

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



**Maestría en Ciencias
en Oceanografía física**

**Intercambio de agua superficial entre la plataforma
continental y la región profunda del golfo de México**

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

Presenta:

Joana Julieta González Rejón

Ensenada, Baja California, México
2020

Tesis defendida por
Joana Julieta González Rejón

y aprobada por el siguiente Comité

Dra. Paula Pérez Brunius

Directora de tesis

Dr. Julio Sheinbaum Pardo

Dra. Sharon Zinah Herzka Llona



Dr. José Gómez Valdés

Coordinador del Posgrado en Oceanografía Física

Dra. Rufina Hernández Martínez

Directora de Estudios de Posgrado

Joana Julieta González Rejón © 2020

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis.

Resumen de la tesis que presenta **Joana Julieta González Rejón** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Física.

Intercambio de agua superficial entre la plataforma continental y la región profunda del golfo de México

Resumen aprobado por:

Dra. Paula Pérez Brunius
Directora de tesis

El intercambio de agua superficial entre la plataforma y la región de aguas profundas se estudió con observaciones de 2 150 trayectorias de derivadores superficiales (entre 1993-2018) y de corrientes observadas en perfiladores acústicos de corrientes entre 2008-2017 alrededor de la plataforma y el talud del golfo. En 13 polígonos alrededor del golfo (0-1500 m) se estimó la probabilidad de entrar y salir de la plataforma con base en la proporción de las trayectorias de derivadores superficiales que cruzaron la isóbata de los 200 m respecto al total de trayectorias observadas en cada polígono, en las temporadas de septiembre-marzo y abril-agosto. Las regiones en las que se observaron las probabilidades más altas ($\geq 30\%$) de entrar a la plataforma fueron: el noroeste y noreste del golfo y frente a Veracruz y Tamaulipas, en ambas temporadas. Las regiones en las que se observaron las probabilidades más altas de salir de la plataforma fueron: la plataforma en el sur de Misisipi y la plataforma oeste de Florida en abril-agosto y la plataforma entre Tamaulipas y Texas, y el sureste de la bahía de Campeche en ambas temporadas. Por otro lado, se determinaron las regiones en las que se observó una dirección preferencial en el intercambio superficial entre la plataforma y la región profunda en septiembre-marzo y abril-agosto, mediante la comparación de las probabilidades de entrar y salir de la plataforma y del promedio de los flujos perpendiculares a las isóbatas (análisis euleriano) observados por los derivadores y perfiladores de corrientes. Las regiones en las que predominó el transporte desde aguas profundas hacia la plataforma fueron: frente a Texas y Luisiana en abril-agosto y frente a Veracruz, Tamaulipas y el suroeste de la bahía de Campeche, en ambas temporadas. Las regiones en las que predominó un transporte hacia aguas profundas fueron: el sureste de la bahía de Campeche en septiembre-marzo y la plataforma al sur de Texas en ambas temporadas.

Palabras clave: Golfo de México, intercambio de agua superficial, corrientes superficiales, derivadores superficiales, plataforma continental.

Abstract of the thesis presented by **Joana Julieta González Rejón** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Physical Oceanography.

Surface water exchange between the continental shelf and the deepwater region of the Gulf of Mexico

Abstract approved by:

Dra. Paula Pérez Brunius
Thesis Director

We studied the surface water exchange between the continental shelf and the deepwater region with observations of 2,150 surface drifters trajectories (between 1993-2018) and currents in moored acoustic profilers between 2008-2017, all around the shelf and slope of the gulf. We estimated the probability of entering and leaving the shelf in 13 polygons around the gulf (0-1500 m), from the proportion of the total trajectories that crossed the 200 m isobath in each polygon between September-March and April-August. In both seasons, it was more likely to enter the shelf from deep waters in the northwest and northeast of the gulf and front of Veracruz and Tamaulipas. The regions where it was more likely to leave the shelf towards deep waters were western Florida and southern Mississippi shelves between April-August and the southeast of the Bay of Campeche and the shelf between Tamaulipas and Texas in both seasons. On the other hand, the regions with a predominant direction in the surface exchange between the shelf and the deepwater region, were determined by comparing the Lagrangian results and cross-isobaths mean flows (Eulerian analysis) observed by drifters and acoustic profilers between September-March and April-August. Water exchange was predominantly towards the shelf in front of Texas and Louisiana between April-August and front of Veracruz-Tamaulipas and the southwest of the Bay of Campeche in both seasons. Water exchange was predominantly towards deep waters at the southeast of the Bay of Campeche between September-March and the south of Texas in both seasons.

Keywords: Gulf of Mexico, surface water exchange, surface currents, drifters, continental shelf.

Dedicatoria

A las personas que contribuyeron a mi aprendizaje y crecimiento personal, profesional y académico dentro de las paredes del DOF y CICESE:

**mis amigos y compañeros estudiantes, investigadores y técnicos, al Dr. Modesto Ortiz,
Lupita y Doña Lety, Yahaira Castañeda**

y especialmente

a **Ángeles García** por ser el angelito que me acompañó, apoyó y aportó la luz y el cariño que necesité sobre todo en los tiempos de crisis personal y en el mundo.

#covid-19

Agradecimientos

Al CICESE y al Posgrado de Oceanografía Física por mi formación como maestra en ciencias.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el financiamiento de mis estudios bajo el No. de becario 634341, al CIGoM por 6 meses de beca del Fondo Sectorial CONACYT-SENER-Hidrocarburos, proyecto 201441 y al Proyecto PEMEX-CICESE: Medición y Análisis Metoceánico del Golfo de México OC20200084 por 2 meses de financiamiento.

A mi comité de tesis: a la Dra. Paula Pérez Brunius por la oportunidad de desarrollar este tema, el tiempo dedicado, por incentivar a dar y ser más, y el apoyo para asistir a congresos de los que me llevo valiosos aprendizajes. Al Dr. Julio Sheinbaum y la Dra. Sharon Herzka por sus valiosas ideas, sugerencias y comentarios para la mejora de la investigación, así como al Dr. David Rivas por hacerlo en su momento.

A los proyectos e instituciones fuentes de los datos de los derivadores superficiales utilizados en esta investigación y a Jonathan Lilly por el procesamiento y la unificación de las bases de datos:

- **DWDE.** Experimento de dispersión en aguas profundas realizado por el Grupo de Investigación con Observaciones Lagrangianas de CICESE (<https://giola.cicese.mx/>) como parte del proyecto “Implementación de redes de observación oceanográficas (físicas geoquímicas, ecológicas) para la generación de escenarios ante posibles contingencias relacionadas a la exploración y producción de hidrocarburos en aguas profundas del Golfo de México” financiado por el Fondo Sectorial CONACYT-SENER-Hidrocarburos, proyecto 201441.
- **NGOM y SGOM.** Financiado por PEMEX Exploración y Producción vía los contratos PEP-CICESE SAP. 428217896, 428218855, y 428229851. NGOM son parte del programa EddyWatch® de Horizon Marine Inc., y fueron provistos como parte de un acuerdo de intercambio de datos entre Horizon Marine y PEMEX - CICESE.
- **OCG. Oil Spill.** Los datos de derivadores fueron obtenidos como cortesía del Prof. R. H. Weisberg y el USF *Ocean Circulation Group*, mediante un programa enfocado en la observación y modelación del océano enfocado en la Plataforma Oeste de Florida [Weisberg et al., 2005]. Los derivadores fueron liberados en la región este del Golfo de México en verano del 2010 en respuesta al derrame de petróleo *DeepWater Horizon* [Liu et al., 2011], los datos fueron usados en el monitoreo de la Corriente de Lazo del Golfo de México y la circulación de la plataforma [Liu et al., 2011] y para evaluar trayectorias de modelos [Liu y Weisberg, 2011, Liu et al., 2014].
- **OCG. RedTide.** Los datos de los derivadores fueron obtenidos como cortesía del Prof. R. H. Weisberg y el USF *Ocean Circulation Group* para el propósito de rastrear el florecimiento algal del 2012 en la Plataforma Oeste de Florida. La liberación de los derivadores fue cortesía del Colegio de Ciencia Marina, Universidad del Sur de Florida, Centro para la Predicción de Marea Roja (CPR por sus siglas en inglés), codirigidos por el Prof. R. H. Weisberg y J. J. Walsh, con la ayuda del Instituto de Investigación del Agua de Florida y el Laboratorio Mote Marine.
- **GLAD** (doi:10.7266/N7VD6WC8), base de datos del Consorcio para la Investigación avanzada en el Transporte de Hidrocarburos en el medio ambiente (CARTHE, por sus siglas en inglés).
- **GDP/HTR**, bases de datos de la NOAA disponible en <https://www.aoml.noaa.gov/phod/gdp/index.php>.
- **SCULP.** Ohlmann y Niiler (2005).

Al creador de las herramientas jLab, que simplificaron el procesamiento de los datos:
Lilly, J. M. 2019. jLab: A data analysis package for Matlab, v. 1.6.6, <http://www.jmlilly.net/software>.

Esta investigación ha sido financiada por el Fondo Sectorial CONACYT-SENER-Hidrocarburos, proyecto 201441. Esta es una contribución del Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGoM). Reconocemos a PEMEX por promover ante el Fondo la demanda específica sobre los derrames de hidrocarburos y el medio ambiente.

Al grupo CANEK (CICESE) por los datos de corrientes, los cuales fueron financiados por el Convenio PEMEX Exploración y Producción-CICESE (SAP. nos. 428217896, 428218855 y 428229851) y al Dr. Enric Pallàs por el apoyo con el procesamiento de los datos y el tiempo dedicado.

A mis profesores del DOF por el esfuerzo y dedicación en transmitir conocimiento y experiencias valiosas para mi formación en oceanografía.

Al GIOLA: gracias a todos por la disposición y la ayuda para el desarrollo de esta tesis, en especial a Paula G. y Xavi.

A mis compañeros y amigos del posgrado “los cuervos negros” por sus ocurrencias, apoyo y muestras de compañerismo, por hacer de esta etapa más llevadera en especial a la “promoción”: Ara, Ale, Bere, Dani, David, Gaby, Gina, Marco (Perusi), Mariam, Oscar, Paulino, Quinn, Yandy y a los adoptados Pancho y Camilo. A Lalo por siempre recibirme en su cubículo e ir al mío para compartir historias. Un gusto haber coincidido.

A las personas que permanecieron conmigo y me alentaron durante esta etapa, mi familia y amigos: A mi hermana Marina y mis padres por mi manutención en los últimos meses de escritura. A Arantxa y Ángeles por su cariño y empatía, las bebidas y comidas compartidas. A Esperanza y Ale por su apoyo. A Linda por ser mi mejor amiga y respaldo durante la mayor parte de la maestría. A Vinicio y Jonathan por las asesorías en los cursos. Gracias a todos por su cariño, comprensión y paciencia.

A la psic. Yahaira Castañeda, por regresarme constantemente al “aquí y ahora”, por enseñarme a ser resiliente y ayudarme a encontrar la fortaleza para concluir este proyecto.

Tabla de contenido

Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	ix
Lista de tablas.....	xiii
Capítulo 1 . Introducción.....	1
1.1 Procesos físicos que generan transporte de agua entre la plataforma continental y la región de aguas profundas.....	2
1.2 Antecedentes.....	6
1.3 Justificación.....	8
1.4 Objetivo general.....	9
1.4.1 Objetivos específicos.....	9
Capítulo 2 . Datos y Método.....	10
2.1 Datos.....	10
2.1.1 Mediciones lagrangianas de derivadores superficiales.....	10
2.1.2 Mediciones eulerianas de corrientes con perfiladores acústicos anclados.....	13
2.2 Métodos.....	14
2.2.1 Probabilidad de entrar y salir de la plataforma.....	15
2.2.1.1 Segmentación de las trayectorias de los derivadores con base en el cruce de la isóbata de 200 m.....	16
2.2.1.2 Delimitación de los polígonos evaluados.....	18
2.2.1.3 Método <i>Bootstrap</i> para inferir la probabilidad de entrar o salir de la plataforma continental.....	20
2.2.2 Dirección preferencial en el intercambio entre la plataforma y la región de aguas profundas.....	22
2.2.2.1 Análisis lagrangiano.....	22
2.2.2.2 Análisis euleriano.....	23
Capítulo 3 . Resultados.....	26
3.1 Distribución espacial y temporal de los segmentos de las trayectorias independientes de los derivadores.....	26
3.2 Probabilidad de entrar a la plataforma continental desde aguas profundas.....	29
3.3 Probabilidad de salir de la plataforma continental hacia aguas profundas.....	33
3.4 Dirección preferencial en el intercambio de agua superficial entre la plataforma continental y la región de aguas profundas.....	36
3.4.1 Análisis lagrangiano de la dirección preferencial en el intercambio de agua entre la plataforma y la región de aguas profundas.....	37

3.4.2 Análisis euleriano de la dirección que prevalece en el intercambio de agua superficial entre la plataforma y la región de aguas profundas	40
3.4.3 Regiones en las que se observó una dirección preferencial en el intercambio de agua superficial entre la plataforma y la región de aguas profundas	44
Capítulo 4 . Discusión	48
4.1 Exportación de agua superficial desde la plataforma continental hacia aguas profundas en el golfo de México occidental	49
4.2 Importación de aguas desde aguas profundas hacia la plataforma en la región occidental del golfo	52
4.3 El intercambio de agua en la plataforma de Tamaulipas y Veracruz	54
Capítulo 5. Sumario y conclusiones	56
Literatura citada	59
Anexos.....	63

Lista de figuras

Figura		Página
1	Imagen satelital de la descarga del río Misisipi y el derrame de petróleo (<i>Deepwater Horizon</i>) en el delta del Misisipi el 17 de mayo de 2010. Imagen de la NASA, Jeff Schmaltz, MODIS Rapid Response Team.....	1
2	(a) Instantánea de la vorticidad relativa superficial modelada normalizada por el parámetro de Coriolis (ζ/f); (b) Campo de salinidad superficial (SSS), (c) gradientes de SSS; y (d) divergencia normalizada (δ/f) correspondientes para el 9 de agosto de 2015. Tomada de Bracco et al. (2019).....	3
3	a) Ilustración del transporte de Ekman en una surgencia costera (arriba) y hundimiento (abajo) en el hemisferio norte ©1998 Wadsworth Publishing Company/ITP. b) Imagen satelital de temperatura superficial del mar durante un evento de surgencia en el que se observaron filamentos hacia el océano, tomada de Brink y Cowles (1991).....	4
4	Regiones de convergencia de corrientes a lo largo de la costa en el golfo de México. a) Sureste de la bahía de Campeche y b) Suroeste de la plataforma de Texas. Las líneas punteadas corresponden a las isobatas de 25, 200 y 1000 m. Tomada de Martínez-López y Zavala-Hidalgo (2009).....	7
5	Promedio mensual climatológico del transporte perpendicular a las isóbatas en el golfo de México. a) Julio y b) Septiembre. Las flechas rojas (azules) corresponden a la capa superficial (subsupsuperficial) de 0- 20 m (20-50 m). Las líneas verdes corresponden a las isóbatas de 20, 30, 50 y 200 m. Tomadas de Nieblas-Piquero (2019).....	7
6	Cobertura temporal de los experimentos de derivadores superficiales en el golfo de México entre 1993-2018. DWDE: Deep Water Dispersion Experiment. GLAD: Grand Lagrangian Deployment. OCG: Ocean Circulation Group. NGOM: Northern Gulf of Mexico. SGOM: Southern Gulf of Mexico. GDP: Global Drifter Program. HTR: High-Temporal Resolution. SCULP: Surface Current and Lagrangian Drift Program.....	10
7	Cobertura espacial del muestreo de los derivadores superficiales en el golfo de México entre 1993 y 2018. a) Diagrama de espagueti de las trayectorias y b) Mapa de densidad de los datos horarios observados. Figura realizada con JLab de Lilly (2019). Se muestra la isóbata suavizada de 200 m.	12
8	Posición geográfica de los anclajes con perfiladores acústicos de corrientes en el sur y oeste del golfo de México. Las isóbatas de 130 m y 500 m se muestran con a líneas grises.....	13

9	Cobertura temporal de las corrientes observadas en el nivel de 30 m de profundidad por los perfiladores acústicos de corrientes en los anclajes en el sur y oeste del golfo de México entre 2008 y 2017.	14
10	Gradiente de la batimetría del golfo de México. Los gradientes altos (amarillos) indican las pendientes altas de la profundidad del fondo. La línea roja representa la isóbata de 200 m suavizada, que se encuentra en el límite somero de la zona de altas pendientes del talud continental. Figura realizada con las herramientas de Lilly (2019).....	16
11	Ilustración de las trayectorias de derivadores que no cruzaron (izquierda) y sí cruzaron (derecha) la isóbata de los 200 m de la región de aguas profundas hacia la plataforma continental con base en el tiempo del otro lado (mínimo 3 días). La flecha roja punteada indica el punto inicial del segmento independiente. La línea continua roja simboliza la isóbata de los 200 m.....	17
12	Diagrama de flujo para segmentar las trayectorias que iniciaron en aguas profundas y cruzaron la isóbata de los 200 m hacia la plataforma continental. Para segmentar las trayectorias que iniciaron en la plataforma y cruzaron hacia aguas profundas aplica de manera análoga al cambiar “la plataforma” por aguas profundas y viceversa.....	19
13	Polígonos que delimitan las áreas de plataforma y aguas profundas evaluadas en el golfo de México. La línea gruesa roja representa la isóbata suavizada de 200 m y las líneas rojas delgadas representan las isóbatas suavizadas de 1500 m y 3000 m. La batimetría se muestra en escala de grises.	20
14	Distribución de las proporciones de trayectorias de entrada a la plataforma continental desde aguas profundas calculadas con <i>Bootstrap</i> a partir de la proporción observada (a) y su curva de distribución acumulada (b). Las líneas discontinuas azules indican el intervalo entre el 2.5 y 97.5 % acumulado.	22
15	Grados de libertad mensuales de los datos observados por los derivadores superficiales entre los 0-1000 m de profundidad en el golfo de México en una malla de resolución espacial de 1/3°. Figura realizada con las herramientas de Lilly (2019)..	24
16	Distribución espacial de los segmentos independientes de las trayectorias de los derivadores. Trayectorias que no cruzaron (a y c) y sí cruzaron (b y d) desde aguas profundas hacia la plataforma (paneles superiores) y desde la plataforma continental hacia aguas profundas (paneles inferiores). Los puntos azules (rojos) indican los inicios (finales) de las trayectorias (líneas grises). Los polígonos están numerados del 1 al 13 en sentido horario desde el sur, como se muestra en el panel a.....	27

- 17 **Número de segmentos independientes de trayectorias evaluados en cada polígono alrededor del golfo por temporada.** Superior: Número de trayectorias que iniciaron en la región de aguas profundas, inferior: trayectorias que iniciaron en la plataforma continental entre abril-agosto (a y c) y septiembre-marzo (b y d). La línea discontinua indica el límite mínimo de 80 trayectorias. La barra de colores corresponde al año de observación..... 29
- 18 **Probabilidad de entrar a la plataforma con base en el porcentaje de las trayectorias que cruzaron la isóbata de 200 m desde aguas profundas hacia la plataforma continental entre abril-agosto y septiembre-marzo.** El porcentaje en cada polígono indica la proporción observada y el número de polígono es señalado en las esquinas. En los polígonos de color gris se observaron menos de 80 trayectorias..... 30
- 19 **Porcentaje con intervalos de confianza al 95 % de las trayectorias que cruzaron de la región de aguas profundas hacia la plataforma continental con respecto al total de las trayectorias evaluadas en los 13 polígonos del golfo de México entre abril-agosto y septiembre-marzo.** El intervalo de confianza se conformó por los valores correspondientes al 2.5 % y 97.5% de la curva acumulada (nivel de confianza del 95 %). Las líneas discontinuas en 5 % y 50 % se añadieron como valores de referencia de un porcentaje muy bajo y alto respectivamente..... 32
- 20 **Probabilidad de salir de la plataforma con base en el porcentaje de las trayectorias que cruzaron la isóbata de los 200 m desde la plataforma continental hacia la región de aguas profundas entre abril-agosto y septiembre-marzo.** El porcentaje en cada polígono indica la proporción observada y el número de polígono es señalado en las esquinas. En los polígonos de color gris se observaron menos de 80 trayectorias. 34
- 21 **Porcentaje con intervalos de confianza al 95 % de las trayectorias que cruzaron desde la plataforma continental hacia la región de aguas profundas con respecto al total de las trayectorias evaluadas en los 13 polígonos del golfo de México en abril-agosto y septiembre-marzo.** El intervalo de confianza se conformó por los valores correspondientes al 2.5 % y 97.5% de la curva acumulada (nivel de confianza del 95 %). Las líneas discontinuas en 5 % y 50 % se añadieron como valores de referencia de un porcentaje bajo y alto respectivamente..... 35
- 22 **Ilustración de los porcentajes de salidas de la plataforma (rojo) y entradas a la plataforma (verde) respecto al total de trayectorias evaluadas en la plataforma/aguas profundas en 13 polígonos alrededor del golfo de México.** Las flechas y rectángulos sin rellenar indican las proporciones en los polígonos con menos de 80 trayectorias observadas. El tamaño de las flechas indica porcentajes entre 16-29 % (pequeño), 30-49% (mediano), ≥ 50 % (grande) y porcentajes ≤ 15 % se muestran en rectángulos. El número de cada polígono se indica en su interior. La línea roja indica la isóbata sin suavizar de 200 y 1500 m. 38

- 23 **Promedio del flujo perpendicular a las isóbatas observado por los derivadores superficiales (celdas de color verde o rojo) y en los anclajes (vectores en los cuadros cian) en el golfo de México.** El color verde (rojo) indica flujo promedio hacia la plataforma (aguas profundas). Los vectores promedio significativamente (no significativamente) diferentes de cero al 95 % de confianza se muestran en negro y azul (gris y magenta) para los datos de los derivadores y los anclajes respectivamente. Los vectores promedio de los derivadores se muestran para las celdas (malla de 1/3 de grado) con suficientes grados de libertad (n=4 en abril-agosto y n=5 en septiembre-marzo). Los cuadros de color cian indican las posiciones de los anclajes nombrados de A-I en sentido horario indicado en mayúsculas sobre el mapa, los anclajes A, C y D-I se encuentran en 130 m y el B en 500 m. La línea negra corresponde a la isóbata suavizada de 200 m. 41
- 24 **Promedios mensuales del flujo perpendicular a la isóbata con intervalos de confianza al 95 % observado en los anclajes en el oeste y sur del golfo de México entre 2008-2017.** Los valores positivos (negativos) indican flujos promedio en dirección de la plataforma hacia aguas profundas (de aguas profundas hacia la plataforma). Anclajes en la isóbata de 130 m (A,C,D-I) y 500 m (B). 45

Lista de tablas

Tabla		Página
1	Características técnicas de los derivadores superficiales evaluados en el golfo de México entre 1993-2018.....	11
2	Número de trayectorias originales y segmentos independientes que resultaron de la segmentación de trayectorias.....	26
3	Resultados del análisis de la probabilidad de entrar a la plataforma desde aguas en ambas entre abril-agosto y septiembre-marzo.....	32
4	Resultados del análisis de la probabilidad de salir de la plataforma hacia aguas profundas entre abril-agosto y septiembre-marzo.....	36
5	Dirección preferencial del intercambio entre la plataforma continental y la región de aguas profundas observada en abril-agosto con base en las proporciones y diferencias entre las probabilidades de entrada y salida de la plataforma.....	39
6	Dirección preferencial del intercambio entre la plataforma continental y la región de aguas profundas observada en septiembre-marzo con base en las proporciones y diferencias entre las probabilidades de entrada y salida de la plataforma.....	39

Capítulo 1. Introducción

El intercambio de agua superficial entre la plataforma continental y la región de aguas profundas (oceánica) desempeña un papel importante en las vías y tasas de redistribución de calor, nutrientes, carbono inorgánico y orgánico, contaminantes, etc. en los sistemas oceánicos y costeros (Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009; Brink, 2016).

En contraste con las regiones oceánicas, las plataformas continentales son regiones con una gran productividad biológica generada por los aportes de nutrientes de las surgencias costeras y las descargas fluviales (Lara-Lara et al., 2008), que sustentan el 90 % de las capturas de pesca globales (Pauly et al., 2002). En las desembocaduras de los ríos, las descargas fluviales son fuente de nutrientes y materiales terrígenos que son transportados a través de la plataforma hacia el océano favoreciendo su productividad biológica (Whitney et al., 2005, Figura 1). En las últimas décadas las descargas fluviales han incrementado su concentración de nitratos y fosfatos de fuente antropogénica, triplicándose entre 1970 y 1990 (Jennerjahn, 2012). En el delta del río Misisipi, la concentración de nutrientes en exceso (conocida como eutrofización) de las descargas fluviales, da origen a florecimientos algales masivos que pueden ser tóxicos y condiciones hipóxicas que alteran el funcionamiento de los ecosistemas costeros sobre todo en los meses de verano (Rabalais et al., 2002). En las regiones influenciadas por las descargas fluviales, el transporte de agua rica en nutrientes desde la plataforma hacia aguas oceánicas no solo contribuye a la fertilización del océano como se mencionó anteriormente, sino que además es importante para remover el exceso de nutrientes y materia orgánica en la plataforma (Le-Hénaff et al., 2019; Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009).



Figura 1. Imagen satelital de la descarga del río Misisipi y el derrame de petróleo (*Deepwater Horizon*) en el delta del Misisipi el 17 de mayo de 2010. Imagen de la NASA modificada. Jeff Schmaltz, MODIS Rapid Response Team.

Por otro lado, los ecosistemas costeros son susceptibles al arribo de contaminantes y materiales desde aguas profundas. La explotación de hidrocarburos en el golfo de México es una de las causas del aumento en la concentración de contaminantes en los ecosistemas marinos y costeros (Ponce-Vélez y Botello, 2005). Los derrames de petróleo ocurridos en el pozo Ixtoc 1 en junio de 1979 en la bahía de Campeche, México, y en el pozo Macondo en abril de 2010, a 40 km de la costa de Luisiana, EUA, ocasionaron grandes pérdidas económicas, ecológicas y humanas (Restrepo et al., 1982; Deepwater Horizon Natural Resource Damage Assessment Trustees, 2016). El petróleo derramado en el pozo Macondo fue transportado por las corrientes oceánicas, los vientos y las olas, desde aguas profundas hacia los ecosistemas costeros de México y Estados Unidos ocasionando impactos negativos en la ecología y economía de ambos países (Figura 1, Beyer et al., 2016; Sun et al., 2015; Turner et al., 2014). Otros impactos del transporte desde aguas profundas hacia la plataforma se han observado en las costas del Caribe, en las que a partir del 2011 se han registrado arribazones de sargazo (*Sargassum sp.*) proveniente del océano Atlántico tropical, provocando fuertes afectaciones al turismo, la pesca y a los ecosistemas costeros (Franks et al., 2011).

Las repercusiones ecológicas y económicas generadas por la distribución de sustancias nutrientes o contaminantes como el petróleo y de materiales como el sargazo, entre la plataforma y el océano, han dejado clara la necesidad de estudiar el intercambio entre ambas regiones. Este intercambio es posible debido al transporte de agua perpendicular a las isóbatas en combinación con transportes verticales, que es generado por diversos procesos físicos (Brink, 2016).

1.1 Procesos físicos que generan transporte de agua entre la plataforma continental y la región de aguas profundas

El transporte de agua perpendicular a las isóbatas que permite el intercambio de agua entre las regiones costeras y oceánicas es posible debido a los efectos de segundo orden en las ecuaciones de movimiento del océano. Los efectos de segundo orden dan origen a la componente ageostrófica de la circulación e incluyen procesos físicos con dependencia temporal, mezcla y disipación, efectos inerciales y aceleraciones verticales de los flujos (Bracco et al., 2019; Brink, 2016; Huthnance, 1995).

Los flujos perpendiculares a las isóbatas se caracterizan por valores grandes de vorticidad absoluta, campos fuertes de divergencia y/o convergencia, velocidades verticales altas y generan gradientes a través de las isóbatas de propiedades conservativas como la salinidad (Bracco et al., 2019, Figura 2).

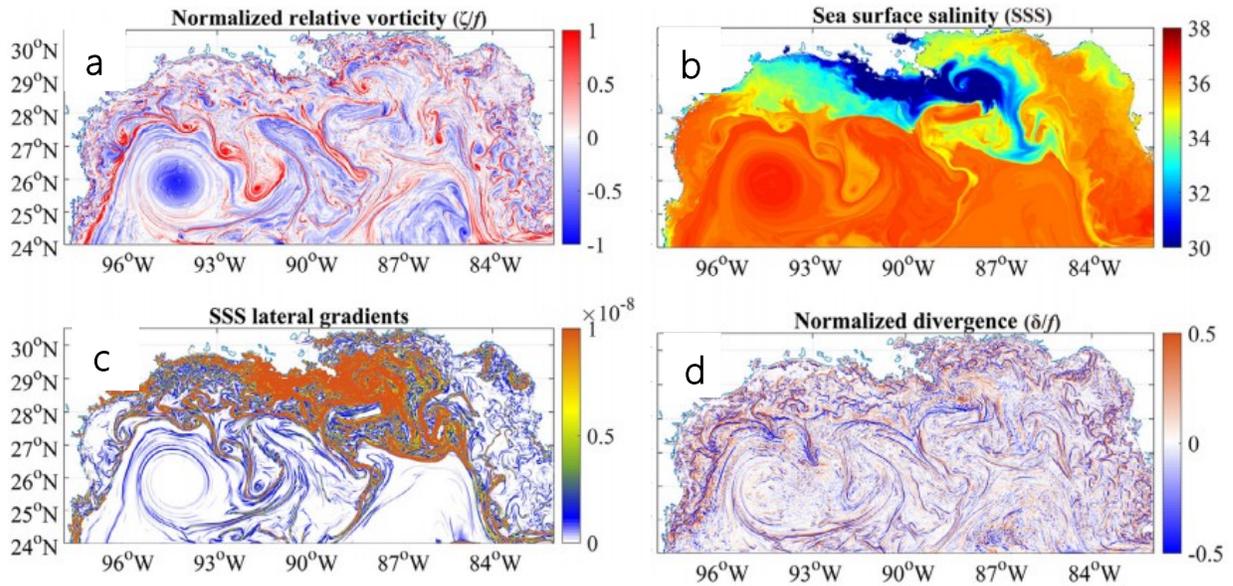


Figura 2. (a) Instantánea de la vorticidad relativa superficial modelada normalizada por el parámetro de Coriolis (ζ/f); (b) Campo de salinidad superficial (SSS), (c) gradientes de SSS; y (d) divergencia normalizada (δ/f) correspondientes para el 9 de agosto de 2015. Tomada de Bracco et al. (2019).

