

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
Licenciatura en Oceanología



**“CIRCULACIÓN SUPERFICIAL EN PLATAFORMA CONTINENTAL
Y AGUAS PROFUNDAS DEL GOLFO DE MÉXICO:
OCTUBRE-NOVIEMBRE DE 2016”**



TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
OCEANÓLOGO

PRESENTA
JOANA JULIETA GONZÁLEZ REJÓN

DIRECTOR DE TESIS
DR. RUBÉN CASTRO

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO, AGOSTO DE 2017

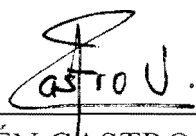
**“CIRCULACIÓN SUPERFICIAL EN PLATAFORMA CONTINENTAL Y
AGUAS PROFUNDAS DEL GOLFO DE MÉXICO:
OCTUBRE-NOVIEMBRE DE 2016”**

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

OCEANÓLOGO

PRESENTA:
JOANA JULIETA GONZÁLEZ REJÓN

APROBADA POR



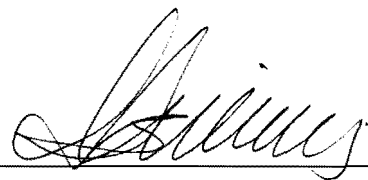
DR. RUBÉN CASTRO VALDEZ

Director de tesis



DR. XAVIER FLORES VIDAL

Sinodal



DRA. PAULA PÉREZ BRUNIUS

Sinodal

RESUMEN

El propósito de este estudio fue describir y analizar la circulación superficial en aguas profundas y de la plataforma continental del Golfo de México del 16 de octubre al 29 de noviembre de 2016. Para esto, se analizó la información de datos horarios de 47 derivadores lagrangianos liberados en el Experimento de Dispersión en Aguas Profundas (DWDE-2). La circulación descrita por los derivadores fue contrastada con información satelital de la topografía dinámica absoluta, velocidades geostróficas y vientos para evaluar la respuesta a estos forzamientos. Se utilizaron datos horarios de viento de una boya meteorológica y del reanálisis climático ERA5. A los datos de los derivadores y los vientos se les aplicó un filtro pasa bajos para eliminar señales diurnas asociadas a las mareas. Adicionalmente se evaluó la correlación compleja del esfuerzo del viento con los derivadores en todo el periodo de estudio y en periodos de eventos “nortes”. La correlación del esfuerzo del viento con los derivadores en aguas profundas fue baja, con valores promedio de 0.3 y en sentido a la izquierda del viento. La circulación superficial en aguas profundas estuvo dominada por la presencia del remolino anticiclónico “Poseidón” quien mantuvo en su trayectoria a la mayoría de los derivadores liberados en aguas profundas. En aguas de plataforma continental los derivadores describieron la circulación superficial típica de la temporada otoñal-invernal, con desplazamientos hacia el sur del golfo. Los vientos y los derivadores tuvieron una correlación promedio de 0.6 para todo el periodo de estudio mientras que para los periodos de “nortes”, presentaron una correlación promedio de 0.9 (frente frío No. 4) y 0.7 (frente frío No. 6), la mayoría a la derecha del viento. Las correlaciones complejas altas combinadas con ángulos bajos ala derecha del viento, sugirieron que los derivadores presentaron bajo arrastre a la corriente superficial y estuvieron mayormente asociados al viento.

Dedicatoria

A mis padres,

por su esfuerzo, apoyo y amor incondicional

para que pudiera cumplir mi sueño de ser oceanóloga.

Con amor y gratitud.

Agradecimientos

Al Dr. Rubén Castro por la paciencia, orientación y tiempo invertido en mí. Gracias por el apoyo y oportunidades (cruceros, servicio social, tesis). Por la confianza, las enseñanzas, pláticas y momentos divertidos durante este tiempo.

Al Dr. Xavier Flores por la oportunidad de colaborar en sus proyectos, por la confianza y motivación hacia mi trabajo. Así mismo por su disposición y retroalimentación hacia mi tesis.

A la Dra. Paula Pérez por permitirme la realización de esta tesis con los datos de su proyecto y aceptar ser parte de mi comité sin conocerme. Gracias por los comentarios y sugerencias que me ayudaron a encaminar mi trabajo.

Al Cuerpo Académico de oceanografía operacional No.CA-UABC-249 y al Observatorio Oceanográfico Regional Costero OORCo. Al M. I. César Liera por su contribución en la parte técnica y enseñanzas sobre los derivadores DORIS.

Al Dr. Víctor Zavala, por su apoyo, consejos y disposición durante la carrera. Gracias por adoptarme como tutorada.

A mis profesores durante la carrera, quienes siempre nos motivaron de alguna forma para ser mejores, dedicados y desempeñar con gusto la profesión. No terminaría de mencionarlos, me llevo un aprendizaje de cada uno de ustedes: Mary Carmen, Luis Cupul, Sorayda (gracias por encaminarme hacia la física del océano), Miguel Téllez, Guillermo Torres, Yaji, Conchita, Manuel Moreno, H. B., Reginaldo, Héctor Manzo, Mariana ¡y los que faltan!

A mi facultad, por permitirme conocer a excelentes personas con las cuales espero tener la dicha de colaborar en el futuro. A los que compartieron esta etapa conmigo y me dejaron formar parte de sus historias. Lalo, José, Pita, Adriana, Abraham, y especialmente a “las niñas”, por mencionar algunos. A mi familia y a mi hermana Paola por su ayuda en cuestiones de programación y cálculo, durante mi tesis y a lo largo de mi carrera.

Contenido

	Página
Resumen	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iv
Lista de tablas y figuras	vii
1. Introducción	1
2. Hipótesis	4
3. Objetivos	4
3.1 Objetivo general	4
3.2 Objetivo específico	4
4. Datos y Método	5
4.1 Derivadores superficiales	5
4.1.1 Derivadores Oceánicos Remotos In situ (DORIS)	5
4.1.2 Derivadores Microstar™	6
4.2 Lanzamiento de los derivadores	6
4.3 Procesamiento de los datos	7
4.3.1 Derivadores	7
4.3.2 Altimetría	7
4.3.3 Viento	8
4.4 Correlación vectorial compleja	10
5. Resultados	11
5.1 Condiciones iniciales de viento y circulación inducida por la topografía dinámica absoluta.	11
5.2 Trayectorias de los derivadores	13
5.2.1 Derivadores en aguas profundas	14

5.2.2 Derivadores en plataforma continental	16
5.3 Forzamientos de la circulación superficial evaluados en el periodo de estudio	19
5.3.1 Topografía dinámica absoluta y velocidades geostróficas	19
5.3.2 Viento	22
5.4 Correlación de los derivadores con el esfuerzo del viento	25
5.5 Eventos “nortes”	27
6. Discusión	29
7. Conclusiones	34
8. Referencias	36

Lista de tablas y figuras

Tabla	Página
I. Periodos de días promediados para la obtención de las imágenes topografía dinámica absoluta, velocidades geostróficas y de viento.	8

Figura	Página
1. Ubicación geográfica y batimetría (m) del Golfo de México.	1
2. Izquierdo: Derivadores DORIS con su papalote (Foto de http://oorco.ens.uabc.mx) Derecho: Esquema del derivador y papalote Microstar™ (Foto de https://www.pacificgyre.com/).	5
3. Ejemplo de las posiciones de liberación de los derivadores Microstar™ y DORIS. Se muestran solo cuatro tripletas de los derivadores Microstar™. Tomada de Pérez-Brunius et al. (2016).	6
4. a) Comparación de las serie de tiempo de los datos de ERA5 y la boya 42002. b) Correlación vectorial entre la serie de tiempo de la boya meteorológica 42002 y los datos de reanálisis ERA5. El diamante blanco indica la posición geográfica de la boya meteorológica.	9
5. Promedio de la magnitud y de la dirección del viento el 16 de octubre de 2016. El rectángulo rojo indica la zona de liberación de los derivadores.	11
6. Circulación geostrófica superficial promedio del 16 de octubre de 2016. La escala de color indica la topografía dinámica absoluta y las flechas las velocidades geostróficas superficiales.	12
7. Trayectorias descritas por los derivadores en todo el periodo de estudio (16 de octubre al 29 de noviembre de 2016).	13
8. Trayectorias de cuatro derivadores sobre la plataforma continental que describieron movimientos oscilatorios y giros.	14
9. Mapa de las trayectorias de los derivadores en aguas profundas (>1000 m). La barra de color indica su rapidez, las líneas grises la batimetría (m) y los puntos negros la posición de la liberación de los derivadores.	15
10. Rapidez de los derivadores en aguas profundas del 16 de octubre al 29 de noviembre de 2016.	15

11. Rapidez de los derivadores en las trayectorias del 30 de octubre al 06 de noviembre de 2016.	16
12. Mapa de las trayectorias de los derivadores sobre plataforma continental. La barra de color indica la rapidez, las líneas grises la batimetría (m) y los puntos negros la posición de la liberación de los derivadores.	17
13. Serie de tiempo de la rapidez de los derivadores en plataforma continental.	17
14. (a), (b) y (c) Representan mapas de las trayectorias de los derivadores. Su rapidez se indica en la barra de color. Se incluyen los vectores del viento promediados del 12 al 18 de octubre en (a), y del 19 al 25 de octubre en (b), mientras que en (c), los vectores de las velocidades geostróficas superficiales promediadas del 19 al 25 de octubre. . Los puntos negros indican el punto inicial y los rombos negros, el punto en el tiempo 20 de octubre de 2016 a las 20 horas. (d) Diagrama de astillas de la velocidad de los seis derivadores.	18
15. (a) Mapa de las trayectorias de los derivadores que fueron desplazados de aguas profundas hacia la costa. (b) Mapa de las trayectorias de tres derivadores que realizaron un giro ciclónico. Los puntos negros indican las posiciones iniciales. En vectores se incluyen las corrientes geostróficas superficiales. En gris se muestra la isobata de 200 y 1000 m.	19
16. Mapas de las trayectorias de los derivadores y del promedio semanal de la circulación geostrófica superficial (vectores) obtenida por la topografía dinámica (contornos grises). La escala de color representa las velocidades de los derivadores. (a) 5-11 de octubre; (b) 12-18 de octubre; (c) 19-25 de octubre y (d) 26 de octubre – 1 noviembre.	20
17. Mapa de las trayectorias de los derivadores y del promedio semanal de la circulación geostrófica superficial (vectores) obtenida por la topografía dinámica (contornos grises). La escala de color representa las velocidades de los derivadores. (a) 2-8 de noviembre; (b) 9-15 de noviembre; (c) 16-22 de noviembre y (d) 23-29 de noviembre.	21
18. Diagrama de astillas y rosa de los vientos de la boya 42002 localizada en el Golfo de México (Figura 4b, www.ndbc.noaa.gov/). Los datos indican de donde proviene el viento.	22
19. Promedio semanal del esfuerzo del viento (vectores, Nm-2). La escala de color representa la magnitud de la velocidad (ms-1). (a) 5-11 de octubre; (b) 12-18 de octubre; (c) 19-25 de octubre y (d) 26 de octubre – 1 noviembre.	23
20. Promedio semanal del esfuerzo del viento (vectores, Nm-2). La escala de color representa la magnitud de la velocidad (ms-1). (a) 2-8 de noviembre; (b) 9-15 de noviembre; (c) 16-22 de noviembre y (d) 23 – 29 noviembre.	24

21. (a) Coeficientes de la correlación compleja filtrados y sin filtrar (b) Ángulos de la correlación compleja. Tonos verdes: plataforma continental. Tonos grises: Agua profunda.	26
22. Vectores de la rapidez del derivador que presentó la menor correlación compleja (0.1, 164°) y el esfuerzo del viento.	27
23. Figura 23. (a) Coeficientes de la correlación compleja para ambos eventos nortes (b) Ángulos de la correlación.	28

1. Introducción

El Golfo de México (GoM) es una cuenca en el Océano Atlántico que está localizada entre los 18° - 30° N, y los 82° - 98° O (Figura 1). Está delimitado al norte y noreste por los Estados Unidos de América, al oeste por Tamaulipas y Veracruz, al este por Cuba y al sur por Campeche, Tabasco y la Península de Yucatán.

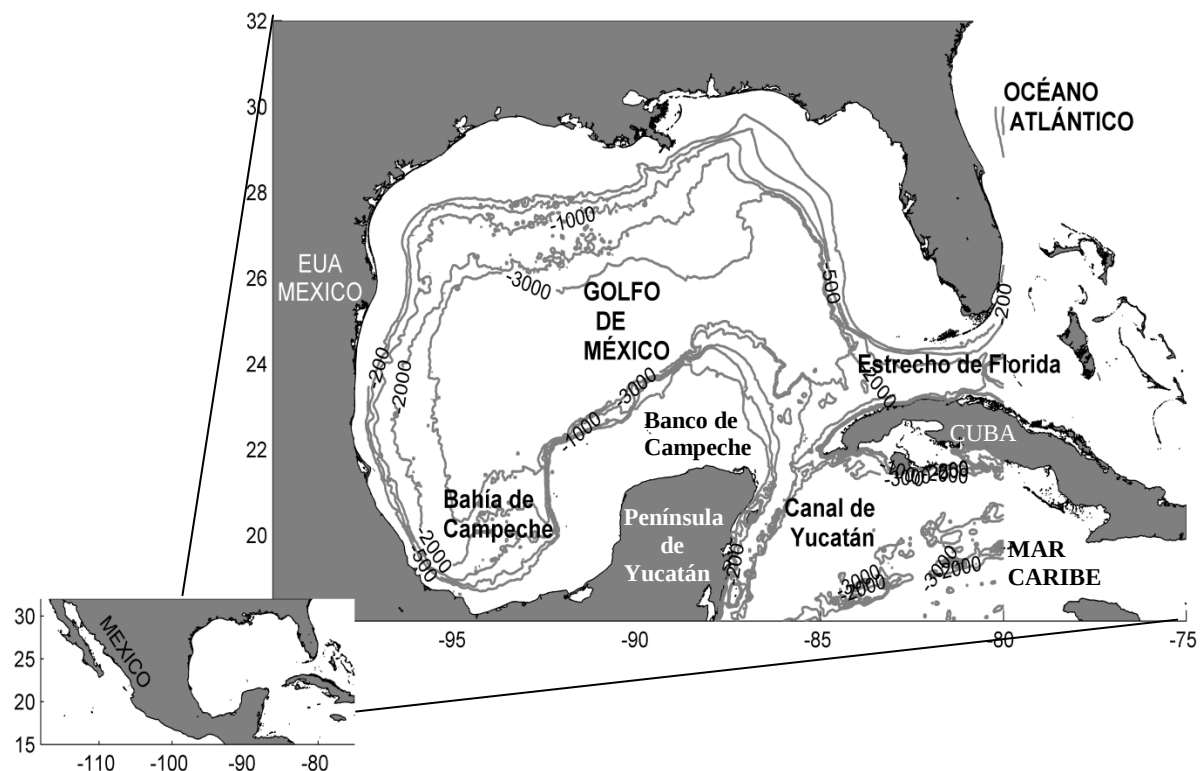


Figura 1. Ubicación geográfica y batimetría (m) del Golfo de México.

