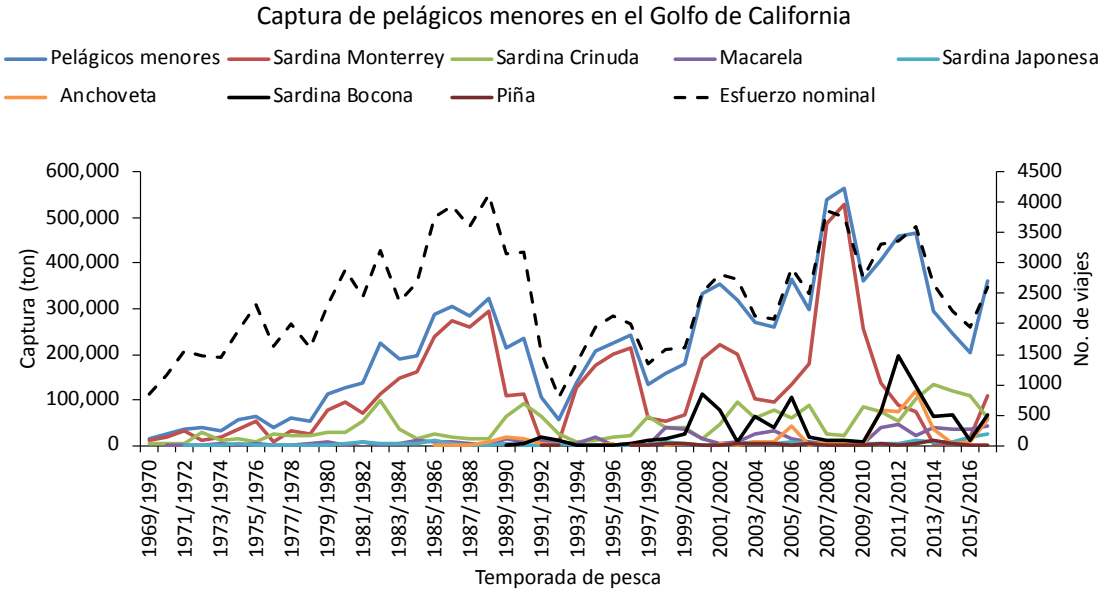


Figura 223. Capturas históricas de pelágicos menores en el Golfo de California. Datos proporcionados por el Centro Regional de Investigación Acuícola y Pesquera de Guaymas, Sonora.

Las zonas tradicionales de pesca de pelágicos menores se ubican a lo largo de ambas costas del GC, abarcando parte del NGC, las grandes islas, el CGC y SGC; áreas en las que pueden ocurrir uno o más procesos oceanográficos de mesoescala (Fig. 24).

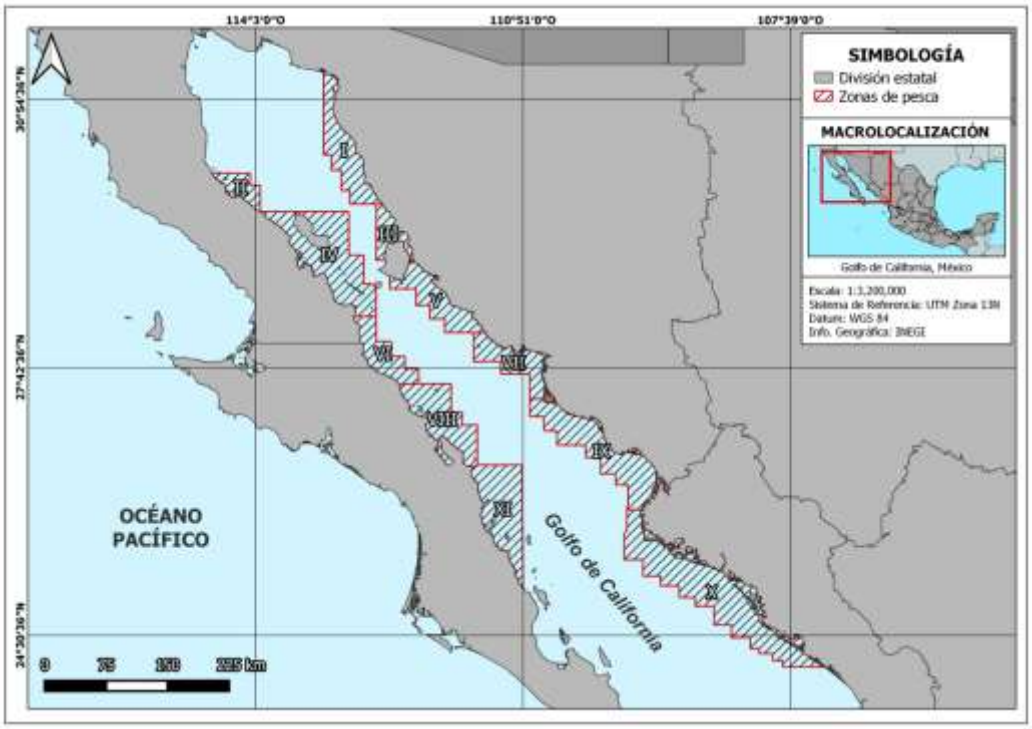


Figura 234. Zonas tradicionales de pesca (números romanos) de las embarcaciones cerqueras de pelágicos menores en el Golfo de California. Adaptado de Nevárez-Martínez et al. (2001).

Tras aplicar correlación cruzada entre las series anuales del número de días con la presencia de procesos de mesoescala y de captura de sardina monterrey, se estimó un retraso significativo de 1 año de los remolinos ciclónicos con relación a las capturas (Fig. 26), lo que reforzó realizar el acoplamiento temporal con retraso de 11 meses de los procesos de mesoescala con las capturas.

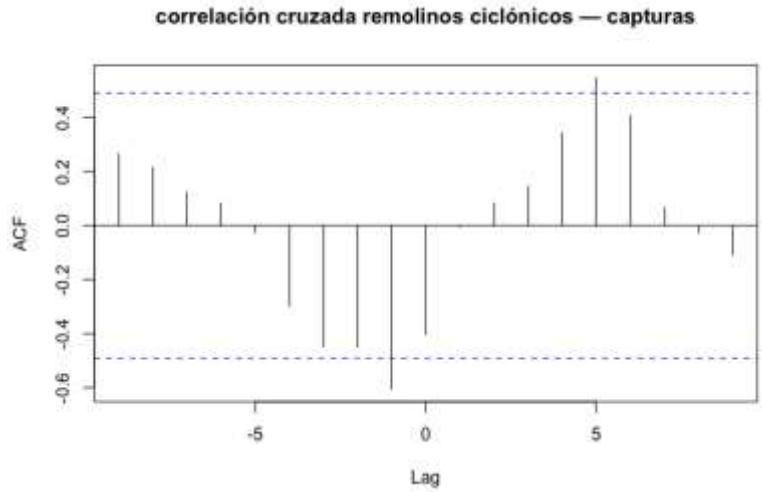


Figura 245. Correlación cruzada de la serie anual del número de días con la presencia de remolinos ciclónicos en el CGC y SGC con las capturas de sardina monterrey Sardinops sagax en el Golfo de California durante las temporadas 1999/2000 – 2016/2017.

Se observó que el número de días con la presencia de remolinos ciclónicos y las capturas presentaron un comportamiento inverso en varias de las temporadas de pesca, en las que destacan las temporadas 2003/2004, 2005/2006 y 2010/2011 – 2015/2016. El comportamiento entre el número de días con la presencia de los remolinos anticiclónicos y las capturas también fue inverso para algunas de las temporadas de pesca, de las cuales sobresalen la temporada 1999/2000, 2010/2011 – 2014/2015, las cuales registraron capturas muy bajas de sardina monterrey. Por otra parte, el número de días con la presencia de surgencias costeras parece no tener mucha relación con las eventuales capturas; sin embargo, durante las temporadas 2011/2012 –2013/2014, las capturas fueron bajas a pesar del alto número de días con la presencia de estos procesos. Entre el número de días con la presencia de filamentos y las capturas se observó que durante las primeras temporadas el comportamiento entre ambos fue similar; sin embargo, hacia el final de la serie temporal las capturas presentaron un comportamiento inverso con el número de días con presencia de estos procesos. Con relación a la intrusión de la masa de agua tropical, en muchas de las temporadas el comportamiento fue inverso entre este evento y las capturas, como en 1999/2000 – 2004/2005, 2012/2013 – 2015/2016 (Fig. 26).

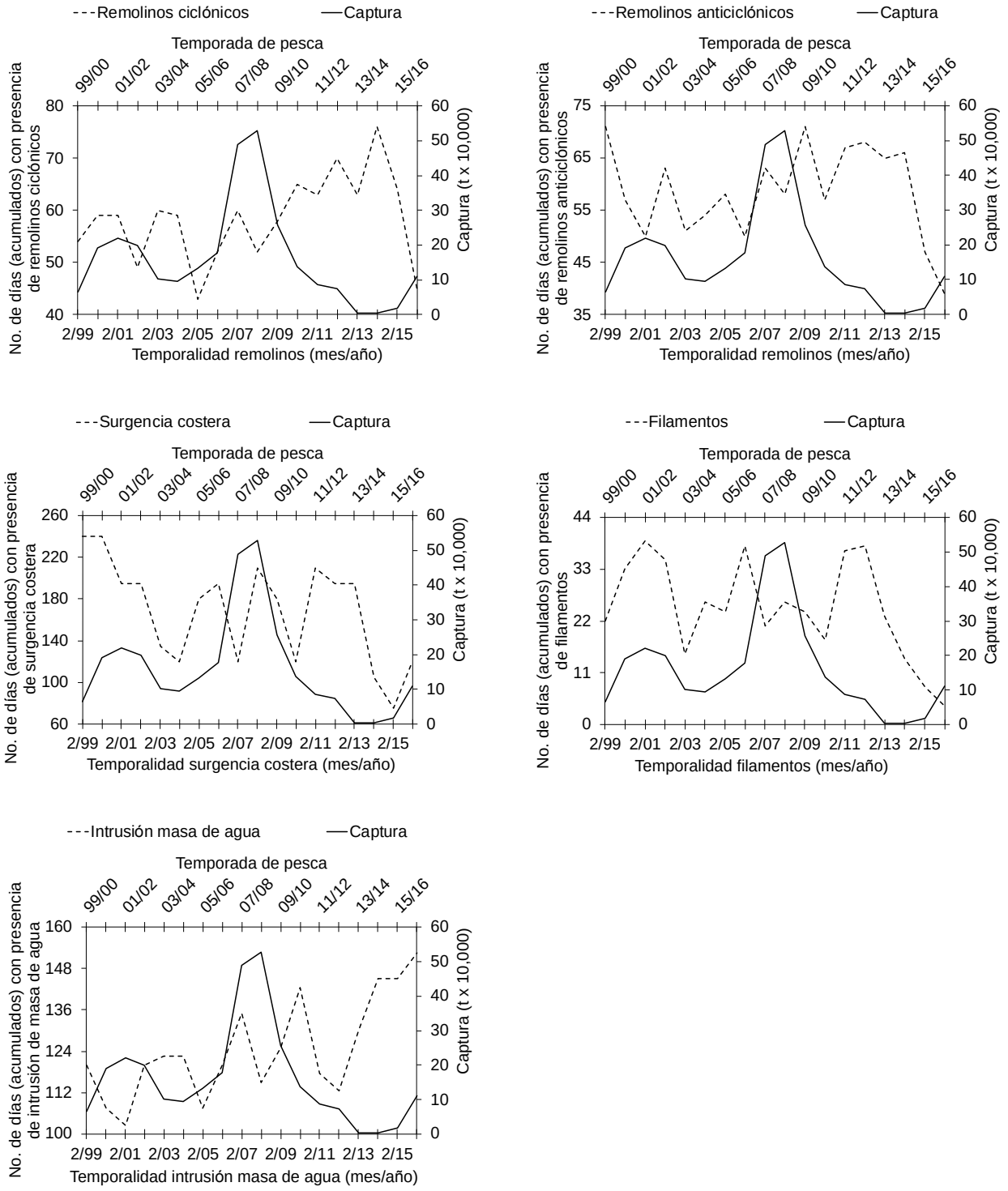


Figura 256. Acoplamiento temporal de la presencia de los procesos oceanográficos de mesoescala registrados durante el periodo de reproducción-reclutamiento (noviembre–mayo) y las correspondientes temporadas de pesca de sardina monterrey Sardinops sagax.

Se estimaron capturas anómalas (< 88,201 y > 233,128 t) en las temporadas 1999/2000, 2007/2008 – 2009/2010, 2011/2012 – 2015/2016. Por su parte, las capturas promedio (160,064

± 72,464 t) se presentaron en las temporadas de pesca 2000/2001 – 2006/2007, 2010/2011 y 2016/2017.

La Fig. 27 muestra los efectos parciales de los modelos aditivos generalizados ajustados al log (Captura) de sardina monterrey, indicando que tan bien los estimados de cada evento de mesoescala se ajustan a los datos observados. Los ejes secundarios de cada gráfico se refieren al suavizado (s) y a los grados de libertad efectivos (s-1), por ejemplo, s(Intrusión,2). El panel izquierdo de la Fig. 27 corresponde a la serie completa de captura analizada en este estudio (1999/2000–2016/2017), de la cual los remolinos ciclónicos y anticiclónicos mostraron asociación importante con las eventuales capturas, mostrando una relación semejante a un domo, sugiriendo que valores óptimos en la duración de estos procesos favorecen a las eventuales capturas. Por su parte, las surgencias costeras, filamentos e intrusión de la masa de agua tropical presentaron baja asociación con capturas (R^2 ajustado negativo). El panel central representa los efectos parciales con las capturas anómalas, se observa que también ambos tipos de remolinos presentaron asociaciones importantes tipo domo con las capturas, seguido de los filamentos que presentaron asociaciones negativas, mientras que las surgencias costeras e intrusión presentaron bajas asociaciones (R^2 ajustado ≤ 0.03). El panel derecho muestra los efectos parciales con las capturas promedio, las cuales presentaron una asociación favorable con las surgencias costeras, mientras que se exhibió una relación inversa con la intrusión de la masa de agua tropical, con los filamentos se presentó una relación tipo domo. Por otro lado, los remolinos no presentaron relaciones importantes con estas capturas (R^2 ajustado ≤ 0.03).

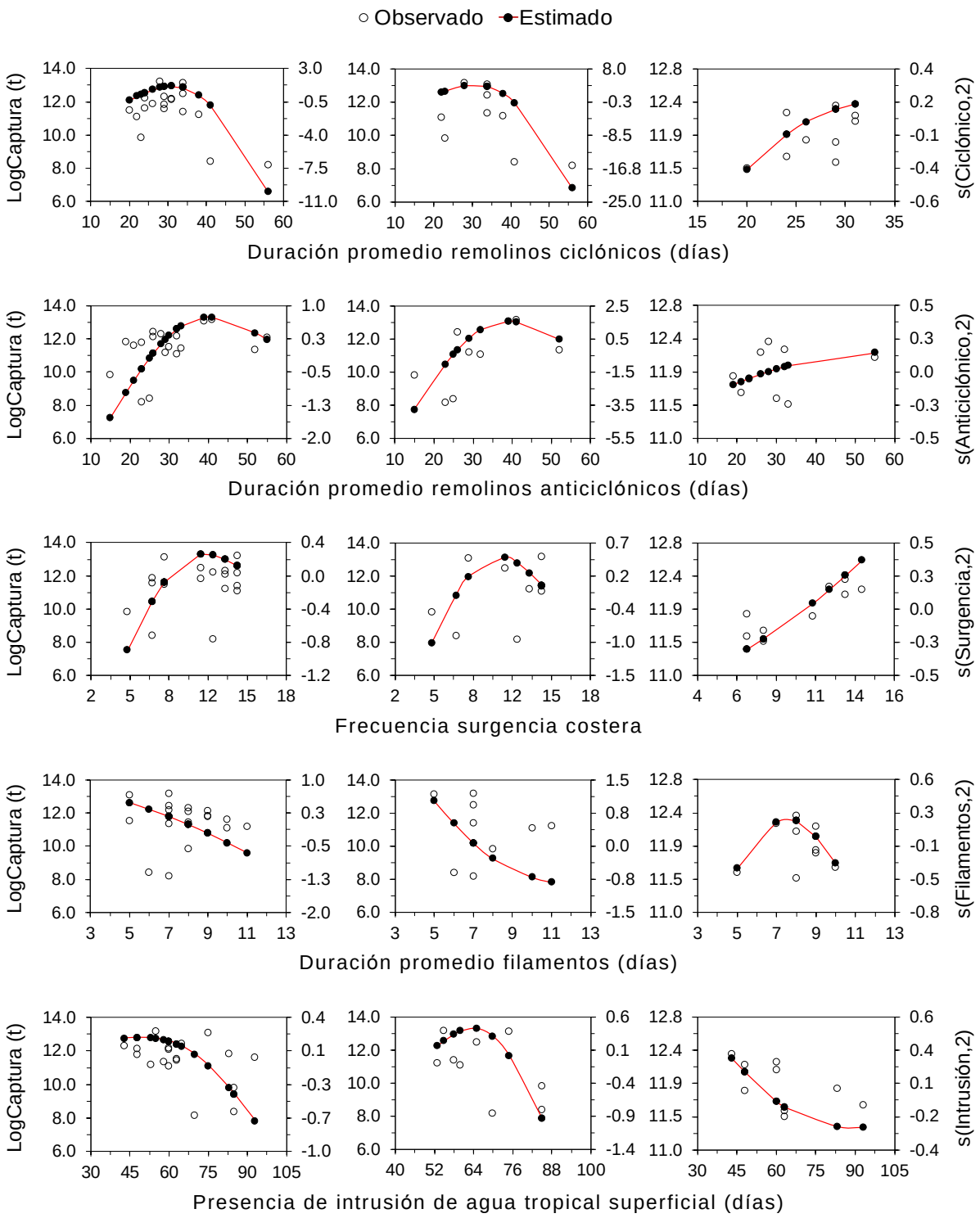


Figura 267. Gráficas de efectos parciales de los modelos aditivos generalizados ajustados a la captura (log t) de sardina monterrey Sardinops sagax en el Golfo de California, durante las temporadas de pesca 1999/2000 – 2016/2017 (panel izquierdo); durante las temporadas de pesca con diferencia estadísticamente significativa a la captura media (panel central) y sin diferencia estadísticamente significativa a la captura media (panel derecho). Valores en el eje-y secundario indican los grados de libertad efectivos, relacionados al término de suavizado.

La Fig. 28 muestra el mejor ajuste de las estimaciones de las capturas de sardina a lo largo de la serie (18 años), como también para las capturas promedio y las capturas anómalas. Las temporadas de pesca se estimaron mejor al evaluar separando las capturas anómalas y las promedio. Ambos tipos de remolinos y filamentos estimaron mejor el comportamiento atípico de las capturas, contrario a lo obtenido al incluir todos los procesos de mesoescala para estimar estas capturas. Por otro lado, las surgencias costeras, la intrusión de la masa de agua tropical y en menor grado los filamentos, estimaron mejor las capturas promedio, opuesto a lo obtenido al incluir todos los cinco tipos de procesos. Además, en la figura están representadas por simbología roja, las capturas pronosticadas por los modelos aditivos aplicados a las tres series temporales de captura (total, promedio y anómalas), se observa las altas fluctuaciones en las capturas.