Existe una variedad de procesos físicos que favorecen el intercambio entre la región costera y el océano como: las surgencias y hundimientos costeros debidos al viento, las inestabilidades en las corrientes a lo largo de la costa, la propagación hacia el oeste de los remolinos de mesoescala y la circulación estuarina por descargas fluviales, entre otros (Mackas y Coyle, 2005). Una revisión más completa de los procesos físicos con transporte a través de las isóbatas puede consultarse en Huthnance (1995). A continuación, se describen los mecanismos que predominan en el golfo de México.

- **Surgencias y hundimientos costeros forzados por el viento**

El esfuerzo del viento sobre la superficie del mar genera una corriente superficial aproximadamente a 45° hacia la derecha (izquierda) de la dirección del viento en el hemisferio norte (sur), generada por el balance entre el gradiente de presión, la aceleración de Coriolis debido a la rotación del planeta y los esfuerzos turbulentos. Las capas de agua por debajo de la capa superficial

experimentan el arrastre del viento como resultado de los esfuerzos turbulentos y cada una se desvía hacia la derecha (hemisferio norte) haciéndose más lenta respecto a la capa superior por efectos de fricción, hasta un nivel aproximado a los 100 m donde la velocidad generada por el esfuerzo del viento es cero. El espesor de la columna de agua ($\sim 0-100$ m) en donde el esfuerzo del viento tiene influencia en las corrientes es conocido como capa de Ekman (Pond y Pickard, 1995).

El transporte de agua superficial integrado en la capa de Ekman es en dirección a 90° a la derecha (izquierda) de la dirección del esfuerzo del viento en el hemisferio norte (sur), y es conocido como transporte de Ekman (Pond y Pickard, 1995). Cuando el viento sopla a la derecha de la costa en el hemisferio norte, el transporte de Ekman en la capa superficial es hacia afuera de la costa y es compensado por agua que asciende de mayor profundidad, lo que genera un transporte hacia la costa en capas subsuperficiales (Figura 3a, arriba). A este proceso se le conoce como surgencia costera (Garrison, 2006) y se observa como gradientes de temperatura perpendiculares a la costa (Figura 3b). Por el contrario, viento a la izquierda de la costa en el hemisferio norte, produce transporte de Ekman hacia la costa en superficie y hundimiento de agua que genera transporte hacia afuera de la costa cerca del fondo (Figura 3a, abajo).

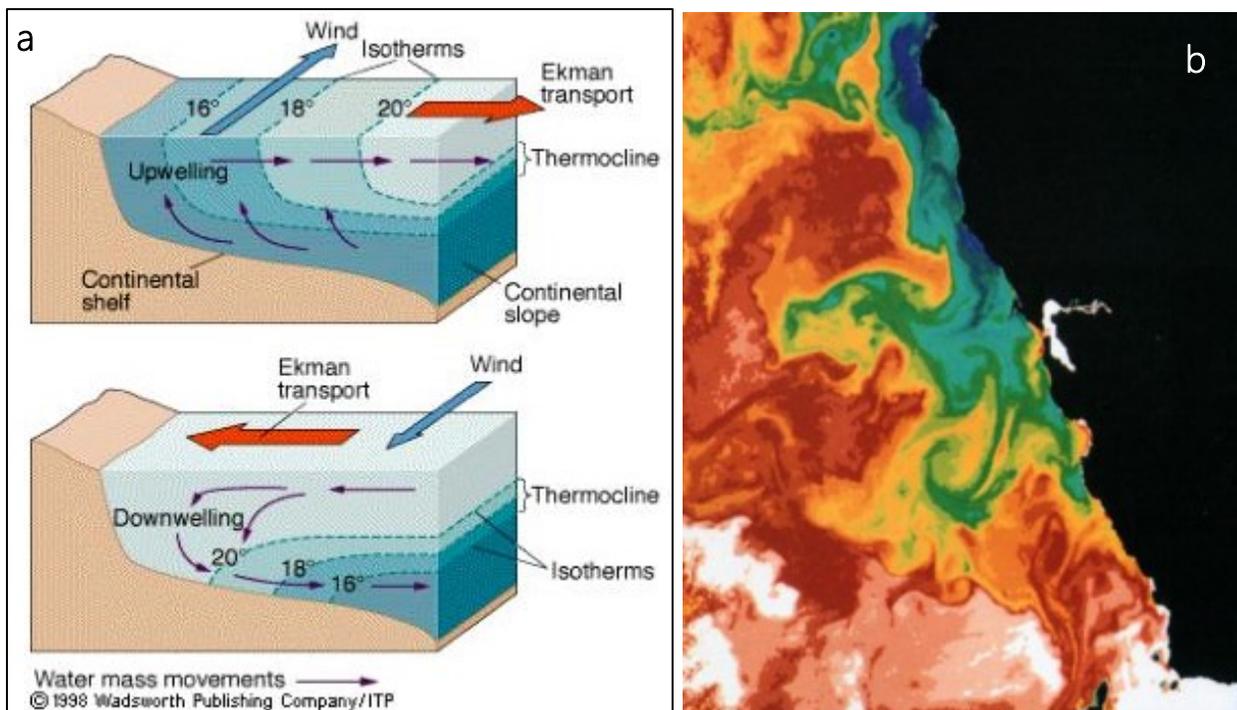


Figura 3. a) Ilustración del transporte de Ekman en una surgencia costera (arriba) y hundimiento (abajo) en el hemisferio norte ©1998 Wadsworth Publishing Company/ITP. b) Imagen satelital de temperatura superficial del mar durante un evento de surgencia en el que se observaron filamentos hacia el océano, tomada de Brink y Cowles (1991).

- **Efectos inerciales**

Las corrientes a lo largo de la costa predominantemente son forzadas por la componente del viento paralela a la costa y por gradientes de presión a través de la plataforma (Cushman-Roisin y Beckers, 2010). Cuando las corrientes a lo largo de la costa o el talud experimentan perturbaciones en su campo de velocidad, se generan inestabilidades. El mecanismo de las inestabilidades baroclínicas consiste en transferir energía potencial del gradiente de densidad a través de la costa hacia energía cinética en remolinos y meandros mediante interacciones no lineales (Thomson y Gower, 1998; ver también Pedlosky, 1979). Las perturbaciones a las velocidades de las corrientes incluyen los cambios abruptos en la dirección de los vientos e irregularidades en la geomorfología de la costa y la batimetría, los cuales originan meandros, remolinos, filamentos y chorros a través de la plataforma (Mackas y Coyle, 2005, ilustrado en Figura 3b). En las corrientes de frontera oeste, se genera transporte hacia el océano cuando estas se separan del talud continental (Brink, 2016).

La interacción de los remolinos de mesoescala con el talud continental es un mecanismo energético para el intercambio de agua entre la plataforma y el océano, en el que se ha observado que tiene la capacidad de transportar agua de la plataforma hacia el océano y viceversa por conservación de volumen (Cherian y Brink, 2016).

- **Circulación estuarina**

En las desembocaduras de los ríos, el agua dulce y menos densa proveniente de las descargas fluviales, mediante la mezcla por marea y viento, desplaza el agua oceánica en dirección hacia el océano en la superficie, y en profundidades mayores se produce un flujo de agua más densa (oceánica) hacia la costa (circulación estuarina positiva). Estos flujos a través de la costa generalmente son más pequeños que los generados por transporte de Ekman pero tienen repercusiones importantes en la distribución de salinidad, pigmentos fotosintéticos y organismos (Mackas y Coyle, 2005). El aporte de agua dulce además aumenta la estratificación vertical y produce gradientes horizontales, que favorecen la generación de filamentos, meandros y chorros (Figura 2b y Figura 3b).

1.2 Antecedentes

La mayoría de los estudios con observaciones *in situ* en los que se estudia el transporte de agua entre la plataforma y la región de aguas profundas se encuentran limitados a ciertas regiones del golfo de México, sobre todo en la región norte (Morey et al., 2003; Ohlmann y Niiler, 2005).

Ohlmann et al. (2001), analizaron de manera euleriana y lagrangiana las trayectorias de derivadores superficiales del proyecto SCULP distribuidas casi de manera homogénea en el norte del golfo para estudiar la influencia de los remolinos de mesoescala en el transporte entre la plataforma y la región de aguas profundas. El análisis euleriano consistió en el cálculo de las elipses de variabilidad de las velocidades de los derivadores distribuidas en una malla regular ($1/4^\circ$). Desde la perspectiva lagrangiana identificaron las zonas en las que ocurre mayor transporte entre la plataforma y la región de aguas profundas en el norte del golfo a partir de un análisis estadístico del porcentaje de las trayectorias de derivadores superficiales que cruzaron la isóbata de 200 m y 2000 m hacia la plataforma y hacia la región profunda en una malla regular de $1/4^\circ$. Las regiones identificadas en este estudio fueron el sur de la desembocadura del Río Misisipi, el sur de la plataforma de Texas-Luisiana y el noroeste y noreste del golfo, relacionadas a las zonas de mayor energía inducida por remolinos.

Por otro lado el transporte de agua a través de la plataforma en todo el golfo de México ha sido estudiado de manera euleriana solamente a partir de observaciones satelitales y modelación numérica. Martínez-López y Zavala-Hidalgo (2009) estudiaron la exportación de clorofila de la plataforma continental hacia el océano a partir de un análisis de los datos mensuales de imágenes satelitales del color del océano (nivel 3, SeaWiFs) y vientos de reanálisis (NCEP/NCAR) entre septiembre de 1997 y agosto de 2007. Observaron que el transporte de agua desde la plataforma hacia la región de aguas profundas es generado por la confluencia de las corrientes a lo largo de la costa en el sur de la bahía de Campeche sobre todo de octubre a noviembre y en el suroeste de la plataforma de Texas-Luisiana en mayo (Figura 4). Al sureste de la boca del Río Misisipi observaron un máximo de transporte hacia aguas profundas en julio debido a los vientos predominantes del suroeste en ese mes.

Asimismo, con un modelo de alta resolución (*Hybrid Coordinate Ocean Model*), Nieblas-Piquero (2019) analizó desde el punto de vista euleriano, los promedios mensuales del transporte de agua superficial (0-20 m) y subsuperficial (20-50 m) perpendicular a las isóbatas de 20 m, 30 m, 50 m, y 200 m a lo largo de toda la plataforma del golfo de México a partir de 21 años de corrientes modeladas numéricamente).

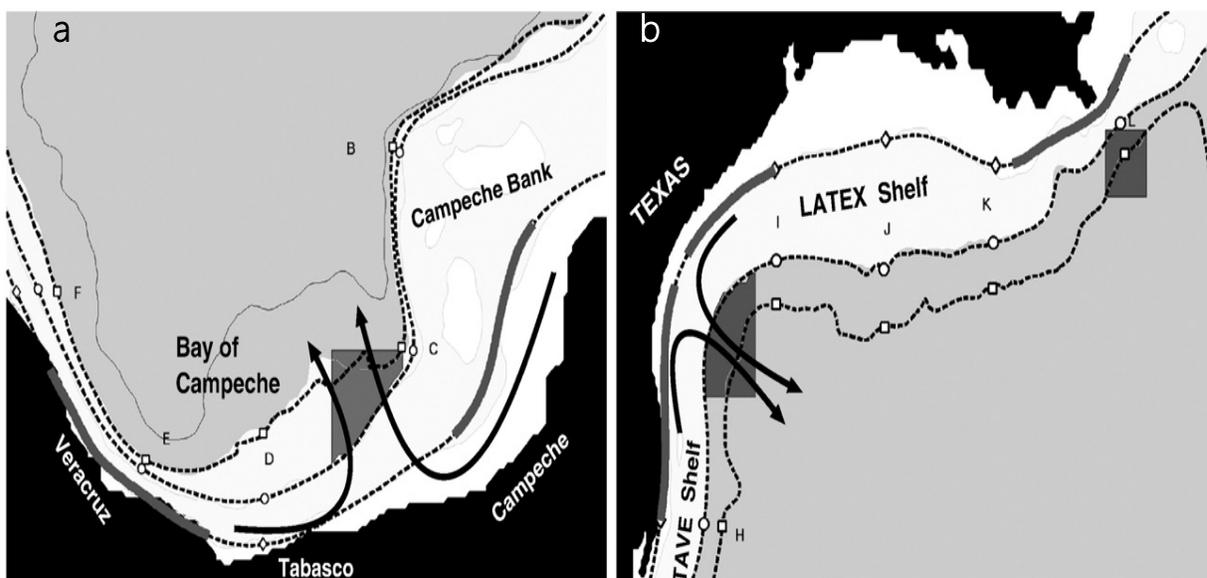


Figura 4. Regiones de convergencia de corrientes a lo largo de la costa en el golfo de México. a) Sureste de la bahía de Campeche y b) Suroeste de la plataforma de Texas. Las líneas punteadas corresponden a las isóbatas de 25, 200 y 1000 m. Tomada de Martínez-López y Zavala-Hidalgo (2009).

El transporte perpendicular a la isóbatas se presentó con mayor frecuencia en la isóbata de los 200 m, respecto a las isóbatas en la plataforma interna e intermedia. En la plataforma al sur de Texas, sur de la bahía de Campeche y en el norte del Banco de Campeche se observó transporte hacia el océano a lo largo de todo el año, mientras que el transporte hacia la plataforma se observó en la plataforma oeste de Florida, Tabasco y Veracruz y el oeste de la plataforma de Yucatán (Figura 5).

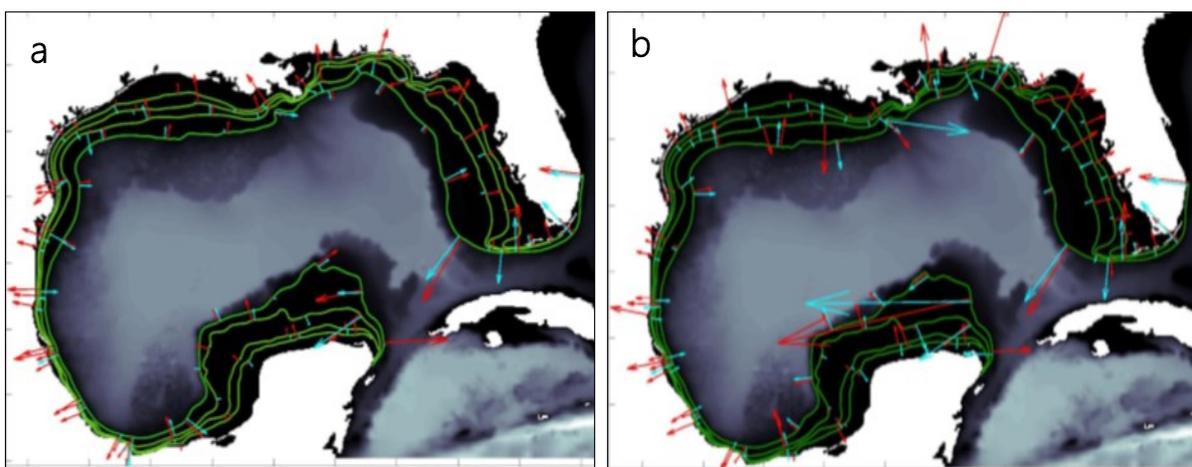


Figura 5. Promedio mensual climatológico del transporte perpendicular a las isóbatas en el golfo de México. a) Julio y b) Septiembre. Las flechas rojas (azules) corresponden a la capa superficial (subsupsuperficial) de 0-20 m (20-50 m). Las líneas verdes corresponden a las isóbatas de 20, 30, 50 y 200 m. Tomadas de Nieblas-Piquero (2019).

1.3 Justificación

El estudio del intercambio de agua superficial entre la plataforma continental y la región profunda del golfo de México es importante debido a que modula la concentración y la distribución de organismos o sustancias nutrientes y contaminantes tanto en mar abierto como en la plataforma, por lo que se requiere entender los procesos físicos involucrados dadas las posibles repercusiones ecológicas y económicas (Bracco et al., 2019; Brink, 2016).

La mayoría de los estudios en los que se habla del transporte de agua superficial entre la plataforma y el océano en el golfo de México con observaciones *in situ* están limitados a una región del golfo y/o están enfocados en ciertos procesos físicos (Ohlmann y Niiler, 2005; Ohlmann et al., 2001). Los trabajos que analizan todo el golfo son producto de observaciones satelitales o modelaciones numéricas (Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009; Nieblas-Piquero, 2019). No existe un estudio que describa y cuantifique el intercambio entre la plataforma y la región de aguas profundas a partir de observaciones *in situ* en todo el golfo de México. Por esta razón, surge la motivación de realizar un análisis euleriano y lagrangiano del intercambio superficial observado entre la plataforma continental y la región de aguas profundas, a partir de 20 años de derivadores superficiales distribuidos en la plataforma y talud continental, y los datos observados con perfiladores de corrientes en anclajes a lo largo del quiebre de la plataforma continental en el oeste y sur del golfo.

Una descripción euleriana y lagrangiana combinada permite obtener resultados más robustos, particularmente cuando se cuenta con una base de datos no homogénea tanto temporal como espacialmente, como en el caso de este estudio. Si ambos enfoques de estudio coinciden, los resultados obtenidos son más confiables. Desde un punto de vista euleriano el flujo se observa desde una posición fija, lo que permite obtener una descripción de la evolución temporal del flujo en un punto, mientras que desde un enfoque lagrangiano, se “sigue” a una partícula material moviéndose en el espacio para una mejor descripción de la dispersión de las partículas y es una medición directa del transporte entre diferentes regiones geográficas. Este estudio observacional podrá ser utilizado como base para la validación de los resultados de modelos numéricos, lo que es importante debido a que estos son herramientas poderosas para comprender los procesos responsables del intercambio, pero antes de poder utilizarlas es preciso asegurar que reproducen lo observado en la realidad.

No existe una única metodología lagrangiana definida para estudiar el intercambio entre la plataforma y la región de aguas profundas a partir de observaciones de trayectorias de derivadores

superficiales. En el norte del golfo de México, Ohlmann et al. (2001) analizaron el transporte entre la plataforma y la región de aguas profundas con un análisis estadístico de los porcentajes de las trayectorias que cruzaron por las isóbatas de 200 y 2000 m para identificar las regiones con mayor transporte a través de esas isóbatas. Las observaciones analizadas por Ohlmann et al. (2001) estaban distribuidas de manera homogénea a lo largo de las isóbatas analizadas, por lo que fue posible realizar el análisis en una malla regular de $1/4^\circ$. Dado que el muestreo de los derivadores superficiales en la base de datos disponible no fueron planificados con el objetivo de estudiar el intercambio entre la plataforma y el océano, la cobertura temporal y la distribución espacial de las trayectorias no es homogénea alrededor de todo el golfo, por lo que además es necesario desarrollar un método para cuantificar el intercambio a partir de la mayor cantidad de trayectorias posibles alrededor de todo el golfo.

1.4 Objetivo general

Cuantificar el intercambio de agua superficial entre la plataforma continental y la región de aguas profundas del golfo de México a partir de observaciones *in situ* desde los puntos de vista euleriano y lagrangiano.

1.4.1 Objetivos específicos

- Desarrollar una metodología para cuantificar el transporte de agua superficial entre la plataforma continental y la región profunda desde un enfoque lagrangiano a partir de trayectorias de derivadores superficiales en el golfo.
- Identificar las regiones y temporadas en las que es más probable entrar desde la región de aguas profundas hacia la plataforma continental.
- Identificar las regiones y temporadas en las que es más probable salir de la plataforma continental hacia la región de aguas profundas.
- Identificar las regiones y temporadas en las que se ha observado que el intercambio de agua superficial entre la plataforma y la región de aguas profundas tiene una dirección preferencial.

Capítulo 2. Datos y método

2.1 Datos

El intercambio de agua superficial entre la plataforma continental y la región de aguas profundas del golfo de México fue estudiado a partir de mediciones lagrangianas y eulerianas del flujo oceánico. Las mediciones lagrangianas correspondieron a una base de datos histórica de derivadores superficiales liberados alrededor del golfo, y las mediciones eulerianas correspondieron a corrientes observadas con perfiladores acústicos en anclajes en el oeste y suroeste del golfo. El objetivo de utilizar los dos tipos de datos consistió en complementar la información espacial del flujo medida por los derivadores distribuidos por todo el golfo, con las series temporales largas de las observaciones de corrientes limitadas a ciertos puntos en el espacio, para obtener una mejor descripción del flujo y evaluar el intercambio de aguas observado entre la plataforma y la región oceánica.

2.1.1 Mediciones lagrangianas de derivadores superficiales

Se analizaron 2 150 trayectorias de una base histórica de derivadores superficiales liberados en ocho experimentos realizados entre el año 1993 y el 2018 (Figura 6). La base de datos de los derivadores incluyó modelos de diferentes marcas comerciales, con distintos sistemas de rastreo y en general con sistemas de arrastre por arriba de los 50 m de profundidad (ver Tabla 1).

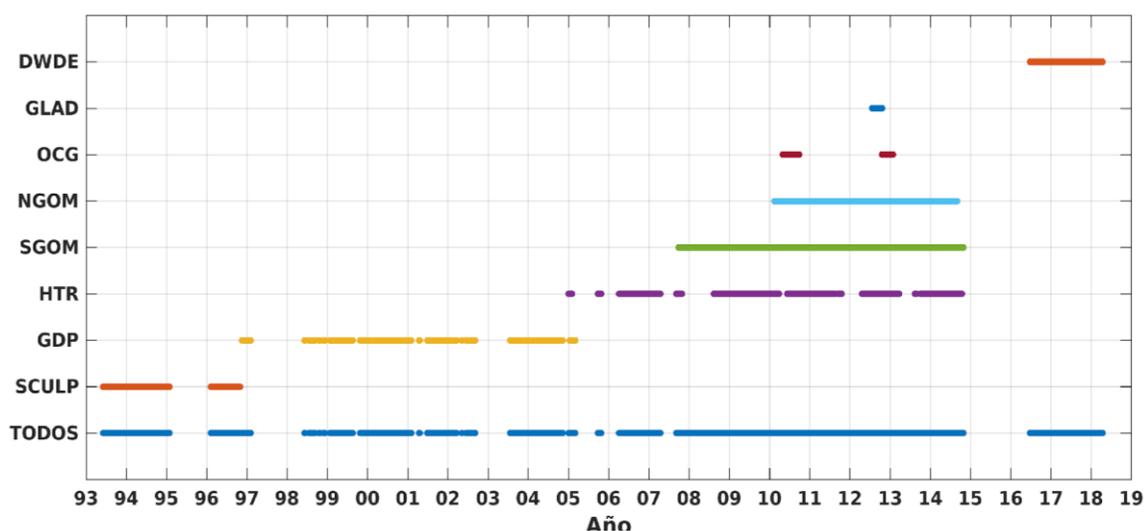


Figura 6. Cobertura temporal de los experimentos de derivadores superficiales en el golfo de México entre 1993-2018. DWDE: Deep Water Dispersion Experiment. GLAD: Grand Lagrangian Deployment. OCG: Ocean Circulation Group. NGOM: Northern Gulf of Mexico. SGOM: Southern Gulf of Mexico. GDP: Global Drifter Program. HTR: High-Temporal Resolution. SCULP: Surface Current and Lagrangian Drift Program.

Tabla 1. Características técnicas de los derivadores superficiales evaluados en el golfo de México entre 1993-2018.

Experimento	Modelo	Sistema de rastreo	Profundidad de arrastre (m)
SCULP	CODE	Argos	1
GDP	SVP	Argos	15
HTR	SVP	Argos	15
SGOM	FHD	GPS	45
NGOM	FHD	GPS	45
OCG	CODE	Argos	1
GLAD	CODE	GPS	1
DWDE	Microstar, CODE	GPS	1

DWDE: Deep Water Dispersion Experiment. GLAD: Grand Lagrangian Deployment. OCG: Ocean Circulation Group. NGOM: Northern Gulf of Mexico. SGOM: Southern Gulf of Mexico. GDP: Global Drifter Program. HTR: High-Temporal Resolution. SCULP: Surface Current and Lagrangian Drift Program.

Debido a que los flujos con cizalla pueden hacer que el sistema de arrastre de los derivadores oscile en la columna de agua y que el derivador mida profundidades más someras (Joseph, 2014), se asumió que las mediciones de los derivadores con arrastre a 1, 15 y 45 m correspondieron a observaciones dentro de una capa superficial de 45 m.

Más información acerca del muestreo, tipo de derivador, procesamiento, así como los modelos, sistemas y profundidades de arrastre (Tabla 1), se encuentra en las fuentes de los datos originales:

- **DWDE: *Deep Water Dispersion Experiment***. Experimento realizado por el Grupo de Investigación con Observaciones Lagrangianas de CICESE (<https://giola.cicese.mx/>).
- **GLAD: *Grand Lagrangian Deployment***. Base de datos pública (Özgökmen, 2013), disponible en <https://data.gulfresearchinitiative.org/data/R1.x134.073:0004> del Consorcio para la Investigación avanzada en el Transporte de Hidrocarburos en el medio ambiente (CARTHE, por sus siglas en inglés).
- **OCG: *Ocean Circulation Group***. Bases de datos disponibles para descarga como cortesía del Prof. R. H. Weisberg y el USF Ocean Circulation Group en: <ftp://ocgweb.marine.usf.edu/pub/Drifters/>.
- **NGOM: *Northern Gulf of Mexico* y SGOM: *Southern Gulf of Mexico***. Base de datos de PEMEX-CICESE (más detalles en Perez-Brunius et al., 2013).

- **GDP: *Global Drifter Program*.** Base de datos pública de la Administración Nacional de la Atmósfera y los Océanos (NOAA por sus siglas en inglés) de Estados Unidos, disponible en <https://www.aoml.noaa.gov/phod/gdp/index.php>. Resolución cada 6 horas (Lumpkin y Centurioni, 2019).
- **HTR: *High-Temporal Resolution*.** Del programa GDP de la NOAA, datos de mayor resolución temporal, sin interpolación cada 6 horas. Obtenido por comunicación personal con R. Lumpkin.
- **SCULP: *Surface Current and Lagrangian Drift Program*.** Detalles en Ohlmann y Niiler, (2005).

Las posiciones de los derivadores fueron interpoladas cada hora y las velocidades se obtuvieron mediante un esquema de diferencias centradas. Se aplicó un control de calidad para la eliminación de datos que no correspondieron a mediciones reales de corrientes como los registrados en tierra o mal geo posicionados y sobre embarcaciones (criterio de velocidades mayores a 300 cms^{-1}). El muestreo no fue temporal ni espacialmente homogéneo (Figura 6 y Figura 7), el norte del golfo estuvo más muestreado sobre todo en la plataforma de Texas y Luisiana (más de 4 000 datos horarios), mientras que en la plataforma continental mexicana fue evidente el bajo muestreo en la plataforma frente a Campeche y Yucatán (menos de 100 datos horarios). El muestreo en la región mexicana fue poco robusto por lo que los resultados fueron analizados bajo esta limitación.

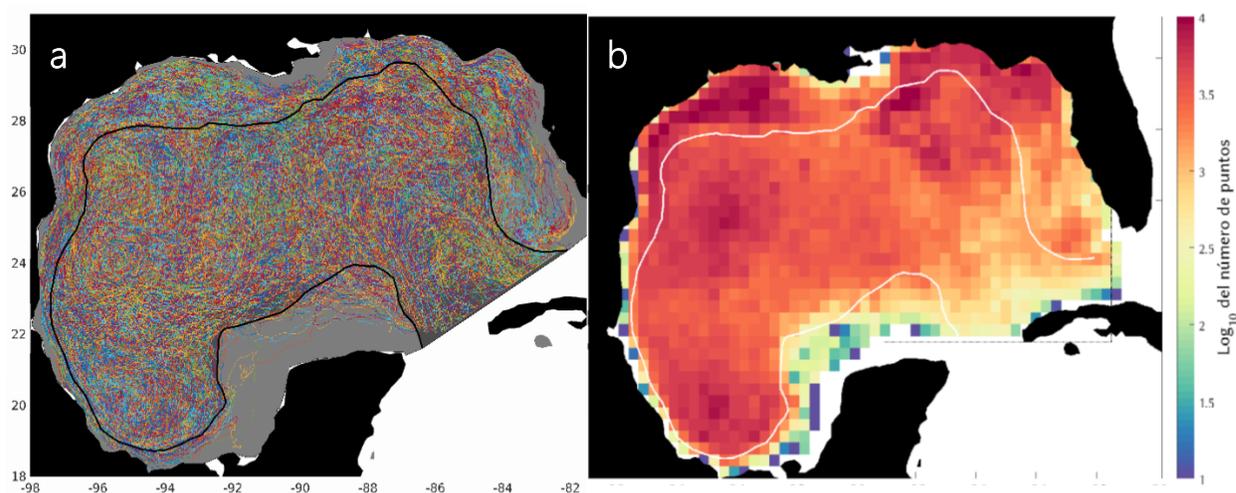


Figura 7. Cobertura espacial del muestreo de los derivadores superficiales en el golfo de México entre 1993 y 2018. a) Diagrama de espagueti de las trayectorias y b) Mapa de densidad de los datos horarios observados. Figura realizada con JLab de Lilly (2019). Se muestra la isóbata suavizada de 200 m.