La batimetría del GoM es heterogénea. Cuenta con regiones de profundidades menores a los 200 m, sobre una plataforma continental de extensión variable a lo largo del golfo. La región más estrecha de la plataforma continental mexicana se encuentra al suroeste de la Bahía de Campeche, mientras que la más extensa está localizada en el Banco de Campeche (Zavala-

Hidalgo *et al.*, 2014). Por otro lado, en la región central, podemos encontrar profundidades mayores a los 3 500 m.

Al ser una cuenca semicerrada, el GoM intercambia propiedades con el Mar Caribe y el Océano Atlántico Norte a través de sus dos bocas. Se comunica con el Mar Caribe mediante la Corriente de Yucatán (Sturges *et al.*, 2005), que al entrar por el Canal de Yucatán (sureste), se convierte en la Corriente de Lazo. Esta corriente se caracteriza por desprender remolinos anticiclónicos, que dominan la circulación en aguas profundas y permanecen por meses (Cochrane, 1972). La Corriente de Lazo eventualmente logra salir por el Estrecho de Florida y comunica al interior del GoM con el Océano Atlántico Norte dando origen a la Corriente del Golfo. (Candela *et al.*, 2002).

Los patrones de circulación superficial al interior del GoM, están determinados por diversas interacciones atmosféricas y oceánicas de distinta variabilidad espacial y temporal. De acuerdo con Monreal-Gómez y colaboradores (2004), los principales generadores de movimiento en el golfo son: la acción de los vientos, los flujos entrantes por el Canal de Yucatán, el intercambio de calor océano-atmósfera y las descargas fluviales. Entre los rasgos físicos más destacables de la circulación del golfo se encuentran: la Corriente de Lazo, frentes, surgencias, remolinos, ondas atrapadas a la costa y la influencia de frentes fríos (Cardona y Bracco, 2016; Luo *et al.*, 2016; Ruíz-Castillo *et al.*, 2016; Rivas, 2017). Destaca además la presencia semipermanente de un remolino ciclónico al oeste de la Bahía de Campeche (Dubranna *et al.*, 2011).

La circulación superficial sobre la plataforma continental del GoM presenta una marcada estacionalidad, la cual es forzada principalmente por el viento (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2014). Durante otoño e invierno, los frentes fríos del noroeste de Estados Unidos, producen vientos del norte o “nortes” que favorecen el flujo de las corrientes hacia el sur; mientras que en primavera-verano, los vientos del sur generan corrientes hacia el norte (Zavala-Hidalgo, 2003). Ligado al forzamiento atmosférico, se ha reportado que los “nortes” producen ondas atrapadas a la costa capaces de intensificar las corrientes superficiales frente a Tabasco y Veracruz (Rivas, 2017). Otro tipo de forzamientos o fenómenos que repercuten en la circulación superficial, sobretodo en plataforma continental y cerca de la costa, son aquellos de frecuencias con componentes semidiurnas e inerciales (Expósito-Díaz *et al.*, 2009). La interacción de los remolinos con el quiebre de la plataforma también puede ocasionar modificaciones en la circulación (Dubranna *et al.*, 2011, Pérez-Brunius, *et al.* 2013).

La dinámica oceánica del GoM es de gran interés e importancia debido a que repercute en la distribución de calor, contaminantes y organismos (Monreal-Gómez *et al.*, 2004, Zavala-Hidalgo *et al.*, 2014, Joye *et al.*, 2016). Asimismo influye en actividades como las pesquerías, la explotación de energías no renovables y el turismo: componentes importantes de la estructura socioeconómica del país (CIA, 2016). Por estas razones, es importante el estudio de la variabilidad de la circulación superficial en diferentes escalas temporales y espaciales, tanto en regiones costeras como de aguas profundas.

2. Hipótesis

El viento y los “nortes” que se presentaron en el periodo del 16 de octubre al 29 de noviembre de 2016, lograron intensificar y desviar las corrientes superficiales; tanto en plataforma continental como en aguas profundas del Golfo de México.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

- ✓ Describir y analizar el comportamiento de las corrientes superficiales durante octubre-noviembre de 2016 en regiones de plataforma continental y aguas profundas del GoM.

3.2 Objetivos específicos

- ✓ Evaluar la influencia de las corrientes geostróficas y el viento en el comportamiento de los derivadores.
- ✓ Comparar de manera cualitativa las trayectorias de los derivadores con la circulación geostrófica.
- ✓ Evaluar la correlación vectorial de los derivadores con el esfuerzo del viento.
- ✓ Describir los efectos de vientos “nortes” sobre la circulación superficial en la plataforma continental.

4. Datos y Método

Parte de los datos utilizados en este estudio, fueron obtenidos mediante la liberación de derivadores lagrangianos en el Golfo de México, los cuales cubren el periodo del 16 de octubre al 29 de noviembre de 2016.

4.1 Derivadores superficiales

4.1.1 Derivadores Oceánicos Remotos In situ (DORIS).

Los DORIS son derivadores esféricos de bajo costo, diseñados y contruidos en el Observatorio Oceanográfico Regional Costero (OORCo) del Instituto de Investigaciones Oceanológicas de la Universidad Autónoma de Baja California. Están equipados con un GPS de alta precisión y un termógrafo, así como un papalote que funciona como arrastre a 1 m de profundidad (Figura 2). El usuario puede programar cada cuánto realizar muestreos y transmisiones, y los datos son almacenados en un servidor web. En el presente estudio se utilizaron siete derivadores de este tipo que fueron programados para transmitir la información cada hora.



Figura 2. Izquierdo: Derivadores DORIS con su papalote (Foto de <http://oorco.ens.uabc.mx/>). Derecho: Esquema del derivador y papalote Microstar™ (Foto de <https://www.pacificgyre.com/>).

4.1.2 Derivadores Microstar™

Son derivadores esféricos superficiales con telemetría satelital (antena de Iridio) equipados con un GPS, termógrafo, indicadores de voltaje de la batería y un papalote a 1 m de profundidad (Figura 2). Fueron programados para muestrear cada 10 minutos y transmitir los datos al sitio web de Pacific Gyre Inc. cada hora. En este estudio se utilizaron 40 derivadores Microstar™.

4.2 Lanzamiento de los derivadores

Los derivadores se liberaron al mar entre el 15 y 19 de octubre de 2016 durante el Experimento de Dispersión en Aguas Profundas (DWDE-2 por sus siglas en inglés) a bordo del *R/V Pelican* en el Golfo de México. Se liberaron al mar en grupos de tres derivadores, en los vértices de un triángulo con una distancia entre ellos que varió de los 20 m a los 100 m (Figura 3). Algunas tripletas se liberaron a más de 1000 m de profundidad (que se denominarán aguas profundas) y otras cerca del quiebre de la plataforma continental (~500 m de profundidad).

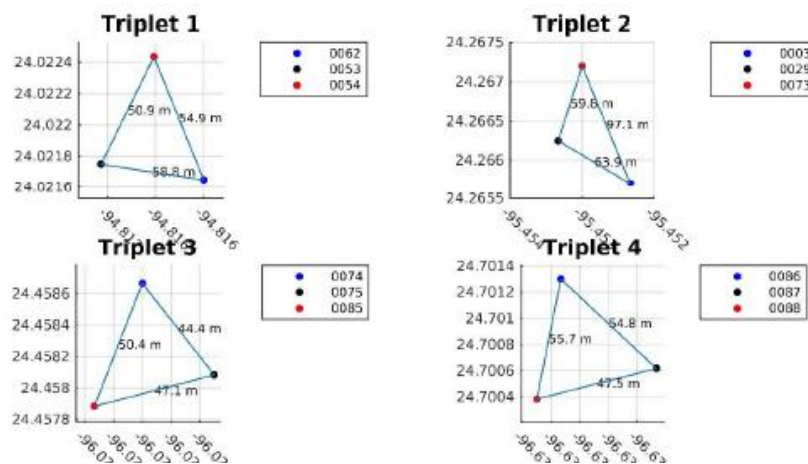


Figura 3. Ejemplo de las posiciones de liberación de los derivadores Microstar™ y DORIS. Se muestran solo cuatro tripletas de los derivadores Microstar™. Tomada de Pérez-Brunius *et al.* (2016).

4.3 Procesamiento de los datos

4.3.1 Derivadores

El procesamiento de los datos registrados para ambos tipos de derivadores consistió en eliminar datos a bordo de la embarcación (antes de su liberación) y en tierra, así como las posiciones erróneas por mal geoposicionamiento. Los picos anómalos de rapidez (> 3 m/s, de acuerdo con Pérez-Brunius *et al.*, 2013) fueron eliminados. Las posiciones (longitud y latitud), se interpolaron linealmente cada hora y se eliminaron aquellos entre intervalos de más de 3 horas sin datos reales. Se utilizó el esquema de diferencias centradas para calcular las componentes de velocidad (u, v), donde:

$$u = \frac{dx}{dt} \quad v = \frac{dy}{dt}$$

dx = La diferencia en metros de las longitudes del punto anterior y el posterior.

dy = La diferencia en metros de las latitudes medias entre el punto anterior y posterior.

dt = para todos los casos fue un intervalo de una hora, en segundos.

A las componentes de velocidad (u, v), se les aplicó un filtro pasa bajos (promedio corrido) para remover las frecuencias diurnas asociadas principalmente a las mareas y algunos fenómenos inerciales. Es importante señalar que no se corrigió el efecto directo de arrastre debido al viento en los derivadores (Poulain *et al.*, 2009), por lo que los resultados son una aproximación a la circulación superficial.

4.3.2 Altimetría

Con el objetivo de observar de manera general el patrón de circulación superficial en el GoM, se presenta la circulación geostrófica del periodo de estudio. Se utilizaron los promedios diarios de la topografía dinámica absoluta y las velocidades geostróficas ($u_g = -\frac{g}{f} \frac{\partial \eta}{\partial y}$, $v_g =$

$\frac{g}{f} \frac{\partial \eta}{\partial x}$) en una malla de resolución de 0.25° . Los productos del altímetro fueron producidos por Ssalto / Duacs y distribuidos por Aviso, con el apoyo de Cnes (<http://www.aviso.altimetry.fr/duacs/>). Las mallas diarias se promediaron semanalmente cubriendo los periodos del esquema de la Tabla I.

Tabla I. Periodos de días promediados para la obtención de las imágenes semanales de topografía dinámica absoluta, velocidades geostróficas y de viento.

Octubre	Noviembre
5-11	2-8
12-18	9-15
19-25	16-22
26-1	23-29

4.3.3 Viento

Se utilizó la serie de tiempo de los promedios horarios de dirección y rapidez del viento de la boya meteorológica 42002 *West Gulf* del Centro Nacional de Datos de Boyas (NBDC por sus siglas en inglés) de la NOAA (www.ndbc.noaa.gov/). La boya se encuentra localizada en las coordenadas 93.758° W, 26.091° N (Figura 4) y los datos cubren el periodo del 05 de octubre al 29 de noviembre de 2016.

Con el propósito de tener mayor cobertura espacial del viento en la región de estudio, se utilizó la base de datos del Reanálisis Climático ERA5 generado por el Servicio de Cambio Climático Copernicus. (*Copernicus Climate Change Service Information* [2017], <http://climate.copernicus.eu/products/climate-reanalysis>). La malla de viento (U, V) a 10 m sobre la superficie del mar, tiene una resolución espacial de 31 km (0.28125°) y los datos utilizados cubren el periodo del 05 de octubre al 29 de noviembre. Se obtuvieron además imágenes promedio de las semanas del periodo de estudio (ver Tabla I).

La comparación gráfica de la serie de reanálisis extraída del punto más cercano a la boya meteorológica, mostró que los datos de ERA5 representaron bien los cambios de dirección y magnitud del viento en el periodo de estudio (Figura 4a). Para comparar cuantitativamente los datos *in situ* de la boya con la malla de ERA5 se realizó una correlación vectorial compleja de acuerdo con Kundu (1976). La máxima correlación fue de 0.92 y ángulo de -1.56° , en una posición muy cercana a la boya (Figura 4b). Esto indica que los datos de reanálisis son muy similares a los de la boya dada la alta correlación y el pequeño ángulo de variación (fase).