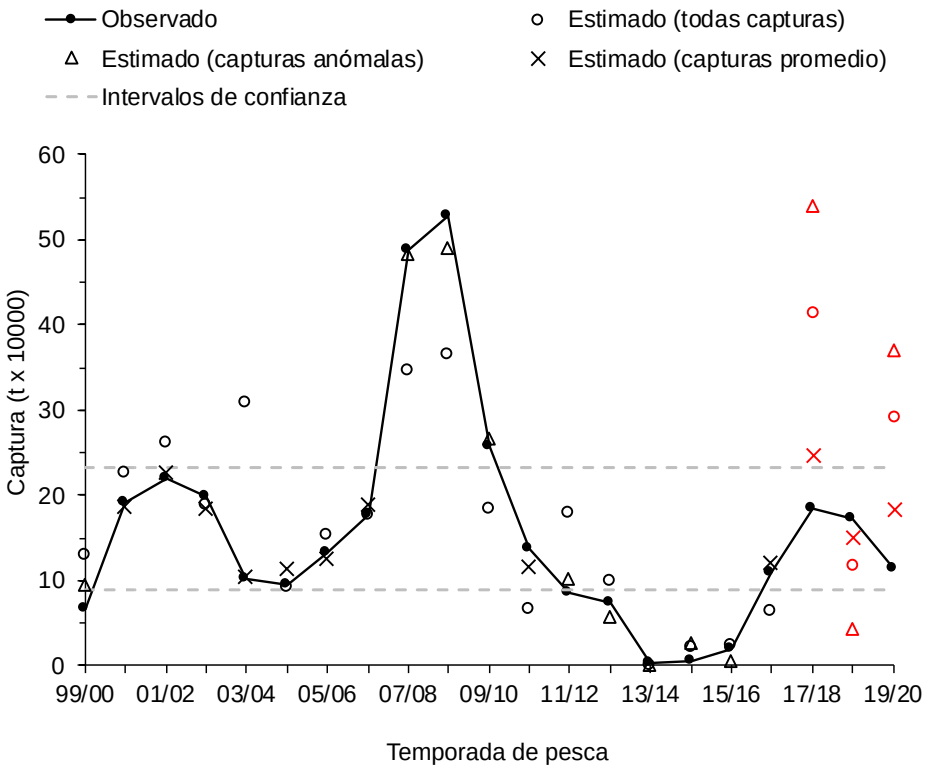


Figura 278. Captura observada (línea negra); captura estimada (círculos); captura anómala estimada (triángulos); captura promedio estimada (cruces) de sardina monterrey Sardinops sagax durante las temporadas de pesca 1999/2000 – 2016/2017 en el Golfo de California. Líneas punteadas representan los intervalos de confianza de la captura media. Las capturas pronosticadas por los modelos aditivos generalizados aplicados a toda la serie temporal (círculos rojos), a las capturas promedio (cruces rojas), y a las anómalas (triángulos rojos).

Después de excluir los procesos de mesoescala que no tuvieron efectos estadísticamente significativos para cada serie de captura, en la tabla 8 se muestra la sucesión de los modelos para cada una de las series de captura. Para la serie de 18 años de captura, el modelo con el mejor ajuste incluye la suma de los efectos parciales (derivada parcial de los valores esperados) de ambos tipos de remolinos, el cual presentó el menor valor de AIC y la varianza explicada con R^2 ajustado de 0.57 y una desviación explicada de 70.4%. El modelo con el mejor ajuste para las temporadas con capturas anómalas incluye la suma de los efectos parciales de ambos remolinos y filamentos, con el AIC más bajo y la varianza explicada más alta (R^2 = 0.96) y una desviación explicada de 93.6%. Para las temporadas con capturas promedio, el modelo con el mejor ajuste comprende la suma de los efectos parciales de las surgencias costeras, intrusión de la masa de agua tropical y filamentos, con la varianza explicada más alta (R^2 = 0.68), una desviación explicada de 90.7% y el valor de AIC más bajo.

Tabla 8. Estadísticos de los Modelos Aditivos Generalizados tras aplicar análisis "selección hacia adelante".

Serie de capturas 1999/2000 – 2016/2017			
Modelo	**R^2 ajustado**	**Desviación explicada (%)**	**AIC**
logCaptura = NULL	0.00	0.0	2064194
logCaptura = s(Ciclónico)	0.23	44.9	1137985
logCaptura = s(Ciclónico) + s(Anticiclónico) *	0.57	70.4	610184
Serie con capturas estadísticamente diferentes a la captura media (1999/2000, 2007/2008 – 2009/2010, 2011/2012 – 2015/2016)			
Modelo	**R^2 ajustado**	**Desviación explicada (%)**	**AIC**
logCaptura = NULL	0.00	0.0	1941721
logCaptura = s(Ciclónico)	0.52	66.7	646663
logCaptura = s(Ciclónico) + s(Anticiclónico)	0.95	90.9	176521
logCaptura =	0.96	93.6	124806

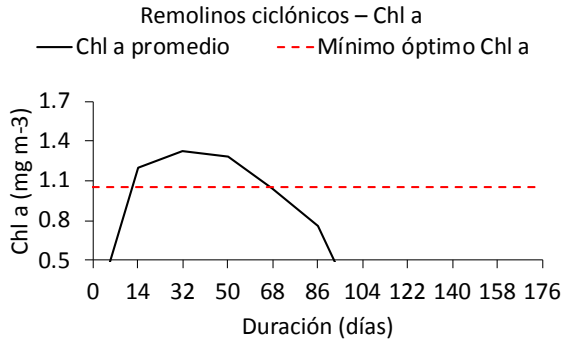
s(Ciclónico) + s(Anticiclónico) + s(Filamentos)
*

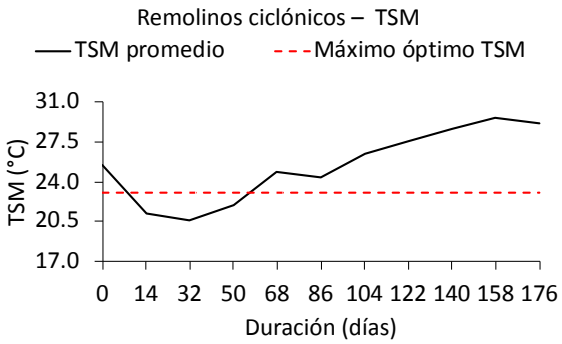
Serie con capturas no estadísticamente diferentes a la captura media (2000/2001 – 2006/2007, 2010/2011, 2016/2017)

Modelo	R^2 ajustado	Desviación explicada (%)	AIC
logCaptura = NULL	0.00	0.0	113750
logCaptura = s(Surgencia)	0.67	75.3	28209
logCaptura = s(Surgencia) + s(Filamentos)	0.58	78.2	24908
logCaptura = s(Surgencia) + s(Filamentos) + s(Intrusión) *	0.68	90.7	10666

Nota: * Indica el modelo con el valor más alto de R-cuadrado ajustado y de porcentaje de desviación explicada, y el valor más bajo del Criterio de Información de Akaike (AIC).

Para tratar de entender los efectos que tienen las duraciones/frecuencia de los procesos de mesoescala en el periodo reproductivo, se obtuvieron los valores promedio de Chl *a* y de TSM durante cada tipo de evento. En la Fig. 29 se observa que los remolinos ciclónicos con duración entre 15 y 50 días presentaron condiciones favorables para la especie. Lo mismo sucedió para los remolinos anticiclónicos. Por otro lado, las surgencias costeras presentaron condiciones idóneas a cualquier frecuencia. Por su parte, los sitios frontales por intrusión de la masa de agua tropical presentaron condiciones favorables hasta alcanzar alrededor de 60 días, tiempo en el que las concentraciones de Chl *a* decaen y la TSM se incrementa por debajo y por encima del óptimo, respectivamente.





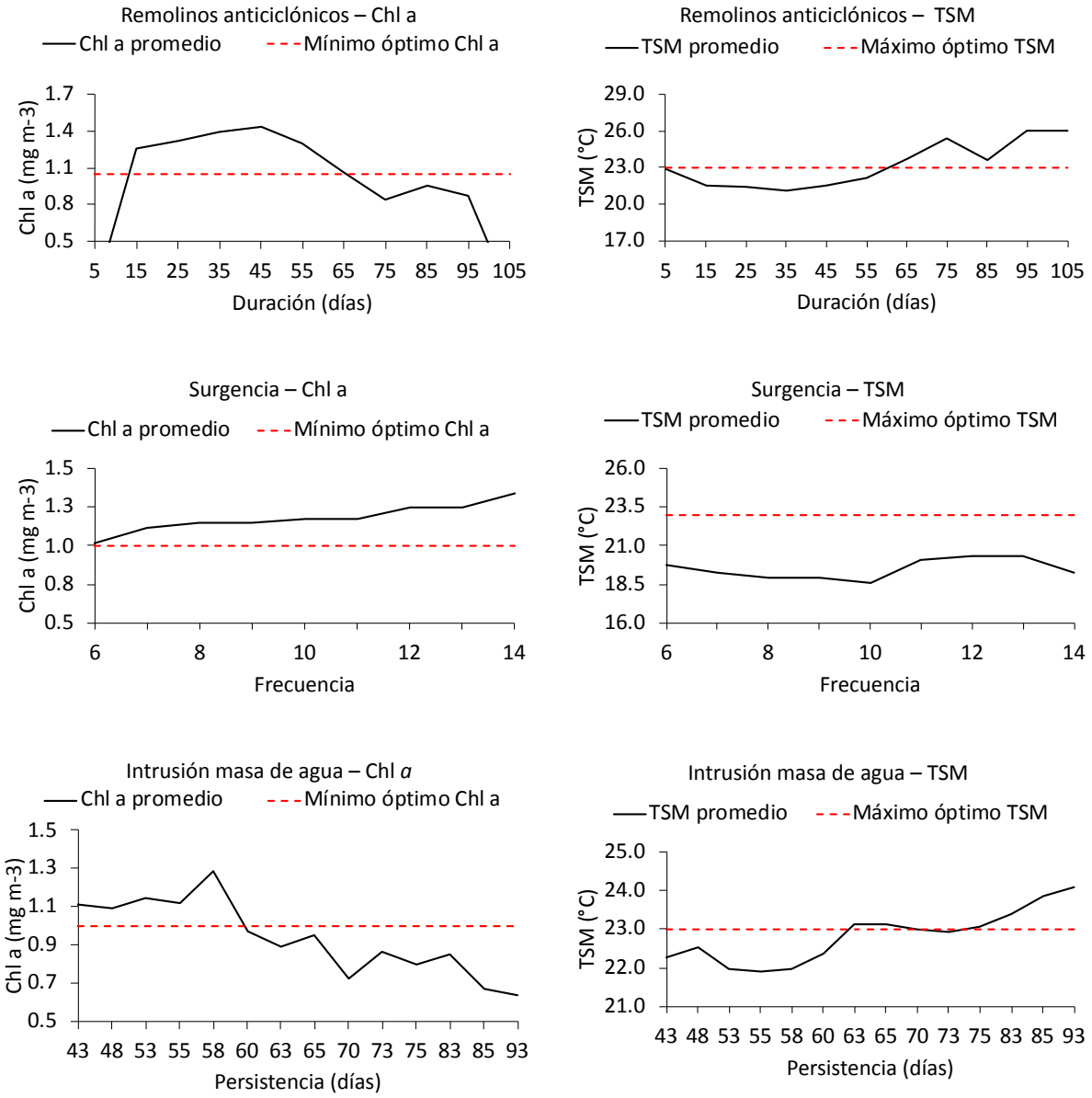


Figura 29. Valores promedio de concentración de clorofila a y de temperatura superficial del mar de los procesos oceanográficos de mesoescala en función de su duración, frecuencia y persistencia en el Golfo de California.

Las Fig. 30 – 34 muestran los mapas de distribución espacial de los lances y capturas de una fracción de la flota pesquera durante las temporadas 2002 – 2004, 2012 – 2014, 2017 – 2019, sobrepuestos a imágenes de clorofila *a* superficial. Se observa que, durante algunos meses, se realizaron lances efectivos y capturas fuera de las zonas tradicionales de pesca, y que frecuentemente coincidían con la presencia de algún evento de mesoescala. Si bien la proporción de lances efectivos y de capturas que ocurrieron dentro de procesos de mesoescala fue baja, en algunas de las temporadas el porcentaje de lances efectivos y la captura promedio

fue mayor cuando ocurrieron dentro de procesos de mesoescala (Fig. 35). Además, en la mayoría de los casos de lances y capturas dentro de procesos de mesoescala, éstos representaron sitios con TSM (17°C – 23 °C) y Chl *a* (1 mg m^{-3} – 5 mg m^{-3}) idóneas para la especie, como se observa en las tablas 9 – 12.

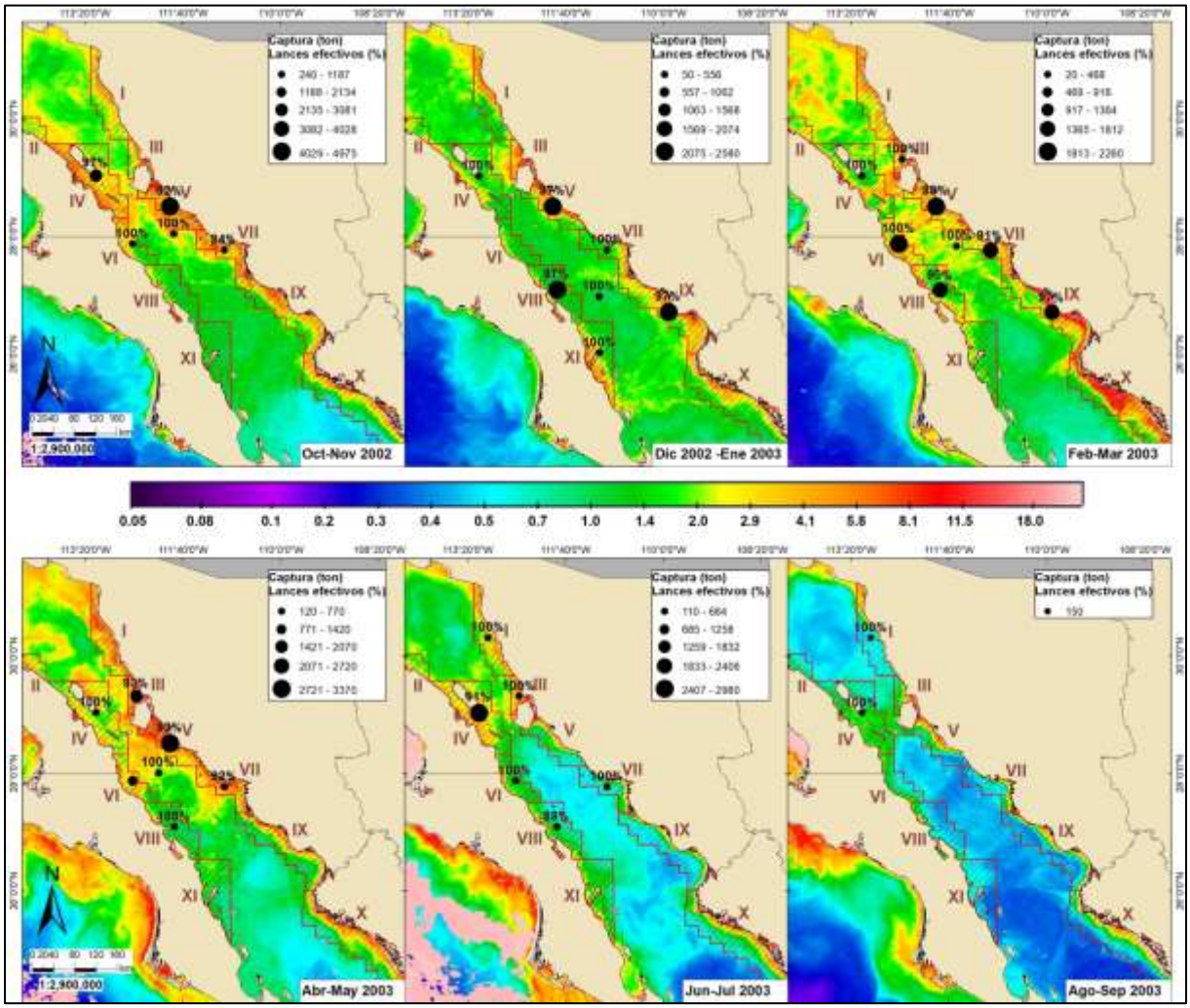


Figura 280. Distribución bimensual de lances efectivos (%) y captura (t) de sardina monterrey Sardinops sagax dentro y fuera de las zonas tradicionales de pesca en el Golfo de California durante la temporada 2002–2003, sobrepuesta en imágenes de promedio bimensual de clorofila a superficial. Los valores de lances efectivos y de captura representan una fracción de la flota cerquera de pelágicos menores.