2.1.2 Mediciones eulerianas de corrientes con perfiladores acústicos anclados

Se utilizaron los promedios horarios de las velocidades registradas por Perfiladores Acústicos de Corrientes por Efecto Doppler (ADCP por sus siglas en inglés) en una red de ocho anclajes colocados a lo largo de la isóbata de 130 m en el oeste y sur del golfo de México (anclajes A, C, D-I, Figura 8) y un anclaje en la isóbata de 500 m (anclaje B, Figura 8) localizado en el sureste de la bahía de Campeche donde no se tuvo instrumentación en la isóbata de 130 m. Las mediciones de las corrientes en los anclajes en la isóbata de 130 m fueron registradas con perfiladores *Workhorse* 300 kHz de *RD Instruments* instalados a 14 m del fondo orientados hacia arriba que registraron las velocidades promediadas en intervalos de 8 m (tamaño de celda) hasta la superficie. Las corrientes en el anclaje en la isóbata de los 500 m fueron perfiladas por un *Workhorse* 300 kHz instalado a los 115 m orientado hacia arriba que registró los promedios de las velocidades observadas dentro de celdas de 8 m de longitud hasta la superficie. Después de eliminar los datos contaminados por eco con la superficie en los primeros 10-15 m de profundidad, los datos fueron interpolados en la vertical cada cinco metros. En este estudio se analizó solamente el nivel más superficial con mayor cobertura temporal común en todos los anclajes que fue a los 30 m. La cobertura temporal de los datos a 30 m puede observarse en la Figura 9.

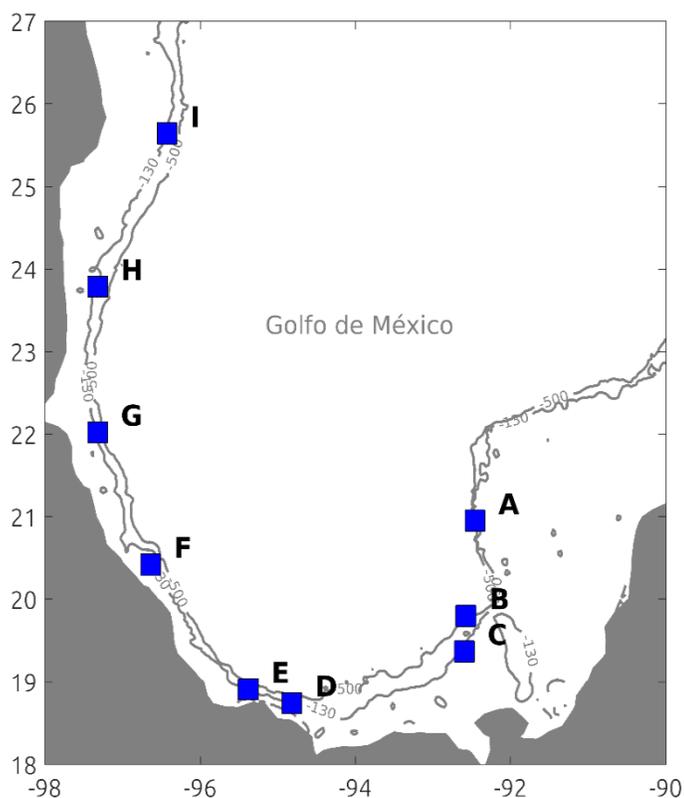


Figura 8. Posición geográfica de los anclajes con perfiladores acústicos de corrientes en el sur y oeste del golfo de México. Las isobatas de 130 m y 500 m se muestran con líneas grises.

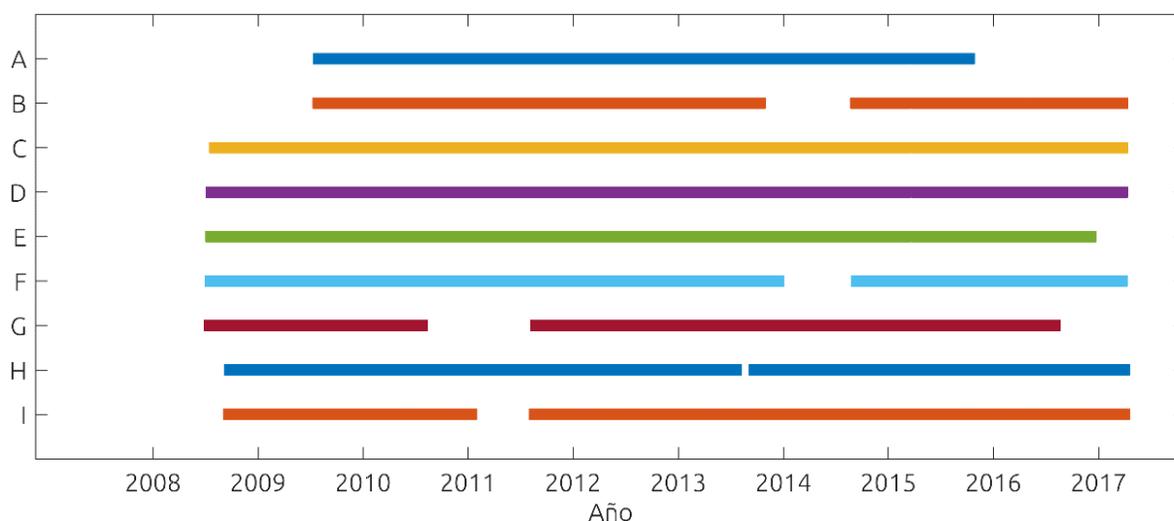


Figura 9. Cobertura temporal de las mediciones de corrientes observadas en el nivel de 30 m de profundidad con perfiladores acústicos de corrientes en los anclajes en el sur y oeste del golfo de México entre 2008 y 2017.

2.2 Métodos

Para identificar las regiones en las que es más probable entrar y salir de la plataforma, se calculó la probabilidad mediante el método *Bootstrap* a partir del porcentaje de las trayectorias que cruzaron la isóbata de los 200 m desde aguas profundas hacia la plataforma y viceversa, en 13 polígonos alrededor de la plataforma y el talud del golfo (ver 2.2.1).

El intercambio de agua (transporte tanto desde la plataforma hacia aguas profundas como de aguas profundas hacia la plataforma) se cuantificó desde las perspectivas euleriana y lagrangiana. Por un lado, el análisis lagrangiano consistió en la comparación de las probabilidades de que los derivadores crucen desde la región de aguas profundas hacia la plataforma y viceversa (ver 2.2.1) y el análisis para identificar una dirección preferencial en el intercambio (ver 2.2.2.1). Por otro lado, el promedio euleriano del flujo perpendicular a las isóbatas observado por los derivadores y por los perfiladores de corrientes anclados se analizó para determinar la dirección promedio que prevalece en el intercambio (ver 2.2.2.2). Se esperó que los promedios eulerianos del flujo indicaran una dirección preferencial de intercambio (hacia la plataforma o aguas profundas), que coincidiera con la dirección de mayor probabilidad de entrada-salida de la plataforma, si el muestreo fue robusto (muchas observaciones) y homogéneo en tiempo y espacio en ambos tipos de mediciones (eulerianas y lagrangianas). Esto es, si el promedio euleriano dio un valor alto hacia la plataforma, se esperó que la probabilidad de entrar a la plataforma fuera mayor que la de salir de ella. Mientras que si el promedio euleriano fue bajo, se esperó que las probabilidades fueran similares en ambas direcciones. Dado que la distribución espacial y las

coberturas temporales de los datos lagrangianos y eulerianos estuvieron limitadas, se tuvo mayor certeza de los resultados en las regiones donde ambos análisis coincidieron.

Las temporadas de septiembre-marzo y de abril-agosto, se estudiaron con base en la variabilidad estacional de los vientos a lo largo de la costa en el golfo de México (Zavala-Hidalgo et al., 2003), los cuales favorecen la generación de transporte entre la plataforma y la región de aguas profundas debido a convergencias a lo largo de la costa de las corrientes (Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009).

2.2.1 Probabilidad de entrar y salir de la plataforma

La probabilidad de entrar o salir de la plataforma se infirió con el método *Bootstrap* en 13 polígonos alrededor del talud y la plataforma del golfo de México a partir de la proporción de las trayectorias de los derivadores superficiales que cruzaron la isóbata suavizada de los 200 m desde la plataforma hacia aguas profundas y viceversa (2.2.1.3). Las probabilidades se clasificaron de manera cualitativa y arbitraria en: muy baja ($\leq 15\%$), baja ($16 \leq \% < 30$), alta ($30 \leq \% < 50$) y muy alta ($\geq 50\%$), con el objetivo de facilitar la interpretación de los resultados e identificar las regiones con las probabilidades más altas.

El límite entre la plataforma continental y la región de aguas profundas del golfo de México se eligió con base en la isóbata en la que comienza el quiebre de la plataforma, donde los gradientes de la batimetría son altos. El quiebre de la plataforma se identificó con base en los gradientes de la batimetría de la base de datos de ETOPO2 (Smith y Sandwell, 1997) distribuida en una malla regular con resolución de 2' (disponible en <https://doorg/10.5065/D6668B7>). Con base en el mapa del gradiente de la batimetría (Figura 10), la isóbata de 200 m resultó ser una buena representación del comienzo del quiebre de la plataforma en la mayoría de las regiones alrededor del golfo. La isóbata de 200 m se suavizó mediante el promedio de los vecinos cercanos y se determinó como el límite marino de la plataforma continental (0-200 m), mientras que las zonas de mayor profundidad a 200 m se definieron como la región de aguas profundas (> 200 m) incluyendo el quiebre y el talud continental.

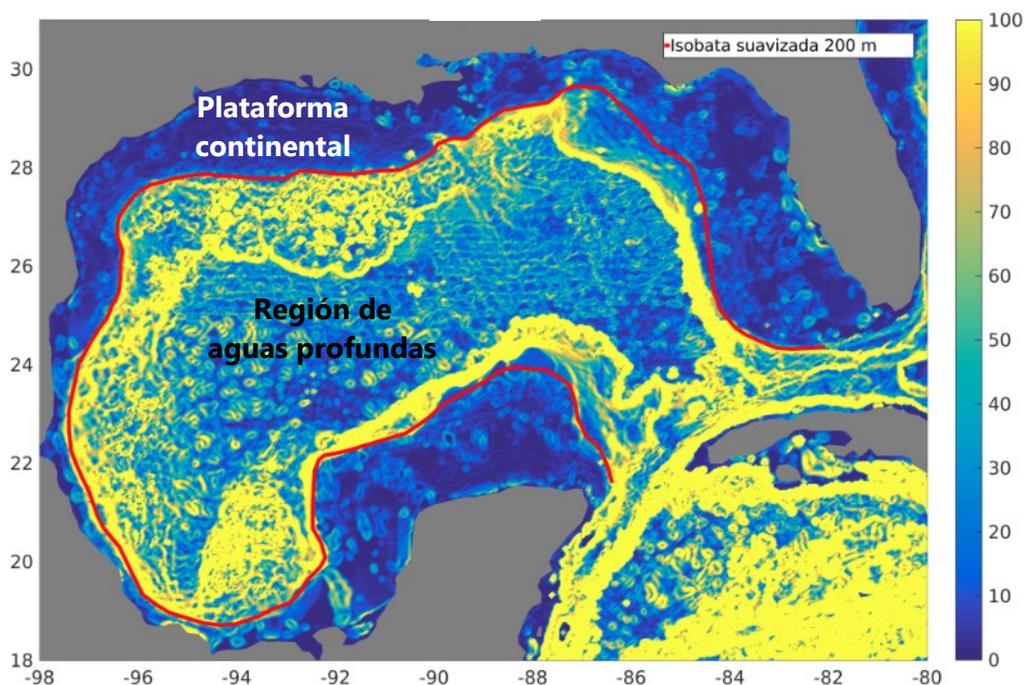


Figura 10. Gradiente de la batimetría del golfo de México. Los gradientes altos (amarillos) indican las pendientes altas de la profundidad del fondo. La línea roja representa la isóbata de 200 m suavizada, que se encuentra en el límite somero de la zona de altas pendientes del talud continental. Figura realizada con las herramientas de Lilly (2019).

2.2.1.1 Segmentación de las trayectorias de los derivadores con base en el cruce de la isóbata de 200 m

Ohlmann et al., (2001) realizaron un análisis estadístico de las trayectorias de derivadores que cruzaron la isóbata de los 200 m hacia la plataforma o aguas profundas y permanecieron un periodo mínimo de 14 días del otro lado, para estudiar los movimientos generados por remolinos de mesoescala. En este estudio no se limitó la permanencia de los derivadores del otro lado de la isóbata a un periodo asociado a un proceso físico en específico con el fin de reportar las observaciones en general. Sin embargo, se ha observado que las trayectorias de los derivadores describen movimientos de “serpenteo” a lo largo del talud en el suroeste del golfo (Comunicación personal con Zavala-Sansón), generando múltiples cruces por la isóbata que pueden ocurrir en la misma o en distinta región y que cada cruce puede durar horas o días y volver a ocurrir después de transcurrido mucho tiempo (semanas, ilustrado en Figura 11). Los múltiples cruces a lo largo del talud muchas veces no logran penetrar a la plataforma o a la región oceánica un tiempo suficiente para cambiar sus propiedades (temperatura, salinidad, etc.) por lo que en realidad ese transporte no representa un intercambio efectivo entre ambas

regiones; por este motivo fue necesario contemplar un periodo mínimo de permanencia del derivador del otro lado después de cruzar la isóbata de 200 m.

El “cruce efectivo” se definió cuando el derivador permaneció del otro lado de la isóbata de 200 m un periodo mínimo después de cruzarla, suficiente para “olvidar” de dónde provino. Este periodo mínimo es el tiempo de correlación lagrangiana o tiempo integral, que es un indicador del tiempo en que la partícula tiene memoria o “recuerda” de donde provino y se define como la integral de la autocorrelación normalizada (LaCasce, 2008):

$$Ti = \int_0^{\infty} R(\tau) d\tau \quad (1)$$

donde R es la autocorrelación normalizada de la velocidad. Dimarco et al. (2005) calcularon esta escala de tiempo para derivadores superficiales en el golfo de México y observaron un pico de frecuencia en los 3.5 días. En este trabajo, se utilizó un tiempo de 3 días para todo el golfo como tiempo suficiente para que la partícula olvide de donde provino y cambie sus propiedades, por lo que después de transcurrido ese tiempo es considerada como una observación independiente de lo observado 3 días atrás (ilustrado en la Figura 11).

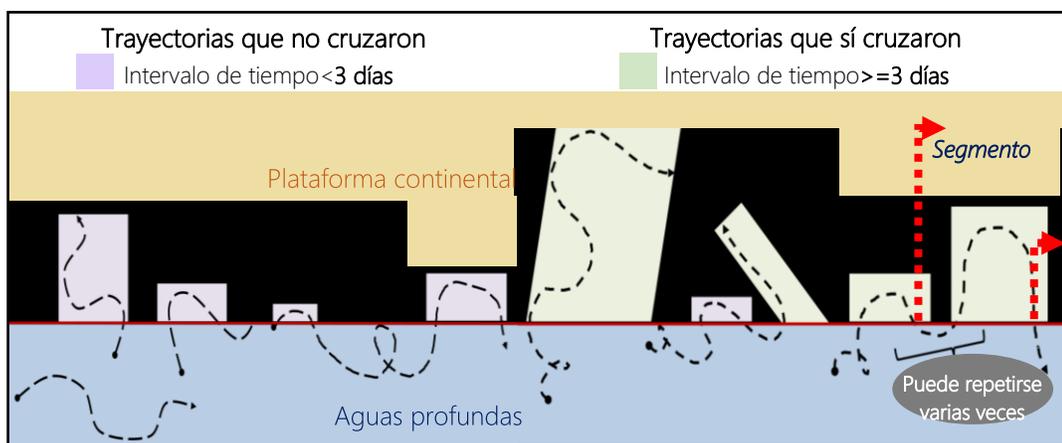


Figura 11. Ilustración de ejemplos de trayectorias de derivadores que no cruzaron (izquierda) y sí cruzaron (derecha) la isóbata de los 200 m de la región de aguas profundas hacia la plataforma continental con base en el tiempo del otro lado (mínimo 3 días). La flecha roja punteada indica el punto inicial del segmento independiente. La línea continua roja simboliza la isóbata de los 200 m.

Las trayectorias de los derivadores se agruparon en dos conjuntos de datos con base en la región en la que iniciaron (plataforma o aguas profundas); debido a que en el territorio mexicano del golfo no se han liberado derivadores en la plataforma continental, se consideraron pseudo lanzamientos de

derivadores en la plataforma cuando los derivadores liberados en aguas profundas entraron a la plataforma, desde la primera posición adentro de la plataforma hasta la posición final de la trayectoria. Para evitar que la duración de las trayectorias de los pseudo lanzamientos en la plataforma fuera muy corta y disminuir el sesgo hacia las trayectorias que no cruzaron la isóbata debido a que el derivador dejó de transmitir su posición antes de registrar un cruce, se realizó un análisis de sensibilidad del porcentaje de las trayectorias que no cruzaron la isóbata respecto al total de trayectorias observadas en función de la duración de la trayectoria (Anexo A). Con base en el análisis de sensibilidad realizado, se decidió evaluar solo las trayectorias que tuvieron una duración (tiempo de vida) de al menos 9 días, para eliminar las trayectorias muy cortas que no registraron cruces debido a su corta duración.

Para evaluar la mayor cantidad de cruces independientes posibles a lo largo de la plataforma del golfo, las trayectorias de los derivadores se segmentaron en intervalos independientes con base en los “cruces efectivos”. Cada una de las trayectorias se examinó para extraer segmentos de trayectorias independientes con un método propuesto que es descrito en el diagrama de flujo de la Figura 12 (ilustrado en la Figura 11), del cual se obtuvieron los subconjuntos de las trayectorias que sí cruzaron y las trayectorias que no cruzaron, con base en la permanencia de 3 días (tiempo integral) del otro lado de la isóbata y un tiempo de vida (duración) de al menos 9 días. Ambos subconjuntos de trayectorias se analizaron para evaluar de forma independiente el transporte de plataforma hacia aguas profundas por un lado, y de la región oceánica hacia la plataforma por el otro.

2.2.1.2 Delimitación de los polígonos evaluados

El transporte entre la plataforma y la región de aguas profundas ha sido estudiado de manera equitativa en celdas de mallas regulares (Ohlmann et al. 2001) o en longitudes iguales de isóbata (Nieblas-Piquero, 2019). Debido a las características no homogéneas de la cobertura espacial y temporal del muestreo de los derivadores (Figura 6 y Figura 7), se sacrificó resolución espacial para obtener resolución estacional. Con base en una regionalización utilizada en estudios previos de conectividad en el golfo de México en los que se contemplan los límites geográficos y rasgos dinámicos del golfo (comunicación personal, Rodríguez-Outerele et al. (2020)) se delimitaron 13 polígonos de estudio alrededor del golfo.

m, por lo que se extendió el límite profundo hasta los 3000 m con el fin de ampliar el área de observación. Los 13 polígonos contuvieron diferentes longitudes de isóbata suavizada de 200 m (ver Anexo B) por lo que los resultados no son directamente comparables entre los polígonos.

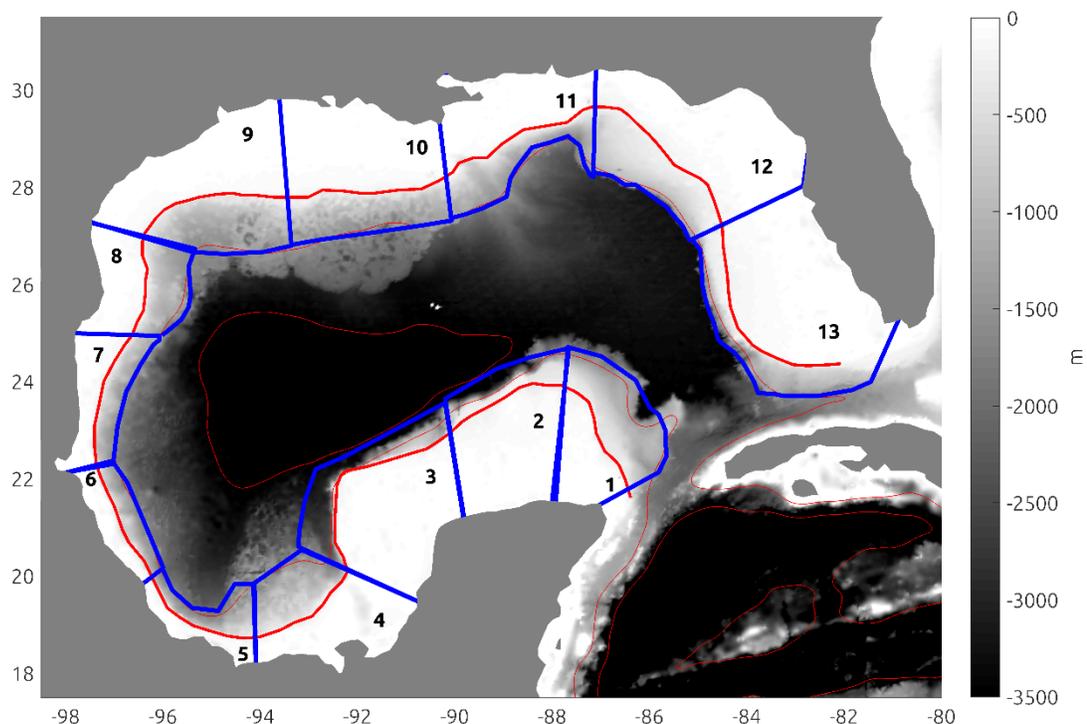


Figura 13. Polígonos que delimitan las áreas de plataforma y aguas profundas evaluadas en el golfo de México. La línea gruesa roja representa la isóbata suavizada de 200 m y las líneas rojas delgadas representan las isóbatas suavizadas de 1500 m y 3000 m. La batimetría se muestra en escala de grises.

En Yucatán y Florida (polígonos 1 y 13), las trayectorias están cortadas en las fronteras de las bocas del golfo con el Caribe (ver Figura 7a). Esto podría generar una subestimación de las proporciones de trayectorias que entran y salen de la plataforma en ambas regiones por lo que no se evaluó el intercambio con el Caribe y el resultado se examinó bajo esa limitación.

2.2.1.3 Método *Bootstrap* para inferir la probabilidad de entrar o salir de la plataforma continental.

En cada uno de los polígonos de la Figura 13 se cuantificaron las trayectorias que no cruzaron la isóbata de los 200 m y las que sí la cruzaron, ya sea para salir o entrar a la plataforma, obtenidos a partir del método descrito en la Figura 12. El análisis se hizo en dos temporadas: de septiembre a marzo y de abril a agosto con base en los meses en los que los vientos a lo largo de la plataforma tienen la misma

dirección predominante y en los que las convergencias estacionales de las corrientes a lo largo de la costa favorecen el transporte a través de la plataforma (Zavala-Hidalgo et al., 2003; Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009). Para cada temporada se calculó la proporción de trayectorias que cruzaron la isóbata de los 200 m desde la plataforma hacia la región de aguas profundas (y viceversa):

$$\text{Proporción} = \frac{\text{No. de trayectorias que sí cruzan}}{\text{No. de trayectorias que sí cruzan} + \text{No. de trayectorias que no cruzan}} \times 100 \quad (2)$$

Las probabilidades de que una partícula entre o salga de la plataforma fueron inferidas con base en los porcentajes de las trayectorias que cruzaron la isóbata de los 200 m desde la región de aguas profundas (200-1500 m) hacia la plataforma continental (0-200 m) y viceversa, mediante el método *Bootstrap*. El método *bootstrap* consiste en generar una estimación empírica de la distribución de muestreo en el que a partir de una muestra original de tamaño N que se toma como población, se realiza un procedimiento tipo Monte Carlo para generar un número grande de nuevas muestras (cada una de tamaño N) producto de un muestreo al azar con reemplazo de la muestra original (Chen, 2019). En este caso, para cada uno de los 13 polígonos y para cada temporada, la población fue el conjunto de trayectorias observadas con una proporción asociada de las trayectorias que cruzan la isóbata de los 200 m con respecto al total de trayectorias. El conjunto de trayectorias observado en cada región fue representado numéricamente por un vector de tamaño N con valores de 1 para las trayectorias que sí cruzaron y 0 para las trayectorias que no cruzaron hacia el otro lado de la isóbata. A partir de la población (vector de 1 y 0) se generaron por muestreo al azar y con reemplazo, 1000 muestras de tamaño N que representaron conjuntos de trayectorias con diferentes proporciones asociadas. La distribución de proporciones (Figura 14a) calculadas por *Bootstrapping* y la curva de distribución acumulada (Figura 14b), se utilizaron para construir el intervalo de confianza al 95 %, delimitado por las proporciones en el 2.5 % y 97.5 % de la distribución acumulada.

La probabilidad de entrar o salir de la plataforma se clasificó en una escala cuantitativa de manera arbitraria en: muy baja ($\leq 15\%$), baja ($16 \leq \% < 30$), alta ($30 \leq \% < 50$) y muy alta ($\geq 50\%$) con el objetivo de facilitar la interpretación de los resultados.

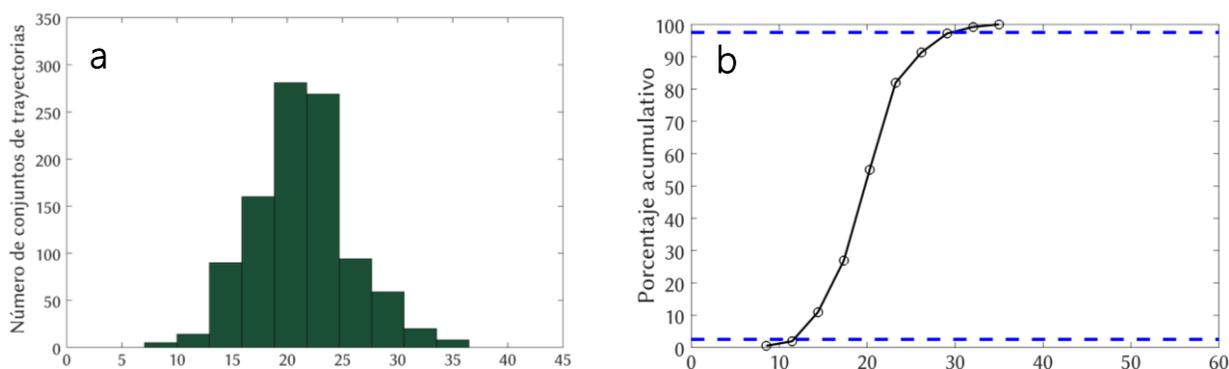


Figura 14. Distribución de las proporciones de trayectorias que entraron a la plataforma continental desde aguas profundas calculadas con *Bootstrap* a partir de la proporción observada (a) y su curva de distribución acumulada (b). Las líneas discontinuas azules indican el intervalo entre el 2.5 y 97.5 % acumulado.

2.2.2 Dirección preferencial en el intercambio entre la plataforma y la región de aguas profundas

El intercambio entre la plataforma y la región profunda se evaluó a partir de un análisis lagrangiano y euleriano con el objetivo de obtener una mejor descripción del transporte entre ambas regiones. Por un lado, se realizó la comparación y cuantificación de las diferencias entre las probabilidades de entrar y salir de la plataforma, inferidas en un análisis lagrangiano con el objetivo de identificar las regiones con una dirección preferencial del intercambio (2.2.2.1). Por otro lado, desde el punto de vista euleriano se calcularon los promedios del flujo perpendicular a las isóbatas observado en los anclajes y por los derivadores distribuidos en una malla regular de $1/3^\circ$ del cual se obtuvo la dirección promedio entre la plataforma y la región de aguas profundas (2.2.2.2). Se analizaron las mismas temporadas que para el análisis lagrangiano: de septiembre a marzo y de abril a agosto.

2.2.2.1 Análisis lagrangiano

La dirección preferencial en el intercambio entre la región de aguas profundas y la plataforma fue determinada a partir de la comparación de los resultados de la probabilidad de cruzar la isóbata de los 200 m hacia la región de aguas profundas y hacia la plataforma (entrar o salir de la plataforma), descritos en 2.2.1.3.

Para cuantificar las diferencias entre la probabilidad de salir o entrar a la plataforma, se calculó la razón entre el porcentaje más alto y el porcentaje más bajo dependiendo el caso en cada polígono, y la

diferencia en porcentaje de ambas probabilidades. De manera arbitraria se estableció que existe una dirección preferencial cuando una probabilidad es 1.5 veces mayor y 15 % más alta, respecto a la otra probabilidad.

2.2.2.2 Análisis euleriano

El análisis euleriano del intercambio de agua entre la plataforma y la región de aguas profundas se realizó para determinar la dirección del flujo promedio perpendicular a las isóbatas observada por derivadores y perfiladores de corrientes que prevalece en la plataforma y el talud del golfo en las temporadas de septiembre-marzo y abril-agosto.

2.2.2.2.1 Promedios en malla de las velocidades perpendiculares a las isóbatas de los derivadores superficiales

Los datos de las velocidades horarias observadas por los derivadores superficiales (2.1.1) se proyectaron en la dirección perpendicular a las isóbatas (ETOPO2, suavizada por método del promedio de vecinos cercanos, disponible en <https://doorg/10.5065/D6668B7>). Los grados de libertad (GdL) de los datos en cada celda de la malla se calcularon mediante la expresión:

$$GdL = \frac{\text{Número de días únicos}}{\text{Tiempo integral}} \quad (3)$$

donde los días únicos fue la cantidad de días distintos en los que hubo mediciones (independiente del número de horas muestreadas) en cada celda y el tiempo integral está definido en la ecuación 1. Los grados de libertad para cada mes se presentan en la Figura 15.