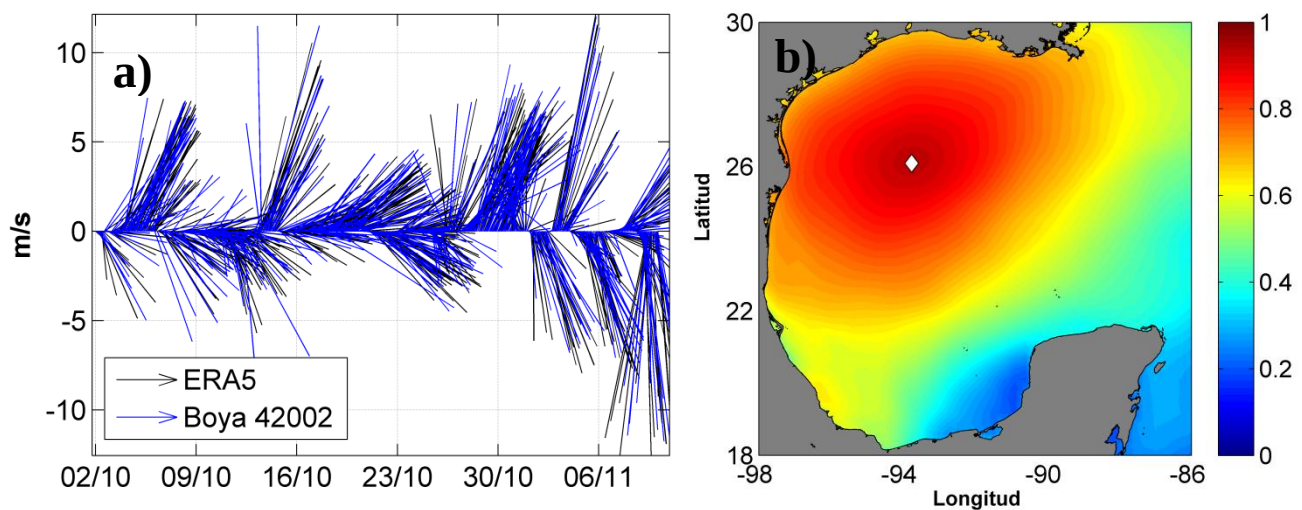


Figura 4. a) Comparación de las serie de tiempo de los datos de ERA5 y la boya 42002. b) Correlación vectorial entre la serie de tiempo de la boya meteorológica 42002 y los datos de reanálisis ERA5. El diamante blanco indica la posición geográfica de la boya meteorológica.

A partir de los datos del viento se obtuvieron las componentes del esfuerzo del viento (τ_x, τ_y) de acuerdo con Gill (1982), con coeficientes de arrastre (Cd) no lineales (Large y Pond, 1981) modificado para velocidades bajas (Trenberth *et al.*, 1990). Se les aplicó el mismo filtro que a los datos de los derivadores.

4.4 Correlación vectorial compleja.

Se evaluó la respuesta de los derivadores (u , v) al forzamiento del esfuerzo de viento (τ_x , τ_y) mediante la correlación vectorial compleja propuesta por Kundu (1976). Esta correlación permite conocer las similitudes de la magnitud entre series de tiempo y el ángulo de desfase entre ellas. La serie de tiempo de τ_x y τ_y se obtuvo extrayendo de la malla, el dato más cercano a la posición de la boya. Con el objetivo de analizar qué tanto responde la circulación superficial (derivadores) a un evento de “norte”, se calculó la misma correlación solo para los períodos del frente frío No. 4 (20-22 oct.) y el frente frío No. 6 (08-12 nov.) del 2016 (Sistema Meteorológico Nacional, <http://smn.cna.gob.mx/es/>). No se realizó la correlación con tiempos de retraso (“lag”) ya que se espera una respuesta al viento casi simultánea (Poulain *et al.*, 2009).

Cabe destacar que el resultado obtenido, solamente indica la correlación para la serie de cada derivador y no da un escenario general debido a que el tiempo de cada serie (derivador) es distinto. Hubo derivadores con datos de los 15 a los 61 días.

5. Resultados

5.1 Condiciones iniciales de viento y circulación inducida por la topografía dinámica absoluta

Las condiciones promedio del viento del 16 de octubre de 2016, indicaron la presencia de los vientos Alisios (Figura 5). En general se observó un flujo proveniente del Este en gran parte del GoM. Al Oeste de $\sim 93^\circ\text{W}$, los vientos parecen divergir, ya que al norte y al sur de $\sim 24^\circ\text{N}$, los vientos se dirigieron al noroeste y al suroeste, respectivamente. En la zona en donde se liberaron los derivadores (Figura 5; $> 24^\circ\text{N}$, $\sim 96^\circ\text{W}$), el viento presentó magnitudes alrededor de los 4 ms^{-1} y provino del este.

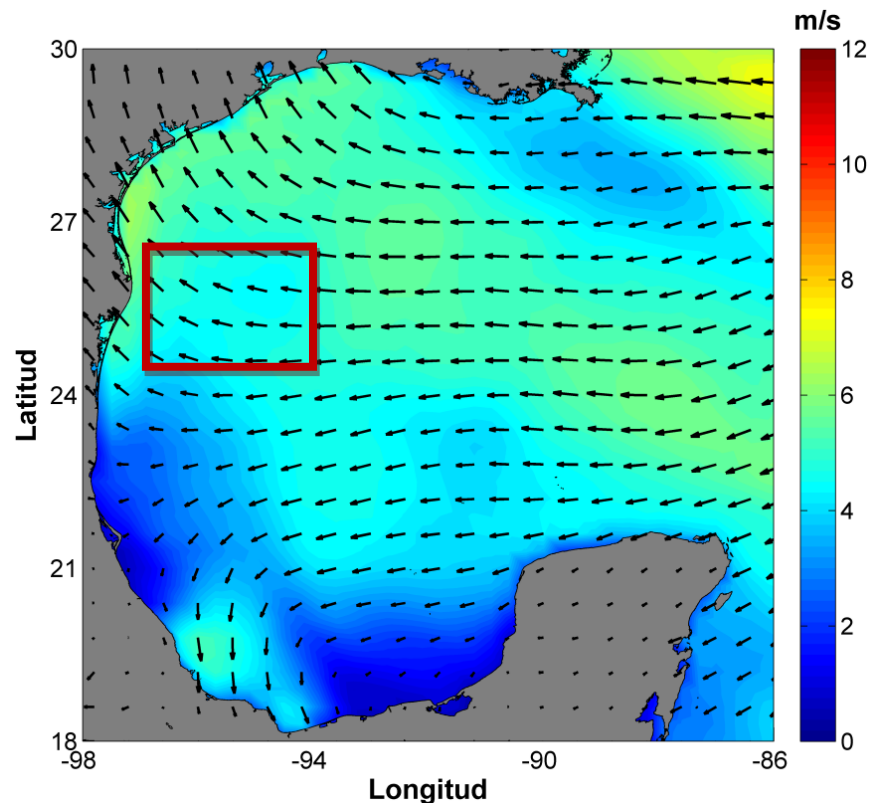


Figura 5. Promedio de la magnitud y de la dirección del viento el 16 de octubre de 2016. El rectángulo rojo indica la zona de liberación de los derivadores.

Por otro lado, las imágenes satelitales de la topografía dinámica absoluta y las corrientes geostróficas (Figura 6), mostraron que la circulación superficial en aguas profundas se caracterizó por la presencia del remolino anticiclónico “*Poseidón*” (proveniente de la Corriente de Lazo). Este remolino, presentó una forma elíptica y alargada en su extremo oeste, una altura máxima de la TDA de 1.04 m en la región central y las velocidades más altas ($\sim 1.2 \text{ ms}^{-1}$) en su extremo este. La circulación superficial al norte del GoM, estuvo caracterizada por la presencia de algunos giros ciclónicos. Se observó la presencia del remolino ciclónico al oeste de la Bahía de Campeche y se detectó una corriente costera hacia el Banco de Campeche.

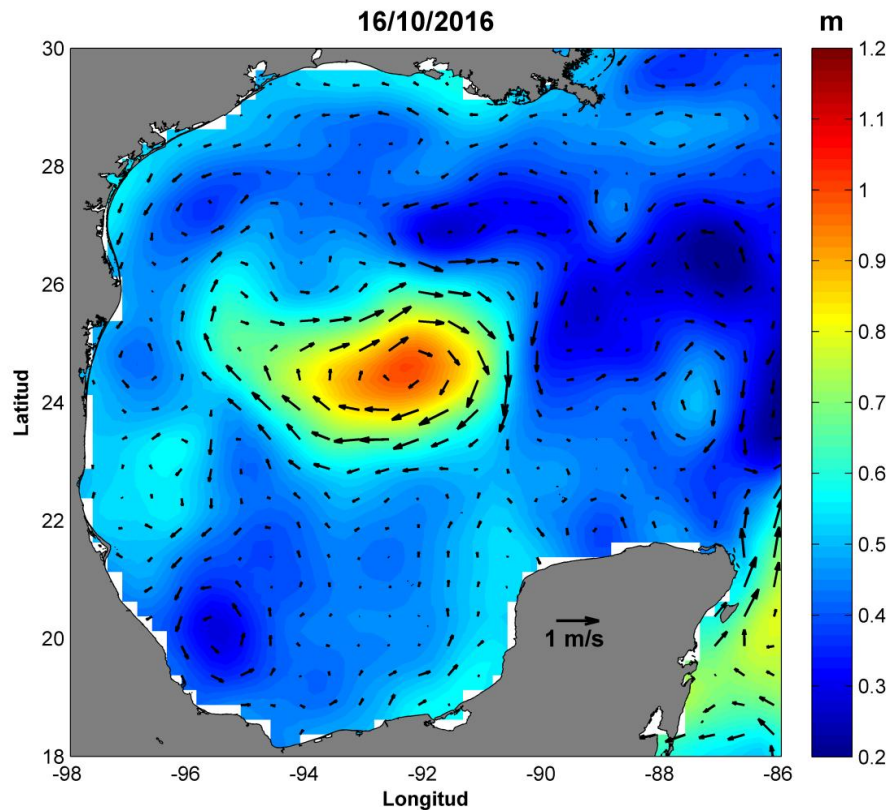


Figura 6. Circulación geostrófica superficial promedio del 16 de octubre de 2016. La escala de color indica la topografía dinámica absoluta y las flechas las velocidades geostróficas superficiales.

5.2 Trayectorias de los derivadores

Los derivadores se distribuyeron a lo largo del golfo y en aguas profundas (Figura 7). Se distinguieron dos tipos de comportamiento: un grupo fue retenido por el remolino “Poseidón” y otro realizó trayectorias cercanas a la plataforma continental. De los 34 derivadores liberados en aguas profundas, siete fueron desplazados hacia plataforma continental y posteriormente hacia el sur. El resto de los derivadores liberados en aguas profundas, permanecieron moviéndose con las corrientes de “Poseidón”.

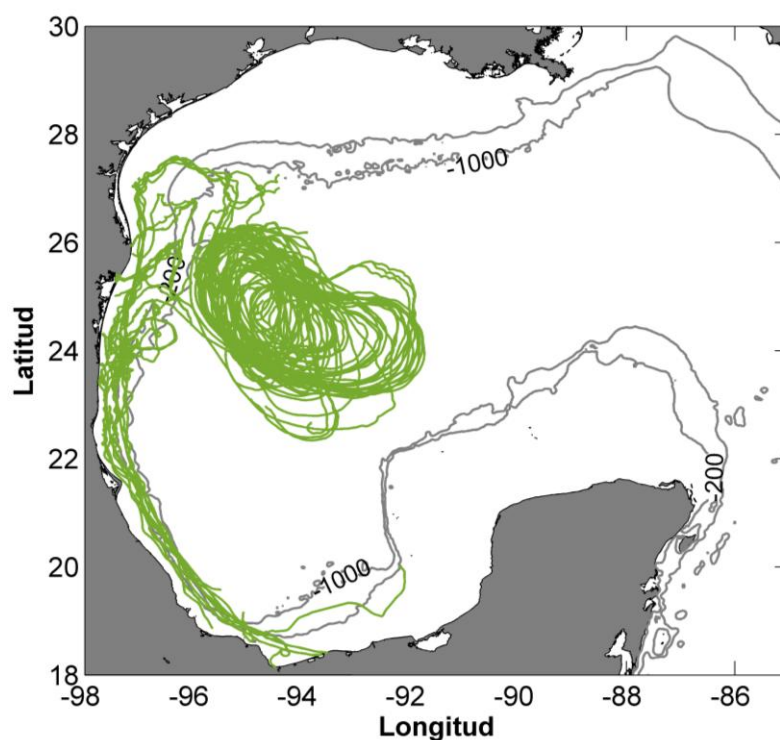


Figura 7. Trayectorias descritas por los derivadores en todo el periodo de estudio (16 de octubre al 29 de noviembre de 2016).

En cuanto a los derivadores liberados en regiones de menor profundidad a 1000 m, todos realizaron trayectorias cerca de la plataforma continental (un total de 20 derivadores). El flujo

predominante fue hacia el sur y algunos derivadores describieron movimientos erráticos, giros y oscilaciones (Figura 8).

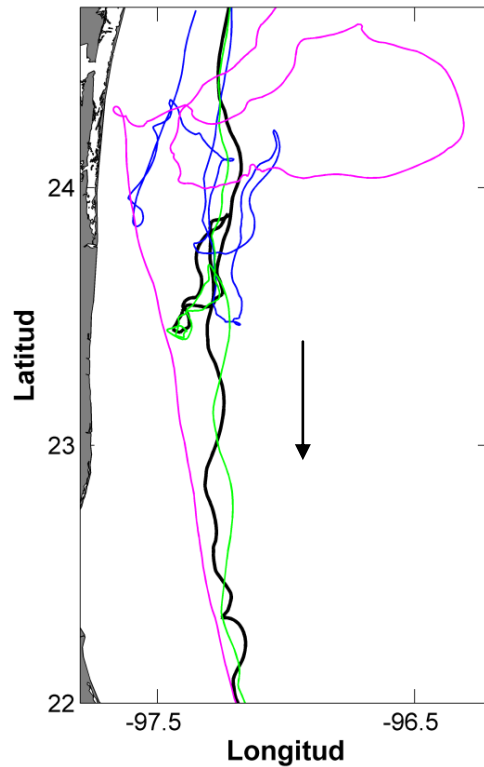


Figura 8. Trayectorias de cuatro derivadores sobre la plataforma continental que describieron movimientos oscilatorios y giros.