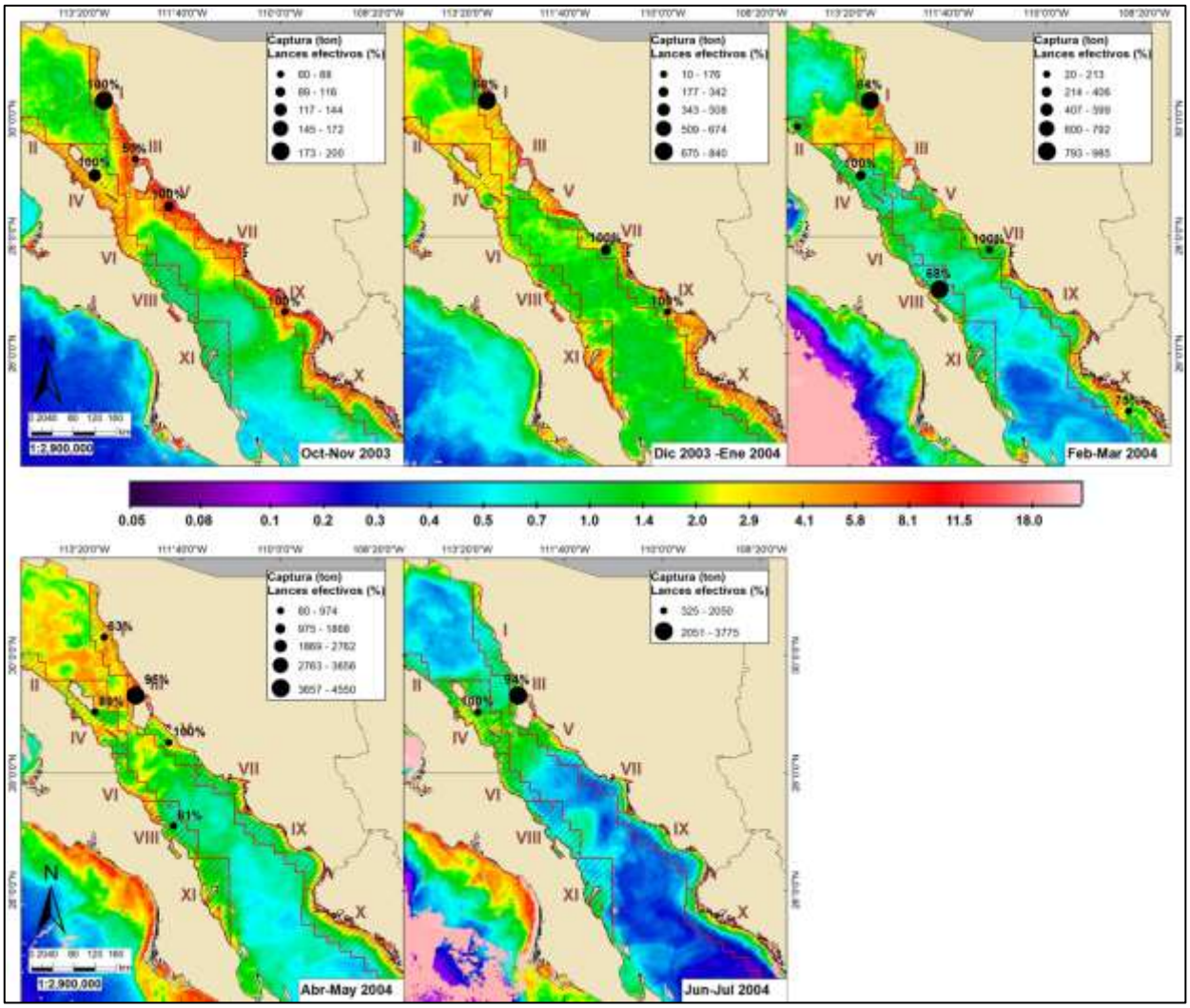


Figura 291. Distribución bimensual de lances efectivos (%) y captura (t) de sardina monterrey Sardinops sagax dentro y fuera de las zonas tradicionales de pesca en el Golfo de California durante la temporada 2003–2004, sobrepuesta en imágenes de promedio bimensual de clorofila a superficial. Los valores de lances efectivos y de captura representan una fracción de la flota cerquera de pelágicos menores.

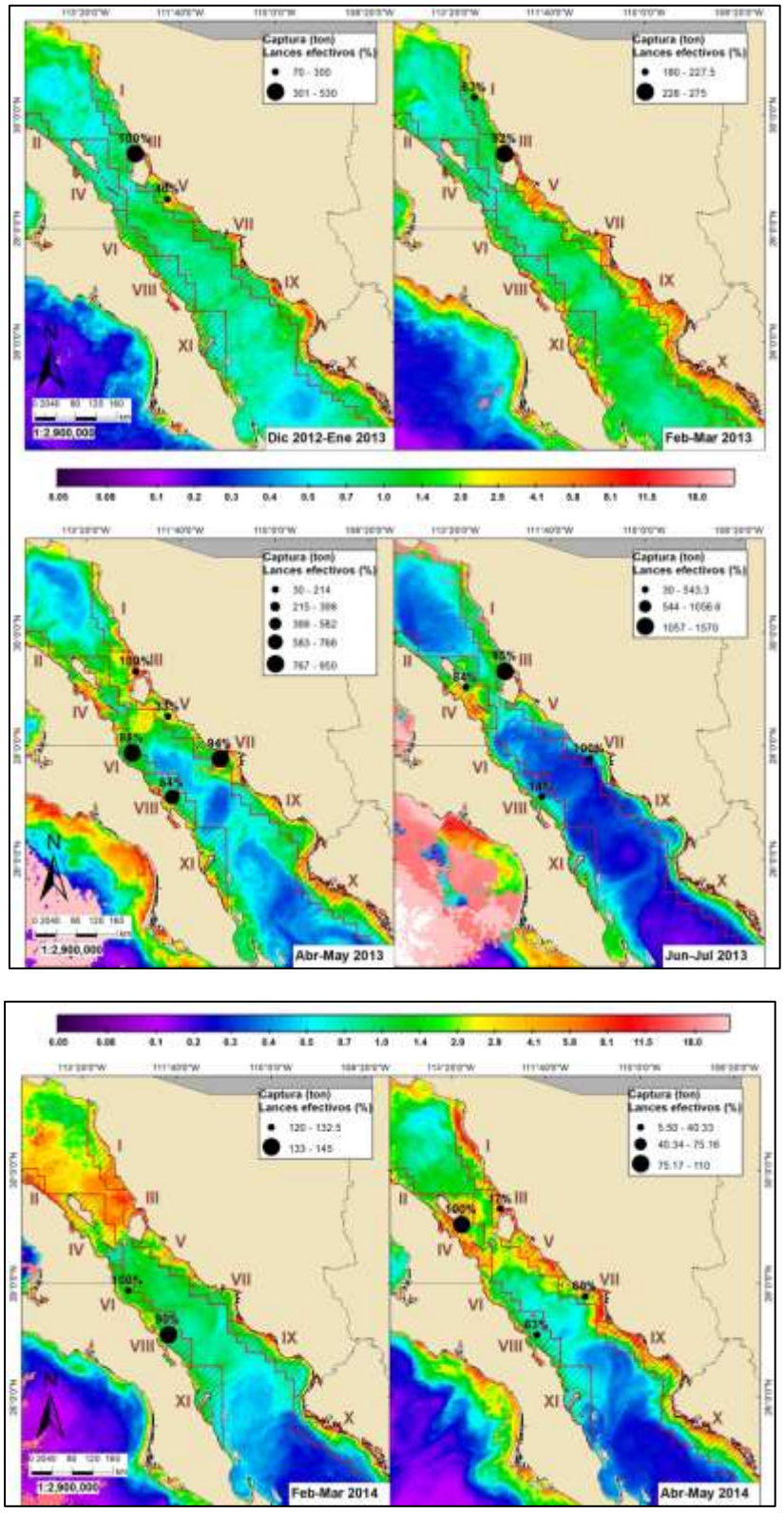


Figura 302. Distribución bimensual de lances efectivos (%) y captura (t) de sardina monterrey Sardinops sagax dentro y fuera de las zonas tradicionales de pesca en el Golfo de California durante las temporadas 2012–2013 y 2013–2014, sobrepuesta en imágenes de promedio bimensual de clorofila a superficial. Los valores de lances efectivos y de captura representan una fracción de la flota cerquera de pelágicos menores.

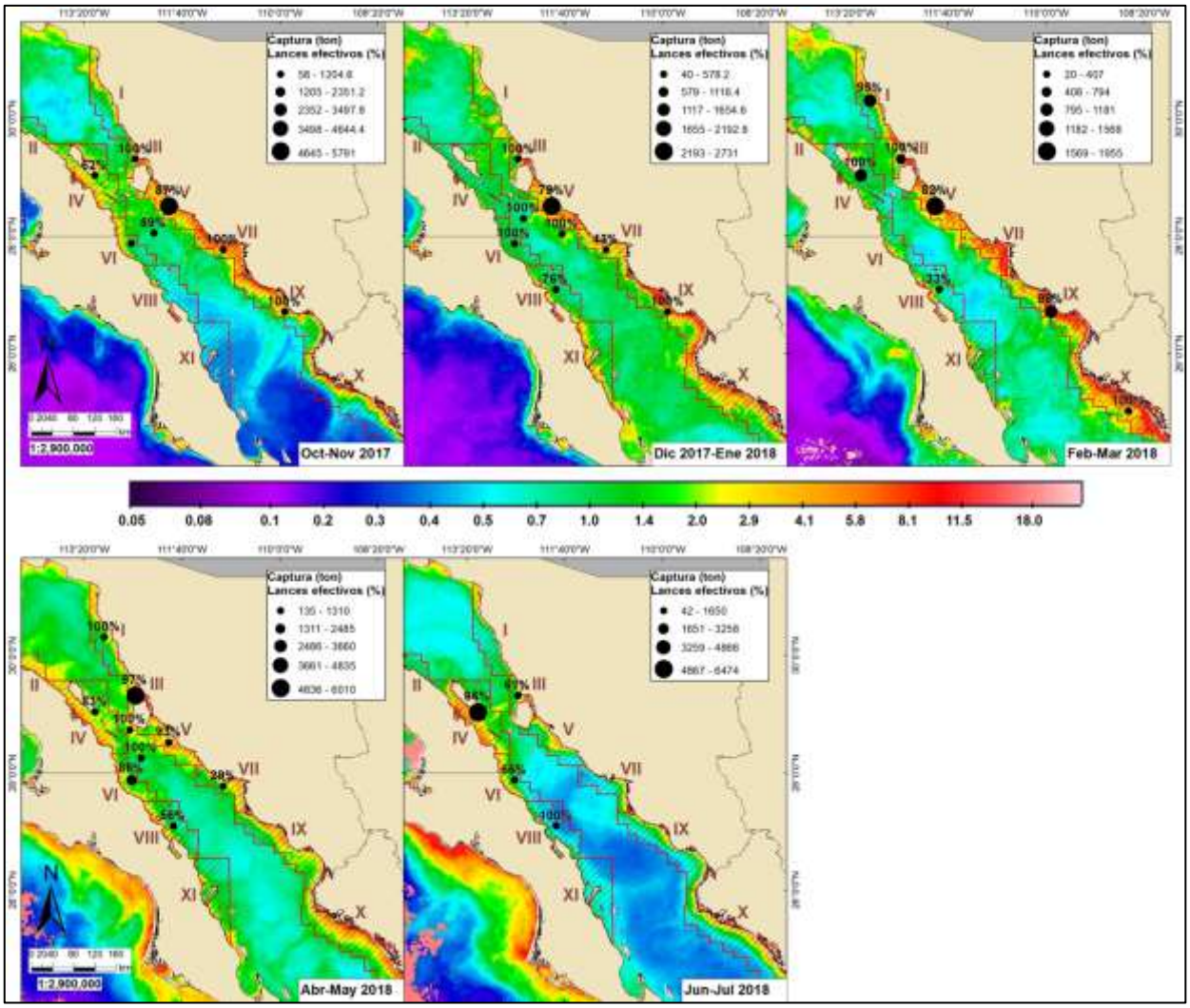


Figura 33. Distribución bimensual de lances efectivos (%) y captura (t) de sardina monterrey Sardinops sagax dentro y fuera de las zonas tradicionales de pesca en el Golfo de California durante la temporada 2017–2018, sobrepuesta en imágenes de promedio bimensual de clorofila a superficial. Los valores de lances efectivos y de captura representan una fracción de la flota cerquera de pelágicos menores.

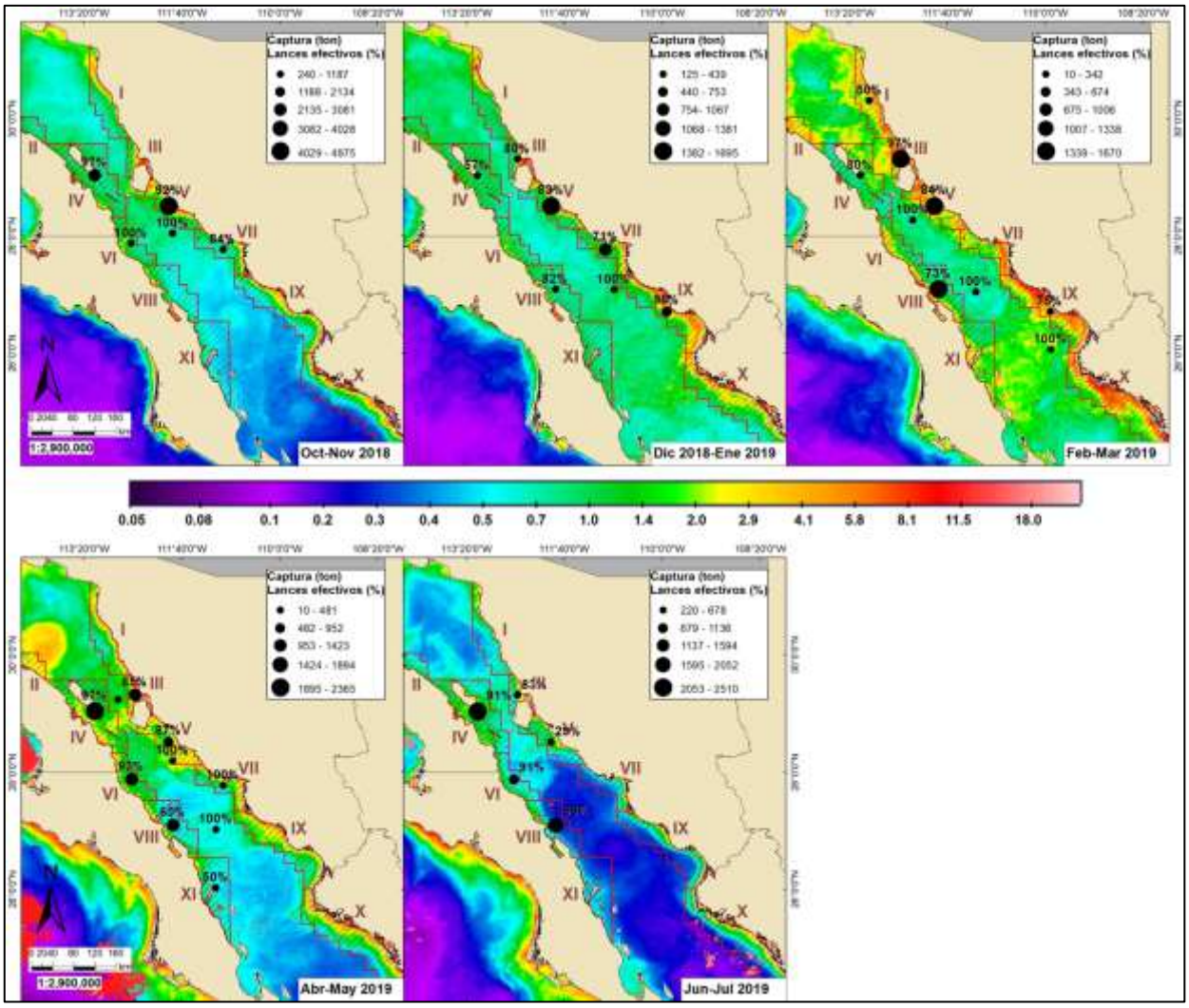
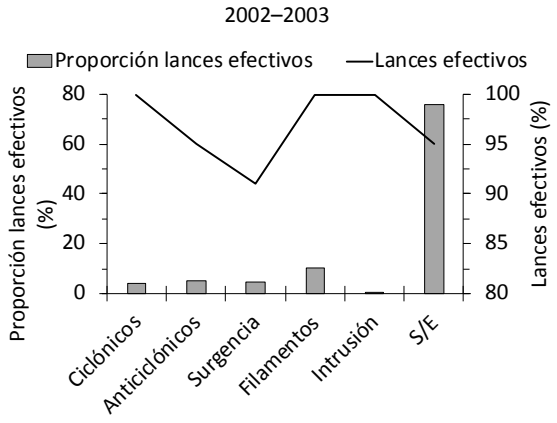
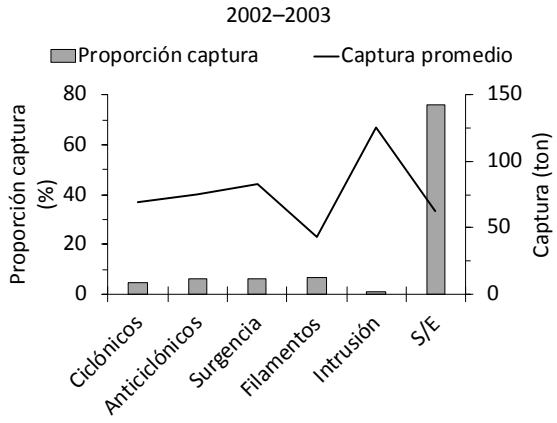
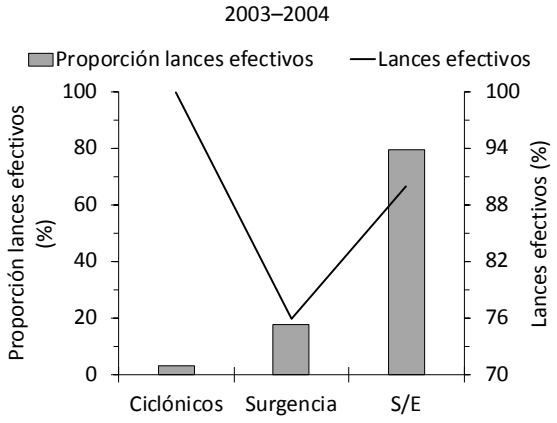
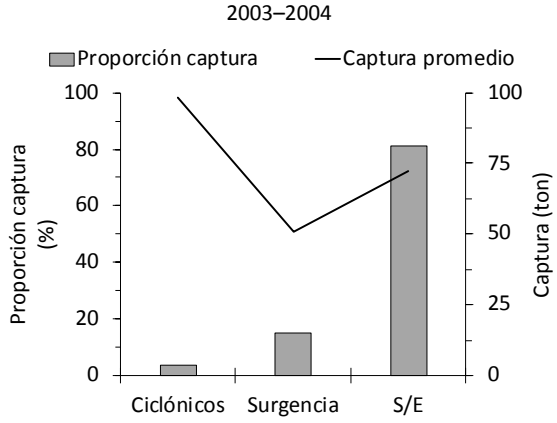


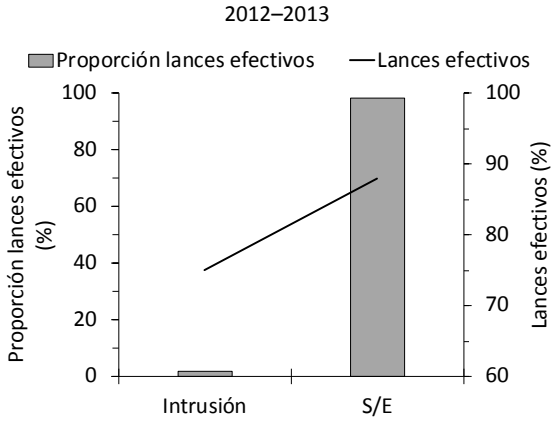
Figura 314. Distribución bimensual de lances efectivos (%) y captura (t) de sardina monterrey Sardinops sagax dentro y fuera de las zonas tradicionales de pesca en el Golfo de California durante la temporada 2018–2019, sobrepuesta en imágenes de promedio bimensual de clorofila *a* superficial. Los valores de lances efectivos y de captura representan una fracción de la flota cerquera de pelágicos menores.

