

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

La investigación fue financiada por el SECIHTI (Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación).

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México). El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo o titular de los Derechos de Autor.

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



**Maestría en Ciencias
en Oceanografía Física**

**Caracterización física y biogeoquímica de los filamentos en el
Golfo de México**

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

Presenta:

Ingrid Alejandra González Colorado

Ensenada, Baja California, México
2025

Tesis defendida por
Ingrid Alejandra González Colorado

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Enric Pallàs Sanz
Codirector de tesis

Dr. Miguel José Costa de Almeida Tenreiro
Codirector de tesis

Dra. Paulina Cetina Heredia

Dr. Helmut Maske Rubach



Dra. María Tereza Cavazos Pérez
Coordinadora del Posgrado en oceanografía física

Dra. Ana Denise Re Araujo
Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Ingrid Alejandra González Colorado** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestra en Ciencias en Oceanografía Física

Caracterización física y biogeoquímica de los filamentos en el golfo de México

Resumen aprobado por:

Dr. Enric Pallàs Sanz
Codirector de tesis

Dr. Miguel José Costa de Almeida Tenreiro
Codirector de tesis

Los filamentos oceánicos son estructuras de mesoescala que transportan agua costera hacia el océano abierto, desempeñando un papel relevante en el ciclo de nutrientes y carbono. En esta tesis se caracterizó la variabilidad espacial, estacional y vertical de filamentos en el Golfo de México mediante la combinación de datos satelitales (2002–2022) de clorofila-a, altura dinámica absoluta y temperatura superficial del mar, junto con observaciones in situ de planeadores submarinos (gliders). El análisis satelital permitió identificar zonas recurrentes con gradientes horizontales intensos de Chla en la periferia de la corriente del Lazo, el oeste del golfo, la bahía de Campeche y frente al río Mississippi. Estas estructuras persistentes coinciden con configuraciones mesoescalares que favorecen la exportación de agua costera, como la interacción entre remolinos ciclónicos y anticiclónicos. Se observó que los filamentos más intensos ocurrieron en verano frente al Mississippi (tras las máximas descargas fluviales), en primavera en el oeste del golfo, y en verano-otoño en Campeche. Las observaciones verticales de los gliders permitieron caracterizar cuatro filamentos con propiedades termohalinas distintas. Se observaron aguas más cálidas, menos salinas y densas en la superficie (~35 metros de profundidad), reflejo de su origen continental. Además, los filamentos presentaron concentraciones elevadas de Chla, oxígeno disuelto y backscatter, indicando alta biomasa y abundancia de partículas en suspensión. La presencia de CDOM fue también relevante, como señal de materia orgánica disuelta. Los diagramas T-S confirmaron diferencias entre misiones atribuibles a variaciones estacionales y a la localización del muestreo. Finalmente, se estimó el transporte de Chla usando la componente transversal de la velocidad geostrófica promedio en cada sección de filamento, con valores de hasta 83.3 ton/día. Este estudio destaca la importancia de la dinámica superficial y los remolinos en la formación de filamentos, y subraya su rol en la redistribución de biomasa desde la plataforma continental hacia el océano profundo en el Golfo de México.

Palabras clave: Filamentos, Remolinos de mesoescala, Imágenes satelitales, gliders, transporte de clorofila-a

Abstract of the thesis presented **by Ingrid Alejandra González Colorado** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in physical oceanographic

Physical and biogeochemical characterization of filaments in the Gulf of Mexico

Abstract approved by:

Dr. Enric Pallàs Sanz
Thesis codirector

Dr. Miguel José Costa de Almeida Tenreiro
Thesis codirector

Oceanic filaments are mesoscale structures that transport coastal water offshore, playing a significant role in nutrient and carbon cycling. This thesis characterized the spatial, seasonal, and vertical variability of filaments in the Gulf of Mexico by combining satellite data (2002–2022) of chlorophyll-a, absolute dynamic topography, and sea surface temperature, with in situ observations from autonomous underwater gliders. Satellite analysis revealed recurrent zones with intense horizontal Chla gradients along the Loop Current periphery, the western Gulf, the Bay of Campeche, and off the Mississippi River. These persistent structures coincide with mesoscale circulation features that promote coastal water export, such as the interaction between cyclonic and anticyclonic eddies. The most intense filaments were observed in summer off the Mississippi (following peak river discharge), in spring in the western Gulf, and in late summer–autumn in Campeche. Vertical glider observations characterized four filaments with distinct thermohaline properties. Surface waters (~35 m deep) were warmer, less saline, and less dense, reflecting their continental origin. Filaments exhibited elevated concentrations of Chla, dissolved oxygen, and backscatter, indicating high biomass and particle abundance. The presence of CDOM also suggested dissolved organic matter content. T-S diagrams confirmed mission-specific differences attributable to seasonal variations and sampling location. Finally, Chla transport was estimated using the cross-sectional component of the average geostrophic velocity across each filament, with values up to 83.3 tons/day. This study highlights the importance of surface circulation and mesoscale eddies in filament formation and underscores their role in redistributing biomass from the continental shelf to the deep ocean in the Gulf of Mexico.

Keywords: Filaments, Mesoscale eddies, Satellite images, gliders, chlorophyll-a transport

Dedicatoria

A mis padres y a mi pareja, por su amor incondicional.

Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE), por permitirme realizar un posgrado.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por brindarme el apoyo económico necesario para dedicarme de tiempo completo a la maestría.

Al Departamento de Oceanografía Física del CICESE, por su apoyo en mi formación académica.

A mis directores de tesis, el Dr. Enric Pallàs Sanz y el Dr. Miguel José Costa de Almeida Tenreiro, por compartirme sus conocimientos, guiarme en la elaboración de esta tesis, por su infinita paciencia y por todos los consejos a lo largo del camino.

A mis sinodales, la Dra. Paulina Cetina Heredia y el Dr. Helmut Maske Rubach, por sus valiosas aportaciones, su amabilidad ante mis dudas y su disposición a ayudarme.

A mi mejor amiga, Adriana, por todas las aventuras que hemos vivido y las que aún nos faltan.

A mi familia, por apoyarme en todos los sentidos. Especialmente a mi madre, quien ha sido mi mayor soporte emocional y nunca me ha dejado sola.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	viii
Lista de tablas	xvi
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Características termohalinas y biogeoquímicas promedias del golfo de México	3
1.2	Antecedentes
1.2.1 Estudios de filamentos en diferentes regiones oceánicas	7
1.2.2 Estudios de filamentos en el golfo de México.....	10
1.3 Justificación	13
1.4 Hipótesis	14
1.5 Objetivos.....	14
1.5.1 Objetivo general.....	14
1.5.2 Objetivos específicos.....	15
Capítulo 2. Datos y metodología	16
2.1 Datos.....	16
2.1.1 Datos satelitales	16
2.1.2 Datos in-situ de planeadores submarinos autónomos (gliders)	16
2.2 Metodología	17
2.2.1 Identificación regional y variabilidad estacional de filamentos mediante datos satelitales.....	17
2.2.2 Análisis de la estructura vertical y transporte biogeoquímico mediante datos de gliders	19

Capítulo 3.	Resultados.....	23
3.1	Análisis de datos satelitales	23
3.1.1	Distribución climatológica de la temperatura superficial del mar	23
3.1.2	Análisis de variabilidad de la Chla y corrientes superficiales	24
3.2	Análisis de datos de planeadores submarinos (gliders)	33
3.2.1	Filamento en región Oeste	33
3.2.2	Filamento en región Mississippi	41
3.2.3	Filamento en región Campeche	48
3.2.4	Caso especial en región Oeste.....	54
Capítulo 4.	Discusión	57
Capítulo 5.	Conclusiones.....	61
Literatura citada		63
Anexos		67

Lista de figuras

Figura	Página
1. Corrientes promedio en la capa superficial del océano calculadas a partir de 7 años de integración del modelo NCOM (1993-1999). Se muestran las isóbatas de los 50 m, 200 m, 500 m y 1000 m de profundidad. Figura extraída de Morey et al., (2003).....	1
2. Modelos conceptuales para la formación de filamentos oceánicos. Squirts (chorros), Mesoscale Eddy Field (campo mesoescalar de remolinos) y meandering jet (meandros). Figura extraída de Strub et al. (1991).	3
3. Climatología anual de temperatura (°C, izquierda) y salinidad (PSU, derecha) en la superficie del golfo de México. Las figuras muestran los promedios multidecadales obtenidos con una resolución espacial de 0.25°. Figura modificada de (NCEI, s.f.).	4
4. Promedios climatológicos de Chla en las aguas oceánicas: (a) invierno, (b) primavera, (c) verano y (d) otoño. Todos los valores de Chla están expresados en mg m ⁻³ . GM, BI y WC representan al golfo de México, las Bahamas y el Caribe occidental, respectivamente. Figura extraída de Condal et al. (2013).	5
5. Climatología mensual de la concentración de clorofila-a [mg Chl m ⁻³] a partir de cuatro sensores satelitales diferentes para las regiones Noreste y Suroeste para el interior del Golfo de México. Línea delgada: datos de CZCS (1978–1986). Línea gruesa: SeaWiFS (1998–2010). Línea punteada: MODIS (2003–2010). Figura modificada de Muller-Karger et al. (2015).	6
6. (a) Mapa de perfiles de BioARGO y estaciones muestreadas durante 6 campañas oceanográficas del proyecto XIXIMI entre 2010 y 2019, (b) Perfil de profundidad vs oxígeno disuelto (O ₂) para todas las estaciones. Figura modificada de Quintanilla et al. (2023).	7
7. Temperatura superficial del océano simulada en una región al sur del punto de separación de la Corriente del golfo en Cape Hatteras para dos periodos: (a) 18 de marzo y (b) 13 de marzo. La altura dinámica de la superficie del océano se muestra con finas líneas negras de contorno cada 0.1 m. Los paneles inferiores muestran la SST ampliada en los cuatro rectángulos negros de los dos paneles superiores que muestran las intrusiones de filamento frío a escala inferior correspondientes a los casos (de izquierda a derecha): F0, F1, F2 y F3. Figura extraída de Gula et al. (2014).	9
8. Elevación del nivel del mar (SSH por sus siglas en inglés) y corrientes superficiales en el noroeste del golfo de México, derivadas de simulaciones del modelo GoM-HYCOM y promediadas del 1 al 5 de agosto de 2015. La línea roja indica la isohalina promedio de 35 psu. Las líneas negras representan las isóbatas de 50, 200 y 1000 m. Figura modificada de Androulidakis et al. (2019).	11
9. Ubicación de las estaciones de muestreo en el norte del goM y relación entre la descarga del río Mississippi y la radiancia del agua obtenida de SeaWiFS. El mapa (panel superior) muestra las localizaciones analizadas, mientras que los paneles inferiores comparan la descarga mensual del Mississippi con la radiancia del agua en las bandas de 555 nm (A) y 443 nm (B)	

durante septiembre de 1997 y octubre de 2000, evidenciando su correlación (Salisbury et al., 2001).	12
10. Profundidad (metros) de la isoterma de 14°C en el noroeste del goM en abril de 1980. La línea discontinua marca la isóbata de 200 m; las estaciones biológicas donde se midió la clorofila están representadas por cuadrados negros (anticiclón), cuadrados blancos (ciclón) y triángulos blancos (talud continental). La línea sólida gruesa indica la ubicación de una pluma de agua más fría. Figura modificada de Biggs y Müller-Karger, (1994).	12
11. Representación esquemática del transporte de masa a través de la plataforma continental (flechas negras) debido a la convergencia de masas de agua del oeste del goM y masas de agua del Banco de Campeche. Figura extraída de Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009).	13
12. Mapas de los promedios mensuales de la temperatura superficial del océano (°C) en el goM derivados de observaciones satelitales para el periodo 2002-2022.	24
13. Mapas de los promedios mensuales de la concentración superficial de Chla (mg/m^3) y corrientes geostróficas superficiales (m/s) en el goM derivados de observaciones satelitales para el periodo 2002-2022. Las flechas negras indican la dirección y magnitud del vector de las corrientes geostróficas promedio.	25
14. Mapas de los promedios mensuales de los gradientes horizontales de Chla ($mg/m^3/m$) y corrientes geostróficas superficiales (m/s) en el goM derivados de observaciones satelitales para el periodo 2002-2022. Se aplicó un blanqueamiento de datos hasta la isobata de 200 m. Las flechas negras indican la dirección y magnitud de los vectores de las corrientes geostróficas promedio.	27
15. Mapas de los promedios estacionales de los gradientes horizontales de Chla ($mg/m^3/m$) y corrientes geostróficas superficiales (m/s) en el goM derivados de observaciones satelitales para el periodo 2002-2022. Se aplicó un blanqueamiento de datos hasta la isobata de 200 m. Las flechas negras indican la dirección y magnitud de los vectores de las corrientes geostróficas promedio.	28
16. Mapas de los promedios mensuales de los gradientes horizontales de concentración de Chla ($mg/m^3/m$) y corrientes geostróficas superficiales (m/s) en la región Oeste del goM derivados de observaciones satelitales para el periodo 2002-2022. Se aplicó un blanqueamiento de datos hasta la isobata de 250 m. Las flechas negras indican la dirección y magnitud de los vectores de las corrientes geostróficas promedio.	30
17. Mapas de los promedios mensuales de los gradientes horizontales de concentración de Chla ($mg/m^3/m$) y corrientes geostróficas superficiales (m/s) en la región Mississippi del goM derivados de observaciones satelitales para el periodo 2002-2022. Se aplicó un blanqueamiento de datos hasta la isobata de 250 m. Las flechas negras indican la dirección y magnitud de los vectores de las corrientes geostróficas promedio.	31
18. Mapas de los promedios mensuales de los gradientes horizontales de concentración de Chla ($mg/m^3/m$) y corrientes geostróficas superficiales (m/s) en la región Campeche del goM derivados de observaciones satelitales para el periodo 2002-2022. Se aplicó un blanqueamiento de datos hasta la isobata de 250 m. Las flechas negras indican la dirección y magnitud de los vectores de las corrientes geostróficas promedio.	31

19. Mapas de los promedios mensuales de los gradientes horizontales de concentración de Chla ($\text{mg}/\text{m}^3/\text{m}$) y corrientes geostróficas superficiales (m/s) en la región Periferia de la LC del goM derivados de observaciones satelitales para el periodo 2002-2022. Se aplicó un blanqueamiento hasta la isobata de 80 m. Las flechas negras indican la dirección y magnitud de los vectores de las corrientes geostróficas promedio. 32
20. Histograma con los promedios mensuales de los gradientes horizontales de la concentración de Chla ($\text{mg}/\text{m}^3/\text{m}$) en las cuatro regiones de estudio (Mississippi, Campeche, Oeste y P.LC) derivados de observaciones satelitales para el periodo 2002-2022..... 32
21. Mapa de trayectoria completa (línea negra y roja) de la misión 14 sobrepuesta a la concentración promedio de Chla superficial durante el periodo de la misión. El punto de inicio y final del recorrido corresponde al extremo más cercano a la costa, desplazándose inicialmente hacia el noreste. 34
22. Perfiles verticales de temperatura, salinidad, anomalía de densidad potencial y concentración de Chla obtenidos a partir de datos crudos de la misión 14, el recuadro corresponde a los primeros 100 m de profundidad que comprende las fechas 11 al 18 de febrero de 2019. 35
23. Campos de altura dinámica absoluta y corrientes geostróficas superficiales para el goM (izquierda) y concentración de Chla y corrientes geostróficas superficiales para la región Oeste (derecha); ambos mapas promediados durante el periodo del 11 al 18 de febrero de 2019 durante la misión 14. En ambos paneles la trayectoria del glider para ese periodo es representada con una línea roja. 36
24. Perfil vertical de velocidad geostrófica (m/s) calculada para la misión 14 de los dives 1 al 200, el recuadro corresponde a los primeros 100 m de profundidad que comprende las fechas 11 al 18 de febrero de 2019..... 37
25. Diagrama T-S de la misión 14 para el periodo 11-18 de febrero de 2019, el recuadro negro corresponde al filamento. Se representan las líneas de anomalía de densidad potencial en gris, mientras que la profundidad está codificada en color. 37
26. Perfiles verticales de concentración de Chla (mg/m^3) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 14 (dives 75-125) para el periodo del 11 al 18 de febrero de 2019. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial. 38
27. Secciones interpoladas de temperatura conservativa, salinidad absoluta, anomalías de densidad potencial y velocidad geostrófica de la misión 14 (dives 75-125), correspondiente al periodo del 11 al 18 de febrero de 2019. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial..... 39
28. Sección interpolados de Chla, backscatter, CDOM y oxígeno disuelto de la misión 14 (dives 75-125), correspondiente al periodo del 11 al 18 de febrero de 2019. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial. 40
29. Sección de transporte de Chla en la misión 14 (dives 75-125) para el periodo del 11 al 18 de febrero de 2019: distribución en el transecto (panel superior) y transporte promedio de los primeros 35 m de profundidad (panel inferior). 41

30. Mapa de trayectoria completa de la misión 12 sobrepuesta a la concentración promedio de Chla superficial durante el periodo de la misión. El punto de inicio del recorrido corresponde al extremo más lejano sobre la LC y el punto final cerca de las costas Veracruzan. 42
31. Perfiles verticales de temperatura, salinidad, anomalías de densidad potencial y concentración de Chla obtenidos a partir de datos crudos de la misión 12, el recuadro corresponde a los primeros 100 m de profundidad que comprende las fechas del 24 de julio al 16 de agosto de 2018..... 43
32. Campos de altura dinámica absoluta y corrientes geostróficas superficiales para el goM (izquierda) y acercamiento de la concentración de Chla y corrientes geostróficas superficiales para la región Mississippi (derecha); ambos mapas promediados durante el periodo del 30 de julio al 11 de agosto del 2018 de la misión 12. En ambos paneles la trayectoria del glider para ese periodo es representada con una línea roja..... 44
33. Perfil vertical de velocidad geostrófica (m/s) calculada para la misión 12 de los dives 1 al 200, el recuadro corresponde a los primeros 100 m de profundidad que comprende las fechas 24 de julio al 16 de agosto de 2018. 44
34. Diagrama T-S de la misión 12 para el periodo del 30 de julio al 11 de agosto del 2018, el recuadro negro corresponde al filamento. Se representan las líneas de anomalía de densidad potencial en gris, mientras que la profundidad está codificada en color..... 45
35. Secciones interpoladas de temperatura, salinidad absoluta, anomalía de densidad potencial y velocidad geostrófica de la misión 12 (dives 149-230), correspondiente al periodo del 30 de julio al 11 de agosto de 2018. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalía de densidad potencial. 46
36. Secciones interpoladas de concentración de Chla, backscatter, CDOM y oxígeno disuelto de la misión 12 (dives 149-230), correspondiente al periodo del 30 de julio al 11 de agosto de 2018. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial. ... 47
37. Sección de transporte de Chla en la Misión 12 (dives 149-230) para el periodo del 30 de julio al 11 de agosto de 2018: distribución en el transecto (panel superior) y transporte promedio hasta 25 m de profundidad (panel inferior)..... 47
38. Mapa de trayectoria completa de la misión 24 sobrepuesta a la concentración promedio de Chla superficial durante el periodo de la misión. El punto de inicio corresponde al extremo más cercano a la costa, desplazándose inicialmente hacia el noreste y haciendo una trayectoria en forma de diamante para regresar cerca del punto de inicio. Las líneas negra y roja corresponden a la trayectoria completa del planeador submarino durante la misión; la negra se refiere a transectos durante los cuales se muestrearon elevadas concentraciones de Chla superficial. 48
39. Perfiles verticales de temperatura, salinidad, anomalía de densidad potencial y concentración de Chla obtenidos a partir de datos crudos de la misión 24, el recuadro corresponde a los primeros 100 m de profundidad que comprende las fechas del 1 al 18 de julio del 2022..... 49
40. Campos de altura dinámica absoluta y corrientes geostróficas superficiales para el goM (izquierda) y concentración de Chla y corrientes geostróficas superficiales para la región de

- Campeche (derecha); ambos promediados durante el periodo del 4 al 8 de julio del 2022 durante la misión 24. En ambos paneles la trayectoria del glider para los dives 20 al 40 es representada en rojo. 50
41. Perfil vertical de velocidad geostrófica (m/s) calculada para la misión 12 de los dives 1 al 200, el recuadro corresponde a los primeros 100 m de profundidad que comprende las fechas 24 de julio al 16 de agosto de 2018. 50
42. Diagrama T-S de la misión 24 para el periodo del 4 al 8 de julio del 2022, el recuadro negro corresponde al filamento. Se representan las líneas de anomalía de densidad potencial en gris, mientras que la profundidad está codificada en color. 51
43. Secciones interpoladas de temperatura conservativa, salinidad absoluta, anomalía de densidad potencial y velocidad geostrófica de la Misión 24 (*dives* 20-40), correspondiente al periodo del 4 al 8 de julio de 2022. Las líneas negras representan los contornos de la anomalía de densidad potencial. 52
44. Secciones interpoladas de Chla, backscatter, CDOM y oxígeno disuelto de la misión 24 (*dives* 20-40), correspondiente al periodo del 4 al 8 de julio de 2022. Las líneas negras representan los contornos de la anomalía de densidad potencial. 53
45. Sección de transporte de concentración de Chla en la misión 24 (*dives* 20-40) para el periodo del 4 al 8 de julio de 2022: distribución en el transecto (panel superior) y transporte promedio hasta 35 m de profundidad (panel inferior). 53
46. Campos de altura dinámica absoluta y corrientes geostróficas superficiales para el goM (izquierda) y concentración de Chla y corrientes geostróficas superficiales para la región de Campeche (derecha); ambos promediados durante el periodo del 27 al 31 de diciembre del 2022 durante la misión 30. En ambos paneles la trayectoria del glider para los dives 57 al 125 es representada en rojo. 54
47. Perfil vertical de velocidad geostrófica (m/s) calculada para la misión 130 de los dives 1 al 280, el recuadro corresponde a los primeros 100 m de profundidad que comprende las fechas 27 de diciembre del 2011 al 18 de enero del 2023. 55
48. Secciones interpoladas de temperatura conservativa, salinidad absoluta, anomalía de densidad potencial, velocidad geostrófica, Chla, backscatter, CDOM y oxígeno disuelto de la misión 30 (*dives* 57-125), correspondiente al periodo del 27 de diciembre del 2022 al 18 de enero del 2023. Las líneas negras representan los contornos de la anomalía de densidad potencial. 56
49. Diagrama T-S combinado de las misiones 12 (azul), 14 (rojo), 24 (verde) y 30 (amarillo). Cada punto representa observaciones individuales de temperatura y salinidad desde la superficie del océano (parte superior de los gráficos) hasta los 1000 m de profundidad (parte inferior). Se incluyen las líneas de anomalía de densidad potencial ($\sigma\theta$) en gris. Los filamentos son visibles como agrupaciones superficiales de menor salinidad y temperatura variable, según la estación. 60
50. Perfiles verticales de temperatura conservativa (°C) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de

- la misión 14 (dives 75-125) para el periodo del 11 al 18 de febrero de 2019. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial. 67
51. Perfiles verticales de la anomalía de densidad potencial (kg/m^3) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 14 (dives 75-125) para el periodo del 11 al 18 de febrero de 2019. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial. 67
52. Perfiles verticales de salinidad absoluta (g/kg) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 14 (dives 75-125) para el periodo del 11 al 18 de febrero de 2019. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial. 68
53. Perfiles verticales de materia orgánica disuelta coloreada (CDOM) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 14 (dives 75-125) para el periodo del 11 al 18 de febrero de 2019. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial. 68
54. Perfiles verticales de backscatter ($\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 14 (dives 75-125) para el periodo del 11 al 18 de febrero de 2019. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial. 69
55. Perfiles verticales de oxígeno disuelto (O_2 , mg/m^3) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 14 (dives 75-125) para el periodo del 11 al 18 de febrero de 2019. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial. 69
56. Perfiles verticales de temperatura conservativa ($^{\circ}\text{C}$) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 12 (dives 149-230) para el periodo del 30 de julio al 11 de agosto de 2018. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial. 70
57. Perfiles verticales de salinidad absoluta (g/kg) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 12 (dives 149-230) para el periodo del 30 de julio al 11 de agosto de 2018. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial. 70
58. Perfiles verticales de anomalía de densidad potencial (kg/m^3) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 12 (dives 149-230) para el periodo del 30 de julio al 11 de agosto de 2018. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial. 71
59. Perfiles verticales de clorofila-a (Chla-a , mg/m^3) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 12 (dives 149-230) para el periodo del 30 de julio al 11 de agosto de 2018. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial. 71

60. Perfiles verticales de carbono orgánico disuelto coloreado (CDOM, ppb) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 12 (dives 149-230) para el periodo del 30 de julio al 11 de agosto de 2018. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial. 72
61. Perfiles verticales de backscatter ($\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 12 (dives 149-230) para el periodo del 30 de julio al 11 de agosto de 2018. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial. 72
62. Perfiles verticales de oxígeno disuelto (O_2 , ml/l) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 12 (dives 149-230) para el periodo del 30 de julio al 11 de agosto de 2018. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial. 73
63. Perfiles verticales de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 24 (dives 20-40) para el periodo del 4 al 8 de julio de 2022. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial. 73
64. Perfiles verticales de salinidad absoluta (g/kg) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 24 (dives 20-40) para el periodo del 4 al 8 de julio de 2022. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial. 74
65. Perfiles verticales de anomalía de densidad potencial (kg/m^3) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 24 (dives 20-40) para el periodo del 4 al 8 de julio de 2022. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial. 74
66. Perfiles verticales de clorofila-a (Chl-a, mg/m^3) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 24 (dives 20-40) para el periodo del 4 al 8 de julio de 2022. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial. 75
67. Perfiles verticales de carbono orgánico disuelto coloreado (CDOM, ppb) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 24 (dives 20-40) para el periodo del 4 al 8 de julio de 2022. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial. 75
68. Perfiles verticales de backscatter ($\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 24 (dives 20-40) para el periodo del 4 al 8 de julio de 2022. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial. 76
69. Perfiles verticales de oxígeno disuelto (O_2 , ml/l) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de

la misión 24 (dives 20-40) para el periodo del 4 al 8 de julio de 2022. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial. 76

Lista de tablas

Tabla	Página
1. Especificaciones de los datos satelitales utilizados en el estudio	16
2. Tabla de puntos coordinados (longitudes y latitudes) que definen los límites de las cuatro diferentes regiones de interés.	28

Capítulo 1. Introducción

El golfo de México (goM) es una cuenca semi-cerrada cuya circulación oceánica está dominada por el sistema de la Corriente del Lazo (LC, por sus siglas en inglés) y los remolinos de mesoescala que ocasionalmente se desprenden de ella. La LC transporta agua cálida y salina desde el mar Caribe hacia el goM, formando una estructura en forma de lazo que eventualmente se estrangula y libera remolinos, los cuales se propagan hacia el oeste, modulando la dinámica del golfo interior y de la plataforma continental (Morey et al., 2003; Zavala-Hidalgo et al., 2003). Estos remolinos, son los conocidos remolinos de la LC (LCEs, por sus siglas en inglés), que interactúan con remolinos ciclónicos (formando dipolos) y generan procesos de transporte que influyen en la distribución de propiedades físicas y biogeoquímicas en aguas abiertas.

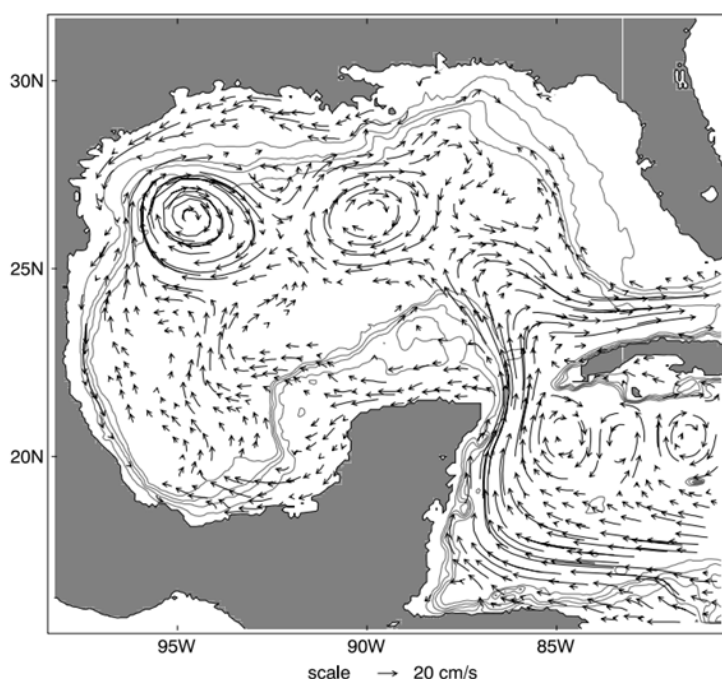


Figura 1. Corrientes promedio en la capa superficial del océano calculadas a partir de 7 años de integración del modelo NCOM (1993-1999). Se muestran las isóbatas de los 50 m, 200 m, 500 m y 1000 m de profundidad. Figura extraída de Morey et al., (2003).

A nivel costero, la circulación suele ser paralela a la plataforma continental (a lo largo de la batimetría), aunque puede verse interrumpida en zonas donde existen dipolos, facilitando el intercambio de agua entre la plataforma y aguas abiertas (Dubranna et al., 2011). Uno de los mecanismos de transporte más relevantes en el goM es la formación de filamentos oceánicos, estructuras alargadas (típicamente desde

decenas hasta cientos de kilómetros y con duración desde días hasta semanas) que transportan propiedades desde regiones costeras hacia aguas oceánicas más profundas desempeñando un papel clave en la conectividad entre la plataforma continental y las aguas abiertas. Estas estructuras suelen estar asociadas espacialmente a zonas frontales, regiones estrechas con fuertes gradientes horizontales de temperatura, salinidad o concentración de clorofila-a (Chla) (McWilliams, 2016; Toner et al., 2003).

Estudios previos han documentado la generación de filamentos en regiones confluentes, frontogénicas, donde los gradientes débiles de temperatura y Chla son amplificados por la dinámica de mesoescala. Existen distintos mecanismos físicos que pueden dar origen a los filamentos oceánicos. Strub et al. (1991) propusieron tres modelos conceptuales para su formación (Figura 2):

1. **Chorros:** La generación de filamentos en regiones de confluencia costera, donde las aguas de la plataforma continental son impulsadas hacia el océano abierto en forma de una corriente tipo hongo (mushroom-like current en inglés).
2. **Campo mesoescalar de remolinos:** La interacción de remolinos de diferente signo de vorticidad (ciclónicos y anticiclónicos) genera zonas de confluencia que inducen estiramiento horizontal, favoreciendo la formación y elongación de filamentos entre ellos.
3. **Meandros:** La inestabilidad baroclínica de las corrientes costeras genera meandros, promoviendo la formación de filamentos que se desarrollan a lo largo de la costa y pueden extenderse mar adentro debido a la circulación inducida por la corriente dominante.

Los filamentos han sido observados en diversas regiones del goM mediante imágenes satelitales y mediciones in-situ (Huguenard et al., 2016; Jones y Wiggert, 2015; Martínez-López & Zavala-Hidalgo, 2009). En particular, la interacción entre la LC y los remolinos ciclónicos de la plataforma norte del goM se ha identificado como un mecanismo clave en la formación y persistencia de estas estructuras, promoviendo la exportación de biomasa fitoplanctónica hacia aguas más alejadas de la costa (Toner et al., 2003).

Si bien las observaciones satelitales han permitido identificar la presencia de filamentos y su evolución espacio temporal, la caracterización tridimensional de estos procesos sigue siendo un desafío. La mayoría de los estudios se han basado en datos de Chla y temperatura superficial sin capturar su estructura vertical. Es por ello que surge la necesidad de combinar observaciones satelitales con mediciones in situ que

permitan evaluar la estructura vertical de estas estructuras y su impacto en la redistribución de nutrientes y biomasa.

El estudio de los filamentos oceánicos (térmicos y de *Chla*) en el goM es esencial para comprender su papel en la distribución de nutrientes y el transporte de biomasa, ya que puede influir en la estructura de los ecosistemas marinos y en la disponibilidad de recursos pesqueros.

Para poder identificar la influencia de estos filamentos, es necesario conocer primero las características promedio del ambiente físico y biogeoquímico del goM. En la siguiente sección se describe el patrón regional de temperatura, salinidad y otras propiedades clave que servirán como referencia para detectar anomalías asociadas a la presencia de filamentos.

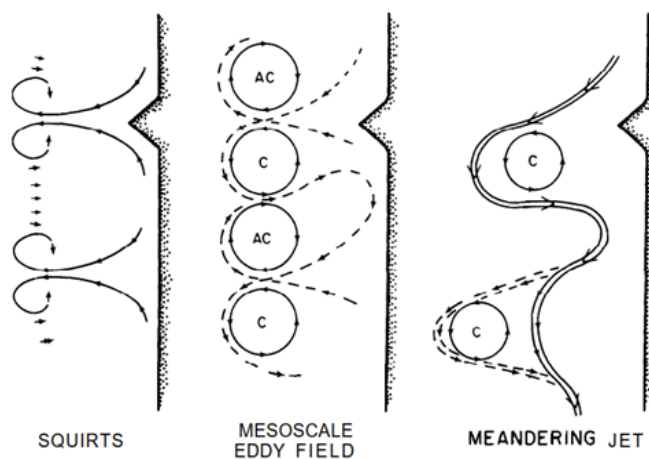


Figura 2. Modelos conceptuales para la formación de filamentos oceánicos. Squirts (chorros), Mesoscale Eddy Field (campo mesoescalar de remolinos) y meandering jet (meandros). Figura extraída de Strub et al. (1991).

1.1 Características termohalinas y biogeoquímicas promedias del golfo de México

A continuación, se presenta un análisis de las condiciones promedio de temperatura superficial del mar, salinidad, *Chla* y otras propiedades biogeoquímicas en el goM, con base en datos climatológicos.

En la Figura 3, tenemos la distribución de temperatura superficial (°C) promedia anual, se observa un patrón típico de latitudes subtropicales, con valores más bajos en la región norte del golfo (~24–25 °C), especialmente cerca de la plataforma continental, y un incremento hacia el sur, alcanzando temperaturas

superiores a 26 °C en la bahía de Campeche. En cuanto a la salinidad (en unidades PSU), los valores más bajos (~32–33) se concentran cerca de la desembocadura del río Mississippi, reflejando la influencia continental. La salinidad aumenta gradualmente hacia el centro y sur del golfo, con máximos superiores a 36 PSU en zonas oceánicas.

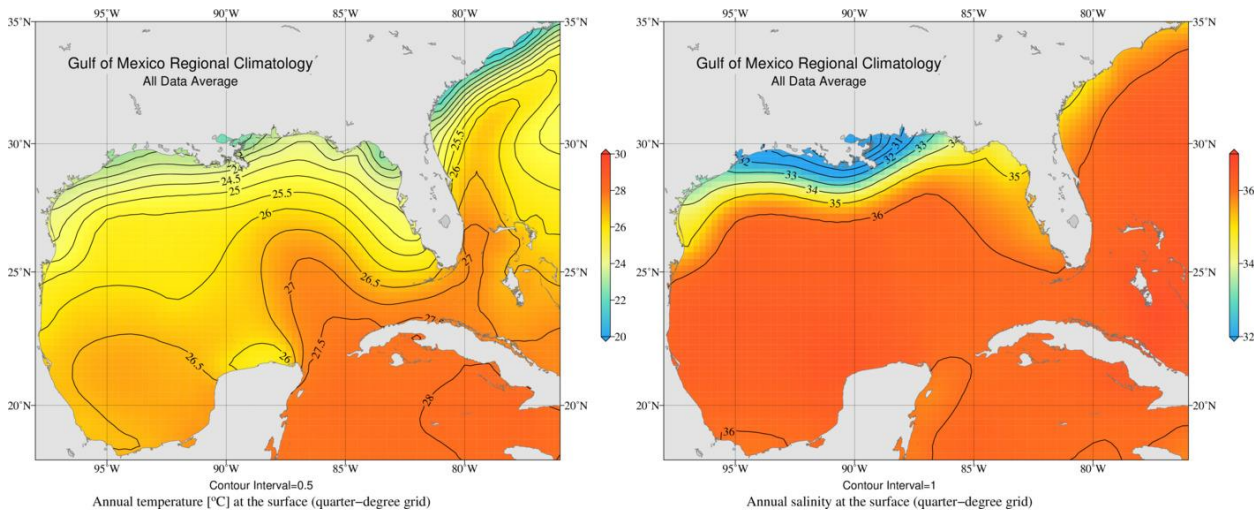


Figura 3. Climatología anual de temperatura (°C, izquierda) y salinidad (PSU, derecha) en la superficie del golfo de México. Las figuras muestran los promedios multidecadales obtenidos con una resolución espacial de 0.25°. Figura modificada de (NCEI, s.f.).

La Chla es un indicador ampliamente utilizado para estimar la biomasa fitoplanctónica en la capa superficial del océano y, por tanto, como indicador de productividad primaria (Muller-Karger et al., 2015). Su distribución espaciotemporal refleja procesos físicos como la mezcla vertical, la estratificación térmica y el transporte lateral por remolinos, frentes y corrientes. Estas propiedades la convierten en una herramienta clave para detectar anomalías oceánicas y estructuras dinámicas, tales como los filamentos estudiados en esta tesis.

Cóndal et al. (2013) realizaron una clasificación bio-óptica no supervisada de datos satelitales de SeaWiFS para identificar regiones homogéneas dentro del goM, el Caribe occidental y las Bahamas. Como resultado, definieron masas de agua denominadas aguas costeras, aguas de transición y aguas abiertas. Esta última, abarca la porción más lejana de la costa donde se espera identificar filamentos en este estudio.

En aguas abiertas, se observaron valores promedio estacionales de Chla entre 0.18 y 0.23 mg m⁻³, con máximos durante el invierno y mínimos en verano, como se muestra en la Figura 4. Este patrón se asocia a procesos de mezcla vertical inducidos por tormentas y frentes fríos invernales que permiten el ascenso

de nutrientes que favorecen el crecimiento fitoplanctónico, fenómeno también reportado por Muller-Karger et al. (1991) y confirmado en estudios posteriores. En consecuencia, los gradientes o máximos localizados de Chla que forman parte de estructuras filamentosas deben interpretarse en relación con este fondo climatológico.