5.2.1 Derivadores en aguas profundas

El comportamiento de los derivadores en aguas profundas (> 1000 m), se caracterizó por la realización de giros en sentido anticiclónico. Los derivadores describieron trayectorias elípticas al interior y extremos de *Poseidón* (Figura 9), con un periodo de entre 14-16 días por cada giro. La rapidez promedio de los derivadores fue de 0.5 ms^{-1} , desde magnitudes cercanas a cero hasta un máximo de 1.1 ms^{-1} (Figura 10). Este máximo se ubicó en el extremo sur suroeste (Figura 11).

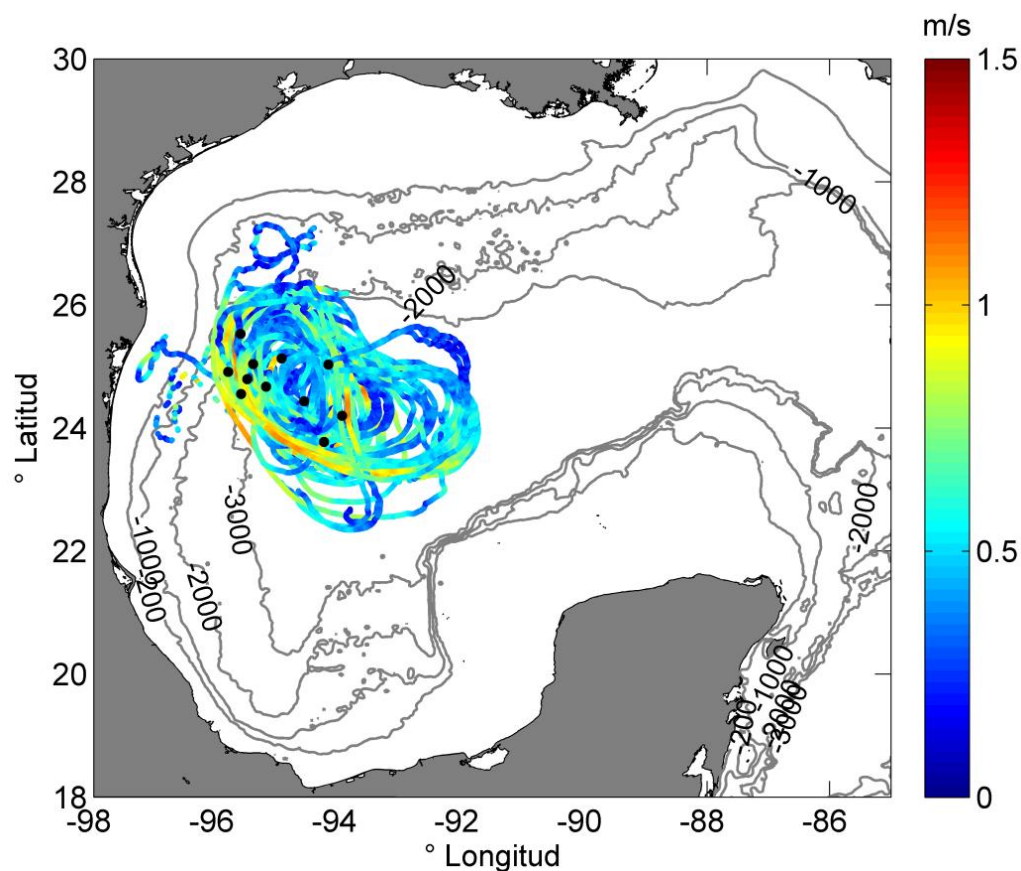


Figura 9. Mapa de las trayectorias de los derivadores en aguas profundas (>1000 m). La barra de color indica su rapidez, las líneas grises la batimetría (m) y los puntos negros la posición de la liberación de los derivadores.

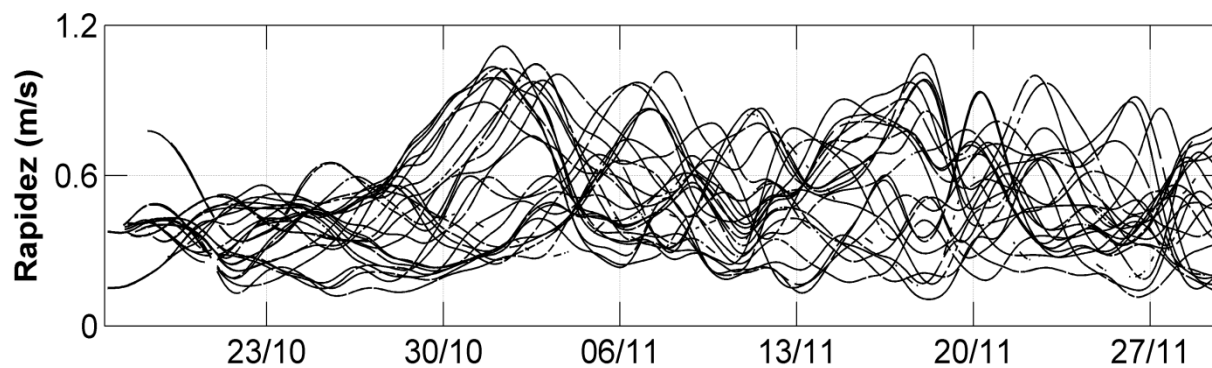


Figura 10. Rapidez de los derivadores en aguas profundas del 16 de octubre al 29 de noviembre de 2016.

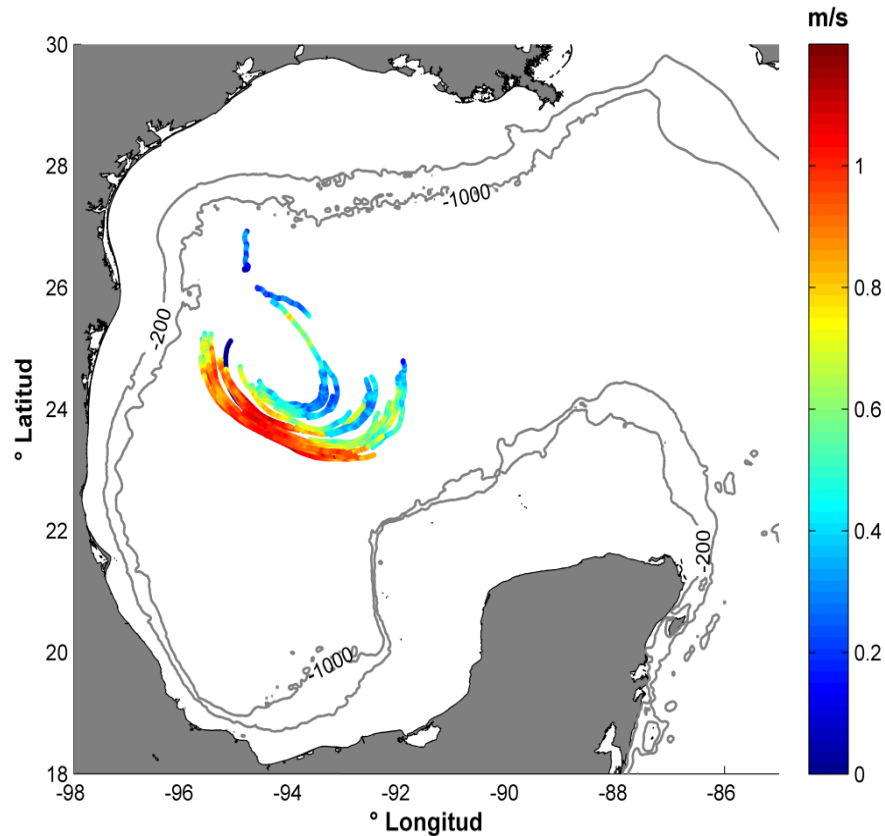


Figura 11. Rapidez de los derivadores en las trayectorias del 30 de octubre al 06 de noviembre de 2016.

5.2.2 Derivadores en plataforma continental

Las trayectorias de los derivadores en regiones de plataforma continental, presentaron mayor variabilidad comparadas a los de aguas profundas (Figura 12). El desplazamiento fue predominantemente hacia el sur, con rapidez promedio fue 0.4 ms^{-1} . Se presentaron magnitudes mínimas de 0.1 ms^{-1} y un máximo de 1.4 ms^{-1} (al sur de la Bahía de Campeche). Se observó un periodo (08 al 12 de noviembre) en el que todos los derivadores incrementaron su rapidez, además en este intervalo de tiempo se registraron las magnitudes más altas del estudio (Figura 13).

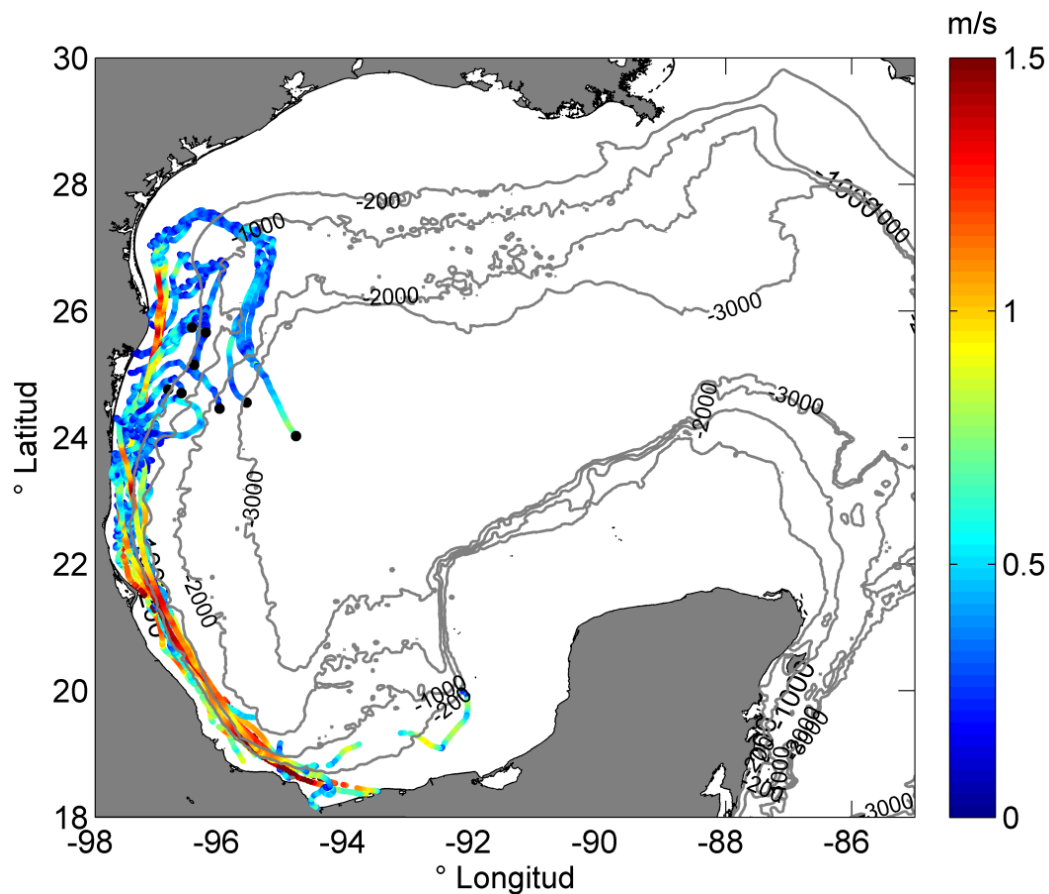


Figura 12. Mapa de las trayectorias de los derivadores sobre plataforma continental. La barra de color indica la rapidez, las líneas grises la batimetría (m) y los puntos negros la posición de la liberación de los derivadores.

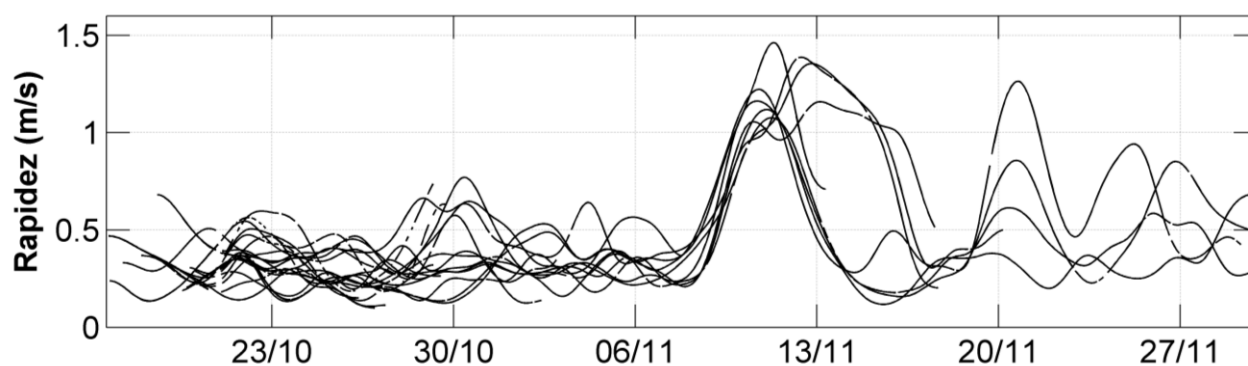


Figura 13. Serie de tiempo de la rapidez de los derivadores en plataforma continental.

Algunos de los derivadores realizaron trayectorias particulares. Seis derivadores tocaron tierra aproximadamente 15 días después de ser liberados. Estos derivadores se desplazaron hacia el norte los primeros días y la tarde del 20 de octubre, cambiaron drásticamente de dirección hacia el suroeste (Figura 14). Cuatro derivadores que inicialmente fueron liberados en aguas profundas, tomaron una dirección noroeste y al llegar a latitudes altas del GoM ($\sim 27^\circ \text{ N}$), se desviaron hacia la costa. Sobre plataforma continental, comenzaron a desplazarse hacia el sur como el resto de los derivadores (Figura 15a). Por último, otros tres derivadores realizaron un giro ciclónico (aproximadamente a 24° N , figura 15b) de duración aproximada de 13 días (25 de octubre - 07 de noviembre). Posteriormente a la realización del giro, uno de los derivadores dejó de transmitir y el resto continuaron su trayecto hacia el sur.

