

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN
SUPERIOR DE ENSENADA, BAJA CALIFORNIA**



**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN OCEANOGRAFÍA FÍSICA**

**Conectividad del golfo de Campeche con el resto del golfo de
México a partir de datos lagrangianos reales y simulados**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

Maestro en Ciencias
Presenta:

Javier Rodríguez Outerelo

Ensenada, Baja California, México
2015

Tesis defendida por
Javier Rodríguez Outerelo
y aprobada por el siguiente Comité

Dra. Paula Pérez-Brunius
Director del Comité

Dr. Alejandro Francisco Parés Sierra
Miembro del Comité

Dra. Sharon Zinah Herzka Llona
Miembro del Comité

Dr. Francisco Javier Ocampo Torres
Coordinador del Posgrado en
Oceanografía Física

Dr. Jesús Favela Vara
Director de Estudios de Posgrado

Febrero, 2015

Resumen de la tesis de Javier Rodríguez Outerelo, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Física.

Conectividad del golfo de Campeche con el resto del golfo de México a partir de datos lagrangianos reales y simulados.

Resumen elaborado por:

Javier Rodríguez Outerelo

Este trabajo evalúa la conectividad superficial del golfo de Campeche con el resto del golfo de México, así como el tiempo de residencia del agua en dicha región y los tiempos de tránsito de partículas a distintas regiones del golfo de México. Para ello se han utilizado los datos boyas de deriva lanzadas mensualmente desde septiembre del 2007 hasta enero de 2014 en cinco puntos del golfo de Campeche. Paralelamente, con la intención de comprobar si se pueden usar datos de altimetría para estimar la conectividad, se han realizado dos experimentos con trazadores sintéticos, cuyas trayectorias se obtuvieron integrando el campo geostrófico derivado de datos de altimetría. En el primer experimento se simularon las trayectorias de las boyas de deriva, lanzando a los trazadores sintéticos en los mismos puntos y tiempos que las boyas de deriva (“boyas simuladas”). En el segundo experimento, se liberaron de manera aleatoria a 1000 partículas cada mes desde septiembre del 2007 a abril del 2013 en cinco regiones de $1^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ al interior del golfo de Campeche (“conectividad mensual”), con el objetivo de obtener mayor robustez estadística y mayor cobertura espacial de trazadores. Los resultados demuestran que (1) la región de Campeche es retentiva (el 31.5% de las boyas reales fueron retenidas trascurridos 100 días de su lanzamiento), (2) los tiempos de residencia fueron muy variables con una mediana de 32 días, y una probabilidad de permanecer en Campeche menos de 45 días del 58%, (3) la salida principal de las boyas desde el golfo de Campeche fue por la región oeste, y (4) el tiempo de tránsito de boyas a las regiones ubicadas al norte de los 26° de latitud es muy variable, pudiendo ser de 30 a 100 días con una probabilidad de ocurrencia similar. El análisis de los trazadores sintéticos sugiere que (1) la retención de la región de Campeche se sobrestima (se encontraron a los 100 días el 58.5% de boyas simuladas y el 80% de partículas del experimento “conectividad mensual”), (2) el tiempo de residencia se sobrestima, siendo que la probabilidad de permanecer en la región más de 90 días fue del 40% y 60% para las boyas simuladas y partículas, respectivamente, y solo del 10% para las boyas reales, (3) las estimaciones de los tiempos de tránsito al norte de los 26° de latitud son similares para todos los trazadores, y (4) la retención en Campeche puede variar en función de las estructuras de mesoescala que interactúen con el ciclón de Campeche, aunque falta analizar con más detalle el efecto que éstas tienen sobre la conectividad. Los resultados son una primera aproximación a la conectividad y los tiempos de residencia del golfo de Campeche para larvas, contaminantes u otros trazadores de interés.

Palabras clave: **conectividad, golfo de Campeche, boyas de deriva, retención.**

Abstract of the thesis presented by Javier Rodríguez Outerelo as a partial requirement to obtain the Master or Doctor in Science degree in Physical Oceanography

Conectividad del golfo de Campeche con el resto del golfo de México a partir de datos lagrangianos reales y simulados.

Abstract by:

Javier Rodríguez Outerelo

This work evaluates the surface connectivity of the Gulf of Campeche with the rest of the Gulf of Mexico, the residence time of water in the Gulf of Campeche and the transit times of particles to different regions of the Gulf of Mexico. Data from drifters released monthly between September 2007 and January 2014 in five points of the Gulf of Campeche were used. In addition, two experiments with synthetic tracers were made to verify whether altimetry data can be used to estimate connectivity, the trajectories of which were obtained by integrating the geostrophic current field derived from altimetry data. In the first experiment the trajectories of the real drifters were simulated, releasing synthetic tracers in the same locations and times of the drifters ("simulated drifters"). In the second experiment, 1000 particles were released randomly each month from September 2007 to April 2013 in five regions of $1^\circ \times 1.5^\circ$ within the Gulf of Campeche ("monthly connectivity"), with the purpose of obtaining more robust statistics and greater spatial coverage. The results show that (1) the region of Campeche is retentive (31.5% of the real drifters were retained after 100 days of their release), (2) the residence times were highly variable with a median of 32 days, and 58% probability of remaining less than 45 days in the Campeche region, (3) drifters exit the Gulf of Campeche mainly through the western region, and (4) the transit times of drifters to regions north of 26° N was highly variable, ranging between 30 to 100 days with similar probability of occurrence. The analysis of synthetic tracers suggests that (1) the retention of Campeche region is overestimated (58.5% of simulated drifters and 80% of particles of the experiment "monthly connectivity" remain in the region after 100 days), (2) residence times are overestimated, since the probability of remaining in the region over 90 days was 40% and 60% for simulated buoys and particles, respectively, and only 10% for real drifters, (3) estimated transit times to latitudes north of 26° N are similar for all tracers, and (4) retention in Campeche may vary depending on the interactions between mesoscale structures and the Campeche cyclone, although the need to analyze the effect this has on the connectivity remains to be addressed in detail. The results provide an approximation to the connectivity and residence times of the Gulf of Campeche for larvae, contaminants or other tracers of interest.

Keywords: **connectivity, Campeche gulf, drifters, retention.**

Dedicatorias

A todas aquellas personas que lean este trabajo.

Agradecimientos

A Paula, mi estimada asesora, por tu paciencia, dedicación e intensidad transmitidas durante el desarrollo de esta tesis.

A los miembros de mi comité, Sharon y Alejandro, por su paciencia y predisposición a ayudar durante el desarrollo de nuestra tesis.

A CONACYT y al Departamento de Oceanografía Física, por la beca otorgada para realizar mis estudios y a Pemex Exploración y Producción por el financiamiento del proyecto (contratos 428217896, 428218855 y 428229851).

A AVISO, por producir los datos de altimetría.

A mis maestros (Enric, Paula, Manuel, Paco, Pedro, José, Tito, Güido), por la formación impartida y los conocimientos compartidos, necesarios para mi desarrollo académico y personal.

A Pepe Ochoa, Luis Zavala y a todo el grupo CANEK, por los consejos y sugerencias durante la elaboración de esta tesis.

A la comunidad CICESE, por compartir muchas e inolvidables experiencias durante todo este tiempo.

A TODOS mis compañeros de posgrado, siempre al pie del cañón y dispuestos a ayudar.

A mi familia (Pepe, Celi, Carlos y Marta), porque sin ellos nada de esto sería posible, y a mi amor, Fátima, por todo tu apoyo y cariño.

Tabla de contenido

Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatorias.....	iv
Agradecimientos	v
Lista de figuras	viii
 Capítulo 1. Introducción.....	 1
1.1 Zona de estudio	3
1.2 Objetivo e hipótesis.....	7
 Capítulo 2. Datos y Metodología	 9
2.1 Boyas	9
2.3 Regionalización del área de estudio	10
2.4 Experimentos	11
2.4.1 Experimento “boyas reales”	11
2.4.2 Experimento “boyas simuladas”	12
2.4.3 Experimento “conectividad mensual”	14
2.4.4 Resultados a generar por los experimentos	15
 Capítulo 3. Resultados y discusión	 16
3.1 Mapas de dispersión y conectividad	16
3.2 Estadísticas comparativas entre diferentes tipos de trazadores	23
3.2.1 Dispersión entre pares de trazadores	23
3.2.2 Distribución de probabilidades de desplazamientos vectoriales desde el punto de origen.....	25

Tabla de contenido

3.2.3 Dispersión absoluta	28
3.3 Análisis del experimento “conectividad mensual”	32
3.3.1 Conectividad durante los meses de retención máxima, intermedia y mínima.	39
3.3.2 Compuestos de altimetría y de campos geostróficos	42
3.4 Tiempos de residencia	46
3.5 Tiempo de tránsito al norte	48
 Capítulo 4. Discusión y Conclusiones	50
4.1 Contexto oceanográfico	50
4.2 Diferencias entre los tres trazadores	53
 Lista de Referencias	56

Lista de figuras

Figura	Página
1 Golfo de México. Se presenta la isóbata de 50 metros de profundidad en color gris. El golfo de Campeche se ubica al sur de 22° de latitud norte y entre 90° y 98° de longitud oeste. El golfo de México está dividido en regiones: Campeche, zona Oeste, zona Centro, zona Este, zona Noroeste, zona Noreste. Los puntos negros (A, B, C, D, E), corresponden a los puntos de lanzamiento de las boyas reales y simuladas. Las nubes de puntos coloreados corresponden a las zonas de lanzamiento de las partículas del experimento “conectividad mensual” (azul, zona A; rojo, zona B; verde, zona C; amarillo, zona D; magenta, zona E).	3
2 Contornos de la altura de la superficie del mar (las líneas blancas corresponden a elevaciones negativas, las negras a positivas) procedentes del mapa de altimetría del 13 de marzo de 2002, sobrepuesto a un mapa de temperatura superficial del mar para la misma fecha. Se observa la corriente del Lazo y un remolino anticiclónico recién desprendido. Está presente también el giro ciclónico de Campeche bajo los 21° de latitud norte. Leben, 2005.....	4
3 Campo de velocidades promedio de 3 años de datos de boyas de deriva en la región, donde se aprecia el giro ciclónico de Campeche, entre los 94° y 96° de longitud oeste y bajo los 21° de latitud norte. Sandoval, 2011.....	5
4 Trayectoria de la boya de deriva 163, lanzada el 19 de julio del 2010, alrededor del giro de Campeche (9 vueltas en total). Los colores indican la rapidez horaria con la que fue advectada durante los más de tres meses que estuvo transmitiendo datos.....	6
5 Tres años de trayectorias de boyas de deriva lanzadas mensualmente en el golfo de Campeche en los puntos negros. En azul se muestran todas las trayectorias, en rojo solo aquellas que salieron del golfo de Campeche al oeste de 96W.....	7
6 Boyas de deriva Far Horizon Drifter. Anderson y Sharma, 2008.....	9

Lista de figuras (continuación)

Figura		Página
7	Máscara de tierra donde la velocidad se ha hecho nula (puntos verdes). Los puntos rojos corresponden a la posición de las boyas simuladas transcurridos 100 días tras su lanzamiento. Los puntos rojos rodeados con azul corresponden a aquellas boyas simuladas que se han acercado a 0.33° de la máscara de tierra y cuya trayectoria ha sido cortada.....	14
8	Mapa de dispersión superficial. Las imágenes corresponden a la posición de los trazadores desde el día 10 hasta el 100 tras su lanzamiento. En color negro se presentan las posiciones de las boyas reales, en rojo la de las boyas simuladas.....	17
9	Gráfica Conectividad Promedio. Imagen A: boyas de deriva; imagen B: boyas simuladas; imagen C: partículas del experimento “conectividad mensual”. Línea azul: región de Campeche; línea verde: Región Oeste; línea roja: región Centro; línea azul celeste: región Este; línea magenta: región Noroeste; línea amarilla: región Noreste. Imagen D: porcentaje de trazadores activos en función del tiempo transcurrido. Línea roja: boyas reales; línea negra: boyas simuladas; línea azul: partículas del experimento “conectividad mensual”.....	18
10	Funciones de distribución de probabilidades acumulativa en base a la distancia de separación entre boyas reales y simuladas. Imagen A: tiempo transcurrido desde el lanzamiento hasta el primer día en horas. Imagen B: tiempo transcurrido desde el día uno hasta el final del experimento en días. Imagen C: Cantidad de pares de trazadores en función del tiempo transcurrido tras el lanzamiento de los pares; la pérdida de pares ocurre como consecuencia de series de tiempo truncadas en el caso de las boyas reales o en el caso de “llegada a tierra” en el caso de las boyas simuladas.....	24
11	Separación típica entre pares de trazadores. Imagen A: tiempo transcurrido: primeras 24 horas tras el lanzamiento de los pares. Imagen B: tiempo transcurrido: desde el día 1 hasta el día 100.....	25

Lista de figuras (continuación)

Figura		Página
12	Funciones de distribución acumulada a día 10. Línea roja: boyas de deriva; línea negra: boyas simuladas; línea azul: partículas del experimento “conectividad mensual”; línea verde: 50% de trazadores.....	26
13	Funciones de distribución acumulada a día 60. Línea roja: boyas de deriva; línea negra: boyas simuladas; línea azul: partículas del experimento “conectividad mensual”; línea verde: 50% de trazadores.....	27
14	Funciones de distribución acumulada a día 100. Línea roja: boyas de deriva; línea negra: boyas simuladas; línea azul: partículas del experimento “conectividad mensual”; línea verde: 50% de trazadores.....	27
15	Dispersión absoluta meridional (primera imagen) y latitudinal (segunda imagen), para las boyas reales (línea azul), boyas simuladas (línea verde) y partículas del experimento “conectividad mensual” (línea roja). Se muestra también la dispersión modelada por Taylor, 1921 cuando t tiende a 0 (línea cian segmentada) y cuando t tiende a infinito (línea cian continua).....	30
16	Porcentaje mensual de partículas en la región de Campeche transcurridos 10 días (línea azul), 50 días (línea verde) y 100 días (línea roja) desde su lanzamiento.....	33
17	Mapa de dispersión correspondiente al mes de diciembre del 2012 para cada zona de lanzamiento. La posición inicial de las partículas en color azul, sus posiciones finales en rojo y sus trayectorias a lo largo de los 100 días en negro. Imagen A: partículas liberadas en la zona de lanzamiento A; imagen B: partículas liberadas en la zona de lanzamiento B; imagen C: partículas liberadas en la zona de lanzamiento C; imagen D: partículas liberadas en la zona de lanzamiento D; imagen E: partículas liberadas en la zona de lanzamiento E; imagen F: campo promedio de altimetría para el mes de diciembre del 2012 con las trayectorias de las boyas de deriva presentes en esa fecha, donde destaca la presencia de los remolinos anticiclónicos Jumbo e Ícarus.....	35

Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
18	Mapa de dispersión correspondiente al mes de septiembre del 2011 para cada zona de lanzamiento. La posición inicial de las partículas en color azul, sus posiciones finales en rojo y sus trayectorias a lo largo de los 100 días en negro. Imagen A: partículas liberadas en la zona de lanzamiento A; imagen B: partículas liberadas en la zona de lanzamiento B; imagen C: partículas liberadas en la zona de lanzamiento C; imagen D: partículas liberadas en la zona de lanzamiento D; imagen E: partículas liberadas en la zona de lanzamiento E; imagen F: campo promedio de altimetría para el mes de septiembre del 2011 con las trayectorias de las boyas de deriva presentes en esa fecha, donde destaca la presencia de los remolinos anticiclónicos Hadal y Franklin.....
	36
19	Mapa de dispersión correspondiente al mes de febrero del 2013 para cada zona de lanzamiento. La posición inicial de las partículas en color azul, sus posiciones finales en rojo y sus trayectorias a lo largo de los 100 días en negro. Imagen A: partículas liberadas en la zona de lanzamiento A; imagen B: partículas liberadas en la zona de lanzamiento B; imagen C: partículas liberadas en la zona de lanzamiento C; imagen D: partículas liberadas en la zona de lanzamiento D; imagen E: partículas liberadas en la zona de lanzamiento E; imagen F: campo promedio de altimetría para el mes de febrero del 2013 con las trayectorias de las boyas de deriva presentes en esa fecha, donde destaca la presencia de los remolinos anticiclónicos Jumbo e Ícarus.....
	37
20	Mapa de dispersión correspondiente al mes de octubre del 2009 para cada zona de lanzamiento. La posición inicial de las partículas en color azul, sus posiciones finales en rojo y sus trayectorias a lo largo de los 100 días en negro. Imagen inferior derecha: campo promedio de altimetría para el mes de octubre del 2009 con las trayectorias de las boyas de deriva presentes en esa fecha, donde destaca la presencia de los remolinos anticiclónicos Ekman, Darwin y Cameron, así como el ciclónico C9.....
	38

Lista de figuras (continuación)

Figura		Página
21	Gráfica Conectividad. Experimento “conectividad mensual”. Imagen A: resultados excluyendo los meses de máxima retención (aquellos con más del 80% de partículas en la región de Campeche a los 100 días). Imagen B: resultados utilizando los meses con retención entre el 80 y 50 % a día 100. Imagen C: resultados utilizando únicamente los meses de mínima retención (aquellos con menos del 50% de partículas en la región de Campeche a los 100 días). Línea azul: región de Campeche; línea verde: Región Oeste; línea roja: región Centro; línea azul celeste: región Este; línea magenta: región Noroeste; línea amarilla: región Noreste. Imagen D: porcentaje de trazadores activos para los meses de máxima retención (línea roja), retención intermedia (línea azul) y mínima retención (línea verde).....	39
22	Mapa de dispersión del mes de octubre del 2009 (zona de lanzamiento C). La posición inicial de las partículas en color azul, sus posiciones finales en rojo y sus trayectorias a lo largo de los 100 días en negro. Imagen derecha: campo promedio de altimetría para el mes de octubre del 2009 con las trayectorias de las boyas de deriva presentes en esa fecha.....	40
23	Gráficas de conectividad. Las imágenes de la primera columna (A, C, E y G) corresponden a las boyas reales. Las imágenes de la segunda columna (B, D, F y H) corresponden a las boyas simuladas. Las líneas continuas de las imágenes A, B, C, D, E y F corresponden a los porcentajes por región (azul, Campeche; verde, Oeste; rojo, Centro; cian, Este; magenta, Noroeste; amarillo, Noreste) para los meses de retención mínima (A, B), meses de retención intermedia (C, D) y meses de máxima retención (E, F), respectivamente. Las líneas discontinuas hacen referencia al total de los datos para cada región, tal y como se muestra en las Figuras 9A y 9B. Las imágenes G y H representan la cantidad de trazadores en función del tiempo transcurrido tras su lanzamiento, existentes en cada clasificación mensual.....	41

Lista de figuras (continuación)

Figura		Página
24	Compuesto de altimetría y velocidades geostróficas para el periodo de septiembre del 2007 a abril del 2013. Primera imagen: los vectores negros corresponden al campo geostrófico; las líneas discontinuas azules corresponden a giros anticiclónicos; las líneas continuas rojas corresponden a giros ciclónicos. Segunda imagen: desviación estándar (cm) de los datos de altimetría.....	43
25	Compuesto de altimetría y velocidades geostróficas para los meses de retención mayor al 80% de partículas a los 100 días. Primera imagen: los vectores negros corresponden al campo geostrófico; las líneas discontinuas azules corresponden a giros anticiclónicos; las líneas continuas rojas corresponden a giros ciclónicos. Segunda imagen: desviación estándar (cm) de los datos de altimetría.....	44
26	Compuesto de altimetría y velocidades geostróficas para los meses de retención menor al 50% de partículas a los 100 días. Primera imagen: los vectores negros corresponden al campo geostrófico; las líneas discontinuas azules corresponden a giros anticiclónicos; las líneas continuas rojas corresponden a giros ciclónicos. Segunda imagen: desviación estándar (cm) de los datos de altimetría.....	45
27	Compuesto de altimetría y velocidades geostróficas para los meses de retención mayor al 50% y menor al 80% de partículas a los 100 días. Primera imagen: los vectores negros corresponden al campo geostrófico; las líneas discontinuas azules corresponden a giros anticiclónicos; las líneas continuas rojas corresponden a giros ciclónicos. Segunda imagen: desviación estándar (cm) de los datos de altimetría.....	45
28	Histograma de frecuencias para el tiempo de residencia de los trazadores en la región de Campeche. Rojo, boyas reales; negro, boyas simuladas; azul, partículas del experimento “conectividad mensual”.....	47
29	Histograma de frecuencias para el tiempo tránsito al norte. Rojo, boyas reales; negro, boyas simuladas; azul, partículas del experimento “conectividad mensual”.....	49

Capítulo 1. Introducción

El estudio que se plantea en esta tesis de maestría pretende analizar la conectividad existente entre el golfo de Campeche y diferentes regiones dentro de las aguas profundas del golfo de México a partir de datos observacionales procedentes de boyas de deriva liberadas en la región sur del golfo y trayectorias lagrangianas generadas a partir de lecturas satelitales del nivel superficial del mar.

En este trabajo, la conectividad se refiere al flujo de trazadores entre diferentes áreas o regiones del océano debido a la hidrodinámica (advección y difusión). Este tipo de estudios son comúnmente usados para calcular tiempos de tránsito y de residencia de trazadores y sus porcentajes de retención o, así como trayectorias preferenciales. Este tipo de información es de gran importancia dentro del ámbito ecológico, ya que influye sobre la estructura poblacional y nivel de conectividad de especies marinas que se caracterizan por una etapa dispersiva durante su ciclo de vida, y sobre su susceptibilidad a disturbios de origen natural o antropogénico (Rooker et al., 2013; Cowen et al., 2009). Por ejemplo, Marinone et al. (2012) utilizan esta metodología para calcular las trayectorias de transporte más probables para huevos y etapas larvales de diferentes especies de importancia para las pesquerías del golfo de California. Mitarai et al. (2009) analizan el riesgo de contaminación existente al utilizar productos químicos destinados al mantenimiento de pesquerías situadas al sur del estado de California, Estados Unidos. Por otro lado, Cowen et al. (2002) utilizaron un análisis de conectividad para establecer el tiempo de residencia y tránsito de larvas de peces de arrecife de coral en regiones del Caribe y la corriente del Lazo, y concluyeron que los procesos de retención eran importantes para el mantenimiento local de las poblaciones.

Una de las estrategias que más han aportado a los estudios de conectividad es la implementación de modelos numéricos para generar trazadores lagrangianos en condiciones dinámicas y regiones específicas (Marinone et al., 2004 y 2012; Paris et al., 2002; Mitarai et al., 2009, entre otros). Este método permite obtener una base de datos tan grande como se ocupe, obteniendo una alta robustez estadística, además de poder realizar tantas repeticiones como sean necesarias, y bajo condiciones diferentes. Por otro lado, este tipo de estudios también se pueden realizar a partir de datos

lagrangianos reales, como en el caso de Manning (2009) aplicado en el golfo de Maine, Estados Unidos, pero son más escasos debido a la problemática tanto económica como de logística que dificultan su realización.

En este proyecto se estudia la conectividad en base a datos de trazadores lagrangianos reales (boyas de deriva) y, además, se implementa una metodología a partir de la cual se obtienen trazadores virtuales a partir de datos de corrientes geostróficas derivadas de altimetría satelital para ser usados para análisis de conectividad. Este último método permite usar datos eulerianos reales de una base accesible para todo el mundo y de fácil manipulación. Su validez se evaluará con los datos de los trazadores reales.

El golfo de México es considerado como una región de alto interés tanto para la pesca comercial de diversas especies como para el creciente interés de explorar y explotar hidrocarburos en aguas profundas. Esta última actividad conlleva un alto riesgo de derrames, como el que ocurrió en el norte del golfo de México durante casi tres meses durante el 2010 tras la explosión de la plataforma petrolífera Deep Water Horizon de la empresa BP. Tal y como expone Barron (2012), es el vertido más grande jamás registrado en la historia de los Estados Unidos y el segundo de toda la historia. Los estudios de conectividad se han utilizado para evaluar la susceptibilidad de poblaciones específicas a derrames, como el atún rojo (Muhling et al., 2012)

El estudio de la conectividad en esta región es fundamental para conocer, por ejemplo, la transferencia de contaminantes, nutrientes o larvas de organismos que están sujetos al transporte por el movimiento del fluido, así como los tiempos de residencia y tránsito, que podrán ser aplicados a diferentes trazadores como primera aproximación.

Actualmente no se han realizado estudios de conectividad en aguas profundas del golfo de México. Además son pocos los estudios que utilizan datos lagrangianos reales para calcularla. Cabe destacar que se han realizado diversos estudios de conectividad poblacional en aguas someras del golfo de México utilizando modelos numéricos (p. ej. Butler et al., 2011; Johnson et al., 2013; Sanvicente-Añorve et al., 2014). Por ello, en este proyecto se plantea una metodología que combina datos reales, tanto lagrangianos

como eulerianos, para evaluar el nivel de conectividad existente entre la zona sur del golfo de México, específicamente el golfo de Campeche, con el resto del golfo.

1.1 Zona de estudio

El golfo de México está ubicado al este de México y al sureste de Estados Unidos, entre los 18 y 31 grados de latitud norte y los 81 y 98 grados de longitud oeste (Figura 1).

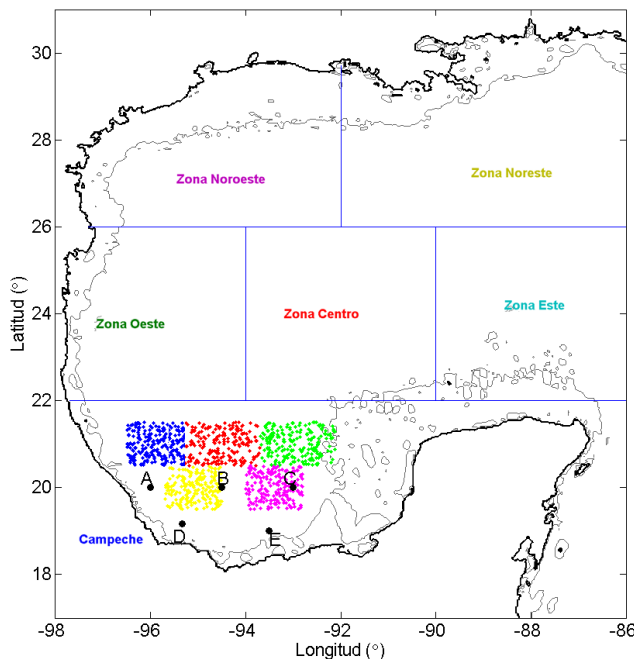


Figura 1: Golfo de México. Se presenta la isóbata de 50 metros de profundidad en color gris. El golfo de Campeche se ubica al sur de 22° de latitud norte y entre 90° y 98° de longitud oeste. El golfo de México está dividido en regiones: Campeche, zona Oeste, zona Centro, zona Este, zona Noroeste, zona Noreste. Los puntos negros (A, B, C, D, E), corresponden a los puntos de lanzamiento de las boyas reales y simuladas. Las nubes de puntos coloreados corresponden a las zonas de lanzamiento de las partículas del experimento “conectividad mensual” (azul, zona A; rojo, zona B; verde, zona C; amarillo, zona D; magenta, zona E).

La dinámica en el golfo se caracteriza por la corriente del Lazo procedente del mar de Caribe, con campo de remolinos que se desprenden de esta (p.ej. Schmitz (2005), ver Figura 2), y por un giro ciclónico semi-permanente ubicado en el golfo de Campeche (p.ej. Sandoval, 2011, ver Figura 3).

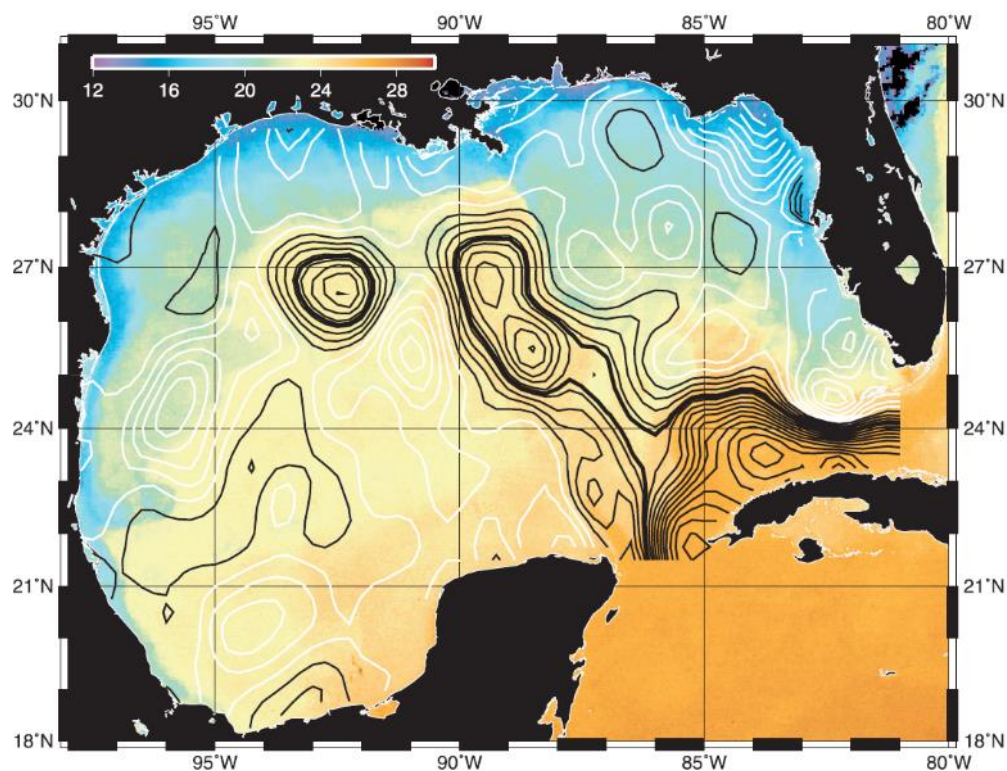


Figura 2: Contornos de la altura de la superficie del mar (las líneas blancas corresponden a elevaciones negativas, las negras a positivas) procedentes del mapa de altimetría del 13 de marzo de 2002, superpuesto sobre la temperatura superficial del mar. Se observa la corriente del Lazo y un remolino anticiclónico recién desprendido. Está presente también el giro ciclónico de Campeche al sur de 21° de latitud norte. Leben, 2005.