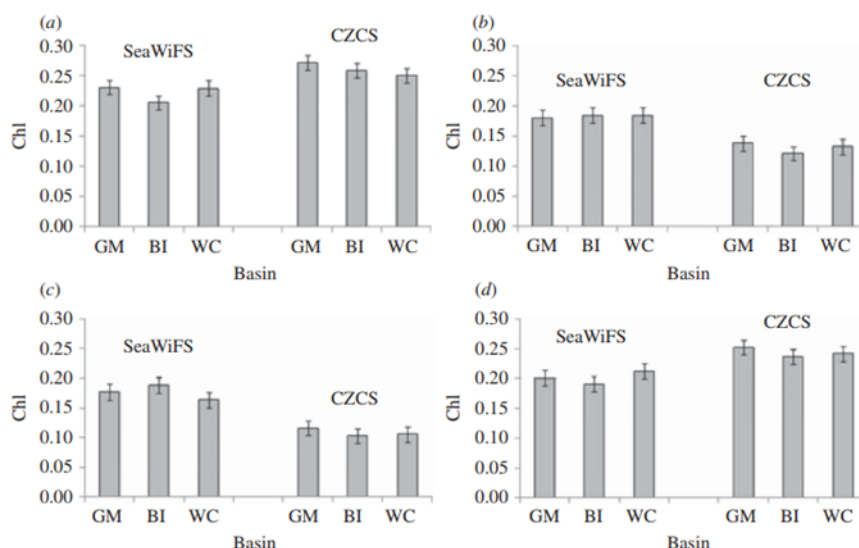


Figura 4. Promedios climatológicos de Chla en las aguas oceánicas: (a) invierno, (b) primavera, (c) verano y (d) otoño. Todos los valores de Chla están expresados en mg m^{-3} . GM, BI y WC representan al golfo de México, las Bahamas y el Caribe occidental, respectivamente. Figura extraída de Condal et al. (2013).

Complementariamente, Muller-Karger et al. (2015) analizaron datos de Chla de tres sensores satelitales (CZCS, SeaWiFS y MODIS) para cuatro regiones profundas del goM, incluyendo las regiones noreste y suroeste, que coinciden geográficamente con los dominios de esta tesis. En ambas zonas se observó una clara estacionalidad, con valores invernales que alcanzan hasta $\sim 0.25 \text{ mg m}^{-3}$ en el noreste y $\sim 0.22 \text{ mg m}^{-3}$ en el suroeste, como se muestra en la Figura 5. En el noreste, además de los valores elevados en invierno y primavera, se presenta un pico máximo durante el mes de julio, lo cual sugiere una ventana de alta productividad a mediados del verano. En contraste, en el suroeste se observa un patrón más definido, con un máximo claro en invierno ($\sim 0.22 \text{ mg m}^{-3}$) seguido por un descenso pronunciado durante el verano, lo que limita temporalmente la aparición de filamentos a los meses fríos. Cabe destacar que, si bien la figura incluye datos de tres sensores, en este trabajo se priorizan las observaciones de SeaWiFS (1998–2010) y MODIS (2003–2010), ya que corresponden a un periodo más cercano al rango temporal analizado en esta tesis.

Quintanilla et al. (2023) analizaron más de 300 perfiles de oxígeno obtenidos entre 2010 y 2019 mediante campañas oceanográficas y flotadores BioARGO, revelando una clara diferenciación entre masas de agua

interiores del golfo y aquellas asociadas a la LC. En particular, dentro de la termoclina que corresponde a la capa de 0 a ~150 m de profundidad, los valores promedio de oxígeno disuelto fueron de 2.78 ± 0.18 ml l⁻¹ para las aguas interiores del goM y de 3.49 ± 0.12 ml l⁻¹ en las aguas asociadas a la LC (ver Figura 6). Esta diferencia refleja un mayor grado de ventilación de las masas de agua provenientes del Caribe, en comparación con las aguas más antiguas y menos oxigenadas del interior del golfo.

Los perfiles verticales (Figura 6b) muestran que los niveles de oxígeno son más elevados en la capa superficial (<100 m), con valores generalmente superiores a 3.0 ml l⁻¹, disminuyendo hacia la base de la termoclina. Este patrón es característico de regiones tropicales, donde la producción primaria en superficie y el intercambio con la atmósfera mantienen una capa bien oxigenada.

Dado que los filamentos estudiados en este trabajo se desarrollan predominantemente en la capa de 0 a 50 m, los valores característicos de oxígeno en esta franja permiten evaluar si dichas estructuras están asociadas a aguas más bien ventiladas —como las influenciadas por la LC— o a masas más envejecidas del interior del goM. Por ello, el O₂ complementa al análisis de Chl_a como un trazador biofísico útil para caracterizar el entorno en el que emergen estos filamentos.

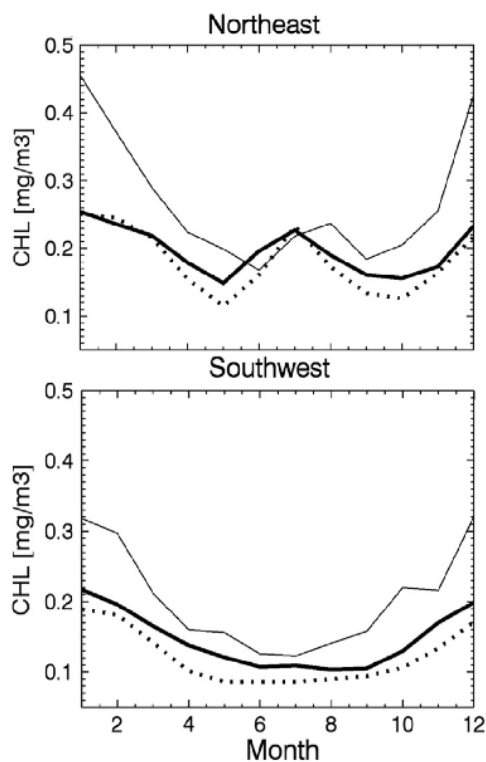


Figura 5. Climatología mensual de la concentración de clorofila-a [mg Chl m^{-3}] a partir de cuatro sensores satelitales diferentes para las regiones Noreste y Suroeste para el interior del Golfo de México. Línea delgada: datos de CZCS (1978–1986). Línea gruesa: SeaWiFS (1998–2010). Línea punteada: MODIS (2003–2010). Figura modificada de Muller-Karger et al. (2015).

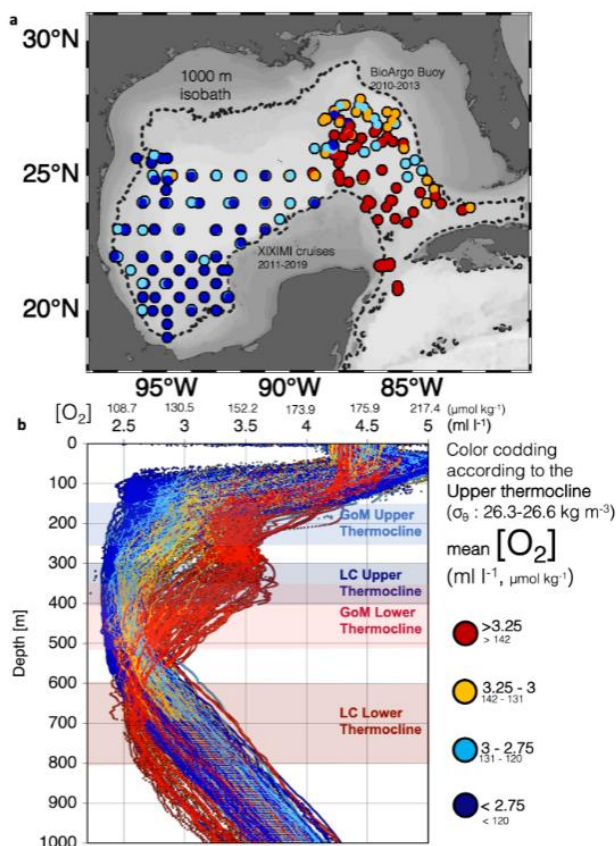


Figura 6. (a) Mapa de perfiles de BioARGO y estaciones muestreadas durante 6 campañas oceanográficas del proyecto XIXIMI entre 2010 y 2019, (b) Perfil de profundidad vs oxígeno disuelto (O_2) para todas las estaciones. Figura modificada de Quintanilla et al. (2023).

1.2 Antecedentes

Los filamentos oceánicos han sido objeto de estudio en diversas regiones del mundo debido a su importancia en la redistribución de propiedades termohalinas y biogeoquímicas. Se han documentado en sistemas de surgencia costera y en regiones influenciadas por actividad mesoescalar (remolinos y frentes oceánicos).

1.2.1 Estudios de filamentos en diferentes regiones oceánicas

Los sistemas de surgencia en los márgenes orientales de los océanos son regiones favorables a la formación de filamentos debido a la interacción entre frentes oceánicos, remolinos y corrientes de borde oriental. Estos procesos han sido ampliamente documentados y se ha demostrado su impacto en la

dinámica de los ecosistemas marinos (Haidvogel et al., 1991; Meunier et al., 2012; García-Muñoz et al., 2004).

La modelación numérica ha permitido analizar en detalle la dinámica de los filamentos oceánicos. Haidvogel et al. (1991) desarrollaron simulaciones que demostraron que los filamentos pueden actuar como caminos eficientes para el transporte de carbono y nutrientes desde zonas altamente productivas hacia regiones oligotróficas. Además, identificaron que en una primera aproximación la dinámica de los filamentos está influenciada por el balance entre el gradiente de densidad y la fuerza de Coriolis (viento térmico), lo que afecta su dirección y persistencia en la columna de agua. Sin embargo, recientemente se ha mostrado numéricamente que el viento térmico turbulento, que incluye la mezcla vertical, es un mejor balance para caracterizar los filamentos oceánicos, especialmente los sub-mesoescalares (Gula et al. 2014; McWilliams, 2016). En la región de surgencia del noroeste de África, Meunier et al. (2012) documentaron la formación de filamentos que transportan aguas ricas en nutrientes desde la costa hacia el océano profundo asociado a los remolinos de mesoescala de la región. Gula et al. (2014) estudiaron la formación de filamentos fríos en la Corriente del golfo mediante simulaciones de alta resolución utilizando el modelo Regional Oceanic Modeling System (ROMS). En la Figura 7, se presenta la temperatura superficial del océano (SST) en una región al sur del punto de separación de la corriente del golfo en Cape Hatteras el 18 de marzo y el 13 de marzo (paneles superiores). Estas simulaciones fueron diseñadas para analizar la evolución de los filamentos fríos. En los paneles inferiores, se presentan acercamientos a cuatro áreas específicas (denominadas F_0 , F_1 , F_2 y F_3), donde se identifican intrusiones filamentosas frías en diferentes etapas de su evolución: F_0 representa un filamento intensificado en su fase final, F_1 muestra un filamento en formación temprana, y F_2 y F_3 corresponden a filamentos inestables en proceso de fragmentación en forma de pequeños vórtices ciclónicos. A medida que los filamentos se intensifican, desarrollan una circulación ageostrófica secundaria con fuertes movimientos verticales, lo que contribuye a la mezcla de masas de agua con diferentes características térmicas y salina, favoreciendo, además, el transporte vertical de nutrientes y otros trazadores biogeoquímicos (McWilliams, 2016). La simulación de Gula et al. (2014) también sugiere que la vida media de filamentos de submesoescala es de unos pocos días, desde su formación hasta su disipación por inestabilidad.

Además de su influencia en el transporte de nutrientes, los filamentos han sido reconocidos como importantes mecanismos de exportación de carbono. García-Muñoz et al. (2004) demostraron que los filamentos pueden exportar cantidades significativas de carbono orgánico total hacia el océano abierto, resaltando su papel en los ciclos biogeoquímicos globales. Asimismo, estas estructuras pueden representar hábitats clave para diversas especies marinas debido a su dinámica asociada a gradientes de vorticidad,

los cuales favorecen la concentración y el transporte lateral de trazadores como nutrientes y Chla a lo largo de los filamentos (Meunier et al., 2012; McWilliams, 2016). Estos procesos dan lugar a regiones de alta productividad biológica, donde la interacción entre la circulación ageostrófica y la estratificación modula tanto la distribución de propiedades biogeoquímicas como la evolución del propio filamento.

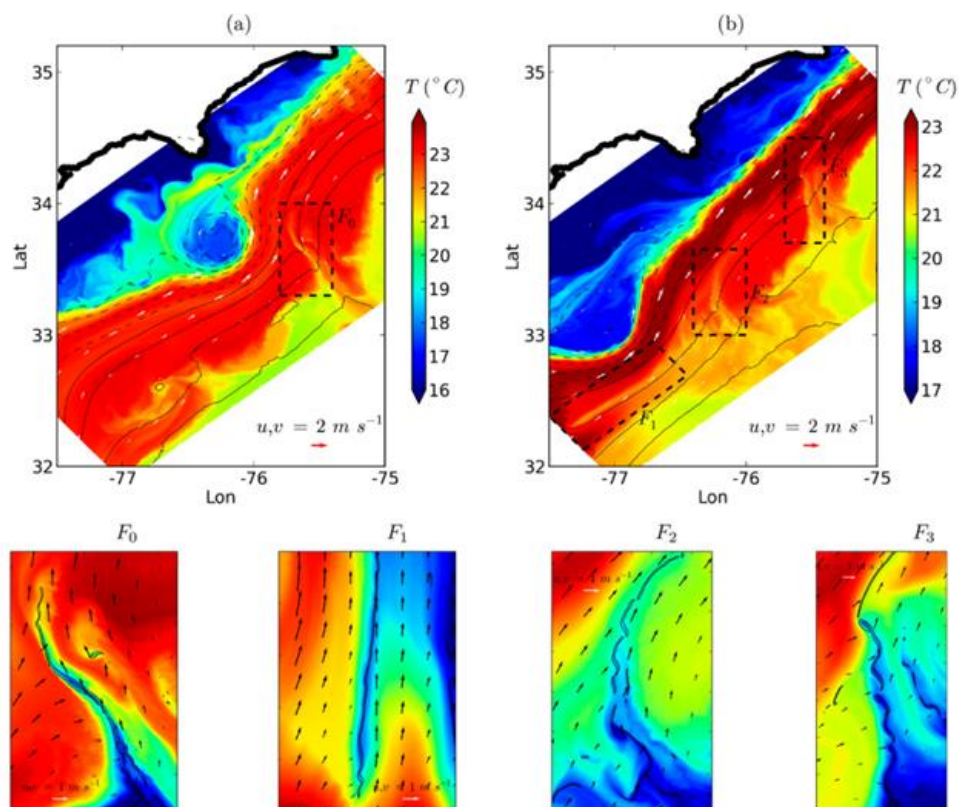


Figura 7. Temperatura superficial del océano simulada en una región al sur del punto de separación de la Corriente del golfo en Cape Hatteras para dos periodos: (a) 18 de marzo y (b) 13 de marzo. La altura dinámica de la superficie del océano se muestra con finas líneas negras de contorno cada 0.1 m. Los paneles inferiores muestran la SST ampliada en los cuatro rectángulos negros de los dos paneles superiores que muestran las intrusiones de filamento frío a escala inferior correspondientes a los casos (de izquierda a derecha): F0, F1, F2 y F3. Figura extraída de Gula et al. (2014).

En línea con estos estudios, Azis et al. (2024) analizaron un filamento oceánico localizado frente a la costa sur de Java, Indonesia, en una región dominada por afloramientos costeros impulsados por el monzón del sudeste asiático. El filamento evaluado presentó una extensión horizontal de aproximadamente 00 km y una profundidad de hasta 50 m. Utilizando datos satelitales e hidrográficos, los autores estimaron el transporte lateral de Chla a través del filamento mediante una integración tridimensional de su concentración y velocidad. Su análisis arrojó un valor de exporte de aproximadamente 46 toneladas diarias de Chla hacia el océano abierto, resaltando el papel de estas estructuras como mecanismos eficientes de redistribución de biomasa fitoplanctónica.

1.2.2 Estudios de filamentos en el golfo de México

Diversos estudios han documentado la presencia de filamentos en distintas zonas del golfo, destacando la región afectada por la pluma de agua dulce del río Mississippi en el norte, la interacción de remolinos mesoescalares en la región occidental y en la Bahía de Campeche (Androulidakis et al., 2019; Biggs & Müller-Karger, 1994; Toner et al., 2003; Liu et al., 2018; Huguenard et al., 2016).

En la región norte del goM, el río Mississippi ha sido identificado como un factor determinante en la generación de filamentos. Androulidakis et al. (2019) analizaron filamentogénesis¹ mediante simulaciones del modelo HYCOM, evidenciando que la descarga fluvial puede inducir la formación de filamentos con diferente intensidad y persistencia. La Figura 8 ilustra la distribución de la altura de la superficie del mar (SSH, por sus siglas en inglés) y las corrientes superficiales promediadas del 1 al 5 de agosto de 2015 en el noroeste del goM, donde se observa un filamento de salinidad que se extiende entre la LC y un ciclón de menor tamaño.

Este filamento surge como resultado de un flujo confluyente que advecta horizontalmente masa de agua de menor salinidad desde la plataforma del Mississippi hacia el interior del goM. La isohalina de 35 psu (línea roja en Figura 8) se estira y es advectada hacia el sur entre estas dos estructuras mesoescalares. Investigaciones previas han demostrado que los remolinos anticiclónicos pueden capturar y redistribuir agua de baja salinidad en su periferia, mientras que los ciclones tienden a atraparla (incorporarla) en su interior durante su formación (Liu et al., 2018).

Además de su influencia en la dinámica física, la descarga del río Mississippi también tiene un impacto significativo en los procesos biogeoquímicos de la región. Salisbury et al. (2001) encontraron correlación entre la descarga fluvial y el transporte de materia orgánica hacia aguas abiertas, destacando el papel de los ríos como fuentes primarias de fertilización. La Figura 9 muestra la coherencia entre la serie temporal de descargas fluviales mensuales del Mississippi y los datos de radiancia oceánica en el norte del goM. Se observó que los valores de radiancia en la banda de 443 nm presentaron una correlación negativa con el caudal del río, lo que indica que el aumento de descarga fluvial está asociado con una mayor concentración de materia orgánica absorbente de luz, como la Chla y la materia orgánica disuelta coloreada (CDOM). Por otro lado, la correlación positiva con la banda de 555 nm sugiere que los sedimentos en suspensión tienden a concentrarse en la zona de descarga del río, modulando la dispersión de partículas en el agua. Estos

¹ Se refiere al/los procesos de formación de filamentos.

resultados resaltan la influencia de la descarga fluvial en la óptica del océano y su papel en la redistribución de materia orgánica y nutrientes.

Estudios adicionales han demostrado que los remolinos asociados a los filamentos pueden capturar y redistribuir carbono orgánico en el océano abierto, modificando la estructura vertical de la biomasa fitoplanctónica y contribuyendo a su dispersión desde zonas costeras hacia mar abierto (Orens et al., 2017).

En la región occidental del goM, Biggs y Müller-Karger (1994) documentaron la presencia de filamentos asociados con remolinos de mesoescala en la plataforma continental. La Figura 10 presenta la profundidad de la isoterma de 14°C en el noroeste del goM en abril de 1980. Se observa una estructura filamentada (línea gruesa continua) identificada a partir de imágenes satelitales de SST y datos hidrográficos, la cual se desarrolla en el eje dipolar entre un remolino anticiclónico (isoterma de 14°C profunda; 340 m) y ciclónico (isoterma de 14°C más somera; 180 m), extendiéndose hacia la zona oceánica y promoviendo el transporte de biomasa y nutrientes de la plataforma continental. Estos hallazgos subrayan la relevancia de los filamentos en la redistribución de propiedades biogeoquímicas y en la conectividad entre la plataforma y las regiones más profundas del oeste del goM. Estudios adicionales han reforzado la relevancia de los remolinos en la formación y desarrollo de los filamentos en esta región que impactan la productividad biológica en el golfo (Müller-Karger et al., 1991; Morey et al., 2003).

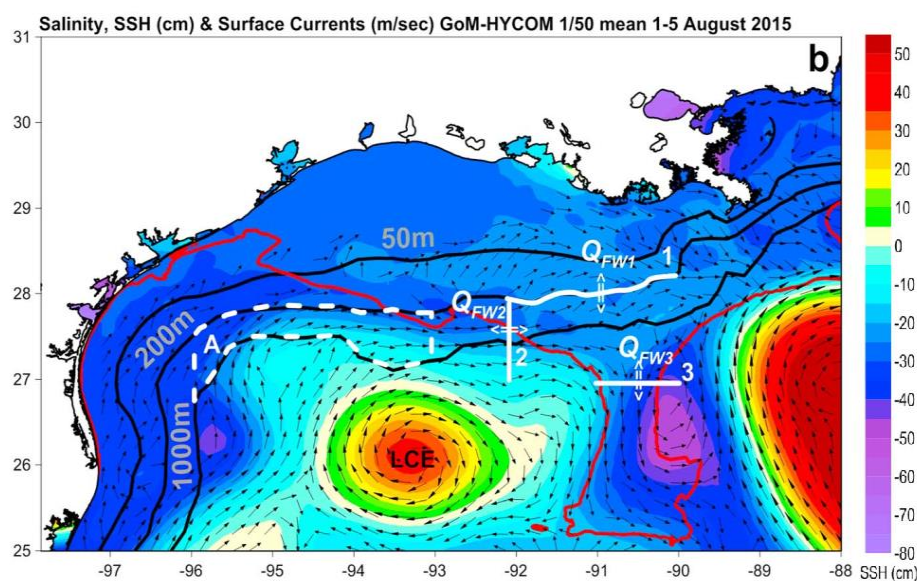


Figura 8. Elevación del nivel del mar (SSH por sus siglas en inglés) y corrientes superficiales en el noroeste del golfo de México, derivadas de simulaciones del modelo GoM-HYCOM y promediadas del 1 al 5 de agosto de 2015. La línea roja indica la isohalina promedio de 35 psu. Las líneas negras representan las isóbatas de 50, 200 y 1000 m. Figura modificada de Androulidakis et al. (2019).

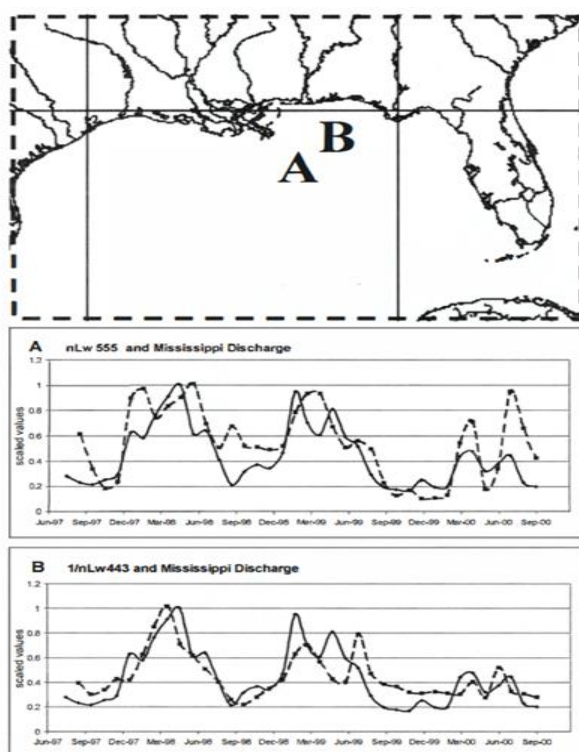


Figura 9. Ubicación de las estaciones de muestreo en el norte del goM y relación entre la descarga del río Mississippi y la radiancia del agua obtenida de SeaWiFS. El mapa (panel superior) muestra las localizaciones analizadas, mientras que los paneles inferiores comparan la descarga mensual del Mississippi con la radiancia del agua en las bandas de 555 nm (A) y 443 nm (B) durante septiembre de 1997 y octubre de 2000, evidenciando su correlación (Salisbury et al., 2001).

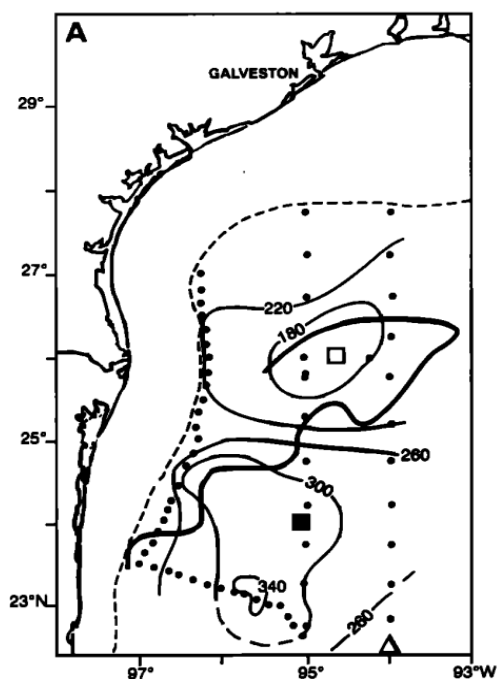


Figura 10. Profundidad (metros) de la isoterma de 14°C en el noroeste del goM en abril de 1980. La línea discontinua marca la isóbata de 200 m; las estaciones biológicas donde se midió la clorofila están representadas por cuadrados negros (anticiclón), cuadrados blancos (ciclón) y triángulos blancos (talud continental). La línea sólida gruesa indica la ubicación de una pluma de agua más fría. Figura modificada de Biggs y Müller-Karger, (1994).

En la bahía de Campeche, aunque los estudios sobre filamentos han sido menos numerosos en comparación con otras regiones del goM, se ha identificado que la circulación regional puede favorecer su formación. Martínez-López y Zavala-Hidalgo (2009) observaron la convergencia entre la circulación ciclónica característica de la bahía de Campeche y una circulación anticiclónica a lo largo del escarpe oeste de la Península de Yucatán (Figura 11). Por su parte, Kemp et al. (2016) estudiaron el transporte de biomasa en la zona sur de la bahía de Campeche y señalaron que los procesos de convergencia y el rotacional del viento pueden generar estructuras filamentosas. Sin embargo, aún es necesario profundizar en la caracterización de estos filamentos para comprender su papel en la fertilización de aguas abiertas del goM. La variabilidad espaciotemporal de los filamentos en el goM sigue siendo un tema de interés para la comunidad científica.

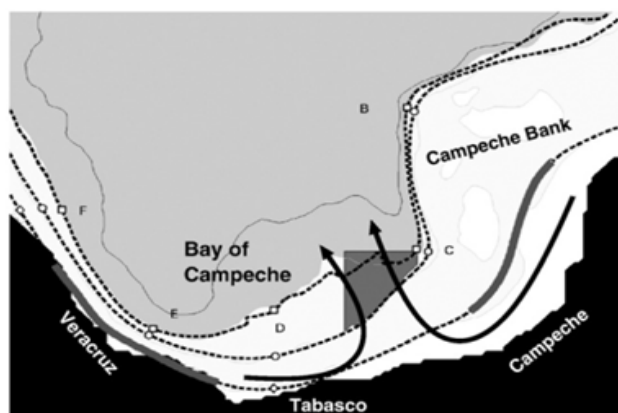


Figura 11. Representación esquemática del transporte de masa a través de la plataforma continental (flechas negras) debido a la convergencia de masas de agua del oeste del goM y masas de agua del Banco de Campeche. Figura extraída de Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009).

1.3 Justificación

Los filamentos oceánicos desempeñan un papel crucial en la redistribución de nutrientes y materia orgánica, influyendo directamente en la conectividad de los ecosistemas marinos y la productividad biológica. Su capacidad para transportar carbono, Chla y nutrientes desde la costa hacia el océano abierto ha sido documentada en estudios previos (Lohrenz et al., 1997; Kemp et al., 2016; Orens et al., 2017).

Desde una perspectiva global, la relevancia de estos procesos se encuadra en el desafío 3 de la Década de las Ciencias Oceánicas para el Desarrollo Sostenible (2021-2030) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), cuyo objetivo es alimentar de forma sostenible a la población mundial. La importación de aguas abiertas de material costero impulsada por los filamentos puede contribuir significativamente a la

identificación de áreas de alta productividad pesquera, promoviendo prácticas de manejo sostenible que permitan la conservación de los recursos marinos en un contexto de cambio climático (United Nations, 2024).

En el goM, se ha documentado la presencia de filamentos en regiones como la desembocadura del río Mississippi, la región occidental y la Bahía de Campeche, asociados principalmente a remolinos mesoescalares y forzamientos locales. Sin embargo, estos estudios han sido puntuales o enfocados en eventos específicos, y hasta ahora no existía un análisis sistemático que abordara su variabilidad estacional ni su estructura vertical en diferentes regiones del golfo.

El presente estudio se enfoca en analizar la variabilidad y estructura de los filamentos oceánicos en el goM mediante la combinación de datos satelitales y mediciones in situ obtenidas a través de gliders. Los datos satelitales permitirán evaluar la variabilidad estacional y regional en variables como la Chla, la SST y la topografía dinámica absoluta (ADT por sus siglas en inglés), mientras que los datos de gliders ofrecerán una visión bidimensional de la estructura vertical de los filamentos. Esta combinación metodológica permitirá abordar preguntas clave sobre la estacionalidad, los mecanismos de formación y la dinámica geostrófica de los filamentos.

1.4 Hipótesis

Los remolinos de mesoescala ubicuos en el goM interaccionan con la plataforma continental, y entre ellos, para formar filamentos que exportan propiedades termohalinas y biogeoquímicas típicas de las aguas de la plataforma hacia aguas profundas, contribuyendo significativamente a la fertilización del golfo de México.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Caracterizar la variabilidad y estructura termohalina de los filamentos del goM mediante imágenes satelitales y datos de alta resolución obtenidos con gliders.

1.5.2 Objetivos específicos

- Determinar si existe una estacionalidad y regiones preferenciales de formación de filamentos a lo largo del año
- Caracterizar el/los mecanismos de generación de filamentos por región
- Describir la estructura vertical dinámica, termohalina y biogeoquímica de los filamentos
- Estimar el transporte de Chla asociado a los filamentos

Capítulo 2. Datos y metodología

2.1 Datos

2.1.1 Datos satelitales

Se emplearon datos satelitales para identificar los filamentos oceánicos en el goM, utilizando información sobre topografía dinámica absoluta (ADT) y velocidades geostróficas derivadas, además de la concentración de Chla superficial. Todos los datos abarcan el periodo comprendido entre 2002 y 2022.

Los datos de ADT y las corrientes geostróficas superficiales se obtuvieron del Copernicus Marine and Environment Monitoring Service (CMEMS; <https://www.copernicus.eu/en>), un sistema de monitoreo oceánico global basado en observaciones satelitales y modelado numérico.

Las imágenes de clorofila-a fueron extraídas del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), el cual monitorea el color superficie del océano, permitiendo detectar la concentración de Chla asociada a los filamentos. Las resoluciones espaciales y temporales de cada variable se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 1. Especificaciones de los datos satelitales utilizados en el estudio

Variable	Fuente	Resolución espacial	Resolución temporal
ADT	CMEMS	0.25° x 0.25° (~27 km)	1 día
Corrientes geostróficas	CMEMS	0.25° x 0.25° (~27 km)	1 día
Chla	MODIS	0.037° x 0.037° (~4 km)	1 día

2.1.2 Datos in-situ de planeadores submarinos autónomos (gliders)

Los gliders son vehículos submarinos autónomos que perfilan la columna de agua modificando su flotabilidad. Su movimiento horizontal resulta de la combinación de estos cambios con el desplazamiento del centro de gravedad (ajuste de la posición de sus baterías internas), lo que, junto con sus alas, genera

una trayectoria en forma de “diente de sierra”. En general, estos planeadores operan entre la superficie y los 1000 m de profundidad, con ciclos de inmersión de aproximadamente 5-6 horas, durante los cuales recorren aproximadamente 4-6 km en dirección horizontal. La velocidad y el desplazamiento del glider dependen de las condiciones de las corrientes y del ángulo de inmersión.

Desde 2016, el Grupo de Monitoreo Oceanográfico con Gliders (GMOG) ha llevado a cabo un monitoreo sistemático de variables oceanográficas en la región central y occidental del goM. Este esfuerzo está orientado al estudio de procesos de mesoescala ($O(100\text{ km})$) y submesoescala ($O(10\text{ km})$). Hasta la fecha, el GMOG ha realizado 30 misiones en el goM y los datos están disponibles en su plataforma web (<https://gliders.cicese.mx>).

Los sensores principales utilizados en los gliders incluyen:

- **CT-Sail:** mide temperatura y conductividad en la columna de agua.
- **Sensor óptico WetLabs:** mide la fluorescencia de clorofila-a, la materia orgánica disuelta coloreada (CDOM) y la retrodispersión de la luz (backscatter en inglés)
- **Sensor de oxígeno Aanderaa:** mide la concentración de oxígeno disuelto en el agua.

2.2 Metodología

2.2.1 Identificación regional y variabilidad estacional de filamentos mediante datos satelitales

Para analizar las características estacionales y mensuales de la Chla, SST y ADT, en la región del goM, se utilizaron datos satelitales diarios para el periodo de 2002 a 2022. Estos datos permitieron calcular promedios mensuales y estacionales, facilitando la identificación de variaciones temporales clave en la dinámica de frentes oceánicos y filamentos.

El primer paso consistió en organizar los datos diarios en matrices correspondientes a cada mes del año. Posteriormente, se calcularon los promedios mensuales para cada una de las variables, mediante la ecuación:

$$X_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (1)$$

donde X_m es el promedio mensual de la variable de interés (ya sea Chla, SST o ADT), n es el número de días en el mes, y X_i representa los datos diarios. Para calcular los promedios estacionales, se siguió un procedimiento similar, agrupando los meses en las cuatro estaciones: invierno (diciembre, enero, febrero), primavera (marzo, abril, mayo), verano (junio, julio, agosto) y otoño (septiembre, octubre, noviembre). El cálculo se realizó mediante:

$$X_e = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m X_{m_j} \quad (2)$$

donde X_e es el promedio estacional, m es el número de meses en la estación, y X_{m_j} representa el promedio mensual de cada uno de los meses que componen la estación. Esta técnica de promediado permitió obtener mapas de las variaciones espaciales en función del tiempo de las diferentes variables, posibilitando la identificación de patrones relacionados con la presencia de filamentos.

Para acentuar las estructuras filamentadas en el goM, se calcularon los gradientes horizontales diarios de Chla, los cuales posteriormente fueron promediados para obtener composiciones mensuales y estacionales. Estos gradientes son importantes para detectar variaciones abruptas en la concentración de Chla, lo que permite identificar zonas de transición (frentes), donde existen fuertes contrastes entre masas de agua. Los filamentos, aunque están relacionados con estas zonas frontales, se distinguen por su forma elongada y coherencia espacial y temporal, asociadas a procesos de advección. Azis et al. (2024) utilizaron este método para analizar la dinámica de filamentos en regiones de alta productividad, demostrando que el uso del módulo del gradiente permite una mejor identificación de estas estructuras y facilita la comparación de intensidades en diferentes regiones. Siguiendo esta metodología, el gradiente horizontal en un punto se determinó como:

$$\nabla Chla(x, y) = \left(\frac{\partial Chla}{\partial x}, \frac{\partial Chla}{\partial y} \right) \quad (3)$$

donde $\left(\frac{\partial Chla}{\partial x} \right)$ y $\left(\frac{\partial Chla}{\partial y} \right)$ representan las derivadas parciales de la concentración de Chla en las direcciones longitudinal y latitudinal, respectivamente. Y el módulo del gradiente de Chla es:

$$|\nabla Chla(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial Chla}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial Chla}{\partial y}\right)^2} \quad (4)$$

Este valor del módulo del gradiente, en mg/m³ por metro, fue utilizado para identificar las áreas de mayor intensidad frontal en las cuatro regiones de estudio: Mississippi, Campeche, Oeste y la periferia de la LC.

Para facilitar la interpretación de los resultados, se blanquearon los altos gradientes de Chla hasta la isobata de 250 m, evitando así la influencia de procesos costeros que podrían enmascarar la detección de los filamentos. Este procedimiento ha sido utilizado en estudios previos para minimizar los efectos de la resuspensión de sedimentos y la descarga fluvial en la plataforma continental, los cuales pueden generar sobreestimaciones en los algoritmos satelitales de Chla en aguas someras (Justic et al., 2021). En particular, Justic et al. (2021) señalaron que la alta carga de nutrientes en la plataforma genera florecimientos fitoplanctónicos que alteran la señal observada de Chla en aguas someras. Además, la batimetría juega un papel clave en la delimitación de frentes oceánicos y en la dinámica de transporte de materia orgánica. Liu et al. (2018) indicaron que la isobata de 200-250 m marca una transición en la dinámica de partículas en la columna de agua, lo que sugiere que excluir datos de la plataforma continental mejora la interpretación de los procesos mesoescalares.

Finalmente, para cada región, también se calcularon los promedios mensuales del módulo del gradiente de Chla, permitiendo así obtener una distribución estacional de la intensidad frontal en cada una de las áreas. Estos resultados fueron plasmados en histogramas mensuales que ilustran las variaciones en la intensidad de los gradientes y su estacionalidad a lo largo del año. Esta representación facilitó la identificación de los meses en los que es más común la presencia de filamentos (persistencia), proporcionando una visión clara de la estacionalidad en cada región.

2.2.2 Análisis de la estructura vertical y transporte biogeoquímico mediante datos de gliders

Para el análisis de los datos recolectados por los gliders, se emplearon las trayectorias y los perfiles verticales obtenidos durante diversas misiones oceanográficas realizadas en el goM. Los sensores a bordo de los gliders registraron variables físicas y biogeoquímicas clave, incluyendo temperatura, conductividad (salinidad), densidad y concentración de clorofila-a. Los datos fueron esenciales para caracterizar la estructura vertical de los filamentos oceánicos en las diferentes regiones de estudio.

Los datos de los gliders fueron seleccionados por segmentos en los que los gliders cruzaban posibles filamentos identificados con sensores remotos. A través de la visualización de vídeos de las trayectorias de estos y su comparación con las imágenes satelitales de Chla, se verificó que los gliders atravesaran los filamentos transversalmente, evitando trayectorias paralelas al eje longitudinal del filamento. Este análisis permitió identificar los transectos más representativos y delimitar claramente los filamentos, proporcionando una descripción precisa de su estructura tanto vertical como horizontal.

Los datos recolectados por los gliders han sido interpolados mediante el método de Barnes (Barnes, 1964), el cual permite generar campos de datos interpolados a partir de observaciones puntuales. Este método facilitó la visualización de las estructuras oceanográficas en alta resolución y permitiendo el cálculo de variables derivadas. Los parámetros de interpolación utilizados fueron definidos con base en estudios previos, particularmente el de Meunier et al. (2018), donde se aplicaron resoluciones de 2 km y 2 m en la horizontal y vertical, respectivamente. Estas escalas pretenden preservar la resolución original de los datos sin introducir aliasing por ondas internas o otra variabilidad indeseable al análisis. En este trabajo, la malla de interpolación utilizada fue:

- **dx** = 2000 m: Resolución en horizontal (trayectoria).
- **dy** = 2 m: Resolución en la vertical (profundidad).

y las escalas de decorrelación:

- **xr** = 30000 m: Escala de decorrelación horizontal.
- **yr** = 20 m: Escala de decorrelación vertical.