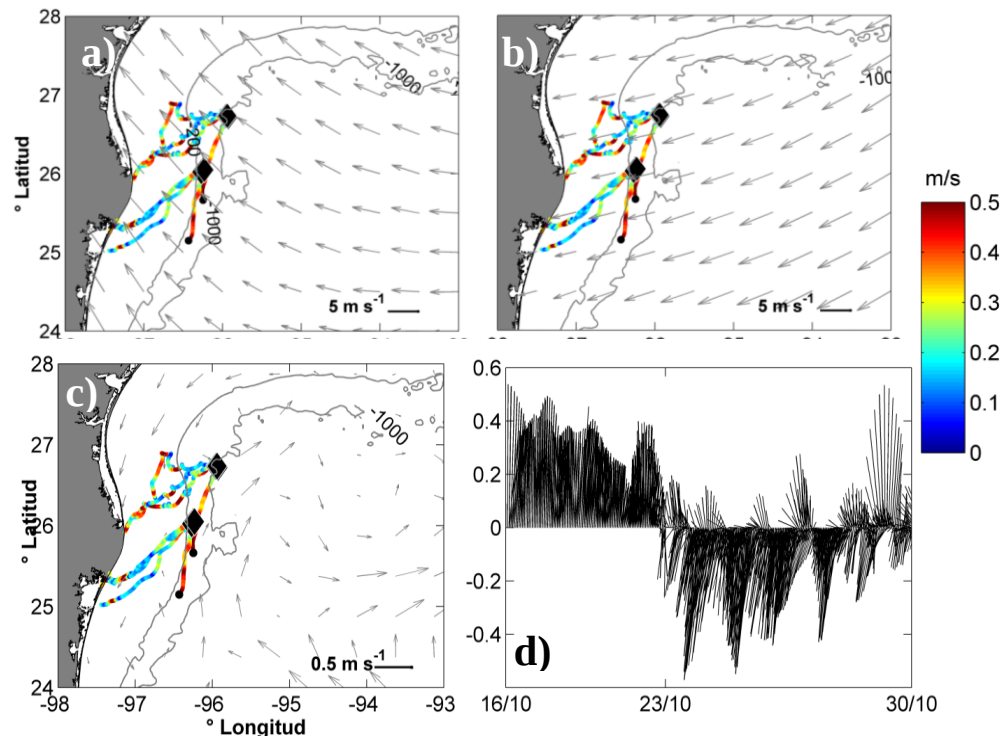


Figura 14. (a), (b) y (c) Representan mapas de las trayectorias de los derivadores. Su rapidez se indica en la barra de color. Se incluyen los vectores del viento promediados del 12 al 18 de octubre en (a), y del 19 al 25 de octubre en (b), mientras que en (c), los vectores de las velocidades geostróficas superficiales promediadas del 19 al 25 de octubre. Los puntos negros indican el punto inicial y los rombos negros, el punto en el tiempo 20 de octubre de 2016 a las 20 horas. (d) Diagrama de astillas de la velocidad de los seis derivadores.

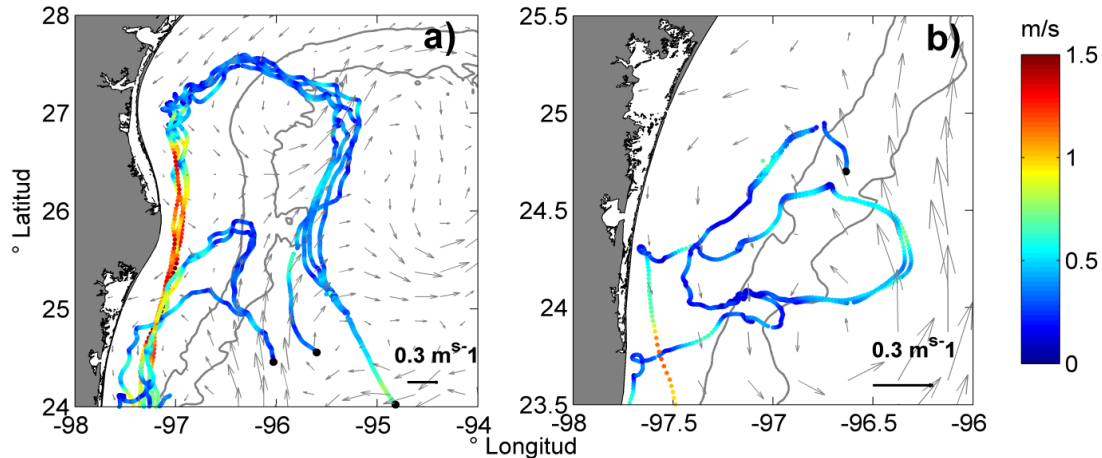


Figura 15. (a) Mapa de las trayectorias de los derivadores que fueron desplazados de aguas profundas hacia la costa. (b) Mapa de las trayectorias de tres derivadores que realizaron un giro ciclónico. Los puntos negros indican las posiciones iniciales. En vectores se incluyen las corrientes geostróficas superficiales. En gris se muestra la isobata de 200 y 1000 m.

5.3 Forzamientos de la circulación superficial evaluados en el periodo de estudio

5.3.1 Topografía dinámica absoluta y velocidades geostróficas

Se observó que la mayoría de las trayectorias de los derivadores en aguas profundas, se ajustaron a las corrientes superficiales geostróficas del remolino “*Poseidón*” (Figuras 16 y 17). Días antes del inicio del experimento, el remolino tenía una forma más circular y se encontró más al Este, comparado al día de la liberación de los derivadores (Figura 16a). “*Poseidón*” se desplazó hacia el oeste del GoM, mostró deformaciones y se alargó inicialmente en un sentido E-O (Figuras 16b-d), posteriormente se orientó N-S (Figuras 17b-d). El remolino se desplazó aproximadamente tres grados hacia el oeste (en 45 días desde la región central), pero no logró alcanzar el quiebre de la plataforma en el periodo de estudio. Adicionalmente, las imágenes satelitales semanales mostraron la interacción de *Poseidón* con otras estructuras menores en sus fronteras (Figura 16c-d, 17a-b).

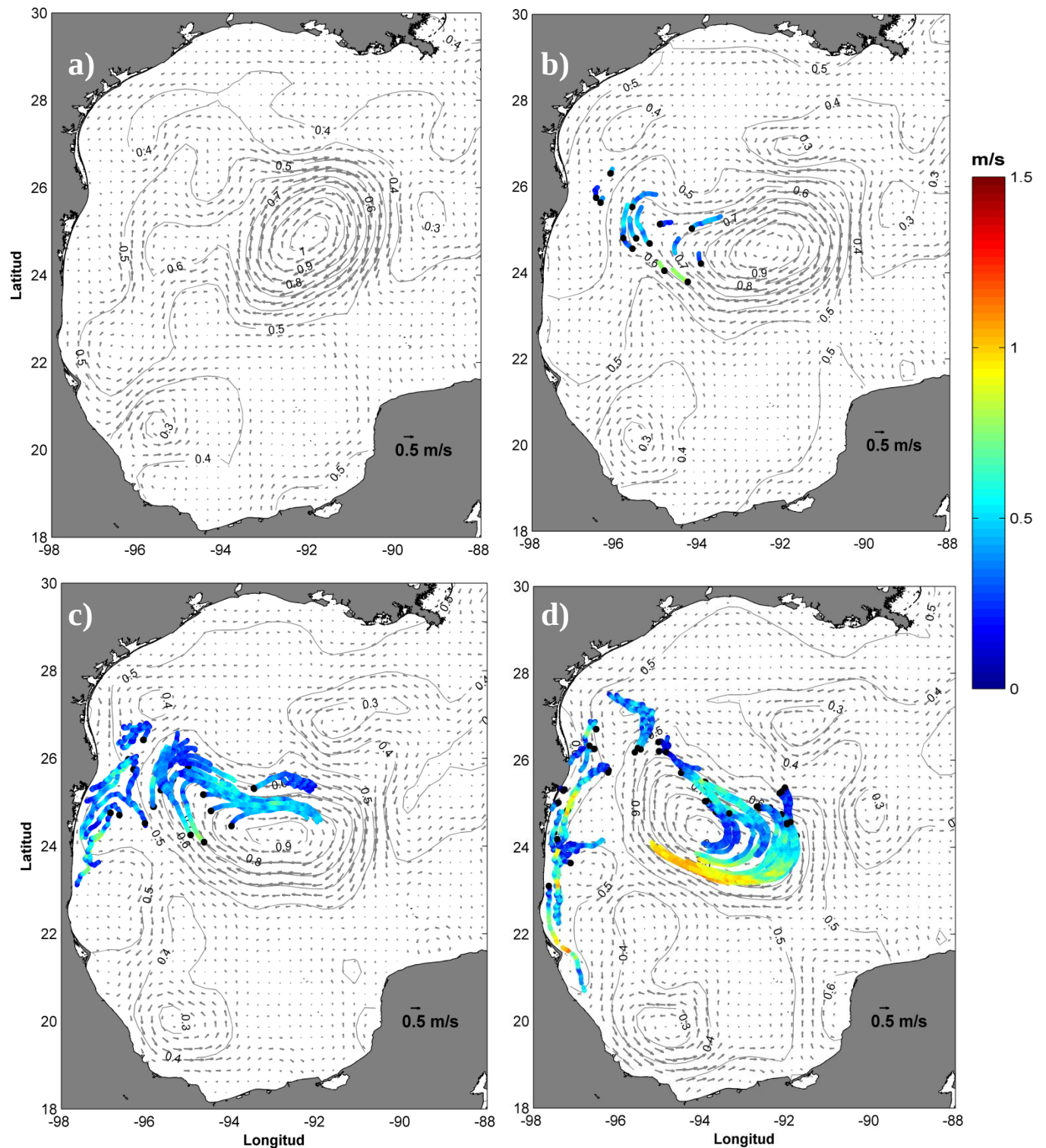


Figura 16. Mapas de las trayectorias de los derivadores y del promedio semanal de la circulación geostrófica superficial (vectores) obtenida por la topografía dinámica (contornos grises). La escala de color representa las velocidades de los derivadores. (a) 5-11 de octubre; (b) 12-18 de octubre; (c) 19-25 de octubre y (d) 26 de octubre – 1 noviembre.

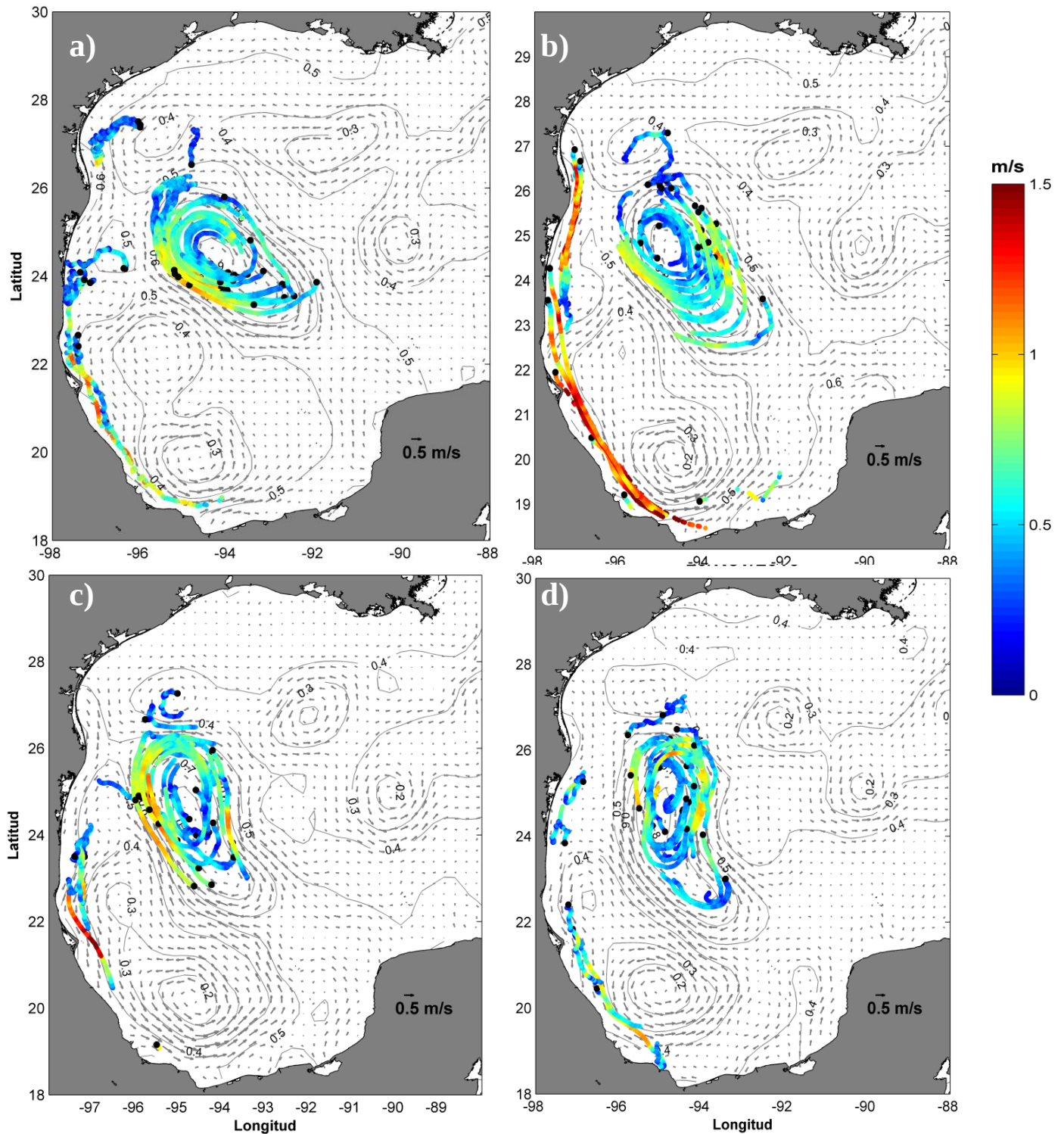


Figura 17. Mapa de las trayectorias de los derivadores y del promedio semanal de la circulación geostrófica superficial (vectores) obtenida por la topografía dinámica (contornos grises). La escala de color representa las velocidades de los derivadores. (a) 2-8 de noviembre; (b) 9-15 de noviembre; (c) 16-22 de noviembre y (d) 23-29 de noviembre.