Los promedios temporales y espaciales de la componente perpendicular a las isóbatas de las velocidades se calcularon por mes sin distinción anual, p. ej. el promedio mensual de enero es el promedio de todos los datos de enero independientemente del año muestreado. El promedio de los datos por mes busca evitar que los meses con mayor número de mediciones tengan mayor peso sobre el promedio, por lo que se obtiene un promedio más equitativo para la temporada. Los promedios mensuales no toman en cuenta en qué año se registraron más observaciones, por lo que el promedio del mes sí puede estar sesgado a un evento en específico de algún año. El promedio de las velocidades

perpendiculares a la isóbata por temporada se calculó promediando los valores de los meses de cada temporada, es decir los promedios mensuales de abril a agosto y los de septiembre a marzo. Los vectores promedio solo se calcularon para los puntos de malla con más de tres grados de libertad (definidos en la expresión 4). El número de observaciones independientes (n) de los datos a promediar se definió como:

$$n = \text{Número de meses con más de tres grados de libertad (definidos en 3)} \quad (4)$$

y se realizó una prueba de t de Student en la que los vectores promedio son significativamente distintos de cero al 95 % si se encuentran dentro del intervalo de confianza definido como:

$$\bar{X} - t_{n-1} \sqrt{\frac{S}{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + t_{n-1} \sqrt{\frac{S}{n}} \quad (5)$$

μ Media poblacional

\bar{X} Media de la muestra

t_{n-1} Valor crítico de la distribución t de Student con $n-1$ grados de libertad para una significancia del 95%.

S Desviación estándar de la muestra.

n No. de observaciones independientes (definido en la expresión 4).

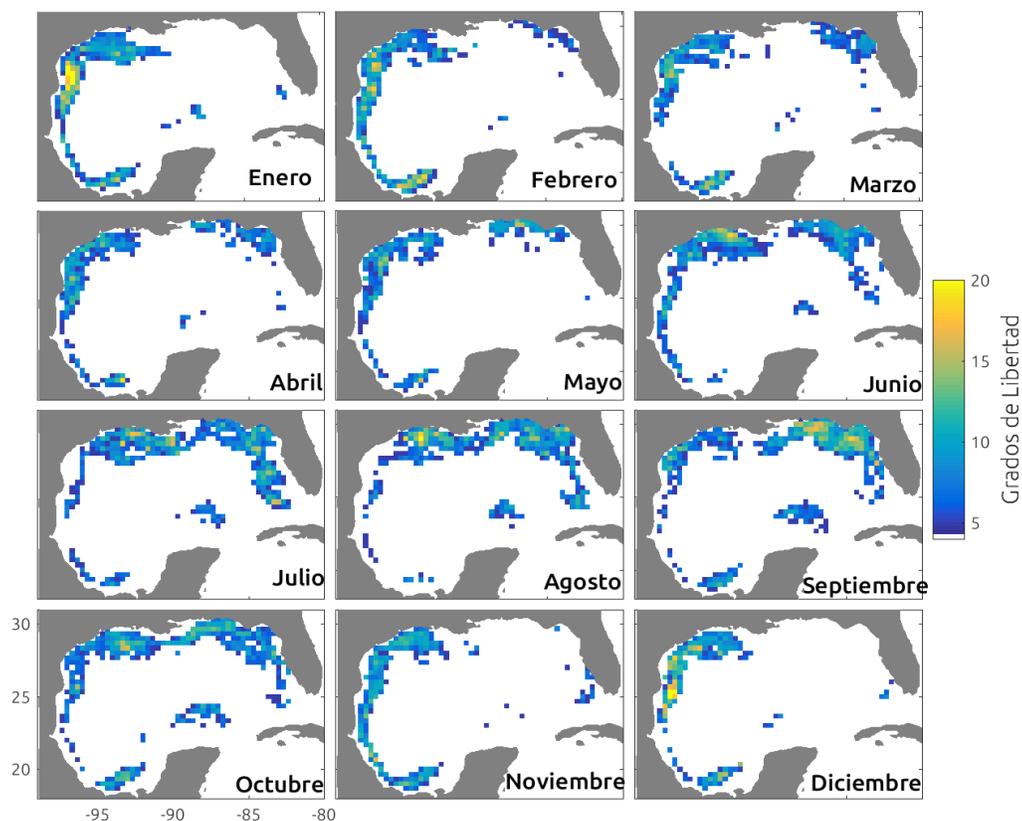


Figura 15. Grados de libertad mensuales de los datos observados por los derivadores superficiales entre los 0-1000 m de profundidad en el golfo de México en una malla de resolución espacial de $1/3^\circ$. Figura realizada con las herramientas de Lilly (2019).

2.2.2.2.2 Promedios de las velocidades de las corrientes observadas en los anclajes

Las velocidades a 30 m de profundidad observadas en los perfiladores de corrientes (correspondiente a las velocidades más superficiales medidas) fueron proyectadas en la dirección del gradiente de la batimetría (ETOPO2, disponible en <https://doorg/10.5065/D6668B7>, suavizada con el método del promedio de vecinos cercanos) correspondiente en cada una de las posiciones de los anclajes. El número de observaciones independientes (n) de los datos en los anclajes se calculó dividiendo el número de observaciones horarias entre el tiempo integral (T):

$$n = \frac{\text{No. observaciones horarias}}{T} \quad (6)$$

El tiempo integral (T) se obtuvo integrando la función de auto covarianza $C(\tau)$ de la magnitud de la velocidad hasta un 0.1 % de la duración de la serie dividida entre la covarianza a lag cero $C(0)$ de acuerdo con Emery y Thompson (2014):

$$T \cdot C(0) = \int_{-\infty}^{\infty} C(\tau) d\tau \quad (7)$$

El tiempo integral promedio en ambas temporadas fue de 3 días para los anclajes en la bahía de Campeche (etiquetados como A, B, C, D y E) y de 7 días para los anclajes en la plataforma de Veracruz y Tamaulipas (F, G, H, I).

Para determinar si los vectores promedio fueron significativos al 95 % de confianza, se realizó la prueba de t de Student definida en la expresión (5) de la sección 2.2.2.2.2.

Capítulo 3. Resultados

3.1 Distribución espacial y temporal de los segmentos de las trayectorias independientes de los derivadores

De un total de 2 150 trayectorias superficiales originales de los derivadores se dividieron en 1 769 trayectorias que iniciaron en la región de aguas profundas y 1 531 trayectorias que iniciaron en la plataforma continental (Tabla 2). La suma entre estos dos conjuntos fue mayor al total debido a que una trayectoria original que inició en la región de aguas profundas se consideró también como trayectoria en la plataforma desde la primera posición registrada sobre la plataforma continental. La metodología propuesta para segmentar las trayectorias con base en los cruces por la isóbata de los 200 m (2.2.1.1) dio como resultado un incremento del 43 % del número de trayectorias que iniciaron en plataforma y del 39 % de las que iniciaron en aguas profundas (Tabla 2). Los segmentos de trayectorias independientes con duración mayor a 9 días, aumentaron un 13 % el número de trayectorias que iniciaron en plataforma y un 17 % las que iniciaron en aguas profundas, y se eligió evaluar estas para disminuir el sesgo de tener muchos segmentos que no cruzaron porque duraron poco tiempo (comparar número de segmentos que no cruzaron con duración mayor a 9 días, con los de duración mayor a 3 días en la Tabla 2).

Tabla 2. Número de trayectorias originales y segmentos independientes que resultaron de la segmentación de trayectorias.

Inicio	Trayectorias originales	Duración (días)	Segmentos independientes	Diferencia respecto al no. original	Segmentos que no cruzaron	Segmentos que sí cruzaron
PC	1 531	> 3	2190	+ 43 %	1088	1102
		≥ 9	1727	+ 13 %	743	984
AP	1 769	> 3	2458	+ 39 %	1284	1174
		≥ 9	2065	+17 %	1026	1039

PC=Plataforma continental; AP= Aguas profundas

La distribución espacial de los segmentos de las trayectorias independientes evaluados (trayectorias de aquí en adelante) se muestra en la Figura 16. Los puntos azules (rojos) indican las posiciones donde iniciaron (terminaron) las trayectorias. Los puntos rojos y azules que delinean las fronteras entre los polígonos en la Figura 16, indican flujos a lo largo de la plataforma entre los polígonos

vecinos, mientras que los puntos rojos y azules en la isóbata de los 200 m son una consecuencia directa del método de segmentación de las trayectorias con base en la isóbata de 200 m (2.2.1.1).

En Figura 16a y Figura 16b se muestra la distribución de las trayectorias que iniciaron en la región de aguas profundas y que respectivamente no cruzaron y sí cruzaron la isóbata de los 200 m hacia la plataforma continental. Los puntos rojos (finales) en la plataforma en la Figura 16a (trayectorias que no cruzaron hacia la plataforma desde aguas profundas) corresponden a trayectorias que iniciaron en la región de aguas profundas del polígono y que entraron a la plataforma continental cruzando la isóbata contenida en otro polígono (ver polígono 9 y 10 como ejemplos) por lo que fueron consideradas trayectorias que no cruzaron hacia la plataforma en el polígono donde se observó primero en aguas profundas.

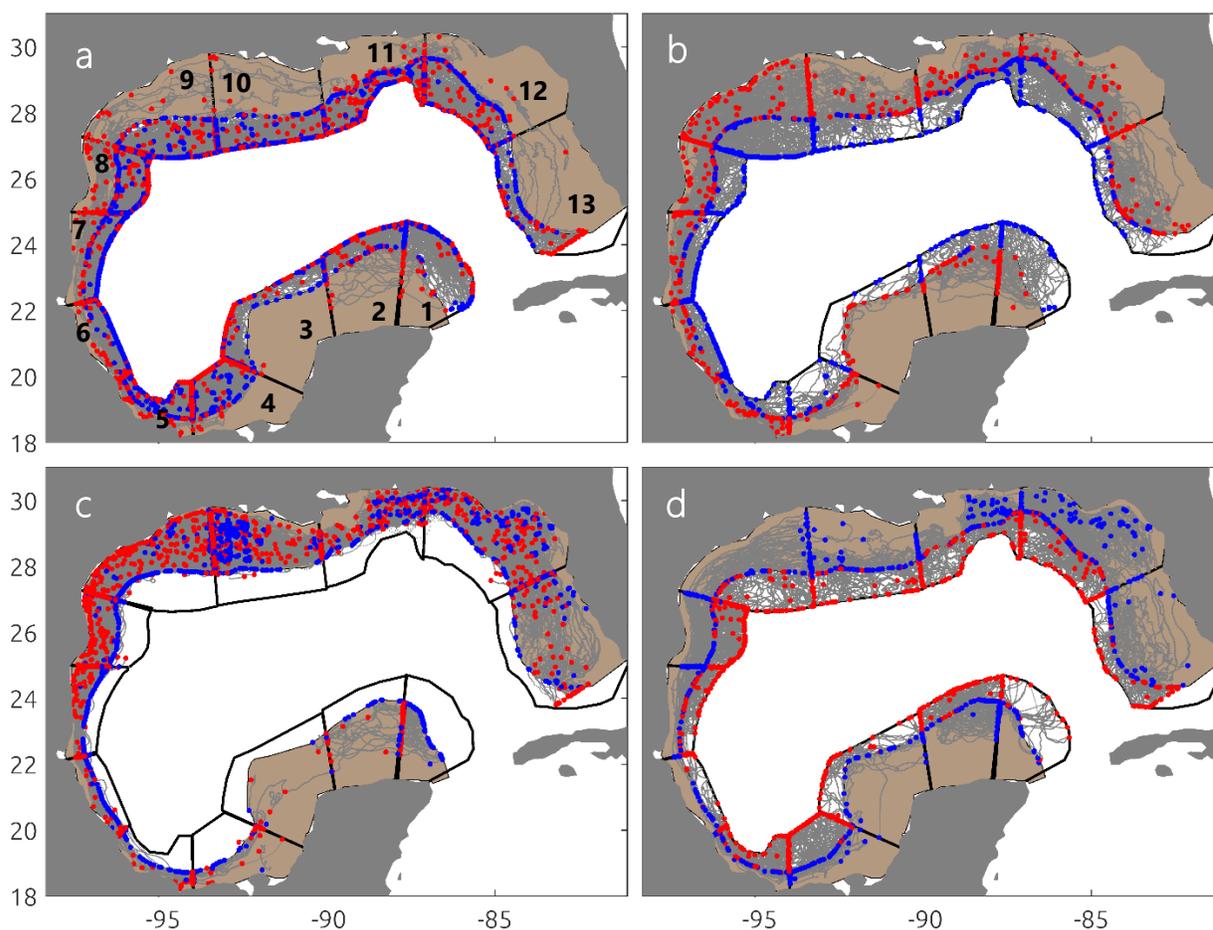


Figura 16. Distribución espacial de los segmentos independientes de las trayectorias de los derivadores. Trayectorias que no cruzaron (a y c) y sí cruzaron (b y d) desde aguas profundas hacia la plataforma (paneles superiores) y desde la plataforma continental hacia aguas profundas (paneles inferiores). Los puntos azules (rojos) indican los inicios (finales) de las trayectorias (líneas grises). Los polígonos están numerados del 1 al 13 en sentido horario desde el sur, como se muestra en el panel a.

La principal mejora de la aplicación del método propuesto para segmentar las trayectorias en segmentos independientes (2.2.1.1) se observó en las trayectorias que iniciaron en la plataforma continental (Figura 16c y Figura 16d) en los polígonos al sur de los 27 ° N, donde la mayoría de los puntos de inicio (azules) de las trayectorias se encuentran sobre la isóbata de los 200 m porque son segmentos independientes derivados de las trayectorias originales. De no haberse aplicado la segmentación de las trayectorias originales, no habría trayectorias para evaluar el transporte de la plataforma hacia la región de aguas profundas en los polígonos en el suroeste del golfo.

El número de trayectorias en cada polígono se muestra por temporada en los histogramas de la Figura 17. Los polígonos al norte de los 25° N tuvieron más observaciones en diferentes años (polígonos 8-13, Figura 17), mientras que los que se encuentran en aguas mexicanas se observaron poco muestreados (polígonos 1-7 de la Figura 17). Con el fin de identificar los polígonos con la mayor cantidad de datos, se estableció de manera arbitraria un mínimo de 80 trayectorias observadas por temporada en cada polígono como criterio de confianza. Los resultados de los polígonos que no cumplieron con el criterio de confianza del número de trayectorias mínimo (80) se consideraron poco robustos y fueron reportados e interpretados bajo esa limitación.

La mayoría de los polígonos en la parte mexicana del golfo, no cumplieron con el mínimo de observaciones de trayectorias que iniciaron en la plataforma en ninguna temporada, con excepción de los polígonos 4 y 5 en septiembre-marzo y el 7 en abril-agosto, por lo que los resultados en esta región (polígonos 4, 5 y 7) fueron interpretados tomando en cuenta que provienen de una muestra pequeña. El polígono 3 en la región del oeste de la plataforma de Yucatán fue el que tuvo menos registros de trayectorias, y solo cumplió con el mínimo de trayectorias en la temporada entre septiembre-marzo del conjunto de trayectorias que iniciaron en la región oceánica (Figura 17b), por lo que no se discuten conclusiones en esta región. Los polígonos 1, 2 y 13 fueron analizados solo para la temporada en la que cumplieron el criterio de confianza de 80 trayectorias: el polígono 13 para evaluar salidas y entradas a la plataforma en abril-agosto y los polígonos 1 y 2 para evaluar solo entradas a la plataforma en septiembre-marzo, sin embargo, al igual que en el polígono 3, los resultados se consideraron poco robustos debido a las pocas observaciones.

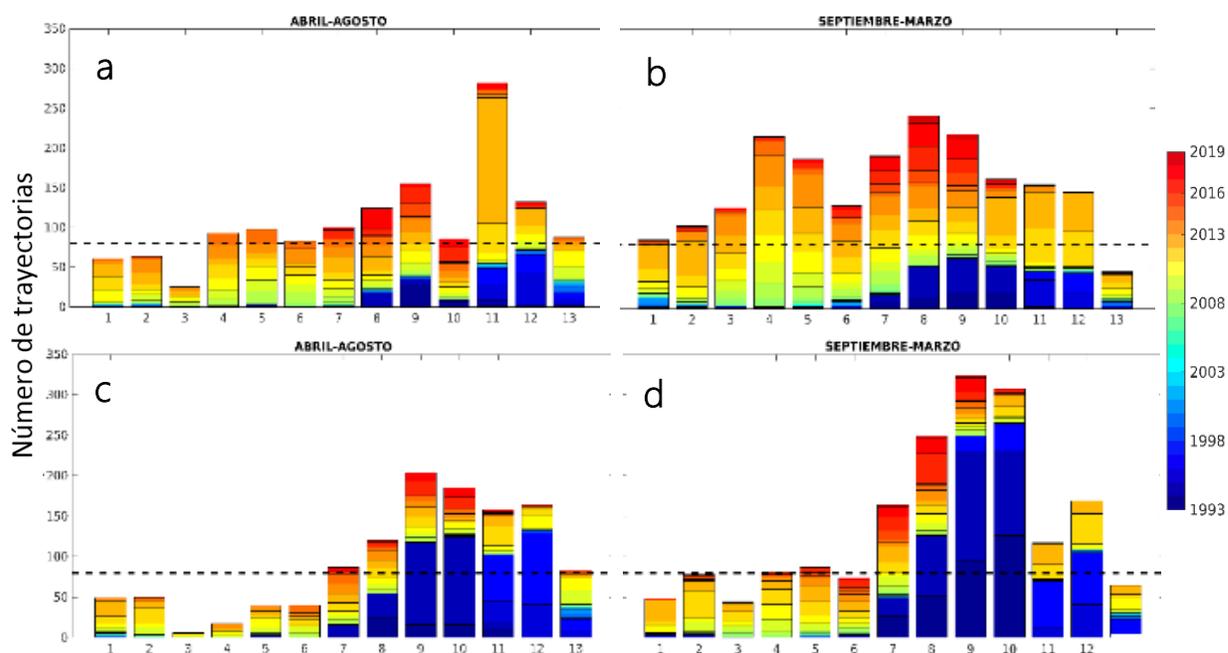


Figura 17. Número de segmentos independientes de trayectorias evaluados en cada polígono alrededor del golfo por temporada. Superior: Número de trayectorias que iniciaron en la región de aguas profundas, inferior: trayectorias que iniciaron en la plataforma continental entre abril-agosto (a y c) y septiembre-marzo (b y d). La línea discontinua indica el límite mínimo de 80 trayectorias. La barra de colores corresponde al año de observación.

Las proporciones de las trayectorias que cruzaron la isóbata de los 200 m, ya sea para salir de la plataforma o entrar a ella en cada polígono, se utilizaron para obtener intervalos de confianza por el método *Bootstrap* (2.2.1.3). Los gráficos de las distribuciones de las proporciones y de las curvas acumuladas para los intervalos de confianza de las trayectorias que entran a la plataforma y las que salen de la plataforma, se encuentran en los anexos del C al J y pueden consultarse los valores exactos por polígono y temporada en las tablas en anexos K y L.

3.2 Probabilidad de entrar a la plataforma continental desde aguas profundas

Los resultados de las proporciones de las trayectorias que cruzaron la isóbata de 200 m desde aguas profundas hacia la plataforma fueron analizados para identificar las regiones y temporadas en las que se observaron los mayores porcentajes de entrada a la plataforma. Los porcentajes se encontraron por debajo del 50 % en la mayoría de los polígonos, pero hubo más porcentajes alrededor del 50 % en abril-agosto (polígonos 6, 7, 9 y 12, Figura 18) que en septiembre-marzo (polígonos 11 y 12, Figura 18). Los resultados en los polígonos se clasificaron en cuatro categorías de una escala de probabilidad con base en los porcentajes observados: muy baja ($\% \leq 15$), baja ($15 < \% < 30$), alta ($30 \leq \% < 50$) y muy

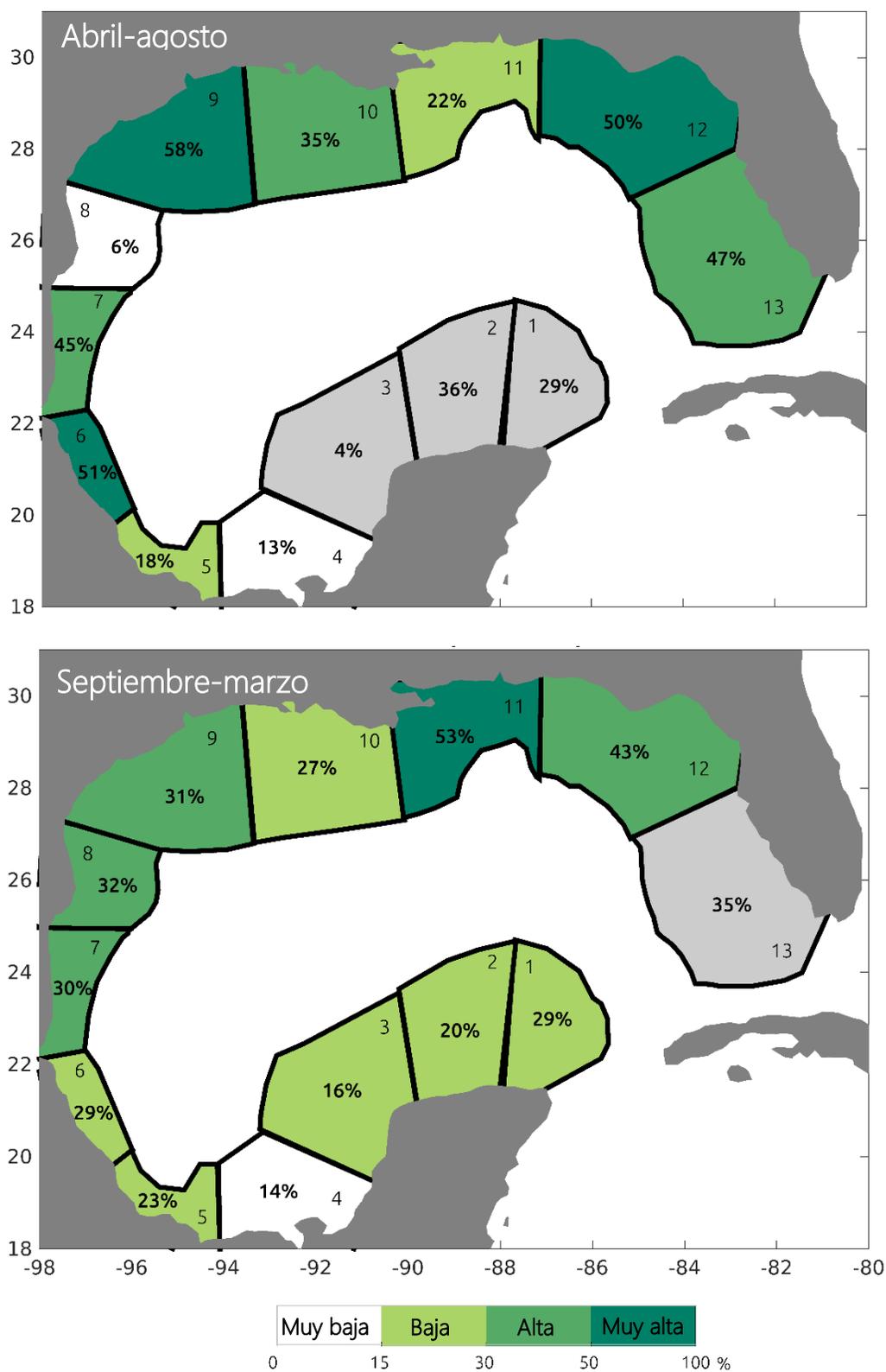


Figura 18. Probabilidad de entrar a la plataforma con base en el porcentaje de las trayectorias que cruzaron la isóbata de 200 m desde aguas profundas hacia la plataforma continental entre abril-agosto y septiembre-marzo. El porcentaje en cada polígono indica la proporción observada y el número de polígono es señalado en las esquinas. En los polígonos de color gris se observaron menos de 80 trayectorias.

alta ($\% \geq 50$) para facilitar su interpretación. El polígono 9 fue el que tuvo el porcentaje más alto (58 %), en el sur de la plataforma de Texas en abril-agosto y el 8 fue el de porcentaje más bajo (7 %) con más de 80 trayectorias y en la misma temporada, localizado entre Tamaulipas y Texas (Figura 18).

Los porcentajes más altos en abril-agosto se encontraron frente a Veracruz en el polígono 6 (51 %), frente a Tamaulipas en el polígono 7 (45 %), en el cuadrante noreste del golfo (polígono 12, 51 %) y al suroeste de Florida (47 %, Figura 18). Los porcentajes más bajos en abril-agosto se encontraron en el sur y suroeste de la bahía de Campeche con porcentajes de 4 %, 13 % y 18 % en los polígonos 3, 4 y 5 respectivamente (Figura 18). En el polígono 3 solo se observaron 26 trayectorias en esta temporada (abril-agosto) por lo que fue un resultado poco robusto. En el resto de las regiones, en el sur de Luisiana y Misisipi (polígonos 10 y 11) y el norte de Yucatán (1 y 2) los porcentajes estuvieron alrededor del 30 % con observaciones robustas (más de 80 trayectorias) solo en los polígonos 10 y 11 (Figura 18).

Los porcentajes más altos de entradas a la plataforma en septiembre-marzo se encontraron en el noreste del golfo, en los polígonos 11 y 12 (53 % y 43 %, Figura 18), mientras que los más bajos fueron 20 %, 16 %, 14 % y 23 % en los polígonos al sur del golfo (polígonos 2, 3, 4 y 5 respectivamente, Figura 18). En el resto de los polígonos (1, 6-10 y 13) los porcentajes estuvieron alrededor del 30 % y solo en el polígono 13 no se observaron más de 80 trayectorias. En los polígonos 1-5, 7, 10, 12 y 13 no hubo diferencias significativas entre temporadas, mientras que en los polígonos 6, 8, 9 y 11 las diferencias entre las proporciones de ambas temporadas (diferencia del 22 %, 35 %, 27 %, y 31 % respectivamente) sí fueron significativas a un nivel de confianza del 95 % (Figura 20).

En resumen, los polígonos con más de 80 trayectorias en las que se observaron las probabilidades más altas de entrada a la plataforma fueron: frente a Veracruz y Tamaulipas (polígonos 6 y 7, probabilidad muy alta y alta respectivamente), frente a Texas y Luisiana (polígonos 9 y 10, probabilidad de entrada muy alta y alta respectivamente) y la plataforma oeste de Florida (polígonos 12 y 13, probabilidad alta y muy alta respectivamente) en abril-agosto; el oeste y noroeste del golfo (polígonos 7, 8 y 9, todos con probabilidades altas) y el cuadrante noreste del golfo en las polígonos 11, 12 y 13 (probabilidad muy alta de entrada en el 11 y alta en el 12 y 13) en septiembre-marzo (Tabla 3 y Figura 18). Los polígonos que presentaron diferencias estacionales fueron el 6 y 9 con mayor porcentaje en abril-agosto y el 8 y 11 con mayor porcentaje en septiembre-marzo.

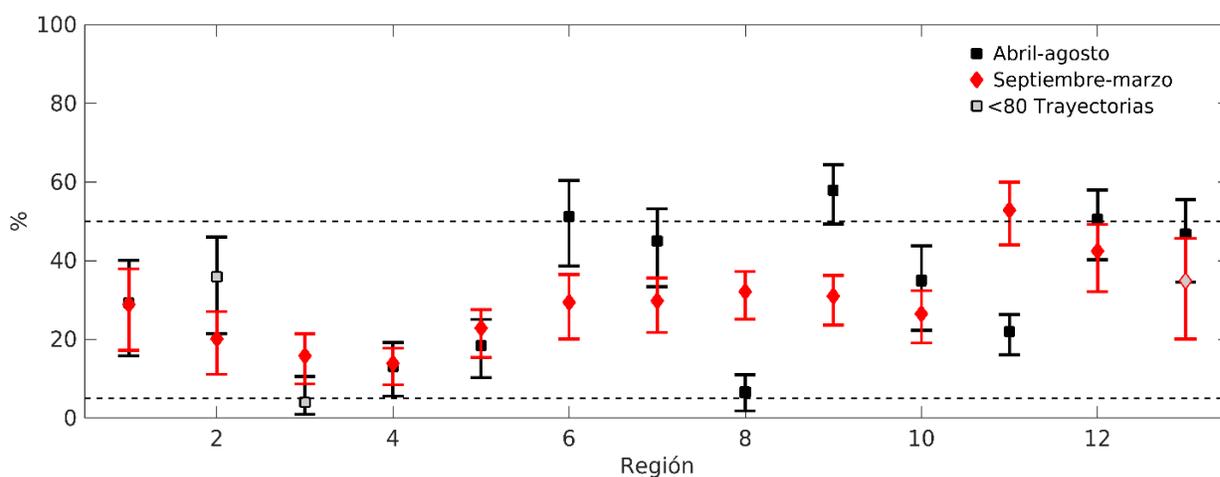


Figura 19. Porcentaje con intervalos de confianza al 95 % de las trayectorias que cruzaron de la región de aguas profundas hacia la plataforma continental con respecto al total de las trayectorias evaluadas en los 13 polígonos del golfo de México entre abril-agosto y septiembre-marzo. El intervalo de confianza se conformó por los valores correspondientes al 2.5 % y 97.5% de la curva acumulada (nivel de confianza del 95 %). Las líneas discontinuas en 5 % y 50 % se añadieron como valores de referencia de un porcentaje muy bajo y alto respectivamente.

Tabla 3. Resultados del análisis de la probabilidad de entrar a la plataforma desde aguas profundas entre abril-agosto y septiembre-marzo.