Para obtener la salinidad absoluta, la temperatura conservativa y otras propiedades derivadas, se utilizaron las funciones del paquete GSW (Gibbs SeaWater) de la International Thermodynamic Equation of Seawater – 2010 (TEOS-10), disponible en: <https://www.teos-10.org/software.htm> (McDougall & Barker, 2011).

La salinidad absoluta se obtuvo a partir de la salinidad práctica registrada por el sensor del glider, considerando la presión y la ubicación geográfica de cada medición mediante la función `gsw_SA_from_SP`. La temperatura conservativa se calculó con la función `gsw_CT_from_t`, que permite convertir la temperatura in situ en temperatura conservativa, corrigiendo los efectos de la compresibilidad del agua. Finalmente, la densidad potencial (σ_θ) se obtuvo a partir de la densidad absoluta (ρ_θ), calculada con la función `gsw_rho`.

Las componentes zonal y meridional de la velocidad geostrófica se calcularon a partir de los gradientes horizontales de densidad aplicando la ecuación del viento térmico:

$$\frac{\partial u_g}{\partial z} = \frac{g}{f \rho_0} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial y}, \quad \frac{\partial v_g}{\partial z} = -\frac{g}{f \rho_0} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial x} \quad (5)$$

Donde:

- u_g y v_g son las componentes zonal y meridional de la velocidad geostrófica (m/s)
- g es la aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)
- f es el parámetro de Coriolis, que varía con la latitud
- $\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial y}$ y $\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial x}$ representan los gradientes de densidad en las direcciones latitudinal (meridional) y longitudinal (zonal), respectivamente
- ρ_0 es la densidad media del agua (kg/m³).

También se generaron diagramas T-S para analizar la relación entre la temperatura y la salinidad a lo largo de los transectos en los que los gliders cruzaron filamentos. Estos diagramas permiten identificar las características principales que definen las masas de agua asociadas a los filamentos. Además, se añadieron líneas punteadas que representan curvas de densidad potencial constante, lo que facilita la identificación de diferentes masas de agua en función de su temperatura y salinidad.

El transporte de Chla dentro de los filamentos fue calculado a partir de los datos previamente interpolados. Primero, se identificaron las secciones del transecto donde el glider cruzó perpendicularmente los filamentos. La identificación se realizó observando las imágenes satelitales, donde se detectaron máximos de Chla, así como en los campos interpolados de los transectos, donde también se observaron máximos de velocidad geostrófica. Estas características son consistentes con la dinámica típica de los filamentos, los cuales se forman frecuentemente por la interacción de remolinos ciclónicos y anticiclónicos que generan regiones de confluencia que pueden transportar material y propiedades a otras regiones.

Una vez seleccionadas las secciones correspondientes a los filamentos, se calculó el transporte local de Chla en cada celda de la malla interpolada, la cual fue generada con una resolución horizontal y vertical de 2000 m y 2 m, respectivamente. Este transporte se estimó siguiendo la metodología de Azis et al. (2024), mediante la siguiente ecuación:

$$T_{local}(x, z) = Chla(x, z) \cdot V_{geos}(x, z) \cdot dx \cdot dz \quad (6)$$

donde $dx = 2000m$ y $dz = 2m$. Este cálculo produjo un campo de transporte con unidades de mg/s , que representa el flujo puntual de Chla por celda.

Finalmente, a partir de los campos bidimensionales resultantes, se identificaron visualmente las regiones con máximos de transporte, asociadas al núcleo del filamento, y se definió un subconjunto de la sección transversal que capturara el área de mayor intensidad. Esta selección se basó en la distribución espacial del transporte observado. El promedio de los valores de T_{local} dentro de esa región fue considerado como el transporte característico de cada filamento.

Capítulo 3. Resultados

3.1 Análisis de datos satelitales

El análisis de los datos satelitales proporciona una visión sinóptica de la variabilidad oceánica superficial en el goM, permitiendo identificar patrones estacionales en la temperatura superficial del mar (SST) y en la distribución de clorofila-a (Chla). Estos resultados son fundamentales para comprender los mecanismos físicos que favorecen la formación de filamentos oceánicos, así como su posible relación con la variabilidad térmica estacional en la región. A continuación, se presentan los promedios mensuales de SST derivados de datos satelitales, seguidos por el análisis de la distribución de Chla y sus gradientes, con el fin de identificar regiones con mayor actividad filamentosa y su relación con estructuras de mesoescala.

3.1.1 Distribución climatológica de la temperatura superficial del mar

La variabilidad de la SST es un factor clave en la dinámica oceánica superficial del goM, influyendo en procesos físicos y biogeoquímicos, como son la estratificación de la columna de agua, la estabilidad de los frentes oceánicos y la disponibilidad de nutrientes en la superficie (Muller-Karger et al., 1991). Estudios previos han documentado una relación entre los cambios estacionales en la SST y las concentraciones de Chla, sugiriendo que la temperatura regula la productividad primaria a través de su impacto en la mezcla de la columna de agua y la disponibilidad de nutrientes (Barkan et al., 2017; Kemp et al., 2016).

En la Figura 12, se presentan los promedios mensuales de la SST en el goM para el periodo 2002-2022. Se puede observar un marcado ciclo estacional, con temperaturas más frías durante los meses de invierno (diciembre-febrero) y un aumento progresivo de la SST hacia el verano, alcanzando su máximo entre julio y septiembre. Este patrón refleja la influencia de los ciclos estacionales de radiación solar y la interacción de la circulación regional con los procesos de mezcla en la columna de agua. Muller-Karger et al. (1991) identificaron un comportamiento similar, señalando que la variabilidad de la SST en el goM no solo está modulada por la radiación solar, sino también por la dinámica de la LC y la presencia de frentes térmicos, los cuales pueden influir en la formación de filamentos.

Durante los meses de otoño a primavera, el mar Caribe muestra temperaturas más altas en comparación

con el goM, y el sistema de la LC transporta estas aguas cálidas hacia el interior del golfo. Este proceso modula la distribución de la temperatura en la región y puede influir en la formación de frentes térmicos. Barkan et al. (2017) destacaron que las variaciones térmicas afectan la estratificación de la columna de agua y la estabilidad de los frentes oceánicos, lo que a su vez influye en la disponibilidad de nutrientes y la productividad biológica.

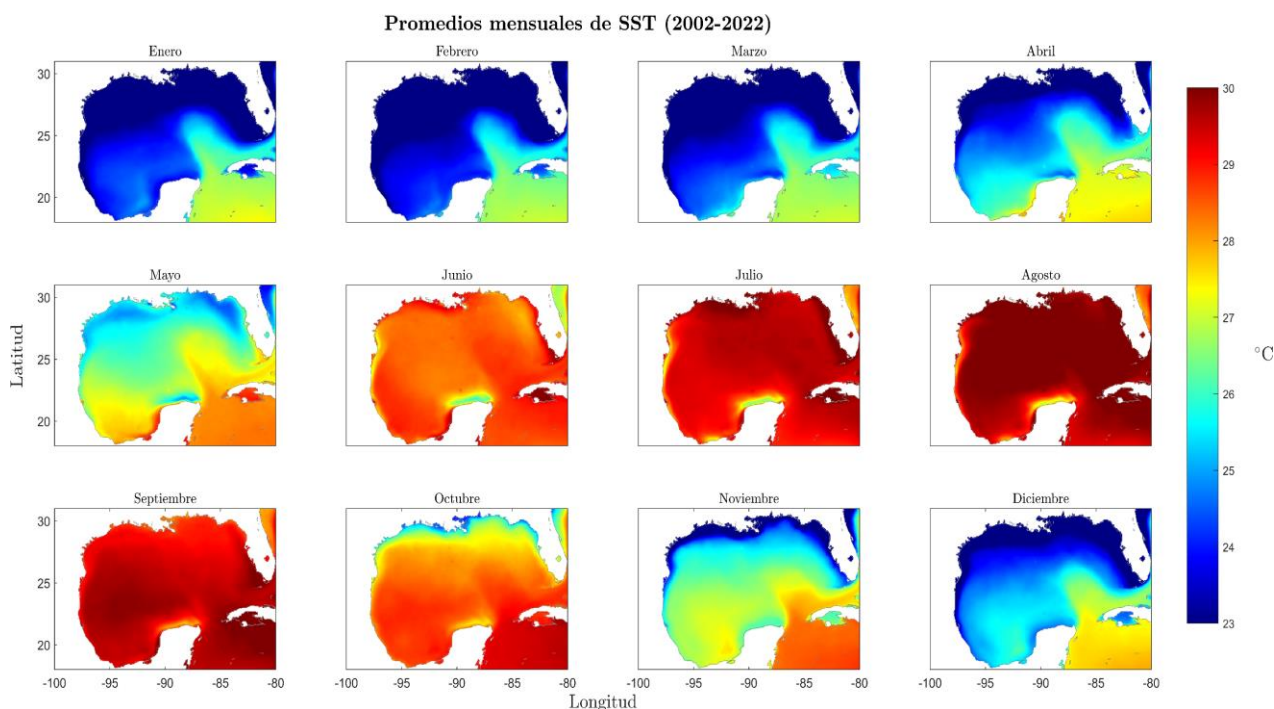


Figura 12. Mapas de los promedios mensuales de la temperatura superficial del océano (°C) en el goM derivados de observaciones satelitales para el periodo 2002-2022.

3.1.2 Análisis de variabilidad de la Chla y corrientes superficiales

En la Figura 13, se muestra la distribución mensual promedio de la Chla y las corrientes geostróficas superficiales en el goM para el periodo 2002-2022. Se pueden identificar mayores concentraciones de Chla en la plataforma continental y en regiones cercanas a la costa a lo largo del año, con una clara estacionalidad en su concentración y extensión hacia aguas profundas. Durante el invierno y primavera, las concentraciones de Chla son más elevadas, mientras que en verano y otoño se observa una disminución generalizada.

Comparando estos patrones con la Figura 12, se aprecia que los meses con mayor concentración de Chla coinciden con períodos de menor SST, lo que sugiere una relación inversa entre ambas variables. Estudios

previos han documentado que las variaciones estacionales de la temperatura superficial influyen en la producción de fitoplancton, ya que la disminución de la SST puede estar asociada con procesos de afloramiento y mezcla que aportan nutrientes a la zona eufótica (Salisbury et al., 2001; Lohrenz et al., 1997). Esto se refleja en la región de Mississippi y la LC, donde las concentraciones de Chla alcanzan sus valores más altos en invierno y primavera, coincidiendo con temperaturas más frías en la Figura 8. Este patrón sugiere que la circulación regional y los procesos de mezcla pueden desempeñar un papel en la redistribución de nutrientes, favoreciendo condiciones propicias para el crecimiento fitoplanctónico en estas estaciones.

Por otro lado, en la costa oeste del goM, las concentraciones de Chla-a también son más elevadas en invierno y primavera, pero disminuyen notablemente en los meses de verano y otoño, siguiendo un patrón similar al resto del goM. Este comportamiento indica que en la mayor parte del goM, la producción de fitoplancton está modulada por la variabilidad estacional en la disponibilidad de nutrientes, posiblemente relacionada con procesos de mezcla inducidos por el enfriamiento invernal y el transporte de aguas ricas en nutrientes hacia la superficie (Damien et al., 2018). En contraste, en la región del norte del goM, se observa una concentración de Chla relativamente alta incluso en los meses de verano, lo que sugiere que en esta zona los aportes fluviales pueden jugar un papel importante en la disponibilidad de nutrientes y por consecuencia, en la productividad primaria (Toner et al., 2003).

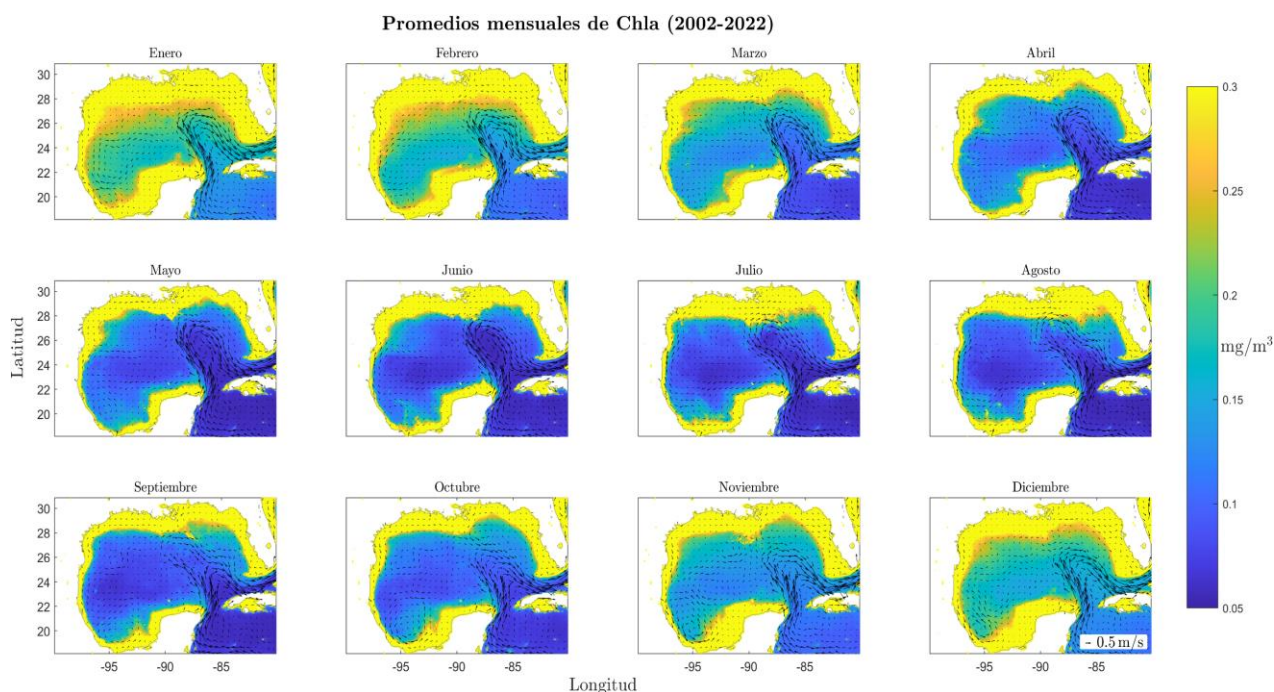


Figura 13. Mapas de los promedios mensuales de la concentración superficial de Chla (mg/m^3) y corrientes geostróficas superficiales (m/s) en el goM derivados de observaciones satelitales para el periodo 2002-2022. Las flechas negras indican la dirección y magnitud del vector de las corrientes geostróficas promedio.

En la Figura 14, se presentan los promedios mensuales de los módulos de los gradientes horizontales de la concentración de Chla, calculados a partir de la isobata de 250 m, junto con las velocidades promedio de las corrientes geostróficas en el goM. Estos gradientes reflejan la tasa de cambio espacial de la concentración de Chla y permiten identificar zonas de transición biogeoquímica marcadas, asociadas con la dinámica superficial. En este análisis, los gradientes intensos y persistentes que se extienden más allá del talud continental se interpretan como indicadores de estructuras alargadas recurrentes, que podrían corresponder a regiones de formación frecuente de filamentos. Dado que se trabaja con promedios mensuales de 20 años, estas estructuras no representan eventos individuales, sino patrones espaciales persistentes que señalan zonas donde la circulación favorece la advección costera hacia mar abierto y donde, con alta probabilidad, se forman filamentos con regularidad estacional.

En los meses de marzo-junio, se observan gradientes intensos en la región oeste del goM, alcanzando áreas más allá de la isobata de 250 m. En el promedio de 20 años de datos, la circulación en esta región parece estar influenciada por la presencia recurrente de un remolino ciclónico al norte y un anticiclón al sur, cuya interacción genera una zona de confluencia que favorece la extensión de filamentos de Chla hacia aguas abiertas incrementando los gradientes.

En julio y agosto, los gradientes más intensos y extendidos se localizan en la región norte del goM, particularmente sobre la plataforma continental influenciada por la descarga del río Mississippi. En este periodo, la LC se encuentra más alargada y extendida hacia el norte, favoreciendo la interacción con las masas de agua de la plataforma. Como resultado, las aguas del Mississippi no permanecen confinadas a la plataforma, sino que se extienden hacia el sureste, superando la isobata de 250 m.

Entre los meses de junio-septiembre, los gradientes más intensos se observan en la región sur del goM, particularmente en la bahía de Campeche y las costas de Veracruz y Tabasco. En este periodo, la circulación de mesoescala está caracterizada por la presencia recurrente de remolinos ciclónicos en la región, los cuales favorecen la extensión hacia el norte-noroeste de aguas de la plataforma con alta Chla. Mientras tanto, en la región este, particularmente en las costas de Yucatán, los gradientes más intensos se mantienen a lo largo de todo el año, siguiendo la periferia de la LC. Esta persistencia está asociada al contraste entre las aguas oligotróficas del Caribe transportadas por la LC y las aguas relativamente más ricas en nutrientes de la plataforma de Yucatán, lo cual genera una estructura frontal continua. La persistencia de esta corriente resulta en una distribución sostenida de filamentos de Chla, manteniéndolos definidos y extendidos hacia el norte.

El análisis de las corrientes superficiales promedio sugiere que la dinámica de mesoescala en el goM juega un papel clave en la distribución del módulo del gradiente horizontal de Chla. La interacción entre remolinos y la LC da lugar a regiones de convergencia, las cuales pueden favorecer la elongación y el transporte de filamentos de Chla (elevados gradientes) hacia aguas oceánicas más profundas.

En la Figura 15 se presentan los mapas de los promedios estacionales de los gradientes de Chla en el goM, junto con la circulación geostrófica superficial promedio. En dichos mapas, las áreas seleccionadas para este estudio se destacan mediante recuadros rojos.

Los resultados muestran una clara variabilidad estacional en la intensidad y distribución de estos gradientes. En la región de Mississippi, los gradientes más intensos ocurren en verano, coincidiendo con la descarga máxima del río Mississippi y la incursión hacia el norte de la LC. En la región Oeste, destacan gradientes intensos durante la primavera, asociados con la zona de confluencia generada por la interacción persistente de un ciclón al norte y un anticiclón al sur. En Campeche, los gradientes más marcados aparecen en verano y otoño, vinculados principalmente con la presencia del remolino ciclónico dominante en la bahía. Finalmente, en la región P. LC, se observa una persistencia anual de gradientes intensos, ligeramente más extendidos al norte durante invierno y primavera, reflejando la influencia continua de la LC.

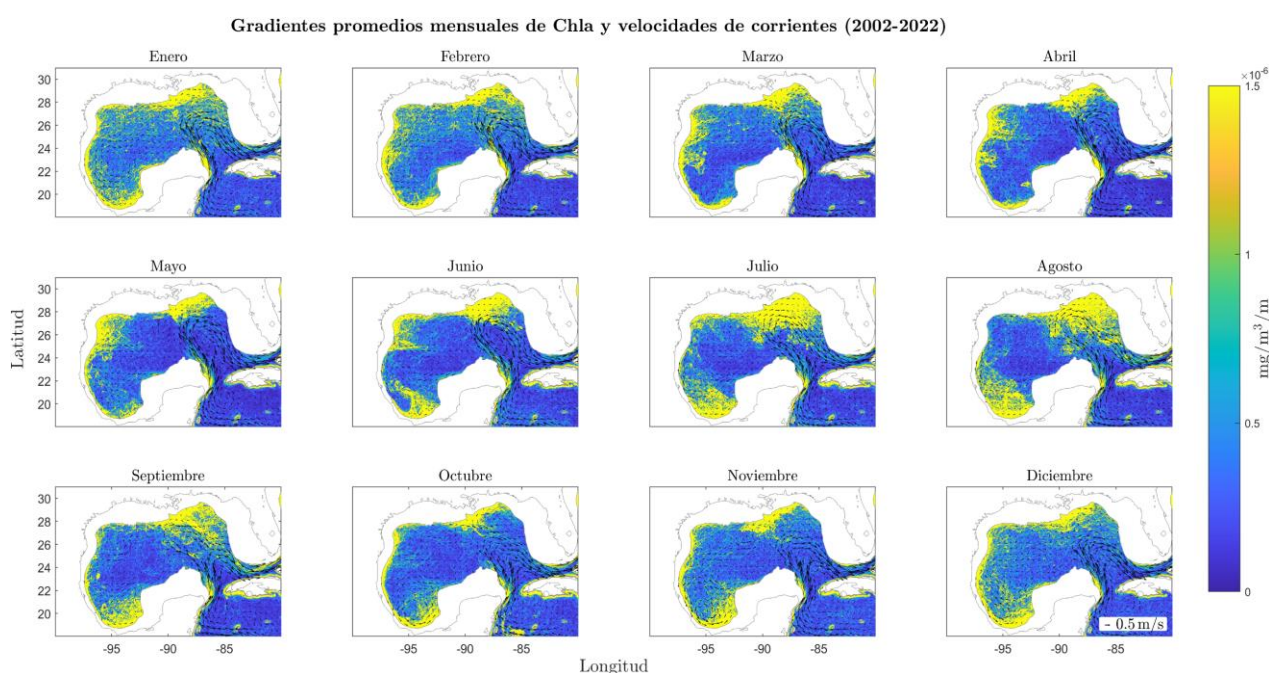


Figura 14. Mapas de los promedios mensuales de los gradientes horizontales de Chla ($\text{mg}/\text{m}^3/\text{m}$) y corrientes geostróficas superficiales (m/s) en el goM derivados de observaciones satelitales para el periodo 2002-2022. Se aplicó un blanqueamiento de datos hasta la isobata de 200 m. Las flechas negras indican la dirección y magnitud de los vectores de las corrientes geostróficas promedio.

Tabla 2. Tabla de puntos coordinados (longitudes y latitudes) que definen los límites de las cuatro diferentes regiones de interés.

Región	Longitud (O°)	Latitud (°N)
Mississippi	-92, -86	25, 29.5
Campeche	-97, -92	18, 22
Oeste	-98, -94	22, 27.7
Periferia de la LC	-89, -86	21, 25

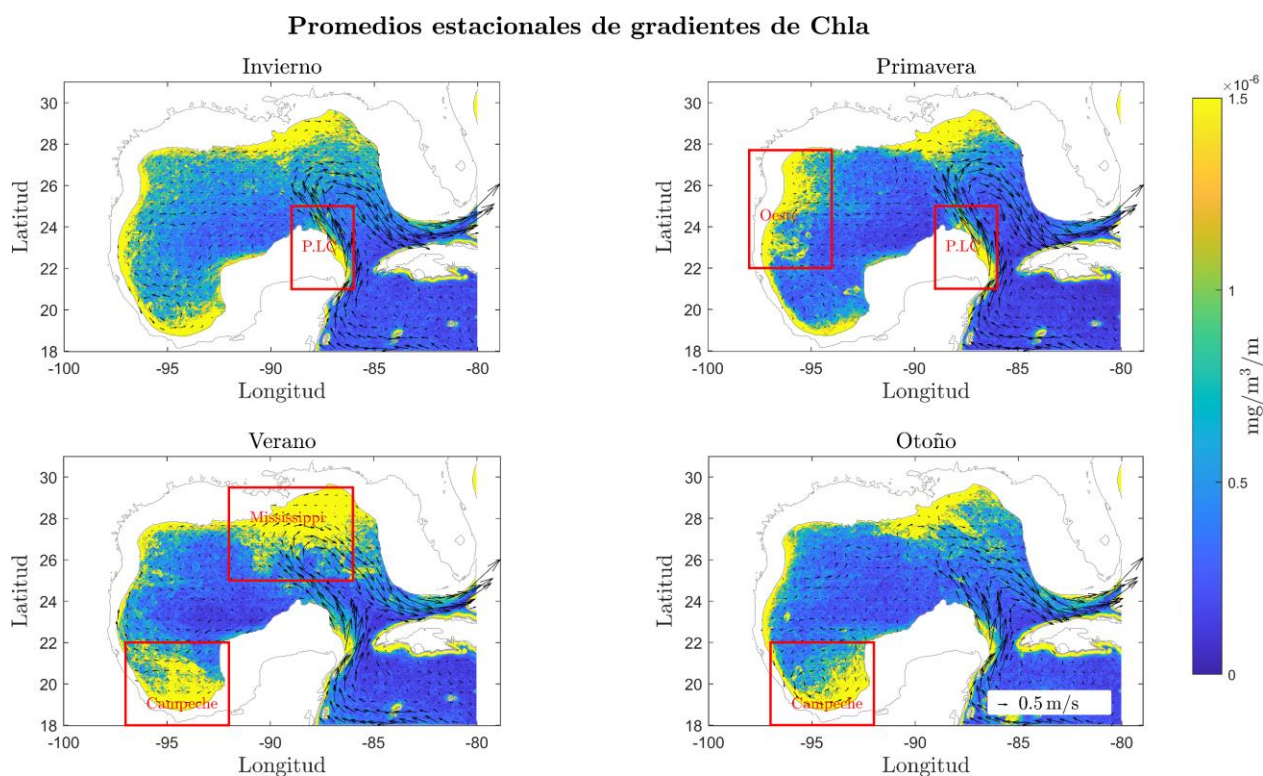


Figura 15. Mapas de los promedios estacionales de los gradientes horizontales de Chla ($\text{mg/m}^3/\text{m}$) y corrientes geostróficas superficiales (m/s) en el goM derivados de observaciones satelitales para el periodo 2002-2022. Se aplicó un blanqueamiento de datos hasta la isobata de 200 m. Las flechas negras indican la dirección y magnitud de los vectores de las corrientes geostróficas promedio.

Una vez definidas las regiones de estudio, se revisaron por región los promedios mensuales de los módulos de los gradientes horizontales de Chla y las corrientes geostróficas superficiales, con el fin de analizar en mayor detalle la evolución temporal de zonas con cambios marcados en la concentración de Chla. Estas zonas podrían estar asociadas a estructuras frontales o a la formación recurrente de filamentos, y su distribución se interpretó en función de la circulación oceánica local en cada región. A demás, se calculó la extensión longitudinal aproximada de los gradientes más intensos observados, si bien no se trata de la

detección directa de filamentos, estas distancias ayudan a inferir cuanto se extienden las estructuras similares a filamentos hacia mar abierto

En la región Oeste (Figura 16), los gradientes más intensos destacan claramente durante marzo-junio, cuando la interacción persistente entre un ciclón y un anticiclón origina una zona de confluencia que extiende estas estructuras hacia el océano abierto. Este patrón sugiere un mecanismo de formación dominado por remolinos de mesoescala que favorecen el transporte de biomasa hacia aguas profundas. Las estructuras observadas durante este periodo muestran extensiones mar adentro de hasta ~330 km desde la plataforma.

En la región de Mississippi (Figura 17), los gradientes más marcados ocurren entre julio y agosto, coincidiendo con la incursión más pronunciada hacia el norte de la LC. Durante estos meses, los gradientes fuertes se extienden hacia el sur - sureste; posteriormente, pierden intensidad hacia septiembre, aunque todavía se observan valores elevados a lo largo del borde este de la LC. En esta región, las estructuras alargadas pueden alcanzar distancias de ~430 a ~460 km mar adentro, lo que sugiere una mayor capacidad de exportación de biomasa desde la plataforma.

En la región de Campeche (Figura 18), los gradientes alcanzan su máxima intensidad entre junio y septiembre, periodo dominado por un remolino ciclónico cuya circulación favorece claramente la advección de Chla desde la plataforma hacia el norte-noroeste, en sentido contrario a las agujas del reloj. Las extensiones horizontales asociadas a estas estructuras superan los ~440 km en algunos meses, indicando una exportación significativa de biomasa hacia aguas oceánicas.

Finalmente, en la región de la P.LC (Figura 19), se observan gradientes intensos y persistentes durante todo el año, con mayor prominencia entre enero y abril. Estas estructuras siguen la plataforma noreste de la Península de Yucatán y se alinean con el borde occidental de la LC, lo que sugiere que la advección asociada a esta corriente es el principal mecanismo responsable de la presencia recurrente de estos gradientes. Las extensiones estimadas en esta región alcanzan los ~390 km, principalmente en invierno y primavera.

En la Figura 20 se muestra un histograma con los promedios mensuales de los módulos de los gradientes horizontales de concentración de Chla para cada región. Este procedimiento permitió caracterizar de manera cuantitativa los patrones estacionales de intensidad en las zonas previamente delimitadas, complementando la inspección visual de las figuras mensuales. Para cada región, se promediaron todos

los valores de los gradientes dentro de la malla regional para cada mes, con el objetivo de identificar los periodos con mayor intensidad relativa.

La región de Mississippi presenta los gradientes más intensos, con un máximo de aproximadamente $1.1 \times 10^{-5} \text{ mg/m}^3/\text{m}$ durante el mes de julio. En la región Oeste, la mayor intensidad se observa en mayo $\sim 1.6 \times 10^{-6} \text{ mg/m}^3/\text{m}$, seguida de una disminución durante el verano. La región de Campeche muestra gradientes elevados principalmente entre julio y diciembre, alcanzando un valor máximo de aproximadamente $2.5 \times 10^{-6} \text{ mg/m}^3$ en agosto. Finalmente, en la periferia de la LC, los gradientes presentan valores más bajos en comparación con las otras regiones, del orden de $8.5 \times 10^{-7} \text{ mg/m}^3$. En esta región, los valores más altos se registran entre enero y marzo, mientras que el mínimo ocurre entre noviembre y diciembre.

Estos resultados indican que los gradientes de Chla tienen comportamientos estacionales claramente diferenciados en cada región del goM.

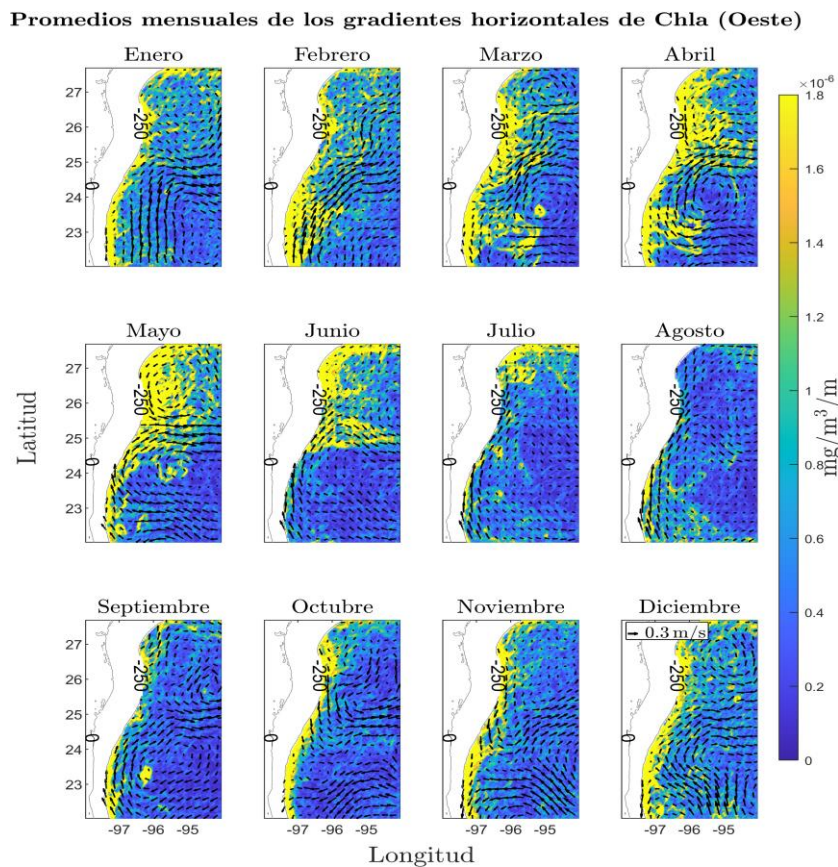


Figura 16. Mapas de los promedios mensuales de los gradientes horizontales de concentración de Chla ($\text{mg/m}^3/\text{m}$) y corrientes geostróficas superficiales (m/s) en la región Oeste del goM derivados de observaciones satelitales para el periodo 2002-2022. Se aplicó un blanqueamiento de datos hasta la isobata de 250 m. Las flechas negras indican la dirección y magnitud de los vectores de las corrientes geostróficas promedio.

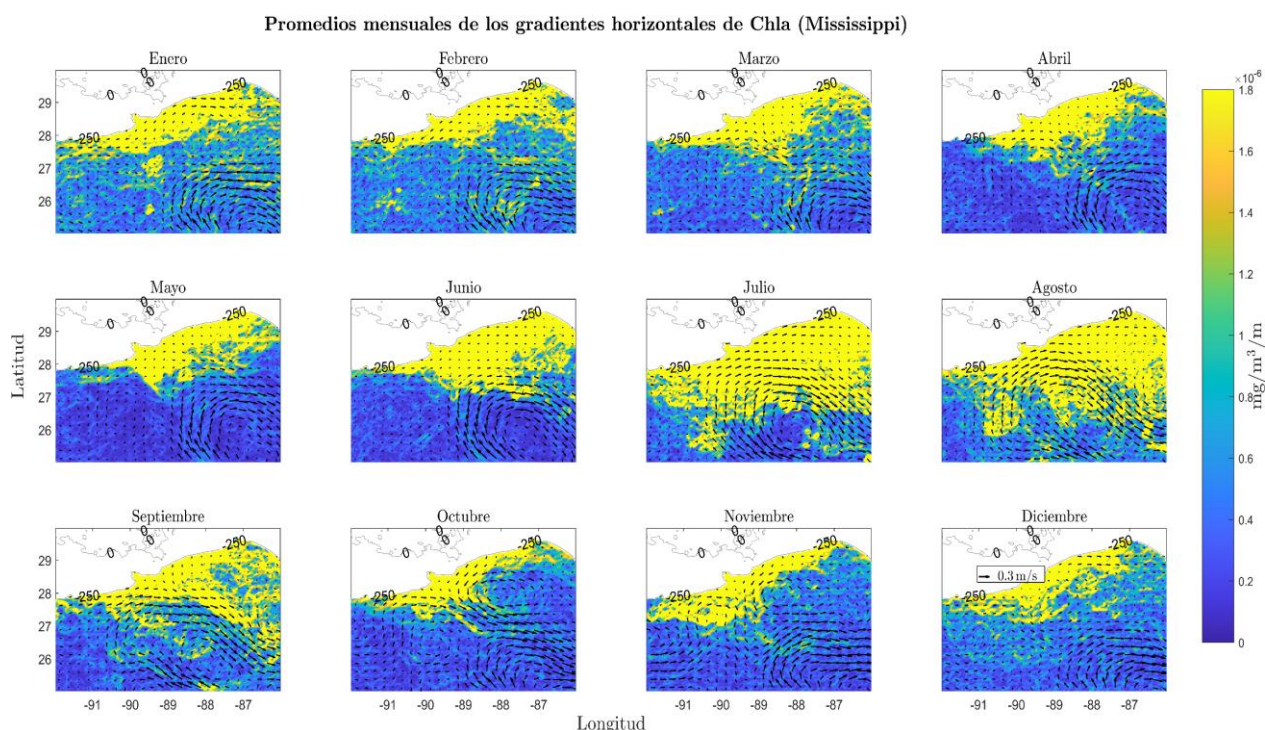


Figura 17. Mapas de los promedios mensuales de los gradientes horizontales de concentración de Chla ($\text{mg}/\text{m}^3/\text{m}$) y corrientes geostróficas superficiales (m/s) en la región Mississippi del goM derivados de observaciones satelitales para el periodo 2002-2022. Se aplicó un blanqueamiento de datos hasta la isobata de 250 m. Las flechas negras indican la dirección y magnitud de los vectores de las corrientes geostróficas promedio.

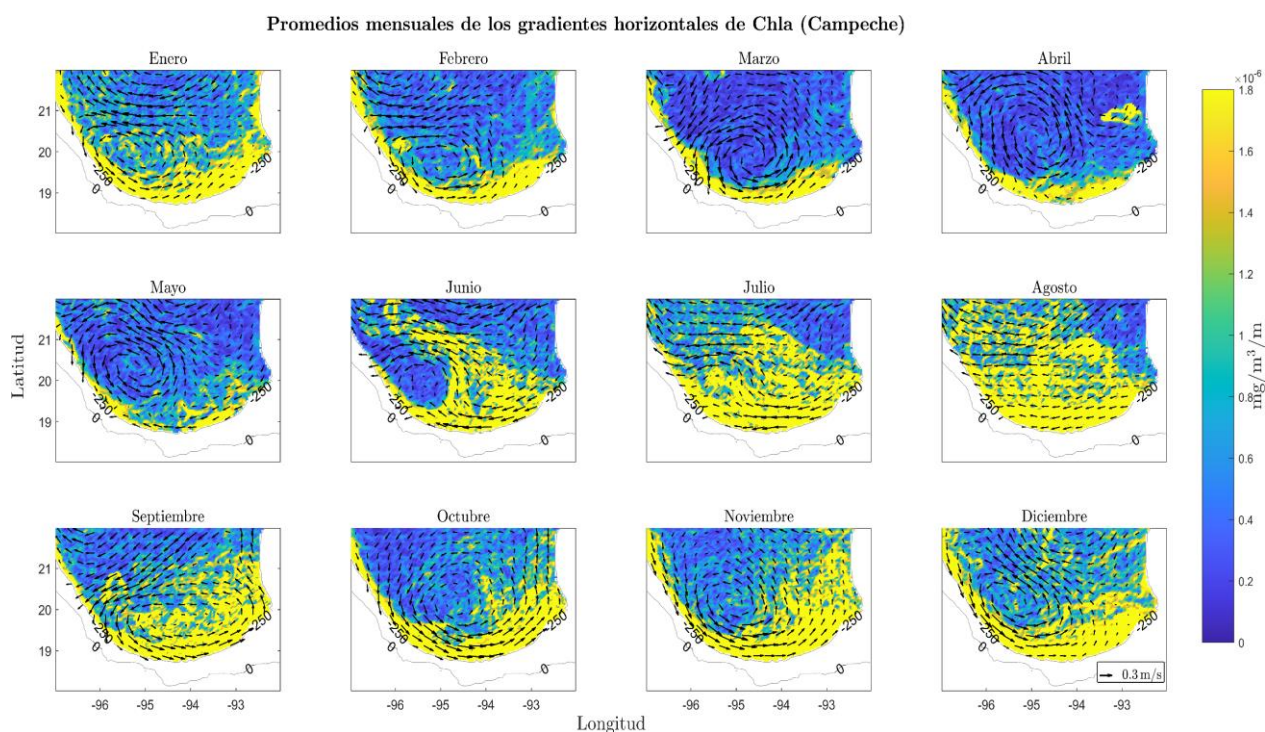


Figura 18. Mapas de los promedios mensuales de los gradientes horizontales de concentración de Chla ($\text{mg}/\text{m}^3/\text{m}$) y corrientes geostróficas superficiales (m/s) en la región Campeche del goM derivados de observaciones satelitales para el periodo 2002-2022. Se aplicó un blanqueamiento de datos hasta la isobata de 250 m. Las flechas negras indican la dirección y magnitud de los vectores de las corrientes geostróficas promedio.