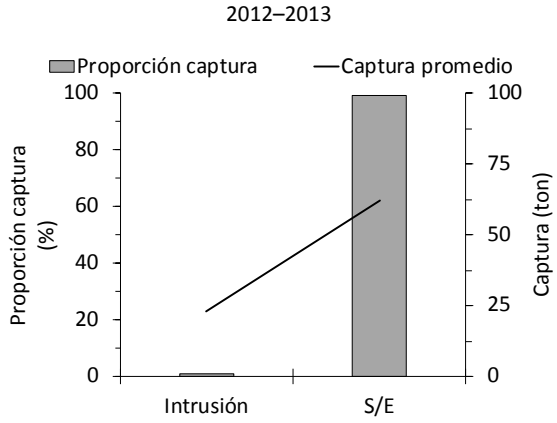

2002–2003
Proporción lances efectivos
Lances efectivos
Proporción lances efectivos (%)
Lances efectivos (%)
0
20
40
60
80
80
85
90
95
100
Ciclónicos
Anticiclónicos
Surgencia
Filamentos
Intrusión
S/E


2002–2003
Proporción captura
Captura promedio
Proporción captura (%)
Captura (ton)
0
20
40
60
80
0
50
100
150
Ciclónicos
Anticiclónicos
Surgencia
Filamentos
Intrusión
S/E


2003–2004
Proporción lances efectivos
Lances efectivos
Proporción lances efectivos (%)
Lances efectivos (%)
0
20
40
60
80
100
70
76
82
88
94
100
Ciclónicos
Surgencia
S/E


2003–2004
Proporción captura
Captura promedio
Proporción captura (%)
Captura (ton)
0
20
40
60
80
100
0
25
50
75
100
Ciclónicos
Surgencia
S/E


2012–2013
Proporción lances efectivos
Lances efectivos
Proporción lances efectivos (%)
Lances efectivos (%)
0
20
40
60
80
100
60
70
80
90
100
Intrusión
S/E


2012–2013
Proporción captura
Captura promedio
Proporción captura (%)
Captura (ton)
0
20
40
60
80
100
0
25
50
75
100
Intrusión
S/E

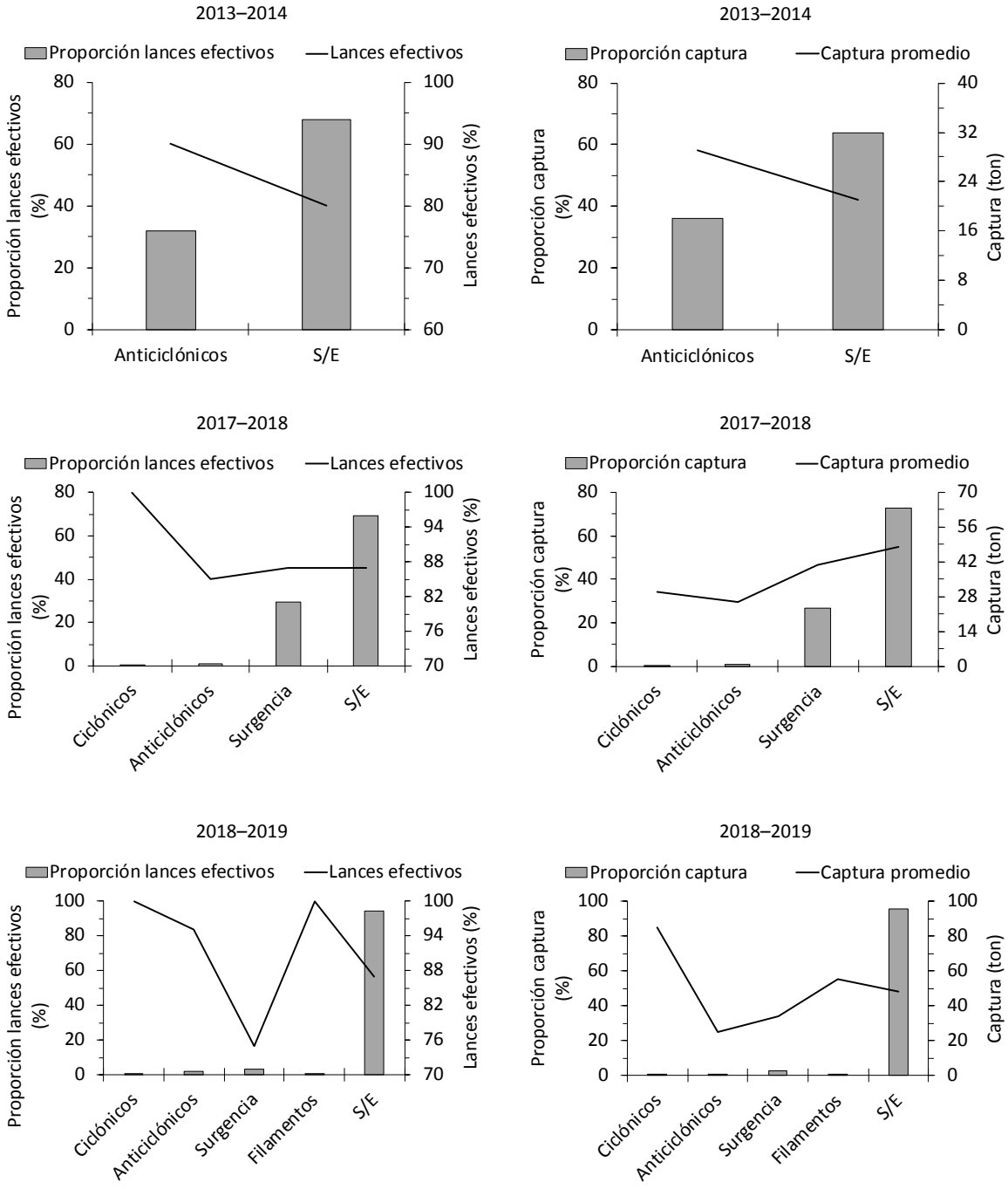
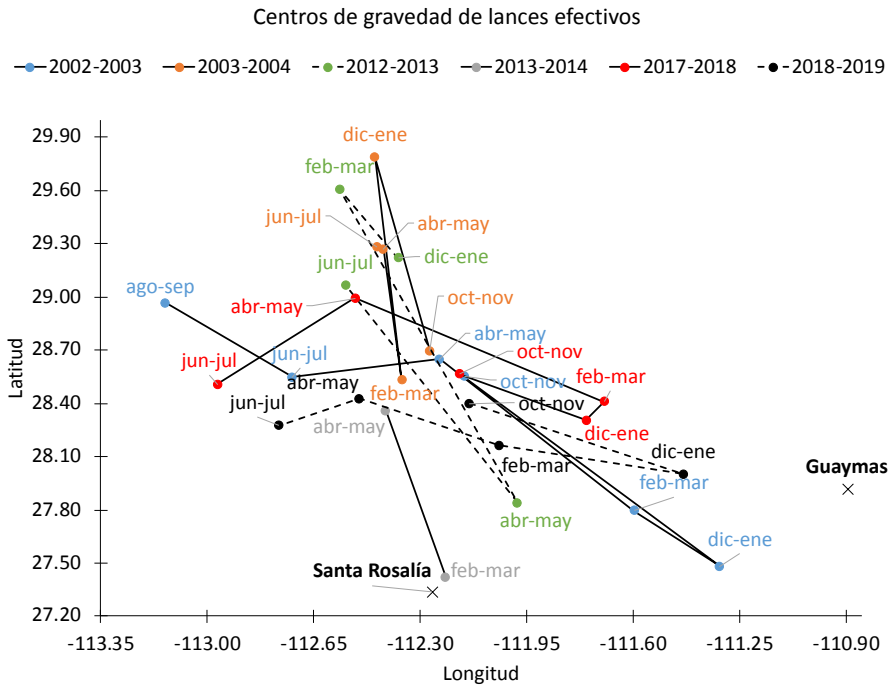


Figura 325. Proporción de lances efectivos, promedio de lances efectivos, proporción de captura y captura promedio de sardina monterrey Sardinops sagax de una fracción de la flota cerquera de pelágicos menores en el Golfo de California durante las temporadas de pesca 2002–2003, 2003–2004, 2012–2013, 2013–2014, 2017–2018 y 2018–2019.

Los centros de gravedad de los lances efectivos y de las capturas muestran, en promedio, el movimiento que realizó la flota pesquera durante cada temporada de pesca, que seguramente está asociado a los sitios con alta disponibilidad del recurso. De manera general, se observa que

la mayor concentración de las capturas coincide en alguna medida con los sitios de mayor proporción de lances efectivos. Esta fracción de la flota, al inicio de la temporada de pesca, por lo general realizó sus lances en regiones cercanas al puerto de desembarque (Guaymas); sin embargo, en algunas temporadas (2012–2013) sus lances y capturas se realizaron en zonas más cercanas a la península de Baja California, mientras que en otras (2003–2004) concentró sus lances cerca de la región de las Grandes Islas. También se observa, de manera general, que en la mayoría de las temporadas los lances y capturas más sureñas se realizaron durante los meses de invierno, mientras que durante el final de la temporada de pesca (verano) los lances y capturas se concentraron en la región de la península y de las Grandes Islas (Fig. 36).



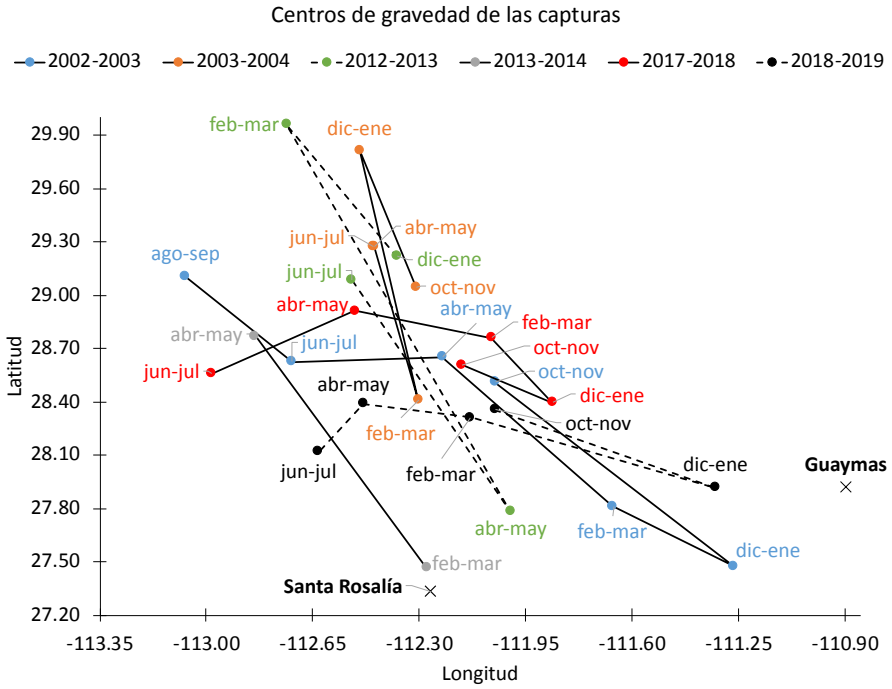


Figura 336. Centros de gravedad longitudinales y latitudinales de los lances efectivos y de las capturas bimensuales de sardina monterrey Sardinops sagax de una fracción de la flota cerquera de pelágicos menores en el Golfo de California, durante las temporadas de pesca 2002–2003, 2003–2004, 2012–2013, 2013–2014, 2017–2018 y 2018–2019.

Tabla 9. Valores óptimos mínimos y máximos de temperatura superficial del mar y de clorofila a con mayor proporción de lances efectivos durante cada temporada de pesca. Temperatura y concentración de clorofila a media en surgencias costeras con presencia de lances efectivos bimensuales de sardina monterrey Sardinops sagax durante cada temporada de pesca.

	Temperatura superficial del mar óptima (°C)		Valor medio de la temperatura superficial del mar (°C) presente en surgencias costeras				Clorofila *a* óptima (mg m^{-3})		Valor medio de la clorofila *a* (mg m^{-3}) presente en surgencias costeras			
	Min.	Max.	Oct-Nov	Dic-Ene	Feb-Mar	Abr-May	Min.	Max.	Oct-Nov	Dic-Ene	Feb-Mar	Abr-May
2002/2003	17.0	23.0	20.8	–	20.0	19.8	1.00	5.00	**6.67**	–	**7.05**	**11.44**
2003/2004			21.2	17.2	17.4	**23.9**			**10.07**	1.97	2.17	3.56
2017/2018			21.9	18.0	17.9	21.2			**5.24**	2.49	2.82	1.92
2018/2019			**23.2**	19.4	–	19.8			2.51	2.55	–	3.69

Tabla 10. Valores óptimos mínimos y máximos de temperatura superficial del mar y de clorofila a con mayor proporción de lances efectivos de sardina monterrey Sardinops sagax, durante cada temporada de pesca. Temperatura y concentración de clorofila a media en remolino ciclónico con presencia de lances efectivos bimensuales durante cada temporada de pesca.

	Temperatura superficial del mar óptima (°C)		Valor medio de la temperatura superficial del mar (°C) presente en remolino ciclónico				Clorofila *a* óptima (mg m^{-3})		Valor medio de la clorofila *a* (mg m^{-3}) presente en remolino ciclónico			
	Min.	Max.	Oct-Nov	Dic-Ene	Feb-Mar	Jun-Jul	Min.	Max.	Oct-Nov	Dic-Ene	Feb-Mar	Jun-Jul
2002/2003	17.0	23.0	–	20.1	19.2	–	1.00	5.00	–	1.19	4.74	–
2003/2004			–	–		**29.6**			–	–	–	1.99
2018/2019			**24.9**	–	19.0	–			**0.86**	–	1.37	–

Tabla 11. Valores óptimos mínimos y máximos de temperatura superficial del mar y de clorofila a con mayor proporción de lances efectivos de sardina monterrey Sardinops sagax, durante cada temporada de pesca. Temperatura y concentración de clorofila a media en remolino anticiclónico con presencia de lances efectivos bimensuales durante cada temporada de pesca.

	Temperatura superficial del mar óptima (°C)		Valor medio de la temperatura superficial del mar (°C) presente en remolino anticiclónico						Clorofila *a* óptima (mg m^{-3})		Valor medio de la clorofila *a* (mg m^{-3}) presente en remolino anticiclónico					
	Min.	Max.	Oct-Nov	Dic-Ene	Feb-Mar	Abr-May	Jun-Jul	Ago-Sep	Min.	Max.	Oct-Nov	Dic-Ene	Feb-Mar	Abr-May	Jun-Jul	Ago-Sep
2002/2003	17.0	23.0	–	–	20.3	**23.8**	–	**31.1**	1.00	5.00	–	–	2.7	**0.9**	–	**0.38**
2013/2014			–	–	21.0	–	–	–			–	–	1.1	–	–	–
2017/2018			**24.9**	18.0	–	–	**30.4**	–			1.1	5.9	–	–	**0.4**	–
2018/2019			–	–	19.2	–	–	–			–	–	**0.6**	–	–	–

Tabla 12. Valores óptimos mínimos y máximos de temperatura superficial del mar y de clorofila a con mayor proporción de lances efectivos de sardina monterrey Sardinops sagax, durante cada temporada de pesca. Temperatura y concentración de clorofila a media en frente por intrusión de masa de agua y en filamentos con presencia de lances efectivos bimensuales durante cada temporada de pesca.

	Temperatura superficial del mar óptima (°C)		Valor medio de la temperatura superficial del mar (°C) presente en frente por intrusión de masa de agua	Valor medio de la temperatura superficial del mar (°C) presente en filamentos	Clorofila *a* óptima (mg m^{-3})		Valor medio de la clorofila *a* (mg m^{-3}) presente en frente por intrusión de masa de agua	Valor medio de la clorofila *a* (mg m^{-3}) presente en filamentos
	Min.	Max.	Abr-May	Dic-Ene	Min.	Max.	Abr-May	Dic-Ene
2002/2003	17.0	23.0	**25.0**	19.7	1.00	5.00	**0.33**	3.8
2012/2013			**25.0**	–			**0.50**	–

8. DISCUSIÓN

El análisis de la asociación ambiente – recurso demanda un conocimiento profundo de los procesos físicos que se sugiere influyen en la dinámica de los organismos de interés. De ahí, la necesidad de hacer un análisis de la dinámica estacional e interanual de los procesos de mesoescala en el GC.

En particular en el Golfo de California, Marinone (2003) identificó que el comportamiento semianual de la circulación lagrangiana, representativa de las corrientes oceánicas superficiales, se debe al forzamiento hidrográfico, siendo el del Océano Pacífico el más importante. En el NGC, los remolinos ciclónicos fueron más frecuentes y de mayor duración durante el verano (junio-octubre), mientras que los remolinos anticiclónicos fueron más frecuentes y de mayor duración durante otoño-invierno (octubre-enero). Además, se ha identificado que los flujos de viento y calor son responsables de la variabilidad semestral, mientras que el Océano Pacífico lo es de la variabilidad anual de las corrientes superficiales, que dan origen a la formación de estos remolinos en el NGC (Gutiérrez *et al*., 2004).

Adicionalmente, en el presente estudio se observaron remolinos anticiclónicos y ciclónicos relativamente más pequeños y de vida más corta durante la circulación ciclónica de verano y la circulación anticiclónica de invierno, respectivamente. Estas observaciones no fueron detectadas por modelado numérico o datos hidrográficos; sin embargo, Gutiérrez *et al*. (2004), utilizando un modelo de circulación lagrangiana, observaron un pequeño remolino ciclónico durante el invierno. Además, Lopez-Calderon *et al*. (2008), utilizando imágenes de satélite de Chl *a* y datos de viento, observaron el mismo comportamiento de los remolinos en el NGC e identificaron la importancia de la componente del viento (u') a lo largo del GC en la formación de estos remolinos menos persistentes y más pequeños.

Aunque el NGC es relativamente poco profundo en comparación con la región central y sur, Lluch-Cota (2000) ha reportado surgencias costeras en la costa este, que muestran un patrón estacional y son más frecuentes durante el período de vientos del noroeste (octubre – mayo), coincidiendo con lo aquí encontrado. Igualmente, se observaron filamentos durante este

período de alta frecuencia de surgencias generadas por el forzamiento del viento; estas estructuras transportaron agua fría rica en nutrientes mar adentro. Además, contrario a lo que sucede en las regiones central y sur, la mayor presencia de filamentos se observó a principios del verano cuando filamentos largos se originaron en la región de las Grandes Islas, transportando agua fría y alta en Chl *a* al NGC. Todos estos procesos de mesoescala influyen directamente en el transporte de nutrientes y contribuyen de forma significativa a la alta productividad de la región.

Por otra parte, existe comunicación durante todo el año entre el NGC y el resto del golfo a través de los canales entre Isla Ángel de La Guarda e Isla Tiburón (Cuenca Tiburón), inhibida únicamente cuando hay circulación anticiclónica en el GC (mayo y octubre-noviembre) (Gutiérrez *et al*., 2004). Badan-Dangon *et al*. (1985) y Paden *et al*. (1991), utilizando imágenes satelitales de TSM observaron estas plumas (filamentos) que se originaron en las Grandes Islas y transportaron agua superficial fría al NGC. Los filamentos de verano de las Grandes Islas encontrados en este estudio se conectaron con el NGC a través de la cuenca Tiburón. Durante el verano la circulación ciclónica predomina en todo el golfo, favoreciendo la formación de estos procesos que podrían tener implicaciones importantes en el transporte de organismos planctónicos entre estas regiones.