Polígono	Abril-agosto	N	Septiembre-marzo	N	Diferencia entre temporadas *
1	Baja	61	Baja	86	No
2	Alta	64	Baja	104	No
3	Muy baja	26	Baja	126	No
4	Muy baja	93	Muy baja	215	No
5	Baja	98	Baja	187	No
6	Muy alta	84	Baja	129	Sí
7	Alta	100	Alta	191	No
8	Muy baja	124	Alta	241	Sí
9	Muy alta	155	Alta	218	Sí
10	Alta	86	Baja	162	No
11	Baja	282	Muy alta	155	Sí
12	Muy alta	132	Alta	146	No
13	Alta	88	Alta	46	No

≤ 15 % **Muy baja** 15 < % < 30 **Baja** 30 < % < 50 **Alta** ≥ 50 % **Muy alta**
 N=Total de trayectorias evaluadas. *Significativa a un nivel de confianza del 95 %

3.3 Probabilidad de salir de la plataforma continental hacia aguas profundas

Los resultados de las proporciones de las trayectorias que cruzaron la isóbata de 200 m desde la plataforma hacia aguas profundas fueron analizados para identificar las regiones y temporadas en las que se observaron los mayores porcentajes de salida de la plataforma. Las probabilidades en los polígonos se clasificaron en cuatro categorías de una escala cualitativa con base en los porcentajes observados: muy baja ($\% \leq 15$), baja ($15 < \% < 30$), alta ($30 \leq \% < 50$ Alta) y muy alta ($\% \geq 50$) para facilitar su interpretación. El polígono con el porcentaje más alto de salidas de la plataforma, con más de 80 trayectorias observadas, fue el polígono 4 en el sureste de la bahía de Campeche con 76 % en septiembre-marzo, mientras que el porcentaje más bajo fue de 9 % en las plataformas de Texas y Luisiana (polígonos 9 y 10) durante abril-agosto (Figura 20) .

Los porcentajes más altos en la temporada abril-agosto se encontraron en el sur del golfo en los polígonos del 2 al 5: con porcentajes del 78 %, 100 %, 58 % y 77 %, sin embargo en estos polígonos se observaron muy pocas trayectorias por lo que los resultados no son concluyentes (< 80 , Figura 17c). En los polígonos 8, 11 y 13 se observaron porcentajes altos en abril-agosto (45 %, 43 % y 56 %, respectivamente) mientras que los porcentajes más bajos de la temporada se observaron en los polígonos 9 y 10 en la plataforma de Texas y Luisiana (ambas 9 %) y frente a Tamaulipas en el polígono 7 (13 %). Los polígonos 1, 6 y 12 tuvieron porcentajes entre 20-30 %, con más de 80 observaciones únicamente en el polígono 12 en abril-agosto.

Los polígonos con las proporciones más altas en septiembre-marzo fueron el 2 (78 %), 3 (100 %), 4 (79 %), 5 (48 %) y el 12 (48 %), con observaciones robustas solamente en 4, 5 y 15. Las proporciones más bajas de salidas en septiembre-marzo se encontraron en la plataforma de Texas y Luisiana (polígonos 9 y 10) con 15 % y 16 % respectivamente y el polígono 1 al norte de Yucatán con 10 %, en esta última se observaron solo 48 trayectorias por lo que el resultado no es robusto. El porcentaje del resto de los polígonos (6-8, 11 y 13) estuvo alrededor del 30 %.

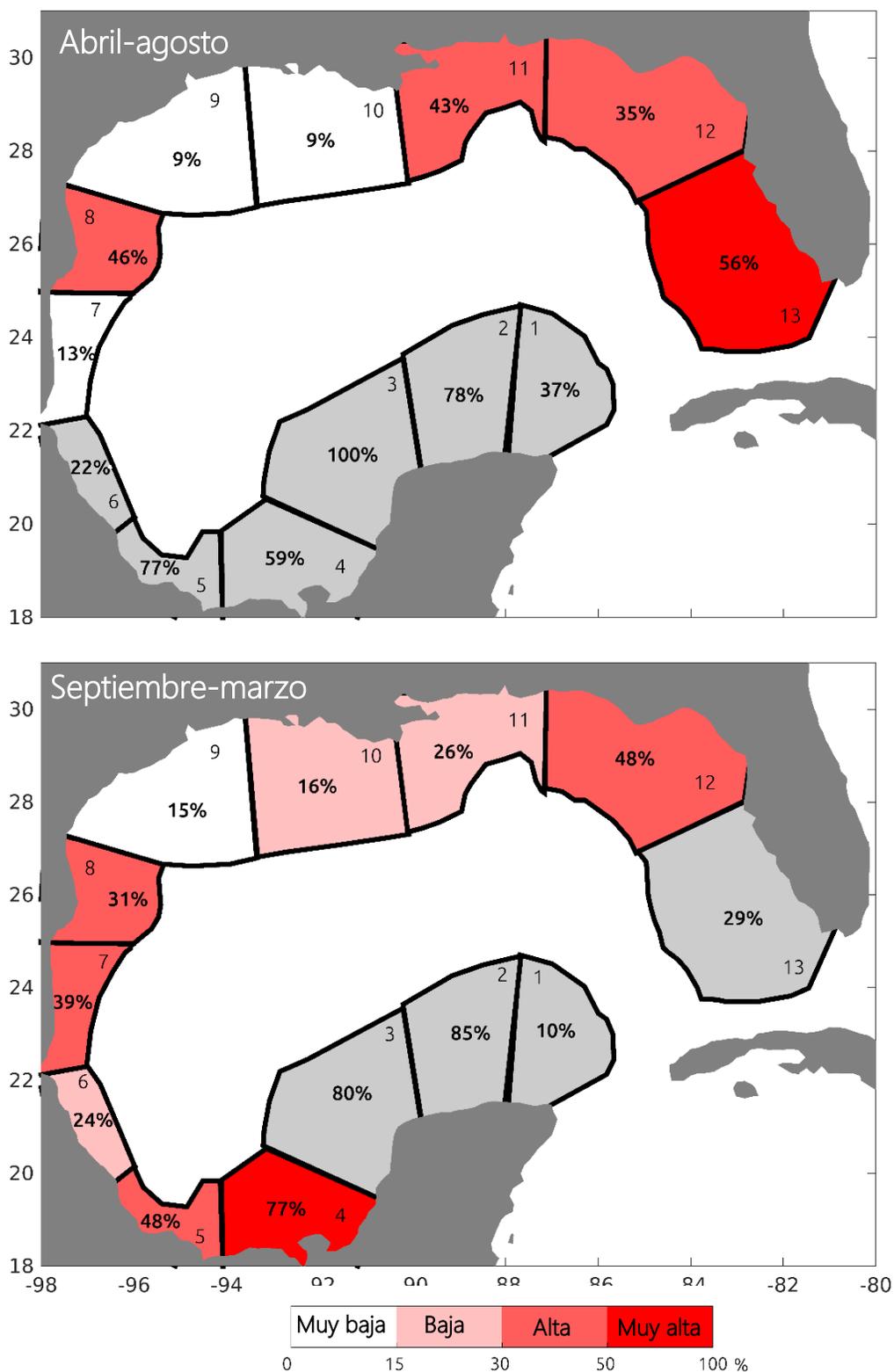


Figura 20. Probabilidad de salir de la plataforma con base en el porcentaje de las trayectorias que cruzaron la isóbata de los 200 m desde la plataforma continental hacia la región de aguas profundas entre abril-agosto y septiembre-marzo. El porcentaje en cada polígono indica la proporción observada y el número de polígono es señalado en las esquinas. En los polígonos de color gris se observaron menos de 80 trayectorias.

Los polígonos 1, 3, 7, 11 y 13 presentaron diferencias en el porcentaje de salidas de la plataforma entre temporadas del 27 % 21 %, 26 %, 17 % y 26 % respectivamente, que resultaron ser significativas en un nivel de confianza del 95 % (Figura 21). Sin embargo la diferencia estacional solo es concluyente en el polígono 11 debido a que en los polígonos 1, 3, 7 y 13 no se tuvieron observaciones robustas.

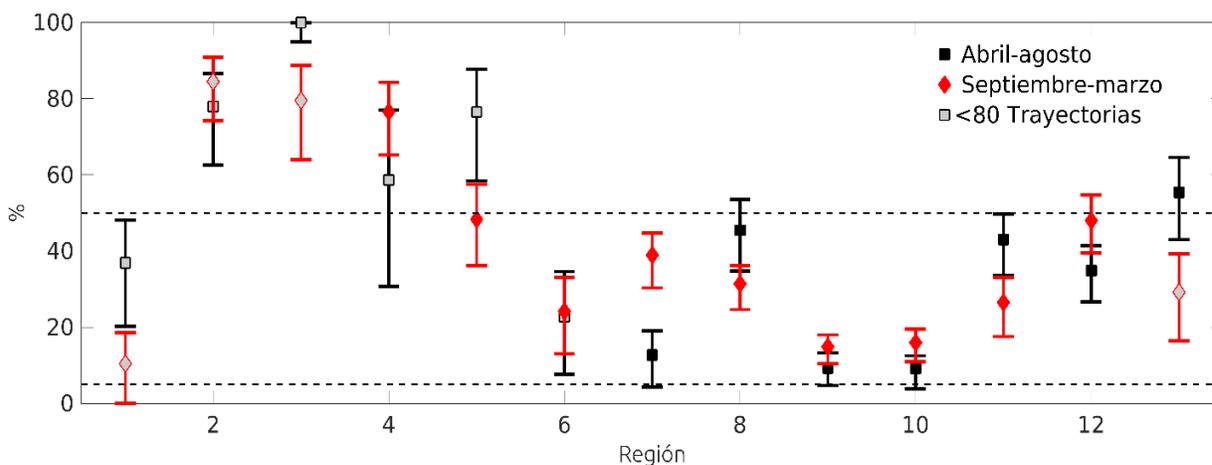


Figura 21. Porcentaje con intervalos de confianza al 95 % de las trayectorias que cruzaron desde la plataforma continental hacia la región de aguas profundas con respecto al total de las trayectorias evaluadas en los 13 polígonos del golfo de México en abril-agosto y septiembre-marzo. El intervalo de confianza se conformó por los valores correspondientes al 2.5 % y 97.5% de la curva acumulada (nivel de confianza del 95 %). Las líneas discontinuas en 5 % y 50 % se añadieron como valores de referencia de un porcentaje bajo y alto respectivamente.

En resumen, los polígonos con más de 80 trayectorias en las que se observaron las probabilidades de salir de la plataforma más altas fueron: en la plataforma entre Tamaulipas y Texas (polígono 8, probabilidad alta), el sur de Misisipi (polígono 11, probabilidad alta) y la plataforma oeste de Florida (polígonos 12 y 13, probabilidad alta y muy alta respectivamente) en abril-agosto y en el sur de la bahía de Campeche (polígonos 4 y 5, probabilidad muy alta y alta respectivamente) y frente a Tamaulipas y el sur de Texas (polígonos 7 y 8, ambos con probabilidades altas) en septiembre-marzo (Tabla 4). Los polígonos con diferencias estacionales fueron el 7 con mayor porcentaje en septiembre-marzo y el 11, mayor en abril-agosto.

Tabla 4. Resultados del análisis de la probabilidad de salir de la plataforma hacia aguas profundas entre abril-agosto y septiembre-marzo.

Polígono	Abril-agosto	N	Septiembre-marzo		Diferencia entre temporadas *
				N	
1	Alta	49	Muy baja	48	Sí
2	Muy alta	50	Muy alta	78	No
3	Muy alta	6	Muy alta	44	Sí
4	Muy alta	17	Muy alta	81	No
5	Muy alta	39	Alta	87	No
6	Baja	40	Baja	74	No
7	Muy baja	87	Alta	164	Sí
8	Alta	121	Alta	249	No
9	Muy baja	204	Muy baja	324	No
10	Muy baja	185	Baja	307	No
11	Alta	158	Baja	117	Sí
12	Alta	164	Alta	169	No
13	Muy alta	83	Baja	65	Sí

≤ 15 % **Muy baja** 15 < % < 30 **Baja** 30 < % < 50 **Alta** ≥ 50 % **Muy alta**
 N=Total de trayectorias evaluadas. *Significativa a un nivel de confianza del 95 %

3.4 Dirección preferencial en el intercambio de agua superficial entre la plataforma continental y la región de aguas profundas

Las regiones con una dirección preferencial en el intercambio entre aguas profundas y la plataforma fueron determinadas con base en los resultados de análisis desde dos puntos de vista. En primer lugar, se describen las regiones en las que se observó una dirección preferencial con base en el porcentaje de trayectorias que cruzaron por la isóbata de 200 m hacia aguas profundas o hacia la plataforma por cada temporada con base en los resultados del análisis lagrangiano (3.4.1). Por otro lado, desde el punto de vista euleriano se describe la dirección promedio del flujo perpendicular a las isóbatas observado por derivadores superficiales en las plataformas alrededor del golfo y en anclajes en el suroeste del golfo a lo largo de la isóbata de 130 m (3.4.2). Por último, se compararon los resultados de ambos análisis (3.4.1 y 3.4.2) para identificar las regiones y temporadas en las que predominó una dirección en el intercambio de agua superficial entre la plataforma y la región de aguas profundas (3.4.3). Adicionalmente se analizaron los promedios mensuales de la componente perpendicular a las isóbatas observado en los anclajes con el fin de obtener más información temporal y determinar con mayor certeza una dirección predominante del flujo promedio en la región de la bahía de Campeche donde los resultados del análisis lagrangiano fueron poco robustos (se observaron pocas trayectorias, < 80).

3.4.1 Análisis lagrangiano de la dirección preferencial en el intercambio de agua entre la plataforma y la región de aguas profundas

Se identificaron las regiones en las que los porcentajes de las trayectorias que cruzaron por la isóbata de los 200 m fueron mayores en una dirección (entrada o salida a la plataforma) en abril-agosto y septiembre-marzo, a partir de los resultados obtenidos en los polígonos (Tabla 3 y Tabla 4, sección 3.2 y 3.3 respectivamente). La comparación de manera cualitativa de los porcentajes de trayectorias que entraron y salieron de la plataforma se ilustra en la Figura 22.

Las proporciones y diferencias entre los porcentajes de entrada y salida por polígono y por temporada fueron calculados para determinar de manera cuantitativa aquellos en los que una dirección predominó frente a la otra (Tabla 5 y Tabla 6). La dirección preferencial en los polígonos se determinó cuando la proporción entre los porcentajes de entrada y salida fue igual o mayor a 1.5 (% más alto/% menor) y la diferencia entre estos porcentajes fue igual o mayor al 15 %, en caso contrario se determinó que no existió una dirección preferencial. Por otro lado, en los polígonos en los que no hubo una dirección preferencial, se identificaron las regiones en las que el intercambio de agua fue alto (porcentajes de entrada y salida altos) o por el contrario, en las que el intercambio de agua se observó bajo (porcentajes de entrada y salida bajos). La dirección preferencial se consideró concluyente solo en los polígonos en los que se observaron más de 80 trayectorias en la plataforma y en aguas profundas.

Las regiones en las que se observó una dirección preferencial de salida desde la plataforma hacia aguas profundas fueron: las regiones frente a Tamaulipas y el sur de Texas (polígono 8, 58 %, más de 6 veces mayor que el porcentaje de entrada) y el sur del Misisipi (polígono 11, 43 %, 2 veces mayor que el de entrada) en abril-agosto (Tabla 5, Figura 22); y en el sur de la bahía de Campeche (polígonos 4 y 5, 77 % y 48 %, más de 5 y 2 veces mayor que los de entrada respectivamente) en septiembre-marzo (Tabla 6, Figura 22).

Las regiones en las que se observó una dirección preferencial de entrada desde aguas profundas hacia la plataforma fueron: la plataforma de Tamaulipas (polígono 7, 45 %, 3.5 veces mayor al porcentaje de salida), en la plataforma de Texas y Luisiana (polígonos 9 y 10, 58 % y 35 %, 6.5 y 4 veces mayor que el porcentaje de salida respectivamente) y el norte de la plataforma oeste de Florida (polígono 12, 51 % , 1.5 veces más grande que el porcentaje de salida) en abril-agosto (Tabla 5 y Figura 22); y el polígono 9 (31 % , 2 veces mayor que el de salida) y en el delta del Misisipi (53 % , 2 veces mayor que el porcentaje de salida) en septiembre-marzo (Tabla 6, Figura 22).

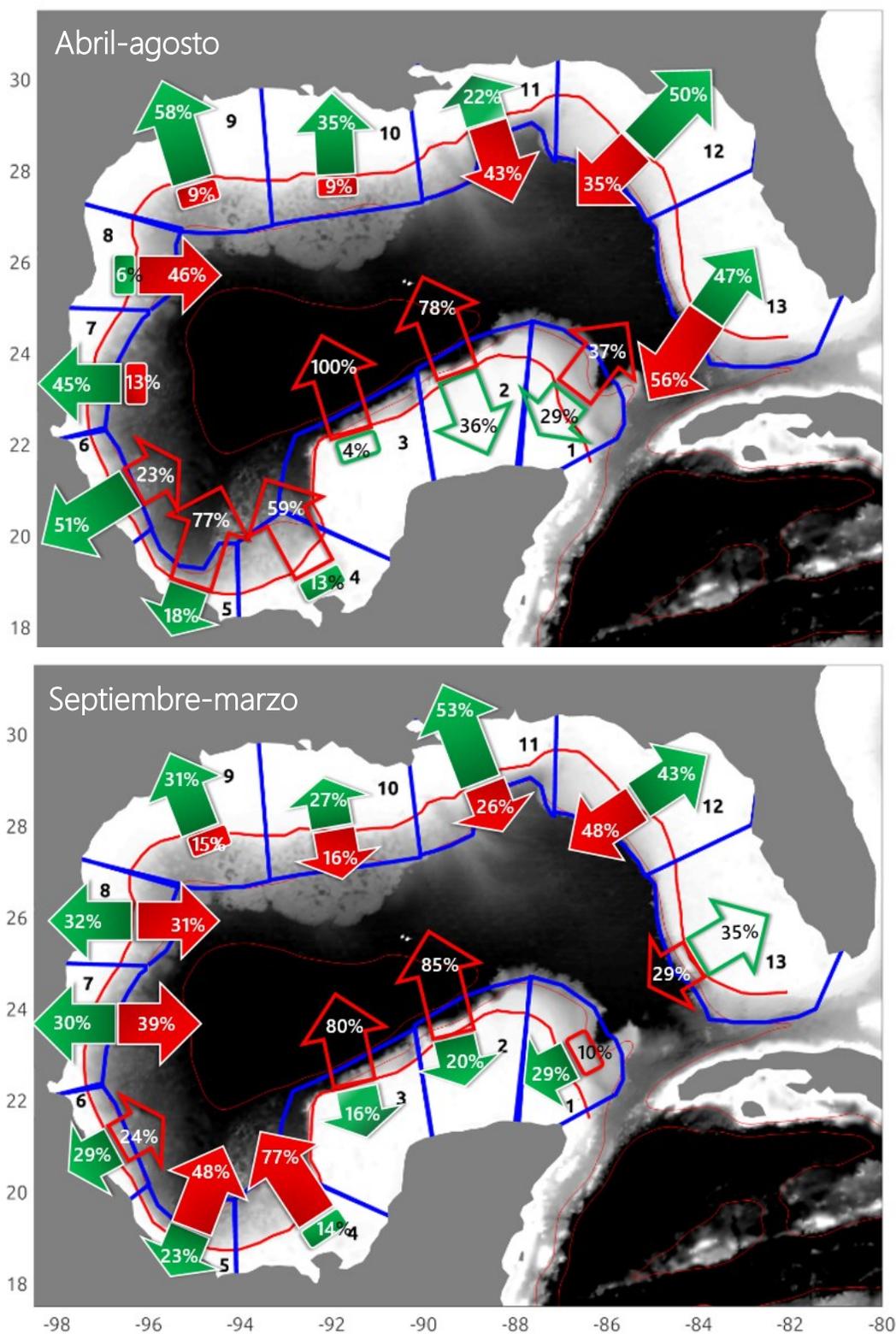


Figura 22. Ilustración de los porcentajes de salidas de la plataforma (rojo) y entradas a la plataforma (verde) respecto al total de trayectorias evaluadas en la plataforma/aguas profundas en 13 polígonos alrededor del golfo de México. Las flechas y rectángulos sin rellenar indican las proporciones en los polígonos con menos de 80 trayectorias observadas. El tamaño de las flechas indica porcentajes entre 16-29 % (pequeño), 30-49 % (mediano), ≥ 50 % (grande) y porcentajes ≤ 15 % se muestran en rectángulos. El número de cada polígono se indica en su interior. La línea roja indica la isóbata sin suavizar de 200 y 1500 m.

Tabla 5. Dirección preferencial del intercambio entre la plataforma continental y la región de aguas profundas observada en abril-agosto con base en las proporciones y diferencias entre las probabilidades de entrada y salida de la plataforma.

Polígono	Probabilidad de entrar y salir de la plataforma	X-Y		Dirección preferencial**	
		X %	Y %		
		X/Y *			
1	Baja de entrada y alta de salida	1.5	8	-	Ninguna
2	Alta de entrada y muy alta de salida	2	42	78	Salida
3	Muy baja de entrada y muy alta de salida	25	96	100	Salida
4	Muy baja de entrada y muy alta de salida	4.5	45	58	Salida
5	Muy baja de entrada y muy alta de salida.	4.5	59	77	Salida
6	Muy alta de entrada y muy baja de salida	2	28	51	Entrada
7	Muy alta de entrada y muy baja de salida	3.5	32	45	Entrada
8	Muy baja de entrada y alta de salida	6.5	38	45	Salida
9	Muy alta de entrada y muy baja de salida	6.5	49	58	Entrada
10	Alta de entrada y muy baja de salida	4	26	35	Entrada
11	Baja de entrada y alta de salida	2	21	43	Salida
12	Muy alta de entrada y alta de salida	1.5	16	51	Entrada
13	Alta de entrada y muy alta de salida	1	9	-	Ninguna

≤ 15 % **Muy baja** 15 < % < 30 **Baja** 30 < % < 50 **Alta** ≥ 50 % **Muy alta**. * X= % mayor, Y= % menor, redondeado al múltiplo de 0.5 más cercano. ** Dirección predominante cuando X/Y ≥ 1.5 y X-Y ≥ 15 %. **Negritas:** Más de 80 trayectorias en ambas direcciones.

Tabla 6. Dirección preferencial del intercambio entre la plataforma continental y la región de aguas profundas observada en septiembre-marzo con base en las proporciones y diferencias entre las probabilidades de entrada y salida de la plataforma.

Polígono	Probabilidad de entrar y salir de la plataforma	X-Y		Dirección preferencial**	
		X %	Y %		
		X/Y *			
1	Baja de entrada y muy baja de salida	3	19	29	Entrada
2	Baja de entrada y muy alta de salida	4	65	85	Salida
3	Baja de entrada y muy alta de salida	5	63	79	Salida
4	Muy baja de entrada y muy alta de salida	5.5	63	77	Salida
5	Muy baja de entrada y alta de salida	2	25	48	Salida
6	Baja de entrada y baja de salida	1	5	-	Ninguna
7	Alta de entrada y alta de salida	1	9	-	Ninguna
8	Alta de entrada y Alta de salida	1	1	-	Ninguna
9	Alta de entrada y muy baja de salida	2	16	31	Entrada
10	Baja de entrada y baja de salida	1.5	10	-	Ninguna
11	Muy alta de entrada y baja de salida	2	27	53	Entrada
12	Alta de entrada y alta de salida	1	6	-	Ninguna
13	Alta de entrada y baja de salida	1	6	-	Ninguna

≤ 15 % **Muy baja** 15 < % < 30 **Baja** 30 ≤ % < 50 **Alta** ≥ 50 % **Muy alta**. * X= % predominante, Y= % de la dirección no predominante, redondeado al múltiplo de 0.5 más cercano. ** Dirección predominante cuando X/Y ≥ 1.5 y X-Y ≥ 15 %. **Negritas:** Más de 80 trayectorias en ambas direcciones.

Las regiones en las que se encontró intercambio alto sin una dirección preferencial (porcentajes altos tanto de entrada y salida de la plataforma) fueron: el sur de la plataforma oeste de Florida (polígono 13, 55 % de entrada y 39 % de salida) en abril-agosto (Tabla 5, Figura 22); y la plataforma de Tamaulipas (polígono 7, 39 % de salida y 30 % de entrada), la plataforma del sur de Texas (polígono 8, 31 % de salida y 32% de entrada), y en el norte de la plataforma oeste de Florida (polígono 12, 48 % de salida y 42 % de entrada) en septiembre-marzo (Tabla 6, Figura 22). Mientras que la región con poco intercambio (porcentaje bajo de salida y entrada a la plataforma) fue la plataforma de Luisiana (polígono 10, 26 % de entrada y 16 % de salida) en septiembre-marzo.

En la plataforma de Yucatán (polígonos 2 y 3), no fue posible hacer una interpretación robusta del resultado en ninguna temporada debido a las pocas observaciones al interior, sin embargo este resultado podría ser indicador de una barrera dinámica entre las aguas superficiales de la región profunda con la plataforma, ya que aunque se observaron muchas trayectorias en aguas profundas frente a esta plataforma, muy pocas se transportaron hacia la plataforma (Figura 16 a y b, Figura 17).

3.4.2 Análisis euleriano de la dirección que prevalece en el intercambio de agua superficial entre la plataforma y la región de aguas profundas

Se identificaron las regiones en las que prevaleció una dirección de la componente perpendicular a las isóbatas de las velocidades observadas por derivadores superficiales y en anclajes con perfiladores de corrientes en abril-agosto y septiembre-marzo. Las magnitudes promedio observadas en ambas mediciones (derivadores y anclajes) fueron del orden de 5-10 cms^{-1} y en general, más intensas en abril-agosto respecto a septiembre-marzo. La dirección del flujo promedio a través de las isóbatas observada en la mayoría de los anclajes (vectores en los cuadros cian, Figura 23) coincidió con la dirección promedio observada por los derivadores en las celdas cercanas (celdas verdes o rojas, Figura 23), con excepción del anclaje C ($\sim 19^\circ \text{ N}$, 92° W) en el sureste de la bahía de Campeche que tuvo dirección opuesta en abril-agosto (Figura 23). La coincidencia de la dirección en el flujo promedio observado por los derivadores y en los anclajes en el suroeste del golfo brindó mayor certeza de que el conjunto de las observaciones de los derivadores muestra una representación realista del flujo promedio por temporada en el resto del golfo.

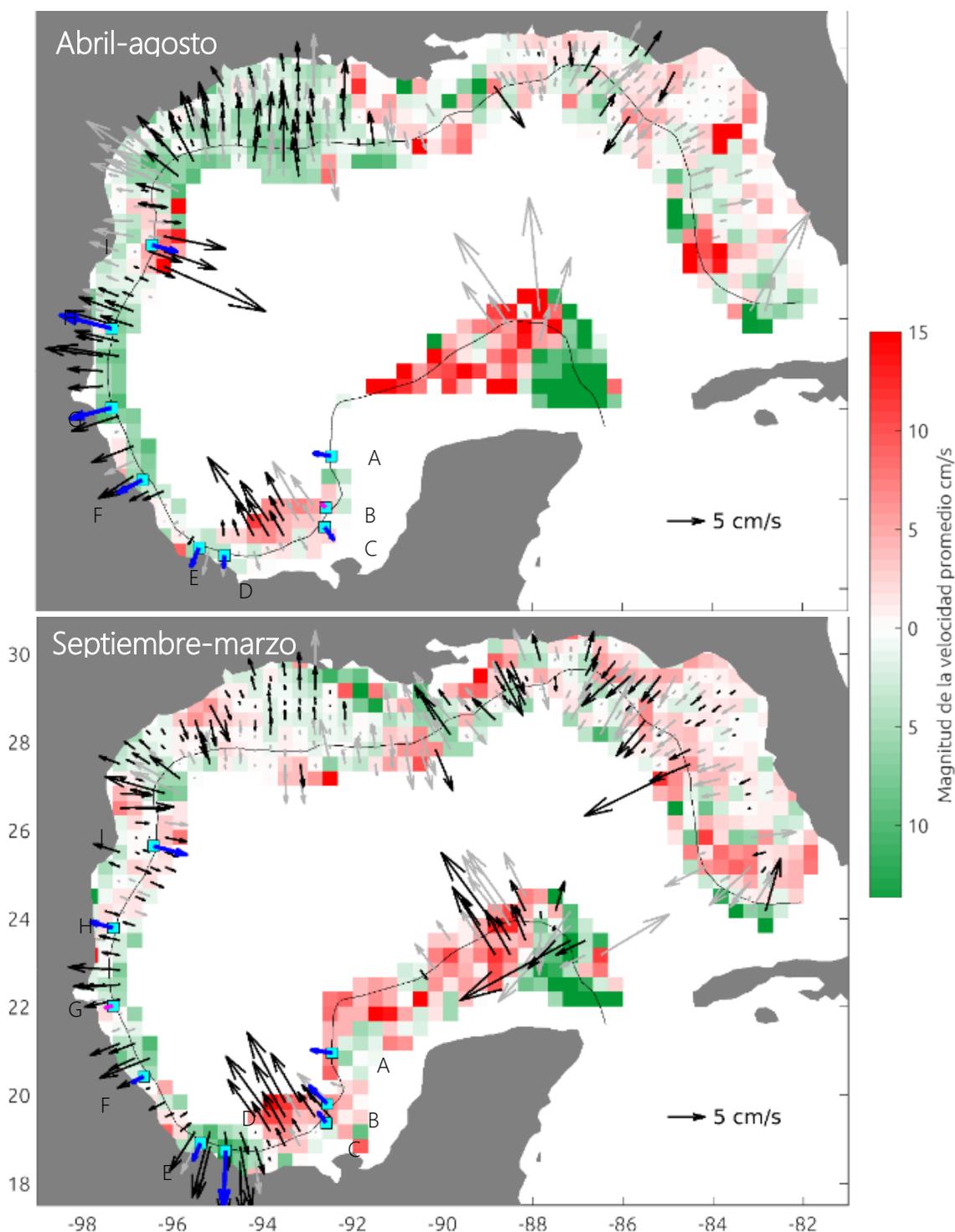


Figura 23. Promedio del flujo perpendicular a las isóbatas observado por los derivadores superficiales (celdas de color verde o rojo) y en los anclajes (vectores en los cuadros cian) en el golfo de México. El color verde (rojo) indica flujo promedio hacia la plataforma (aguas profundas). Los vectores promedio significativamente (no significativamente) diferentes de cero al 95 % de confianza se muestran en negro y azul (gris y magenta) para los datos de los derivadores y los anclajes respectivamente. Los vectores promedio de los derivadores se muestran para las celdas (malla de 1/3 de grado) con suficientes grados de libertad ($n=4$ en abril-agosto y $n=5$ en septiembre-marzo). Los cuadros de color cian indican las posiciones de los anclajes nombrados de A-I en sentido horario indicado en mayúsculas sobre el mapa, los anclajes A, C y D-I se encuentran en 130 m y el B en 500 m. La línea negra corresponde a la isóbata suavizada de 200 m.