Según Vázquez de la Cerda et al. (2005) este giro ciclónico es debido a que el rotor del viento es positivo en esta zona. El centro del giro está localizado al oeste de los 94°W el 90% del tiempo y presenta corrientes mucho más débiles en la región oriental del golfo de Campeche que en la occidental (Figura 3; Sandoval, 2011). Esta asimetría en su posición parece deberse por la influencia de la topografía (Sandoval, 2011; Pérez-Brunius et al., 2013).

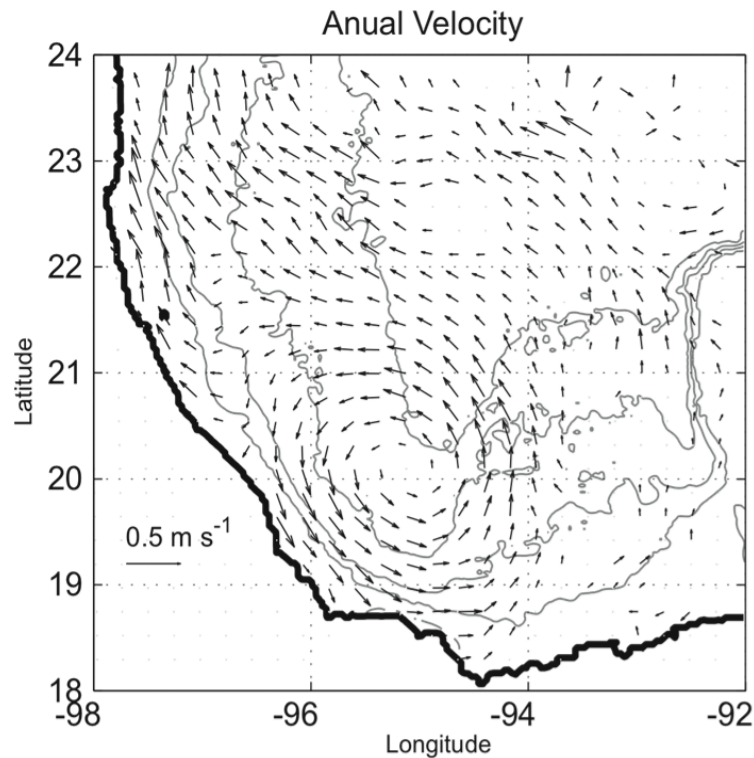


Figura 3: Campo de velocidades promedio de 3 años de datos de boyas de deriva en la región, donde se aprecia el giro ciclónico de Campeche. Sandoval, 2011.

Flores-Coto, C. et al. (2014) en su trabajo sobre estructura y patrones espaciales de asociaciones larvales en el sur del golfo de México, concluyen que giro ciclónico de Campeche fue un área retentiva (con baja conectividad) y provocó el aislamiento de las asociaciones larvales ahí presentes. Sabatés y Olivar (1996) reportaron que el choque de dos giros bien definidos (sin deformaciones durante su interacción) y el choque entre una corriente y un giro, generan frentes que funcionan de barreras que restringen el movimiento de los organismos de un área a otra. Esta capacidad de retención del giro de Campeche pudo verse reflejada en las trayectorias de algunas boyas de deriva que han mostrado que pueden permanecer girando alrededor del giro de Campeche durante meses. Un ejemplo se muestra en la Figura 4, donde se muestra la trayectoria de una boya de deriva que dio 9 vueltas al giro.

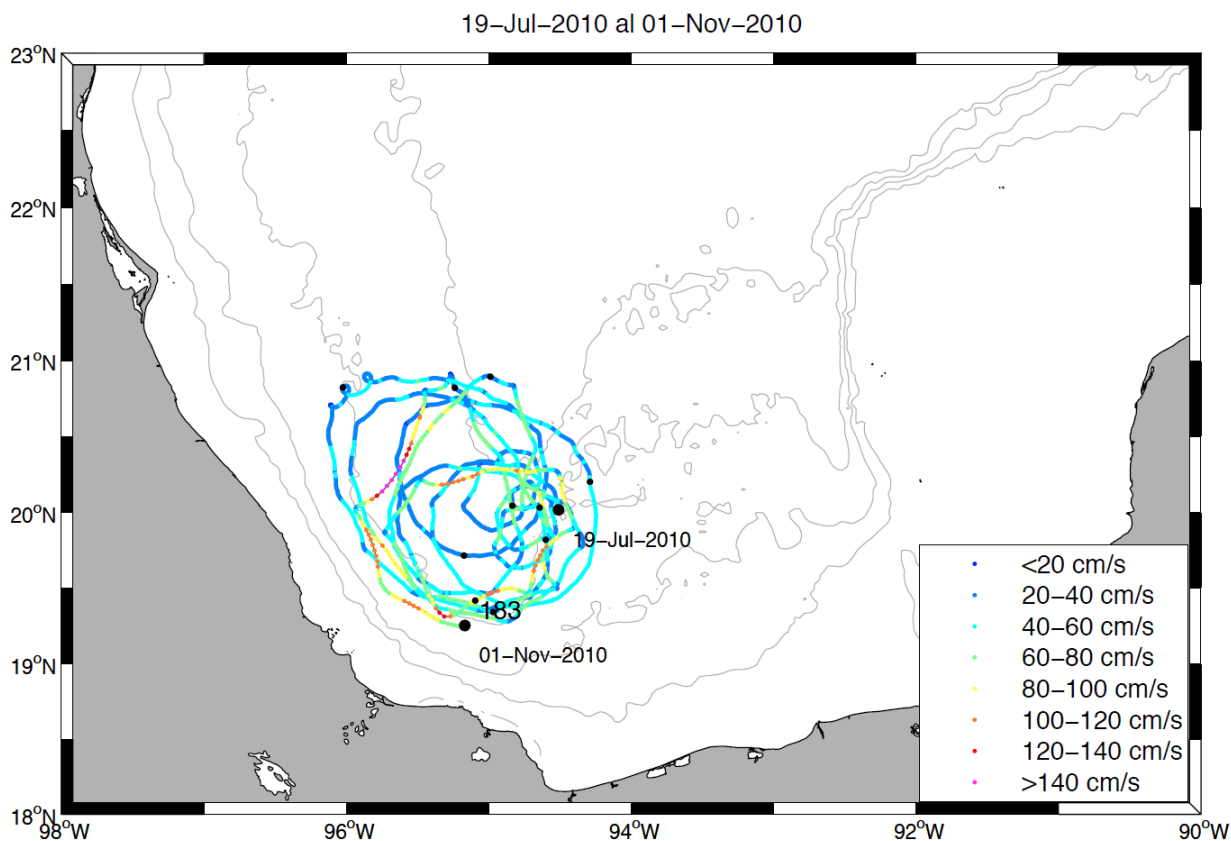


Figura 4: Trayectoria de la boya de deriva 163, lanzada el 19 de julio del 2010, alrededor del giro de Campeche (9 vueltas en total). Los colores indican la rapidez horaria con la que fue adveccionada durante los más de tres meses que estuvo transmitiendo datos.

Ocasionalmente, los remolinos anticiclónicos desprendidos de la Corriente del Lazo, así como los generados localmente en el noroeste del golfo, llegan a interactuar con el remolino ciclónico del golfo de Campeche. La interacción de los dos remolinos puede resultar en pérdida de agua del giro ciclónico por el margen oeste del golfo de México. (Pérez-Brunius et al, 2013). Esta salida de agua fue representada por las trayectorias de las boyas de deriva en un análisis preliminar: el 64% de 303 boyas a la deriva que salen del golfo de Campeche lo hacen por el margen oeste de la cuenca (Figura 5).

Todos los estudios previos sugieren que el giro de Campeche tiene capacidad de retención (no cuantificada) y que su interacción con otras estructuras de mesoescala puede tener implicaciones para la conectividad entre las aguas del giro y el resto del golfo.

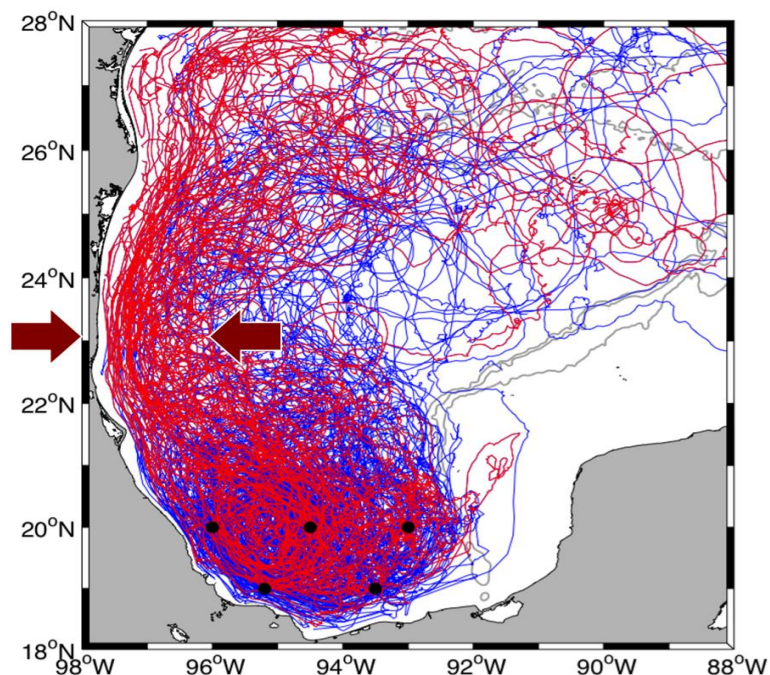


Figura 5: Tres años de trayectorias de boyas de deriva lanzadas mensualmente en el golfo de Campeche en los puntos negros. En azul se muestran todas las trayectorias, y en rojo, solo aquellas que salieron del golfo de Campeche al oeste de 96W.

El giro ciclónico de Campeche es considerado semi-permanente. Existe la hipótesis de que su intensidad varía estacionalmente en función del rotor del viento (Vázquez de la Cerda et al., 2005), aunque estudios posteriores indican que hay otros procesos que también influyen sobre su intensidad y posición. Unos de los procesos que introducen mayor variabilidad es la ya mencionada interacción del giro de Campeche con remolinos anticiclónicos procedentes del norte del golfo de México, provocando el desplazamiento y deformación del giro de Campeche. (Pérez-Brunius et al., 2013; Cordero, 2015).

1.2 Objetivo e hipótesis

El objetivo principal de este trabajo es estimar el nivel de conectividad entre el golfo de Campeche con otras regiones del golfo de México a diferentes intervalos temporales por medio del análisis de las trayectorias de boyas de deriva y trazadores sintéticos. Se estimó el tiempo de residencia de la capa superficial de agua en el golfo de Campeche y se estimó el tiempo que tardan los trazadores en llegar a diferentes regiones del golfo de México. Además, se obtendrán trayectorias sintéticas a partir de datos de altimetría

para evaluar el nivel de conectividad entre regiones del golfo de México, evaluando su validez por medio de la comparación directa con los resultados de las boyas de deriva.

La hipótesis que se plantea es que, atendiendo a las características dinámicas y estudios previos sobre la zona, la región del golfo de Campeche, donde se ubica el giro ciclónico presentará alta capacidad de retención y la región Oeste será la principal zona de salida de los trazadores.

El proyecto podrá ser la base para futuros estudios de conectividad relacionados con partículas pasivas o no pasivas, proporcionará más información sobre la dinámica superficial del golfo, y permitirá demostrar que tan válido es utilizar los datos de altimetría para conocer la dispersión lagrangiana en la capa superficial del golfo. Además, podría servir también de base para poder evaluar resultados de estudios numéricos de conectividad en la región.

Capítulo 2. Datos y Metodología

2.1 Boyas

Los datos que se usarán para este proyecto son procedentes de las boyas de deriva superficiales “Far Horizon Drifters” que se han lanzado en el golfo de Campeche desde 2007, como parte del proyecto “Medición y análisis metoceanico del golfo de México” financiado por PEMEX . Las boyas fueron lanzadas cerca de cinco puntos en el golfo de Campeche desde marzo del 2007 hasta la actualidad (cinco boyas por mes, Figura 1).

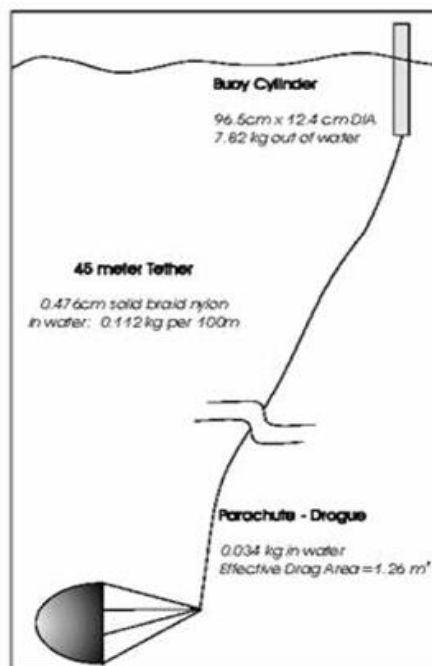


Figura 6: Boyas de deriva Far Horizon Drifter. Anderson y Sharma, 2008.

Las boyas Far Horizon Drifters (Figura 6) están diseñadas de manera que se puedan lanzar desde una pequeña avioneta. Presentan un paracaídas que permite una caída suave desde la avioneta y que, además, funciona como sistema de arrastre. El paracaídas queda sumergido a una profundidad de entre los 50 y 30 metros, con el objeto de que solamente las corrientes superficiales sean las causantes del movimiento de la balsa, y que se minimice el efecto directo del viento. Estudios previos demuestran que la velocidad de las boyas está altamente correlacionada con el campo de velocidades geostróficas para un instante dado (coeficiente de correlación: 0.7), mientras que el coeficiente de correlación con el viento es de 0.19 (Pérez-Brunius et al,

2013). Este diseño simplifica considerablemente los costos y logística de sus lanzamientos, y permite que estos sean realizados mensualmente. Toda la electrónica está contenida en un cilindro que queda en la superficie del mar que incluye un sistema de GPS que envía datos horarios a través del sistema de satélites Argos, el cual tiene una muy buena cobertura para el golfo de México.

Los datos tuvieron que pasar por criterios de calidad para ser considerados dentro éste análisis. Se excluyeron los datos con las siguientes características:

- las coordenadas indicaban un punto sobre superficie terrestre, lo cual puede indicar que la boya fue sustraída del mar y los datos no sería válidos;
- la rapidez fue mayor a 3m/s, que es una magnitud que no es observable en corrientes oceánicas, pudiendo sugerir que la boya ha sido llevada por una embarcación y los datos no serían válidos;
- los datos indicaron un pico de rapidez comparado con las registradas justo antes o después, pudiendo ser provocado por un error en la transmisión o recepción de los datos entre la boya y el satélite, por lo que los datos no serían válidos.