El principal forzante de la circulación en el GC es el océano Pacífico, que ejerce su influencia anualmente a través de ondas internas tipo Kelvin que ingresan por la costa oriental del GC (Ripa, 1997). Gutiérrez *et al*. (2004) identificaron un período de circulación ciclónica de julio a agosto en las regiones central y sur. El viento también juega un papel importante como agente forzante para la circulación superficial del océano en estas regiones, por lo general hacia el sur durante el invierno y hacia el norte durante el verano (Jiménez *et al*., 2005). En el CGC la mayor presencia y máxima duración de remolinos ciclónicos se observó durante verano (julio–septiembre), lo que sugiere fue efecto del océano Pacífico, del régimen de vientos y de la interacción entre ambos forzantes. Zamudio *et al.* (2008) indican que, durante verano, el viento local y las ondas atrapadas costeras pueden aumentar la corriente que ingresa al GC, la cual interactúa con los cabos y línea de costa a lo largo del SGC Y CGC para generar remolinos. Como se puede apreciar en las imágenes de satélite de Chl *a*, en general, en el GC la concentración de

pigmentos de los remolinos depende más de la estación del año en la que se producen y de la costa donde se originan. Esto les permite, dependiendo de su rotación, concentrar o dispersar agua eutrófica u oligotrófica de un área a otra y afectar la distribución del plancton con efectos sobre la fauna costera y pelágica (García-Morales *et al*., 2017); estas mismas observaciones fueron realizadas por Lopez-Calderon *et al*. (2008) al analizar las imágenes de satélite de Chl *a* del NGC.

Las regiones centro y sur presentan dos periodos de circulación anticiclónica, de octubre a noviembre y en mayo; además, de enero a marzo, el viento induce corrientes que fluyen hacia la boca del golfo (Gutiérrez *et al*., 2004; Lavín y Marinone, 2003). El flujo hacia el sur de estos dos agentes forzantes y su interacción combinada a lo largo de las costas de las regiones central y sur serían responsables del alto número de días con presencia de remolinos anticiclónicos durante el otoño y el invierno en estas zonas; asimismo, la duración máxima de estos remolinos se reportó durante el otoño-invierno, cuando ambos agentes forzantes aumentan la duración de los remolinos. Sin embargo, en el SGC el número de días con la presencia de remolinos exhibe menor estacionalidad, siendo frecuentes durante casi todo el año. Esta región está en comunicación directa con el Océano Pacífico y forma parte de una zona de convergencia donde se mezclan las aguas de la Corriente de California, las aguas superficiales ecuatoriales transportadas por la Corriente Costera Mexicana (CCM) y las aguas del Golfo de California con alta salinidad, generando meandros y remolinos de mesoescala (Lavín *et al*., 2009; Pantoja *et al*., 2012). Considerando la confluencia de estas masas de agua y la hipótesis propuesta por Zamudio *et al*. (2008), respecto de que la interacción del CCM con la línea de costa al ingresar al SGC genera una serie de remolinos en esta región, entonces se espera que durante la mayor parte del año se presenten remolinos ciclónicos y anticiclónicos dependientes de las corrientes superficiales y la dirección del viento.

Los periodos de procesos de surgencias costeras registrados en este estudio para la CGC y SGC son similares a los reportados por Lluch-Cota (2000) utilizando un índice derivado del viento, y por García-Morales *et al*. (2017) usando imágenes de satélite Chl *a*. El uso de imágenes satelitales de TMS para detectar gradientes de temperatura superficial a lo largo de la costa, como un indicador para identificar procesos de afloramiento, se ha utilizado en otras regiones

(García-Reyes *et al*., 2014; Dabuleviciene *et al*., 2018). Aunque el viento no fue incluido para la identificación de este evento, el uso de gradientes de TSM podría ser de utilidad para también observar la respuesta biológica (concentración de Chl *a*) a este forzamiento del viento. Esto puede dar una idea de cuán estratificada está la columna de agua y que, a pesar de que haya forzamiento del viento, si la termoclina está más profunda de lo normal, el mecanismo de afloramiento será poco eficiente. Esto podría ocurrir con la intensificación de la CCM a través de ondas Kelvin costeras que podrían profundizar la termoclina en la costa este del GC (Lluch-Cota *et al*., 2007; Herrera-Cervantes *et al*., 2007).

Los filamentos provenientes de surgencias costeras tuvieron un comportamiento similar tanto en la región central como en el sur. Fueron más frecuentes en el CGC que en el SGC, probablemente porque el primero tiene un litoral más irregular con cabos y crestas, y como la fuerza del viento durante el invierno y la primavera genera corrientes hacia el ecuador, pueden interactuar con estas características costeras para aumentar la formación de estas estructuras (Navarro-Olache *et al*., 2004; Levín *et al*., 2006). Estos filamentos con agua fría y rica en pigmentos son mecanismos importantes para el transporte mar adentro de huevos y larvas de especies de importancia ecológica y económica con consecuencias para su sobrevivencia y reclutamiento (García-Morales *et al*., 2017).

El movimiento estacional de la Zona de Convergencia Intertropical provoca desplazamientos latitudinales del sistema de corrientes ecuatoriales, determinando qué tan al norte la Corriente Costera de Costa Rica transportará Agua Superficial Tropical (Lavín y Marinone, 2003). Adicionalmente, la CCM llega al GC durante la primavera y el otoño, mostrando un comportamiento estacional, cuya intensidad depende en gran medida de las ondas Kelvin ecuatoriales (Godínez *et al*., 2010; Gómez-Valdivia *et al*., 2015). Esto explica la intrusión estacional de masa de agua cálida (> 25 °C) y oligotrófica (< 0.3 mg m^{-3} Chl *a*) al SGC y CGC encontrada en este estudio, generalmente de abril a noviembre, llegando algunos años antes y/o retirándose más tarde debido probablemente a las ondas Kelvin internas. Esto concuerda con las observaciones realizadas por García-Morales *et al*. (2017) usando imágenes satelitales mensuales para la costa central de Sonora, mencionando que los frentes creados por la intrusión son mecanismos importantes de retención de plancton y distribución de especies.

El ACP permitió identificar que en el NGC la variabilidad interanual del número de días con la presencia de los remolinos ciclónicos y anticiclónicos, la frecuencia de surgencias costeras, y el número de días con la presencia de filamentos estuvo influenciada por eventos muy fuertes de El Niño y La Niña, representados por los valores del MEI, y también presentaron asociación con el PDO. Lavín y Marinone (2003) identificaron que el ENOS es responsable de las anomalías interanuales más fuertes en el GC, y que durante los eventos de El Niño, ondas atrapadas a la costa pueden profundizar de 50 a 100 m la capa superficial de mezcla y la termoclina. Además, la PDO controla un modo de la variabilidad ambiental en el GC que está asociada a los vientos y en menor medida a la temperatura superficial (Bernal *et al*., 2001), y algunas variables ambientales como el índice de surgencias costeras presentan coherencia con la tendencia del PDO y que la variabilidad de éstas está dominada por la interacción del PDO y el ENOS (Lluch-Cota *et al*., 2010). Esto explicaría la relación negativa de los eventos fuertes de El Niño y los valores positivos del PDO con la presencia interanual de las surgencias costeras, donde la termoclina es más profunda que el promedio, indicando que el agua subsuperficial, fría y rica en nutrientes, no aflora lo suficiente a la superficie. Este efecto también debería afectar la frecuencia de afloramientos costeros y consecuentemente de filamentos en las regiones central y sur del golfo, como se observó en los resultados de este estudio.

En el NGC, la circulación ciclónica durante verano–otoño y anticiclónica durante invierno–primavera se debe al forzamiento por el océano Pacífico en forma de onda atrapada de tipo Kelvin, sin embargo, el efecto acumulado del viento hacia esta región también es importante y contribuye a la presencia de remolino ciclónico en verano y anticiclónico en invierno (Beier, 1997; Beier y Ripa, 1999). Además, la circulación en el NGC es más susceptible a eventos cortos de vientos y a eventos interanuales como ENOS, particularmente durante la fase anticiclónica cuando la componente barotrópica es importante (Lavín *et al*., 1997; Carillo y Palacios-Hernández, 2002). En el presente estudio se mostró que la presencia de los remolinos anticiclónicos se ve afectada negativamente por condiciones fuertes de El Niño y valores positivos de PDO, cuya explicación pudiera ser el debilitamiento de los vientos del noroeste y el fortalecimiento de las ondas Kelvin internas que afectan la condición barotrópica. Gómez-Valdivia *et al*. (2015) observaron que, bajo condiciones de El Niño, además de la variabilidad de

las ondas Kelvin internas, existe un aumento en la velocidad de las corrientes costeras, potenciando los efectos de la CCM en el GC. La combinación de estos efectos durante los períodos de El Niño y de PDO positivos pueden ser responsables del aumento en el número de días con la presencia de filamentos de verano y de remolinos ciclónicos, como se muestra en el análisis de componentes principales.

La variabilidad interanual de los procesos de mesoescala en la CGC muestra que la intrusión de masa de agua se incrementa con condiciones El Niño fuertes y del PDO positivo; además, en menor medida, el aumento del número de días con la presencia de la intrusión de agua se relaciona con el incremento de los remolinos ciclónicos y anticiclónicos. El aumento de la corriente CCM debido a las ondas atrapadas costeras más fuertes durante los períodos ENOS positivos, debería indicar una interacción más fuerte de estas corrientes con la costa, aumentando la formación de remolinos ciclónicos y anticiclónicos en esta región (Zamudio *et al*., 2008; García-Morales *et al*., 2017).

En el SGC no se observó un efecto claro de la variabilidad interanual (ENOS o PDO) sobre la presencia de remolinos. Lo anterior posiblemente porque en esta región existe interacción entre el agua de la corriente de California, el agua superficial tropical y el agua del Golfo de California, presentando características termohalinas de transición (Lavín y Marinone, 2003; Pantoja *et al*., 2012). Además, la región presenta una variabilidad horizontal muy alta en la velocidad geostrófica, exhibiendo numerosos remolinos de mesoescala (Lavín y Marinone, 2003; Mascarenhas Jr *et al*., 2004). Parece que, excepto bajo condiciones fuertes de El Niño/La Niña, la variabilidad estacional es la más relevante en la interacción a gran escala entre la porción sur de la corriente de California y la Corriente Costera Mexicana (Kessler, 2006; Godínez *et al*., 2010). Además, desde esta región y hacia el norte, la influencia de ENOS está más restringida a la zona costera oriental (Godínez *et al*., 2010). Esta es, probablemente, la razón por la que los efectos de estos eventos climáticos no se observan completamente sobre los remolinos en esta región, ya que muchos estaban relativamente lejos de la costa, como se ve en las imágenes de satélite, y posiblemente se originaron por inestabilidades barotrópicas debido a la interacción de las masas de agua (Pantoja *et al*., 2012).

Fue obvio que el número de días con la presencia y frecuencia de estos procesos de mesoescala varían anualmente en las diferentes regiones del GC, ya que cada una de estas áreas exhibe distintas condiciones de profundidad, batimetría, línea de costa, viento local y corrientes superficiales. Además, el monitoreo constante de estos procesos oceánicos y su variabilidad, debido a eventos climáticos que ocurren a una escala espacial y temporal más amplia, ayudará a comprender cómo las diferentes regiones de este gran ecosistema marino responden a largo plazo. Estos procesos de mesoescala son importantes para la concentración, transporte y dispersión de nutrientes, pigmentos y organismos planctónicos, incluyendo huevos y larvas, afectando consecuentemente la distribución y abundancia de numerosas especies marinas de importancia ecológica y económica (García-Morales *et al*., 2017; Robles-Tamayo *et al*., 2020); contribuyendo en gran medida a la alta productividad del GC, que es uno de los ecosistemas marinos más productivos del mundo (Lluch-Cota *et al*., 2007; Páez-Osuna *et al*., 2016; Mercado-Santana *et al*., 2017).

Con respecto a la relación ambiente–sardina, si bien existe evidencia de relación directa entre la variabilidad de la captura con la TSM y la concentración de Chl *a* (García-Morales *et al*., 2012; Lanz *et al*., 2009), con la TSM y el índice de surgencia (Morales-Bojórquez, 1996; Nevárez-Martínez *et al*., 2001) y con fenómenos climáticos de gran escala, como ENOS, PDO y el cambio de régimen climático (Lluch-Belda *et al*., 1989, 1992; Lluch- Cota *et al*., 2017), era poca o nula la información sobre el efecto de los fenómenos de mesoescala sobre la distribución y abundancia de la especie. En este estudio se mostró la relación de los procesos de mesoescala que se presenta durante el período de reproducción–reclutamiento de la sardina, ambos eventos biológicos altamente determinantes en el éxito de la sobrevivencia y reclutamiento de la especie al stock pescable. Dada la orientación del trabajo, que tuvo como premisa varias hipótesis, como el período crítico y deriva larval (Hjort, 1914), el océano estable (Lasker, 1981) y retención (Iles y Sinclair, 1982), la ventana ambiental óptima (Cury y Roy, 1989) y la triada fundamental (Bakun *et al*., 1998), los procesos de mesoescala analizados en este estudio se plantean como mecanismos determinantes en el éxito o fracaso del reclutamiento de la sardina monterrey. Sin embargo, cabe aclarar que no son los únicos mecanismos y factores involucrados en la variabilidad de la abundancia de la sardina, ya que existen otros factores que pudieran

contribuir como los depredadores, la disponibilidad de presas, el crecimiento, el esfuerzo de pesca y el tamaño del stock parental (Houde, 2008), que no son incluidos en este análisis.

Es conocido que la variabilidad en las condiciones oceanográficas afecta el hábitat de desove y las áreas de distribución de la población de sardina (Abdelouahab *et al*., 2021). Los procesos de mesoescala aquí analizados, mostraron que la variabilidad interanual es muy recurrente. Además, la frecuencia interanual de surgencias costeras y filamentos en el GC ha demostrado estar negativamente correlacionada con condiciones fuertes de El Niño y período positivo del PDO. Por otro lado, la persistencia de la intrusión de masa de agua y, en menor medida, la presencia de remolinos anticiclónicos, han demostrado estar correlacionados con condiciones fuertes de El Niño y PDO positivo (Farach-Espinoza *et al*., 2021; García-Morales *et al*., 2017). Las tendencias a largo plazo de estos procesos de mesoescala pudieran verse reflejadas en la variabilidad interanual de las capturas de sardina, ya que la especie ha mostrado preferencias hacia condiciones óptimas en términos de TSM y surgencias costeras.

Se ha demostrado que la dinámica de mesoescala afecta las etapas tempranas de la vida de los peces pelágicos pequeños, controlando su dispersión y las tasas de mortalidad natural y, en consecuencia, su reclutamiento y dinámica poblacional (Torri *et al*., 2018). Un aumento en la magnitud de la captura de sardina se ha asociado con una mayor ocurrencia de remolinos de mesoescala, contribuyendo significativamente a sus variaciones interanuales (Al Jufaili y Piontkovski, 2019). Los resultados aquí presentados muestran que, con un aumento en la duración promedio de los remolinos, las capturas de sardina fueron considerablemente altas. Sin embargo, las capturas muy bajas se asociaron con remolinos de muy corta o muy larga duración, indicando que las capturas altas de sardina ocurren con remolinos de duración intermedia (25–40 días), con condiciones idóneas de TSM (17°C–23 °C) y Chl *a* (1 mg m^{-3}–5 mg m^{-3}). Además, ENOS puede modular las fluctuaciones de las corrientes regionales, que regulan la energía cinética de los remolinos y la variación interanual de la ocurrencia de remolinos (Jia *et al*., 2011; Al Jufaili y Piontkovski, 2019). Estos efectos sugieren que los eventos interanuales a gran escala, como ENOS y PDO, no solo afectan la temperatura del agua y la productividad primaria en el GC, sino que también pueden afectar la frecuencia y duración de los procesos

oceánicos de mesoescala, con consecuencias en la circulación superficial del océano y en el transporte de huevos y larvas y la dinámica de la sardina monterrey.

En aguas alejadas de la costa, en la región del sur de California, Nieto *et al*. (2014) determinaron que los remolinos acarrean aguas con condiciones óptimas en términos de temperatura, concentración de clorofila y energía cinética, lo que genera un hábitat propicio para el desove de la sardina del Pacífico, lo que aumenta la probabilidad de encontrar huevos dentro de procesos de mesoescala (remolinos y filamentos) en áreas distantes de la costa. Sin embargo, argumentan que una vez que los huevos eclosionan y las larvas se desarrollan y crecen en alta mar, a los peces juveniles les puede ser difícil regresar más cerca de la costa, lo que origina una falla en el reclutamiento. Dado que el GC es un mar semicerrado con restricciones longitudinales, el transporte mar adentro de huevos y larvas está limitado por varias decenas a muy pocos centenares de kilómetros, lo que básicamente no representa grandes distancias para que los juveniles puedan regresar más cerca de la costa. No obstante, si no encuentran áreas adecuadas para su sobrevivencia, puede tener efectos negativos en el reclutamiento. Lluch-Cota *et al*. (2000) identificaron que, en las primeras etapas de vida de la sardina en el GC, los organismos necesitan áreas con alto enriquecimiento, concentración y retención en la superficie del océano para su sobrevivencia, con efectos sucesivos en su reclutamiento. Estos mecanismos ambientales y su interacción se conocen como la tríada fundamental (Bakun *et al*., 1998).

Los remolinos al estar prácticamente atrapados en el interior del GC, sugiere que los efectos que éstos pudieran tener sobre las regiones costeras y oceánicas del golfo están presentes durante la mayor parte de su periodo de vida. Generalmente, los remolinos ciclónicos transportan plancton desde su núcleo hasta sus bordes, entre otros componentes, mientras que los remolinos anticiclónicos acumulan constituyentes en su núcleo. Apango-Figueroa *et al*. (2015) compararon la abundancia de larvas en el GC durante el verano y determinaron que, en un remolino anticiclónico, la mayor abundancia de larvas se observó por convergencia en comparación con un remolino ciclónico, que mostró la menor abundancia de larvas por efecto de divergencia. Aunque este estudio representa condiciones de verano, los mecanismos físicos de los remolinos aún permanecen durante el período de desove de la sardina. La relación entre la duración de los remolinos ciclónicos y anticiclónicos, y las capturas posteriores de *S. sagax*

encontrada en este estudio, sugiere que los huevos y las larvas encuentran un hábitat adecuado en los remolinos durante un cierto período de vida de estos procesos (∼ 24–34 días para remolinos ciclónicos y ∼ 32–41 días para remolinos anticiclónicos), probablemente cuando presentan mayor estabilidad y mejor hábitat en términos de SST, Chl *a* y disponibilidad de presas. Logerwell *et al*. (2001), determinaron que la relación entre la densidad de remolinos y el éxito reproductivo de la sardina en el área de la Corriente de California parece tener forma de domo, lo que indica que una densidad óptima de remolinos podría estar asociada con vientos fuertes y transportes relacionados con una alta frecuencia de remolinos, lo que podría interrumpir la alimentación, afectando el éxito de las primeras etapas de la sardina. Además, los cambios físicos que sufren los remolinos durante el período final de su duración podrían afectar la distribución de las larvas porque las estructuras de mesoescala comienzan a perder estabilidad (Apango-Figueroa *et al*., 2015; Bakun, 2006).