En todos los anclajes se observaron diferencias entre temporadas en la magnitud promedio del flujo perpendicular a las isóbatas, sin embargo no hubo grandes diferencias estacionales en el patrón general de la dirección promedio (Figura 23). En el este de la bahía de Campeche, en el anclaje A ($\sim 21^\circ$ N, 92° W) el promedio del flujo perpendicular a las isóbatas tuvo una dirección de la plataforma hacia aguas profundas en ambas temporadas y se observó una magnitud promedio ligeramente más grande en septiembre-marzo. En el anclaje B ($\sim 20^\circ$ N, 92° W) la dirección promedio fue hacia aguas profundas en ambas temporadas, aunque no significativa en abril-agosto. En el anclaje C ($\sim 19^\circ$ N, 92° W) la dirección promedio fue desde aguas profundas hacia la plataforma en abril-agosto temporada que presentó la magnitud promedio mayor, y se invirtió en septiembre-marzo.

Los anclajes en el sur y oeste del golfo occidental en las plataformas de Veracruz y Tamaulipas ($D-H$, $< 24^\circ$ N, $> 94^\circ$ W), tuvieron una dirección promedio de aguas profundas hacia el interior de la plataforma en ambas temporadas. La mayoría de los anclajes presentaron magnitudes promedio mayores en abril-agosto, con excepción del anclaje D (en el sur de la bahía de Campeche, $\sim 19^\circ$ N, 94° W) que tuvo una magnitud promedio más grande en septiembre-marzo. En la plataforma entre Tamaulipas y el sur de Texas ($\sim 25-26^\circ$ N, 96.5° W) en el anclaje I, la dirección promedio observada fue de la plataforma hacia la región de aguas profundas en ambas temporadas y de mayor magnitud en septiembre-marzo.

La dirección promedio del flujo perpendicular a las isóbatas observada por los derivadores (vectores en las celdas verdes y rojas, Figura 23) en general coincidió con lo observado en la mayoría de los anclajes con excepción del anclaje C en el sureste de la bahía de Campeche ($\sim 19^\circ$ N, 92° W). En el sureste de la bahía de Campeche ($18-21^\circ$ N, $92-94^\circ$ W), la dirección promedio observada en las celdas en el talud fue de la plataforma hacia aguas profundas en ambas temporadas, ligeramente mayor en magnitud promedio en septiembre-marzo. En el suroeste de la bahía de Campeche (19° N, $94-96^\circ$ W) se observó flujo promedio con dirección hacia la plataforma en ambas temporadas, con magnitud menor en septiembre-marzo (Figura 23). En las plataformas del oeste del golfo frente a Veracruz y Tamaulipas ($< 24^\circ$ N, $> 94^\circ$ W) la dirección del flujo promedio en general fue de aguas profundas hacia el interior de la plataforma en ambas temporadas con magnitudes más intensas en abril-agosto. En algunas celdas se observaron flujos promedios en dirección hacia aguas profundas alrededor de los $20^\circ-22^\circ$ N entre septiembre-marzo. En la plataforma entre Tamaulipas y el sur de Texas ($24-26^\circ$ N, $\sim 97^\circ$ W) la dirección del flujo promedio observado fue hacia aguas profundas en ambas temporadas (Figura 23).

Por otro lado, en el resto de las regiones en las que solo se tuvieron observaciones de los derivadores superficiales, se observó mayor variabilidad espacial de la dirección del flujo promedio en las celdas alrededor de la isóbata de los 200 m y sobre la plataforma. En la plataforma oeste de Florida ($24-30^{\circ}$ N, $< 86^{\circ}$ W) y las plataformas en el noreste del golfo al sur de Luisiana, Misisipi y Alabama ($> 28^{\circ}$ N, $88-92^{\circ}$ W) se observaron flujos promedio en dirección hacia aguas profundas y hacia la plataforma distribuidos espacialmente de forma heterogénea en ambas temporadas. En estas plataformas se tuvieron pocos promedios significativamente diferentes de cero (Figura 23) por lo que no parece haber una dirección promedio preferencial del flujo. En la plataforma de Texas y Luisiana ($> 27^{\circ}$ N, $92-98^{\circ}$ W) se observó flujo promedio con dirección hacia la plataforma de manera homogénea en abril-agosto, y flujos promedio significativos tanto hacia aguas profundas como hacia la plataforma en septiembre-marzo (Figura 23).

En la plataforma de Yucatán ($21-24^{\circ}$ N, $87-92^{\circ}$ W, Figura 23) la dirección del flujo promedio (velocidades perpendiculares a las isóbatas) observada por los derivadores, fue hacia aguas profundas en el norte y oeste ($21-24^{\circ}$ N, $88-92^{\circ}$ W) en ambas temporadas. En el este de la plataforma ($22-24^{\circ}$ N, $86-88^{\circ}$ W), el flujo promedio tuvo una dirección hacia el interior de la plataforma en ambas temporadas. En esta plataforma la dirección del flujo promedio fue significativa en el norte y este solamente en septiembre-marzo. Es importante recordar que en estas regiones en la plataforma de Yucatán se promediaron pocos datos de derivadores (Figura 15 y Figura 16).

En resumen, las regiones en las que se observó un flujo promedio en dirección de aguas profundas hacia la plataforma fueron: en las plataformas de Veracruz y Tamaulipas ($< 24^{\circ}$ N, $> 94^{\circ}$ W) en ambas temporadas, la plataforma de Texas y Luisiana ($> 28^{\circ}$ N, $> 91^{\circ}$ W) en abril-agosto y el este de la plataforma de Yucatán ($22-24^{\circ}$ N, $86-88^{\circ}$ W) en septiembre-marzo. Mientras que las regiones donde el flujo promedio superficial tuvo una dirección de la plataforma hacia las aguas profundas fueron el norte de la plataforma de Yucatán en septiembre-marzo, el sureste de la bahía de Campeche ($18-21^{\circ}$ N, $92-94^{\circ}$ W) y la plataforma entre el norte de Tamaulipas y el sur de Texas ($\sim 25-26^{\circ}$ N, 96.5° W) en ambas temporadas. Por otro lado las regiones en las que no se observó una dirección predominante del flujo promedio a través de la isóbata de los 200 m, fueron: la plataforma de Texas y Luisiana ($> 28^{\circ}$ N, $91-98^{\circ}$ W) en septiembre-marzo, la plataforma al sur de Misisipi y Alabama ($> 28^{\circ}$ N, $88-92^{\circ}$ W) y la plataforma oeste de Florida ($24-30^{\circ}$ N, $< 86^{\circ}$ W) en ambas temporadas.

3.4.3 Regiones en las que se observó una dirección preferencial en el intercambio de agua superficial entre la plataforma y la región de aguas profundas

Las regiones en las que se observó una dirección preferencial en el intercambio de agua superficial entre la plataforma continental y la región de aguas profundas en el golfo, se determinaron con base en las coincidencias por temporada entre los resultados de los porcentajes de trayectorias que cruzaron la isóbata de los 200 m (análisis lagrangiano, 3.4.1) y de los promedios significativos de la componente perpendicular a las isóbatas de las velocidades observadas por los derivadores y con los anclajes (análisis euleriano, 3.4.2). En la región mexicana occidental del golfo de México los resultados de ambos análisis no pudieron compararse en la mayoría de las regiones debido a que los resultados del análisis lagrangiano no fueron robustos en cuanto al número de observaciones (Figura 22). En el sur y oeste del golfo (18° - 26° N, 94 - 98° W), adicionalmente se analizaron los promedios mensuales del flujo perpendicular a la isóbata observados en los anclajes (Figura 24), con el fin de obtener más información temporal y por otro lado, determinar con mayor certeza una dirección del flujo promedio en las regiones donde se observaron pocas trayectorias para el análisis lagrangiano.

En el sureste de la bahía de Campeche (18 - 21° N, 92 - 94° W), la dirección predominante en el intercambio de agua de acuerdo con los resultados del análisis de trayectorias (3.4.1), fue de la plataforma hacia la región de aguas profundas en ambas temporadas (polígono 4, Figura 22) aunque hubo pocas observaciones (< 80 trayectorias) en abril-agosto. En esta región los resultados del análisis euleriano (3.4.2) mostraron flujos promedio con dirección hacia aguas profundas en ambas temporadas, tanto en las observaciones de los derivadores como en los anclajes. Los promedios mensuales del flujo perpendicular a la isóbata en los anclajes A y B (Figura 24) indicaron un flujo promedio con dirección hacia la región de aguas profundas a lo largo del año, significativo de agosto a noviembre. En el anclaje C (Figura 24), el flujo promedio significativo tuvo una dirección hacia la plataforma en diciembre, junio y julio y hacia aguas profundas de septiembre a noviembre. En esta región del golfo aunque los resultados lagrangianos y eulerianos, sugirieron una dirección hacia aguas profundas en ambas temporadas, los promedios mensuales indicaron que solo es significativa en los meses de otoño (septiembre-noviembre).

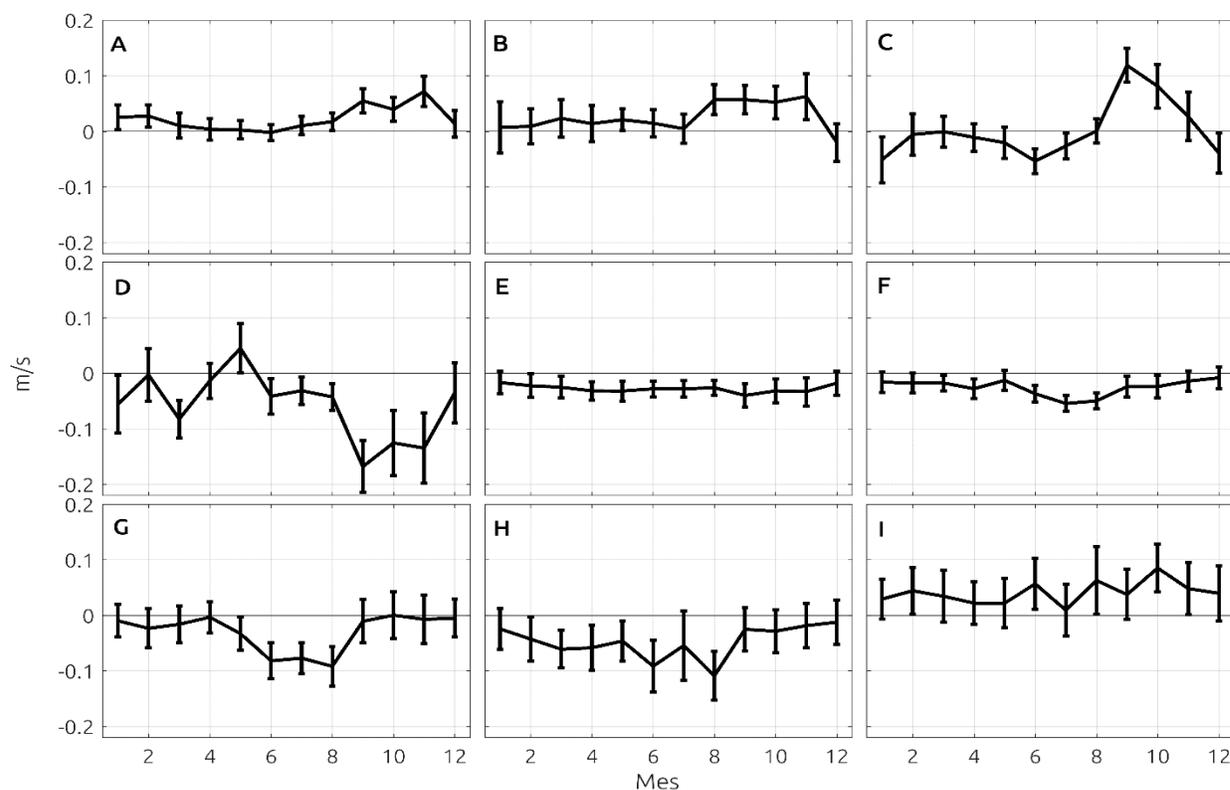


Figura 24. Promedios mensuales del flujo perpendicular a la isóbata con intervalos de confianza al 95 % observado en los anclajes en el oeste y sur del golfo de México entre 2008-2017. Los valores positivos (negativos) indican flujos promedio en dirección de la plataforma hacia aguas profundas (de aguas profundas hacia la plataforma). Anclajes en la isóbata de 130 m (A,C,D-I) y 500 m (B).

En el suroeste de la bahía de Campeche (19° N, 94° - 96° W) la dirección preferencial en el intercambio de agua con base en el análisis lagrangiano (3.4.1), fue de la plataforma hacia la región de aguas profundas en ambas temporadas (polígono 5, Figura 22). Por el contrario, la dirección promedio observada en el análisis euleriano por los derivadores y con los anclajes en esta región fue de aguas profundas hacia la plataforma en ambas temporadas (Figura 23). Los flujos promedios mensuales en el suroeste de la bahía, en el anclaje D (Figura 24) se observaron en dirección hacia la plataforma continental casi todo el año, siendo no significativos en diciembre, febrero, abril y mayo. En el anclaje E (Figura 24) el promedio del flujo tuvo una dirección significativa hacia la plataforma a lo largo de casi todo el año con excepción de diciembre a febrero. Los resultados eulerianos sugirieron que la dirección promedio del flujo perpendicular a la isóbata en el sur de la bahía de Campeche es hacia el interior de la plataforma a lo largo de todo el año, con eventos de mayor intensidad entre septiembre-noviembre. La discrepancia de la dirección entre el análisis lagrangiano y euleriano podría deberse al poco muestreo de las trayectorias al interior de la plataforma (39 trayectorias en abril-agosto y 87 en septiembre-

marzo), que resultó en proporciones altas de cruces hacia aguas profundas o a procesos de dispersión que se ven reflejados en los resultados lagrangianos pero no en los promedios por temporada.

En el oeste del golfo, en las plataformas de Veracruz y Tamaulipas el análisis euleriano mostró flujos promedio con dirección hacia la plataforma en ambas temporadas, mientras que los resultados del análisis lagrangiano no fueron robustos. Los resultados lagrangianos frente a Veracruz (polígono 6 de la Figura 22) mostraron porcentajes mayores de las trayectorias que cruzaron desde aguas profundas hacia la plataforma en ambas temporadas, pero estos no fueron concluyentes por falta de observaciones en la plataforma en ambas temporadas. Los promedios mensuales del flujo a través de la isóbata mostraron en promedio una dirección hacia la plataforma que fue significativa en los meses de marzo y abril, junio-octubre y en general más cercano a cero en los meses de noviembre-febrero. Los resultados de los análisis lagrangiano y euleriano, así como los promedios mensuales del flujo a través de la isóbata, sugirieron que frente a Veracruz la dirección preferencial es de aguas profundas hacia la plataforma a lo largo de todo el año y es más evidente en abril-agosto (Figura 22, Figura 23 y Figura 24). Frente a Tamaulipas (polígono 7 de la Figura 22) los porcentajes de cruce por la isóbata de 200 m indicaron una dirección preferencial de entrada (45 %) frente a la de salida (13 %) de la plataforma en abril-agosto, mientras que los porcentajes fueron similares (30 % de entrada y 39 % de salida) en septiembre-marzo. Los promedios mensuales del flujo a través de la isóbata a los 22° N en el anclaje G (Figura 24), mostraron una dirección del flujo promedio hacia la plataforma que fue significativa de mayo a agosto y promedios cercanos a cero el resto de año (septiembre-abril). Estos promedios coincidieron con lo observado en el análisis lagrangiano en el polígono 7 (Figura 22). Por otro lado a los 24 ° N, en el anclaje H, los promedios mensuales indicaron un flujo en dirección hacia la plataforma casi todo el año pero que no es significativa en julio y septiembre-febrero (Figura 24). En el oeste del golfo, los resultados complementarios de los promedios mensuales del flujo a través de las isóbatas (Figura 24) en conjunto con los resultados del análisis euleriano (Figura 23) y lagrangiano (Figura 22) sugirieron que en la plataforma de Tamaulipas, la dirección preferencial en el intercambio es hacia la plataforma a lo largo de todo el año predominantemente entre abril-agosto (21°-24° N, 97° W), mientras que al sur en la frontera con Veracruz (22° N, 97° W) la dirección preferencial es hacia la plataforma en abril-agosto y no existe una dirección preferencial en septiembre-marzo.

En la plataforma al sur de Texas (~ 25-26° N, 96.5° W), los análisis lagrangiano y euleriano mostraron una dirección preferencial hacia aguas profundas en abril-agosto. En septiembre-marzo, el análisis euleriano mostró una dirección del flujo promedio perpendicular a la isóbata en dirección hacia aguas profundas en el anclaje I y los derivadores (Figura 23) mientras que no se observó diferencia entre

los porcentajes de entrada y salida (32% y 31 % respectivamente, Figura 22). El promedio mensual del flujo perpendicular a la isóbata tuvo una dirección hacia aguas profundas en el anclaje I (I, Figura 24) a lo largo de todo el año pero significativa solo en febrero, junio y octubre. En los meses en los que el promedio resultó ser no significativo, los valores mínimos de los intervalos de confianza fueron cercanos a cero, por lo que se infiere que el flujo perpendicular a las isóbatas se encuentra limitado y cuando ocurre tiende a ser en dirección hacia aguas profundas, o bien ambas direcciones ocurren en magnitudes y/o duraciones similares. La predominancia de la dirección hacia aguas profundas del flujo perpendicular a la isóbata se observó claramente en los porcentajes de trayectorias de salida y entrada a la plataforma en abril-agosto (45 % y 7 % respectivamente) ilustrados en la Figura 22.

En resumen, las regiones en las que se observó con certeza que la dirección preferencial fue desde aguas profundas hacia la plataforma (entrada a la plataforma) en el análisis lagrangiano (3.4.1) y en el euleriano (3.4.2) fueron: la plataforma de Tamaulipas (23° - 24° N, 97° W) y la plataforma de Texas y Luisiana ($> 28^{\circ}$ N, 91 - 98° W) en abril-agosto (Figura 22 y Figura 23). Por otro lado, los resultados eulerianos en los anclajes y derivadores sugirieron que la dirección promedio del flujo perpendicular a la isóbata es hacia la plataforma en el suroeste de la bahía de Campeche, las plataformas de Veracruz (19° - 21° , 97° W) y Tamaulipas (23 - 24° N, 97° W) a lo largo de casi todo el año.

Las regiones en las que en ambos análisis (3.4.1 y 3.4.2) se observó con certeza que la dirección preferencial fue desde la plataforma hacia aguas profundas (salida de la plataforma) fueron: el sureste de la bahía de Campeche (18° - 21° N, 92° - 94° W) en septiembre-marzo y la plataforma al sur de Texas ($\sim 25^{\circ}$ - 26° N, 96.5° W) en abril-agosto (Figura 22 y Figura 23). Por otro lado, los resultados eulerianos en los anclajes y derivadores sugirieron que la dirección promedio del flujo perpendicular a la isóbata es hacia aguas profundas en el sur de Texas (26° N, 96.5° W) a lo largo de casi todo el año.

Las regiones en las que no se observó una dirección preferencial en el intercambio entre aguas profundas y la plataforma en ambos análisis fueron: el sur de la plataforma oeste de Florida (24 - 26° N, $< 86^{\circ}$ W) en abril-agosto, y el norte de la plataforma oeste de Florida (26 - 29° N, $< 86^{\circ}$ W) y la plataforma de Luisiana ($> 27^{\circ}$ N, 90 - 94° W) en septiembre-marzo. Por otro lado, los resultados eulerianos en los anclajes y derivadores sugirieron que no existe una dirección preferencial en el intercambio en el medio de la plataforma entre Tamaulipas y Veracruz aproximadamente a los 22° N, 97° W en septiembre-marzo (Figura 23).

Capítulo 4. Discusión

En este trabajo se cuantificó el intercambio de agua superficial entre la plataforma y la región de aguas profundas y se evaluó dónde y cuándo es más probable que el agua superficial en la plataforma continental sea transportada hacia aguas profundas y viceversa en el golfo de México. Se utilizaron las observaciones de un gran número de derivadores superficiales entre 1993-2018 y anclajes de correntímetros entre 2008-2017 alrededor de la plataforma y el talud del golfo. Desde el punto de vista lagrangiano, se calcularon las proporciones de las trayectorias de los derivadores que cruzaron la isóbata de los 200 m para salir o entrar a la plataforma continental en 13 regiones alrededor del golfo, y en las temporadas de septiembre-marzo y abril-agosto. Los resultados del análisis lagrangiano se compararon con los promedios eulerianos de la componente de la velocidad perpendicular a la costa observados en los anclajes, así como de los datos de los derivadores distribuidos en una malla regular de 1/3 de grado. Los resultados obtenidos mostraron un patrón general de transporte entre la plataforma y la región de aguas profundas consistente con algunos resultados obtenidos a partir de 21 años de simulación del modelo de circulación de alta resolución *Hybrid Coordinate Ocean Model* reportados por Nieblas-Piquero (2019, ver Figura 5 y Figura 23), así como con los patrones estacionales de transporte de agua superficial hacia aguas profundas observados previamente a partir de imágenes satelitales (SeaWiFs) y reanálisis de vientos (NCEP/NCAR) mensuales entre 1997-2007 reportados por Martínez-López y Zavala-Hidalgo (2009, ver Figura 4 y Figura 20).

La discusión se centrará en el golfo de México occidental, región en la que se determinó de forma robusta una clara dirección preferencial del intercambio superficial entre la plataforma y la región oceánica. También es en esta región en la que se cuenta tanto con las trayectorias de derivadores superficiales, como con 8 años de corrientes medidas por perfiladores acústicos anclados, lo cual nos permite tener una mayor certidumbre en los resultados. Primero se discuten los resultados obtenidos en las regiones de las plataformas en el sur de Texas y el sureste de la bahía de Campeche (4.1) en las que la dirección preferencial fue desde la plataforma hacia la región de aguas profundas, después la plataforma oriental de Texas (4.2) donde se observaron probabilidades altas de entrar a la plataforma y por último, el intercambio observado entre la plataforma y la región profunda en la plataforma de Veracruz y el sur de Tamaulipas (4.3).

4.1 Exportación de agua superficial desde la plataforma continental hacia aguas profundas en el golfo de México occidental

Los resultados mostraron que en las plataformas al sur de Texas-norte de Tamaulipas, así como al sureste de la bahía de Campeche, hay un transporte promedio en ambas temporadas hacia aguas profundas. La exportación de aguas superficiales desde la plataforma hacia aguas profundas es importante para la fertilización de la región oceánica por medio del transporte de las descargas fluviales ricas en clorofila y de baja salinidad (Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009; Morey et al., 2003) y además tiene efectos en la distribución de larvas de especies nerítico-oceánicas (Compaire et al., 2020). Este transporte es generado por la interacción de varios procesos físicos que se discuten a continuación.

▪ La plataforma al sur de Texas

En la plataforma al sur de Texas ($\sim 26^\circ$ N, $\sim 96^\circ$ W), el análisis lagrangiano mostró probabilidades altas de salida de agua de la plataforma en ambas temporadas (polígono 8 de la Figura 22), que fue mucho mayor en abril-agosto (46 %) respecto a septiembre-marzo (31%). Aunque las proporciones de las trayectorias observadas que cruzaron la isóbata de los 200 m en septiembre-marzo, no mostraron una dirección preferencial (31 % de salida vs 32 % de entrada, Figura 22), las observaciones de 8 años de corrientes en el anclaje en esa zona (anclaje I, Figura 23 y Figura 24) sugirieron que la dirección promedio del flujo perpendicular a la isóbata de 130 m es desde la plataforma hacia aguas profundas a lo largo de casi todo el año. Además, en contraste con las altas probabilidades de salir en esta región, se observó una probabilidad muy baja de entrar a la plataforma (6%) en abril-agosto (polígono 8, Figura 18).

Sturges y Blaha (1976) analizaron diversos estudios sobre el rotacional del esfuerzo del viento en el golfo y observaron la persistencia de un giro anticiclónico en el golfo occidental, más intenso en verano e invierno, que consideran análogo al giro subtropical debido a los vientos del Atlántico norte. Los autores sugieren que sobre el talud continental del oeste del golfo de México existe una corriente de frontera oeste entre los $24-26^\circ$ N, en analogía a la corriente del Golfo en el oeste del Atlántico. Esta corriente de frontera oeste se separa del talud al interactuar con el cabo en la boca del Río Bravo (26° N), en la misma región en la que se observó transporte hacia el océano de manera casi persistente en este trabajo.

La circulación anticiclónica promedio que produce el flujo hacia el este a $\sim 26^\circ$ N también ha sido asociada a la propagación hacia el oeste de remolinos del Lazo y su arribo al talud continental al sur de los 26° N, pero la contribución relativa del forzamiento del viento y de los remolinos anticiclónicos a este patrón de circulación a la fecha se desconoce (p. ej. Schmitz et al., 2005). Por ejemplo, Meza-Padilla et al., (2019) reportaron un patrón dominante de transporte hacia el océano en la isóbata de 200 m entre $25-26^\circ$ N generado por el impacto de los remolinos de Lazo con el talud continental de la plataforma oeste del golfo, a partir de mapas auto-organizados de salinidad y corrientes a 200 m con 20 años de un modelo de circulación general. Por otro lado, el estudio numérico de Guerrero et al., (2020) reporta en promedio transporte hacia aguas profundas aproximadamente a los 25.5° N, generado por el extremo norte de remolinos anticiclónicos de mesoescala que interactúan con el quiebre de la plataforma oeste del golfo.

En contraste con las probabilidades altas de salir de la plataforma observadas en esta región, Gough et al., (2019) observaron una barrera dinámica persistente que aísla la plataforma de la región de aguas profundas a lo largo de todo el año en el oeste del golfo entre $24-26^\circ$ N. La barrera se observó como una estructura lagrangiana coherente asociada a la corriente de frontera oeste, calculada a partir de la climatología de 18 años de velocidades diarias de corrientes modeladas numéricamente con el modelo *Nucleus for European Modelling of the Ocean*. El promedio euleriano del flujo perpendicular a las isóbatas en la plataforma oeste entre $24-26^\circ$ N de este estudio sugiere que existe una divergencia: con flujo hacia la costa en el interior de la plataforma y flujo hacia el océano cerca del talud continental en abril-agosto (Figura 23), lo que es consistente con la baja proporción de entradas observada (6 %). Sin embargo, la divergencia del flujo promedio no se observó en septiembre-marzo, cuando la proporción de entradas fue del 32 %. Asimismo, las trayectorias que iniciaron en la plataforma y cruzaron la isóbata de 200 m hacia aguas profundas provenían desde zonas más someras (inspección de trayectorias, Figura 16d), por lo que no parece indicar que la plataforma esté tan aislada de la región profunda como lo sugieren Gough et al. (2019). Aunque la punta de la estructura lagrangiana en forma de “garfio” que describen Gough et al. (2019). podría contribuir a transportar material desde la plataforma hacia aguas profundas, esto no ha sido bien estudiado y requiere de mayor análisis. Por otro lado, Compaire et al., (2020) observaron en la plataforma oeste del golfo entre Tamaulipas y Texas, que el transporte de larvas neríticas de peces hacia aguas profundas ocurre cuando el frente dinámico sobre el talud continental se muestra inestable, así como a los flujos costa-afuera generados por la presencia de remolinos sobre el talud continental (anticiclónicos al sur y/o ciclónicos al norte). Esto se corroboró con muestras biológicas de larvas de peces colectadas en aguas profundas, con las trayectorias

simuladas del origen de las larvas usando corrientes modeladas numéricamente (*Hybrid Coordinate Ocean Model*), e imágenes satelitales del color del océano.

Consistente con la probabilidad más alta de salir de la plataforma del sur de Texas observada entre abril-agosto (46 %, polígono 8 en Figura 20), Martínez-López y Zavala-Hidalgo, (2009) observaron un transporte hacia aguas profundas de aguas ricas en clorofila con máximos en el mes de mayo en esta región ($\sim 26^\circ$ N) a partir de imágenes satelitales de color del océano. Este transporte mar adentro lo asocian a las convergencias a lo largo de la costa de las corrientes ocasionadas por las variaciones estacionales en la dirección del esfuerzo del viento.

Aunque se han presentado los principales mecanismos propuestos como los responsables de generar el transporte desde la plataforma hacia el océano, estos aún no están del todo resueltos y pareciera ser que existe una sinergia de procesos asociados, que se requiere estudiar de manera más detallada.