Promedios mensuales de los gradientes horizontales de Chla (P.LC)

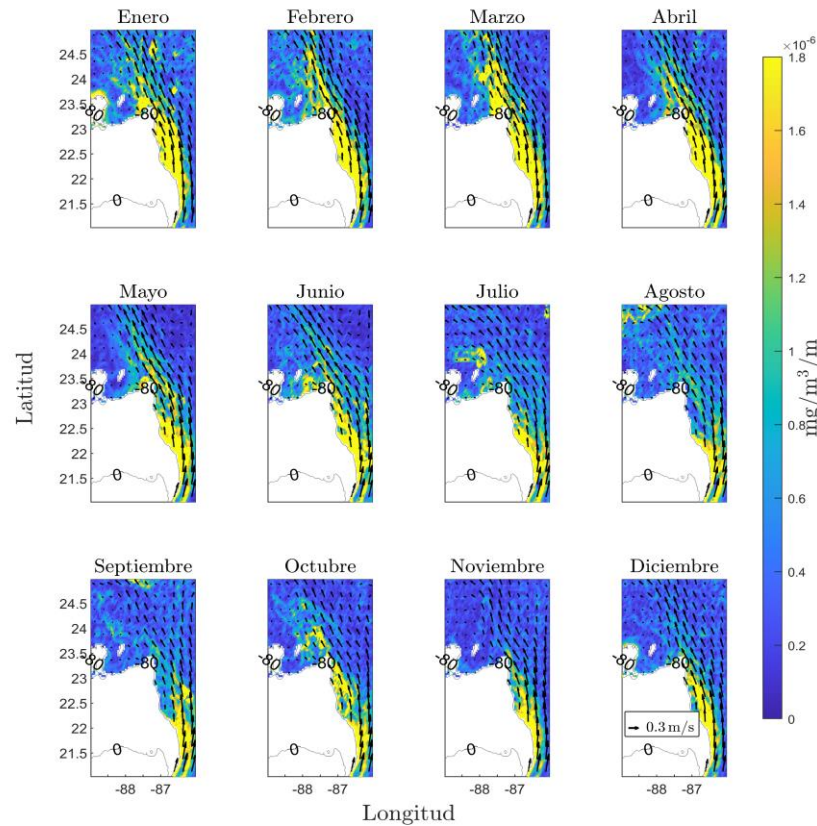


Figura 19. Mapas de los promedios mensuales de los gradientes horizontales de concentración de Chla ($\text{mg}/\text{m}^3/\text{m}$) y corrientes geostóficas superficiales (m/s) en la región Periferia de la LC del goM derivados de observaciones satelitales para el periodo 2002-2022. Se aplicó un blanqueamiento hasta la isobata de 80 m. Las flechas negras indican la dirección y magnitud de los vectores de las corrientes geostóficas promedio.

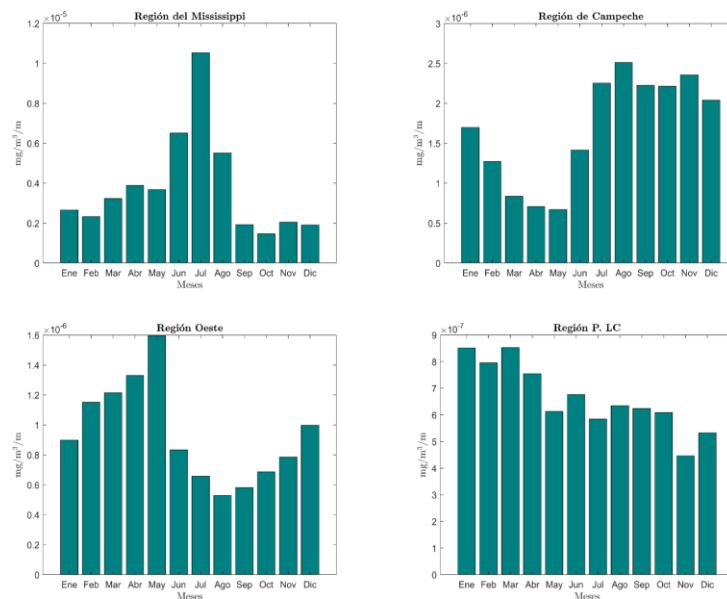


Figura 20. Histograma con los promedios mensuales de los gradientes horizontales de la concentración de Chla ($\text{mg}/\text{m}^3/\text{m}$) en las cuatro regiones de estudio (Mississippi, Campeche, Oeste y P.LC) derivados de observaciones satelitales para el periodo 2002-2022.

3.2 Análisis de datos de planeadores submarinos (gliders)

Para complementar los resultados obtenidos a partir de datos satelitales, y caracterizar la estructura vertical de los filamentos oceánicos en las regiones de interés se utilizaron observaciones obtenidas con planeadores submarinos autónomos. Se seleccionaron tres misiones de gliders que cruzaron filamentos en las regiones de Mississippi, Oeste y bahía de Campeche. La selección de estas estructuras se realizó dentro de las áreas delimitadas como regiones preferenciales para la formación de filamentos, procurando que los periodos de observación coincidieran con los meses y mecanismos dinámicos previamente identificados del análisis satelital.

El uso de planeadores submarinos autónomos permitió obtener muestreos continuos de la temperatura, salinidad, densidad potencial, velocidad geostrófica y variables biogeoquímicas como la concentración de Chla, oxígeno disuelto (O_2), materia orgánica disuelta coloreada (CDOM) y retrodispersión óptica (backscatter), a lo largo de una trayectoria de diente de sierra. Este análisis es fundamental para comprender el papel de los filamentos en la distribución vertical y horizontal de biomasa y otras propiedades fisicoquímicas dentro del goM. Estudios previos han demostrado que la combinación de mediciones satelitales con observaciones in situ mediante planeadores submarinos autónomos permite evaluar de manera efectiva las interacciones entre procesos físicos de mesoescala y la redistribución de propiedades termohalinas en el goM (Sosa-Gutiérrez et al., 2020).

3.2.1 Filamento en región Oeste

El análisis de la misión 14 del GMOG, en la región oeste del goM, permitió identificar un filamento oceánico en aguas abiertas. La trayectoria completa del planeador submarino, realizada entre el 02 de febrero y el 05 de abril de 2019, se muestra en la Figura 21. La línea roja y negra indican el recorrido total del glider, y la línea negra delimita las áreas con elevadas concentraciones superficiales de Chla, donde se observan estructuras alargadas características de filamentos oceánicos. Estas estructuras se sitúan en aguas profundas, lejos de la influencia directa de la plataforma continental, sugiriendo un transporte potencial de biomasa desde zonas costeras hacia el océano abierto.

En la Figura 22 se presentan los perfiles verticales de temperatura, salinidad absoluta, anomalía de densidad potencial y concentración de Chla, obtenidos a partir de los datos crudos de toda la misión 14. A lo largo de estos perfiles, destaca una región específica, aproximadamente a 200 km desde el inicio de la

misión, en los primeros 100 metros de profundidad, donde se observan anomalías termohalinas y biogeoquímicas bien definidas. Estas anomalías se caracterizan por una disminución simultánea de la temperatura, pero principalmente de salinidad y densidad, junto con un marcado incremento en la concentración de Chla. Este patrón es consistente con la intrusión de agua costera hacia aguas profundas, corroborando así la existencia del filamento.

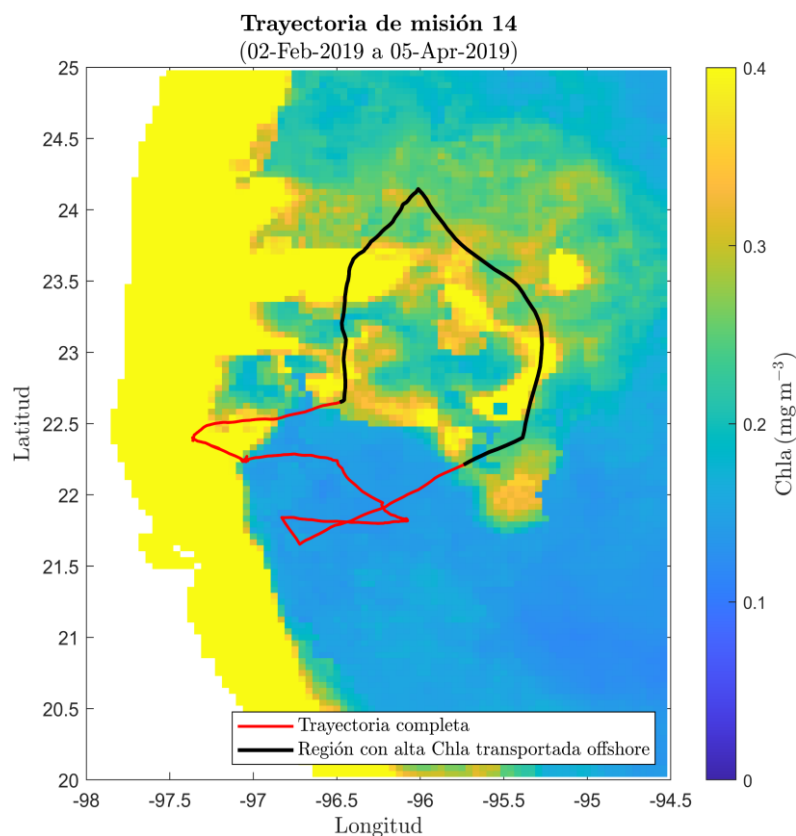


Figura 21. Mapa de trayectoria completa (línea negra y roja) de la misión 14 sobrepuesta a la concentración promedio de Chla superficial durante el periodo de la misión. El punto de inicio y final del recorrido corresponde al extremo más cercano a la costa, desplazándose inicialmente hacia el noreste.

La misión 14 constó de un total de 416 dives (inmersiones/emersiones), cubriendo un recorrido desde la costa hacia aguas profundas y de regreso. Al revisar la trayectoria del planeador submarino junto con imágenes satelitales de Chla, fue posible identificar el periodo durante el cual atravesó perpendicularmente el filamento, correspondiente a los dives 75-125 realizados entre el 11 y el 18 de febrero de 2019. En la Figura 23 se presentan los campos promedio de ADT y concentración superficial de Chla durante estas fechas, junto con la trayectoria específica del glider realizada en esos días (línea roja). La trayectoria indica claramente un desplazamiento en dirección de sur a nor-noreste, cruzando una región de alta concentración de Chla. En paralelo, el campo de ADT revela que esta estructura se encuentra influenciada por la interacción entre remolinos ciclónicos y anticiclónicos, favoreciendo el transporte de

agua costera hacia áreas profundas. Podemos estimar que el filamento atravesado en la misión tiene una anchura de ~ 50 km y una extensión de ~ 300 km.

Con el fin de validar la coherencia entre los datos satelitales y los cálculos de velocidad, se analizó el perfil vertical de velocidad geostrofica correspondiente a toda la misión 14 (Figura 23). Para mejorar la representación de las estructuras mesoescalares a lo largo de un dominio extenso, se ajustaron las escalas de decorrelación empleadas en la interpolación mediante el método de Barnes. En particular, se aumentaron las escalas horizontales y verticales de correlación ($x_r = 50$ km, $y_r = 30$ m), en contraste con las utilizadas en los transectos más cortos posteriores, donde se mantuvieron escalas más finas mencionadas en la metodología. Este ajuste permitió suavizar el campo interpolado y resaltar con mayor claridad las señales dinámicas de interés.

En dicho perfil, se observa que en la región marcada con el recuadro negro (correspondiente al periodo del 11 al 18 de febrero de 2019), las velocidades en la capa superficial (0–100 m) alcanzan valores positivos cercanos a 0.4 m/s, orientados hacia mar abierto. Esta señal se encuentra flanqueada por velocidades negativas, lo que sugiere una convergencia lateral compatible con la interacción entre remolinos ciclónicos y anticiclónicos. Además, se confirma que la señal más intensa se localiza en la parte superficial, coincidiendo con las mayores concentraciones de clorofila-a observadas en la Figura 22, lo que refuerza la interpretación de un transporte de agua costera rica en biomasa hacia zonas oceánicas.

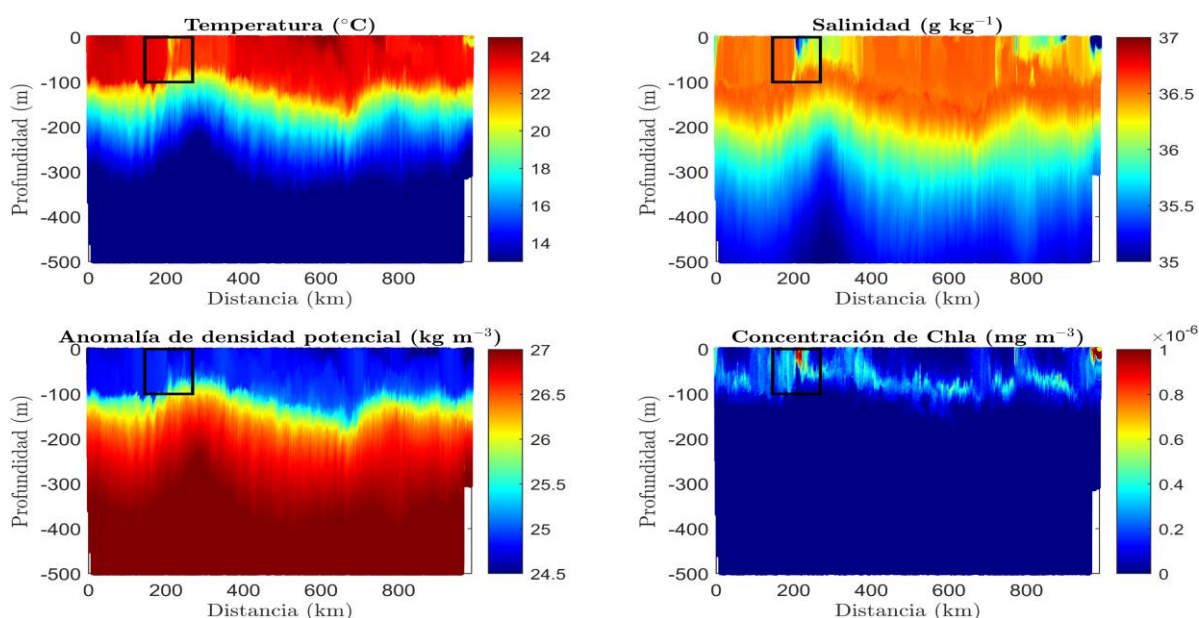


Figura 22. Perfiles verticales de temperatura, salinidad, anomalía de densidad potencial y concentración de Chla obtenidos a partir de datos crudos de la misión 14, el recuadro corresponde a los primeros 100 m de profundidad que comprende las fechas 11 al 18 de febrero de 2019.

Adicionalmente, el diagrama T-S correspondiente al mismo periodo (Figura 25) complementa esta interpretación, mostrando dos masas de agua bien diferenciadas. Se identifica el agua relacionada al filamento en la capa superficial (0-50 m), la distribución es dispersa con temperaturas entre $\sim 21^{\circ}\text{C}$ y 23°C y salinidades bajas entre ~ 35 y 36 g/kg, lo que indica la presencia de una masa de agua menos salina y más cálida, posiblemente influenciada por descarga costera o advección superficial. Esta firma termohalina, coherente con lo observado en los perfiles verticales, refuerza la presencia del filamento. Por debajo de esta capa, la distribución es más homogénea, con propiedades características del interior del goM.

Para complementar la identificación del filamento y permitir una descripción más detallada basada en variables calculadas, se aplicó una interpolación objetiva a los datos obtenidos a lo largo del transecto seleccionado. La Figura 26 presenta una comparación directa entre los perfiles verticales de concentración de Chla derivados de los datos crudos y los correspondientes campos interpolados. Esta comparación permite observar claramente cómo la interpolación suaviza la distribución original, lo que facilita su interpretación visual y permite calcular derivadas espaciales esenciales para la estimación de la velocidad geostrófica transversal al transecto como se describe en la ecuación 5 de la sección de metodología.

Finalmente, de manera similar, los perfiles interpolados en malla regular y sus versiones originales (perfiles en diente de sierra) de temperatura, salinidad absoluta, anomalía de densidad potencial, concentración de Chla, backscatter, CDOM y O_2 , correspondientes a las otras dos misiones utilizadas en este estudio, se presentan en el Anexo 1 de esta tesis (Figuras 50 – 69). Esto permite una comparación visual que asegura que los gradientes y estructuras relevantes sean adecuadamente representados sin perder la variabilidad inherente al fenómeno estudiado.

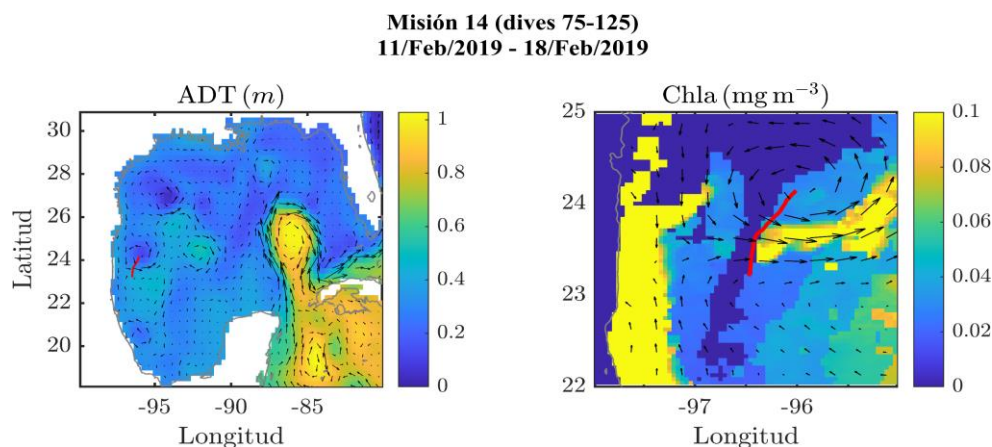


Figura 23. Campos de altura dinámica absoluta y corrientes geostróficas superficiales para el goM (izquierda) y concentración de Chla y corrientes geostróficas superficiales para la región Oeste (derecha); ambos mapas promediados durante el periodo del 11 al 18 de febrero de 2019 durante la misión 14. En ambos paneles la trayectoria del glider para ese periodo es representada con una línea roja.

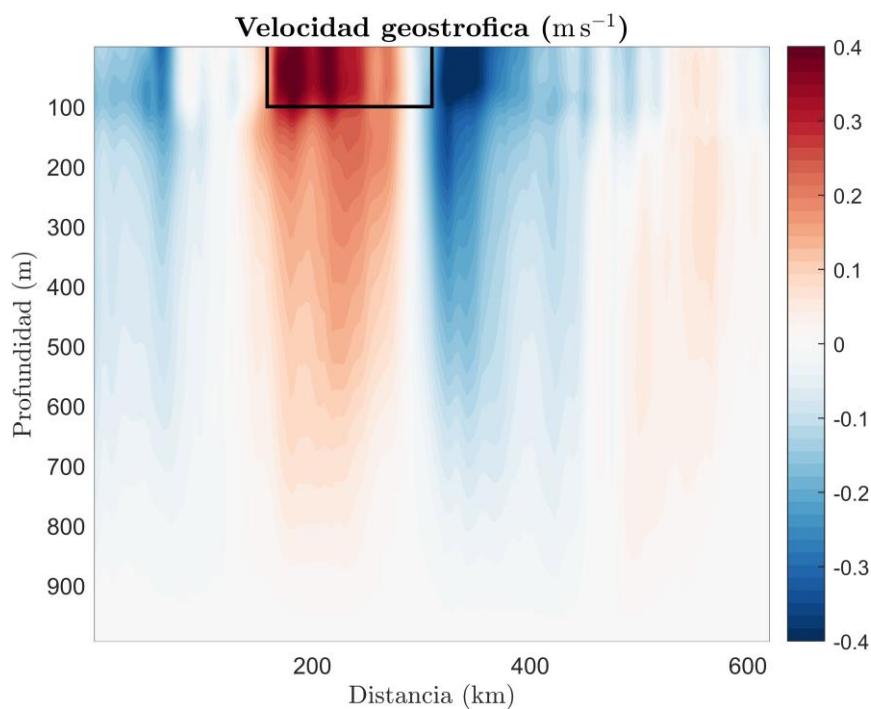


Figura 24. Perfil vertical de velocidad geostrofica (m/s) calculada para la misión 14 de los dives 1 al 200, el recuadro corresponde a los primeros 100 m de profundidad que comprende las fechas 11 al 18 de febrero de 2019.

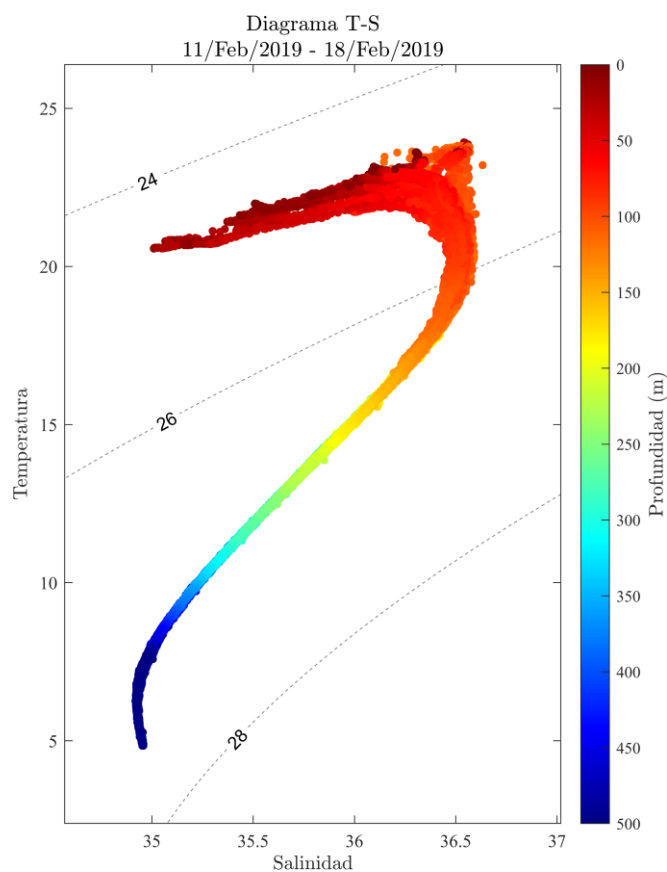


Figura 25. Diagrama T-S de la misión 14 para el periodo 11-18 de febrero de 2019, el recuadro negro corresponde al filamento. Se representan las líneas de anomalía de densidad potencial en gris, mientras que la profundidad está codificada en color.

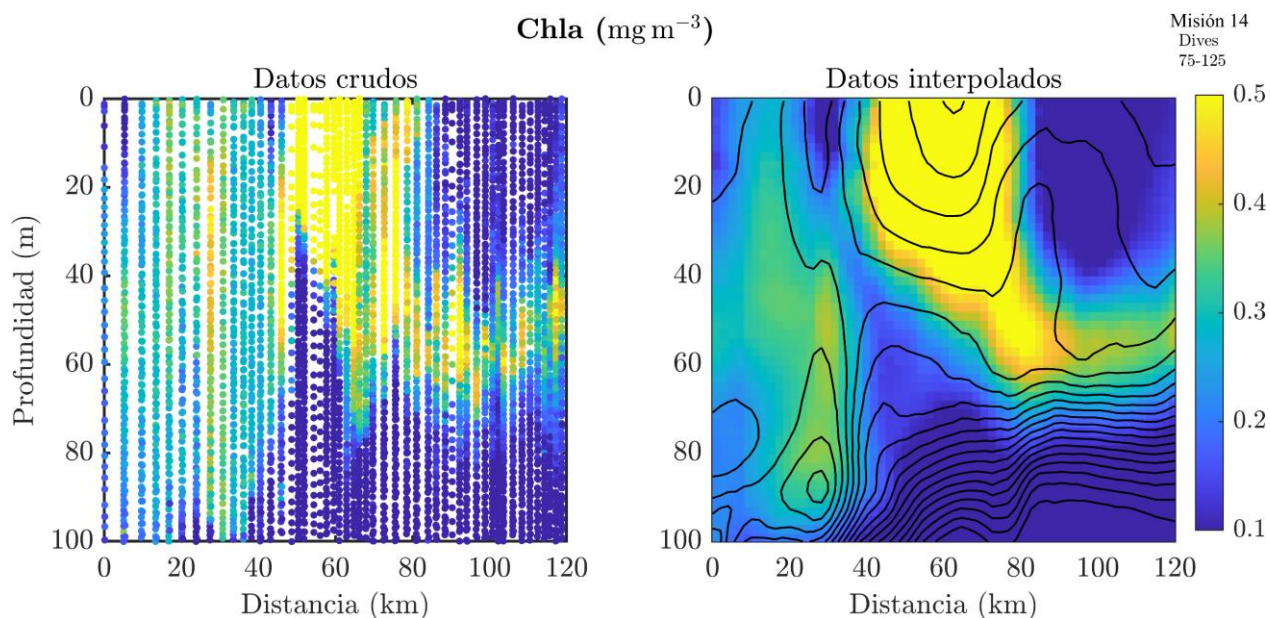


Figura 26. Perfiles verticales de concentración de Chla (mg m^{-3}) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 14 (dives 75-125) para el periodo del 11 al 18 de febrero de 2019. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial.

La sección de temperatura interpolada (Figura 27) muestra una variación a lo largo del transecto, con temperaturas que oscilan entre 21°C y 24°C en los primeros 100 m de la columna de agua. Se observa un núcleo más frío aproximadamente a los 50 km de distancia del transecto, en los primeros $\sim 50\text{m}$ de profundidad. Antes del núcleo de agua fría, la columna de agua presenta una temperatura relativamente homogénea, mientras que después de este se observa una mayor estratificación térmica.

La sección de salinidad absoluta evidencia la presencia de aguas menos salinas ($\sim 35.5 \text{ g/kg}$) a $\sim 50\text{km}$ de distancia y en los primeros 50 m de profundidad, indicando una intrusión de agua con influencia continental. Estas aguas coinciden con el núcleo frío y contrastan con las capas más profundas, donde la salinidad absoluta es mayor y las temperaturas son más bajas.

La distribución de la anomalía de densidad potencial refuerza la idea de una estructura tipo filamento, con valores más bajos en la superficie ($\sim 24.8 \text{ kg/m}^3$), coherentes con una reducción de la temperatura del agua intrusiva. Estas observaciones sugieren la presencia de un filamento frío y poco salino. La confluencia de corrientes generada por la interacción de estructuras de mesoescala de diferente signo de vorticidad, facilita el transporte de agua menos densa hacia el océano profundo.

Finalmente, la distribución de la velocidad geostrofica transversal al transecto muestra una estructura bien

definida en los primeros 100 m de la columna de agua. Los valores positivos representan velocidades dirigidas mar adentro (offshore), mientras que los valores negativos corresponden a un flujo hacia la costa (inshore). Dado que la trayectoria del glider en esta sección avanzó de sur a norte, esto implica que la corriente asociada al filamento es predominantemente hacia el este (ver Figura 23), transportando agua desde la plataforma continental hacia el océano abierto con velocidades de hasta 0.5 m/s. La mayor intensidad del flujo ocurre a ~30 km dentro del transecto y la mínima a ~60km, además, se observa un patrón bidireccional con una banda de flujo offshore y otra inshore.

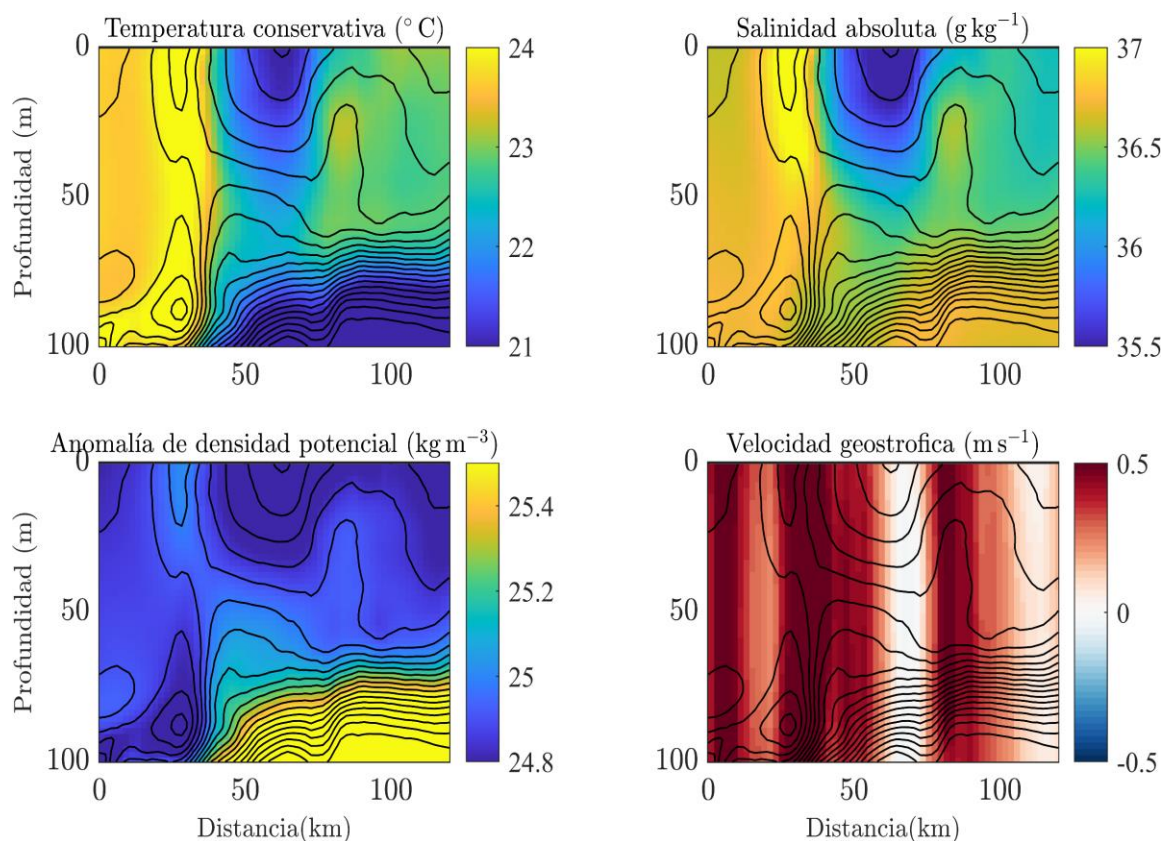


Figura 27. Secciones interpoladas de temperatura conservativa, salinidad absoluta, anomalías de densidad potencial y velocidad geostrofica de la misión 14 (dives 75-125), correspondiente al periodo del 11 al 18 de febrero de 2019. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial.

En la Figura 28 se presentan las secciones interpoladas de Chla, backscatter, CDOM y O₂ a lo largo del transecto correspondiente a los dives 75-125. La distribución de Chla muestra concentraciones máximas entre los 40 y 60 km del transecto, con un núcleo en la capa superficial (~30-50 m de profundidad), lo que coincide con la región de menor densidad identificada previamente. Este incremento en Chla está acompañado por un aumento en los valores de backscatter, lo que sugiere una mayor biomasa en suspensión. Este patrón es consistente con la posible presencia de fitoplancton, dado que la

retrodispersión óptica (junto con la Chla) está asociada con la abundancia de partículas biológicas en la columna de agua (Pasqueron de Fommervault et al., 2017).

La sección de CDOM indica una mayor concentración de materia orgánica disuelta en la misma región donde se observan los máximos de Chla y backscatter. Esta distribución podría estar relacionada con la actividad biológica y la descomposición de materia orgánica en la zona frontal del filamento, un proceso que ha sido documentado en sistemas de interacción entre remolinos y frentes de afloramiento (Rossi et al., 2013).

En cuanto al O_2 disuelto, se observan valores de hasta 4.2 ml/l en las zonas donde se observaron altas concentraciones de Chla y backscatter. Este comportamiento es característico de regiones con intensa producción primaria, donde la fotosíntesis incrementa los niveles de oxígeno en la capa superficial de la columna de agua (Damien et al., 2018). La distribución espacial del O_2 , sugiere que la actividad biológica en el filamento contribuye significativamente a la variabilidad de los niveles de oxígeno en la región.

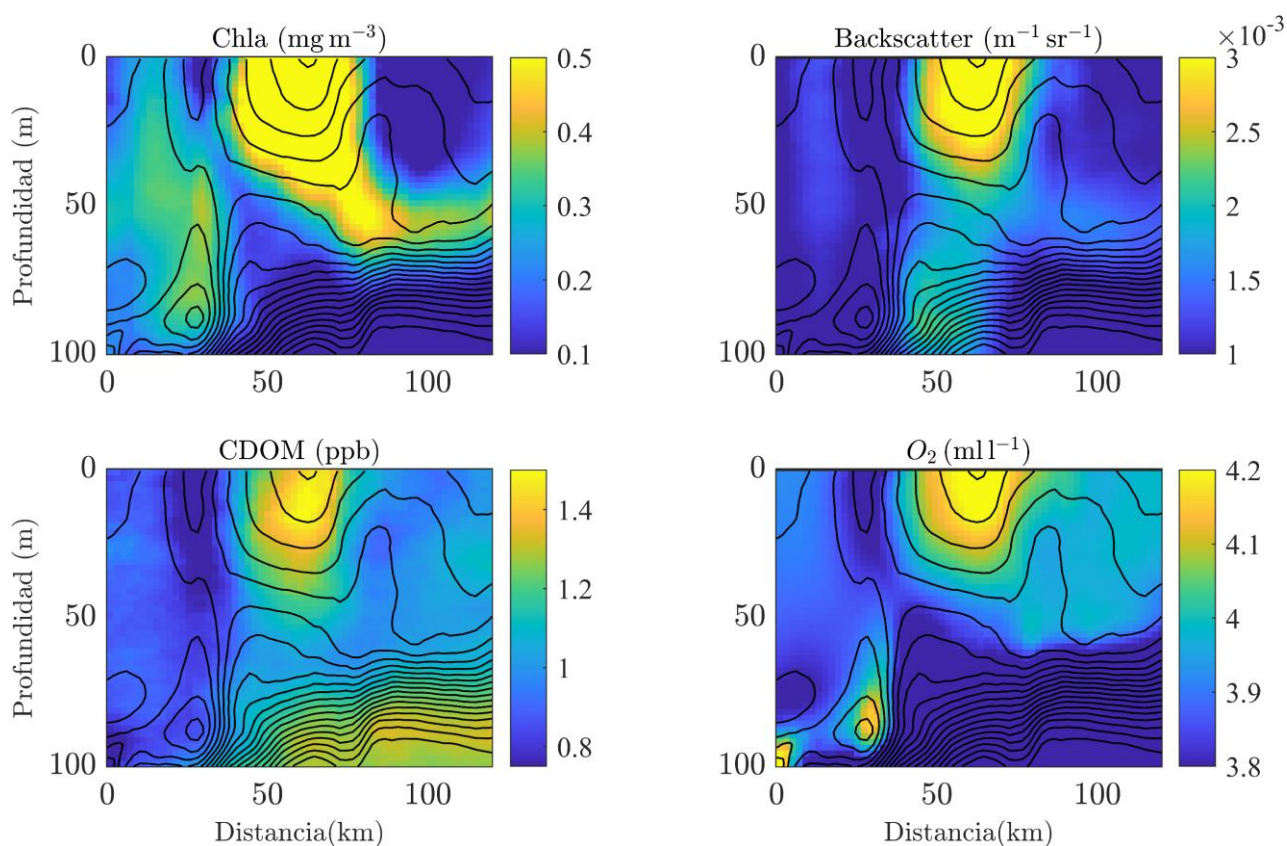


Figura 28. Sección interpolados de Chla, backscatter, CDOM y oxígeno disuelto de la misión 14 (dives 75-125), correspondiente al periodo del 11 al 18 de febrero de 2019. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial.

En la Figura 29 se presentan los resultados del cálculo del transporte de Chla a lo largo del transecto seleccionado. En el panel superior, se muestra la distribución del transporte en función de la distancia y la profundidad, donde los valores más altos se concentran entre los 40 y 60 km del transecto, con un núcleo máximo alrededor de los 15 m de profundidad. Estas zonas de mayor transporte coinciden con las regiones de alta concentración de Chla y con las áreas de elevada velocidad geostrófica, lo que sugiere que el filamento actúa como un mecanismo eficiente de redistribución de biomasa en el océano.

En el panel inferior, se representa el transporte promediado verticalmente hasta la base del filamento (35 m de profundidad) en función de la distancia a lo largo de la sección. Se identifican varios picos de transporte que corresponden con las zonas donde se registraron los máximos de Chla. El análisis cuantitativo indica que el transporte promedio es de aproximadamente 964.7 mg/s (~ 83.3 ton/día).

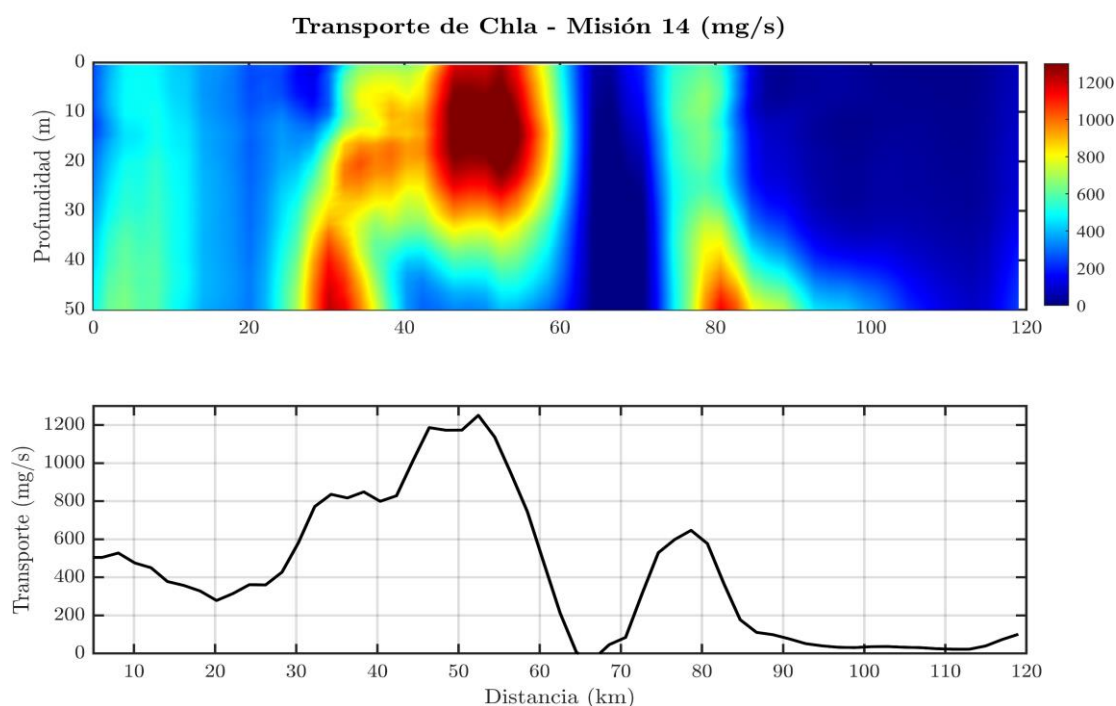


Figura 29. Sección de transporte de Chla en la misión 14 (dives 75-125) para el periodo del 11 al 18 de febrero de 2019: distribución en el transecto (panel superior) y transporte promedio de los primeros 35 m de profundidad (panel inferior).