La relación casi lineal entre surgencias costeras y las capturas promedio muestra que el incremento en las surgencias beneficia a la sardina monterrey. En las áreas de surgencias los huevos de sardina son más comunes que las larvas, debido a que son sitios donde las sardinas adultas encuentran alimento (López-Martínez *et al*., 1999) y llevan a cabo el desove (Green-Ruiz y Hinojosa-Corona 1997), y la biomasa de fitoplancton y zooplancton suele ser mayor en las áreas frontales producto de los procesos de surgencias (Gómez-Gutiérrez *et al*., 2007; Robinson *et al*., 2007). La relación en forma de domo (no significativa) entre la frecuencia de surgencias y las capturas anómalas puede ser una equivalencia de la ventana ambiental óptima documentada por Cury y Roy (1989) para peces pelágicos pequeños, en entornos de afloramiento costero, donde la baja intensidad del afloramiento podría representar un bajo aporte de nutrientes y limitada disponibilidad de alimentos. Por otro lado, una alta intensidad podría indicar una alta turbulencia (Nevárez-Martínez *et al*., 2001; McClatchie *et al*., 2007), sugiriendo que la retención de organismos jóvenes y la capacidad de alimentación de las larvas serían factores limitantes.

En cuanto a los filamentos, sus efectos fueron moderadamente importantes en comparación con los otros procesos, probablemente debido a su menor tiempo de vida y menor influencia espacial. Sin embargo, en la serie de capturas anómalas, un aumento en la duración de los

filamentos se reflejó en capturas considerablemente bajas. En este estudio, los filamentos con una vida útil más larga (> 10 días) a menudo llegaron a la mitad del golfo. En los principales sistemas de afloramiento, los filamentos se consideran mecanismos de dispersión de huevos y larvas hacia alta mar (Artal *et al*., 2019), con posibles consecuencias en el reclutamiento. En la serie de captura media, los filamentos tenían una relación en forma de domo, lo que sugiere que una duración baja representa condiciones algo desfavorables y una duración más alta en períodos en los que la región costera es muy dinámica y con alta turbulencia, afecta la sobrevivencia de las primeras etapas de vida. Aceves-Medina *et al*. (2009) y Hammann *et al*. (1998) determinaron que las áreas de desove en el GC están acopladas con el transporte hacia el oeste de filamentos que eventualmente se conectan a remolinos y contribuyen a la retención de huevos y larvas, durante su deriva hacia zonas altamente productivas en el centro del GC. Asimismo, acoplar regiones de desove a filamentos y remolinos fríos, denota que los estadios tempranos de peces son transportados a áreas con mejor estabilidad de la columna de agua y disponibilidad de alimento, aumentando las tasas de crecimiento y acortando la fase larvaria planctónica (Aceves-Medina *et al*., 2009).

Los frentes térmicos a menudo representan áreas donde convergen dos masas de agua, lo que conduce a una alta retención de nutrientes y una alta productividad; ésto representa entornos adecuados para los peces en términos de disponibilidad de alimento, incrementando el éxito de la pesca (Bakun, 2006). Sin embargo, una presencia prolongada de intrusión de agua podría eventualmente representar un hábitat pobre en términos de TSM óptima, productividad y disponibilidad de presas. Se ha determinado que esta agua cálida tropical transporta micro y nano plancton (Valdéz-Holguín y Lara-Lara, 1987), cambiando la dinámica multitrófica en el GC. Debido al tamaño del espacio interbranquial de la sardina monterrey, este tipo de material planctónico no es retenido por sus branquias (López-Martínez *et al*., 1999), reduciendo el consumo de presas durante episodios prolongados de intrusión de agua. Además, la persistencia de la intrusión de masa de agua puede verse aumentada por eventos de El Niño (Farach-Espinoza *et al*., 2021; García-Morales *et al*., 2017), lo que resulta en una contracción de la distribución de sardina adulta a áreas cercanas a las Grandes Islas, reduciendo disponibilidad espacial a la pesquería (Nevárez-Martínez *et al*., 2001). Estos resultados podrían explicar el

descenso repentino de las capturas en la serie de capturas promedio asociado a una mayor persistencia de la intrusión de masas de agua encontrada en este estudio.

Por todo lo anterior, los procesos de mesoescala y su relación con la distribución y abundancia de la sardina son piezas claves para explicar parte de la alta variabilidad en sus capturas. En este estudio, si bien se hicieron análisis para determinar ciclos que son aparentes en las series de anomalías de los procesos de mesoescala, no fue posible identificarlos (no mostraron significancia estadística), debido a lo corto de las series. Se recomienda fuertemente continuar su análisis incorporando años y buscar la relación con eventos de escala interanual, decadal y multidecadal.

9. CONCLUSIONES

En el NGC, los remolinos y las surgencias costeras mostraron un marcado comportamiento estacional asociado al forzamiento del océano Pacífico y al comportamiento de los vientos dentro del GC. En el CGC, estos procesos junto con los filamentos y la intrusión de agua tropical también mostraron comportamiento estacional asociado a los agentes forzantes antes mencionados, sin embargo, la estacionalidad de los remolinos fue menos conspicua, probablemente porque en esta región se presenta una línea de costa más irregular y una mayor profundidad lo cual puede amortiguar el efecto local de los vientos y del océano Pacífico. En el SGC, se presentó estacionalidad en las surgencias costeras, filamentos e intrusión de agua tropical, sin embargo, en los remolinos fue menos evidente, probablemente debido a que en esta región interactúan masas de agua con distintas características, provocando interacciones termohalinas complejas.

La detección de frentes en imágenes satelitales de gradientes costeros de TSM ≥ 1°C y la sobreposición de estos frentes en imágenes de concentración de Chl *a*, muestra la respuesta física y biológica del forzamiento del viento sobre la línea de costa y pueden ser buenos indicadores para la identificación sinóptica de procesos de surgencias costeras a largo plazo.

La variabilidad interanual de procesos de mesoescala se asoció significativamente a eventos fuertes de El Niño y La Niña, así como a fases positivas y negativas del PDO. Esto demuestra que la señal y los efectos que estos eventos climáticos de gran escala pueden tener en el GC dependen de su intensidad y de la interacción entre ellos. Este trabajo destaca la importancia de utilizar imágenes satelitales para estudiar a largo plazo y en diferentes escalas espaciales la dinámica y la variabilidad de los ecosistemas marinos.

Todos los procesos de mesoescala analizados en este estudio se asociaron con las capturas. Sin embargo, los remolinos fueron los que presentaron mayor asociación durante las temporadas con capturas anómalas, en las que duraciones de $\sim$ 25–40 días de ambos tipos de remolinos fueron responsables de las capturas significativamente altas. Mientras que una duración media

muy alta de los remolinos ciclónicos y muy baja de los anticiclónicos se asociaron con capturas significativamente bajas.

Durante las temporadas con capturas promedio, la alta frecuencia de surgencias costeras y la baja persistencia de intrusión de masa de agua tropical presentaron mayores asociaciones con las altas capturas promedio, mientras que las menores capturas promedio se asociaron con una mayor persistencia de intrusión de masa de agua tropical y una menor frecuencia de surgencias costeras.

Comprender la variabilidad a largo plazo de los procesos de mesoescala y su impacto en las etapas tempranas de la vida de *S. sagax* ayudará a pronosticar la abundancia estacional de sardina y la disponibilidad para la pesquería a corto plazo. Si la TSM continúa aumentando, sus implicaciones en la disminución de afloramientos y filamentos costeros y el aumento en la persistencia de la intrusión de masa de agua podrían tener consecuencias en la dinámica trófica del Golfo de California.

10. LITERATURA CITADA

Abdelouahab, H., Berraho, A., Baibai, T., Larissi, J., Charib, S., Agouzouk, A., Makaoui, A., Ettahiri, O. y Errhif, A. (2021). Long term variation of sardine *Sardina pilchardus* spawning along the Atlantic coast of northwest Africa (21–26 N): characterization and spatiotemporal variability in spawning habitat. *Oceanologia*, 63(1): 1-11. doi: 10.1016/j.oceano.2020.08.006.

Abdi, H. y Williams, L. J. (2010). Principal component analysis. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2(4): 433-459. doi: 10.1002/wics.101.

Aceves-Medina, G., Palomares-García, R., Gómez-Gutiérrez, J., Robinson, C. J. y Saldierna-Martínez, R. J. (2009). Multivariate characterization of spawning and larval environments of small pelagic fishes in the Gulf of California. *Journal of Plankton Research*, 31(10): 1283-1297. doi: 10.1093/plankt/fbp056.

Al Jufaili, S. M. y Piontkovski, S. A. (2019). Seasonal and interannual variations of sardine catches along the Omani Coast. *International Journal of Oceans and Oceanography*, 14(77): 2020-77. doi: 10.37622/IJOO/14.1.2020.77-99.

Alpers, W., Brandt, P., Lazar, A., Dagorne, D., Sow, B., Faye, S., Hansen, M. W., Rubino, A., Poulain, P. M. y Brehmer, P. (2013). A small-scale oceanic eddy off the coast of West Africa studied by multi-sensor satellite and surface drifter data. *Remote Sensing of Environment*, 129: 132-143. doi: 10.1016/j.rse.2012.10.032.

Apango-Figueroa, E., Sánchez-Velasco, L., Lavín, M. F., Godinez, V. M. y Barton, E. D. (2015). Larval fish habitats in a mesoscale dipole eddy in the Gulf of California. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 103: 1-12. doi: 10.1016/j.dsr.2015.05.005.

Argote, M. L., Amador, A., Lavín, M. F. y Hunter, J. R. (1995). Tidal dissipation and stratification in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 100(C8): 16103-16118. doi: 10.1029/95JC01500.

Arístegui, J., Barton, E. D., Tett, P., Montero, M. F., García-Muñoz, M., Basterretxea, G., Cussatlegras, A. S., Ojeda, A. y De Armas, D. (2004). Variability in plankton community structure, metabolism, and vertical carbon fluxes along an upwelling filament (Cape Juby, NW Africa). *Progress in Oceanography*, 62(2-4): 95-113. doi: 10.1016/j.pocean.2004.07.004.

Arreguín-Sánchez, F., del Monte-Luna, P., Zetina-Rejón, M. J. y Albáñez-Lucero, M. O. (2017). The Gulf of California large marine ecosystem: fisheries and other natural resources. *Environmental development*, 22: 71-77. doi: 10.1016/j.envdev.2017.03.002.

Artal, O., Sepúlveda, H. H., Mery, D. y Pieringer, C. (2019). Detecting and characterizing upwelling filaments in a numerical ocean model. *Computers & Geosciences*, 122: 25-34. doi: 10.1016/j.cageo.2018.10.005.

Avendaño-Ibarra, R., Godínez-Domínguez, E., Aceves-Medina, G., González-Rodríguez, E. y Trasviña, A. (2013). Fish larvae response to biophysical changes in the Gulf of California, Mexico (winter-summer). *Journal of Marine Biology*, 2013: 1-17. doi: 10.1155/2013/176760.

Badan-Dangon, A., Koblinsky, C. J. y Baumgartner, T. (1985). Spring and summer in the Gulf of California: observations of surface thermal patterns. *Oceanologica Acta*, 8(1): 13-22.

Badan, A. (2003). The atmosphere over the Gulf of California. En: *Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 205-212.

Badan-Dangon, A., Dorman, C. E., Merrifield, M. A. y Winant, C. D. (1991). The lower atmosphere over the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 96(C9): 16877-16896. doi: 10.1029/91JC01433.

Bakun, A. y Parrish, R. H. (1990). Comparative studies of coastal pelagic fish reproductive habitats: the Brazilian sardine (*Sardinella aurita*). *ICES Journal of Marine Science*, 46(3): 269-283. doi: 10.1093/icesjms/46.3.269.

Bakun, A. (1994). Climate change and marine populations: interactions of physical and biological dynamics. En: *Workshop on Scope, significance, and policy implications of Global Change and marine environment*. University of Rhode Island, USA, pp. 14-17.

Bakun, A., Roy, C., Lluch-Cota, S. (1998). Coastal upwelling and other processes regulating ecosystem productivity and fish production in the western Indian Ocean. En: *Large marine ecosystems of the Indian Ocean: Assessment, sustainability and management*. Blackwell, London, pp. 103-141.

Bakun, A. (2006). Fronts and eddies as key structures in the habitat of marine fish larvae: opportunity, adaptive response and competitive advantage. *Scientia Marina*, 70(S2): 105-122. doi: 10.3989/scimar.2006.70s2105.

Bakun, A., Black, B. A., Bograd, S. J., García-Reyes, M., Miller, A. J., Rykaczewski, R. R. y Sydeman, W. J. (2015). Anticipated effects of climate change on coastal upwelling ecosystems. *Current Climate Change Reports*, 1(2): 85-93. doi: 10.1007/s40641-015-0008-4.

Batchelor, G.K. (1967). *An Introduction to Fluid Dynamics*. 1st. ed. Cambridge University Press, London.

Baumgartner, T. R. y Christensen, N. (1985). Coupling of the Gulf of California to large-scale interannual climatic variability. *Journal of Marine Research*, 43(4): 825-848. doi: 10.1357/002224085788453967.

Baumgartner, T. (1992). Reconstruction of the history of Pacific sardine and northern anchovy populations over the past two millenia from sediments of the Santa Barbara basin, California. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports*, 33: 24-40.

Bécognée, P., Moyano, M., Almeida, C., Rodríguez, J. M., Fraile-Nuez, E., Hernández-Guerra, A. y Hernández-León, S. (2009). Mesoscale distribution of clupeoid larvae in an upwelling filament trapped by a quasi-permanent cyclonic eddy off Northwest Africa. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 56(3): 330-343. doi: 10.1016/j.dsr.2008.10.008.

Beier, E. (1997). A numerical investigation of the annual variability in the Gulf of California. *Journal of physical oceanography*, 27(5): 615-632. doi: 10.1175/1520-0485(1997)027<0615:ANIOTA>2.0.CO;2.

Beier, E. y Ripa, P. (1999). Seasonal gyres in the northern Gulf of California. *Journal of physical oceanography*, 29(2): 305-311. doi: 10.1175/1520-0485(1999)029<0305:SGITNG>2.0.CO;2.

Bernal, G., Ripa, P. y Herguera, J. C. (2001). Oceanographic and climatic variability in the lower Gulf of California: Links with the tropics and North Pacific. *Ciencias Marinas*, 27(4): 595-617. doi: 10.7773/cm.v27i4.498.

Bodenhofer, U., Kothmeier, A. y Hochreiter, S. (2011). APCluster: an R package for affinity propagation clustering. *Bioinformatics*, 27(17): 2463-2464. doi: 10.1093/bioinformatics/btr406.

Bolz, G. R. y Lough, R. G. (1984). Retention of ichthyoplankton in the Georges Bank region during the autumn-winter seasons, 1971-77. *Journal of Northwest Atlantic Fishery Science*, 5(1): 33.45.

Brinton, E., Fleminger, A. y Siegel-Causey, D. (1986). The temperate and tropical planktonic biotas of the Gulf of California. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports*, 27: 228-266.

Carrillo, L. y Palacios-Hernández, E. (2002). Seasonal evolution of the geostrophic circulation in the northern Gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54(2): 157-173. doi: 10.1006/ecss.2001.0845.

Castro, R., Lavín, M. F. y Ripa, P. (1994). Seasonal heat balance in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 99(C2): 3249-3261. doi: 10.1029/93JC02861.

Castro, R., Mascarenhas, A. S., Durazo, R. y Collins, C. A. (2000). Seasonal variation of the temperature and salinity at the entrance to the Gulf of California, Mexico. *Ciencias Marinas*, 26(4): 561-583. doi: 10.7773/cm.v26i4.621.

Cayula, J. F. y Cornillon, P. (1992). Edge detection algorithm for SST images. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 9(1): 67-80. doi: 10.1175/1520-0426(1992)009<0067:EDAFSI>2.0.CO;2.

Cisneros-Mata, M. A., Nevárez-Martínez, M. O. y Hammann, G. (1995). The rise and fall of the Pacific sardine, *Sardinops sagax caeruleus* Girard, in the Gulf of California, Mexico. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports*, 36: 136–143.

Cisneros-Mata, M.A., Nevárez-Martínez, M.O., Martínez-Zavala, M.A., Anguiano-Carrazco, M.L., Santos-Molina, J.P., Godínez-Cota, R., Montemayor-López, G. (1997). *Diagnosis de la pesquería de pelágicos menores en el Golfo de California de 1991 a 1995/96.* Instituto Nacional de la Pesca. CRIP Guaymas, Sonora, México.

Coria-Monter, E., Monreal-Gómez, M. A., Salas-de-León, D. A., Aldeco-Ramírez, J. y Merino-Ibarra, M. (2014). Differential distribution of diatoms and dinoflagellates in a cyclonic eddy confined in the Bay of La Paz, Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(9): 6258-6268. doi: 10.1002/2014JC009916.

Cruz-Gómez, R.C., Monreal-Gómez, M. A. y Nicolaevich Bulgakov, S. (2008). Efectos de los vórtices en sistemas acuáticos y su relación con la química, biología y geología. *Interciencia*, 33(10): 741-746.

Culley, M. (1971). *The pilchard: biology and exploitation*. Elsevier. 1st. ed. Pergamon Press Limited, Oxford.

Cury, P. y Roy, C. (1989). Optimal environmental window and pelagic fish recruitment success in upwelling areas. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 46(4): 670-680. doi: 10.1139/f89-086.

Cury, P., Bakun, A., Crawford, R. J., Jarre, A., Quiñones, R. A., Shannon, L. J. y Verheye, H. M. (2000). Small pelagics in upwelling systems: patterns of interaction and structural changes in "wasp-waist" ecosystems. *ICES Journal of Marine Science*, 57(3): 603-618. doi: 10.1006/jmsc.2000.0712.

Cyr, F. y Larouche, P. (2015). Thermal fronts atlas of Canadian coastal waters. *Atmosphere-ocean*, 53(2): 212-236. doi: 10.1080/07055900.2014.986710.

Dabuleviciene, T., Kozlov, I. E., Vaiciute, D. y Dailidiene, I. (2018). Remote sensing of coastal upwelling in the south-eastern Baltic Sea: Statistical properties and implications for the coastal environment. *Remote Sensing*, 10(11): 1752. doi: 10.3390/rs10111752.