▪ El sureste de la bahía de Campeche

Los promedios eulerianos del flujo perpendicular a las isóbatas obtenidos con los correntímetros anclados, mostraron la predominancia de un promedio en dirección hacia aguas profundas a lo largo de casi todo el año, que fue ligeramente de mayor magnitud en los meses de invierno (anclajes B y C, Figura 23 y Figura 24). En esta región el análisis lagrangiano mostró probabilidades muy altas de salir de la plataforma (polígono 4 de la Figura 22), que fue más alta en septiembre-marzo (77 %) respecto a abril-agosto (58 %), consistente con las variaciones de las magnitudes observadas en los promedios eulerianos del flujo perpendicular a las isóbatas (Figura 23).

La dirección preferencial hacia aguas profundas en septiembre-marzo, fue consistente con el transporte de agua rica en clorofila desde la plataforma hacia aguas profundas observado con imágenes satelitales mensuales de color del océano (Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009). Estos autores sugieren que el flujo costa-afuera se debe a la convergencia de corrientes sobre la plataforma que van en direcciones opuestas, debidas a una convergencia del esfuerzo del viento a lo largo de la costa que se intensifica en los meses de invierno, con máximos en octubre-noviembre. Por otro lado, se ha observado que el giro ciclónico de Campeche el cual tiene una presencia semipermanente en la región occidental de la bahía de Campeche frecuentemente interactuando con el talud (Pérez-Brunius et al. 2013), podría también contribuir al transporte hacia agua profundas en la región sureste de la bahía, por

un mecanismo análogo al sugerido por Guerrero et al. 2020 para el transporte hacia aguas profundas a 25.5° N. Esto es, el extremo oriental del giro de Campeche localizado en la zona sureste de la bahía, así como el extremo norte de un anticiclón interactuando con el talud occidental, promueven transporte de la plataforma hacia aguas profundas.

4.2 Importación de aguas desde aguas profundas hacia la plataforma en la región occidental del golfo

La plataforma occidental del golfo de México se caracteriza por ser más angosta que lo generalmente se observa en aguas estadounidenses y frente a la península de Yucatán. Además, a esta región frecuentemente arriban remolinos anticiclónicos de la corriente del Lazo, entre los 22° y los 26° N y también es común encontrar al giro ciclónico de Campeche interactuando con el talud al sur de los 22° N (Guerrero et al. 2020). Las interacciones de estas estructuras de mesoescala con el talud influyen a los flujos en la plataforma y favorecen el intercambio de material con la región oceánica (p. ej. Vidal et al., 1992).

▪ Plataforma oriental de Texas

En el noroeste del golfo en la plataforma de Texas-Luisiana (polígonos 9 y 10, Figura 18), el análisis lagrangiano sugirió que hay probabilidades altas ($\geq 30\%$) de entrar a la plataforma sobre todo en verano (hasta 58 %, Figura 18). Por otro lado, se observaron probabilidades muy bajas de salir de la plataforma ($\leq 15\%$), aún menores en verano (9 % ambos polígonos, Figura 20). Los promedios eulerianos de los flujos perpendiculares a las isóbatas mostraron una dirección hacia la plataforma continental sobre toda la región en abril-agosto, mientras que no hubo una dirección promedio clara en toda la plataforma en septiembre-marzo (Figura 23).

Los resultados obtenidos frente a Texas-Luisiana coincidieron con lo reportado por Lugo-Fernández et al., (2001) quienes observaron en un análisis de probabilidad del arribo de observaciones de derivadores superficiales a las costas de Estados Unidos, que las costas de Texas tuvieron las probabilidades más altas en los meses de primavera y verano. También fueron consistentes con lo reportado por Ohlmann et al., (2001) que con base en un análisis de los cruces por la isóbata de los 200 m de trayectorias de derivadores superficiales, observaron mayor porcentaje de transporte hacia la

plataforma en el noroeste del golfo. Consistente con las bajas probabilidades de salir de la plataforma de Texas-Luisiana (<15 %, polígonos 9 y 1 de la Figura 22), Gough et al., (2019) observaron porcentajes de salida hacia aguas profundas entre 5-19 % con base en observaciones de derivadores superficiales y un ensamble de trazadores en 18 años de corrientes modeladas numéricamente.

En contraste con los resultados observados, Thyng y Hetland (2018) a partir de trayectorias de partículas simuladas numéricamente observaron que los vientos del norte incrementan la probabilidad de cruzar la isóbata de los 100 m hacia aguas profundas en invierno. Así mismo, observaron que las descargas fluviales del Misisipi incrementan el transporte hacia aguas profundas en los meses de verano. Sin embargo, esto no se vio reflejado en los resultados de este trabajo, donde la proporción de trayectorias que salieron de la plataforma de Texas y Luisiana fue baja en septiembre-marzo (< 16 %, polígonos 9 y 10, Figura 22), y muy baja para el periodo de abril-agosto (< 9 %, polígonos 9 y 10, Figura 22). Además, los promedios eulerianos del flujo perpendicular a la isóbata de 200 m fueron altos en dirección hacia el interior de la plataforma en abril-agosto (Figura 22 y Figura 23). Esto es, ni el análisis lagrangiano ni el euleriano sugieren que hay una dirección preferencial hacia aguas profundas en ninguna temporada. No tenemos explicación para esta discrepancia, aunque pudiera ser reflejo de que los flujos hacia aguas profundas reportados por Thyng y Hetland (2018) son episódicos, y no ocurren tan frecuentemente como para aparecer en los promedios de temporada, así como que pudiera ser que los flujos que cruzan los 100 m no logran llegar a profundidades mayores de 200 m (como se mostró en este estudio).

Los resultados sugirieron que la plataforma oriental de Texas (27-30° N) es una región que funciona como receptora de partículas provenientes de aguas profundas y que difícilmente puede exportar material de la plataforma hacia el océano. Esta plataforma ha sido reportada anteriormente como una zona de retención (Duran et al., 2018; Gough et al., 2019), y como las corrientes a lo largo de la plataforma son dominantes sobre la plataforma (Ohlmann y Niiler, 2005), actúa más bien como distribuidora de material de aguas profundas a lo largo de la plataforma continental. Esta región es importante porque la dirección preferencial hacia el interior de la plataforma observada sobre todo en abril-agosto, podría tener grandes impactos en la distribución de contaminantes provenientes de aguas profundas en aguas someras, como podría ser el petróleo derramado por un accidente costa-afuera.

4.3 El intercambio de agua en la plataforma de Tamaulipas y Veracruz

Los resultados del análisis lagrangiano mostraron contundentemente mayor proporción de entradas (51 %-45 %) que de salidas (23 %-13 %) en el oeste del golfo en abril-agosto (polígonos 6 y 7, Figura 22), mientras que en septiembre-marzo las proporciones fueron parecidas en ambos sentidos (~ 30 %). La dirección preferencial hacia la plataforma que se obtuvo con el análisis lagrangiano para abril-agosto fue consistente con los promedios eulerianos en dirección hacia el interior de la plataforma obtenido tanto con los datos de los derivadores como de los anclajes. Ese promedio también dio hacia la plataforma en la temporada de septiembre-marzo, pero su magnitud fue menor e incluso llegó a ser no significativamente diferente de cero (anclaje G, Figura 23) o en dirección contraria en ciertas zonas (entre 24° y 26°N), consistente con la falta de dirección preferencial observada con los resultados lagrangianos para esa temporada (Figura 23).

El estudio numérico con simulaciones de 21 años de Nieblas-Piquero (2019) mostró un transporte a través de la isóbata de los 200 m con dirección hacia el interior de la plataforma, que predominó a lo largo de todo el año, con importantes señales diurnas del viento que se intensificaron en verano.

El estudio numérico de Guerrero et al. (2020) mostró que la interacción de remolinos anticiclónicos de mesoescala con el quiebre del talud continental en el oeste del golfo produce transporte a través de la isóbata de los 200 m con múltiples inversiones de la dirección en la región alrededor de los 22 ° N, y un flujo hacia el interior de la plataforma en el extremo sur cuando el remolino anticiclónico interactúa con el giro de Campeche. El análisis lagrangiano y euleriano de esta tesis mostró que hay una dirección preferencial hacia el interior entre los 20° y 24° N en septiembre-marzo, que es a grandes rasgos la zona donde tienden a interactuar el giro de Campeche y los remolinos del Lazo.

Al sur de la plataforma de Veracruz, en el suroeste de la bahía de Campeche, los resultados mostraron mayor proporción de trayectorias que cruzaron la isóbata de 200 m hacia aguas profundas (polígono 5 Figura 22) en contraste con un promedio euleriano del flujo hacia el interior de la plataforma para ambas temporadas (Figura 23). El porqué de las diferencias en la dirección preferencial entre ambos análisis no está claro y requiere de mayor investigación, pero se presentan a continuación algunas consideraciones que podrían abordarse en un futuro. El flujo promedio hacia el interior de la plataforma observado en ambas temporadas puede estar asociado al flujo del extremo occidental del giro ciclónico de la bahía de Campeche (Pérez-Brunius et al., 2013). El que esto no se vea reflejado en una mayor proporción de trayectorias que entran a la plataforma pudiera deberse a que, siendo una plataforma

muy angosta, las trayectorias quedan principalmente alineadas con las isóbatas. Las entradas o salidas realmente no reflejan un desplazamiento considerable alejándose de la isóbata de los 200 m, sino más bien un flujo a lo largo del quiebre del talud. Una inspección de las trayectorias mostró que tienden a entrar en la parte norte y salir en la parte oriental del polígono 5 (figura 22), consistente con el flujo ciclónico del giro. El hecho de observar una proporción alta de salidas en este polígono pudiera estar asociado a momentos en que el giro ciclónico se acerca al talud occidental (Zavala-Sansón et al., 2017), resultando en un flujo de la plataforma hacia aguas profundas en la parte sur de la bahía de Campeche (sección oriental del polígono 5 figura 22), análogo al transporte hacia mar adentro que ocurre en la sección norte de remolinos de Lazo interactuando con el talud alrededor de los 26° N. Sin embargo, en el polígono 5 al suroeste de la bahía se observaron muy pocas trayectorias (< 80), por lo que los resultados no son robustos.

Capítulo 5. Sumario y conclusiones

Con el objetivo de identificar las regiones y temporadas más importantes para el intercambio superficial entre la plataforma y la región de aguas profundas en todo el golfo de México se analizaron las observaciones de 2 150 trayectorias de derivadores superficiales entre los años 1993 y 2018, y de velocidades registradas con perfiladores de corrientes en anclajes a lo largo del suroeste del golfo entre los años 2008-2017. El análisis de los datos se realizó en dos temporadas: septiembre-marzo y abril-agosto, para evaluar la posible estacionalidad en el transporte perpendicular a las isóbatas, asumiendo que podría estar relacionado a la variabilidad estacional observadas en los vientos a lo largo de la costa en el golfo (Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009; Zavala-Hidalgo, 2003).

Las regiones en las que es más probable entrar o salir de la plataforma continental se identificaron desde un punto de vista lagrangiano, estimando las probabilidades de entrada y salida de la plataforma con base en las proporciones de las trayectorias de los derivadores que cruzaron por la isóbata de 200 m desde aguas profundas hacia la plataforma y viceversa, en 13 polígonos alrededor del golfo conteniendo a la plataforma y al talud continental.

Las regiones en las que se observó una dirección preferencial en el intercambio superficial entre la plataforma y aguas profundas se identificaron con base en la comparación entre las proporciones de las trayectorias de entrada y las de salida de la plataforma del análisis lagrangiano, así como con los promedios del flujo perpendicular a las isóbatas de un análisis euleriano. El análisis euleriano consistió en el cálculo del promedio por temporada del flujo perpendicular a la isóbata de 130 m observado con los perfiladores de corrientes en los anclajes, y al promedio por temporada de los flujos perpendiculares a las isóbatas observados por los derivadores superficiales, distribuidos en una malla regular de $1/3^\circ$ alrededor del quiebre de la plataforma.

Los resultados del análisis lagrangiano y euleriano en general coincidieron en la dirección preferencial del intercambio en la mayoría de las regiones con excepción del suroeste de la bahía de Campeche, en la que se observaron direcciones opuestas. La discrepancia en la dirección preferencial entre los análisis lagrangiano y euleriano en el suroeste de la bahía de Campeche podría deberse a los efectos del giro de Campeche en la circulación en aguas profundas y a lo largo del talud continental, y al hecho de que la plataforma en esta región es muy angosta. Sin embargo, las plataformas mexicanas del golfo (sobre todo la plataforma de Yucatán) se encontraron pobremente muestreadas por lo que se recomienda incrementar los esfuerzos e inversión en la investigación a partir de mediciones lagrangianas

in situ para estudiar los efectos de la dispersión en el intercambio entre la plataforma y el océano en estas plataformas.

Las regiones importantes en las que se observó una dirección preferencial hacia aguas profundas fueron el sur de Texas y la bahía de Campeche, consistente con lo reportado con Martínez-López y Zavala-Hidalgo (2009) quienes observaron la exportación de agua rica en clorofila hacia el océano a partir de imágenes satelitales de color el océano y reanálisis de vientos. Esto sugiere que estas regiones son importantes para remover partículas y sustancias de la plataforma y distribuirlas hacia aguas profundas. Sin embargo, los resultados del estudio entran en aparente contradicción con lo reportado por Gough et al., (2019) quienes sugieren que hay una barrera dinámica persistente entre 24-26°N que mantiene aislada a la plataforma continental de la región de aguas profundas, a partir de la observación de una estructura coherente lagrangiana persistente calculada con velocidades climatológicas de corrientes modeladas numéricamente. El trabajo de Compaire et al. (2020) confirma que este frente actúa limitando el transporte de larvas neríticas hacia aguas profundas, pero que este transporte ocurre debido a inestabilidades del frente o la presencia de remolinos de mesoescala interactuando con el talud. Es posible que los promedios climatológicos utilizados por Gough et al. (2019) filtren los procesos que dan lugar al intercambio en esta región y que parecen ocurrir con la frecuencia suficiente para aparecer en los promedios estacionales de color del mar, así como en los análisis eulerianos y lagrangianos obtenidos en este estudio. Una revisión más detallada de la variabilidad de los procesos en esta región es necesaria para una mejor comprensión del intercambio entre la plataforma y el océano.

La plataforma oriental de Texas fue una región con probabilidades altas de que aguas de la región oceánica entren en ambas temporadas y fue aún mayor en primavera-verano (58 %). Los resultados fueron consistentes con probabilidades altas de arribo a las costas de Texas-Luisiana sobre todo en verano calculadas a partir de observaciones de derivadores superficiales (Lugo-Fernández et al., 2001). Esta región podría ser importante para la recepción y distribución de partículas contaminantes provenientes de la región oceánica, como podría ser el petróleo derramado en un incidente de un pozo de exploración en aguas profundas.

En la plataforma de Veracruz, la dirección preferencial del intercambio en promedio fue hacia la plataforma continental y se observó de mayor magnitud en abril-agosto, consistente con los resultados numéricos de Nieblas-Piquero (2019) a lo largo de todo el año. Las proporciones iguales de entrada y salida (~ 30 %) observadas en septiembre-marzo y la disminución de la magnitud del promedio euleriano en dirección hacia la plataforma hasta ser no significativamente diferente de cero a los 22° N, es

consistente con las inversiones de la dirección del transporte promedio a través de la isóbata de 200 m generadas por la interacción de los remolinos de mesoescala con el quiebre del talud continental observadas a partir de corrientes modeladas numéricamente (Guerrero et al. 2020).

Este es el primer estudio observacional que cuantifica el intercambio de agua superficial entre la plataforma y la región de aguas profundas estacionalmente y en todo el golfo de México, gracias a un conjunto de datos con una amplia distribución geográfica y series de tiempo largas. La similitud en los promedios de largo periodo de estos flujos con lo obtenido a partir de estudios numéricos da certeza de que estos últimos son capaces de reproducir al menos esos patrones globales. Esto es alentador, ya que los modelos numéricos son herramientas que pueden dar respuestas más concretas sobre los principales procesos involucrados en dicho intercambio. Por otro lado, esa consistencia también invita a explorar más las bases de datos utilizadas para analizar eventos particulares para así poder tener una base observacional para entender mejor en qué condiciones se da el transporte en la plataforma y la región oceánica del golfo de México.

Literatura citada

- Beyer, J., Trannum, H. C., Bakke, T., Hodson, P. V., Collier, T. K. 2016. Environmental effects of the Deepwater Horizon oil spill: a review. *Marine Pollution Bulletin*, 110. doi:10.1016/j.marpolbul.2016.06.027
- Bracco, A., Liu, G., Sun, D. 2019. Mesoscale-submesoscale interactions in the Gulf of Mexico: from oil dispersion to climate. *Chaos, Solitons and Fractals*. doi:10.1016/j.chaos.2018.12.012
- Brink, K. H. 2016. Cross-Shelf exchange. *Annual Review of Marine Science*, 8(1), 59–78. doi:10.1146/annurev-marine-010814-015717
- Brink, K. H., Cowles, T. J. 1991. The coastal transition zone program. *Journal of Geophysical Research*. doi:10.1029/91jc01206
- Chen, H. 2019. Chapter 1: Bootstrap method. Consultado en febrero de 2019, en: <http://www.math.ntu.edu.tw/~hchen/teaching/LargeSample/notes/notebootstrap.pdf>
- Cherian, D. A., Brink, K. H. 2016. Offshore transport of shelf water by deep-ocean eddies. *Journal of Physical Oceanography*. doi:10.1175/JPO-D-16-0085.1
- Compaire, J. C., Pérez-Brunius, P., Jiménez-Rosenberg, S., Rodríguez-Outereño, J., Echeverri-García, L. del P., Herzka, S. 2020. Connectivity of coastal and neritic fish larvae to the deep waters of the Perdido region (western Gulf of Mexico) inferred from in situ sampling and ocean circulation modelling (En revisión). *Limnology and Oceanography*.
- Cushman-Roisin, B., Beckers, J. M. 2010. Introduction to geophysical fluid dynamics. *Physical and Numerical Aspects*. En: *Analysis*, 101. doi:10.1016/B978-0-12-088759-0.00022-5
- Deepwater Horizon Natural Resource Damage Assessment Trustees. 2016. Deepwater Horizon oil spill final programmatic damage assessment and restoration plan and final programmatic environmental impact statement. Consultado en octubre de 2019, en: <https://www.gulfspillrestoration.noaa.gov/restoration-planning/gulf-plan>
- Dimarco, S. F., Nowlin, W. D., Reid, R. O. 2005. A statistical description of the velocity fields from upper ocean drifters in the gulf of Mexico. *Geophysical Monograph Series*, 161. doi:10.1029/161GM08
- Duran, R., Beron-Vera, F. J., Olascoaga, M. J. 2018. Extracting quasi-steady Lagrangian transport patterns from the ocean circulation: an application to the Gulf of Mexico. *Scientific Reports*, 8(1). doi:10.1038/s41598-018-23121-y
- Franks, J. S., Johnson, D. R., Dong-Shan, K., Sanchez-Rubio, G., J. Read, H., Lay, M. 2011. Unprecedented influx of pelagic *Sargassum* along Caribbean island coastlines during summer 2011 Loss of blue carbon from coastal wetlands (NASA) View project. En: *Proceedings of the Gulf and Caribbean Fisheries Institute*, 64, 6–8.
- Garrison, T. 2006. *Essentials of oceanography* (4ta ed.). Consultado en marzo de 2019, en: <https://books.google.com.mx/books?id=AXIGAAAAQBAJ>
- Gough, M. K., Beron-Vera, F. J., Olascoaga, M. J., Sheinbaum, J., Jouanno, J., Duran, R. 2019. Persistent

- Lagrangian transport patterns in the Northwestern Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography*, 49(2), 353–367. doi:10.1175/JPO-D-17-0207.1
- Guerrero, L., Sheinbaum, J., Mariño-Tapia, I., González-Rejón, J. J., Pérez-Brunius, P. 2020. Eddy-shelf break influence on the cross-shelf exchange in the Mexican Western Gulf of Mexico (En revisión). *Continental Shelf Research*.
- Huthnance, J. M. 1995. Circulation, exchange and water masses at the ocean margin: the role of physical processes at the shelf edge. *Progress in Oceanography*, 35(4), 353–431. doi:10.1016/0079-6611(95)80003-C
- Jennerjahn, T. C. 2012. Biogeochemical response of tropical coastal systems to present and past environmental change. *Earth-Science Reviews*, 114. doi:10.1016/j.earscirev.2012.04.005
- Joseph, A. 2014. *Measuring ocean currents: tools, technologies, and data*. Elsevier Inc. 448 pp.
- LaCasce, J. H. 2008. Statistics from Lagrangian observations. *Progress in Oceanography*, 77. doi:10.1016/j.pocean.2008.02.002
- Lara-Lara, R., Arenas-Fuentes, V., Bazán-Guzmán, C., Díaz-Castañeda, V., Escobar-Briones, E., García-Abad, M. de la C., Gaxiola-Castro, G., Robles-Jarero, G., Sosa-Ávalos, R., Soto-González, L. A., Tapia-García, M., Valdez-Holguín, E. 2008. Los ecosistemas marinos. En: *Capital natural de México. I: conocimiento actual de la biodiversidad*. CONABIO, México, pp. 135-159. Consultado en marzo de 2019, En: https://www.biodiversidad.gob.mx/v_ingles/country/pdf/CapNatMex/Vol%20I/I05_Losecosistemasmr.pdf
- Le-Hénaff, M., Muller-Karger, F. E., Kourafalou, V. H., Otis, D., Johnson, K. A., McEachron, L., Kang, H. S. 2019. Coral mortality event in the Flower Garden Banks of the Gulf of Mexico in July 2016: Local hypoxia due to cross-shelf transport of coastal flood waters? *Continental Shelf Research*, 190. doi:10.1016/j.csr.2019.103988
- Lilly, J. M. 2019. jLab: A data analysis package for Matlab v. 1.6.6, Recuperado en octubre de 2018, en: <http://www.jmlilly.net/software>.
- Lugo-Fernández, A., Morin, M. V., Ebesmeyer, C. C., Marshall, C. F. 2001. Gulf of Mexico historic (1955–1987) surface drifter data analysis. *Journal of Coastal Research*, 17(1), 1–16. Consultado en mayo 2019, en: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0035086881&partnerID=tZOtx3y1>
- Lumpkin, R., Centurioni, L. 2019. Global Drifter Program quality-controlled 6-hour interpolated data from ocean surface drifting buoys. Consultado February 6, 2020, from NOAA National Centers for Environmental Information. Dataset. Recuperado en febrero de 2018, en: <https://data.nodc.noaa.gov/cgi-bin/iso?id=gov.noaa.nodc:AOML-GDP>
- Mackas, D. L., Coyle, K. O. 2005. Shelf-offshore exchange processes, and their effects on mesozooplankton biomass and community composition patterns in the northeast Pacific. En *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2005, Elsevier Ltd, 52(5–6), pp. 707–725. doi:10.1016/j.dsr2.2004.12.020
- 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(1–2), 1–20. doi:10.1016/j.jmarsys.2008.10.002
- Meza-Padilla, R., Enriquez, C., Liu, Y., Appendini, C. M. 2019. Ocean circulation in the western gulf of Mexico using self-organizing maps. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(6), 4152–4167. doi:10.1029/2018JC014377
- 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*, 108(C10), 3303. doi:10.1029/2002JC001674
- Nieblas-Piquero, J. M. 2019. Variabilidad de flujos a través y a lo largo de la plataforma continental del Golfo de México y su sensibilidad a forzamientos atmosféricos. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. 105 pp.
- Ohlmann, J. C., Niiler, P. P. 2005. Circulation over the continental shelf in the northern Gulf of Mexico. *Progress in Oceanography*, 64(1), 45–81. doi:10.1016/j.pocean.2005.02.001
- Ohlmann, J. C., Niiler, P. P., Fox, C. A., Leben, R. R. 2001. Eddy energy and shelf interactions in the Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106(C2), 2605–2620. doi:10.1029/1999jc000162
- Özgekmen, T. 2013. GLAD experiment CODE-style drifter trajectories (low-pass filtered, 15 minute interval records), northern Gulf of Mexico near DeSoto Canyon, July-October 2012. Harte Research Institute, Texas A&M University-Corpus Christi. Recuperado en marzo de 2010, en: <https://data.gulfresearchinitiative.org/data/R1.x134.073:0004>
- Pauly, D., Christensen, V., Guénette, S., Pitcher, T. J., Sumaila, U. R., Walters, C. J., Watson, R., Zeller, D. 2002. Towards sustainability in world fisheries. *Nature*, 418. doi:10.1038/nature01017
- Pedlosky, J. 1979. *Geophysical fluid dynamics*. *Geophysical Fluid Dynamics*. Consultado en febrero de 2019, en: doi:10.4171/owr/2017/23
- Pérez-Brunius, P., García-Carrillo, P., Dubranna, J., Sheinbaum, J., Candela, J. 2013. Direct observations of the upper layer circulation in the southern Gulf of Mexico. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 85, 182–194. doi:10.1016/j.dsr2.2012.07.020
- Ponce-Vélez, G., Botello, A. V. 2005. Niveles de hidrocarburos en el Golfo de México. En: Botello A. V. , Rendón-von Osten, J. , Gold-Bouchot, G., y Agraz-Hernández C. (Eds.), *Golfo de México contaminación e impacto ambiental: Diagnóstico y tendencias* (2da ed.). Univ. Autón. de Campeche. Univ. Nal. Autón. de México. Instituto Nacional de Ecología. p. 696.
- Pond, S., Pickard, G. L. 1995. *Introductory Dynamical Oceanography* (2da ed.). Consultado en diciembre de 2019, en: <https://books.google.com.mx/books?id=S6X8BAAAQBAJ>
- Rabalais, N. N., Turner, R. E., Wiseman, W. J. 2002. Gulf of Mexico hypoxia, “the Dead zone” *Annu. Rev. Ecol. Syst*, 33, 235–263. doi:10.1146/annurev.ecolsys.33.010802.150513
- Restrepo, C. E., Lamphear, F. C., Gunn, C. A., Ditton, R. B., Nichols, J. P. 1982. Ixtoc I oil spill economic impact study. Consultado en diciembre de 2019, en: <http://large.stanford.edu/courses/2017/ph240/fernandez2/docs/3930.pdf>

- Rodríguez-Outereelo, J., Pérez-Brunius, P., Olascoaga, M. J., Miron, P., Beron-Vera, F. J., García-Carrillo, P., Sheinbaum, J., Azevedo Correia de Souza, J. M., Jouanno, J., Estrada-Allis, S. N., Zavala-Hidalgo, J. 2020. Coastal surface connectivity of the Gulf of Mexico from transition matrices. *Ocean Sciences Meeting*, 2020. Recuperado en julio de 2020, <https://agu.confex.com/agu/osm20/meetingapp.cgi/Paper/646745>
- Schmitz, W. J., Biggs, D. C., Lugo-Fernandez, A., Oey, L.-Y., Sturges, W. 2005. A synopsis of the circulation in the Gulf of Mexico and on its continental margins. En: Sturges, W. y Lugo-Fernández, A. (Eds.), *Circulation in the Gulf of Mexico: observations and models*, 161. doi:10.1029/161GM03
- Smith, W. H. F., Sandwell, D. T. 1997. Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science*. doi:10.1126/science.277.5334.1956
- Sturges, W., Blaha, J. P. 1976. A western boundary current in the Gulf of Mexico. *Science*, 192(4237), 367–369. doi:10.1126/science.192.4237.367
- Sun, S., Hu, C., Tunnell, J. W. 2015. Surface oil footprint and trajectory of the Ixtoc-I oil spill determined from Landsat/MSS and CZCS observations. *Marine Pollution Bulletin*, 101(2), 632–641. doi:10.1016/j.marpolbul.2015.10.036
- Thomson, R. E., Gower, J. F. R. 1998. A basin-scale oceanic instability event in the Gulf of Alaska. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C2), 3033–3040. doi:10.1029/97jc03220
- Thyng, K. M., Hetland, R. D. 2018. Seasonal and interannual cross-shelf transport over the Texas and Louisiana continental shelf. *Continental Shelf Research*, 160, 23–35. doi:10.1016/j.csr.2018.03.006
- Turner, R. E., Overton, E. B., Meyer, B. M., Miles, M. S., McClenachan, G., Hooper-Bui, L., Engel, A. S., Swenson, E. M., Lee, J. M., Milan, C. S., Gao, H. 2014. Distribution and recovery trajectory of Macondo (Mississippi Canyon 252) oil in Louisiana coastal wetlands. *Marine Pollution Bulletin*, 87(1), 57–67. doi:10.1016/j.marpolbul.2014.08.011
- Vidal, V. M. V., Vidal, F. V., Pérez-Molero, J. M. 1992. Collision of a loop current anticyclonic ring against the continental shelf slope of the western Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research*, 97(C2), 2155. doi:10.1029/91jc00486
- Whitney, F. A., Crawford, W. R., Harrison, P. J. 2005. Physical processes that enhance nutrient transport and primary productivity in the coastal and open ocean of the subarctic NE Pacific. En: *Deep-Sea Research Part II: Topical studies in oceanography*, 2005, Elsevier Ltd, 52(5–6), pp. 681–706. doi:10.1016/j.dsr2.2004.12.023
- 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(12), 3389. doi:10.1029/2003jc001879
- Zavala-Sansón, L., Pérez-Brunius, P., Sheinbaum, J. 2017. Point source dispersion of surface drifters in the southern Gulf of Mexico. *Environmental Research Letters*, 12(2). doi:10.1088/1748-9326/aa537c

Anexos

Anexo A

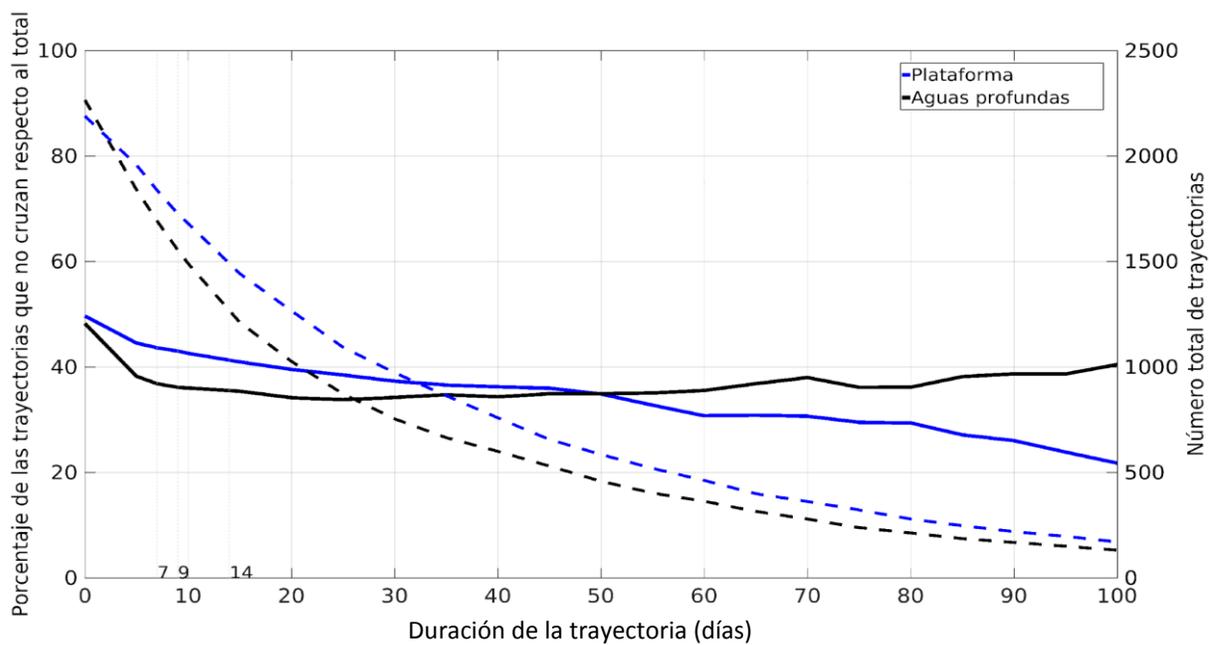


Figura 25. Proporción de las trayectorias que iniciaron en plataforma continental (línea continua azul) y en aguas profundas (línea continua negra) y que no cruzaron la isóbata de los 200 m, en función de su duración. Líneas discontinuas: Total de trayectorias observadas en la plataforma continental (azul) y la región profunda (negro).