La circulación del remolino fue claramente registrada por los derivadores en aguas profundas (Figuras 16 y 17). En cambio, los trayectos en la plataforma continental, no mostraron gran coincidencia con las corrientes geostroficas. Solo en algunos trayectos pareciera haber similitud entre la dirección de los derivadores y la de las corrientes geostroficas (Figura 14c y 15a-b). Se detectó además la presencia de un pequeño giro ciclónico alrededor de los 23° y 24° N.

5.3.2 Viento

Durante el periodo de estudio el registro de la boya 42002 muestra periodos de vientos del noreste y sureste intercalados, con mayor dominancia de vientos provenientes del noreste-este (Figura 18). En promedio la magnitud del viento fue de 6.2 ms^{-1} y se presentó un máximo de 13 ms^{-1} (del sureste).

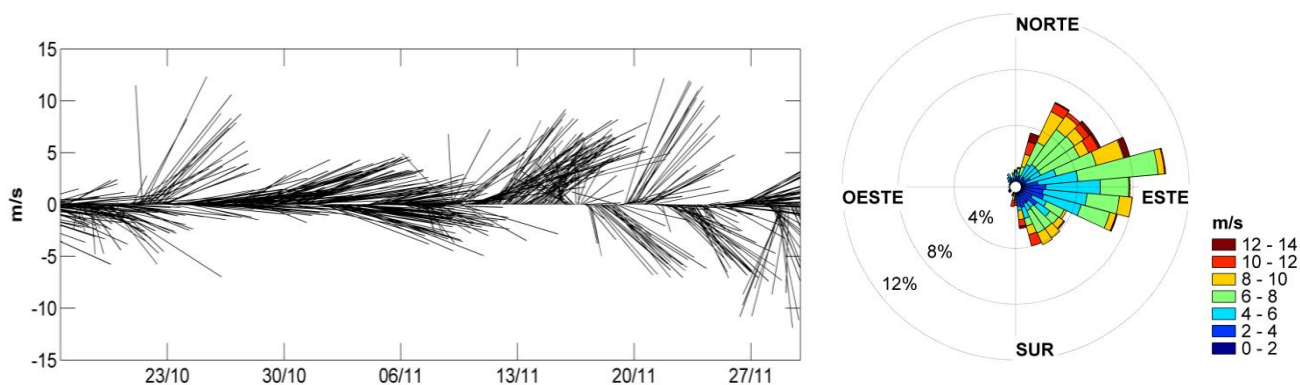


Figura 18. Diagrama de astillas y rosa de los vientos de la boya 42002 localizada en el Golfo de México (Figura 4b, www.ndbc.noaa.gov/). Los datos indican de donde proviene el viento.

Los promedios semanales de las imágenes satelitales del esfuerzo del viento, mostraron cierta predominancia de la dirección hacia el suroeste-oeste (Figuras 19 y 20). Destaca el evento de mayor intensidad de viento en la semana del 9 al 15 de noviembre (Figura 20b).

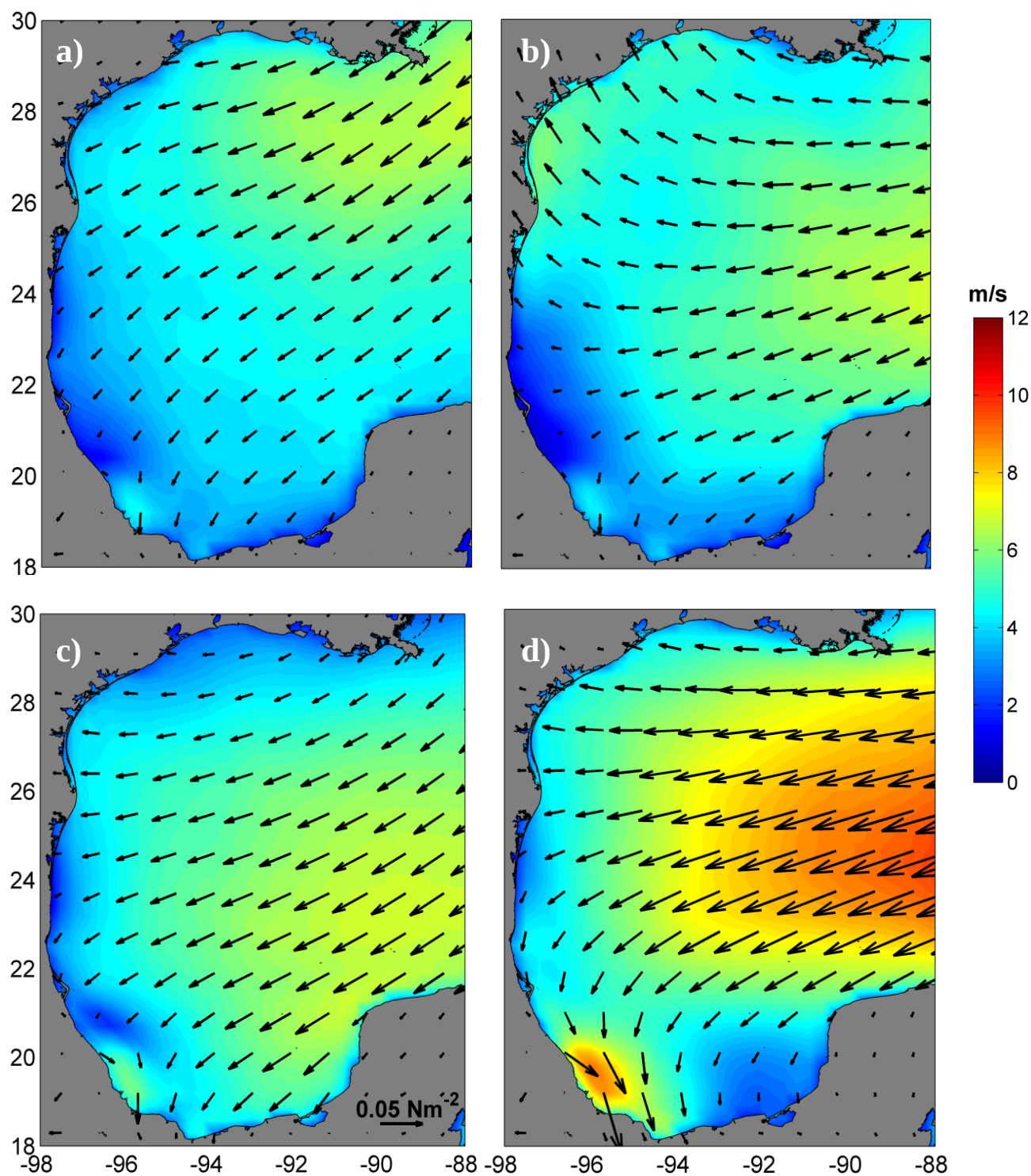


Figura 19. Promedio semanal del esfuerzo del viento (vectores, Nm^{-2}). La escala de color representa la magnitud de la velocidad (ms^{-1}). (a) 5-11 de octubre; (b) 12-18 de octubre; (c) 19-25 de octubre y (d) 26 de octubre – 1 noviembre.

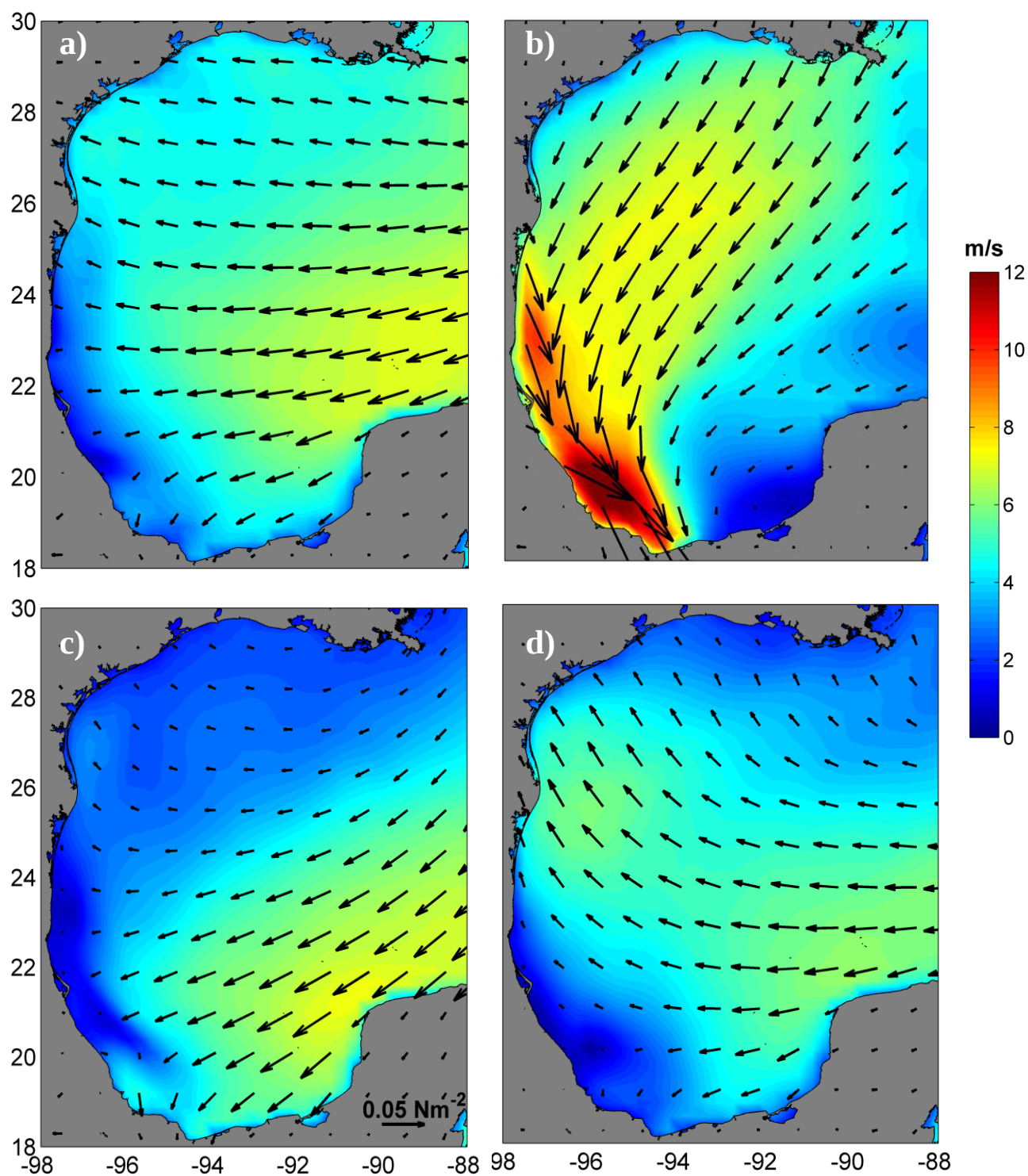


Figura 20. Promedio semanal del esfuerzo del viento (vectores, Nm^{-2}). La escala de color representa la magnitud de la velocidad (ms^{-1}). (a) 2-8 de noviembre; (b) 9-15 de noviembre; (c) 16-22 de noviembre y (d) 23 – 29 noviembre.

Esta semana (9-15 de noviembre) corresponde al paso del frente frío No. 6 del 2016. En este periodo, el campo de viento en todo el GoM, tenía una dirección hacia el sureste y se intensificó en la región de la Bahía de Campeche.

5.4 Correlación de los derivadores con el esfuerzo del viento

Las comparaciones entre las componentes zonal y meridional de los derivadores y las del esfuerzo del viento, indicaron una mayor correlación para los derivadores en la plataforma continental (Figura 21). El coeficiente de correlación compleja promedio para los datos filtrados fue ligeramente mayor respecto a los no filtrados tanto en aguas profundas como en plataforma (Figura 21). Esto indica que los derivadores se correlacionan mejor con otras frecuencias del viento respecto a la señal diurna. En plataforma continental los coeficientes para los datos filtrados y sin filtrar fueron de 0.6 y 0.5 respectivamente. Los ángulos de la correlación variaron entre los 0.1° y los 32° (en promedio, 24°), con un extremo de 164° . La mayoría de las series estuvo en sentido anticiclónico respecto al viento. Solo un derivador tuvo una baja correlación con el viento (0.1) y un ángulo de 164° en sentido ciclónico (Figura 22). Por otro lado, el promedio de la correlación de los derivadores en aguas profundas, fue 0.3 para los filtrados y 0.2 sin filtrar, la mayoría con ángulos menores a los 27° y en sentido ciclónico respecto al viento. Solo un derivador presentó un ángulo alrededor de 45 grados (ángulo teórico en corrientes superficiales forzadas por viento (Ekman, 1905)) con un sentido anticiclónico y su correlación fue débil (0.2). Estos resultados (coeficientes > 0.5 y ángulos $< 27^\circ$) coinciden en su mayoría con comportamiento de derivadores que no presentan buen arrastre a la corriente (Poulain *et al.*, 2009), y que responden más al arrastre directo por el viento. Esto era de esperarse al no haber

realizado la corrección del error asociado al arrastre por viento propuesta en la literatura (por ejemplo, Poulain *et al.* (2009)).