3.2.2 Filamento en región Mississippi

La misión 12 se llevó a cabo en el goM, pasando cerca de la región del Mississippi, con un total de 575 inmersiones que abarcaron un recorrido desde la LC hasta la plataforma continental. En la Figura 30 se presenta la trayectoria completa de la misión sobrepuesta a la concentración promedio de Chla superficial

durante el periodo de muestreo. Se observa que el glider cruzó transversalmente una extensión costera de altas concentraciones de Chla, la cual puede asociarse con un filamento oceánico

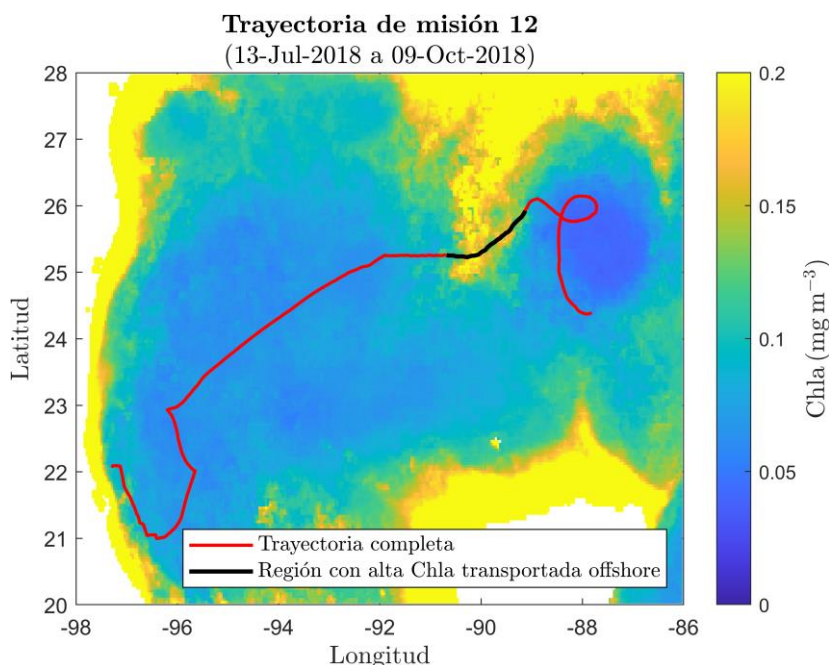


Figura 30. Mapa de trayectoria completa de la misión 12 sobrepuesta a la concentración promedio de Chla superficial durante el periodo de la misión. El punto de inicio del recorrido corresponde al extremo más lejano sobre la LC y el punto final cerca de las costas Veracruzanas.

La Figura 31 muestra los perfiles verticales de temperatura, salinidad absoluta, anomalía de densidad potencial y concentración de Chla a lo largo de toda la misión. Durante el periodo del 24 de julio al 16 de agosto de 2018, se identifican anomalías notorias en salinidad absoluta y anomalía de densidad potencial en los primeros 100 m de profundidad, caracterizadas por una disminución de la salinidad absoluta ($SA(\text{min}) \approx 35 \text{ g/kg}$) y anomalía de densidad potencial ($\sigma_\theta(\text{mín}) \approx 22 \text{ kg/m}^3$). Estas regiones de baja salinidad y densidad coinciden con un aumento en la concentración de Chla, lo que sugiere que se muestreó el filamento observado en la Figura 30. A diferencia de la misión 14, en esta región no se registran cambios significativos en la temperatura sugiriendo que se trata de un filamento cálido y poco salino.

La misión completa constó de un total de 575 *dives*, abarcando un recorrido desde la LC hasta la plataforma continental del oeste del goM. Al revisar día por día la trayectoria del glider en conjunto con las imágenes satelitales de Chla superficial, se identificó un tramo en el que cruzó transversalmente un filamento en la región del Mississippi, correspondiente a los dives 149-230 realizados entre el 30 de julio y el 11 de agosto de 2018. En la Figura 32 se presentan los campos promedio de ADT y concentración superficial de Chla

durante este periodo, junto con la trayectoria del planeador submarino. Se observa que el planeador submarino se desplazó siguiendo una dirección noreste-suroeste, atravesando una región con alta concentración de Chla superficial representativa de un filamento de ~ 100 km de anchura y ~ 400 km de longitud (considerando que se extiende desde la costa). El campo de ADT muestra que el planeador cruzó un ciclón y se adentró en un anticiclón hacia el suroeste. Dada la presencia de estos 2 remolinos de diferente signo, claramente se distingue la formación de una zona de confluencia que favorece la formación y extensión del filamento hacia el sur con características de la plataforma del Mississippi.

El perfil vertical de velocidad geostrofica calculado para la misión 12 (Figura 33), muestra en la región destacada por el recuadro negro (entre el periodo del 24 de julio al 16 de agosto de 2018), velocidades de hasta ± 0.4 m/s en los primeros 100 m de profundidad, donde los colores rojos indican velocidades con dirección offshore y los colores azules velocidades hacia la costa. Vemos que esta señal superficial se encuentra delimitada por núcleos de velocidad positiva a ambos lados, lo que sugiere una zona de confluencia entre remolinos de distinto signo. La disposición de estas velocidades coincide con la ubicación del filamento identificado previamente (ver Figura 32).

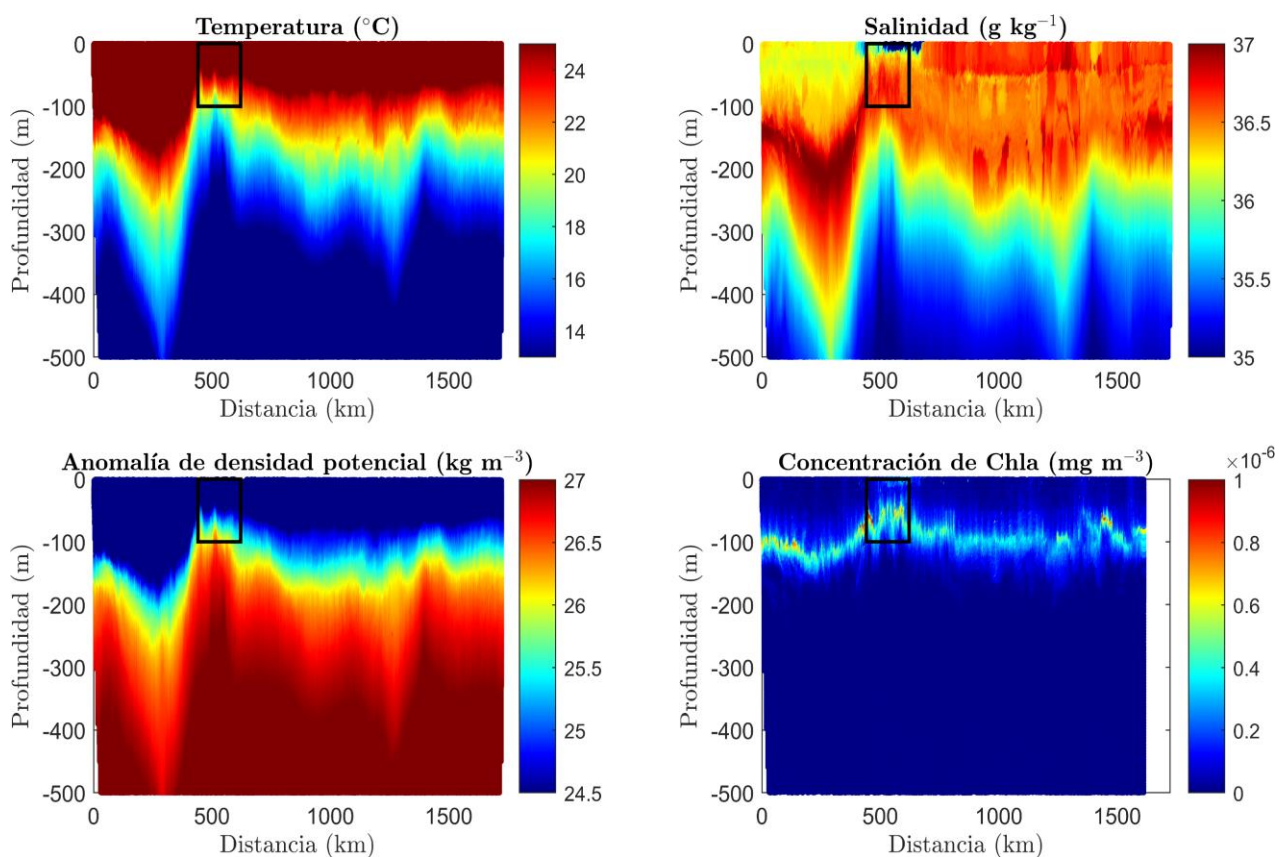


Figura 31. Perfiles verticales de temperatura, salinidad, anomalías de densidad potencial y concentración de Chla obtenidos a partir de datos crudos de la misión 12, el recuadro corresponde a los primeros 100 m de profundidad que comprende las fechas del 24 de julio al 16 de agosto de 2018.

Misión 12 (dives 149-230)
30/Jul/2018 - 11/Aug/2018

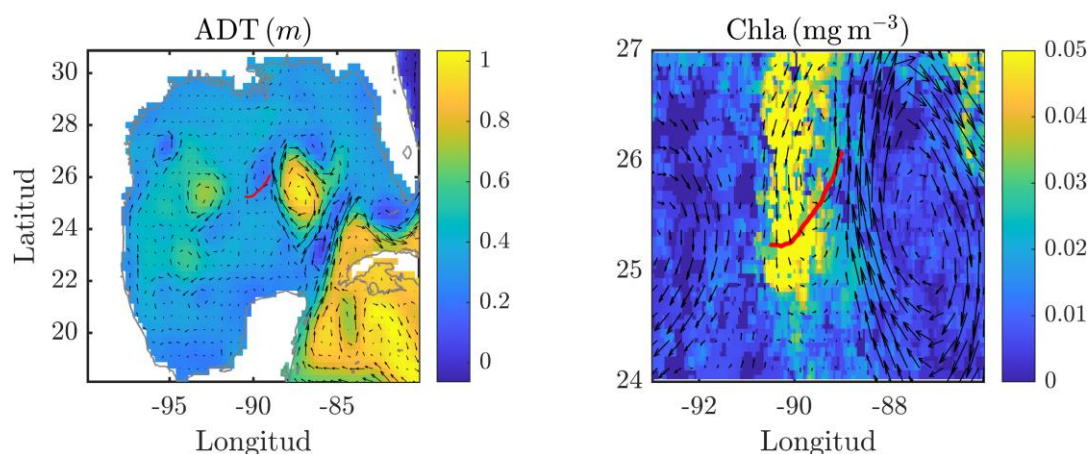


Figura 32. Campos de altura dinámica absoluta y corrientes geostróficas superficiales para el goM (izquierda) y acercamiento de la concentración de Chla y corrientes geostróficas superficiales para la región Mississippi (derecha); ambos mapas promediados durante el periodo del 30 de julio al 11 de agosto del 2018 de la misión 12. En ambos paneles la trayectoria del glider para ese periodo es representada con una línea roja.

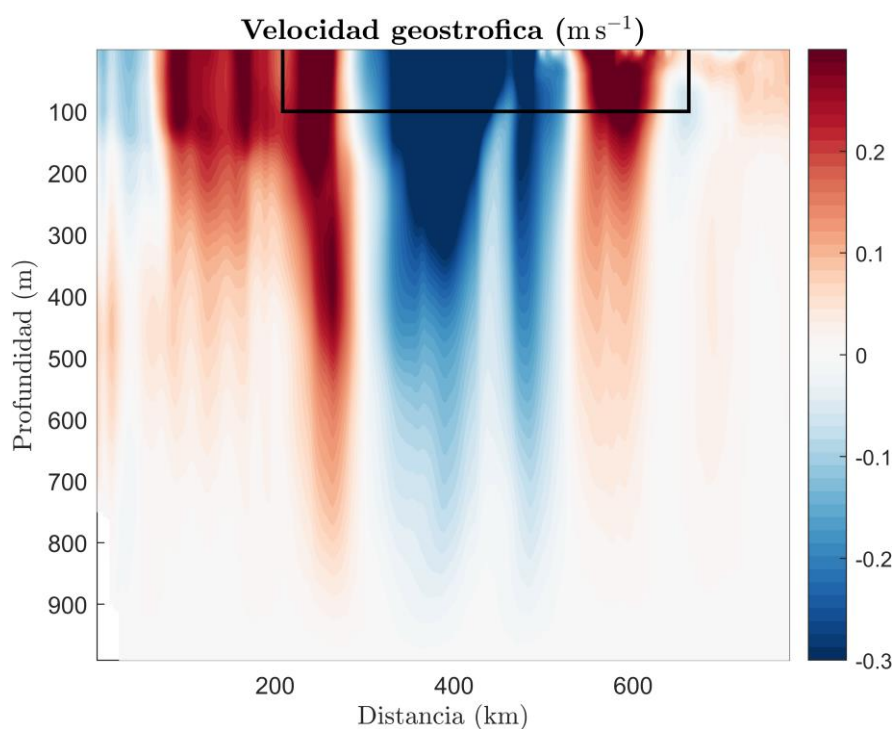


Figura 33. Perfil vertical de velocidad geostrófica (m/s) calculada para la misión 12 de los dives 1 al 200, el recuadro corresponde a los primeros 100 m de profundidad que comprende las fechas 24 de julio al 16 de agosto de 2018.

El diagrama T-S (Figura 34) muestra una clara diferenciación entre las masas de agua superficiales y las profundas muestreadas en el transecto. En la capa superficial (~50 m), la temperatura permanece cercana a 30°, mientras que la salinidad decrece drásticamente, alcanzando valores menores a 35 g/kg, la combinación de ambas variables nos dice que se están cruzando aguas de baja densidad con características

diferentes a la del océano abierto. En contraste, a mayor profundidad las propiedades son más homogéneas y características de las aguas comunes del goM, la presencia de ambos tipos de agua se puede apreciar en el diagrama TS (Figura 28).

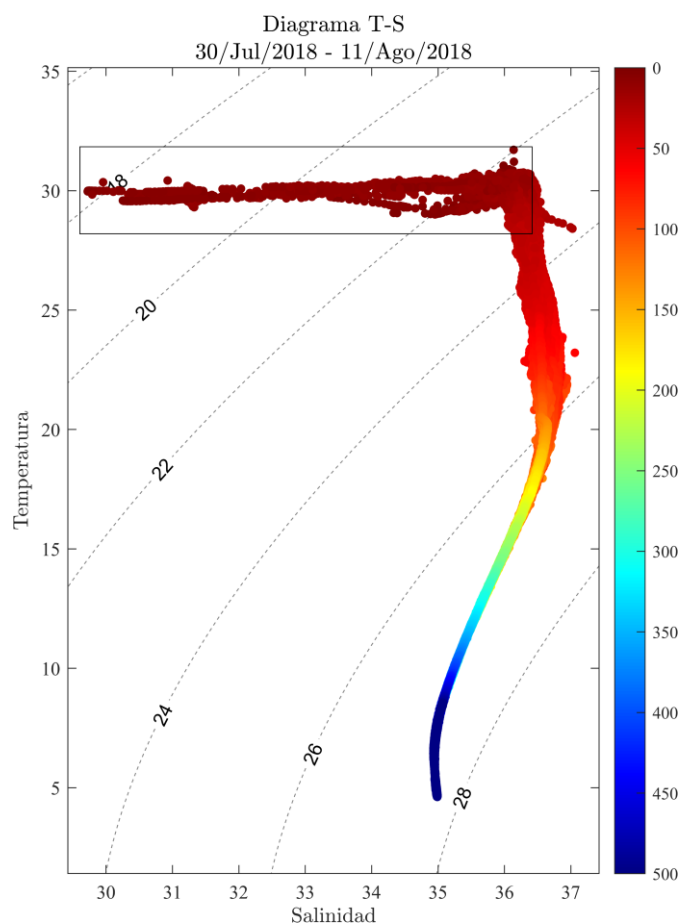


Figura 34. Diagrama T-S de la misión 12 para el periodo del 30 de julio al 11 de agosto del 2018, el recuadro negro corresponde al filamento. Se representan las líneas de anomalía de densidad potencial en gris, mientras que la profundidad está codificada en color.

Los perfiles interpolados de temperatura conservativa, salinidad absoluta, anomalía de densidad potencial y velocidad geostrófica (Figura 35) permiten analizar la estructura vertical del filamento identificado en la región del Mississippi. La sección de temperatura conservativa muestra valores cálidos en la superficie, característicos del verano, sin presentar anomalías destacables. En contraste, la sección de salinidad absoluta revela una intrusión de agua menos salina (<33 g/kg) confinada en la capa superficial (~ 30 m) entre los 100 - 150 km del transecto. Esta estructura está reflejada en la anomalía de densidad potencial, donde se observan valores menores (<21 kg/m³) en la superficie. La distribución vertical de la velocidad geostrófica muestra que predominan valores positivos (flujos hacia el sur) en el mismo rango de distancias

donde ubicamos el filamento, con velocidades de hasta 0.5 m/s.

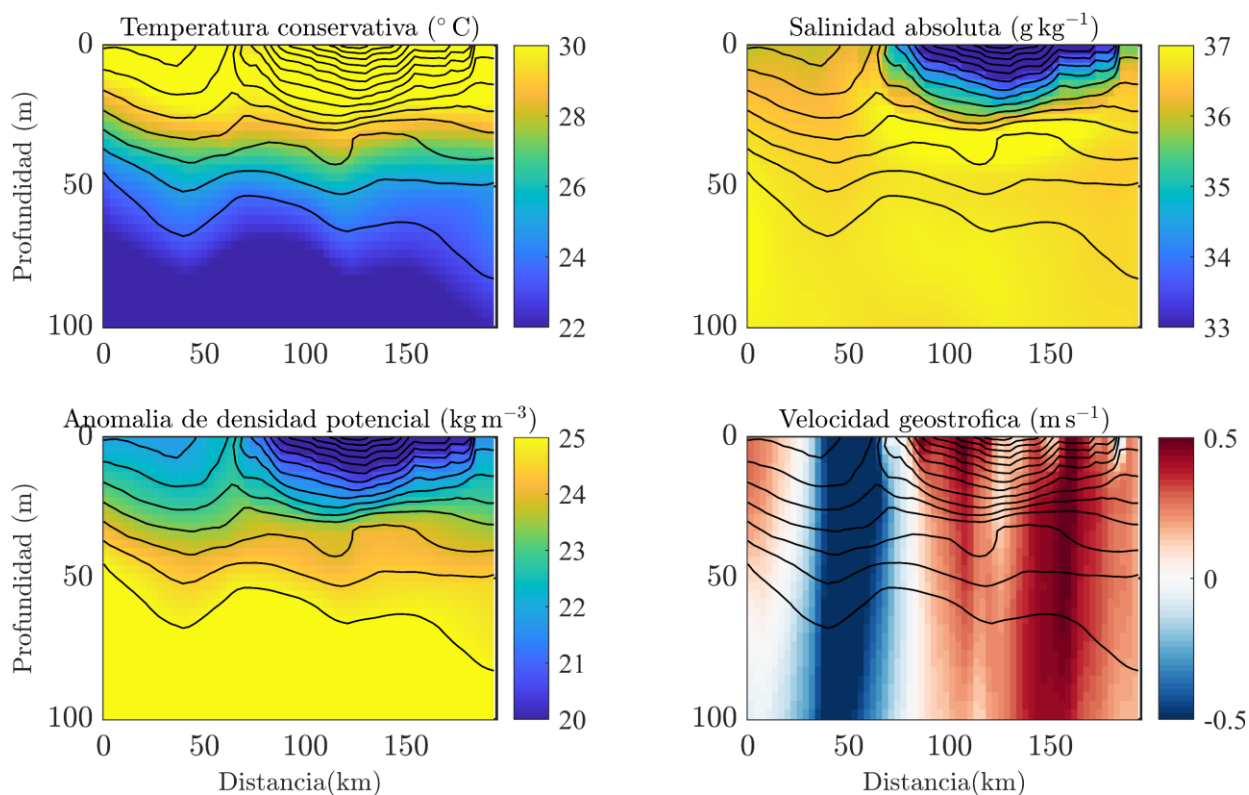


Figura 35. Secciones interpoladas de temperatura, salinidad absoluta, anomalía de densidad potencial y velocidad geostrofica de la misión 12 (dives 149-230), correspondiente al periodo del 30 de julio al 11 de agosto de 2018. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalía de densidad potencial.

La Figura 36 presenta las secciones interpoladas de Chla, backscatter, CDOM y oxígeno disuelto a lo largo del transecto. Se observa que la Chla alcanza valores máximos de $\sim 0.25 \text{ mg/m}^3$ en los primeros 10-15 m de profundidad, coincidiendo con la ubicación del filamento entre los 100 y 150 km del transecto. La distribución del backscatter sigue un patrón similar, aunque los valores elevados ($>1.5 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$) se extienden más en la profundidad ($\sim 35 \text{ m}$), lo que sugiere la presencia de material particulado en suspensión, un gran porcentaje del cual es probablemente de origen biológico. De manera consistente, la distribución vertical de CDOM muestra una concentración elevada en la misma región, lo que indica actividad biogeoquímica asociada a la descomposición de materia orgánica de origen continental en el filamento. El oxígeno disuelto presentó valores de $\sim 4.5 \text{ ml/l}$, coincidiendo con las regiones de alta concentración de Chla y backscatter. Sin embargo, se observa un aumento en las concentraciones de oxígeno disuelto en la base de la capa de mezcla ($\sim 50 \text{ m}$ de profundidad), lo que sugiere una posible desoxigenación en el interior del filamento.

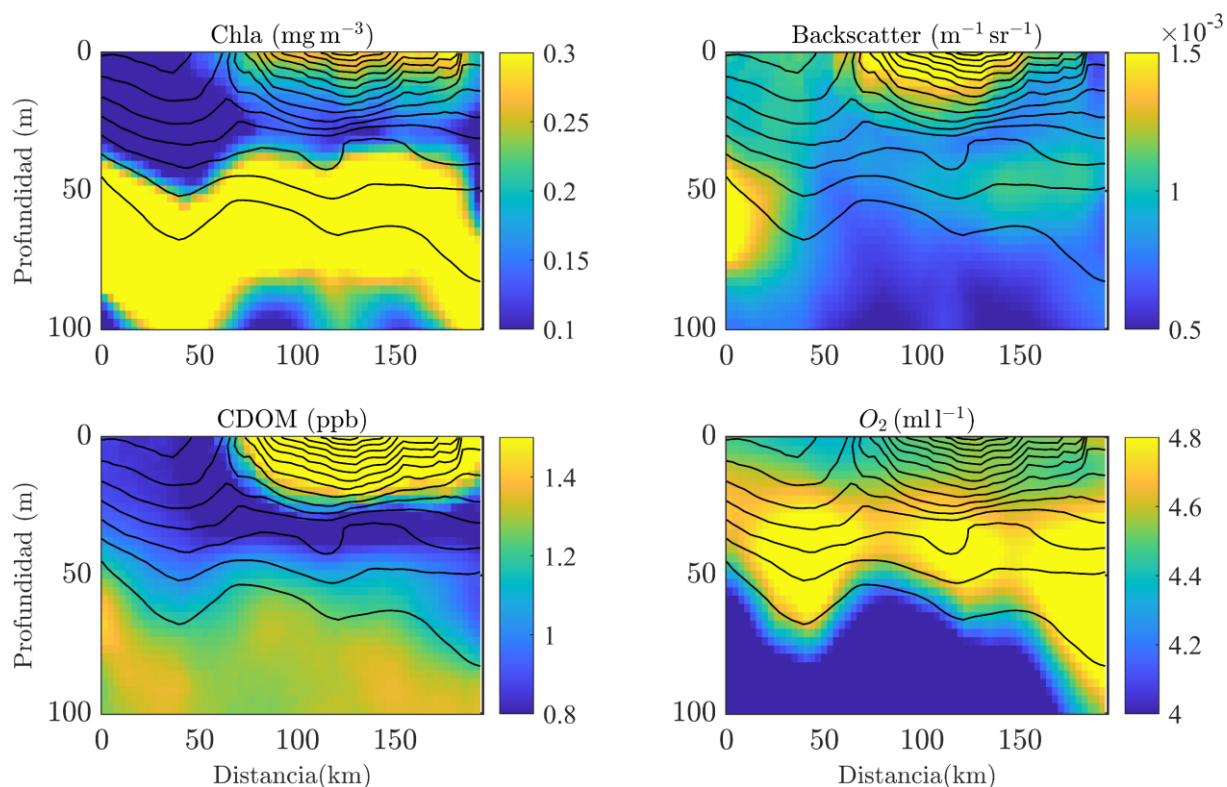


Figura 36. Secciones interpoladas de concentración de Chla, backscatter, CDOM y oxígeno disuelto de la misión 12 (dive 149-230), correspondiente al periodo del 30 de julio al 11 de agosto de 2018. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial.

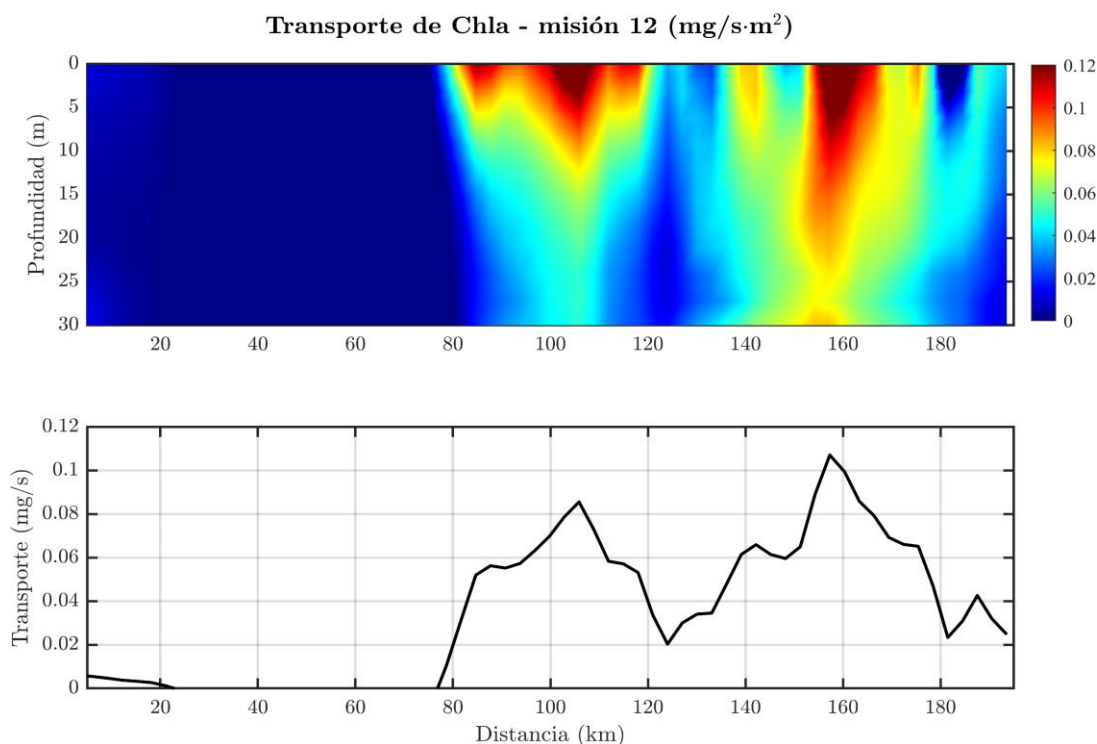


Figura 37. Sección de transporte de Chla en la Misión 12 (dive 149-230) para el periodo del 30 de julio al 11 de agosto de 2018: distribución en el transecto (panel superior) y transporte promedio hasta 25 m de profundidad (panel inferior).

3.2.3 Filamento en región Campeche

La misión 24 se realizó en la región de Campeche, abarcando un total de 450 dives entre el 30 de junio y el 22 de septiembre de 2022. En la Figura 38 se presenta la trayectoria completa de la misión (líneas negra y roja) sobrepuesta a la concentración promedio de Chla superficial durante el periodo de muestreo. Se observa que el glider atravesó una región de alta concentración de Chla alargada hacia mar abierto (línea negra), lo que sugiere la presencia de un filamento

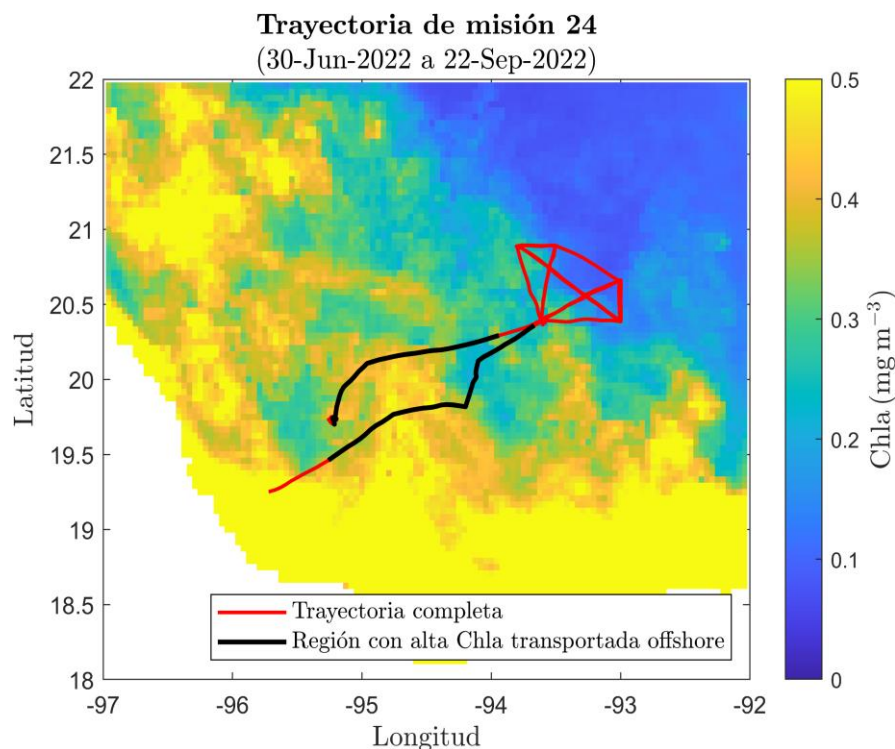


Figura 38. Mapa de trayectoria completa de la misión 24 sobrepuesta a la concentración promedio de Chla superficial durante el periodo de la misión. El punto de inicio corresponde al extremo más cercano a la costa, desplazándose inicialmente hacia el noreste y haciendo una trayectoria en forma de diamante para regresar cerca del punto de inicio. Las líneas negra y roja corresponden a la trayectoria completa del planeador submarino durante la misión; la negra se refiere a transectos durante los cuales se muestrearon elevadas concentraciones de Chla superficial.

En la Figura 39 se presentan los perfiles verticales de temperatura, salinidad absoluta, anomalía de densidad potencial y concentración de Chla a lo largo de toda la misión. Se observan disminuciones en la salinidad absoluta ($\sim 35 \text{ g/kg}$) y en la anomalía de densidad potencial ($\sim 24.5 \text{ kg/m}^3$) en la capa de mezcla entre el periodo del 1 al 18 de julio del 2022, lo que sugiere que el filamento observado satelitalmente (Figura 38) se muestreó con el planeador submarino entre esas fechas.

En la Figura 40 se presentan los campos de ADT y concentración de Chla para la misión 24, correspondiente a los dives 20 a 41, realizados entre el 4 y el 8 de julio de 2022 en la región de Campeche. La trayectoria del glider atraviesa el filamento que se extiende hacia el norte y circula hacia el oeste alrededor de la frontera norte del ciclón de Campeche, dicho filamento presenta una anchura de ~ 30 km de ancho y ~ 300 km de longitud. El mapa de ADT, muestra la presencia de una circulación ciclónica (anticiclónica) al oeste (este) del filamento, lo que sugiere que la interacción de estas estructuras impulsa su extensión hacia el norte.

El perfil vertical de velocidad geostrófica para la misión 24 (Figura 41) muestra un núcleo de velocidades positivas cercanas a 0.4 m/s en los primeros 100 m de profundidad (en el periodo del 1 al 15 de julio del 2022), localizado en la región destacada por el recuadro negro. Esta señal superficial está flanqueada por velocidades negativas, lo que sugiere la presencia de una zona de convergencia generada por la interacción de remolinos de signo opuesto. Esta configuración dinámica coincide espacialmente con la región de alta concentración superficial de Chla observada en los perfiles verticales (Figura 39) y en los mapas satelitales (Figura 40), lo que refuerza la interpretación de un transporte de biomasa hacia mar abierto impulsado por el filamento identificado en la región de Campeche.

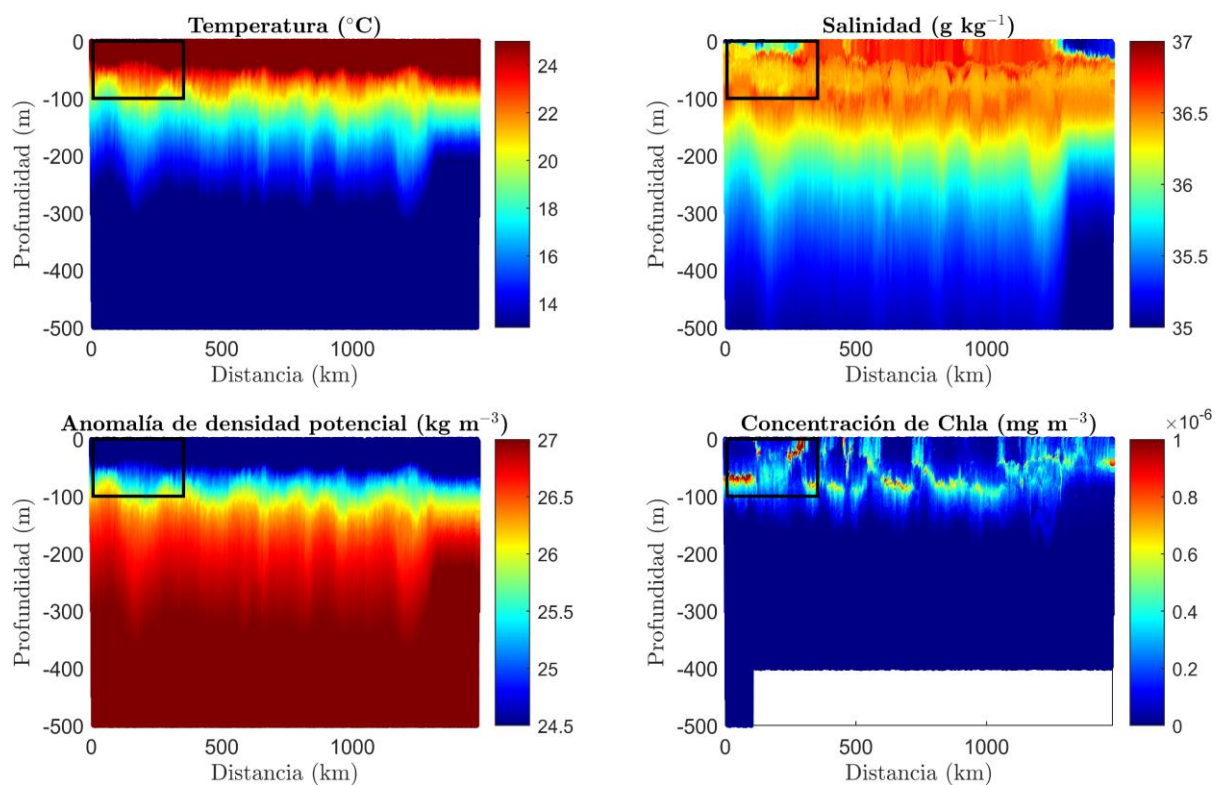


Figura 39. Perfiles verticales de temperatura, salinidad, anomalía de densidad potencial y concentración de Chla obtenidos a partir de datos crudos de la misión 24, el recuadro corresponde a los primeros 100 m de profundidad que comprende las fechas del 1 al 18 de julio del 2022.

Misión 24 (dives 20-40)
04/Jul/2022 - 08/Jul/2022

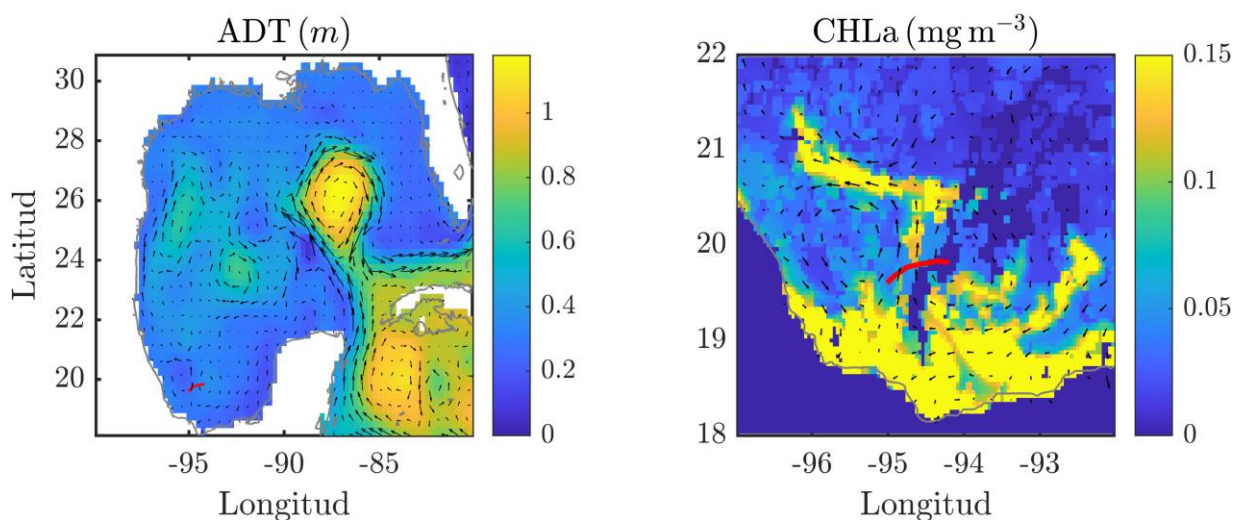


Figura 40. Campos de altura dinámica absoluta y corrientes geostróficas superficiales para el goM (izquierda) y concentración de Chla y corrientes geostróficas superficiales para la región de Campeche (derecha); ambos promediados durante el periodo del 4 al 8 de julio del 2022 durante la misión 24. En ambos paneles la trayectoria del glider para los dives 20 al 40 es representada en rojo.