2.3 Regionalización del área de estudio

Debido a que la conectividad representa el grado de conexión existente entre diferentes zonas, es necesario dividir la zona de estudio en regiones. Esta división se puede realizar en función de diferentes criterios, como pueden ser: características dinámicas (Marinone, 2012), características ecológicas (Thorrold et al., 2007), de manera arbitraria (Manning et al., 2009), entre otras.

El golfo de México fue dividido en 6 regiones: golfo de Campeche, golfo de México occidental, golfo de México central, golfo de México oriental, golfo de México Noroeste y golfo de México Noreste (Figura 1). La clasificación se hizo atendiendo a características dinámicas: el golfo de Campeche contiene un giro ciclónico semi-permanente, el golfo occidental es la zona por la que se ha observado la salida de agua del golfo de

Campeche provocada por la interacción de los giros anticiclónicos provenientes del norte del golfo de México con el giro de Campeche, la zona oriental del golfo se encuentra bajo la influencia de la corriente del Lazo y la zona central del golfo presenta una gran variabilidad asociada a la liberación y paso de los remolinos que se desprenden de la corriente del Lazo. También se buscó que el área superficial cubierta por cada zona (entre los límites de cada zona y la isóbata de 50 metros) fuese aproximadamente igual para cada región y de un tamaño lo suficientemente grande como para obtener robustez estadística, dado que el número de datos obtenidos de las boyas de deriva es limitado.

2.4 Experimentos

Se han realizado tres experimentos con la intención de resolver los objetivos del proyecto denominados “boyas reales”, “boyas simuladas” y “conectividad mensual”. Con los tres experimentos se generaron bases de datos con las para analizar el nivel de conectividad. En el experimento “boyas reales” se han utilizados las trayectorias de las boyas de deriva como base de datos, en el experimento “boyas simuladas” se han utilizado datos de altimetría para generar trayectorias sintéticas de partículas, liberadas en la misma ubicación espacial y temporal que las boyas reales (una partícula por cada boya real), para la generación de la base de datos. En el experimento “conectividad mensual” se han utilizado datos de altimetría para generar trayectorias sintéticas de 68000 partículas, liberadas dentro del golfo de Campeche, para generar una base de datos mucho más grande con la que se obtuvo mayor robustez estadística. Se usó la información generada por las boyas reales para la validación de los resultados obtenidos por las partículas de los experimentos “boyas simuladas” y “conectividad mensual”

2.4.1 Experimento “boyas reales”

En este experimento se utilizan los datos posicionales de 405 boyas reales de PEMEX para realizar un conteo por región en función del tiempo, a partir del cual se infiere la conectividad superficial “real” del golfo de Campeche con el resto del golfo de México. El experimento consiste en monitorear la posición de todas las boyas reales

conjuntamente desde el momento de su lanzamiento hasta 100 días después. Este límite de 100 días está relacionado con el tiempo que transcurre desde que la boya es lanzada hasta que deja de emitir datos al satélite, llega a tierra, o es recogida por una embarcación. Este tiempo, que se denominó “Tiempo de vida”, es diferente para cada boya, variando entre 1 y más de 100 días, con un promedio de 86 días, provocando que los resultados no sean estadísticamente confiables si el experimento se alarga por más de 100 días. A pesar de que cada boya fue lanzada en fechas diferentes y por ende estuvieron sujetas a condiciones dinámicas particulares, el análisis se llevó a cabo considerando que fueron lanzadas en el mismo instante, por lo que los resultados obtenidos en términos de conectividad reflejan la variabilidad total de las condiciones comprendidas entre septiembre de 2007 y enero de 2014.

Se han analizado las trayectorias de las boyas lanzadas en los cinco puntos de lanzamiento de dos maneras diferentes: (1) considerando todos los puntos de lanzamiento conjuntamente para generar estadísticas del nivel de conectividad entre regiones con un tamaño muestral máximo, y (2) analizando las trayectorias de cada punto de lanzamiento por separado, lo cual provee un mayor nivel de resolución espacial en y permite el análisis de los patrones de conectividad en función del lugar en el cual fueron lanzadas las boyas reales.

Los resultados obtenidos llevan consigo la incertidumbre asociada al número limitado de boyas y a las condiciones dinámicas que cada boya experimentó debido a que fueron lanzadas en fechas distintas.

2.4.2 Experimento “boyas simuladas”

Con la intención de evaluar si se puede obtener información de la dispersión superficial y conectividad a partir de datos de altimetría, se realizó otro experimento en el que se simulan las trayectorias de las boyas reales mediante la integración del campo geostrófico correspondiente a la fecha de lanzamiento de cada una de las boyas reales.

El nivel del mar absoluto se obtuvo de la base de datos MADT (Maps of Absolute Dynamic Topography) de AVISO que incluye la topografía dinámica promedio (1993-

1999) en una malla de cobertura global con resolución de 0.33° . El intervalo de tiempo entre cada campo disponible es de 7 días. Los productos de altimetría fueron producidos y distribuidos por Aviso (<http://www.aviso.altimetry.fr/>), como parte de Salto Ground Processing Segment.

Debido a que los datos de AVISO usados en este trabajo abarcaron hasta el mes de agosto de 2013, se obtuvieron trayectorias sintéticas para 354 (número de boyas reales lanzadas hasta agosto de 2013) realizando una integración Runge-Kutta de orden 4 del campo velocidad euleriano, empleando un intervalo de integración de 3 horas por un periodo de 100 días. Se implementó una máscara de tierra que sigue la isóbata de 50 metros para evitar incurrir en los errores asociados a datos satelitales en zonas cercanas a la costa, provocados por el eco en la señal que se genera durante el cambio de medio terrestre a acuático en la trayectoria del satélite (Figura 7). A los puntos de malla correspondientes a la máscara de tierra se les asigna un valor de velocidad cero por motivos computacionales, generando una capa límite artificial con velocidades bajas en los puntos de malla cercanos a la costa. La trayectoria de las partículas se corta bajo el criterio de que “han llegado a tierra”, es decir, cuando la partícula se ubica a una distancia menor a 0.33° (resolución espacial de la malla de AVISO) de la máscara de tierra.

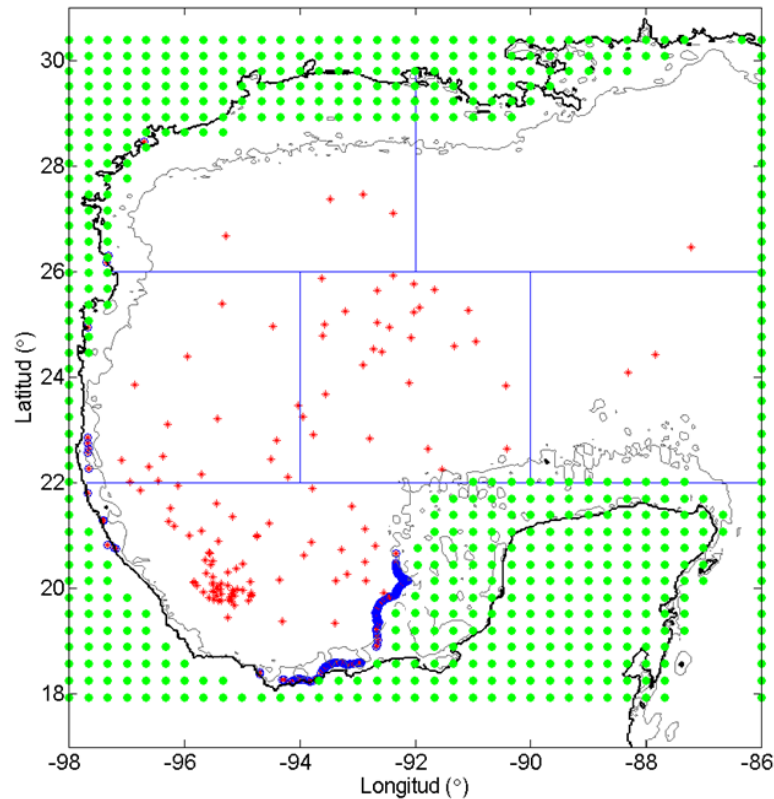


Figura 7: Los puntos verdes representan la máscara de tierra donde la velocidad derivada de altimetría se ha hecho nula, y sigue la isóbata de los 50m. Los puntos rojos corresponden a la posición de las boyas simuladas transcurridos 100 días tras su lanzamiento. Los puntos rojos rodeados con azul corresponden a aquellas boyas simuladas que se han acercado a 0.33° de la máscara de tierra y cuya trayectoria fue cortada.

De manera análoga al experimento “boyas reales”, y debido a que las trayectorias de las partículas se cortan en el momento en “han llegado a tierra”, ha de tenerse en cuenta el “Tiempo de vida” de las boyas simuladas. Este tiempo se define como el tiempo durante el cual la boya simulada es advectada por las corrientes geostróficas antes de llegar a la capa límite artificial (Figura 7).

2.4.3 Experimento “conectividad mensual”

Con el objetivo de mejorar la robustez estadística, en comparación con los dos experimentos anteriores, para evaluar el nivel de la conectividad superficial del golfo de Campeche con las demás regiones de estudio, se obtuvieron las trayectorias de 1000 partículas lanzadas cada mes durante 68 meses comprendidos entre septiembre de 2007 y abril de 2013 (68000 partículas en total). Al igual que en el experimento “boyas simuladas”, se usó un intervalo de integración de 3 horas durante 100 días y se usó el

mismo método de corte de trayectorias. La liberación se realizó de manera aleatoria en un área rectangular de 1 por 1.5 grados, cuyo centro de masa está ubicado medio grado de latitud más al norte que los puntos de lanzamiento de los experimentos “boyas reales” y “boyas simuladas” (Figura 1).

Dado el gran número de trazadores, este experimento permite generar estadísticas mensuales y por zonas de lanzamiento.

2.4.4 Resultados a generar por los experimentos

Los resultados que estos tres experimentos proporcionan son:

- Porcentaje de trazadores (boyas reales, boyas simuladas y/o partículas), en función del tiempo transcurrido desde su lanzamiento en cada una de las regiones consideradas del golfo de México.
- Funciones de distribución acumulada (FDAs) de las distancias calculadas con base en la trayectoria entre el punto de lanzamiento del trazador y su posición en un instante dado. Estas se calculan a partir de los histogramas empleando intervalos de 25 km.
- Dispersión absoluta (en km^2), definida como la varianza de los desplazamientos individuales del trazador relativos a su posición inicial, en las que el desplazamiento es la distancia lineal (vectorial) desde el punto de origen del trazador hasta su posición en un tiempo dado (LaCasce, 2008).
- Tiempo de residencia de los trazadores en la región de Campeche, entendido como el tiempo en que un trazador estuvo moviéndose libremente en la región de Campeche. El tiempo de residencia máximo considerado es de 100 días, correspondiente con la duración de los experimentos.
- Tiempo de tránsito al norte del golfo, entendido como el tiempo que un trazador tarde en cruzar el límite que separa la ZEE mexicana de la estadounidense (26° de latitud norte).

Capítulo 3. Resultados y discusión

3.1 Mapas de dispersión y conectividad

En los diferentes estudios de conectividad existentes, es posible representar la información tanto cuantitativamente (Thorrold et al., 2007) como cuantitativamente (Manning et al., 2009). Los mapas de dispersión son una herramienta de utilidad para ver cómo es, a nivel cualitativo, el patrón de advección de toda la nube de trazadores en función del tiempo transcurrido tras su liberación. De esta forma se pueden apreciar zonas de retención y/o zonas de tránsito, aunque sin poder cuantificar dicha retención o conectividad, así como el tiempo en que los trazadores tardan en alcanzar diferentes regiones en el océano. Por otro lado, realizando un conteo de trazadores por región y obteniendo los porcentajes correspondientes en función del tiempo transcurrido desde su lanzamiento, sí es posible estimar cuantitativamente la conectividad y la retención desde la región de liberación de los trazadores.

En la Figura 8 se muestran mapas de dispersión en el que se ubican las posiciones de las boyas reales (asteriscos color NEGRO) y de las partículas que las simulan (asteriscos color ROJO) cada 10 días después de su lanzamiento. No se graficaron las posiciones de las partículas del experimento “conectividad mensual” debido que el gran número de partículas existentes impidió observar algún patrón en la advección de los trazadores. Estos mapas de dispersión, a nivel cualitativo, indican que a medida que transcurre el tiempo, hay más boyas simuladas que reales en la región de Campeche, hay una mayor distancia entre el punto de origen y las boyas reales que en el caso de las simuladas (sobre todo poco después del lanzamiento), se observa una mayor presencia de boyas reales en la región oeste, y las boyas simuladas están distribuidas de manera más uniforme a lo largo del golfo.

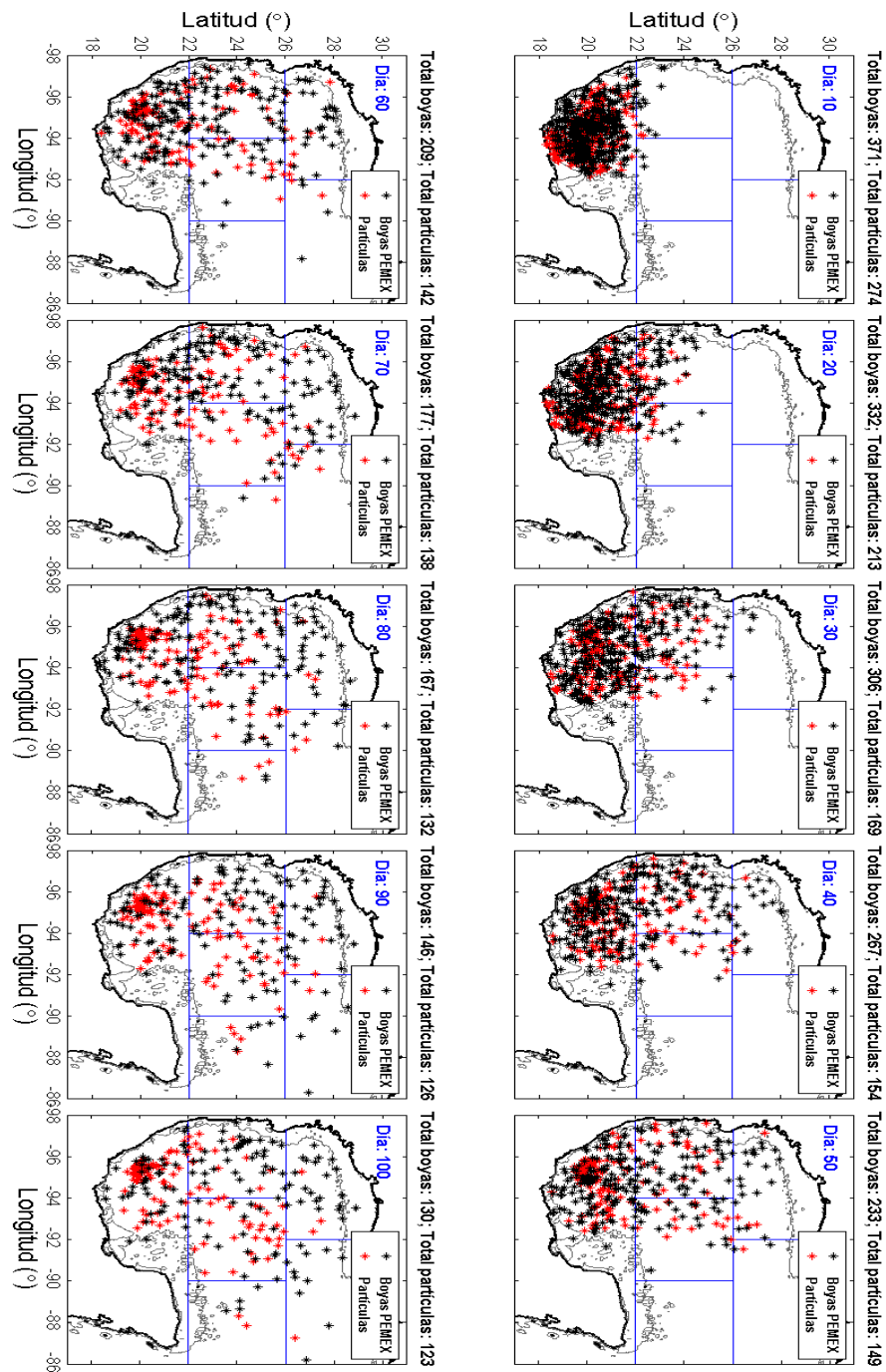


Figura 8: Mapa de dispersión superficial. Las imágenes corresponden a la posición de los trazadores desde el día 10 hasta el 100 tras su lanzamiento. En color negro se presentan las posiciones de las boyas reales, en rojo la de las boyas simuladas.