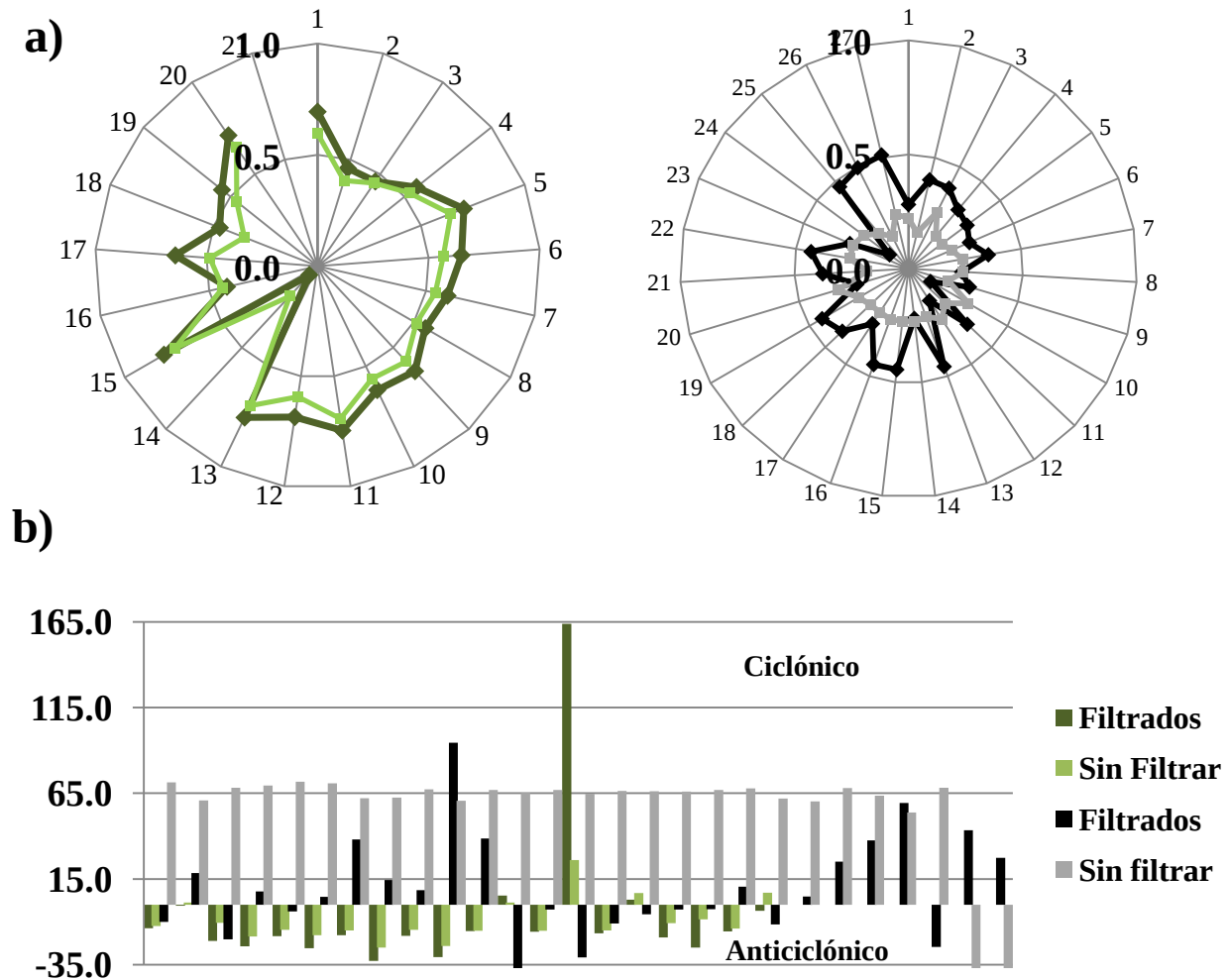


Figura 21. (a) Coeficientes de la correlación compleja. (b) Ángulos de la correlación compleja. Tonos verdes: plataforma continental. Tonos grises: Agua profunda.

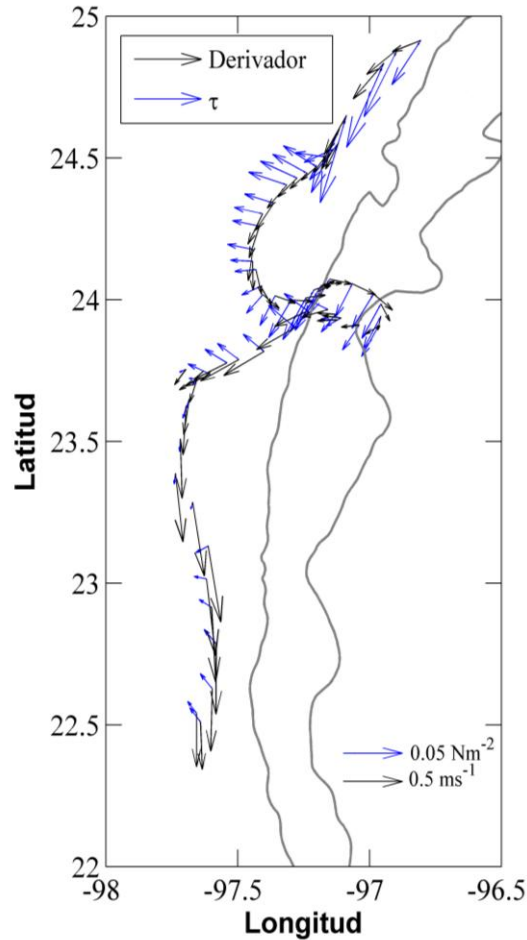


Figura 22. Vectores de la rapidez del derivador que presentó la menor correlación compleja (0.1, 164°) y el esfuerzo del viento.

5.5 Eventos “nortes”.

Durante el periodo de estudio se registraron alrededor de cinco frentes fríos con efecto de “norte” de acuerdo al Servicio Meteorológico Nacional (<http://smn.cna.gob.mx/es/>). La correlación compleja promedio para el evento “norte” asociado al frente frío No. 4, fue mayor comparada a la de todo el periodo de estudio (Figura 23a). El promedio en plataforma continental para el frente frío No. 4 fue de 0.9 con ángulos promedios de 36° , la mayoría a la derecha del viento. Para el frente frío No. 6 el coeficiente promedio fue 0.7 y ángulo de 21° , la

mayoría en sentido anticiclónico. En el frente frío No. 6, solo se evaluaron nueve derivadores que tenían datos.

Los periodos de “nortes” para los derivadores en aguas profundas no se evaluaron debido a la baja correlación ya mostrada en el resto del periodo de estudio.

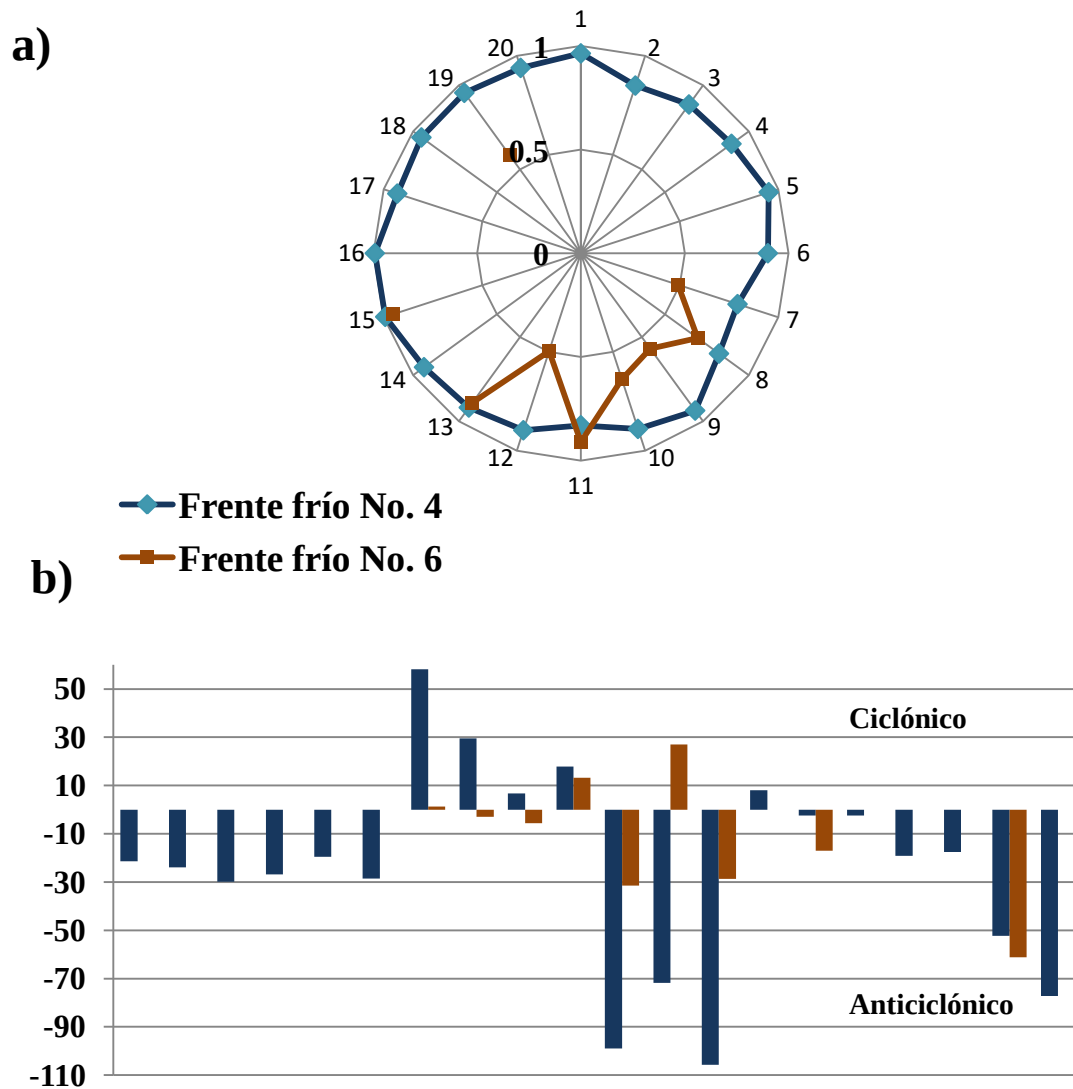


Figura 23. (a) Coeficientes de la correlación compleja para ambos eventos nortes (b) Ángulos de la correlación.

6. Discusión

El comportamiento de las boyas de deriva liberadas en superficie en el periodo de estudio, dependió en gran medida de la profundidad a la cual fueron liberados en el GoM. En general, se observó que los derivadores liberados en zonas cuya isobata rebasó los 1000 m de profundidad realizaron trayectorias circulares en aguas profundas, mientras que los liberados a menor profundidad, tendieron a desplazarse hacia el sur sobre la plataforma continental. Las correlaciones de los derivadores con el viento para los datos filtrados fueron ligeramente mayores, lo cual indica que el forzamiento del viento con frecuencias distintas a la diurna es más importante. Así mismo, las frecuencias mayores a los periodos inerciales (29-38 hrs. para el GoM) suelen correlacionarse menos con el viento (Röhrs y Christensen, 2015), por lo que el filtrar la señal diurna ayudó a obtener una mejor correlación.

La correlación del esfuerzo del viento con la mayoría de los derivadores indicó que el viento no tuvo un efecto importante en la circulación superficial en aguas profundas. La correlación promedio fue relativamente baja (0.3) estuvo combinada con ángulos de fase a la izquierda del viento, contrario a lo esperado para el hemisferio norte (Ekman, 1905). Sin embargo algunos derivadores presentaron buena correlación (mayor a 0.4), aunque con ángulos ciclónicos mayores a 27° , por lo que el efecto del viento en esta región no está bien definido en este estudio.

La influencia de la variabilidad de la topografía dinámica (asociada a la dinámica de la Corriente de Lazo) sobre la circulación superficial en aguas profundas fue evidente. El efecto del remolino anticiclónico *Poseidón*, sobre los derivadores, se detectó cualitativamente porque sus trayectorias se ajustaron bien a los movimientos del remolino (Figura 9, 16 y 17). Los

derivadores reprodujeron y registraron las deformaciones y variaciones de velocidad del remolino en su camino hacia el oeste.

El comportamiento de los derivadores indicó que la mayoría lograron entrar a las corrientes del remolino, se transportaron con él aunque este interactuó con otras estructuras y registraron su deformación en el trayecto. Aunque *Poseidón* retuvo a la mayoría de los derivadores liberados en aguas profundas (>1000 m), algunos de ellos (siete) no fueron arrastrados por el remolino y fueron desplazados hacia la costa (Figura 15a). En este estudio no se analizó cuantitativamente la probabilidad de que las partículas (derivadores) entraran o quedaran retenidas en el remolino, ni qué tanto respondieron a la interacción con estructuras de mesoescala, por lo que no es claro el forzante de este comportamiento.

En la figura 15a se muestran los vectores de la circulación geostrófica superficial, que indican un flujo hacia el norte y noroeste, el cual parece coincidir con la trayectoria de los derivadores. Además en ese periodo de tiempo, se presentaron vientos del sureste que pudieron favorecer que no fueran retenidos en el remolino. Esto significó que, aunque hubo una gran dominancia de una estructura de mesoescala en aguas profundas (como *Poseidón*), las partículas cercanas pudieron no ser atrapadas por las corrientes y desplazarse hacia regiones más someras. Lo anterior podría depender de la presencia de otras corrientes. Por otro lado, una minoría de derivadores (alrededor de tres) después de girar un tiempo con el remolino, lograron salir e incorporarse a otro giro o desplazarse hacia plataforma continental (Figura 9). Es decir, aunque la mayoría de las partículas (derivadores) fueron retenidas en el remolino, existió el remoto escenario en el que algunas se transportaron hacia aguas más someras antes que el remolino.

Los derivadores sobre plataforma tuvieron un coeficiente de correlación con el viento relativamente alto (> 0.5). La mayoría de los derivadores analizados obtuvieron un ángulo pequeño (17° - 20°) a la derecha del viento. Estos resultados indican en la mayoría de los casos, que el derivador no está bien anclado a la corriente (Poulain *et al.*, 2009). Solamente seis de los derivadores presentaron ángulos mayores a 20° en sentido anticiclónico, es decir, el movimiento de los derivadores fue a la derecha del viento. Estos resultados son coherentes con lo esperado para el hemisferio norte, cuando los derivadores están bien anclados a una corriente forzada por viento (Ekman, 1905; Poulain *et al.*, 2009).