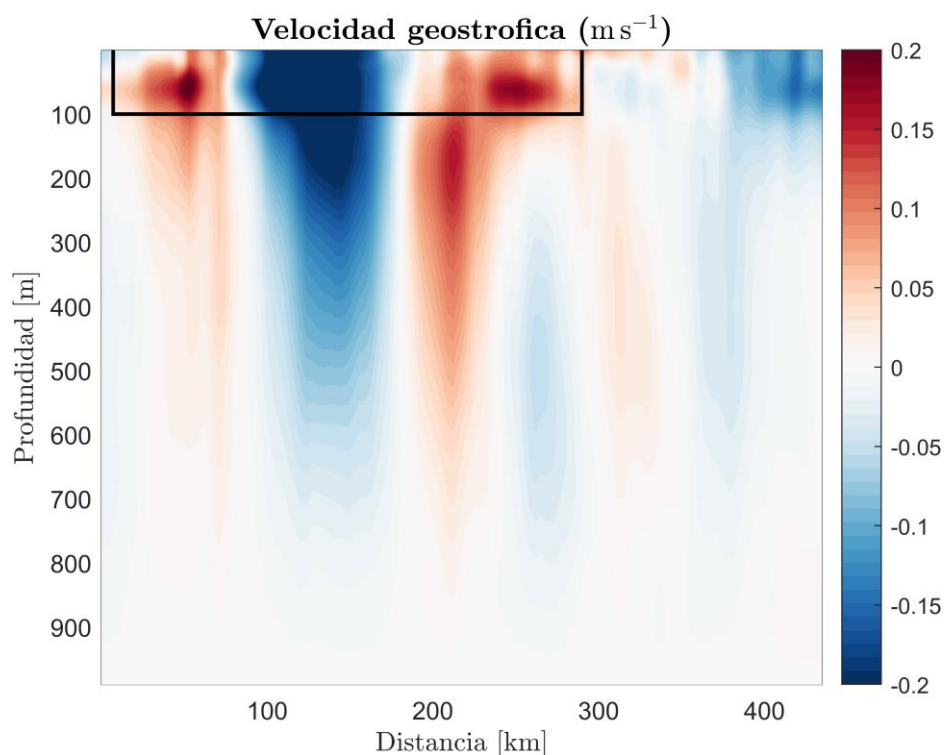


Figura 41. Perfil vertical de velocidad geostrófica (m/s) calculada para la misión 12 de los dives 1 al 200, el recuadro corresponde a los primeros 100 m de profundidad que comprende las fechas 24 de julio al 16 de agosto de 2018.

En la Figura 42 se presenta el diagrama T-S correspondiente al transecto entre el 4 y el 8 de julio de 2022. Se observa una diferenciación entre las masas de agua atravesadas por el planeador submarino. En la capa

superficial (~ 50 m), la temperatura varía entre $27 - 30^\circ\text{C}$, que son valores típicos en la región en el mes de julio. La salinidad más baja es de 35.2 g/kg , que es menor al promedio reportado en la región en la Figura 3.

Las secciones interpoladas de temperatura conservativa, salinidad absoluta, anomalía de densidad potencial y velocidad geostrófica se presentan en la Figura 43. La temperatura superficial varía entre 29 y 30°C , con un gradiente bien definido hasta los 100 m de profundidad, lo que sugiere una fuerte estratificación térmica. En la sección de salinidad absoluta, se identifica una intrusión de agua menos salina ($\sim 35.5\text{ g/kg}$) entre los 40 y 80 km del transecto, confinada en los primeros 20 m de profundidad. La anomalía de densidad potencial también muestra valores bajos (22.5 kg/m^3) en la superficie, reforzando la idea de una intrusión de aguas menos densas procedentes de la plataforma continental de la bahía de Campeche.

Finalmente, la distribución de la velocidad geostrófica revela un flujo predominante hacia el norte con valores positivos de hasta 0.4 m/s en toda la sección del transecto; pero que se alternan con desaceleraciones (regiones blancas). Esta circulación concuerda con la interacción observada en la Figura 40, donde el planeador cruza una gran zona de confluencia entre remolinos que impulsa la extensión del filamento hacia el norte.

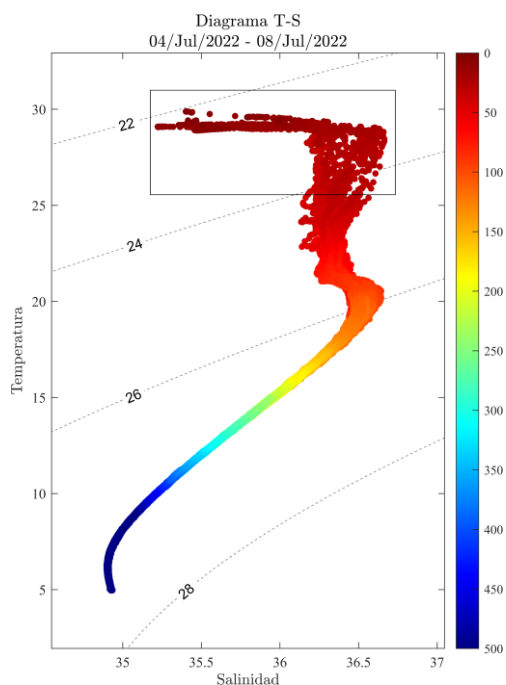


Figura 42. Diagrama T-S de la misión 24 para el periodo del 4 al 8 de julio del 2022, el recuadro negro corresponde al filamento. Se representan las líneas de anomalía de densidad potencial en gris, mientras que la profundidad está codificada en color.

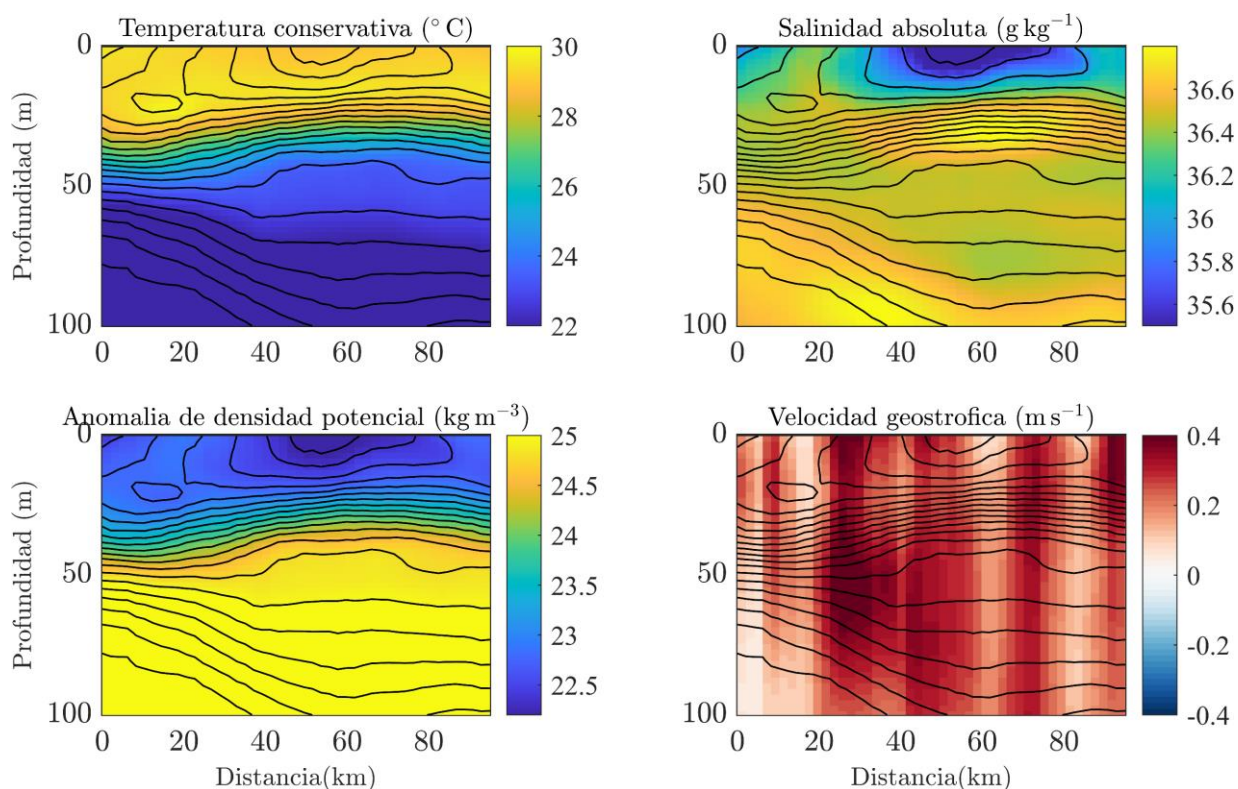


Figura 43. Secciones interpoladas de temperatura conservativa, salinidad absoluta, anomalía de densidad potencial y velocidad geostrofica de la Misión 24 (*díves* 20-40), correspondiente al periodo del 4 al 8 de julio de 2022. Las líneas negras representan los contornos de la anomalía de densidad potencial.

Las secciones interpoladas de Chla, backscatter, CDOM y oxígeno disuelto para el transecto seleccionado en la región de Campeche se presentan en la Figura 44. La concentración de Chla alcanza valores máximos de $\sim 0.4 \text{ mg/m}^3$ en un núcleo ubicado entre los 30 y 60 km del transecto a 20 m de profundidad. La sección de backscatter muestra un patrón similar con concentraciones de hasta $3 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$, lo que sugiere una mayor concentración de partículas en suspensión. En contraste, el perfil de CDOM presenta valores elevados en la superficie, aunque su distribución no coincide completamente con las zonas de mayor Chla y backscatter. Finalmente, el oxígeno disuelto muestra un máximo ($\sim 4.5 \text{ ml/l}$) en la base de la capa de mezcla ($\sim 50 \text{ m}$) y en el área donde localizamos el filamento vemos valores de $\sim 4 \text{ ml/l}$, ligeramente superior al promedio estimado por Quintanilla et al. (2023).

Los resultados del transporte de Chla a través del transecto se presentan en la Figura 45. En el panel superior, se observa que los mayores valores del transporte se encuentran entre los 30 y 60 km del transecto, concentrándose sub-superficialmente entre 10-35 m de profundidad. El panel inferior muestra el transporte promediado desde superficie hasta los 35 m de profundidad. Se estimó un transporte medio de 370.5 mg/s ($\sim 32 \text{ ton/día}$).

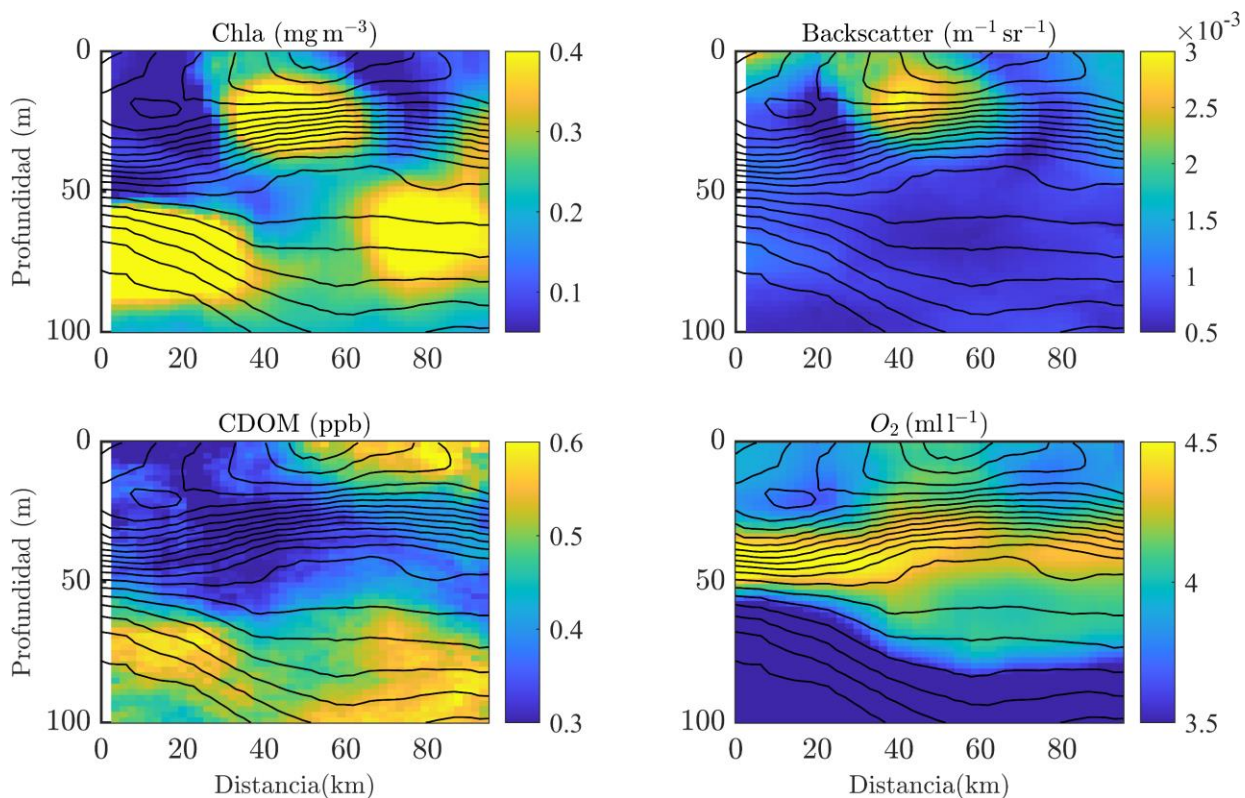


Figura 44. Secciones interpoladas de Chla, backscatter, CDOM y oxígeno disuelto de la misión 24 (dives 20-40), correspondiente al periodo del 4 al 8 de julio de 2022. Las líneas negras representan los contornos de la anomalía de densidad potencial.

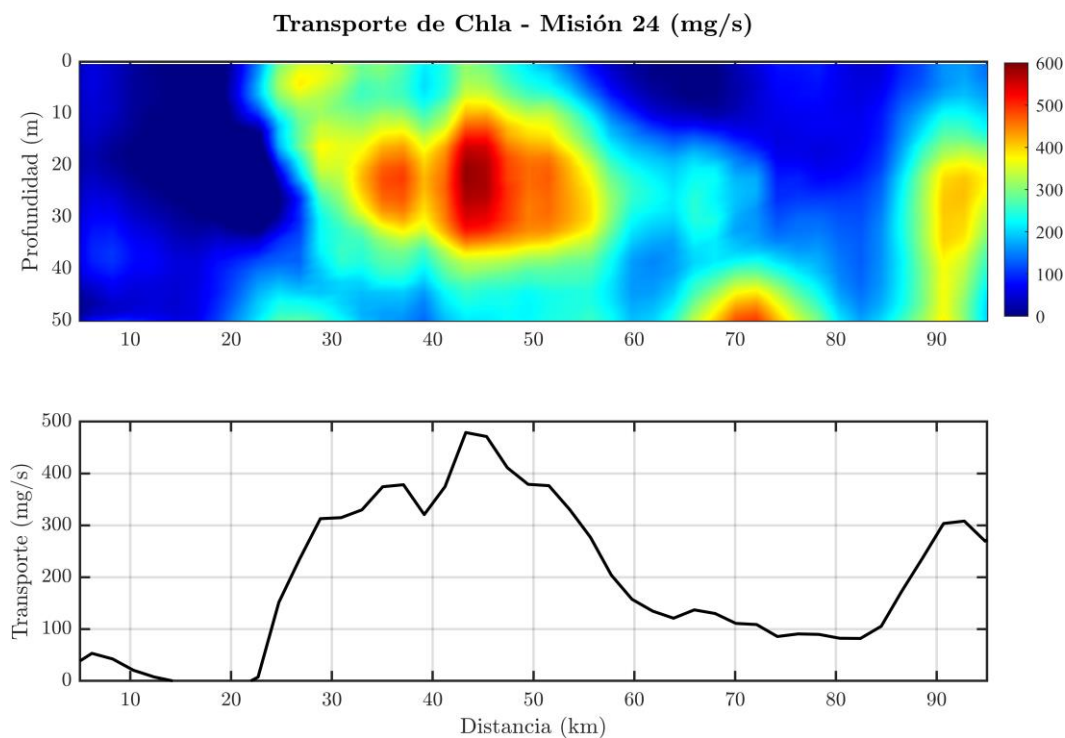


Figura 45. Sección de transporte de concentración de Chla en la misión 24 (dives 20-40) para el periodo del 4 al 8 de julio de 2022: distribución en el transecto (panel superior) y transporte promedio hasta 35 m de profundidad (panel inferior).

3.2.4 Caso especial en región Oeste

Un filamento muy interesante en la región oeste del goM fue muestreado durante la misión 0030 en el eje de un dipolo formado por el remolino ciclónico de la bahía de Campeche y un remolino anticiclónico. En la Figura 46 se presentan los campos promedio diarios de ADT y concentración de Chla superficial para el periodo del 27 al 31 de diciembre de 2022, junto con la trayectoria del planeador submarino durante la misión 30. Esta misión abarcó del 27 de diciembre de 2022 al 14 de enero de 2023; sin embargo, debido a la disponibilidad limitada de imágenes satelitales con datos diarios hasta el año 2022, los mapas corresponden únicamente a los primeros cinco días del muestreo. Esta limitación temporal puede explicar en parte la débil señal del filamento en la imagen satelital de Chla e incluso las corrientes promediadas en este corto periodo de tiempo pueden ser diferentes a lo que fue en los días posteriores.

La trayectoria del planeador, representada por la línea roja, se extiende de oeste a este, cruzando en su tramo inicial la periferia de un remolino anticiclónico, el cual es visible en la figura de concentración de Chla. La dirección de los vectores y la configuración espacial de Chla indican que, durante los primeros 200 km del transecto, el planeador se desplazó dentro de un entorno dinámico influenciado por dicho remolino, donde se identificarán más adelante estructuras subsuperficiales asociadas al filamento observado.

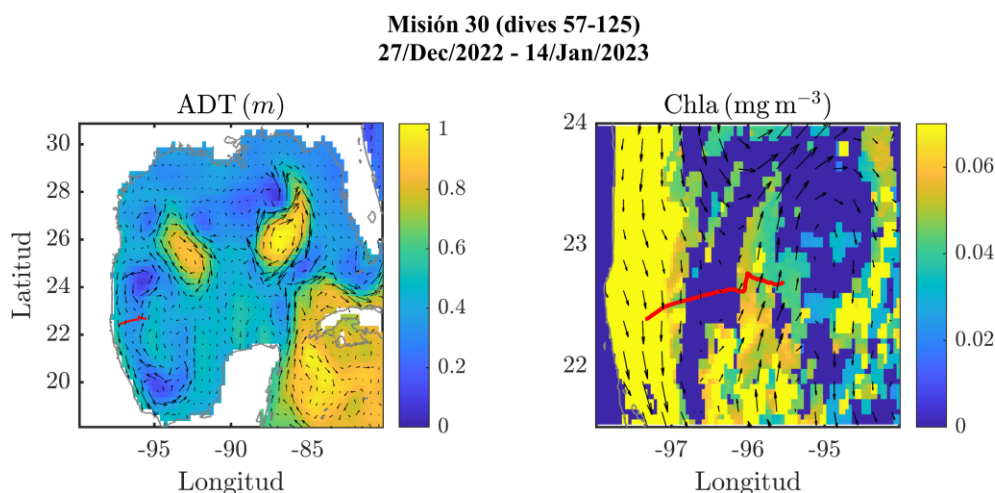


Figura 46. Campos de altura dinámica absoluta y corrientes geostróficas superficiales para el goM (izquierda) y concentración de Chla y corrientes geostróficas superficiales para la región de Campeche (derecha); ambos promediados durante el periodo del 27 al 31 de diciembre del 2022 durante la misión 30. En ambos paneles la trayectoria del glider para los dives 57 al 125 es representada en rojo.

Para apoyar la interpretación dinámica de la estructura observada, en la Figura 47 se presenta el perfil vertical de velocidad geostrófica perpendicular al transecto del planeador, calculado hasta una

profundidad de 1000 m. En esta figura se aprecia un patrón de intercalamiento de velocidades positivas y negativas, particularmente marcado en el intervalo destacado por el recuadro negro, que abarca el periodo del 27 de diciembre de 2022 al 18 de enero de 2023. Este patrón sugiere la presencia de remolinos mesoescalares. En particular, en la región superficial (~ 0 –100 m) del transecto comprendido entre los 200 y 400 km, se observa un núcleo anticiclónico (velocidades positivas flanqueadas por negativas) como se identificó en misiones previas.

Para examinar con mayor detalle la estructura vertical del filamento muestreado durante la misión 30, en la Figura 48 se presentan los campos interpolados de temperatura conservativa, salinidad absoluta, anomalía de densidad potencial, velocidad geostrofica, clorofila-a, backscatter, CDOM y oxígeno disuelto. Estas secciones revelan un núcleo subsuperficial anómalo entre los 50 y 120 km del transecto, con una forma lenticular claramente distinguible en las variables físicas y biogeoquímicas.

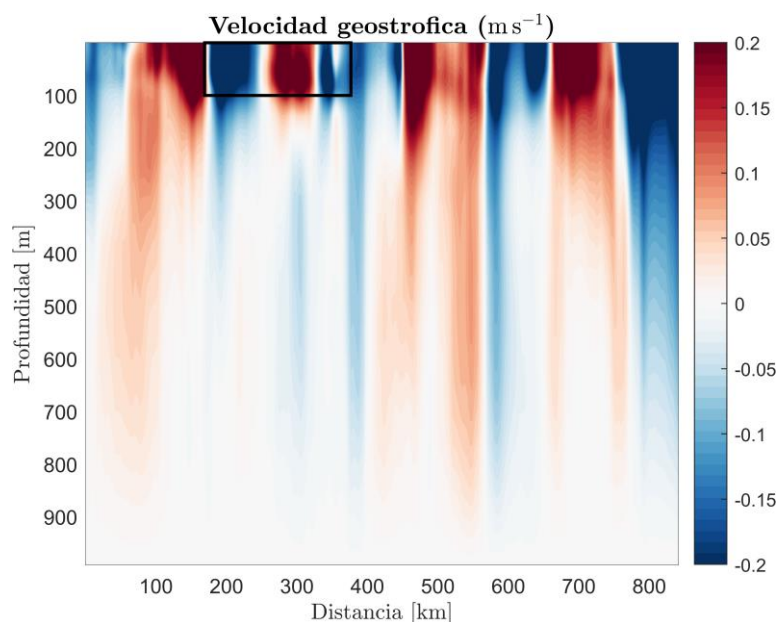


Figura 47. Perfil vertical de velocidad geostrofica (m/s) calculada para la misión 130 de los dives 1 al 280, el recuadro corresponde a los primeros 100 m de profundidad que comprende las fechas 27 de diciembre del 2011 al 18 de enero del 2023.

La característica diferencial de este caso es la presencia de un remolino sub-superficial intratermoclinico, es decir, un remolino confinado dentro de la termoclina. Esta estructura presenta isopincas abombadas tanto hacia arriba como hacia abajo (ver panel de anomalía de densidad), lo cual sugiere que la termoclina se encuentra separada en dos capas, una superior y una inferior, típicamente asociadas a este tipo de remolinos. La circulación geostrofica muestra un núcleo de velocidad positiva flanqueado por núcleos negativos (panel de velocidad), indicando rotación anticiclónica en el sentido de las agujas del reloj.

Encima del núcleo del remolino, es decir, en la parte más superficial ($\sim 0\text{--}40\text{ m}$), se detecta una intrusión de agua más fría y menos salina ($<22.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $<35.5\text{ g kg}^{-1}$, respectivamente), asociada a un filamento de invierno. Este filamento presenta baja densidad, mayores concentraciones de clorofila-a y oxígeno disuelto ($>4.8\text{ ml l}^{-1}$), y menores valores de backscatter en comparación con el interior del remolino, lo que sugiere que el filamento está compuesto por aguas superficiales más recientemente ventiladas. Por el contrario, el remolino intratermoclinico en niveles subsuperficiales ($60\text{--}110\text{ m}$) exhibe mayor concentración de material particulado (backscatter) y bajos valores de oxígeno disuelto, indicativos de aguas más envejecidas y posiblemente subducidas.

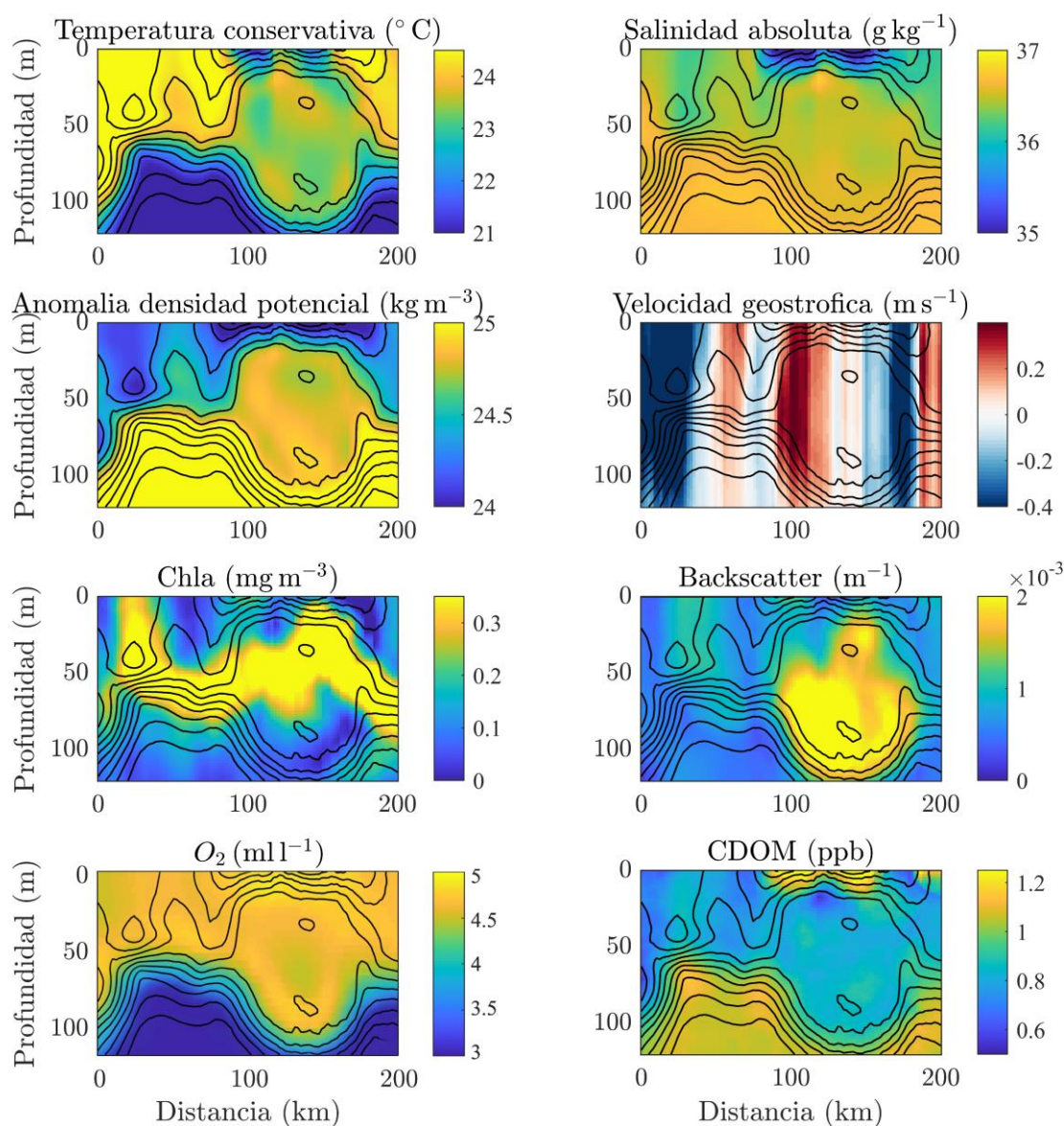


Figura 48. Secciones interpoladas de temperatura conservativa, salinidad absoluta, anomalía de densidad potencial, velocidad geostrofica, Chla, backscatter, CDOM y oxígeno disuelto de la misión 30 (dives 57-125), correspondiente al periodo del 27 de diciembre del 2022 al 18 de enero del 2023. Las líneas negras representan los contornos de la anomalía de densidad potencial.

Capítulo 4. Discusión

En este estudio se utilizaron datos satelitales de SST, ADT y concentración de Chla en superficie, junto con mediciones de planeadores submarinos autónomos, para caracterizar la estructura vertical y la variabilidad de los filamentos oceánicos en el goM. La combinación de estos datos permitió obtener una visión integral de estos procesos, abordando tanto su estructura vertical como el transporte de concentración de Chla hacia aguas abiertas.

La estacionalidad observada en los gradientes de concentración de Chla sugiere que existen condiciones físicas favorables recurrentes que varían espacialmente en el goM. En la región del Mississippi, los gradientes más intensos se registraron en julio, lo cual coincide con el periodo posterior a las máximas descargas del río Mississippi, que típicamente ocurren entre mayo y julio (Salisbury et al., 2001). Esta coincidencia temporal refuerza la hipótesis de que la pluma fluvial, rica en nutrientes, materia orgánica disuelta coloreada (CDOM) y partículas en suspensión, actúa como un factor clave en la intensificación de los gradientes costeros y la formación de filamentos que se proyectan hacia el mar abierto. Además, la intrusión más profunda hacia el norte de la Corriente del Lazo durante el verano puede contribuir al confinamiento y advección de estas masas de agua, potenciando la persistencia de estructuras filamentosas.

En el oeste del golfo, los gradientes máximos se concentraron durante mayo, alineándose con una configuración promedio de circulación caracterizada por un ciclón al norte de $\sim 25.5^{\circ}\text{N}$ y un anticiclón al sur. Este patrón de confluencia entre remolinos opuestos genera una fuerte exportación perpendicular a la costa. Observaciones previas, como las de Biggs (1994), documentan eventos similares donde masas de agua con alta concentración de Chla son transportadas hacia mar abierto por este tipo de interacción.

En la región de Campeche, los valores más elevados de gradientes se observaron entre agosto y septiembre, coherentes con la circulación inducida por el remolino ciclónico en el centro de la bahía y una circulación anticiclónica al este, que generan flujos confluentes responsables de exportar agua desde la plataforma hacia aguas profundas.

Finalmente, en la periferia de la LC, aunque no se detectó una estacionalidad marcada, los gradientes intensos persisten durante todo el año, con mayor intensidad en invierno y primavera. Esto sugiere una dinámica impulsada por la circulación continua de la LC, que al incidir sobre la plataforma noreste de Yucatán genera un flujo divergente que favorece la formación de estructuras elongadas y recurrentes. En

todas las regiones analizadas, los gradientes máximos se asociaron con patrones de circulación mesoescalares que actúan como mecanismos persistentes de formación y mantenimiento de filamentos.

El análisis de las secciones verticales interpoladas permitió caracterizar la estructura de los filamentos observados por gliders en las regiones de Mississippi, Oeste y Campeche, y complementariamente, un caso especial en la misión 30. En términos físicos, la reducción abrupta de la salinidad absoluta, la menor densidad relativa y la anomalía de densidad potencial fueron los principales indicadores de la presencia de filamentos, mientras que la temperatura mostró variaciones dependiendo de la estación del año. Los diagramas T-S confirman estas diferencias. Como se muestra en la Figura 49, el límite superior de cada traza representa la capa superficial del océano (0 m), mientras que la base se extiende hasta los 1000 m de profundidad. En esta figura, es evidente que los filamentos muestreados presentan propiedades termohalinas distintas en la superficie —menos densas, más frescas o más cálidas dependiendo de la misión—, reflejo de su origen costero y de las condiciones locales al momento del muestreo.

En la misión 12 (Mississippi, agosto), el filamento presentó aguas cálidas ($\sim 30^\circ\text{C}$) y menos salinas (30–35 g/kg), ubicándose por debajo del rango promedio de salinidad del interior del golfo mostrado en la Figura 3, pero coherente con la intrusión de la pluma del río Mississippi. Las concentraciones de Chla ($\sim 0.25\text{ mg/m}^3$) se sitúan ligeramente por encima del promedio para el mes de agosto (ver Figura 5). Asimismo, el oxígeno disuelto ($\sim 4.5\text{ ml/l}$) fue más alto que los valores estimados para la LC según Quintanilla et al. (2023). Este comportamiento sugiere una mezcla entre agua dulce cargada de materia orgánica y remolinos que favorecen la advección offshore, en coincidencia con los meses de mayor descarga fluvial (Salisbury et al., 2001).

En contraste, la misión 14 (Oeste, febrero) presentó un filamento frío ($20\text{--}22^\circ\text{C}$) y poco salino (35–35.5 g/kg), lo que implica una intrusión de agua continental bien definida. Este filamento también presentó concentraciones elevadas de Chla ($\sim 0.5\text{ mg/m}^3$) y oxígeno disuelto ($\sim 4.2\text{ ml/l}$), por encima de los valores medios invernales para el interior del golfo ($\sim 0.22\text{ mg/m}^3$ y 2.78 ml/l respectivamente; Muller-Karger et al., 2015; Quintanilla et al., 2023), sugiriendo una intensa producción primaria. El backscatter también fue elevado, lo que indica una alta concentración de partículas, posiblemente fitoplancton o material orgánico particulado resuspendido. Este patrón coincide con lo documentado por Biggs (1994), y refuerza la hipótesis de una interacción persistente entre remolinos como mecanismo de formación.

La misión 24 (Campeche, julio) reveló una estructura somera, cálida ($\sim 29^\circ\text{C}$) y menos salina ($\sim 35.5\text{ g/kg}$), con un núcleo de Chla de $\sim 0.4\text{ mg/m}^3$ a 20 m de profundidad, oxígeno de $\sim 4\text{ ml/l}$ y niveles altos de

backscatter. Estas concentraciones son superiores a los valores promedio del interior del goM (Quintanilla et al., 2023), lo que indica una intrusión reciente de aguas productivas desde la plataforma, intensificada por la acción del remolino ciclónico de la bahía de Campeche (Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009).

La misión 30 representa un caso particular. Se trata de un filamento invernal que se insertó en la capa superior (~0–40 m) de un remolino intratermoclinico (Meunier et al., 2018). El agua del filamento fue más fría (<22.5 °C), menos salina (<35.5 g/kg), altamente oxigenada (>4.8 ml/l) y con valores altos de Chla y backscatter, lo que sugiere una reciente ventilación y origen superficial. En cambio, el núcleo del remolino presentaba características opuestas: agua más envejecida, menos oxigenada y mayor contenido de partículas, lo que indica posible acumulación de material resuspendido.

Todos los filamentos estuvieron contenidos dentro de la capa de mezcla y presentaron estructuras someras (20–35 m), lo que limita la mezcla vertical y favorece la acumulación de biomasa fitoplanctónica y partículas en suspensión en la capa superficial (Pasqueron de Fommervault et al., 2017). Las diferencias en oxígeno entre filamentos sugieren la coexistencia de procesos de fotosíntesis (valores altos) y respiración (valores bajos), como también ha sido documentado por Salas et al. (2004) y Bakun (2006). La elevada señal de backscatter en todos los casos indica una carga significativa de partículas, cuya naturaleza (biogénica o terrígena) debe ser explorada en trabajos futuros. El CDOM, aunque no fue caracterizado en detalle, está frecuentemente asociado a aguas continentales y fluviales, y su presencia también es consistente con el origen costero de los filamentos.

La eficiencia en el transporte de biomasa también varió entre regiones. Se estimaron transportes de ~21–32 ton/día en los filamentos del Mississippi y Campeche, mientras que en el Oeste (Misión 14) fue de ~83.3 ton/día, comparable a lo reportado por Azis et al. (2024) en el Mar de Java. Esta similitud sugiere que, aunque los mecanismos locales puedan variar (remolinos, descargas, afloramientos), los filamentos inducidos por forzamientos mesoescalares son estructuras eficientes para redistribuir biomasa.

Finalmente, la comparación entre misiones en el diagrama T-S combinado permite visualizar que, aunque los filamentos comparten ciertas características generales (intrusión superficial, baja salinidad, alta Chla), existen diferencias claras determinadas por su localización, estación y mecanismos de formación. Destaca, por ejemplo, que los filamentos de las misiones 14 y 30, a pesar de ubicarse en la misma región (Oeste), presentan firmas térmicas distintas debido al periodo en que fueron muestreados y a que uno de ellos (Misión 30) se generó más al sur y durante invierno. En conjunto, las propiedades termohalinas menos densas en la superficie parecen ser una firma común de los filamentos en el goM.

En términos de futuras líneas de investigación, resulta fundamental evaluar los procesos de mezcla vertical dentro de los filamentos, incluyendo la disipación y transformación de las masas de agua, así como su papel en la exportación de carbono orgánico particulado de origen costero y su eventual secuestro en aguas profundas. La combinación de mediciones in situ y modelado numérico permitirá cuantificar con mayor precisión la contribución de los filamentos al ciclo del carbono en el goM. Estudios recientes han sugerido que los filamentos pueden desempeñar un papel clave en este proceso, facilitando la exportación de carbono al océano profundo mediante mecanismos como el bombeo biológico y el hundimiento de materia orgánica (Contreras-Pacheco et al., 2023). Además, sería relevante explorar cómo varía la eficiencia del transporte de masa en función de la intensidad de los remolinos y las condiciones hidrográficas locales. En definitiva, este estudio contribuye a un mejor entendimiento de la variabilidad y estructura vertical de los filamentos oceánicos en el goM, y resalta su importancia en el transporte de material costero hacia aguas más profundas.