Para cuantificar los resultados de la Figura 7, y así poder evaluar la conectividad superficial del golfo de Campeche con el resto del golfo de México, se han generado gráficas que muestran el porcentaje de trazadores en cada una de las regiones de estudio a través del tiempo (Figura 9A, 9B y 9C). Esto es, cada diez días se cuenta el número de trazadores presentes en cada región, y se divide entre el número de trazadores activos en ese momento. Hay que resaltar que la información mostrada mediante porcentajes representa a todo el periodo de septiembre del 2007 a abril del 2013 para los trazadores sintéticos (boyas simuladas y partículas) y de septiembre del 2007 a enero el 2014 para las boyas reales.

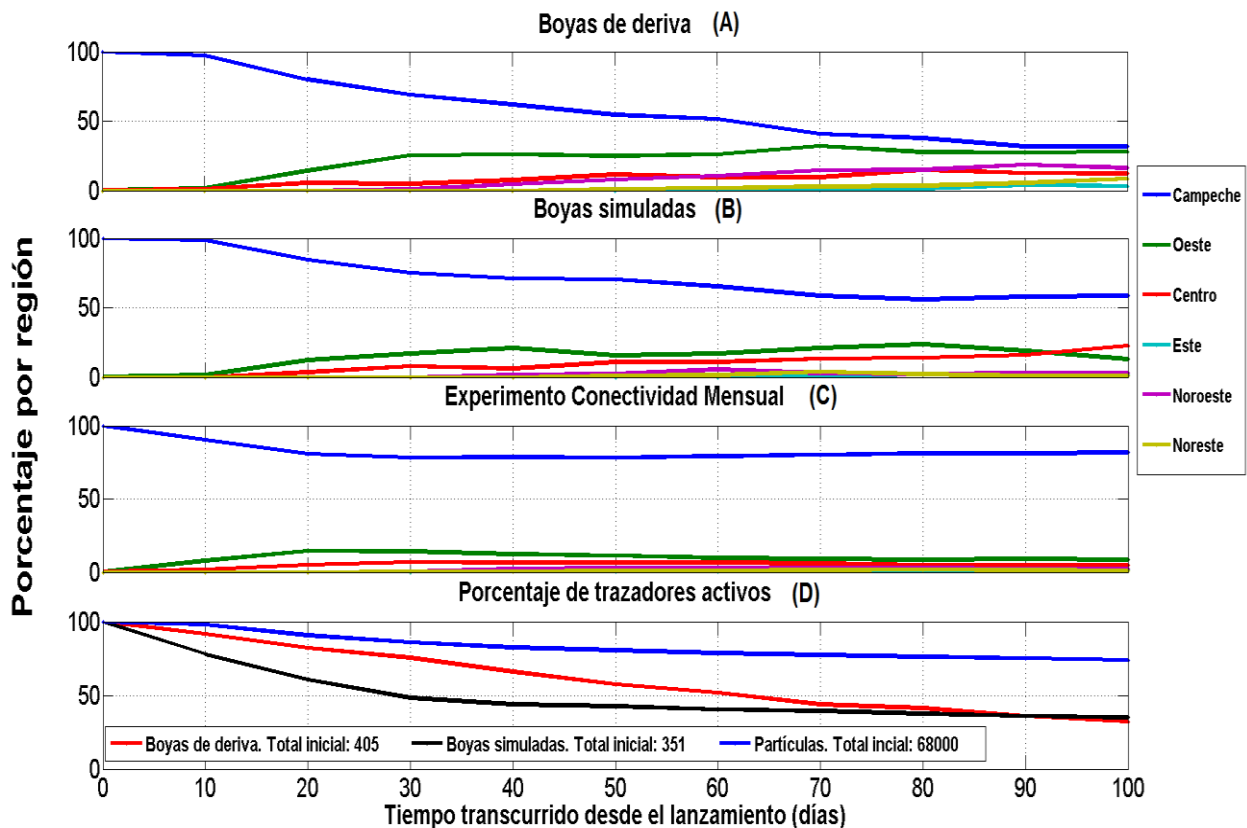


Figura 9: Gráfica Conectividad Promedio. Imagen A: boyas de deriva; imagen B: boyas simuladas; imagen C: partículas del experimento “conectividad mensual”. Línea azul: región de Campeche; línea verde: Región Oeste; línea roja: región Centro; línea azul celeste: región Este; línea magenta: región Noroeste; línea amarilla: región Noreste. Imagen D: porcentaje de trazadores activos en función del tiempo transcurrido. Línea roja: boyas reales; línea negra: boyas simuladas; línea azul: partículas del experimento “conectividad mensual”.

La variación temporal en los porcentajes es indicativo de la conectividad de la región de Campeche con el resto del golfo de México. Para las boyas reales (Figura 9A) se

observa que 10 días después de su lanzamiento, casi el 100% de las boyas aún se encontraron en la región de Campeche. A medida que transcurre el tiempo el porcentaje disminuye consistentemente hasta el final del experimento. Los porcentajes de boyas reales en las regiones centro y oeste, se incrementaron desde el día 10 hasta aproximadamente el día 30, tras lo cual los porcentajes se mantienen aproximadamente constantes (casi el 30%) hasta el final del experimento. Se detectaron boyas reales en la región noroeste tras 30 días y los porcentajes aumentan ligeramente en los siguientes intervalos de tiempo hasta los 90 días, sin superar el 20% de boyas. Casi no se observaron boyas reales en las regiones este y noreste durante todo el experimento (menos del 11% del total de las boyas entraron a estas regiones durante los 100 días). La evolución temporal de estos porcentajes muestra que la región de Campeche es una región de retención, ya que el porcentaje de boyas reales al final de experimento fue relativamente alta (31.5%). La advección de las boyas reales fuera de la región de Campeche se puede dar por la región oeste (desde el día 10, un máximo del 30% de boyas reales) o la región centro, (entre los 10 y 20 días tras el lanzamiento, un máximo de 20% de boyas reales), pero como se observa a simple vista en el mapa de dispersión (Figura 8), la principal salida de las boyas se produjo hacia la región oeste. Las regiones oeste, centro y en menor medida la noroeste, presentan porcentajes con tendencias que no variaron mucho en los intervalos de tiempo analizados, lo cual indica que funcionan como zonas de tránsito, es decir, exportan tantas boyas reales como las que reciben.

Los porcentajes por región de las boyas simuladas (Figura 9B) presentan un patrón muy parecido al de las boyas reales. El porcentaje de boyas simuladas en la región de Campeche disminuyó desde el día 10 y lo hace de manera continua en los intervalos de tiempo analizados, con una retención del 58.5% a los 100 días, casi el doble del observado para las boyas reales. Las regiones Oeste y Centro funcionan ambas como zonas de tránsito, y la diferencia entre sus porcentajes es menor que para el caso de las boyas reales (aproximadamente 5% de diferencia entre las regiones Oeste y Centro para las boyas simuladas, 10% de diferencia para las boyas reales). Se detectó la presencia de boyas simuladas en la región Noroeste luego de 30 días, aunque con porcentajes más bajos que para las boyas reales (3% frente a 15%). No se observan

trazadores en las regiones Noreste y Este en ninguno de los intervalos de tiempo analizados.

La diferencia más resaltable en términos de conectividad entre boyas reales y simuladas es que se produce una sobreestimación del grado de retención de la región de Campeche por parte de las boyas simuladas (58.5% de boyas simuladas frente a 31.5% de boyas reales a los 100 días). También es destacable que la distancia lineal recorrida desde el punto de lanzamiento de las boyas reales es mayor que la de las boyas simuladas para un mismo tiempo, tal y como muestra el tiempo que se tardan en observar trazadores en la región Noroeste: aproximadamente 20 días para las boyas reales frente a más de 30 para las boyas simuladas.

En la Figura 9C se muestran los porcentajes por región para las partículas del experimento “conectividad mensual”. El comportamiento de los porcentajes obtenidos a partir del conteo de todas las partículas resultó muy diferente a lo observado para el caso de las boyas simuladas. Esto es algo inesperado, ya que la advección de las partículas se realiza con los mismos datos y considerando las mismas condiciones dinámicas a la que fueron expuestos los trazadores en el experimento “boyas simuladas”; las únicas diferencias son el número de partículas liberadas y la región donde éstas se liberaron. En este caso, en la región de Campeche hay un 80% de retención de las partículas desde los 30 hasta los 100 días. La región Oeste presentó un 14.5% de partículas a los 20 días, tras lo cual hay una disminución gradual en el porcentaje de partículas en la región hasta el final del experimento (8.31% a los 100 días). Los porcentajes de partículas para la región centro presentan un comportamiento similar a los de la región Oeste, con un máximo de 7% de partículas a los 30 días y 5% a los 100 días. Se observaron partículas en la región Noroeste a partir de los 30 días. En las regiones Noreste y Este apenas se observan partículas a lo largo del experimento. La evolución de los porcentajes de las regiones de Campeche, Oeste y Centro parece indicar una falta de conectividad de la región de Campeche con el resto de las regiones del golfo desde el día 30: se puede apreciar una disminución del porcentaje de partículas en Campeche que está relacionada con la advección de partículas desde Campeche hacia las regiones Oeste y Centro hasta los 20 días, momento a partir del cual el porcentaje de partículas retenidas en Campeche no varía

con el tiempo, lo que podría indicar que las partículas dejan de salir de la región de Campeche a partir de los 20-30 días.

El análisis de los porcentajes de partículas en el experimento de “conectividad mensual” indicó diferencias muy notables en comparación con la información obtenida de las boyas reales y con las boyas simuladas. La diferencia entre el experimento “boyas Simuladas” y “conectividad mensual” llama particular atención, siendo que las únicas diferencias entre ambos experimentos son el número de trazadores lanzados (351 en el caso de las “boyas Simuladas” frente a 68000 en el caso del experimento de “conectividad mensual”) y la zona de lanzamiento (en el caso de las boyas simuladas los puntos de lanzamiento son iguales los de las boyas reales y están próximos a la costa, mientras que en el caso del experimento de “conectividad mensual” se lanzaron los trazadores de manera aleatoria en regiones de 1 por 1.5 grados cuyo centro se ubica 0.5° de latitud más al norte que los puntos de lanzamiento de las boyas reales y simuladas, Figura 1).

Como ya se mencionó con anterioridad, el número de trazadores activos desciende con el tiempo debido a su “tiempo de vida”. En la última imagen de la Figura 9D se muestra la evolución temporal de los porcentajes de trazadores activos. Para el caso de las boyas reales, la mitad de ellas permanecieron activas transcurridos 60 días, quedando activas a día 100 el 32% del total de boyas reales. La mitad de las boyas simuladas permanecieron activas hasta los 30 días, quedando activas a día 100 el 35% del total de boyas simuladas. Para el caso de las partículas, el porcentaje activo en función del tiempo es siempre superior al 73%. Los experimentos se llevaron a cabo utilizando únicamente aquellos trazadores cuyo tiempo de vida fuese mayor de 100 días para que el número de trazadores iniciales fuese igual al número de trazadores al final del experimento. Los resultados expresados en forma de porcentajes no tuvieron diferencias significativas con respecto de los obtenidos con el total de trazadores disponibles para cada tiempo analizado, por lo que el tiempo de vida no parece haber sesgado a las estadísticas.

La información obtenida a partir del análisis individual de cada zona o punto de lanzamiento para las boyas reales no se muestra, pues los porcentajes de boyas reales

en función del tiempo obtenidos para cada punto de lanzamiento fueron del mismo orden y presentaron el mismo comportamiento que los porcentajes obtenidos utilizando la totalidad de las boyas de deriva (Figura 9A), es decir, el nivel de conectividad para las boyas reales no varía significativamente en función de los puntos de lanzamiento. Sin embargo, para el caso de las boyas simuladas, el punto de lanzamiento E (Figura 1, punto negro “E”) no genera trayectorias robustas y estadísticos fiables, debido a que, durante los primeros 20 días, aproximadamente el 90% de las boyas simuladas fueron advectadas hacia la plataforma continental ubicada frente a Campeche y sobre la que se sitúa la máscara de tierra. Esto provocó que sus trayectorias se corten, quedando únicamente 3 boyas simuladas moviéndose libremente en el océano. Dado que este patrón de retención no se observa con las boyas reales, es probable que la advección hacia el este generada por las corrientes estimadas a partir de medidas de AVISO no es real. Cabe resaltar que para el caso del experimento “conectividad mensual”, las partículas liberadas en la zona de lanzamiento D (Figura 1, nube de puntos amarillos), generan porcentajes de retención para la región de Campeche que son un 10% mayores a los porcentajes obtenidos usando la totalidad de partículas desde el día 20 hasta el día 100. Esta sobreestimación puede deberse a que la zona de lanzamiento D se ubica dentro del giro de Campeche, provocando una mayor retención de partículas.

En general, las tres bases de datos muestran que la región de Campeche tiene un alto grado de retención y que tiene un bajo nivel de conectividad con las regiones orientales del golfo de México. Para las boyas reales y simuladas, las regiones Oeste y Centro funcionan como zonas de tránsito de trazadores. La base de datos generada a partir del experimento “conectividad mensual” sugiere que no hay conectividad entre la región de Campeche con el resto de regiones del golfo desde el día 20.