Danell-Jiménez, A., Sánchez-Velasco, L., Lavín, M. F. y Marinone, S. G. (2009). Three-dimensional distribution of larval fish assemblages across a surface thermal/chlorophyll front in a semienclosed sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 85(3): 487-496. doi: 10.1016/j.ecss.2009.09.010.

Davis, R. E. (1976). Predictability of sea surface temperature and sea level pressure anomalies over the North Pacific Ocean. *Journal of Physical Oceanography*, 6(3): 249-266. doi: 10.1175/1520-0485(1976)006<0249:POSSTA>2.0.CO;2.

Diehl, S. F., Budd, J. W., Ullman, D. y Cayula, J. F. (2002). Geographic window sizes applied to remote sensing sea surface temperature front detection. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(7): 1105-1113. doi: 10.1175/1520-0426(2002)019<1105:GWSATR>2.0.CO;2.

Douglas, R., Gonzalez-Yajimovich, O., Ledesma-Vázquez, J. y Staines-Urías, F. (2007). Climate forcing, primary production and the distribution of Holocene biogenic sediments in the Gulf of California. *Quaternary Science Reviews*, 26(1-2): 115-129. doi: 10.1016/j.quascirev.2006.05.003.

Dufois, F., Hardman-Mountford, N. J., Greenwood, J., Richardson, A. J., Feng, M. y Matear, R. J. (2016). Anticyclonic eddies are more productive than cyclonic eddies in subtropical gyres because of winter mixing. *Science Advances*, 2(5): 1-6. doi: 10.1126/sciadv.1600282.

Emilsson, I. y Alatorre, M. A. (1997). Evidencias de un remolino ciclónico de mesoescala en la parte sur del Golfo de California. En: *Contribuciones a la oceanografía física en México.* Unión Geofísica Mexicana, México, D.F., pp. 173-182.

Faghmous, J. H., Frenger, I., Yao, Y., Warmka, R., Lindell, A. y Kumar, V. (2015). A daily global mesoscale ocean eddy dataset from satellite altimetry. *Scientific Data*, 2(1): 1-16. doi: 10.1038/sdata.2015.28.

Farach-Espinoza, E. B., López-Martínez, J., García-Morales, R., Nevárez-Martínez, M. O., Lluch-Cota, D. B. y Ortega-García, S. (2021). Temporal variability of oceanic mesoscale events in the Gulf of California. *Remote Sensing*, 13(9): 1774. doi: 10.3390/rs13091774.

Fiedler, P. C. y Talley, L. D. (2006). Hydrography of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69(2-4): 143-180. doi: 10.1016/j.pocean.2006.03.008.

Figueroa, J. M., Marinone, S. G. y Lavin, M. F. (2003). A description of geostrophic gyres in the southern Gulf of California. En: *Nonlinear processes in geophysical fluid dynamics*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 237-255.

Flament, P., Armi, L. y Washburn, L. (1985). The evolving structure of an upwelling filament. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 90(C6): 11765-11778. doi: 10.1029/JC090iC06p11765.

Flierl, G. R. y Wroblewski, J. S. (1985). The possible influence of warm core Gulf Stream rings upon shelf water larval fish distribution. *Fishery Bulletin*, 83(3): 313-330.

Froese, R., Demirel, N., Coro, G., Kleisner, K. M. y Winker, H. (2017). Estimating fisheries reference points from catch and resilience. *Fish and Fisheries*, 18(3): 506-526. doi: 10.1111/faf.12190.

Fu, L. L., Chelton, D. B., Le Traon, P. Y. y Morrow, R. (2010). Eddy dynamics from satellite altimetry. *Oceanography*, 23(4): 14-25.

García-Morales, R. (2012). *Variabilidad oceanográfica del hábitat de los stocks de Sardinops sagax (Jenyns, 1842) (Clupeiformes: clupeidae) en el sistema de la corriente de California (1981-2005)*. *Tesis Doctoral*. Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, La Paz.

García-Morales, R., Shirasago-Germán, B., Félix-Uraga, R. y Pérez-Lezama, E. L. (2012). Conceptual models of Pacific sardine distribution in the California current system. *Current Development in Oceanography*, 5: 23-47.

García-Morales, R., López-Martínez, J., Valdez-Holguín, J. E., Herrera-Cervantes, H. y Espinosa-Chaurand, L. D. (2017). Environmental variability and oceanographic dynamics of the central and southern coastal zone of Sonora in the Gulf of California. *Remote Sensing*, 9(9): 925. doi: 10.3390/rs9090925.

García-Reyes, M., Largier, J. L. y Sydeman, W. J. (2014). Synoptic-scale upwelling indices and predictions of phyto-and zooplankton populations. *Progress in Oceanography*, 120: 177-188. doi: 10.1016/j.pocean.2013.08.004.

García-Reyes, M., Sydeman, W. J., Schoeman, D. S., Rykaczewski, R. R., Black, B. A., Smit, A. J. y Bograd, S. J. (2015). Under pressure: Climate change, upwelling, and eastern boundary upwelling ecosystems. *Frontiers in Marine Science*, 2: 109. doi: 10.3389/fmars.2015.00109.

Godínez, V. M., Beier, E., Lavín, M. F. y Kurczyn, J. A. (2010). Circulation at the entrance of the Gulf of California from satellite altimeter and hydrographic observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C4): 1-15. doi: https://doi.org/10.1029/2009JC005705.

Gómez-Gutiérrez, J., Martínez-Gómez, S. y Robinson, C. J. (2007). Influence of thermo-haline fronts forced by tides on near-surface zooplankton aggregation and community structure in Bahía Magdalena, Mexico. *Marine Ecology Progress Series*, 346: 109-125. doi: 10.3354/meps07019 .

Gómez-Valdivia, F., Parés-Sierra, A. y Flores-Morales, A. L. (2015). The Mexican Coastal Current: A subsurface seasonal bridge that connects the tropical and subtropical northeastern Pacific. *Continental Shelf Research*, 110: 100-107. doi: 10.1016/j.csr.2015.10.010.

González-Rodríguez, E., Trasviña-Castro, A., Gaxiola-Castro, G., Zamudio, L. y Cervantes-Duarte, R. (2012). Net primary productivity, upwelling and coastal currents in the Gulf of Ulloa, Baja California, México. *Ocean Science*, 8(4): 703-711. doi: 10.5194/os-8-703-2012.

Green-Ruiz, Y. A. y Hinojosa-Corona, A. (1997). Study of the spawning area of the northern anchovy in the Gulf of California from 1990 to 1994, using satellite images of sea surface temperatures. *Journal of Plankton Research*, 19(8): 957-968. doi: 10.1093/plankt/19.8.957.

Gutiérrez, O. Q., Marinone, S. G. y Parés-Sierra, A. (2004). Lagrangian surface circulation in the Gulf of California from a 3D numerical model. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51(6-9): 659-672. doi: 10.1016/j.dsr2.2004.05.016.

Hammann, M. G., Baumgartner, T. R. y Badan-Dangon, A. (1988). Coupling of the Pacific sardine (*Sardinops sagax caeruleus*) life cycle with the Gulf of California pelagic environment. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports*, 29: 102-109.

Hammann, M. G., Nevárez-Martínez, M. O. y Green-Ruíz, Y. (1998). Spawning habitat of the Pacific sardine (*Sardinops sagax*) in the Gulf of California: Egg and larval distribution 1956-1957 and 1971-1991. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports*, 39: 169-179.

Harvey, J. B., Ryan, J. P. y Zhang, Y. (2021). Influences of extreme upwelling on a coastal retention zone. *Frontiers in Marine Science*, 8:648944. doi: 10.3389/fmars.2021.648944.

Hastie, T. y Tibshirani, R. (1986). Generalized additive models. *Statistical Science*. 1(3): 297-310. doi: 10.1214/ss/1177013604.

Heras-Sánchez, M. D. C., Valdez-Holguín, J. E. y Hazas-Izquierdo, R. G. (2018). Sea-surface temperature spatiotemporal analysis for the Gulf of California, 1998–2015: Regime change simulation. En: *International Conference on Supercomputing in Mexico*. Springer, Cham, Switzerland, pp. 167-181.

Herrera-Cervantes, H., Lluch-Cota, D. B., Lluch-Cota, S. E. y Gutiérrez-de-Velasco S, G. (2007). The ENSO signature in sea-surface temperature in the Gulf of California. *Journal of Marine Research*, 65(5): 589-605. doi: 10.1357/002224007783649529.

Hilborn, R. y Walters, C. J. (1992). Stock and recruitment. En: *Quantitative fisheries stock assessment: choice, dynamics, and uncertainty*. Springer, Boston, pp. 241-296.

Hinrichsen, H. H. (2009). Biological processes and links to the physics. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56(21-22): 1968-1983. doi: 10.1016/j.dsr2.2008.11.008.

Hjort, J. (1914). *Fluctuations in the great fisheries of northern Europe*. Conseil Permanent International Pour L'exploration de la Mer. Rapports et Procés-Verbaux, Copenhague.

Holmgren-Urba, D. y Baumgartner, T. R. (1993). A 250-year history of pelagic fish abundances from the anaerobic sediments of the central Gulf of California. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports*, 34: 60-68.

Houde, E. D. (2008). Emerging from Hjort's shadow. *Journal of Northwest Atlantic Fishery Science*, 41: 53-70. doi: 10.2960/J.v41.m634.

Iglewicz, B. y Hoaglin, D. C. (1993). *How to detect and handle outliers*. ASQC Quality Press, Milwaukee.

Iles, T. D. y Sinclair, M. (1982). Atlantic herring: stock discreteness and abundance. *Science*, 215(4533): 627-633. doi: 10.1126/science.215.4533.627.

Inda-Díaz, E. A., Sánchez-Velasco, L. y Lavín, M. F. (2010). Three-dimensional distribution of small pelagic fish larvae (*Sardinops sagax* and *Engraulis mordax*) in a tidal-mixing front and surrounding waters (Gulf of California). *Journal of Plankton Research*, 32(9): 1241-1254. doi: 10.1093/plankt/fbq051.

Jia, F., Wu, L., Lan, J. y Qiu, B. (2011). Interannual modulation of eddy kinetic energy in the southeast Indian Ocean by Southern Annular Mode. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C2): 1-9. doi: 10.1029/2010JC006699.

Jiménez, A., Marinone, S. G. y Parés-Sierra, A. (2005). Effect of the spatial and temporal variability of winds on the circulation in the Gulf of California. *Ciencias Marinas*, 31(2): 357-368. doi: 10.7773/cm.v31i2.58.

Jolliffe, I. T. y Cadima, J. (2016). Principal component analysis: a review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374(2065): 20150202. doi: 10.1098/rsta.2015.0202.

Jones, B. H., Mooers, C. N., Rienecker, M. M., Stanton, T. y Washburn, L. (1991). Chemical and biological structure and transport of a cool filament associated with a jet-eddy system off northern California in July 1986 (OPTOMA21). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 96(C12): 22207-22225. doi: 10.1029/91JC02146.

Kahru, M., Mitchell, B. G., Gille, S. T., Hewes, C. D. y Holm-Hansen, O. (2007a). Eddies enhance biological production in the Weddell-Scotia confluence of the Southern Ocean. *Geophysical Research Letters*, 34(14): 1-6. doi: 10.1029/2007GL030430.

Kahru, M., Fiedler, P. C., Gille, S. T., Manzano, M. y Mitchell, B. G. (2007b). Sea level anomalies control phytoplankton biomass in the Costa Rica Dome area. *Geophysical Research Letters*, 34(22): 1-5. doi: 10.1029/2007GL031631.

Kassambara, A. y Mundt, F. (2021). *Factoextra: Extract and visualize the results of multivariate data analyses, R package version 1.0. 7. 2020*. Disponible en: https://cran.r-project.org/package=factoextra [consulta: 10 enero 2021].

Kawasaki, T. (1993). Recovery and collapse of the Far Eastern sardine. *Fisheries Oceanography*, 2(3-4): 244-253. doi: 10.1111/j.1365-2419.1993.tb00139.x.

Kämpf, J., Chapman, P. (2016). The functioning of coastal upwelling systems. En: *Upwelling systems of the world*. Springer, Cham, Switzerland, pp. 31-65. doi: 10.1007/978-3-319-42524-5_2.

Kessler, W. S. (2006). The circulation of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69(2-4): 181-217. doi: 10.1016/j.pocean.2006.03.009.

Kiørboe, T., Munk, P., Richardson, K., Christensen, V. y Paulsen, H. (1988). Plankton dynamics and larval herring growth, drift and survival in a frontal area. *Marine Ecology Progress Series*, 44(3): 205-219.

Lam, T. J. (1983). Environmental influences on gonadal activity in fish. En: *Fish physiology*. Academic Press, New York, pp. 65-116.

Lanz, E., Nevárez-Martínez, M., López-Martínez, J. y Dworak, J. A. (2009). Small pelagic fish catches in the Gulf of California associated with sea surface temperature and chlorophyll. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports*, 50: 134-146.

Lasker, R. (1981). The role of a stable ocean in larval fish survival and subsequent recruitment. *Marine fish larvae: morphology, ecology and relation to fisheries*, 1: 80-89.

Laurs, R. M., Fiedler, P. C. y Montgomery, D. R. (1984). Albacore tuna catch distributions relative to environmental features observed from satellites. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 31(9): 1085-1099. doi: 10.1016/0198-0149(84)90014-1.

Lavín, M. F., Durazo, R., Palacios, E., Argote, M. L. y Carrillo, L. (1997). Lagrangian observations of the circulation in the northern Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography*, 27(10): 2298-2305. doi: 10.1175/1520-0485(1997)027<2298:LOOTCI>2.0.CO;2.

Lavín, M. F. y Marinone, S. G. (2003). An overview of the physical oceanography of the Gulf of California. En: *Nonlinear processes in geophysical fluid dynamics*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 173-204.

Lavín, M. F., Beier, E., Gómez-Valdés, J., Godínez, V. M. y García, J. (2006). On the summer poleward coastal current off SW México. *Geophysical Research Letters*, 33(2): 1-4. doi: 10.1029/2005GL024686.

Lavín, M. F., Castro, R., Beier, E., Godínez, V. M., Amador, A. y Guest, P. (2009). SST, thermohaline structure, and circulation in the southern Gulf of California in June 2004 during the North American Monsoon Experiment. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(C2): 1-22. doi: 10.1029/2008JC004896.

Levin, S. A. (1992). The problem of pattern and scale in ecology. *Ecology*, 73(6): 1943-1967. doi: 10.2307/1941447.

Lê, S., Josse, J. y Husson, F. (2008). FactoMineR: an R package for multivariate analysis. *Journal of Statistical Software*, 25: 1-18. doi: 10.18637/jss.v025.i01.

Li, G., Chen, X., Lei, L. y Guan, W. (2014). Distribution of hotspots of chub mackerel based on remote-sensing data in coastal waters of China. *International Journal of Remote Sensing*, 35(11-12): 4399-4421. doi: 10.1080/01431161.2014.916057.

Li, J., Wang, G. y Zhai, X. (2017). Observed cold filaments associated with mesoscale eddies in the South China Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(1): 762-770. doi: 10.1002/2016JC012353.

Lluch-Belda, D. R. J. M., Crawford, R. J., Kawasaki, T., MacCall, A. D., Parrish, R. H., Schwartzlose, R. A. y Smith, P. E. (1989). World-wide fluctuations of sardine and anchovy stocks: the regime problem. *South African Journal of Marine Science*, 8(1): 195-205. doi: 10.2989/02577618909504561.

Lluch-Belda, D., Schwartzlose, R. A., Serra, R., Parrish, R., Kawasaki, T., Hedgecock, D. y Crawford, R. J. M. (1992). Sardine and anchovy regime fluctuations of abundance in four regions of the world oceans: a workshop report. *Fisheries Oceanography*, 1(4): 339-347. doi: 10.1111/j.1365-2419.1992.tb00006.x.

Lluch-Cota, S. E. (2000). Coastal upwelling in the eastern Gulf of California. *Oceanologica Acta*, 23(6): 731-740. doi: 10.1016/S0399-1784(00)00121-3.

Lluch-Cota, S.E. y Arias-Aréchiga, J.P. (2000). Sobre la importancia de considerar la existencia de centros de actividad biológica para la regionalización del océano: El caso del Golfo de California. En: *BAC: Centros de actividad biológica del Pacífico mexicano*. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C., México, pp. 255-263.

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

Lluch-Cota, S. E., Morales-Zárate, M. V., Lluch-Cota, D. B. (2008). Variabilidad del clima y pesquerías del noroeste de México. En: *Variabilidad Ambiental y Pesquerías de México*. Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca, Mazatlán, pp. 82-86.

Lluch-Cota, S. E., Parés-Sierra, A., Magaña-Rueda, V. O., Arreguín-Sánchez, F., Bazzino, G., Herrera-Cervantes, H. y Lluch-Belda, D. (2010). Changing climate in the Gulf of California. *Progress in Oceanography*, 87(1-4): 114-126. doi: 10.1016/j.pocean.2010.09.007.

Lluch-Cota, S. E., Salvadeo, C., Lluch-Cota, D. B., Saldívar-Lucio, R. y Díaz, G. P. (2017). Impacts of climate change on Mexican Pacific fisheries. *Climate Change Impacts on Fisheries and Aquaculture: A Global Analysis*, 1: 219-238. doi: 10.1002/9781119154051.ch9.

Lobel, P. S. y Robinson, A. R. (1988). Larval fishes and zooplankton in a cyclonic eddy in Hawaiian waters. *Journal of Plankton Research*, 10(6): 1209-1223. doi: 10.1093/plankt/10.6.1209.

Logerwell, E. A. y Smith, P. E. (2001). Mesoscale eddies and survival of late stage Pacific sardine (*Sardinops sagax*) larvae. *Fisheries Oceanography*, 10(1): 13-25. doi: 10.1046/j.1365-2419.2001.00152.x.

Logerwell, E. A., Lavaniegos, B. y Smith, P. E. (2001). Spatially-explicit bioenergetics of Pacific sardine in the Southern California Bight: are mesoscale eddies areas of exceptional prerecruit production?. *Progress in Oceanography*, 49(1-4): 391-406. doi: 10.1016/S0079-6611(01)00032-5.

Lopez-Calderon, J., Martinez, A., Gonzalez-Silvera, A., Santamaria-del-Angel, E. y Millan-Nuñez, R. (2008). Mesoscale eddies and wind variability in the northern Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C10): 1-13. doi: https://doi.org/10.1029/2007JC004630.

López-Martínez, J., Nevárez-Martínez, M. O., Molina-Ocampo, R. E. y Manrique-Colchado, F. A. (1999). Overlap in the type and size of the prey that compose the diet of the pacific sardine *Sardinops caeruleus* (Girard, 1856), thread herring *Opisthonema libertate* (Gunther, 1867) and northern anchovy *Engraulis mordax* (Girard, 1856) in the Gulf of California. *Ciencias Marinas*, 25(4): 541-556. 10.7773/cm.v25i4.727.