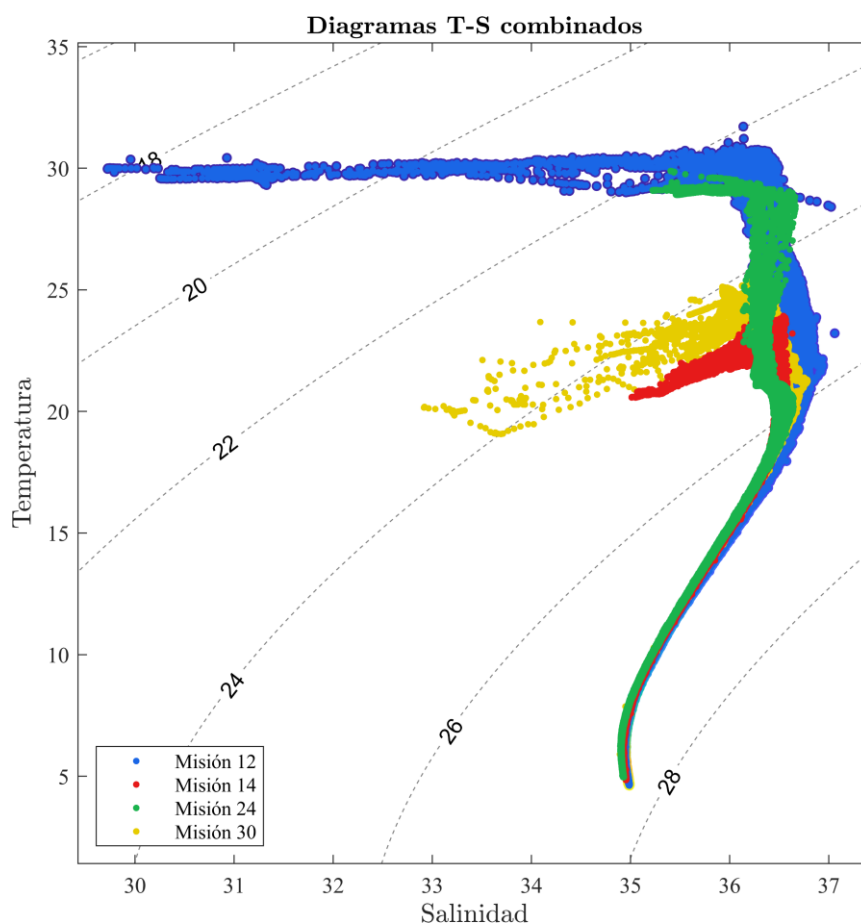


Figura 49. Diagrama T-S combinado de las misiones 12 (azul), 14 (rojo), 24 (verde) y 30 (amarillo). Cada punto representa observaciones individuales de temperatura y salinidad desde la superficie del océano (parte superior de los gráficos) hasta los 1000 m de profundidad (parte inferior). Se incluyen las líneas de anomalía de densidad potencial (σ_θ) en gris. Los filamentos son visibles como agrupaciones superficiales de menor salinidad y temperatura variable, según la estación.

Capítulo 5. Conclusiones

Este estudio destaca la importancia de los filamentos oceánicos en el transporte lateral de masa en el golfo de México (goM), y su papel dentro de la dinámica superficial impulsada por remolinos de mesoescala. Al combinar datos satelitales con mediciones de planeadores submarinos autónomos, se caracterizó la estructura vertical de los filamentos y se identificó que su formación está estrechamente relacionada con la interacción entre remolinos ciclónicos y anticiclónicos, particularmente en zonas de confluencia dinámica y regiones afectadas por descargas fluviales.

Se observó una fuerte estacionalidad en la persistencia de los filamentos en las distintas regiones del goM. En el norte, los filamentos están relacionados con la descarga del río Mississippi y la intrusión de la Corriente del Lazo (LC); en el oeste, se originan en zonas de confluencia entre remolinos; y en Campeche, en la interacción entre el ciclón regional y una circulación anticiclónica al este de la bahía. Como excepción, la plataforma noreste de Yucatán mostró altos gradientes de concentración de Chla todo el año. En todos los casos, los datos de los planeadores confirmaron que los filamentos son estructuras someras (menores a 35 m), que actúan como vías de exportación de biomasa hacia aguas profundas.

Los filamentos presentaron propiedades termohalinas bien diferenciadas en superficie respecto al entorno oceánico, con menor salinidad, mayor temperatura o densidad reducida (dependiendo de la estación), lo que permitió identificar su firma como masas de agua menos densas en los diagramas T-S. Esta baja densidad parece ser una característica común y diagnóstica de los filamentos en la vertical.

En términos biogeoquímicos, todos los filamentos mostraron altas concentraciones de clorofila-a (Chla), acompañadas por niveles elevados de retrodispersión óptica (backscatter), lo que indica la presencia de partículas en suspensión —probablemente de origen biológico—. Este patrón sugiere una acumulación de biomasa fitoplanctónica en la capa superficial, favorecida por la estratificación (Pasqueron de Fommervault et al., 2017). En cuanto al CDOM, su distribución se mantuvo elevada en la superficie, particularmente en los filamentos del Mississippi y Campeche, lo que podría indicar actividad biológica reciente o descomposición de materia orgánica de origen continental, como también ha sido sugerido por Rossi et al. (2013).

El oxígeno disuelto presentó variabilidad asociada al origen y la historia de la masa de agua: valores elevados en superficie reflejan ventilación reciente o fotosíntesis activa, mientras que valores bajos se asociaron al interior de remolinos subsuperficiales o zonas más envejecidas. La misión 30 ejemplificó este

contraste, al mostrar un filamento superficial bien oxigenado (~ 4.8 ml/l) sobre un remolino intratermoclinico con aguas menos oxigenadas y más cargadas de partículas.

En cuanto al transporte, se estimaron valores de $\sim 21\text{--}32$ ton/día en las misiones de Mississippi y Campeche, y hasta ~ 83.3 ton/día en el Oeste. Estos valores son comparables a los reportados por Azis et al. (2024) para un filamento en el Mar de Java, lo que sugiere que, independientemente de la región oceánica, los filamentos generados por forzamientos mesoescalares son estructuras eficientes para la redistribución de biomasa.

Este estudio también proporciona evidencia de que los filamentos observados en el goM comparten similitudes estructurales con los descritos en otras regiones del mundo. Por ejemplo, en sistemas de surgencia como el frente costero de África o el Pacífico Oriental, se han documentado filamentos de naturaleza submesoescala que transportan nutrientes y biomasa a lo largo de decenas de kilómetros (Meunier et al., 2012; Gula et al., 2014), similares en escala y dinámica a los del goM.

En definitiva, los resultados resaltan la necesidad de investigar más profundamente la estructura vertical de los filamentos y su interacción con la dinámica superficial del golfo. La metodología empleada —que incluye el cálculo de la velocidad geostrófica transversal a partir de datos interpolados y la estimación de transporte de Chla— permitió describir de manera robusta la función de estos filamentos como vectores de conectividad entre la plataforma continental y el océano abierto. Comprender mejor estos mecanismos contribuirá a mejorar la predicción del transporte de trazadores y su impacto en la productividad biológica de las aguas profundas del goM, especialmente en el contexto de cambio climático.

Literatura citada

- Androulidakis, Y. S., Kourafalou, V. H., & Schiller, R. V. (2015). Process studies on the evolution of the Mississippi River plume: Impact of topography, wind and discharge conditions. *Continental Shelf Research*, 107, 33–49. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.07.014>
- Androulidakis, Y., Kourafalou, V., Le Hénaff, M., Kang, H. S., Sutton, T., Chen, S., & Ntaganou, N. (2019). Offshore spreading of Mississippi waters: Pathways and vertical structure under eddy influence. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(8), 5952–5978. <https://doi.org/10.1029/2018JC014661>
- Azis Ismail, M. F., Budiman, A. S., Basit, A., Yulihastin, E., Sofiati, I., & Mujiasih, S. (2024). Cross-shelf transport of high chlorophyll-a coastal waters by frontal eddies in the south of Java Sea. *Kuwait Journal of Science*, 51, 100253. <https://doi.org/10.1016/j.kjs.2024.100253>
- 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. <https://doi.org/10.3989/scimar.2006.70s2105>
- Barkan, R., McWilliams, J. C., Molemaker, M. J., Choi, J., Srinivasan, K., & Shchepetkin, A. F. (2017). Submesoscale dynamics in the Northern Gulf of Mexico. Part II: Temperature–salinity relations and cross-shelf transport processes. *Journal of Physical Oceanography*, 47(9), 2347–2360. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-17-0040.1>
- Barnes, S. L. (1964). A technique for maximizing details in numerical weather map analysis. *Journal of Applied Meteorology*, 3(4), 396–409. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1964\)003<0396:ATFMDI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1964)003<0396:ATFMDI>2.0.CO;2)
- Bianchi, T. S., Lambert, C. D., Santschi, P. H., & Guo, L. (1997). Sources and transport of land-derived particulate and dissolved organic matter in the Gulf of Mexico (Texas shelf/slope): The use of lignin-phenols and loliolides as biomarkers. *Organic Geochemistry*, 27(1–2), 65–78. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(97\)00040-5](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(97)00040-5)
- Biggs, D. C., & Müller-Karger, F. E. (1994). Ship and satellite observations of chlorophyll stocks in interacting cyclone-anticyclone eddy pairs in the western Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research*, 99(C4), 7371–7384. <https://doi.org/10.1029/93JC02153>
- Cao, Z., Dai, M., Zheng, N., Wang, D., Li, Q., Zhai, W., Meng, F., & Gan, J. (2011). Dynamics of the carbonate system in a large continental shelf system under the influence of both a river plume and coastal upwelling. *Journal of Geophysical Research*, 116, G02010. <https://doi.org/10.1029/2010JG001596>
- Condal, A. R., Vega-Moro, A., & Ardisson, P.-L. (2013). Climatological, annual, and seasonal variability in chlorophyll concentration in the Gulf of Mexico, western Caribbean, and Bahamas using NASA colour maps. *International Journal of Remote Sensing*, 34(5), 1591–1614. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.725935>
- Combes, V., Matano, R. P., & Palma, E. D. (2023). Circulation and cross-shelf exchanges in the northern shelf of the southwestern Atlantic: Dynamics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 128, e2023JC019887. <https://doi.org/10.1029/2023JC019887>

- Contreras-Pacheco, Y. V., Herzka, S. Z., Vallejo-Espinosa, G., & Herguera, J. C. (2023). Particulate organic carbon in the deep-water region of the Gulf of Mexico. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1095212. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1095212>
- Damien, P., Pasqueron de Fommervault, O., Sheinbaum, J., Jouanno, J., Camacho-Ibar, V. F., & Duteil, O. (2018). Partitioning of the open waters of the Gulf of Mexico based on the seasonal and interannual variability of chlorophyll concentration. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123, 2592–2614. <https://doi.org/10.1002/2017JC013456>
- Dubranna, J., Pérez-Brunius, P., López, M., & Candela, J. (2011). Circulation over the continental shelf of the western and southwestern Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116, C08009. <https://doi.org/10.1029/2011JC007007>
- Pasqueron de Fommervault, O., Perez-Brunius, P., Damien, P., Camacho-Ibar, V. F., & Sheinbaum, J. (2017). Temporal variability of chlorophyll distribution in the Gulf of Mexico: Bio-optical data from profiling floats. *Biogeosciences*, 14(22), 5647–5662. <https://doi.org/10.5194/bg1456472017>
- García-Muñoz, M., Arístegui, J., Montero, M. F., & Barton, E. D. (2004). Distribution and transport of organic matter along a filament-eddy system in the Canaries – NW Africa coastal transition zone region. *Progress in Oceanography*, 62(2), 115–129. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2004.07.005>
- Gomes, H. R., Goes, J. I., & Saino, T. (2000). Influence of physical processes and freshwater discharge on the seasonality of phytoplankton regime in the Bay of Bengal. *Continental Shelf Research*, 20(3), 313–330. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(99\)00072-2](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(99)00072-2)
- Grupo de Monitoreo Oceanográfico con Gliders (GMOG). (2024). *Datos de misiones de gliders en el Golfo de México*. CICESE. <https://gliders.cicese.mx/gmog>
- Gula, J., Molemaker, M. J., & McWilliams, J. C. (2014). Submesoscale cold filaments in the Gulf Stream. *Journal of Physical Oceanography*, 44(10), 2617–2643. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-14-0029.1>
- Haidvogel, D. B., Beckmann, A., & Hedstrom, K. S. (1991). Dynamical simulations of filament formation and evolution in the Coastal Transition Zone. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 96(C8), 15017–15040. <https://doi.org/10.1029/91JC00943>
- Huguenard, K. D., Bogucki, D. J., Ortiz-Suslow, D. G., Laxague, N. J. M., MacMahan, J. H., Özgökmen, T. M., Haus, B. K., Reniers, A. J. H. M., Hargrove, J., Soloviev, A. V., & Graber, H. (2016). On the nature of the frontal zone of the Choctawhatchee Bay plume in the Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(2), 1322–1345. <https://doi.org/10.1002/2015JC010988>
- Jones, E. B., & Wiggert, J. D. (2015). Characterization of a high chlorophyll plume in the northeastern Gulf of Mexico. *Remote Sensing of Environment*, 159, 152–166. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.11.019>
- Justić, D., Kourafalou, V. H., Mariotti, G., He, S., Weisberg, R., Androulidakis, Y., ... Wiggert, J. (2021). Transport processes in the Gulf of Mexico along the river-estuary-shelf-ocean continuum: A review of research from the Gulf of Mexico Research Initiative. *Estuaries and Coasts*, 44(5), 1–22. <https://doi.org/10.1007/s12237-021-01005-1>

- Kemp, G. P., Day Jr, J. W., Yáñez-Arancibia, A., & Peyronnin, N. S. (2016). Can continental shelf river plumes in the northern and southern Gulf of Mexico promote ecological resilience in a time of climate change? *Water*, 8(3), 83. <https://doi.org/10.3390/w8030083>
- Liu, G., Bracco, A., & Passow, U. (2018). The influence of mesoscale and submesoscale circulation on sinking particles in the northern Gulf of Mexico. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 6(1), 36. <https://doi.org/10.1525/elementa.292>
- Lohrenz, S. E., Fahnenstiel, G. L., Redalje, D. G., Lang, G. A., Chen, X., & Dagg, M. J. (1997). Variations in primary production of northern Gulf of Mexico continental shelf waters linked to nutrient inputs from the Mississippi River. *Marine Ecology Progress Series*, 155, 45–54. <https://doi.org/10.3354/meps155045>
- Martínez-López, B., & Zavala-Hidalgo, J. (2009). Seasonal and interannual variability of cross-shelf transports of chlorophyll in the Gulf of Mexico. *Journal of Marine Systems*, 77, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.10.002>
- Mendoza, C., Mancho, A. M., & Rio, M. H. (2010). The turnstile mechanism across the Kuroshio current: Analysis of dynamics in altimeter velocity fields. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 17(1), 103–111. <https://doi.org/10.5194/npg171032010>
- Meunier, T., Barton, E. D., Barreiro, B., & Torres, R. (2012). Upwelling filaments off Cap Blanc: Interaction of the NW African upwelling current and the Cape Verde frontal zone eddy field? *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C8), C08031. <https://doi.org/10.1029/2012JC007905>
- Meunier, T., Tenreiro, M., Pallàs-Sanz, E., Ochoa, J., Ruiz-Angulo, A., Portela, E., Cusí, S., Damien, P., & Carton, X. (2018). Intrathermocline eddies embedded within an anticyclonic vortex ring. *Geophysical Research Letters*, 45(15), 7624–7633. <https://doi.org/10.1029/2018GL077527>
- Meunier, T., Pallàs-Sanz, E., Tenreiro, M., Portela, E., Ochoa, J., Ruiz-Angulo, A., & Cusí, S. (2018). The vertical structure of a Loop Current Eddy. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(9), 6070–6090. <https://doi.org/10.1029/2018JC013801>
- Meybeck, M. (1982). Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world rivers. *American Journal of Science*, 282(4), 401–450. <https://doi.org/10.2475/ajs.282.4.401>
- Morey, S. L., Martin, P. J., O'Brien, J. J., Wallcraft, A. A., & Zavala-Hidalgo, J. (2003). Export pathways for river discharged fresh water in the northern Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C10), 3303. <https://doi.org/10.1029/2002JC001674>
- Müller-Karger, F. E., Walsh, J. J., Evans, R. H., & Meyers, M. B. (1991). On the seasonal phytoplankton concentration and sea surface temperature cycles of the Gulf of Mexico as determined by satellites. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 96(C7), 12645–12665. <https://doi.org/10.1029/91JC00787>
- Müller-Karger, F. E., Smith, J. P., Werner, S., Chen, R., Roffer, M., Liu, Y., Muhling, B., Lindo-Atichati, D., Lamkin, J., Cerdeira-Estrada, S., & Enfield, D. B. (2015). Natural variability of surface oceanographic conditions in the offshore Gulf of Mexico. *Progress in Oceanography*, 134, 54–76. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.12.007>

- National Centers for Environmental Information (NCEI). (s.f.). *Gulf of Mexico Climate Data*. NOAA. Accedido el 31 de mayo del 2025, de <https://www.ncei.noaa.gov/access/gulf-of-mexico-climate/gulf-data.html>
- Pasqueron de Fommervault, O., Perez-Brunius, P., Damien, P., Camacho-Ibar, V. F., & Sheinbaum, J. (2017). Temporal variability of chlorophyll distribution in the Gulf of Mexico: Bio-optical data from profiling floats. *Biogeosciences*, 14(24), 5647–5662. <https://doi.org/10.5194/bg-14-5647-2017>
- Quintanilla, J. G., Herguera, J. C., & Sheinbaum, J. (2024). Oxygenation of the Gulf of Mexico thermocline linked to the detachment of Loop Current eddies. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1479837. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1479837>
- Romero, S. I. (2008). *Estimaciones satelitales de clorofila y los frentes oceánicos del Atlántico Sudoccidental* [Tesis de Doctorado en Ciencias, Universidad de Buenos Aires]. https://hdl.handle.net/20.500.12110/tesis_n4237_Romero
- Rossi, V., Garçon, V., Tassel, J., Romagnan, J.-B., Stemmann, L., Jourdin, F., Morin, P., & Morel, Y. (2013). Cross-shelf variability in the Iberian Peninsula Upwelling System: Impact of a mesoscale filament. *Continental Shelf Research*, 59, 97–114. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2013.04.008>
- Salas de León, D. A., Monreal-Gómez, M. A., Signoret, M., & Aldeco, J. (2004). Anticyclonic-cyclonic eddies and their impact on near-surface chlorophyll stocks and oxygen supersaturation over the Campeche Canyon, Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109, C05028. <https://doi.org/10.1029/2002JC001614>
- Salisbury, J., Vandemark, D., Campbell, J., Hunt, C., Wisser, D., & McClain, C. (2001). Ocean color and river data reveal fluvial influences in coastal waters. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 82(20), 221–227. <https://doi.org/10.1029/01EO00117>
- Sosa-Gutiérrez, R., Pallàs-Sanz, E., Jouanno, J., Chaigneau, A., Candela, J., & Tenreiro, M. (2020). Erosion of the subsurface salinity maximum of the Loop Current Eddies from glider observations and a numerical model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(7), e2019JC015397. <https://doi.org/10.1029/2019JC015397>
- Strub, P. T., Kosro, P. M., & Huyer, A. (1991). The nature of the cold filaments in the California Current System. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 96(C8), 14,743–14,768. <https://doi.org/10.1029/91JC01024>
- Toner, M., Kirwan, A. D., Poje, A. C., Kantha, L. H., Muller-Karger, F. E., & Jones, C. K. R. T. (2003). Chlorophyll dispersal by eddy-eddy interactions in the Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C4), 3105. <https://doi.org/10.1029/2002JC001499>
- UNESCO. (2024, 3 de octubre). *Decade Challenges*. UNESCO Intergovernmental Oceanographic. <https://oceandecade.org/es/challenges/>
- Vukovich, F. M. (2007). Climatology of ocean features in the Gulf of Mexico using satellite remote sensing data. *Journal of Physical Oceanography*, 37(3), 689–707. <https://doi.org/10.1175/JPO2989.1>
- Zavala-Hidalgo, J., Morey, S. L., & O'Brien, J. J. (2003). Seasonal circulation on the western shelf of the Gulf of Mexico using a high-resolution numerical model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C12), 3389. <https://doi.org/10.1029/2003JC001879>

Anexos

1. Las figuras del Anexo A muestran los datos crudos medidos por los planeadores submarinos en los paneles de la izquierda y los datos interpolados objetivamente en los paneles de la derecha.

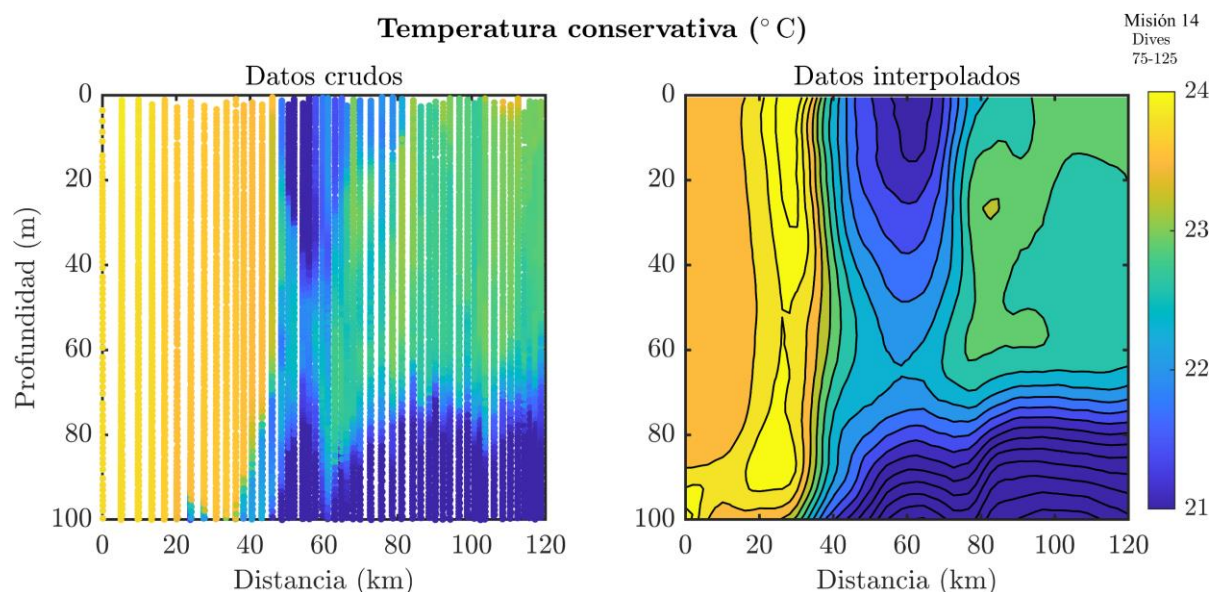


Figura 50. Perfiles verticales de temperatura conservativa ($^{\circ}\text{C}$) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 14 (dives 75-125) para el periodo del 11 al 18 de febrero de 2019. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial.

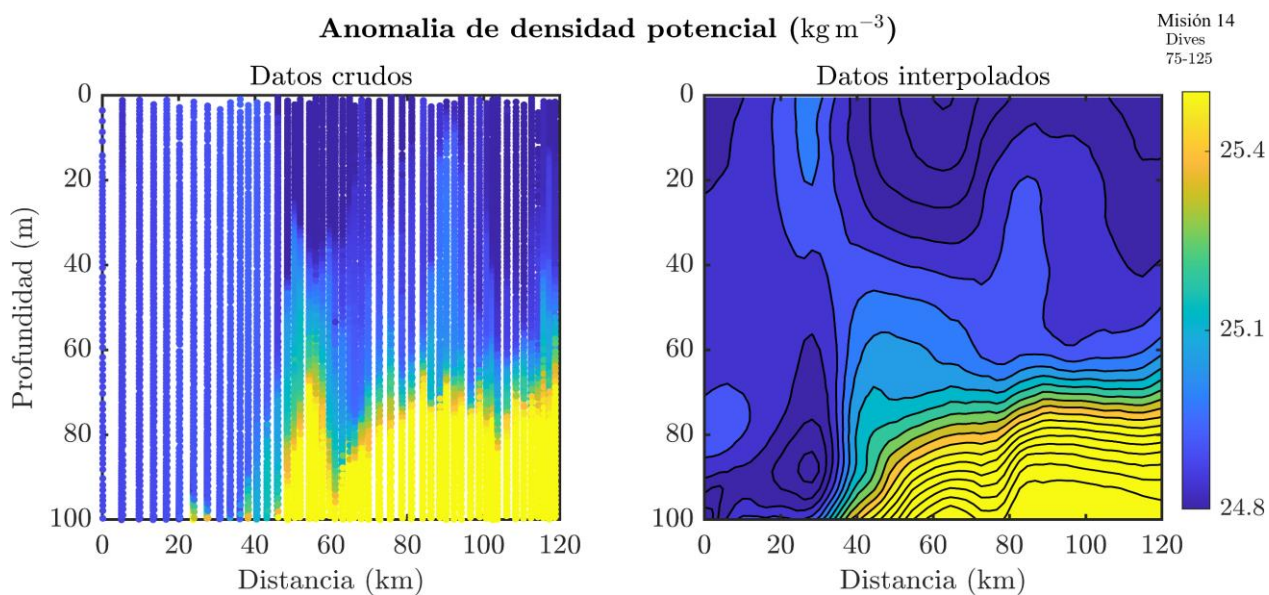


Figura 51. Perfiles verticales de la anomalía de densidad potencial (kg/m^3) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 14 (dives 75-125) para el periodo del 11 al 18 de febrero de 2019. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial.

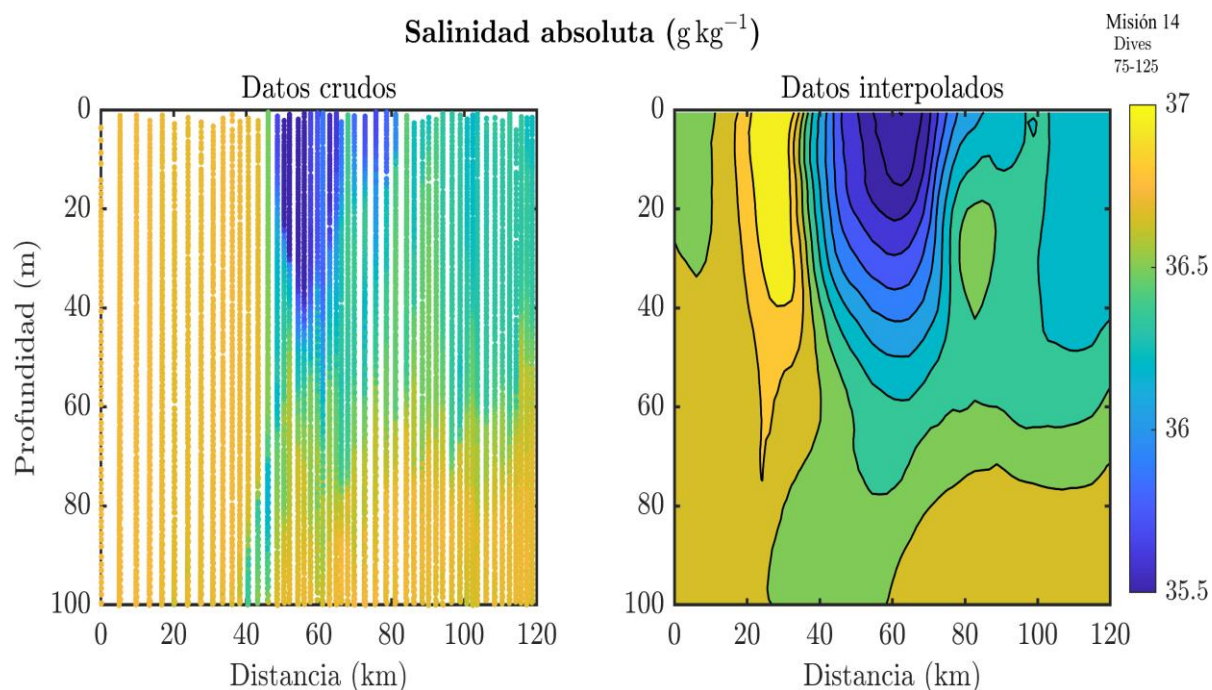


Figura 52. Perfiles verticales de salinidad absoluta (g/kg) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 14 (dives 75-125) para el periodo del 11 al 18 de febrero de 2019. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial.

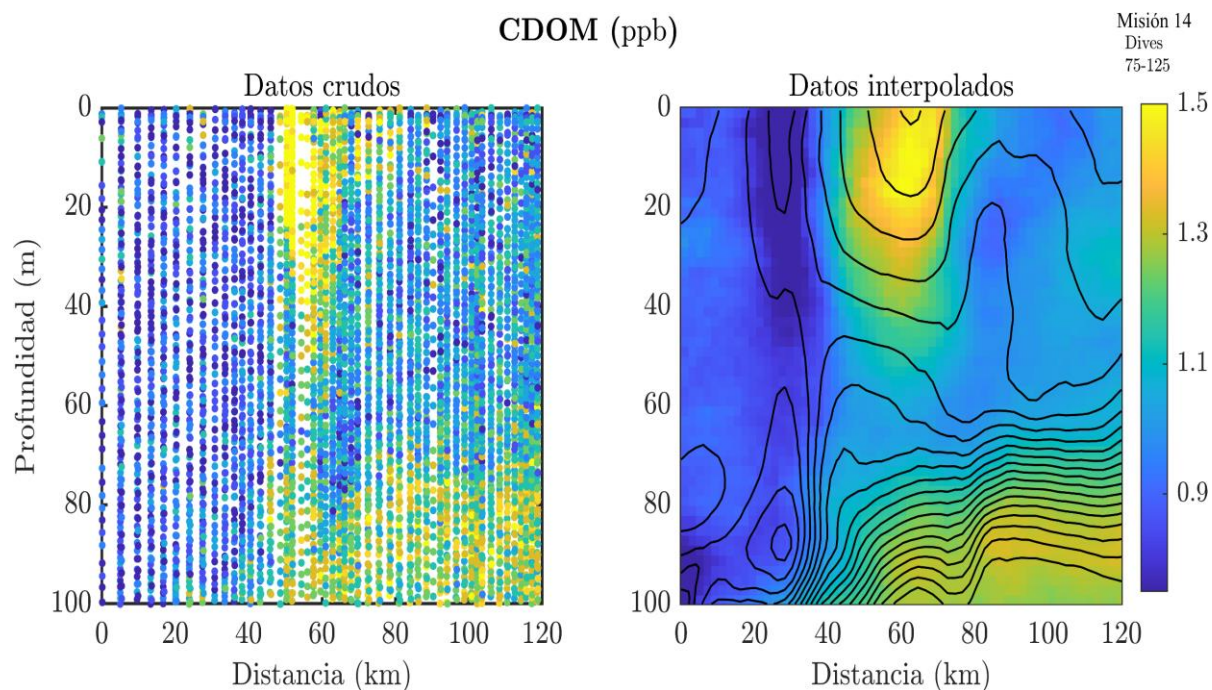


Figura 53. Perfiles verticales de materia orgánica disuelta coloreada (CDOM) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 14 (dives 75-125) para el periodo del 11 al 18 de febrero de 2019. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial.

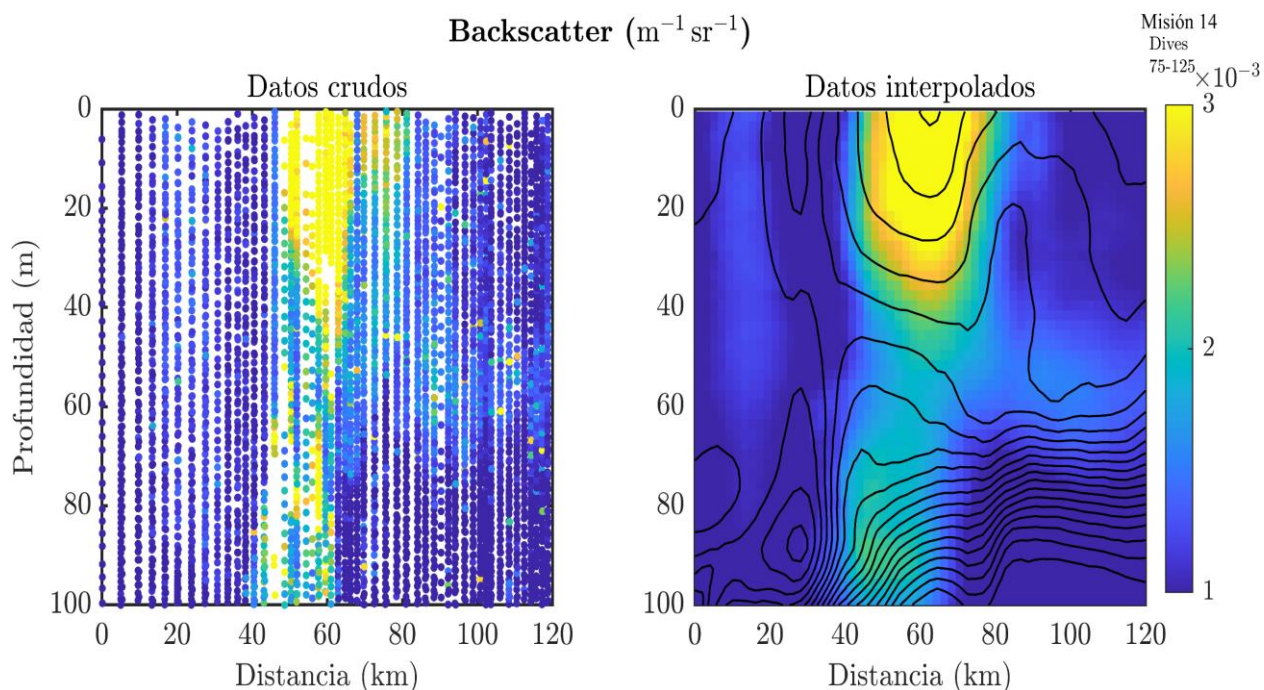


Figura 54. Perfiles verticales de backscatter ($\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 14 (dives 75-125) para el periodo del 11 al 18 de febrero de 2019. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial.

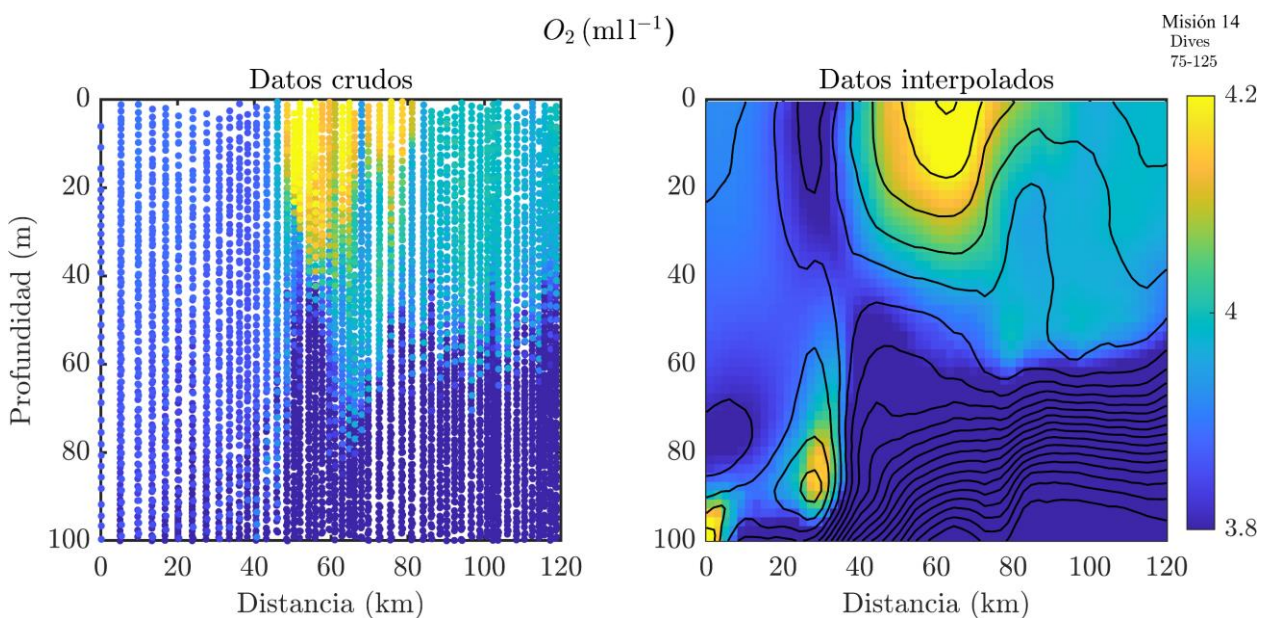


Figura 55. Perfiles verticales de oxígeno disuelto (O_2 , ml l^{-1}) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 14 (dives 75-125) para el periodo del 11 al 18 de febrero de 2019. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial.

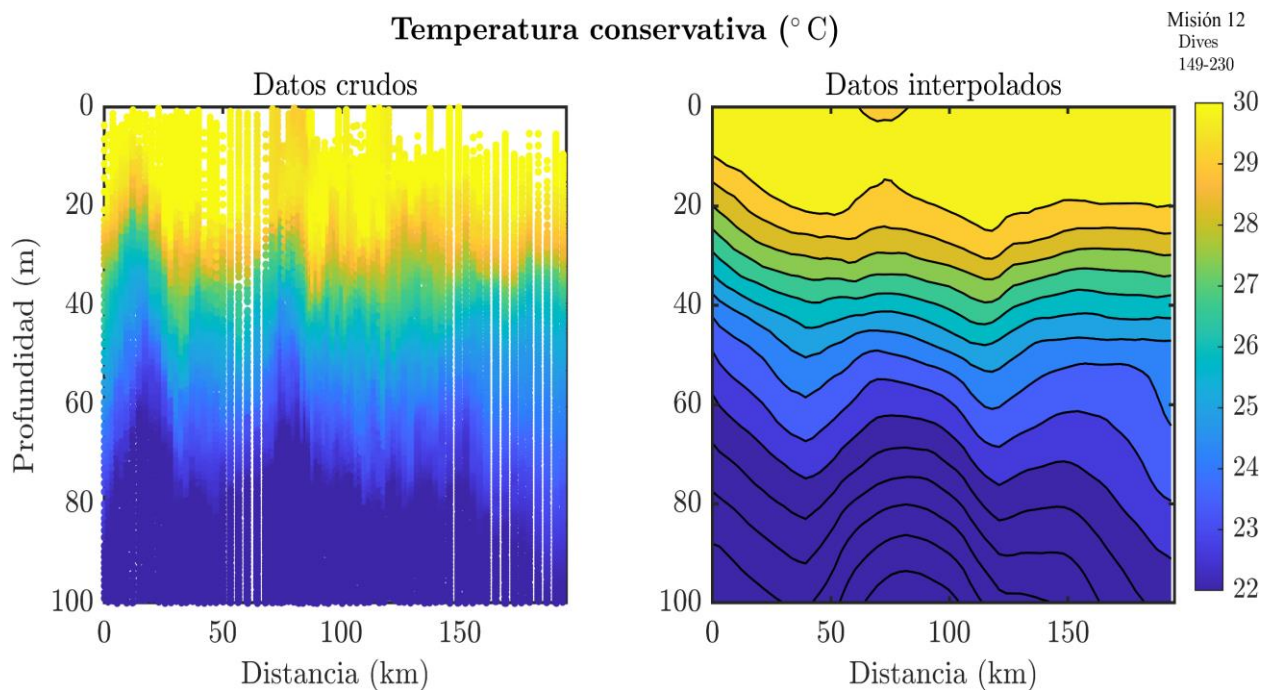


Figura 56. Perfiles verticales de temperatura conservativa ($^{\circ}\text{C}$) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 12 (dives 149-230) para el periodo del 30 de julio al 11 de agosto de 2018. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial.