Con el fin de evaluar mejor las frecuencias del viento que influyen en la circulación superficial, se recomienda la realización de espectros rotacionales y el cálculo de coherencia entre ellos. En este caso no se realizó debido a que la mayoría de los derivadores presentó una alta correlación con el viento y un ángulo pequeño (derivadores con bajo arrastre a la corriente, que siguen la dirección del viento). Aunque existen metodologías que permiten corregir o extraer, la información de la circulación superficial de derivadores con bajo arrastre hacia la corriente (Pazan y Niiler, 2001; Poulain *et al.*, 2009), no fue parte de los objetivos del presente estudio.

El comportamiento general de los derivadores sobre la plataforma continental describió un flujo predominante hacia el sur. Esta corriente costera hacia el sur, es típica de la temporada de otoño e invierno, y se presume que es forzada por vientos del norte (Zavala-Hidalgo, 2003; Martínez-López y Pares-Sierra, 2009). Aunque la dirección de proveniencia del viento presentó periodos intercalados entre el sureste y el noreste, fue marcada la dominancia de los del noreste (Figura 18). El análisis de los derivadores sobre la plataforma, sugirió que respondieron a las variaciones de la magnitud del viento (coeficiente de correlación alto). Sin embargo, al igual que

la corriente superficial, los vientos tienden a desviarse siguiendo la costa hacia el sur, por efecto de represamiento causado por la Sierra Madre Oriental (Osorio-Tai, 2015). Esto fue notorio sobre todo en los eventos de “norte” (Figura 20b), por lo que es probable que las trayectorias descritas indiquen más el comportamiento del viento que el de las corrientes. Durante el evento asociado al frente frío No.6, se observaron flujos intensos de viento que se manifestaron como aumentos de la rapidez en los derivadores. Este evento transportó en poco tiempo (2-3 días) a algunos derivadores desde latitudes altas ($\sim 24^\circ$) del GoM hasta el oeste de la Bahía de Campeche ($\sim 20^\circ$). Este comportamiento (recorrido de distancias largas en tiempos cortos asociados a flujos intensos de viento) también ha sido observado en el norte del GoM (Ohlmann y Niiler, 2005)

Los derivadores en el periodo de los frentes fríos con efecto de “norte” analizados, se correlacionaron más con los vientos. El primero de ellos (frente frío No. 4) ocurrió el 20 de octubre, y su efecto fue evidente en al menos seis derivadores. Estos derivadores cambiaron drásticamente de dirección aproximadamente un día después de la entrada del “norte” y fueron desplazados hacia la costa (Figura 14) la correlación fue alta (entre 0.8-0.9) con ángulos entre los 19° y 29° . Las magnitudes de la rapidez de la mayoría de derivadores en el periodo del frente frío No. 4, no mostraron incrementos sobresalientes, en contraste con el periodo del 9 al 13 de noviembre (Figura 13). Este periodo coincide con el paso del frente frío No. 6, el cual atravesó todo el GoM y comprendió el periodo del 08 al 10 de noviembre de acuerdo al Sistema Meteorológico Nacional. En la imagen satelital de la semana del 9 al 15 de noviembre se aprecia la intensificación de la magnitud y esfuerzo del viento sobre todo en la región de la Bahía de Campeche (Figura 20b), donde los vientos comienzan a acanalarse a lo largo de la costa ($94-96^\circ\text{W}$) con dirección hacia el sureste. Aunque el aumento de magnitud observado en el periodo

del norte asociado al frente frío No. 6 se presentó tanto en derivadores en la Bahía de Campeche como en latitudes más altas. Lo anterior es indicador de que los “nortes” intensificaron la corriente. Por otro lado, el ángulo pequeño de la correlación compleja, también es indicador de que siguieron la dirección del viento, que tuvo un efecto de represamiento hacia el sur.

Cabe mencionar que la información presentada no es concluyente para afirmar el efecto e importancia del viento en la circulación superficial del periodo de estudio. Las trayectorias parecieran indicar que además del viento, los derivadores respondieron a otras estructuras o fenómenos en algunos periodos de tiempo (Figura 8), lo cual no se evaluó en este estudio. Las correlaciones altas (> 0.5) indican que probablemente los derivadores no presentaron un buen arrastre a la corriente superficial, es importante contemplar que no se conoce el error de la estimación de las corrientes superficiales para ninguno de los derivadores. Debido a que se reconoce que las variaciones en magnitud de los vientos en el GoM en temporada de otoño e invierno son notorias e importantes, se sugiere la implementación de derivadores con un arrastre (papalote) más profundo.

Aunque los datos obtenidos por los derivadores no fueron corregidos para minimizar el error debido al arrastre directo por el viento, los resultados indicaron una aproximación coherente de la circulación superficial. En aguas profundas, los derivadores lograron describir la circulación asociada al remolino en el que fueron arrastrados; en plataforma continental, describieron un flujo que coincide con lo reportado en la literatura para la temporada de estudio. Debido a que la temporada del periodo de estudio se ve afectada por periodos de vientos intensos (frentes fríos), los resultados solo permiten aproximar tendencias de la circulación superficial.

El efecto del viento en la circulación superficial del GoM ha sido ampliamente estudiado y discutido (Martínez-López y Pares-Sierra, 1998; Zavala-Hidalgo *et al.*, 2003; Rivas, 2017). Aunque el objetivo del presente estudio consistió en evaluar mayoritariamente el efecto del viento sobre la circulación superficial, es importante reconocer las limitaciones al no evaluar otros forzamientos y procesos físicos implicados en la circulación superficial. Uno de los forzamientos importantes en la circulación superficial de la región de estudio, son las ondas atrapadas a la costa. Este tipo de ondas suelen ser más evidentes y de mayor intensidad posteriormente a un evento de viento fuerte (como los “nortes”), y tienen la capacidad de intensificar las corrientes superficiales (Rivas, 2017). Sin embargo en este estudio no se contempló la variabilidad de las corrientes debida a ondas atrapadas aunque se presentaron varios “nortes”. Así mismo, estudios reportan la importancia de oscilaciones inerciales y mareas semidiurnas en la circulación superficial, sobre todo en el área de la Bahía de Campeche (Expósito-Díaz *et al.*, 2009), fenómenos que tampoco fueron evaluados.

7. Conclusiones

Los derivadores en aguas profundas presentaron una baja correlación con el esfuerzo del viento. En esta zona la circulación superficial estuvo dominada por el remolino anticiclónico de la Corriente de Lazo (*Poseidón*) que arrastró y retuvo a los derivadores en su trayectoria hacia el oeste.

El comportamiento de los derivadores en plataforma continental describió una corriente costera hacia el sur. Sin embargo en esta zona las correlaciones de los derivadores con el

esfuerzo del viento fueron altas y los ángulos de fase pequeños, esto indicó que los derivadores estuvieron más asociados al esfuerzo del viento que a la corriente superficial.

Los eventos nortes asociados a los frentes fríos analizados en el periodo de estudio tuvieron una muy buena correlación con los derivadores de plataforma continental, por lo que se comprobó parcialmente la hipótesis planteada. Las corrientes se intensificaron por los eventos de viento asociados a los frentes fríos. Sin embargo el efecto en la dirección no es claro debido al represamiento del viento, el cual se alinea en la misma dirección que la corriente costera (sigue la costa hacia el sur). Por otro lado el efecto de los eventos “nortes” no se evaluó en aguas profundas debido a la baja correlación obtenida para todo el periodo de estudio.

8. Referencias

- Bracco, A., J. Choi, K. Joshi, H. Luo y J., McWilliams. 2016. Submesoscale currents in the northern Gulf of Mexico: Deep phenomena and dispersion over the continental slope. *Ocean Modelling*. 101: 43-58. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocemod.2016.03.002>.
- Candela, J., J. Sheinbaum, J. Ochoa y A. Badan. 2002. The potential vorticity flux through the Yucatan Channel and the Loop Current in the Gulf of Mexico. *Geophys. Res. Lett.* 29 (22), 2059, <http://dx.doi.org/10.1029/2002GL015587>
- Cardona, Y. y A. Bracco. 2016. Predictability of mesoscale circulation throughout the water column in the Gulf of Mexico. *Deep-Sea Res. Pt. II.* 129: 332–349. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2014.01.008>
- CIA, 2016. The Word FactBook. Disponible en línea: <https://www.cia.gov/>. Consultado el 28 de enero de 2017.
- Cochrane, J. 1972. Separation of an Anticyclone and Subsequent Developments in the Loop Current (1969). En: Capurro L., y J. Reid. Eds. *Contributions on the Physical Oceanography of the Gulf of Mexico*. Vol. 2. Texas A & M University. Oceanography Studies. Gulf Publishing Company. 288 pp.
- Dubranna, J., P. Pérez-Brunius, M. López, and J. Candela. 2011. Circulation over the continental shelf of the western and southwestern Gulf of Mexico, *J. Geophys. Res.*, 116, C08009. <http://dx.doi.org/10.1029/2011JC007007>
- Ekman, V. W., 1905. On the influence of the Earth's rotation on ocean currents. *Ark. Mat., Astron., Fys.*, 2 (11), 1–53.
- Expósito-Díaz G., DA. Salas-de León, MA. Monreal-Gómez, D. Salas-Monreal, & F. Vázquez-Gutiérrez. 2009. Corrientes inerciales en el sur del Golfo de México. *Cienc. Mar.* 35(3), 287-296.
- Gill, A., 1982. *Atmosphere-Ocean Dynamics*, Academy Press, Vol. 30.
- Joye, S., A. Bracco, T. Özgökmen. 2016. The Gulf of Mexico ecosystem, six years after the Macondo oil well blowout. *Deep-Sea Res. Pt. II.* 129: 4-19. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2016.04.018>

- Kundu, P.J. 1976. Ekman Veering Observed near the Ocean Bottom. *J Phys. Oceanogr*, 6, 238-242. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1976\)006<0238:EVONTO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1976)006<0238:EVONTO>2.0.CO;2)
- Large y Pond. 1981. Open Ocean Momentum Flux Measurements in Moderate to Strong Winds. *J. Phys. Oceanogr.*, 11: 324 – 336. [https://doi.org/10.1175/15200485\(1981\)011<0324:OOMFMI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/15200485(1981)011<0324:OOMFMI>2.0.CO;2)
- Luo, H., A. Bracco, Y. Cardona y J. McWilliams. 2016. Submesoscale circulation in the northern Gulf of Mexico: Surface processes and the impact of the freshwater river input. *Ocean Modelling* 101: 68-82. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocemod.2016.03.003>.
- Martínez-López, B. Pares-Sierra, A. 1998. Circulación del golfo de México inducida por mareas, viento y la corriente de Yucatán. *Cienc. Mar.*, 24 (1): 65-93.
- Monreal-Gómez, M., D. Salas-de-León, y A. García-Gasca. 2004. Golfo de México: circulación y productividad. *Ciencia*. 76: 25-33.
- Ohlmann, J. y P. Niiler. 2005. Circulation over the continental shelf in the northern Gulf of Mexico. *Prog. Oceanogr.* 64: 45–81. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2005.02.001>
- Osorio-Tai, M., 2015. Estudio de la intensificación de los vientos en el puerto de Veracruz mediante modelación numérica. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Baja California. 75 pp.
- Pérez-Brunius, P., P. García-Carrillo, J. Dubranna, J. Sheinbaum y J. Candela. 2013. Direct observations of the upper layer circulation in the southern Gulf of Mexico. *Deep-Sea Res. Pt. II*. 85: 182–194. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.07.020>
- Pazan, S. y P. Niiler. 2001. Recovery of Near-Surface Velocity from Undrogued Drifters. *J. Atmos. Ocean. Tech.* 18: 476-489. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2001\)018<0476:RONSVF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2001)018<0476:RONSVF>2.0.CO;2)
- Pérez-Brunius, P. 2016. Experimento de Dispersión en Aguas Profundas (DWDE-2). Reporte técnico de crucero. CICESE. 129 pp.
- Poulain, P., R., Gerin, E., Mauri y R., Pennel. 2009. Wind Effects on Drogued and Undrogued Drifters in the Eastern Mediterranean. *J. Atmos. Ocean. Tech.* 26: 1144-1156. <https://doi.org/10.1175/2008JTECHO618.1>

- Rivas, D. 2017. Wind-driven coastal-trapped waves off southern Tamaulipas and northern Veracruz, western Gulf of Mexico, during winter 2012-2013. *Estuar. Coast. Shelf S.* 185: 1-10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2016.12.002>.
- Röhrs, J. y K. Christensen. 2015. Drift in the uppermost part of the ocean. *Geophys. Res. Lett.*, 42. <http://dx.doi.org/10.1002/2015GL066733>.
- Ruíz-Castillo, E., J. Gomez-Valdes, J. Sheinbaum y R. Rioja-Nieto. 2016. Wind-driven coastal upwelling and westward circulation in the Yucatan shelf. *Cont. Shelf Res.* 118: 63–76. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2016.02.010>
- Sturges, W., A. Lugo-Fernandez, M. Shargel. 2005. Introduction to Circulation in the Gulf of Mexico. En: Sturges, W., A. Lugo-Fernandez. Eds. *Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and Models*. American Geophysical Union, Washington, D. C. <http://dx.doi.org/10.1029/161GM02>
- Trenberth, K., W. Large y J. Olson, 1990. The Mean Annual Cycle in Global Ocean Wind Stress. *J. Phys. Oceanogr.* 20: 1742-1760. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1990\)020<1742:TMACIG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1990)020<1742:TMACIG>2.0.CO;2)
- Zavala-Hidalgo, J. Morey y J. O'Brien. 2003. Seasonal circulation on the western shelf of the Gulf of Mexico using a high-resolution numerical model. *J. Geophys. Res.* 108(C12), 3389, <http://dx.doi.org/10.1029/2003JC001879>.
- Zavala-Hidalgo, J., R. Romero-Centeno, A. Mateos-Jasso. 2014. The response of the Gulf of Mexico to wind and heat flux forcing. *Atmos.* 27 (3): 317-334. [https://doi.org/10.1016/S0187-6236\(14\)71119-1](https://doi.org/10.1016/S0187-6236(14)71119-1)