En las siguientes secciones se analizarán las diferencias entre los tres tipos de trazadores, y en particular se analizará con detalle los resultados obtenidos en el experimento “conectividad mensual” para entender por qué ese experimento muestra resultados tan diferentes a los otros dos.

3.2 Estadísticas comparativas entre diferentes tipos de trazadores

Con el fin de evaluar de manera más cuantitativa qué tan bien simulan la dispersión y posición final de trazadores las trayectorias sintéticas obtenidas con altimetría, se realizaron diversas estadísticas para comparar esos resultados con los datos obtenidos a partir del análisis de las trayectorias de las boyas reales.

3.2.1 Dispersión entre pares de trazadores

Para dar una medida de las diferencias entre las trayectorias de las boyas reales y las simuladas por medio de los datos de altimetría, se ha calculado la separación lineal entre pares de trazadores (cada boya real comparada con su cada boya simulada) en función del tiempo transcurrido tras su liberación. Para visualizar la dispersión en diferentes escalas, se presentan las distancias entre los trazadores durante las primeras 24 horas tras su liberación (Figura 10A) y durante los 100 días de los experimentos (Figura 10B).

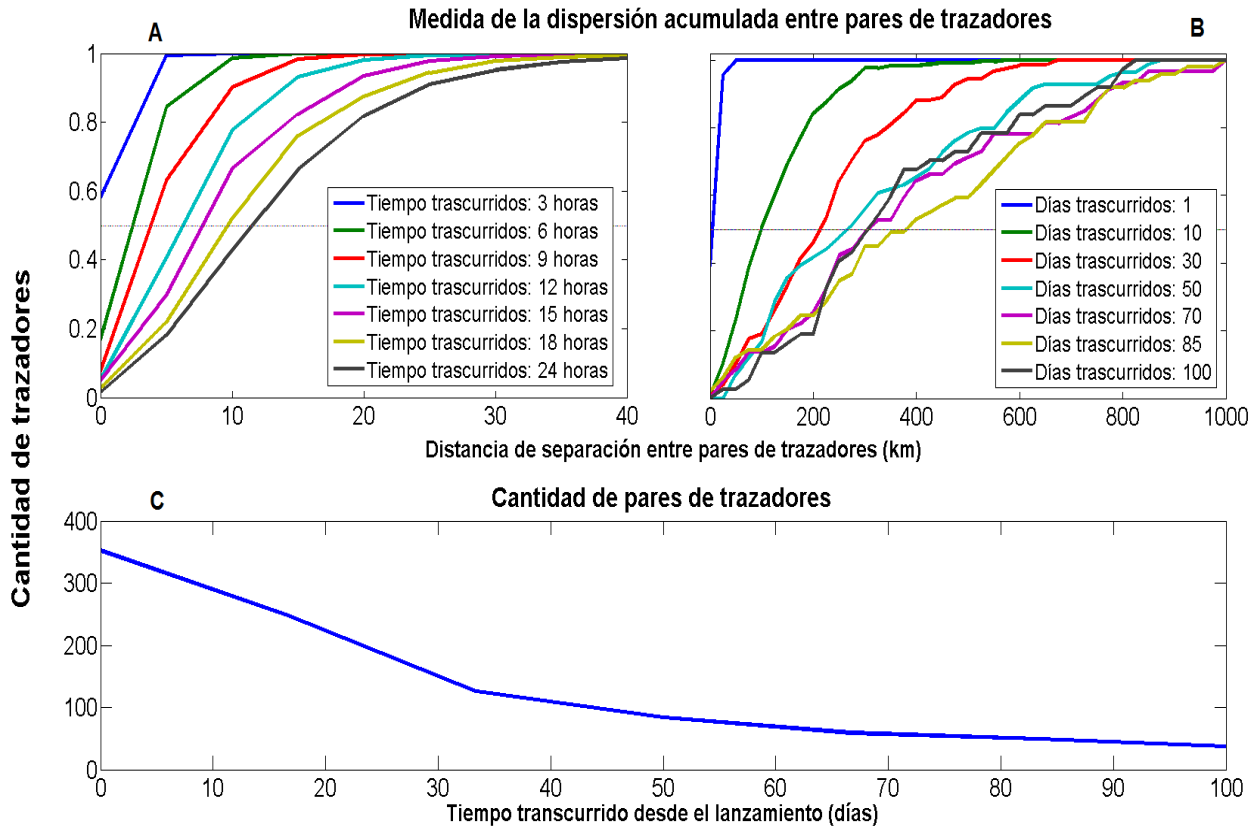


Figura 10: Funciones de distribución de probabilidades acumulativa en base a la distancia de separación entre boyas reales y simuladas. Imagen A: tiempo transcurrido desde el lanzamiento hasta el primer día en horas. Imagen B: tiempo transcurrido desde el día uno hasta el final del experimento en días. Imagen C: Cantidad de pares de trazadores en función del tiempo transcurrido tras el lanzamiento de los pares; la pérdida de pares ocurre como consecuencia de series de tiempo truncadas en el caso de las boyas reales o en el caso de “llegada a tierra” en el caso de las boyas simuladas.

Al analizar lo que ocurre con el 50% de los pares de trazadores a través del tiempo como un indicador del nivel de dispersión, la distancia que separa a los pares de trazadores va desde los 3 km a las 6 horas de su lanzamiento, hasta 12 km de separación transcurridas 24 horas, y este incremento se produce a un ritmo cercano al constante (≈ 0.6 km/hora) (Figura 10A). A medida que transcurre el tiempo del experimento, vemos que la distancia que separa al 50% de los pares de trazadores es próxima a los 100 km a los 10 días, 210 km a los 30 días, de 300 km a los 70 días, momento a partir del cual la separación se mantiene entre los 300 y 400 km (Figura 10B). El cálculo de la mediana para cada distribución de frecuencias de la separación entre pares de trazadores se muestra como función del tiempo transcurrido durante

cada experimento en la Figura 11. La evolución temporal de la mediana de las distancias entre pares de trazadores durante las primeras 24 horas de experimento es lineal (Figura 11A), momento a partir del cual, la tasa de crecimiento de la mediana es menor, tal y como se deduce a partir de la disminución de la pendiente de la evolución temporal de la mediana (Figura 11B). Además, se aprecia que las variaciones de esta distancia desde el día 50 son pequeñas (± 20 km). Esta separación representa una medida del error que se estaría cometiendo al utilizar el campo geostrófico derivado de altimetría para generar trayectorias sintéticas de trazadores.

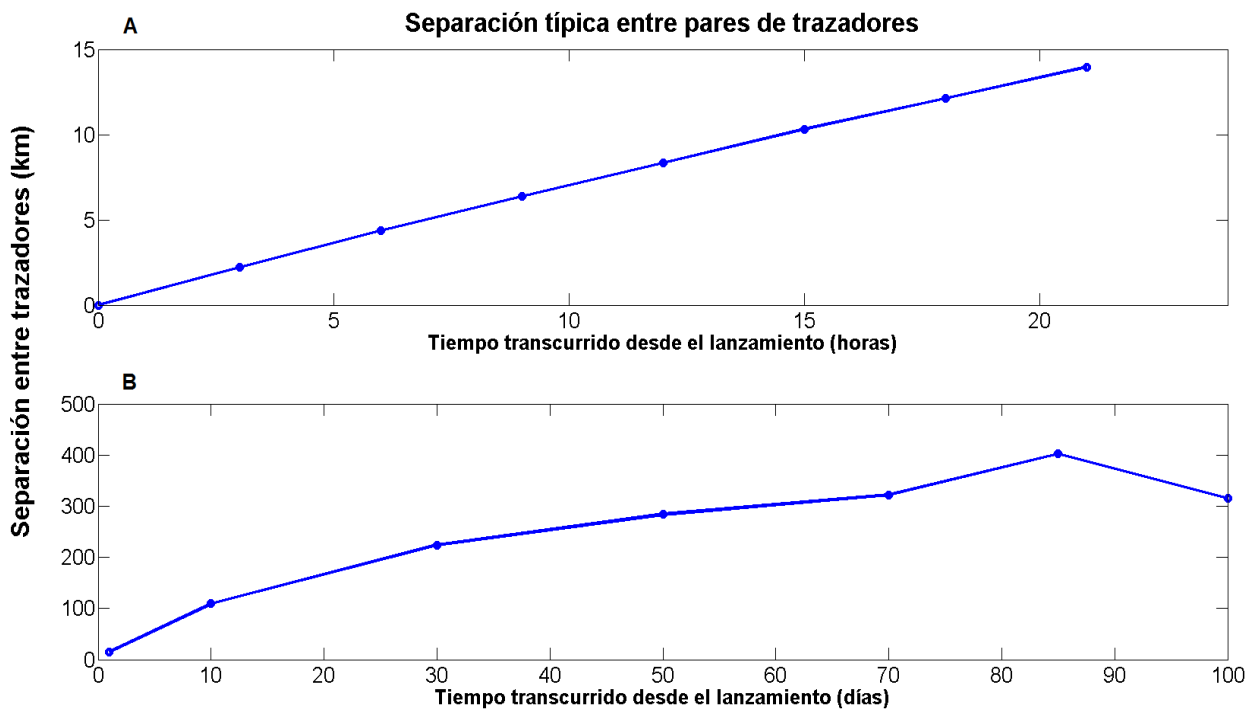


Figura 11: Separación típica entre pares de trazadores. Imagen A: tiempo transcurrido: primeras 24 horas tras el lanzamiento de los pares. Imagen B: tiempo transcurrido: desde el día 1 hasta el día 100.

3.2.2 Distribución de probabilidades de desplazamientos vectoriales desde el punto de origen

Otra manera de comparar estadísticamente los tres experimentos de dispersión, es calculando las funciones de densidad de probabilidades y de distribución acumulada de las distancias calculadas con base en el desplazamiento lineal entre el punto de origen

y la posición del trazador en un tiempo dado tras el lanzamiento. Los histogramas usados fueron calculados a partir de bins de 25 km.

En las Figuras 12, 13 y 14 se muestran las funciones de distribución acumulada (FDAs) de los desplazamientos para boyas reales, boyas simuladas y partículas del experimento “conectividad mensual”, transcurridos 10, 60 y 100 días tras su lanzamiento

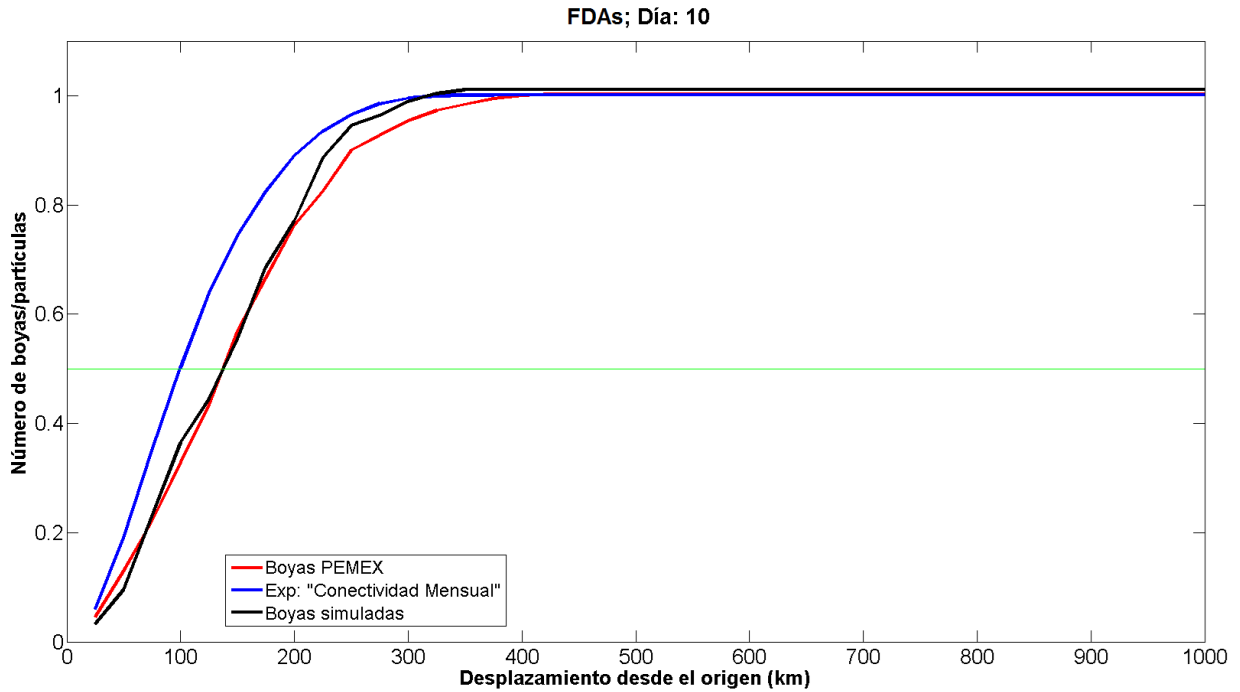


Figura 12: Funciones de distribución acumulada a día 10. Línea roja: boyas de deriva; línea negra: boyas simuladas; línea azul: partículas del experimento “conectividad mensual”; línea verde: 50% de trazadores.

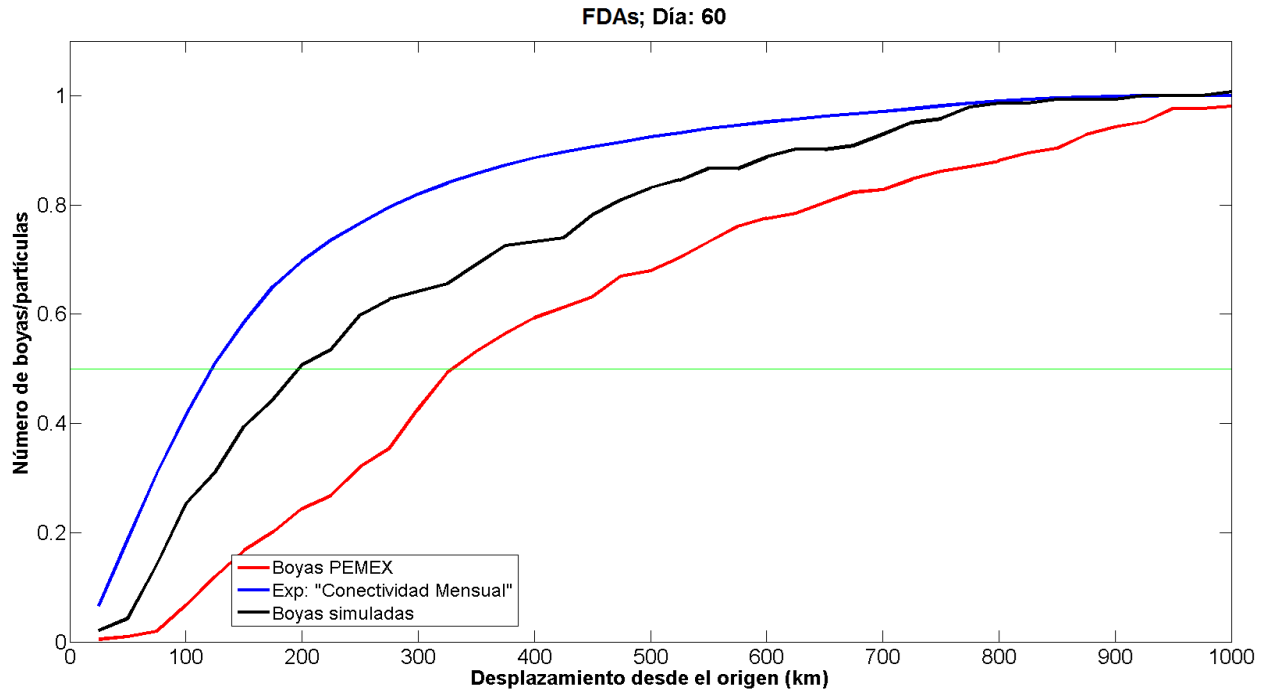


Figura 13: Funciones de distribución acumulada a día 60. Línea roja: boyas de deriva; línea negra: boyas simuladas; línea azul: partículas del experimento “conectividad mensual”; línea verde: 50% de trazadores.