Anexo B

Tabla 7. Longitudes de los segmentos de isóbata de 200 m suavizada contenida en cada polígono evaluado.

Polígono	Longitud (Km)
1	286.3
2	264.6
3	482.3
4	262.6
5	275.3
6	277
7	320.3
8	235.5
9	284
10	389.2
11	357.3
12	409.4
13	427.3

Anexo C

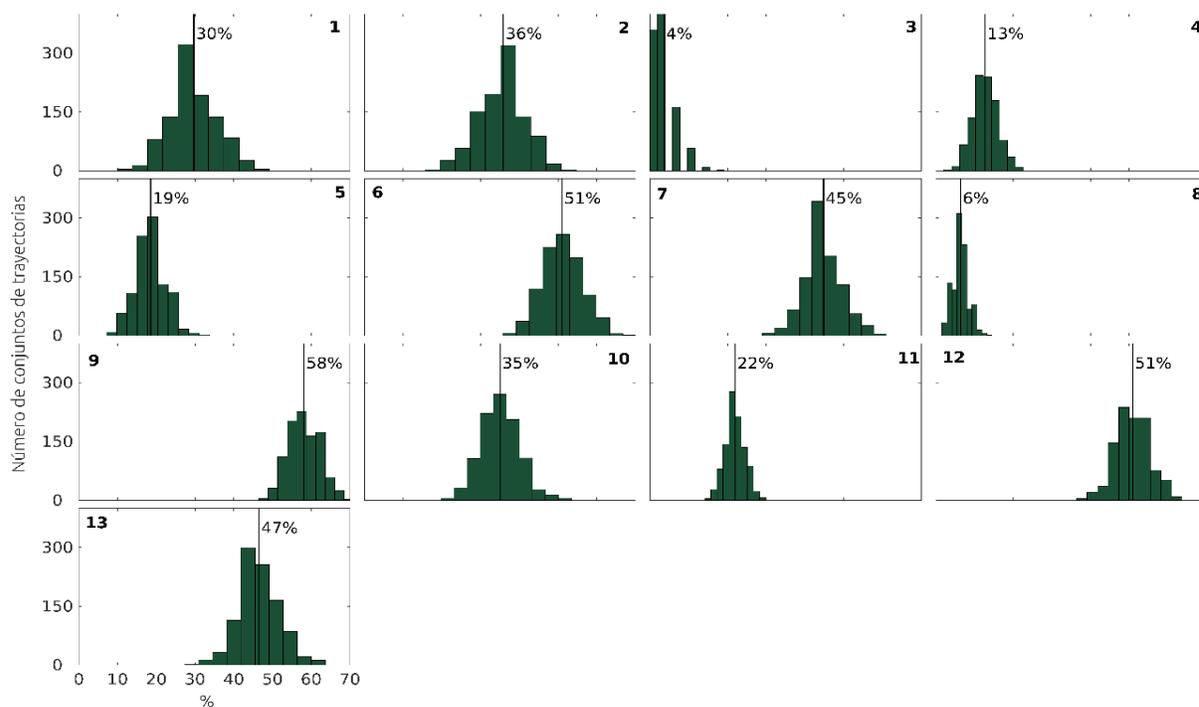


Figura 26. Distribución de las proporciones (%) de trayectorias que cruzan la isóbata de 200 m desde aguas profundas (200-1500 m) hacia la plataforma continental (0-200 m) entre abril-agosto calculadas mediante el procedimiento Bootstrap en los 13 polígonos. La proporción promedio se indica en la figura.

Anexo D

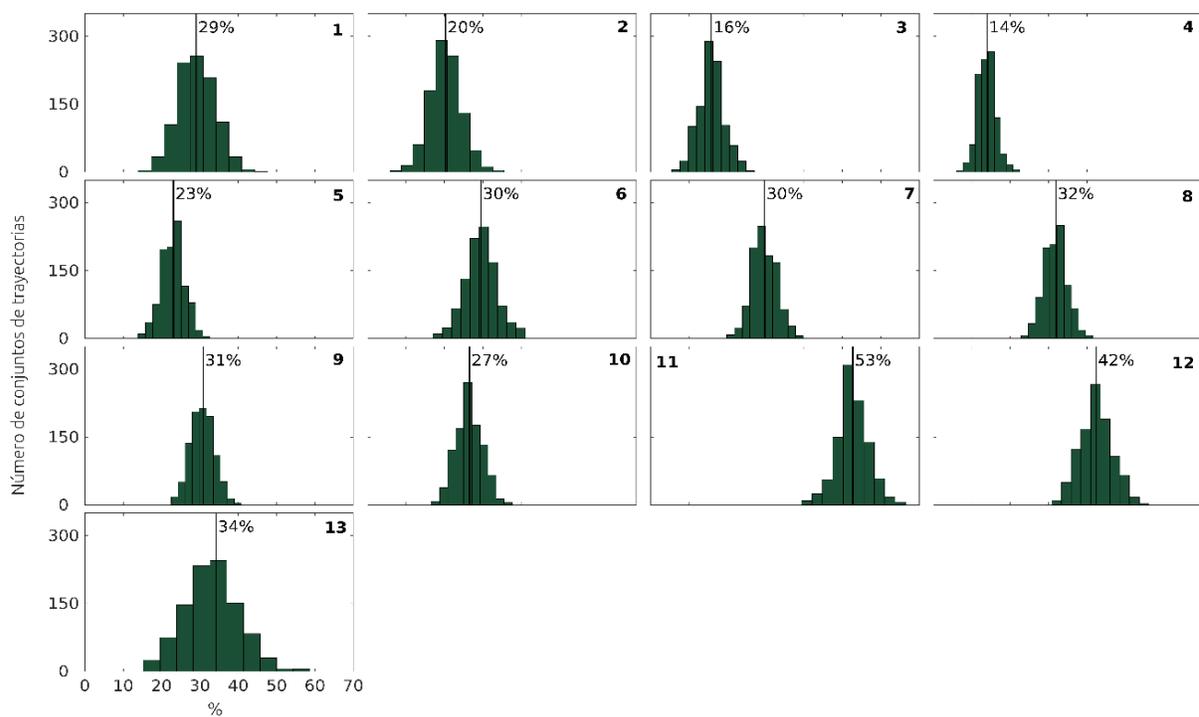


Figura 27. Distribución de las proporciones (%) de trayectorias que cruzan la isóbata de 200 m desde aguas profundas (200-1500 m) hacia la plataforma continental (0-200 m) entre septiembre-marzo calculadas mediante el procedimiento *Bootstrap* en los 13 polígonos. La proporción promedio se indica en la figura.

Anexo E

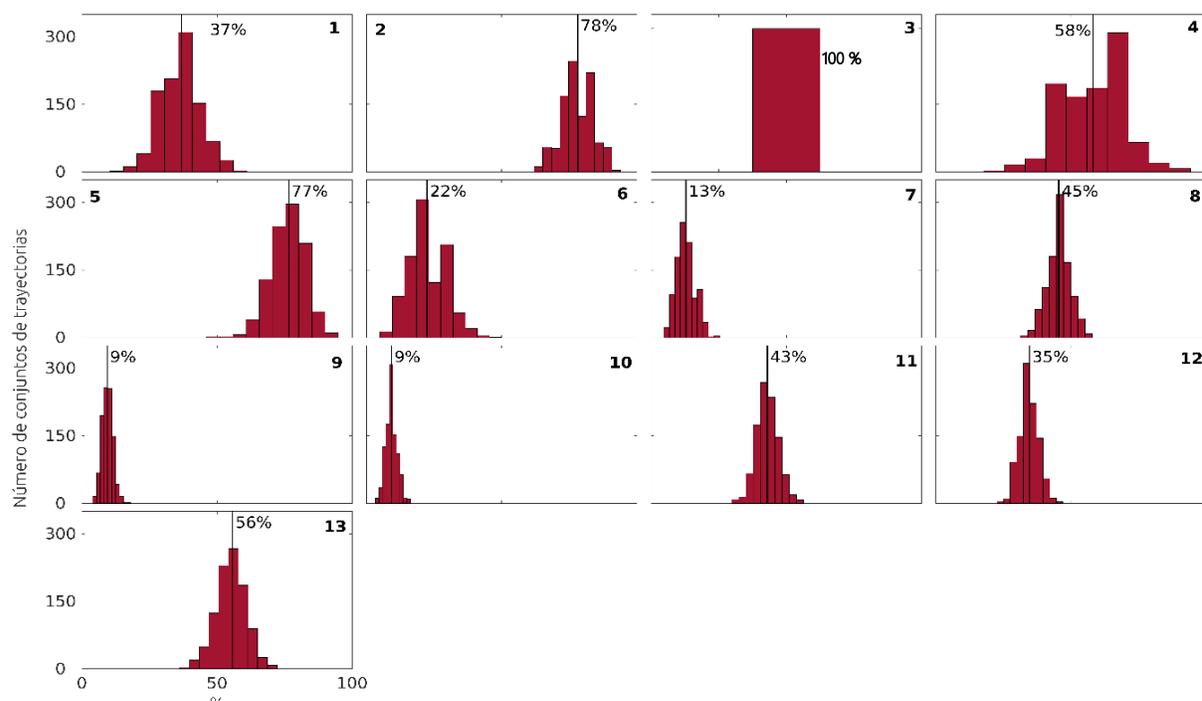


Figura 28. Distribución de las proporciones (%) de trayectorias que cruzan la isóbata de 200 m desde la plataforma continental (0-200 m) hacia aguas profundas (200-1500 m) entre abril-agosto calculadas mediante el procedimiento Bootstrap en los 13 polígonos. La proporción promedio se indica en la figura.

Anexo F

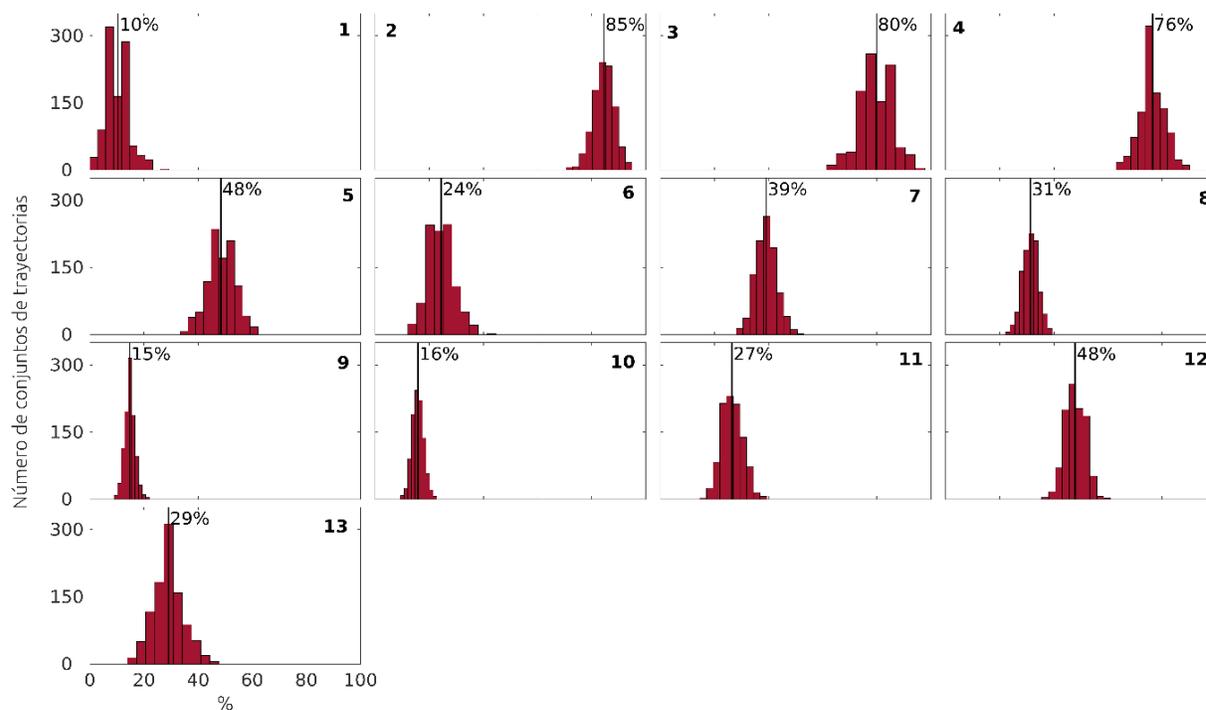


Figura 29. Distribución de las proporciones (%) de trayectorias que cruzan la isóbata de 200 m desde la plataforma continental (0-200 m) hacia aguas profundas (200-1500 m) entre septiembre-marzo calculadas mediante el procedimiento Bootstrap en los 13 polígonos. La proporción promedio se indica en la figura.

Anexo G

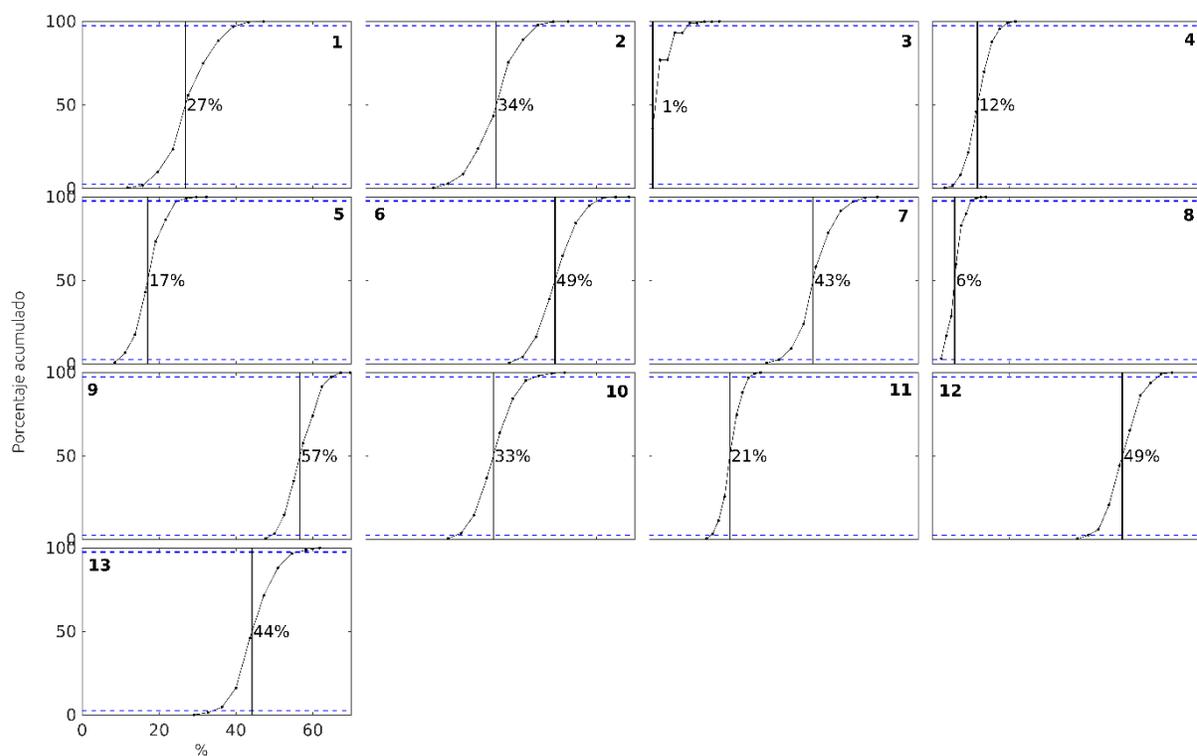


Figura 30. Curvas de densidad acumulativa de la distribución de proporciones de trayectorias que cruzan hacia la plataforma continental entre abril-agosto en los 13 polígonos evaluados. Las líneas discontinuas indican el 5 % y 95 % acumulado y el porcentaje al 50 % se muestra en la figura.

Anexo H

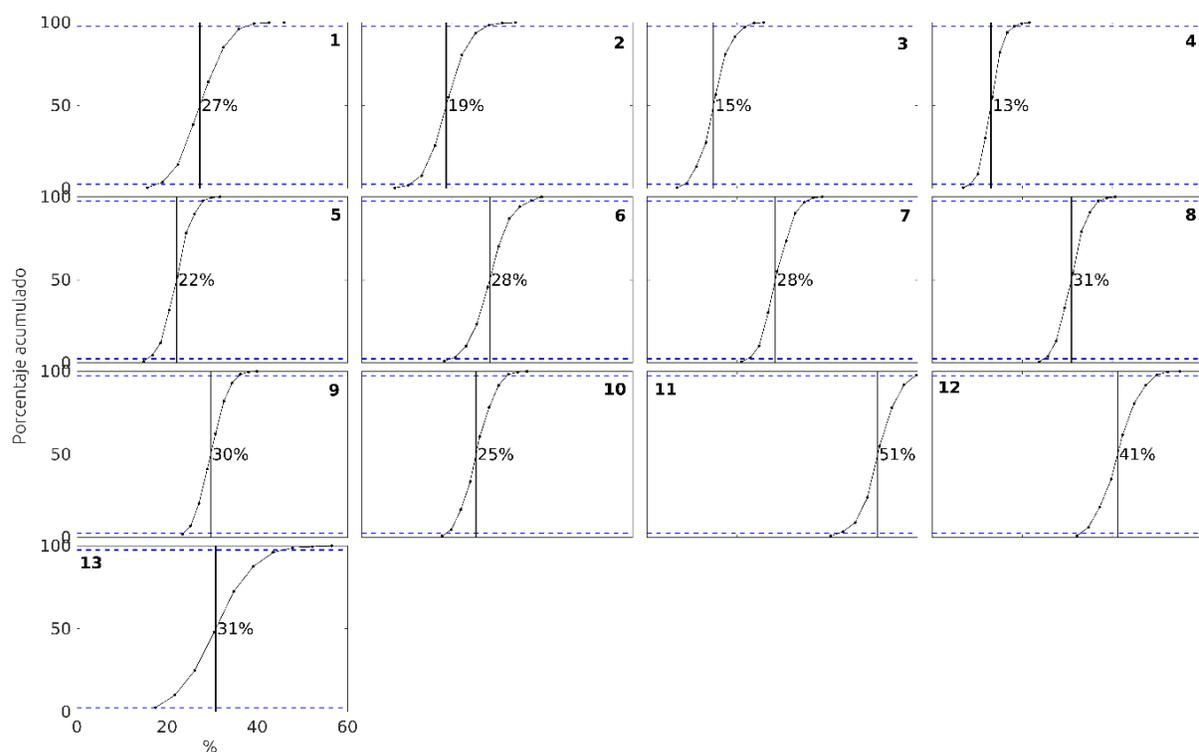


Figura 31. Curvas de densidad acumulativa de la distribución de proporciones de trayectorias que cruzan hacia la plataforma continental entre septiembre-marzo en los 13 polígonos evaluados. Las líneas discontinuas indican el 5 % y 95 % acumulado y el porcentaje al 50 % se muestra en la figura.

Anexo I

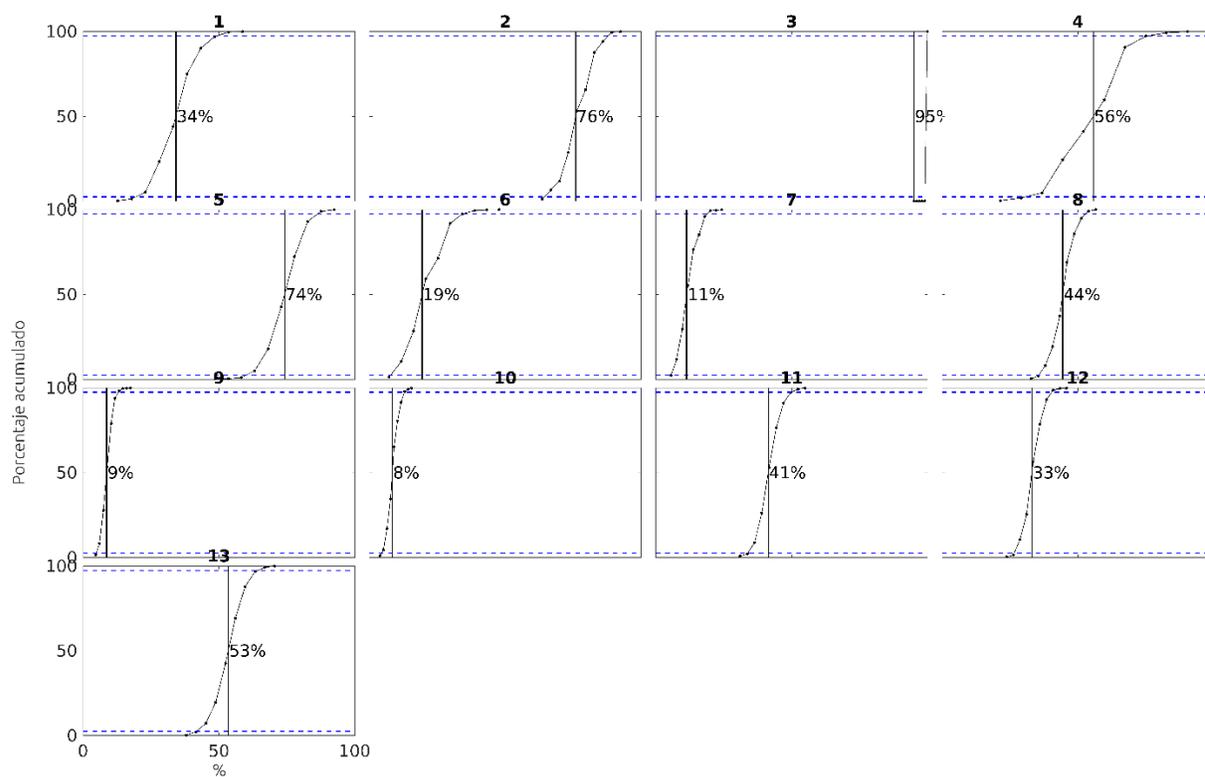


Figura 32. Curvas de densidad acumulativa de la distribución de proporciones de trayectorias que cruzan hacia aguas profundas entre abril-agosto en los 13 polígonos evaluados. Las líneas discontinuas indican el 5 % y 95 % acumulado y el porcentaje al 50 % se muestra en la figura.

Anexo J

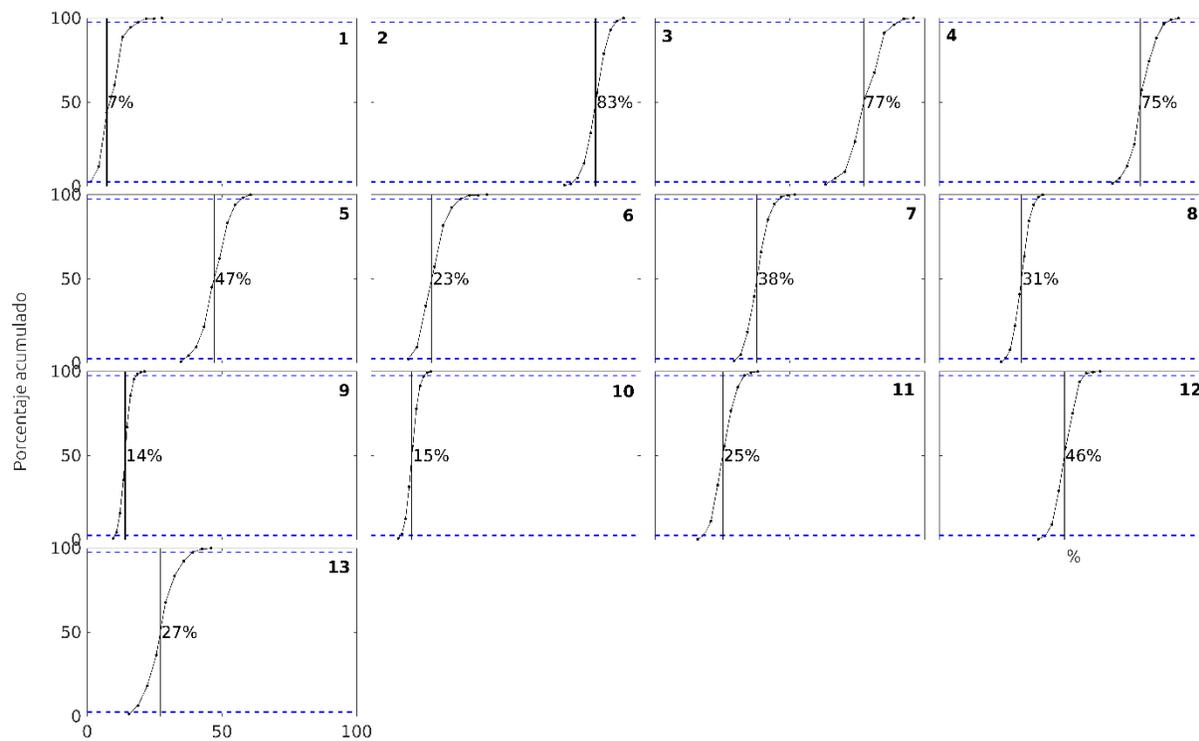


Figura 33. Curvas de densidad acumulativa de la distribución de proporciones de trayectorias que cruzan hacia aguas profundas entre septiembre-marzo los 13 polígonos evaluados. Las líneas discontinuas indican el 5 % y 95 % acumulado y el porcentaje al 50 % se muestra en la figura.

Anexo K

Tabla 8. Proporción observada e intervalos de confianza al 95 % (Bootstrap) de las trayectorias que cruzaron la isóbata de los 200 m desde la región de aguas profundas hacia la plataforma continental en ambas temporadas.
N=número de segmentos independientes evaluados.

Polígono	Abril-agosto				Septiembre-marzo			
	N	Límite inferior	Proporción (%)	Límite superior	N	Límite inferior	Proporción (%)	Límite Superior
1	61	15	29	40	86	18	29	37
2	64	22	36	45	104	12	20	27
3	26	1	4	11	126	8	16	22
4	93	0	13	19	215	8	14	18
5	98	0	18	26	187	16	23	28
6	84	39	51	61	129	20	29	36
7	100	32	45	54	191	22	30	36
8	124	2	7	10	241	25	32	38
9	155	48	58	65	218	23	31	36
10	86	23	35	43	162	18	26	33
11	282	16	22	26	155	43	53	60
12	132	40	51	58	146	33	42	49
13	88	35	46	54	46	21	35	45

Anexo L

Tabla 9. Proporción observada e intervalos de confianza al 95 % (Bootstrap) de las trayectorias que cruzaron la isóbata de los 200 m desde la plataforma continental hacia aguas profundas en ambas temporadas. N=número de segmentos independientes evaluados.

Polígono	Abril-agosto				Septiembre-marzo			
	N	Límite inferior	Proporción (%)	Límite superior	N	Límite inferior	Proporción (%)	Límite Superior
1	49	20	37	48	4	0	10	19
82	50	63	78	87	73	74	85	91
3	6	95	100	100	63	64	80	89
4	17	31	59	77	64	65	77	84
5	39	58	77	88	34	36	48	58
6	40	8	22	35	12	13	24	33
7	87	4	13	19	29	30	39	45
8	121	35	46	54	25	25	31	36
9	204	5	9	13	7	10	15	18
10	185	4	9	13	15	11	16	20
11	158	34	43	50	21	18	26	33
12	164	27	35	41	37	40	48	55
13	83	43	56	65	14	16	29	39