López-Martínez, J. Ed. (2008). *La Variabilidad Ambiental y las Pesquerías de México*. Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca, Mazatlán, Sinaloa, México.

Lynn, R. J. (2003). Variability in the spawning habitat of Pacific sardine (*Sardinops sagax*) off southern and central California. *Fisheries Oceanography*, 12(6): 541-553. doi: 10.1046/j.1365-2419.2003.00232.x.

Macewicz, B. J., Castro-González, J. J., Cotero-Altamirano, C. E., y Hunter, J. (1996). Adult reproductive parameters of Pacific sardine (*Sardinops sagax*) during 1994. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports*, 37: 140-151.

Mair, P. y Wilcox, R. (2020). Robust statistical methods in R using the WRS2 package. *Behavior Research Methods*, 52(2): 464-488. doi: 10.3758/s13428-019-01246-w.

Mann, K. H. (1992). Physical influences on biological processes: how important are they?. *South African Journal of Marine Science*, *12*(1): 107-121. doi: 10.2989/02577619209504695.

Mantua, N. J., Hare, S. R., Zhang, Y., Wallace, J. M. y Francis, R. C. (1997). A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(6): 1069-1080. doi: 10.1175/1520-0477(1997)078<1069:APICOW>2.0.CO;2.

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): 1-27. doi: 10.1029/2002JC001720.

Martínez-Aguilar, S., Arreguín-Sánchez, F. y Morales-Bojórquez, E. (2005). Natural mortality and life history stage duration of Pacific sardine (*Sardinops caeruleus*) based on gnomonic time divisions. *Fisheries Research*, 71(1): 103-114. doi: 10.1016/j.fishres.2004.04.008.

Martínez-Flores, G. M., Sánchez, E. N. y Zaitzev, O. (2011). Teledetección de plumas de material suspendido influenciadas por escorrentía en el sur del Golfo de California. *Cicimar Oceánides*, 26(1): 95-102. doi: 10.37543/oceanides.v26i1.91.

Martínez-Rincón, R. O., Saldívar-Lucio, R., Morales, M., Lluch-Cota, S. E., Lluch-Cota, D. B., Salvadeo, C. y Ponce-Díaz, G. (2019). Contribution of ocean variability to climate-catch models

of Pacific sardine. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 159: 103-111. doi: 10.1016/j.dsr2.2018.12.001.

Mascarenhas Jr, A. S., Castro, R., Collins, C. A. y Durazo, R. (2004). Seasonal variation of geostrophic velocity and heat flux at the entrance to the Gulf of California, Mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C7): 1-9. doi: 10.1029/2003JC002124.

McClatchie, S., Rogers, P. J. y McLeay, L. (2007). Importance of scale to the relationship between abundance of sardine larvae, stability, and food. *Limnology and Oceanography*, 52(4): 1570-1579. doi: 10.4319/lo.2007.52.4.1570.

Mercado-Santana, J. A., Santamaría-del-Ángel, E., González-Silvera, A., Sánchez-Velasco, L., Gracia-Escobar, M. F., Millán-Núñez, R. y Torres-Navarrete, C. (2017). Productivity in the Gulf of California large marine ecosystem. *Environmental Development*, 22: 18-29. doi: 10.1016/j.envdev.2017.01.003.

Merrifield, M. A. y Winant, C. D. (1989). Shelf circulation in the Gulf of California: A description of the variability. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 94(C12): 18133-18160. doi: 10.1029/JC094iC12p18133.

Morales-Bojórquez, E. (1996). *Simulación de las fluctuaciones de Sardina Monterrey (Sardinops caeruleus) con base en la relación existente entre el stock, el reclutamiento y la variabilidad ambiental*. *Tesis Maestría*. Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, La Paz.

Morales-Bojórquez, E., Gómez-Muñoz, V. M., Félix-Uraga, R. y Alvarado-Castillo, R. (2003). Relation between recruitment, sea surface temperature, and the density-independent mortality of the Pacific sardine (*Sardinops caeruleus*) off the southwest coast of the Baja California Peninsula, Mexico. *Scientia Marina*, 67(1): 25-32. doi: 10.3989/scimar.2003.67n125.

Morrow, R. y Le Traon, P. Y. (2012). Recent advances in observing mesoscale ocean dynamics with satellite altimetry. *Advances in Space Research*, 50(8): 1062-1076. doi: 10.1016/j.asr.2011.09.033.

Myers, R. A. y Drinkwater, K. F. (1989). Offshelf Ekman transport and larval fish survival in the northwest Atlantic. *Biological Oceanography*, 6(1): 45-64.

Navarro-Olache, L. F., Lavín, M. F., Álvarez-Sánchez, L. G. y Zirino, A. (2004). Internal structure of SST features in the central Gulf of California. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51(6-9): 673-687. Doi: 10.1016/j.dsr2.2004.05.014.

Nevárez-Martínez, M. O., Lluch-Belda, D., Cisneros-Mata, M. A., Santos-Molina, J. P., Martínez-Zavala, M. D. L. A. y Lluch-Cota, S. E. (2001). Distribution and abundance of the Pacific sardine (*Sardinops sagax*) in the Gulf of California and their relation with the environment. *Progress in Oceanography*, 49(1-4): 565-580. doi: 10.1016/S0079-6611(01)00041-6.

Nevárez-Martínez, M. O., Martínez-Zavala, M. D. L. Á., Jacob-Cervantes, M. L., Cotero-Altamirano, C. E., Santos-Molina, J. P., Valdez-Pelayo, A. (2014). Peces pelágicos menores (*Sardinops sagax*, *Opisthonema spp*., *Scomber japonicus*, *Engraulix mordax*, *Centengraulis mysticetus*, *Etrumeus teres*, *Trachurus symmetricus*, *Oligoplites spp*.). En*: Sustentabilidad y Pesca Responsable en México. Evaluación y Manejo.* Instituto Nacional de Pesca, México, pp. 83-137.

Nevárez-Martínez, M. O., Arzola-Sotelo, E. A., López-Martínez, J., Santos-Molina, J. P. y Martínez-Zavala, M. A. (2019). Modeling growth of the Pacific sardine *Sardinops caeruleus* in the Gulf of California, Mexico, using the multimodel inference approach. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports*, 60: 1-13.

Nieto, K., McClatchie, S., Weber, E. D. y Lennert-Cody, C. E. (2014). Effect of mesoscale eddies and streamers on sardine spawning habitat and recruitment success off southern and central California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(9): 6330-6339. doi: 10.1002/2014JC010251.

Paden, C. A., Abbott, M. R. y Winant, C. D. (1991). Tidal and atmospheric forcing of the upper ocean in the Gulf of California: 1. Sea surface temperature variability. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 96(C10): 18337-18359. doi: 10.1029/91JC01597.

Páez-Osuna, F., Sanchez-Cabeza, J. A., Ruiz-Fernández, A. C., Alonso-Rodríguez, R., Piñón-Gimate, A., Cardoso-Mohedano, J. G., Flores-Verdugo, F.J., Carballo, J.L., Cisneros-Mata, M.A. y Álvarez-Borrego, S. (2016). Environmental status of the Gulf of California: A review of responses to climate change and climate variability. *Earth-Science Reviews*, 162: 253-268. doi: 10.1016/j.earscirev.2016.09.015.

Palacios-Hernández, E., Beier, E., Lavín, M. F. y 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. doi: 10.1175/1520-0485(2002)032<0705:TEOTSV>2.0.CO;2.

Pantoja, D. A., Marinone, S. G., Parés-Sierra, A. y Gómez-Valdivia, F. (2012). Numerical modeling of seasonal and mesoscale hydrography and circulation in the Mexican Central Pacific. *Ciencias Marinas*, 38(2): 363-379. doi: 10.7773/cm.v38i2.2007.

Parrish, J. K. (1999). Using behavior and ecology to exploit schooling fishes. *Environmental Biology of Fishes*, 55(1): 157-181. 10.1023/A:1007472602017.

Pegau, W. S., Boss, E. y Martínez, A. (2002). Ocean color observations of eddies during the summer in the Gulf of California. *Geophysical Research Letters*, 29(9): 1-3. doi: 10.1029/2001GL014076.

Petatán-Ramírez, D., Ojeda-Ruiz, M. Á., Sánchez-Velasco, L., Rivas, D., Reyes-Bonilla, H., Cruz-Piñón, G., Morzaria-Luna, H. N., Cisneros-Montemayor, M. A., Cheung, W. y Salvadeo, C. (2019). Potential changes in the distribution of suitable habitat for Pacific sardine (*Sardinops sagax*)

under climate change scenarios. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 169–170, 104632. doi: 10.1016/j.dsr2.2019.07.020.
Pitcher, T. J. y Hart, P.J.B. (1982). *Fisheries Ecology*. 1ª ed. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Podestá, G. P., Browder, J. A. y Hoey, J. J. (1993). Exploring the association between swordfish catch rates and thermal fronts on US longline grounds in the western North Atlantic. *Continental Shelf Research*, 13(2-3): 253-277. doi: 10.1016/0278-4343(93)90109-B.

Portela, E., Beier, E., Barton, E. D., Castro, R., Godínez, V., Palacios-Hernández, E., Fiedler, P.C., Sánchez-Velasco, L. y Trasviña, A. (2016). Water masses and circulation in the tropical Pacific off central Mexico and surrounding areas. *Journal of Physical Oceanography*, 46(10), 3069-3081. doi: 10.1175/JPO-D-16-0068.1.

Quattrocchi, F. y Maynou, F. (2017). Environmental drivers of sardine (*Sardina pilchardus*) in the Catalan Sea (NW Mediterranean Sea). *Marine Biology Research*, 13(9): 1003-1014. doi: 10.1080/17451000.2017.1331039.

Robinson, C. J., Gómez-Aguirre, S. y Gómez-Gutiérrez, J. (2007). Pacific sardine behaviour related to tidal current dynamics in Bahía Magdalena, México. *Journal of Fish Biology*, 71(1): 200-218. doi: 10.1111/j.1095-8649.2007.01484.x.

Ripa, P. (1997). Toward a physical explanation of the seasonal dynamics and thermodynamics of the Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography*, 27(5): 597-614. doi: 10.1175/1520-0485(1997)027<0597:TAPEOT>2.0.CO;2.

Robles-Tamayo, C. M., García-Morales, R., Valdez-Holguín, J. E., Figueroa-Preciado, G., Herrera-Cervantes, H., López-Martínez, J. y Enríquez-Ocaña, L. F. (2020). Chlorophyll a concentration distribution on the mainland coast of the Gulf of California, Mexico. *Remote Sensing*, 12(8): 1335. doi: 10.3390/rs12081335.

Rodríguez, J. M., Barton, E. D., Hernández-León, S. y Arístegui, J. (2004). The influence of mesoscale physical processes on the larval fish community in the Canaries CTZ, in summer. *Progress in Oceanography*, 62(2-4): 171-188. doi: 10.1016/j.pocean.2004.07.006.

Rodríguez, J. M., Hernández-León, S. y Barton, E. D. (2006). Vertical distribution of fish larvae in the Canaries-African coastal transition zone in summer. *Marine Biology*, 149(4): 885-897. doi: 10.1007/s00227-006-0270-z.

Rojas, P. M. (2014). Diel variation in the vertical distribution of fish larvae forced by upwelling filaments off Punta Angamos (northern Chile). *Latin American Journal of Aquatic Research*, 42(3): 401-417.

Romero-Centeno R. D. L. (1995). *Comportamiento de los campos hidrográficos y flujos de calor y masa en el Canal de Ballenas. Tesis de Maestría*. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Departmento de Oceanografía Física, Ensenada.

Rothchild, B. J. y Osborn, T. R. (1988). The effects of turbulence on planktonic contact rates. *Journal of Plankton Research*, 10: 465-475.
Roy, C. (1998). An upwelling-induced retention area off Senegal: a mechanism to link upwelling and retention processes. *South African Journal of Marine Science*, 19(1): 89-98. doi: 10.2989/025776198784126881.

Sánchez-Velasco, L., Valdez-Holguín, J. E., Shirasago, B., Cisneros-Mata, M. A. y Zarate, A. (2002). Changes in the spawning environment of *Sardinops caeruleus* in the Gulf of California during El Niño 1997–1998. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54(2): 207-217. doi: 10.1006/ecss.2001.0840.

Sánchez-Velasco, L., Jiménez-Rosenberg, S. A. y Lavín, M. F. (2007). Vertical distribution of fish larvae and its relation to water column structure in the southwestern Gulf of California. *Pacific Science*, 61(4): 533-548. doi: 10.2984/1534-6188(2007)61[533:VDOFLA]2.0.CO;2.

Sánchez-Velasco, L., Lavín, M. F., Peguero-Icaza, M., León-Chávez, C. A., Contreras-Catala, F., Marinone, S. G., Gutiérrez-Palacios, I. V. y Godínez, V. M. (2009). Seasonal changes in larval fish assemblages in a semi-enclosed sea (Gulf of California). *Continental Shelf Research*, 29(14): 1697-1710. doi: 10.1016/j.csr.2009.06.001.

Sánchez-Velasco, L., Lavín, M. F., Jiménez-Rosenberg, S. P. A., Godínez, V. M., Santamaría-del-Ángel, E. y Hernández-Becerril, D. U. (2013). Three-dimensional distribution of fish larvae in a cyclonic eddy in the Gulf of California during the summer. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 75: 39-51. doi: 10.1016/j.dsr.2013.01.009.

Sánchez-Velasco, L., Lavín, M. F., Jiménez-Rosenberg, S. P. A. y Godínez, V. M. (2014). Preferred larval fish habitat in a frontal zone of the northern Gulf of California during the early cyclonic phase of the seasonal circulation (June 2008). *Journal of Marine Systems*, 129: 368-380. doi: 10.1016/j.jmarsys.2013.08.004.

Santamaría-del-Ángel, E., Álvarez-Borrego, S. y Müller-Karger, F. E. (1994). Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 99(C4): 7411-7421. doi: 10.1029/93JC02154.

Schneider, N. y Cornuelle, B. D. (2005). The forcing of the Pacific Decadal Oscillation. *Journal of Climate*, 18(21): 4355-4373. doi: 10.1175/JCLI3527.1.

Shannon, L. V., Crawford, R. J. M., Brundrit, G. B. y Underhill, L. G. (1988). Responses of fish populations in the Benguela ecosystem to environmental change. *ICES Journal of Marine Science*, 45(1): 5-12. doi: 10.1093/icesjms/45.1.5.

Simón-Díaz, M. (2009). *Maduración gonadal e inducción al desove de la sardina del Pacífico Sardinops sagax caeruleus*. *Tesis de Maestría*. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, México.

Smith, K. A. y Suthers, I. M. (1999). Displacement of diverse ichthyoplankton assemblages by a coastal upwelling event on the Sydney shelf. *Marine Ecology Progress Series*, 176: 49-62. doi: 10.3354/meps176049**.**

Sokolov, V. A. (1974). Investigaciones biológico pesqueras de los peces pelágicos del Golfo de California. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports*, 17: 92-96.

Sournia, A. (1994). Pelagic biogeography and fronts. *Progress in Oceanography*, 34(2-3): 109-120. doi: 10.1016/0079-6611(94)90004-3.

Strub, P. T., Kosro, P. M. y Huyer, A. (1991). The nature of the cold filaments in the California Current system. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 96(C8): 14743-14768.

Strub, P. T. y James, C. (2002). The 1997–1998 oceanic El Niño signal along the southeast and northeast Pacific boundaries—An altimetric view. *Progress in Oceanography*, 54(1-4): 439-458. doi: 10.1016/S0079-6611(02)00063-0.

Torri, M., Corrado, R., Falcini, F., Cuttitta, A., Palatella, L., Lacorata, G., Patti, B., Arculeo, M., Mifsud, R., Mazzola, S. y Santoleri, R. (2018). Planktonic stages of small pelagic fishes (*Sardinella aurita* and *Engraulis encrasicolus*) in the central Mediterranean Sea: The key role of physical forcings and implications for fisheries management. *Progress in Oceanography*, 162: 25-39. doi: 10.1016/j.pocean.2018.02.009.

Urías-Leyva, H., Aceves-Medina, G., Avendaño-Ibarra, R., Saldierna-Martínez, R. J., Gómez-Gutiérrez, J. y Robinson, C. J. (2018). Regionalization in the distribution of larval fish assemblages during winter and autumn in the Gulf of California. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 46(1): 20-36. doi: 10.3856/vol46-issue1-fulltext-4.

Valdez-Holguín, J. E. y Lara-Lara, J. R. (1987). Primary productivity in the Gulf of California effects of El Niño 1982-1983 event. *Ciencias Marinas*, 13(2): 34-50. doi: 10.7773/cm.v13i2.533.

Van Winkle, W., Rose, K. A., Shuter, B. J., Jager, H. I. y Holcomb, B. D. (1997). Effects of climatic temperature change on growth, survival, and reproduction of rainbow trout: predictions from a simulation model. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 54(11): 2526-2542. doi: 10.1139/f97-167.

Wang, Y., Zhang, H. R., Chai, F. y Yuan, Y. (2018). Impact of mesoscale eddies on chlorophyll variability off the coast of Chile. *PLOS ONE*, 13(9): 1-13. doi: 10.1371/journal.pone.0203598.

Washburn, L., Swenson, M. S., Largier, J. L., Kosro, P. M. y Ramp, S. R. (1993). Cross-shelf sediment transport by an anticyclonic eddy off northern California. *Science*, 261(5128): 1560-1564. doi: 10.1126/science.261.5128.1560.

Wood, S. N. (2006). *Generalized additive models: an introduction with R*. 1ª ed. Chapman and Hall/CRC, New York.

Woodson, C. B. y Litvin, S. Y. (2015). Ocean fronts drive marine fishery production and biogeochemical cycling. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(6): 1710-1715. doi: 10.1073/pnas.1417143112.

Wroblewski, J. S. y Cheney, J. (1984). Ichthyoplankton associated with a warm core ring off the Scotiars Shelf. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 41(2): 294-303. doi: 10.1139/f84-034.

Xiu, P., Chai, F., Curchitser, E. N. y Castruccio, F. S. (2018). Future changes in coastal upwelling ecosystems with global warming: The case of the California Current system. *Scientific Reports*, 8(1): 1-9. doi: 10.1038/s41598-018-21247-7.

Yoshida-Hernández, H. (2015). *Variabilidad ambiental y su efecto en la distribución espacio-temporal de las tasas de captura de dorado (Coryphaena hippurus) en la región de Los Cabos BCS, México*. *Tesis Doctoral*. Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, La Paz.

Yu, W., Yi, Q., Chen, X. y Chen, Y. (2016). Modelling the effects of climate variability on habitat suitability of jumbo flying squid, *Dosidicus gigas*, in the southeast Pacific Ocean off Peru. *ICES Journal of Marine Science*, 73(2): 239-249. doi: 10.1093/icesjms/fsv223.

Zamudio, L., Hogan, P. y Metzger, E. J. (2008). Summer generation of the southern Gulf of California eddy train. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C6):1-21. doi: 10.1029/2007JC004467.