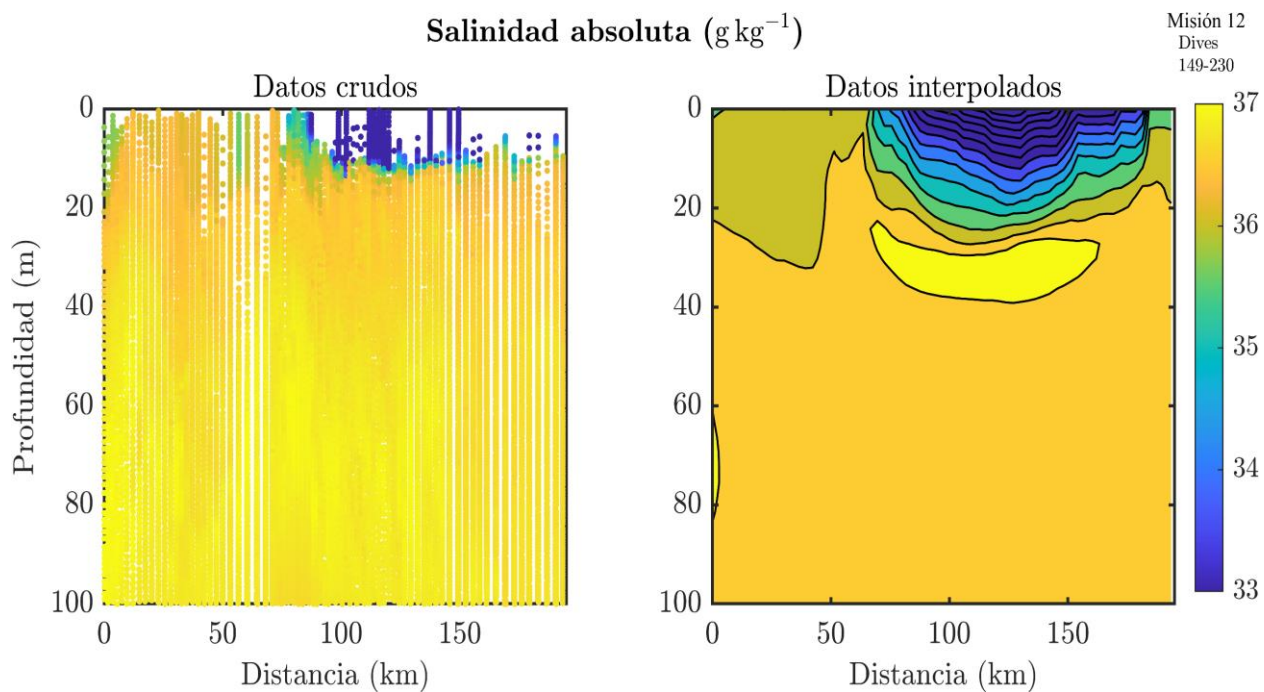


Figura 57. Perfiles verticales de salinidad absoluta (g/kg) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 12 (dives 149-230) para el periodo del 30 de julio al 11 de agosto de 2018. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial.

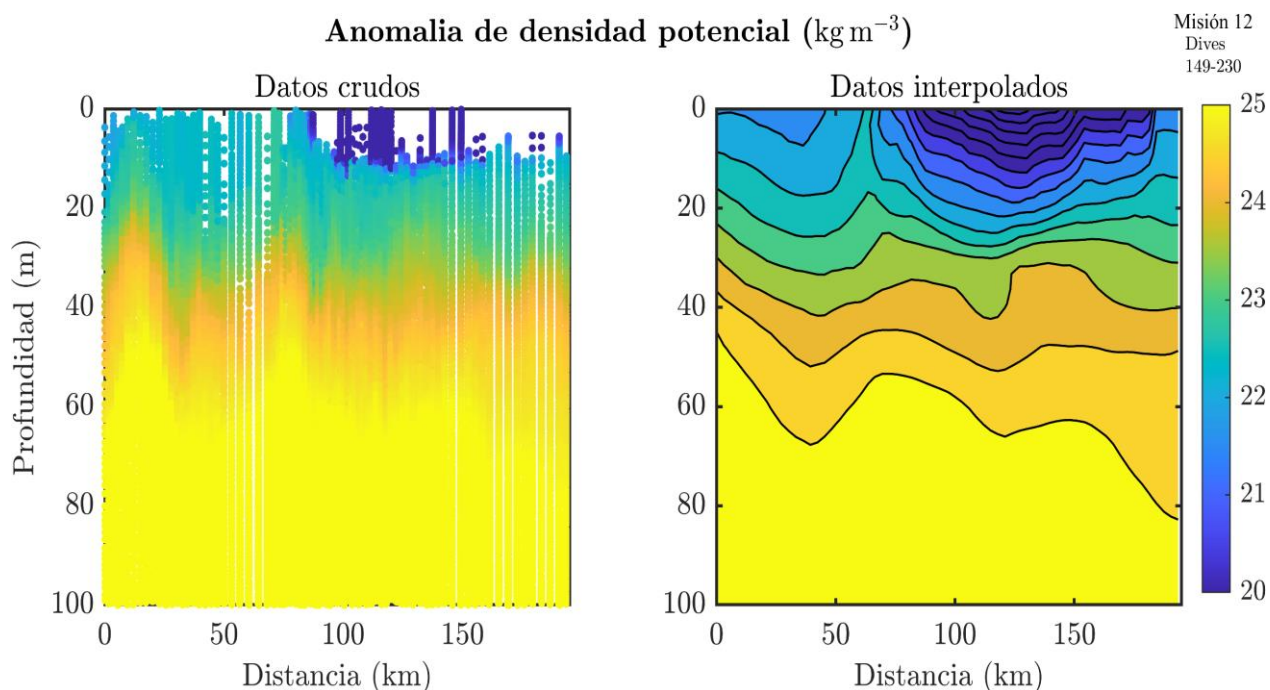


Figura 58. Perfiles verticales de anomalía de densidad potencial (kg/m^3) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 12 (dives 149-230) para el periodo del 30 de julio al 11 de agosto de 2018. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial.

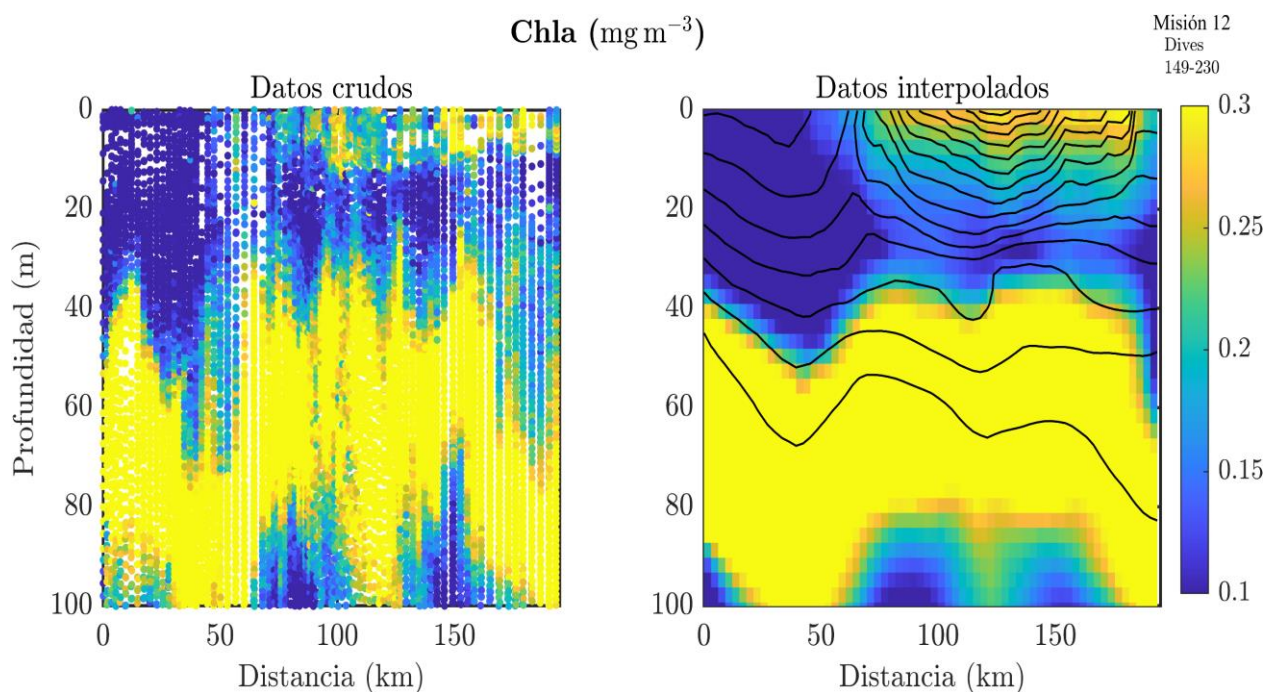


Figura 59. Perfiles verticales de clorofila-a (Chla-a, mg/m^3) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 12 (dives 149-230) para el periodo del 30 de julio al 11 de agosto de 2018. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial.

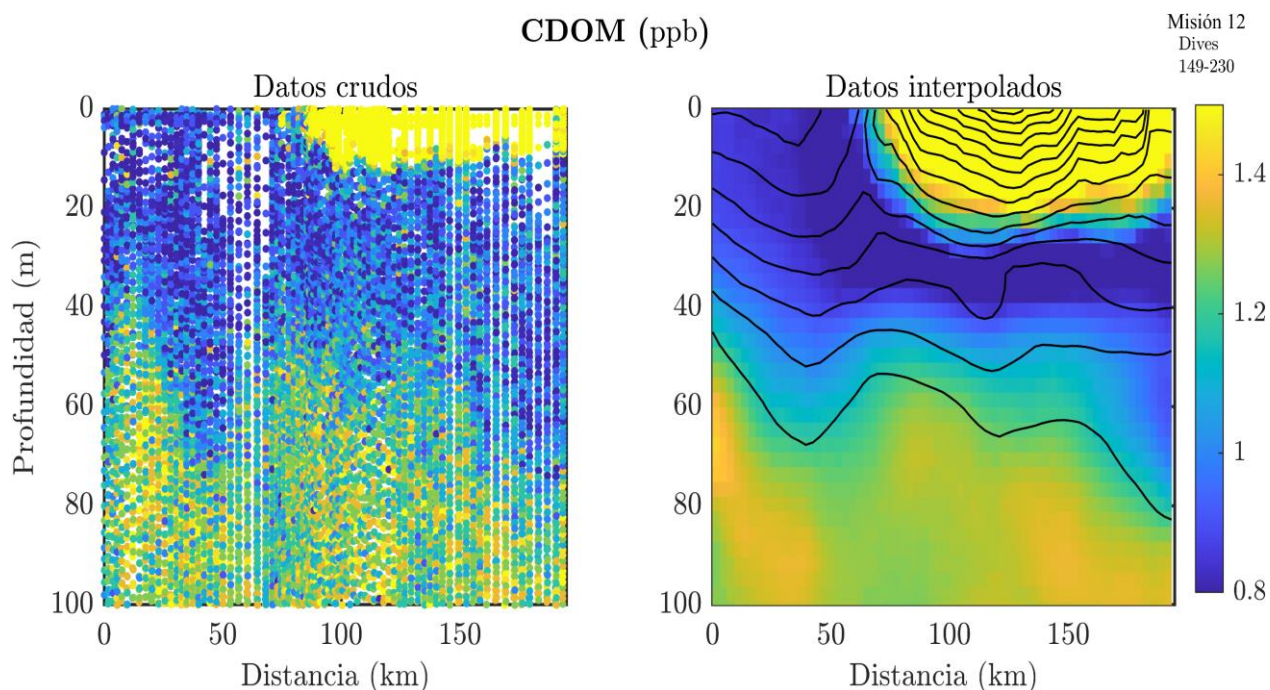


Figura 60. Perfiles verticales de carbono orgánico disuelto coloreado (CDOM, ppb) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 12 (dives 149-230) para el periodo del 30 de julio al 11 de agosto de 2018. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial.

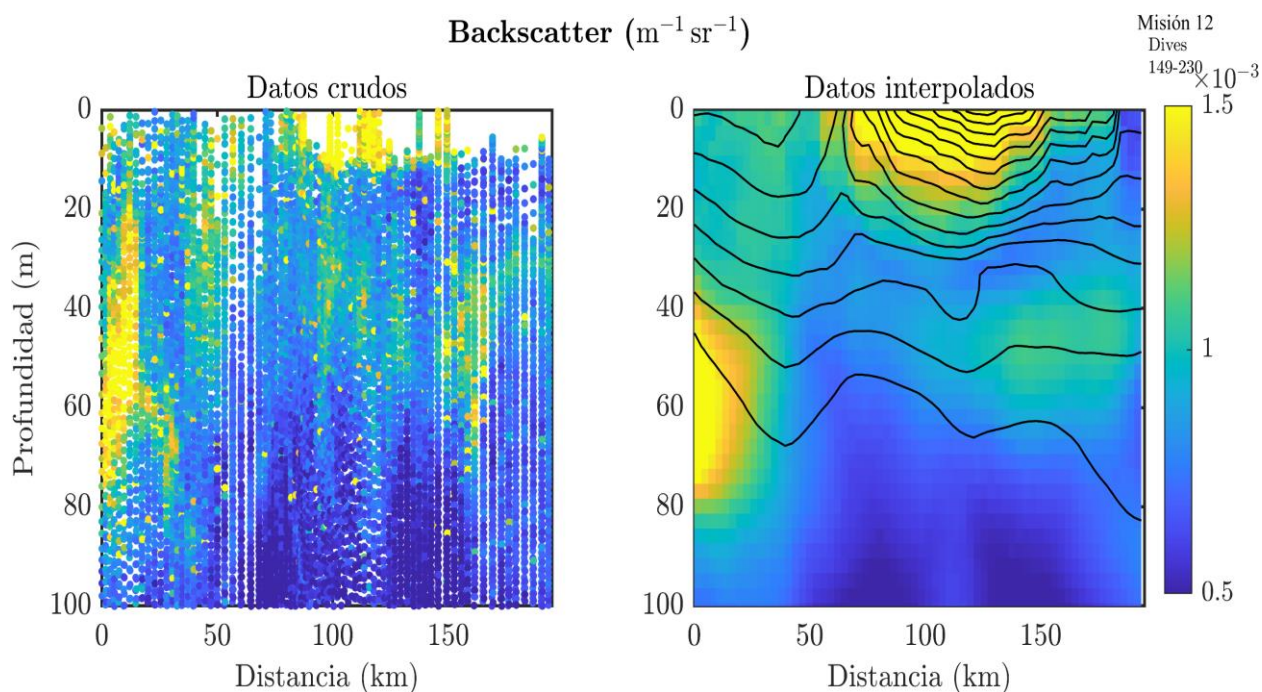


Figura 61. Perfiles verticales de backscatter ($\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 12 (dives 149-230) para el periodo del 30 de julio al 11 de agosto de 2018. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial.

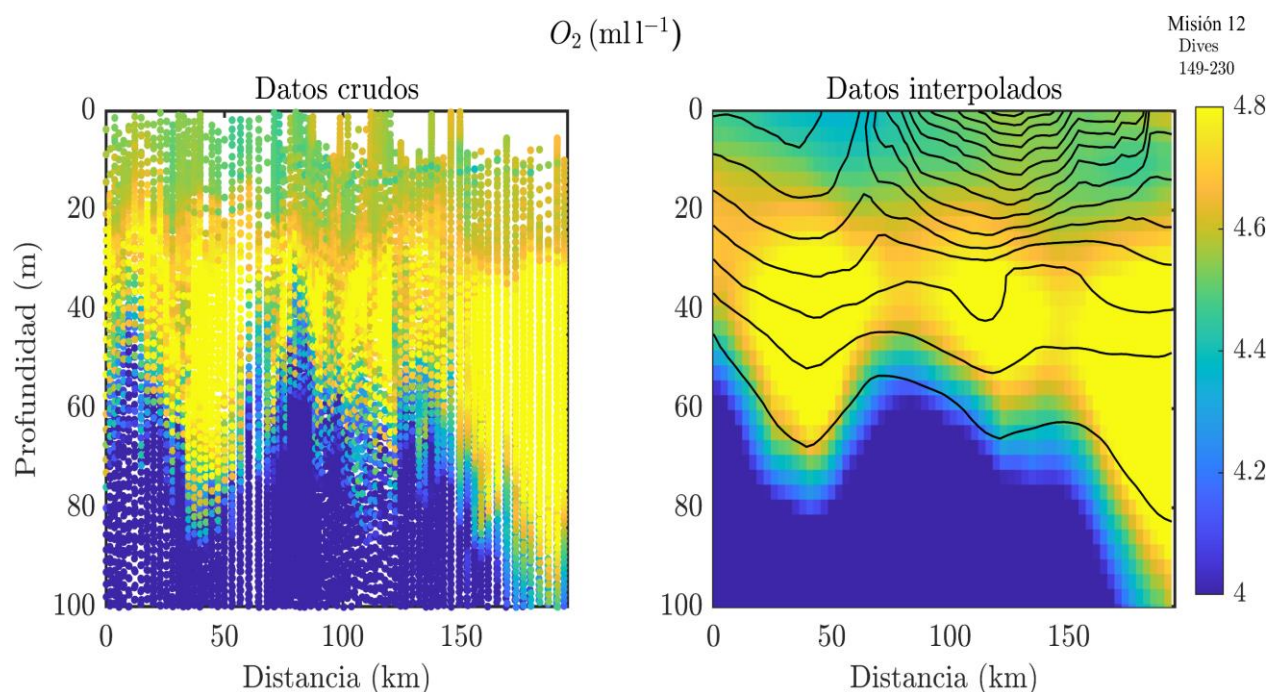


Figura 62. Perfiles verticales de oxígeno disuelto (O_2 , ml/l) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 12 (dives 149-230) para el periodo del 30 de julio al 11 de agosto de 2018. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial.

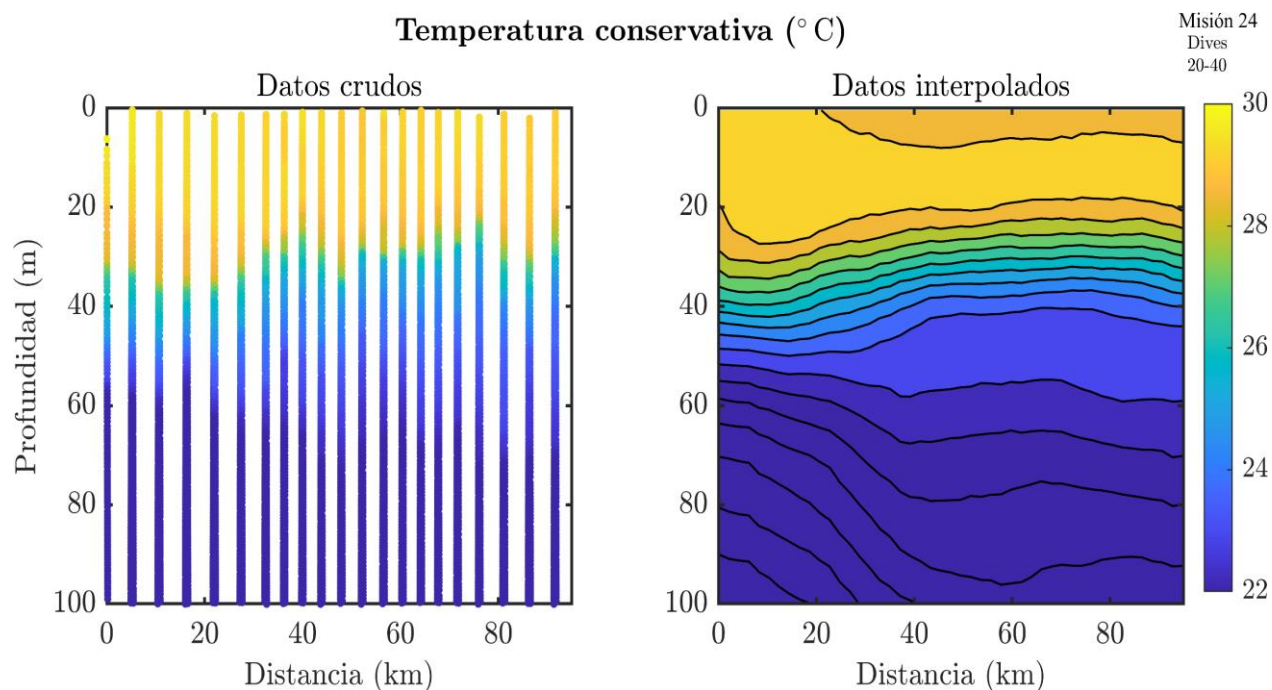


Figura 63. Perfiles verticales de temperatura (°C) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 24 (dives 20-40) para el periodo del 4 al 8 de julio de 2022. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial.

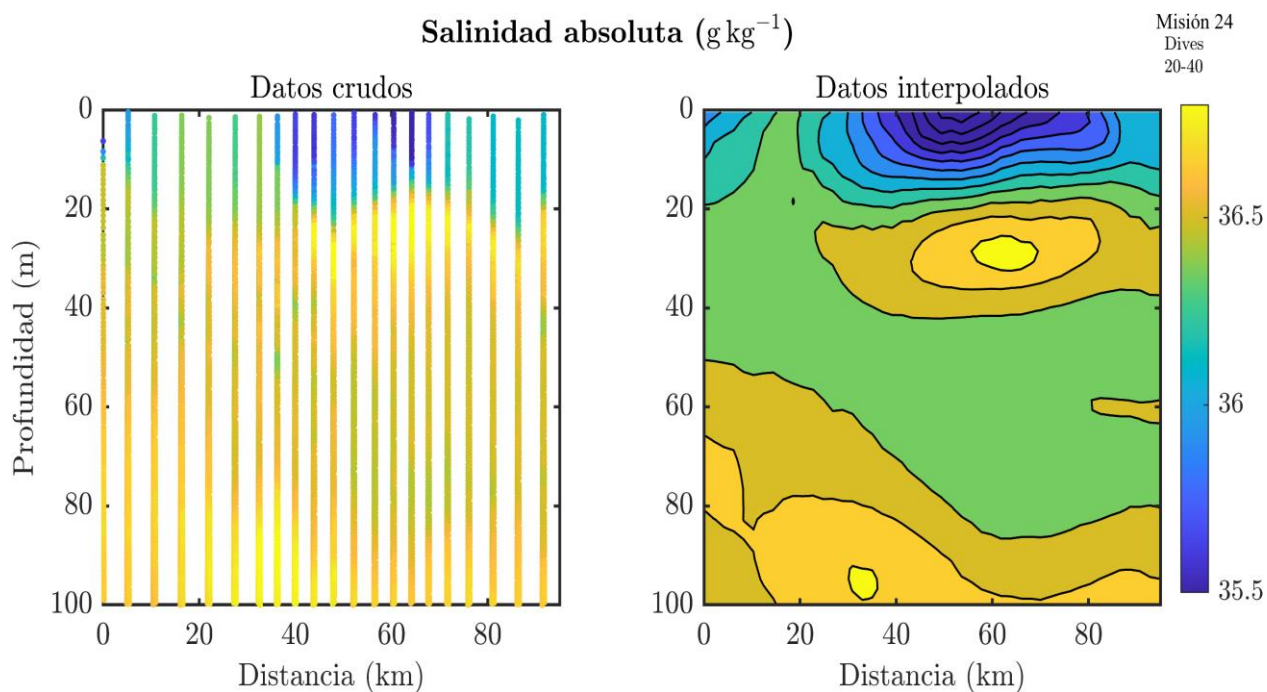


Figura 64. Perfiles verticales de salinidad absoluta (g/kg) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 24 (dives 20-40) para el periodo del 4 al 8 de julio de 2022. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial.

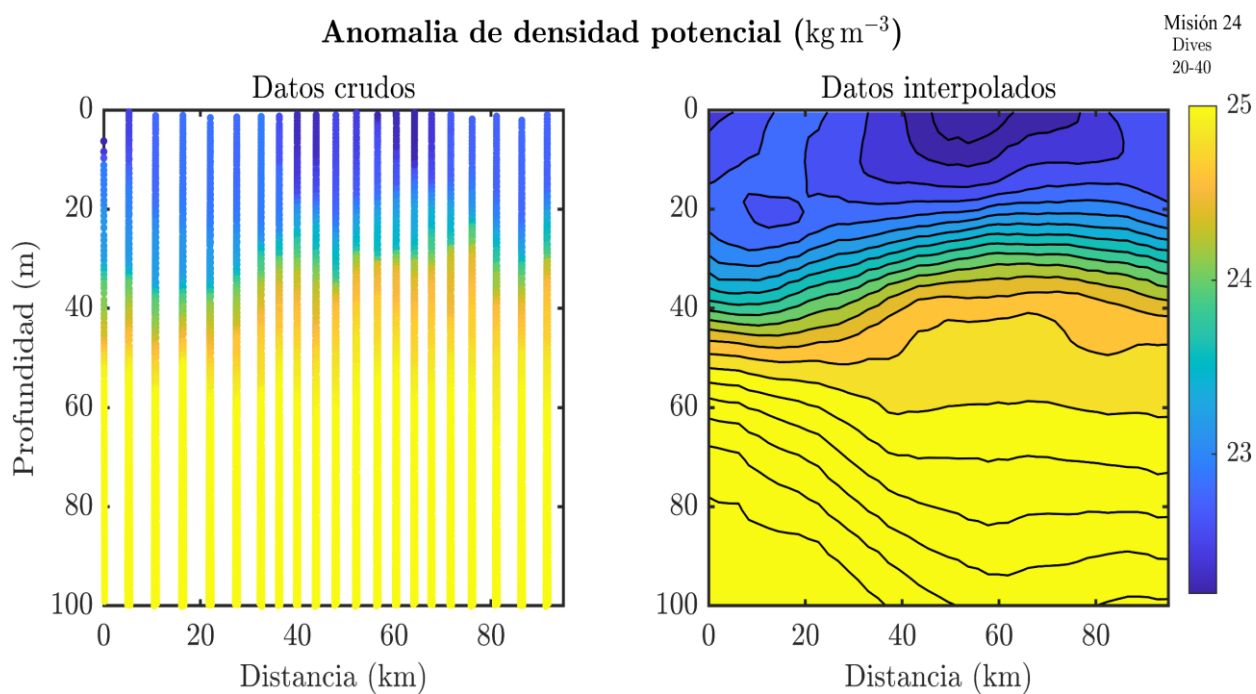


Figura 65. Perfiles verticales de anomalía de densidad potencial (kg/m^3) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 24 (dives 20-40) para el periodo del 4 al 8 de julio de 2022. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial.

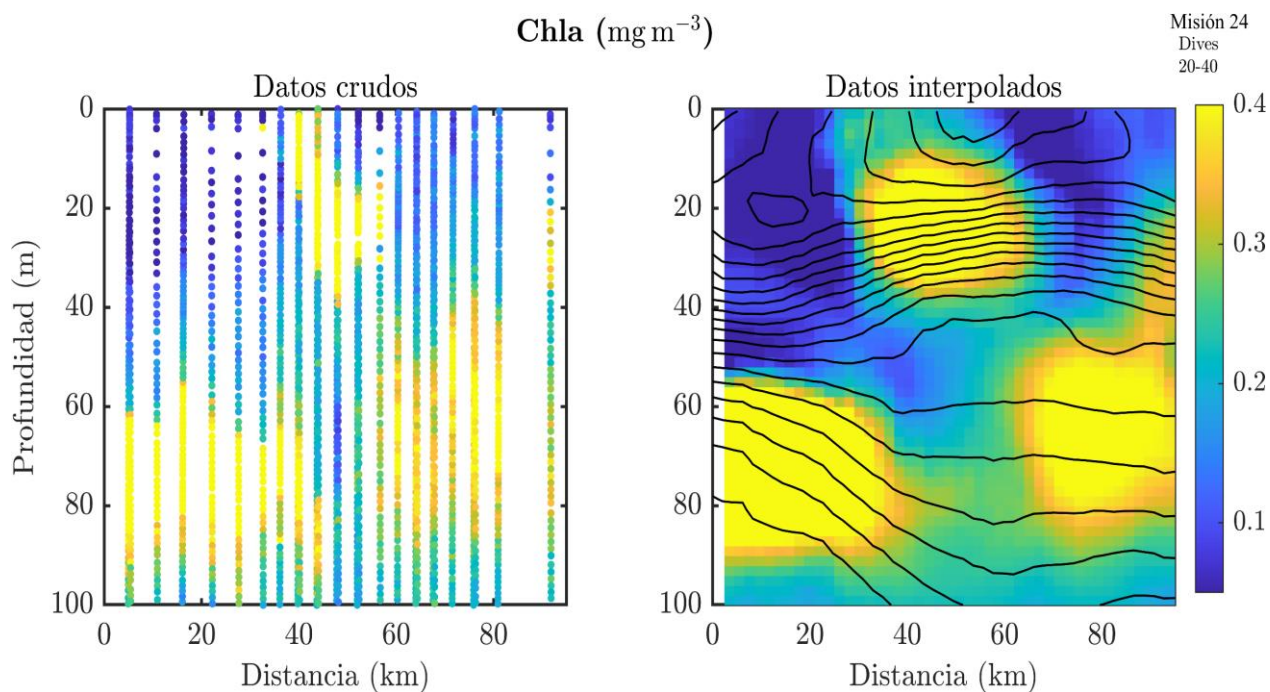


Figura 66. Perfiles verticales de clorofila-a (Chla-a, mg/m^3) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 24 (dives 20-40) para el periodo del 4 al 8 de julio de 2022. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial.

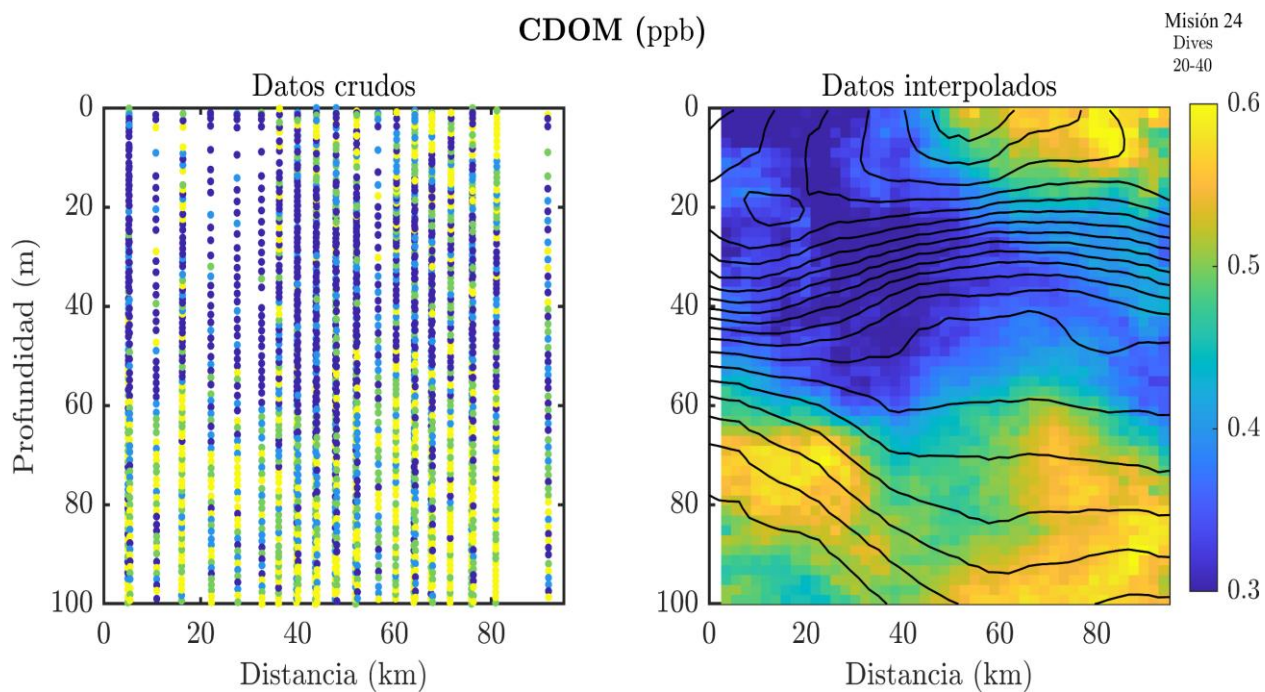


Figura 67. Perfiles verticales de carbono orgánico disuelto coloreado (CDOM, ppb) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 24 (dives 20-40) para el periodo del 4 al 8 de julio de 2022. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial.

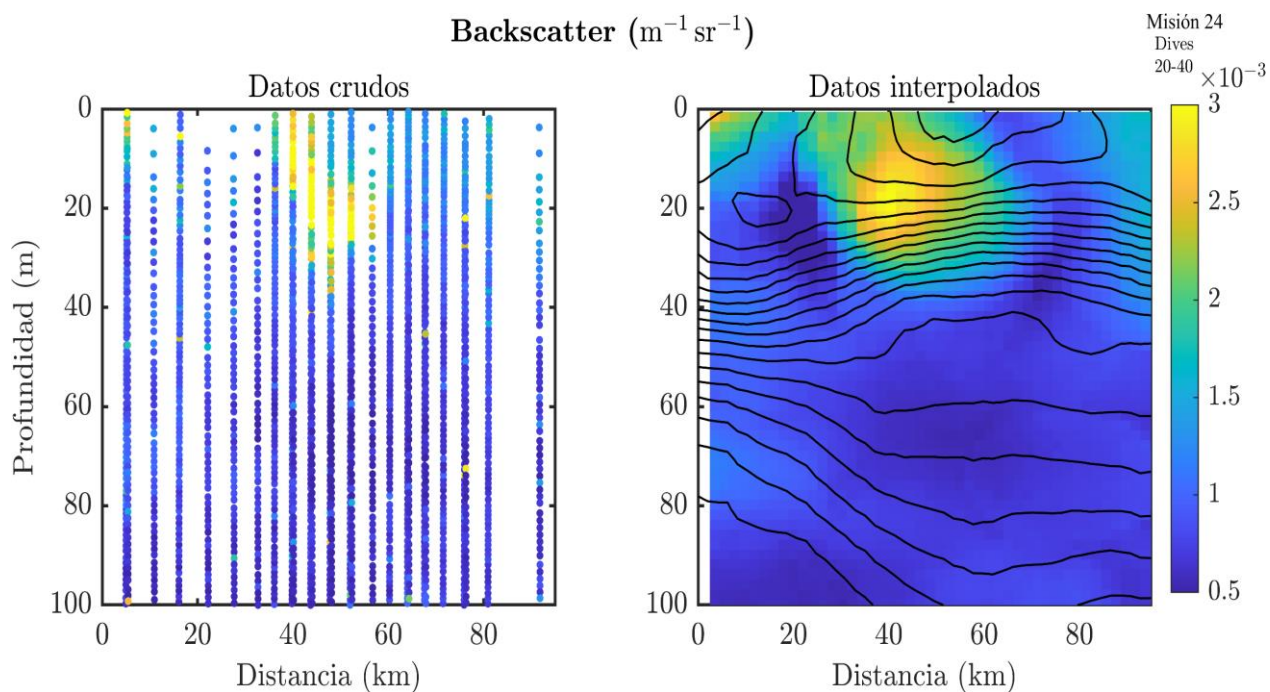


Figura 68. Perfiles verticales de backscatter ($\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 24 (dives 20-40) para el periodo del 4 al 8 de julio de 2022. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial.

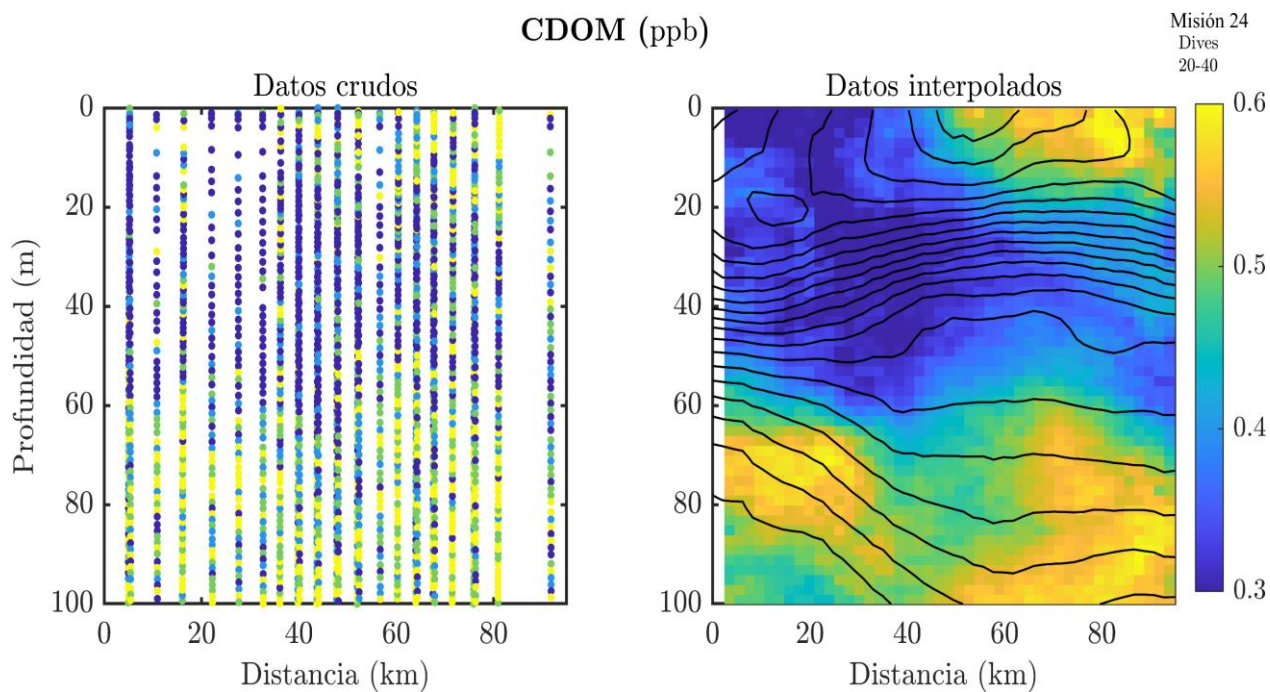


Figura 69. Perfiles verticales de oxígeno disuelto (O_2 , ml/l) medidos con los planeadores submarinos (izquierda) e interpolados objetivamente en una malla regular (derecha) para el transecto de la misión 24 (dives 20-40) para el periodo del 4 al 8 de julio de 2022. Las líneas negras sólidas representan los contornos de anomalías de densidad potencial.