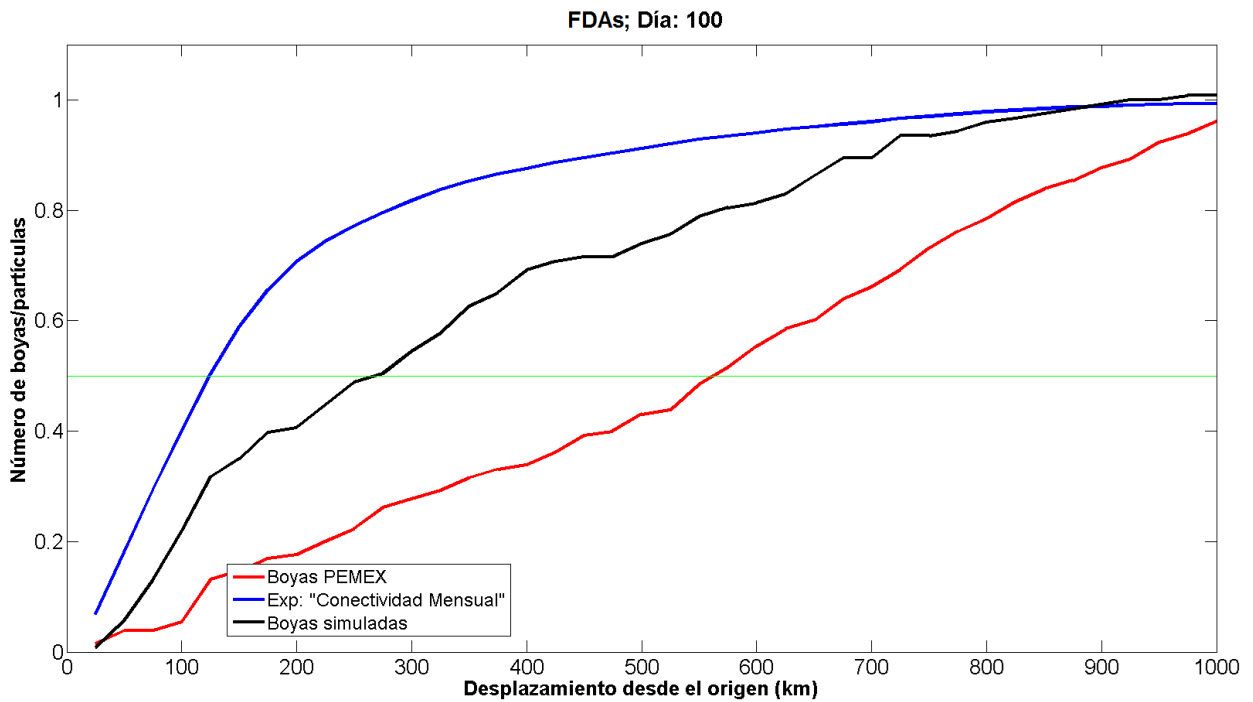


Figura 14: Funciones de distribución acumulada a día 100. Línea roja: boyas de deriva; línea negra: boyas simuladas; línea azul: partículas del experimento “conectividad mensual”; línea verde: 50% de trazadores.

Las funciones de distribución acumulada muestran que transcurridos 10 días de experimento, el 50% de las boyas reales y el 50% de las boyas simuladas presentan un desplazamiento de 120 km, mientras que el 50% de las partículas del experimento “conectividad mensual” presentan un desplazamiento inferior a 100 km (Figura 12). Hasta los 30 días, las estadísticas obtenidas a partir de las boyas reales y boyas simuladas son similares. En contraste, las de las partículas correspondientes al experimento “conectividad mensual” presentan un valor de desplazamiento más bajo. A medida que transcurre el tiempo, las diferencias se hacen más notables: a los 60 días, el desplazamiento presentado por el 50% de las boyas reales es de aproximadamente 300 km, comparado con 185 km para las boyas simuladas y 95 km para las partículas (Figura 13). A los 100 días, los desplazamientos aproximados para la mitad de los trazadores son de 560, 280 y 110 km para boyas reales, simuladas y partículas, respectivamente (Figura 14).

Para comparar las estadísticas de manera objetiva entre las tres bases de datos, a 10, 20, 40, 60, 80 y 100 días tras su lanzamiento, y determinar qué tanto se parecen los función de distribución acumulada de las boyas reales con las de las boyas simuladas y los trazadores del experimento “conectividad mensual”, se realizó el denominado test Kolmogorov-Smirnov (Chakravarti, 1967). Los resultados del test mostraron que únicamente las estadísticas generadas por las boyas reales y las boyas simuladas son comparables, y sólo durante los primeros 20 días. Las boyas reales se desplazan más rápidamente de su punto de lanzamiento, seguidas por las boyas simuladas, y por último por las partículas de los experimentos de conectividad mensual.

3.2.3 Dispersión absoluta

Otra manera de comparar estadísticamente el comportamiento de las boyas reales con las simuladas y las partículas del experimento “conectividad mensual”, es calculando la dispersión absoluta (LaCasce, 2008), definida por:

$$D_x(t) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [x_i(t) - x_i(0)]^2, \quad (1)$$

en donde $x_i(0)$ y $x_i(t)$ son la posición de lanzamiento y la posición al instante t de la partícula i , respectivamente, y N es el número de partículas presentes al tiempo t . Este cálculo se puede realizar tanto para desplazamientos meridionales como zonales para ver el grado de anisotropía en la dispersión (Figura 15).

En su trabajo publicado en 1921, Taylor concluye que la dispersión de una única partícula, bajo un régimen estacionario y homogéneo, es de tipo balístico en los momentos iniciales (t tiende a 0), es decir, la dispersión depende de t^2 . Este comportamiento en el patrón de dispersión es debido a la presencia de estructuras de mesoescala dominantes. Por otro lado, cuando t tiende a infinito la dispersión calculada por Taylor es de tipo caminata aleatoria (régimen también conocido como browniano), y depende linealmente del tiempo (Taylor, 1921). LaCasce (2008), denomina como dispersión anómala a aquella que no se ajusta a la dispersión modelada por Taylor (1921), pudiendo ser provocada por encontrarse los trazadores en una cuenca con barreras físicas o dinámicas, o bien, como consecuencia de una alta correlación a escalas temporales largas con los campos de velocidades presentes.

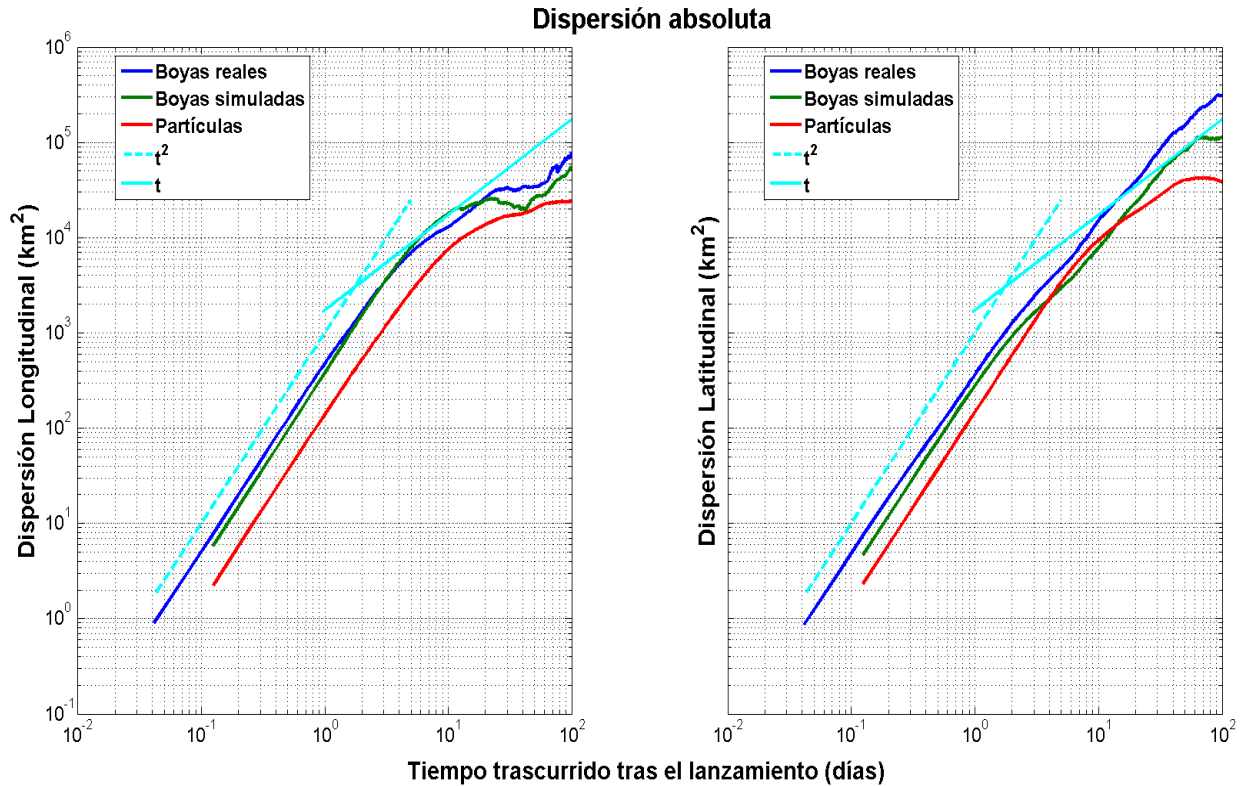


Figura 15: Dispersión absoluta meridional (primera imagen) y latitudinal (segunda imagen), para las boyas reales (línea azul), boyas simuladas (línea verde) y partículas del experimento “conectividad mensual” (línea roja). Se muestra también la dispersión modelada por Taylor, 1921 cuando t tiende a 0 (línea cian segmentada) y cuando t tiende a infinito (línea cian continua).

En términos generales, la dispersión absoluta calculada para los tres trazadores presenta el mismo régimen aproximado, salvo durante las primeras 3 horas, donde creemos que ocurre un incremento en la dispersión mucho mayor para las boyas reales que para los demás trazadores, provocando que la dispersión absoluta a las 3 horas del lanzamiento de los trazadores sean mayores para las boyas reales que para las boyas simuladas y partículas del experimento “conectividad mensual”. La dispersión longitudinal de presentada a las 3 horas por las boyas reales es de 8 km^2 , para las boyas simuladas es de 6 km^2 y para las partículas es de 2.2 km^2 , mientras que la latitudinal es de 7.5 km^2 para las boyas reales, de 4.6 km^2 para las boyas simuladas y de 2.3 km^2 para las partículas. A partir de las 3 horas, la tasa con la que crece la dispersión (las pendientes de las curvas) es parecida para los tres trazadores y los regímenes de dispersión son aproximadamente iguales para los tres trazadores. Lo que

cambia es el momento en el que se producen los cambios de régimen: se presenta un régimen balístico desde las 3 horas hasta los 5 días, aproximadamente, para las boyas reales y simuladas, y hasta los 10 días para las partículas. El régimen de dispersión de tipo caminata aleatoria o browniano se observa desde los 5 hasta los 25 días en la dispersión absoluta longitudinal para las boyas reales y simuladas, pero no para las partículas. La dispersión absoluta latitudinal estimada para todos los trazadores no se comporta como la modelada por Taylor, ya que es más lenta (con una pendiente menor a la modelada por Taylor) en los momentos iniciales y más rápida cuando t tiende a infinito. Para un tiempo dado, la magnitud de la dispersión medida en las boyas reales es, como máximo, el doble de la de las boyas simuladas y entre 3 y 4 veces mayor a la de las partículas. Longitudinalmente, la dispersión presenta un patrón de saturación en todos los casos a partir de 25 días, provocado probablemente por las barreras físicas más limitantes a nivel longitudinal, como la orografía en la región de Campeche. Latitudinalmente, la dispersión absoluta observada por las boyas reales no alcanza un patrón de saturación. Sin embargo, para las boyas simuladas se produce la saturación entre a los 60 y 65 días, y para las partículas entre los 35 y 42 días.

Para resumir, en términos estadísticos, las trayectorias de las boyas simuladas comparadas con las trayectorias reales alcanzan una separación máxima aproximadamente 300 km a los 50 días de su lanzamiento. Además, tal y como demuestran los FDAs, a cada instante, los trazadores sintéticos subestiman el desplazamiento lineal desde el origen comparado con las boyas reales. Durante las 3 primeras horas tras la liberación de los trazadores la dispersión absoluta mostrada por las boyas reales es mayor que la mostrada por las boyas simuladas y por las partículas. Todos los trazadores describen un régimen balístico desde las 3 horas hasta los 10 días como máximo. A nivel longitudinal se aprecia una saturación de la dispersión absoluta estimada para todos los trazadores que puede ser debida a la restricción del tamaño de la cuenca. A nivel latitudinal, la dispersión absoluta estimada para las boyas reales no presentan un régimen de saturación claro, pero sí lo muestra la dispersión absoluta estimada para las boyas simuladas y las partículas, probablemente debido una alta correlación durante un largo periodo con las estructuras de mesoescala a nivel latitudinal (LaCasce, 2008). Las boyas simuladas y las partículas subestiman en menos

de un orden de magnitud a la dispersión absoluta de las boyas de deriva a un tiempo dado.

3.3 Análisis del experimento “conectividad mensual”

Como se ha mostrado hasta ahora, los resultados del experimento “conectividad mensual” resultaron ser anómalamente diferentes con respecto a la información obtenida a través de las boyas reales y las boyas simuladas. No queda claro si esto se debe al cambio en las regiones donde fueron lanzadas, o a la estrategia de lanzamiento, que consistió en lanzar muchos trazadores esparcidos en una región más grande (Figura 1). Se ha analizado la variabilidad temporal, en escala mensual, de la retención de partículas en la región de Campeche para entender mejor qué es lo que provoca el alto grado de retención así como la aparente falta de conectividad de la región de Campeche con el resto del golfo, como se muestran en la Figura 9C.

Las series temporales de los porcentajes de partículas presentes en la región de Campeche al día 10, 50 y 100 después de ser liberadas muestra que existe una alta variabilidad en el grado de retención en la región en función del mes de liberación (Figura 16). La retención de partículas en el giro de Campeche es muy alta independientemente del lugar donde se hayan lanzado las partículas. Sin embargo, esta retención depende tanto del mes en que las partículas fueron liberadas así como del tiempo transcurrido desde su liberación. Un ejemplo de esta variabilidad se observa al comparar dos meses de lanzamiento específicos: enero 2009 y enero 2011. Para el caso de enero 2009, el 70 % de las partículas son retenidas en Campeche a los 10 días, disminuyendo el porcentaje a casi el 60% a los 50 días y a 56% a los 100 días. En contraste, el 90% de las partículas liberadas en enero 2011 están presentes en Campeche a los 10 días, disminuyendo este porcentaje a menos del 60% a los 50 días, e incrementándose a 90% a los 100 días.

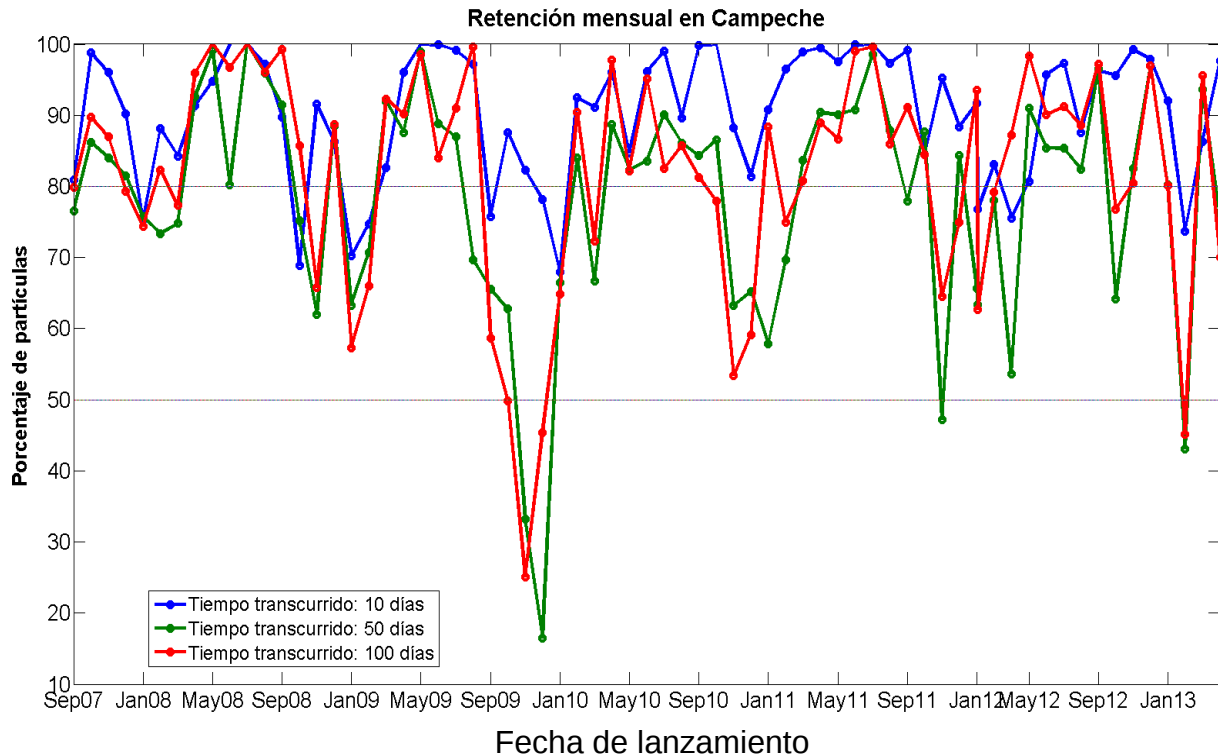


Figura 16: Porcentaje mensual de partículas retenidas en la región de Campeche transcurridos 10 días (línea azul), 50 días (línea verde) y 100 días (línea roja) desde su lanzamiento.

Debido a que el porcentaje obtenido del total de partículas presentes en Campeche desde los 20 a los 100 días resultó ser de 80%, se ha establecido este valor como límite para identificar los meses que presentaron máxima retención. De manera arbitraria se ha elegido 50% de retención de partículas a los 100 días para clasificar a aquellos meses como meses de mínima retención. Los meses restantes son clasificados como meses de retención intermedia. Los meses de máxima retención son: octubre y noviembre del 2007; febrero, abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre del 2008; marzo, abril, mayo, junio, julio y agosto del 2009; febrero, abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre de 2010; enero, marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre del 2011; enero, abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre y noviembre del 2012; enero y marzo del 2013. Esto implica que en el 64.7% de los meses del experimento (68 meses en total) más del 80% de las partículas se retuvieron en la región de Campeche tras 100 días de haber sido liberadas. Los meses de mínima retención son: octubre, noviembre y diciembre del 2009 y febrero del 2013.

El comportamiento de las partículas del experimento “conectividad mensual” en los meses de máxima retención se presenta en las Figuras 17 y 18. En el mes de diciembre de 2012 (Figura 17), por ejemplo, se aprecia que algunas partículas de las lanzadas en las zonas A y B (Figuras 17A y 17B) son advectadas hacia el norte a través de la región Oeste, ubicándose finalmente entre las regiones Oeste y Noroeste tras ser influenciadas por el giro anticiclónico Ícarus y por los giros ciclónicos C14 y C16. Únicamente fueron advectadas a la plataforma de Campeche las partículas lanzadas en la zona C y E (Figuras 17C y 17E). Comparando el mapa de altimetría promedio para diciembre de 2012, con las trayectorias de las boyas reales presentes en esas fechas (Figura 17F), se refleja la circulación del giro ciclónico de Campeche a través de las trayectorias de boyas reales que son retenidas en la región de Campeche. Además, las trayectorias de salida de Campeche atraviesan la región Oeste y están influenciadas por los anticiclones Ícarus y Jumbo, así como por los ciclones C14 y C16.

Fecha lanzamiento: 28-Nov-2012

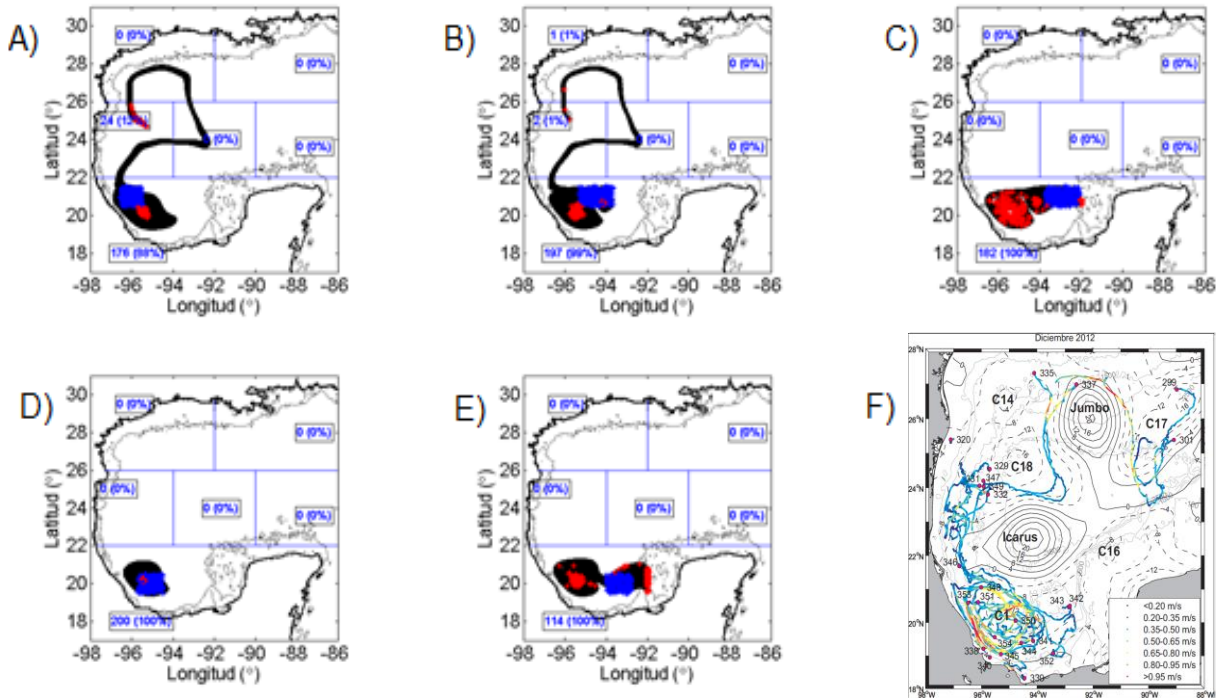


Figura 17: Mapa de dispersión correspondiente al mes de diciembre del 2012 para cada zona de lanzamiento. La posición inicial de las partículas en color azul, sus posiciones finales en rojo y sus trayectorias a lo largo de los 100 días en negro. Imagen A: partículas liberadas en la zona de lanzamiento A; imagen B: partículas liberadas en la zona de lanzamiento B; imagen C: partículas liberadas en la zona de lanzamiento C; imagen D: partículas liberadas en la zona de lanzamiento D; imagen E: partículas liberadas en la zona de lanzamiento E; imagen F: campo promedio de altimetría para el mes de diciembre del 2012 con las trayectorias de las boyas de deriva presentes en esa fecha, donde destaca la presencia del giro de Campeche y de los remolinos anticiclónicos Jumbo e Ícarus.

En la Figura 18, se observan las trayectorias de los trazadores lanzados en septiembre del 2011, y las partículas son retenidas en el giro de Campeche de manera similar al caso anterior. Todas las partículas originadas en las zonas de lanzamiento C, D y E (Figuras 18C, 18D y 18E) son retenidas en el giro de Campeche. Se observa en el mapa de altimetría promedio (Figura 18F) para este mes que las boyas reales no son retenidas claramente por el giro de Campeche, siendo que ninguna trayectoria ha logrado darle la vuelta.

Fecha lanzamiento: 31-Aug-2011

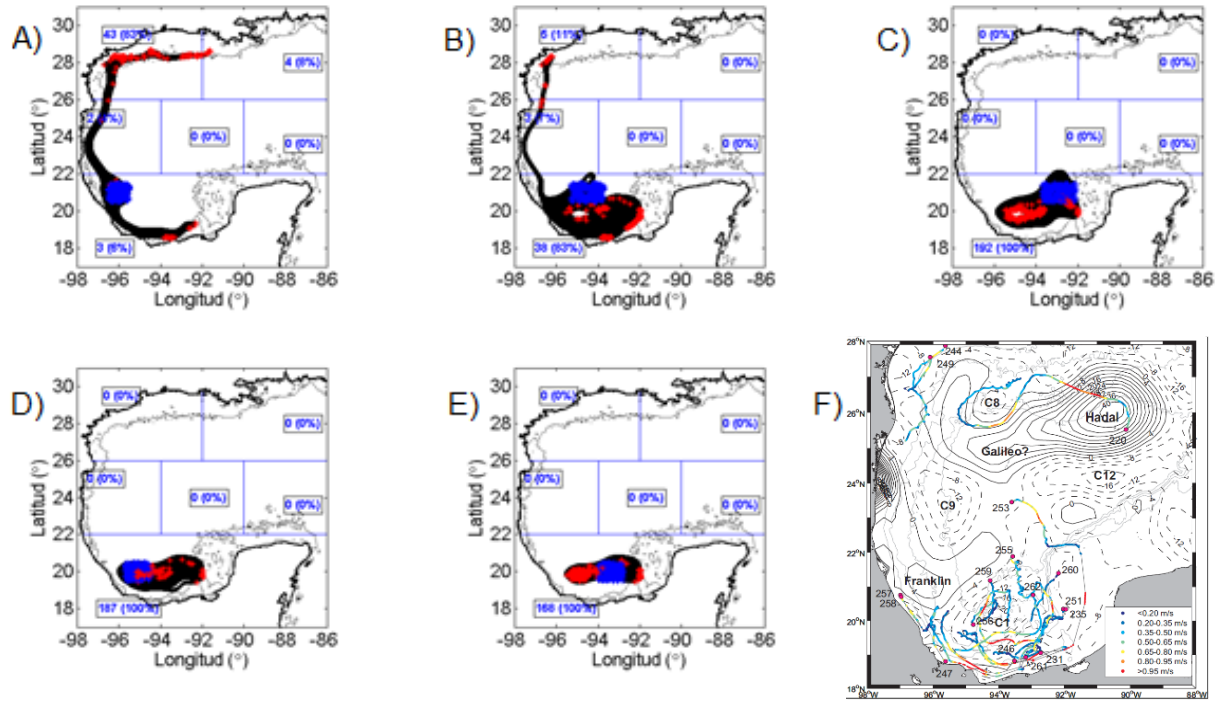


Figura 18: Mapa de dispersión correspondiente al mes de septiembre del 2011 para cada zona de lanzamiento. La posición inicial de las partículas en color azul, sus posiciones finales en rojo y sus trayectorias a lo largo de los 100 días en negro. Imagen A: partículas liberadas en la zona de lanzamiento A; imagen B: partículas liberadas en la zona de lanzamiento B; imagen C: partículas liberadas en la zona de lanzamiento C; imagen D: partículas liberadas en la zona de lanzamiento D; imagen E: partículas liberadas en la zona de lanzamiento E; imagen F: campo promedio de altimetría para el mes de septiembre del 2011 con las trayectorias de las boyas de deriva presentes en esa fecha, donde destaca la presencia de los remolinos anticiclónicos Hadal y Franklin.

El comportamiento de las partículas del experimento “conectividad mensual” en los meses de mínima retención queda representado en las Figuras 19 y 20. En la Figura 19 se representa al mes de febrero del 2013, cuando el porcentaje final de partículas retenidas en la región de Campeche es inferior al 50%. Las partículas lanzadas en las zonas A y B (Figuras 19A y 19B) han sido advectadas hacia el norte en mayor proporción que las partículas liberadas en las demás zonas de lanzamiento. Se aprecia la influencia del anticiclón Jumbo que provoca un retorno de las partículas hacia el sur, así como la influencia de los ciclones C18 y, sobretodo, C14, que presenta capacidad de retención. Las partículas originadas en la zona D (Figura 19D) han sido retenidas casi en su totalidad por el giro de Campeche. Por otro lado, muchas de las partículas lanzadas en las zonas de lanzamiento C y E (Figuras 19C y 19E) alcanzaron la capa

límite por lo cual su trayectoria fue cortada, provocando que el número de partículas disponibles para ser advectadas fuese muy pequeño. Las trayectorias de las boyas reales no describen con claridad el giro de Campeche, pero su salida sí es bloqueada por el anticiclón Ícarus, produciéndose únicamente por la región Oeste, tal y como sucede con las partículas, que fueron transportadas hacia el norte para ser advectadas por Jumbo y afectadas por el ciclón C14.

Fecha lanzamiento: 30-Jan-2013

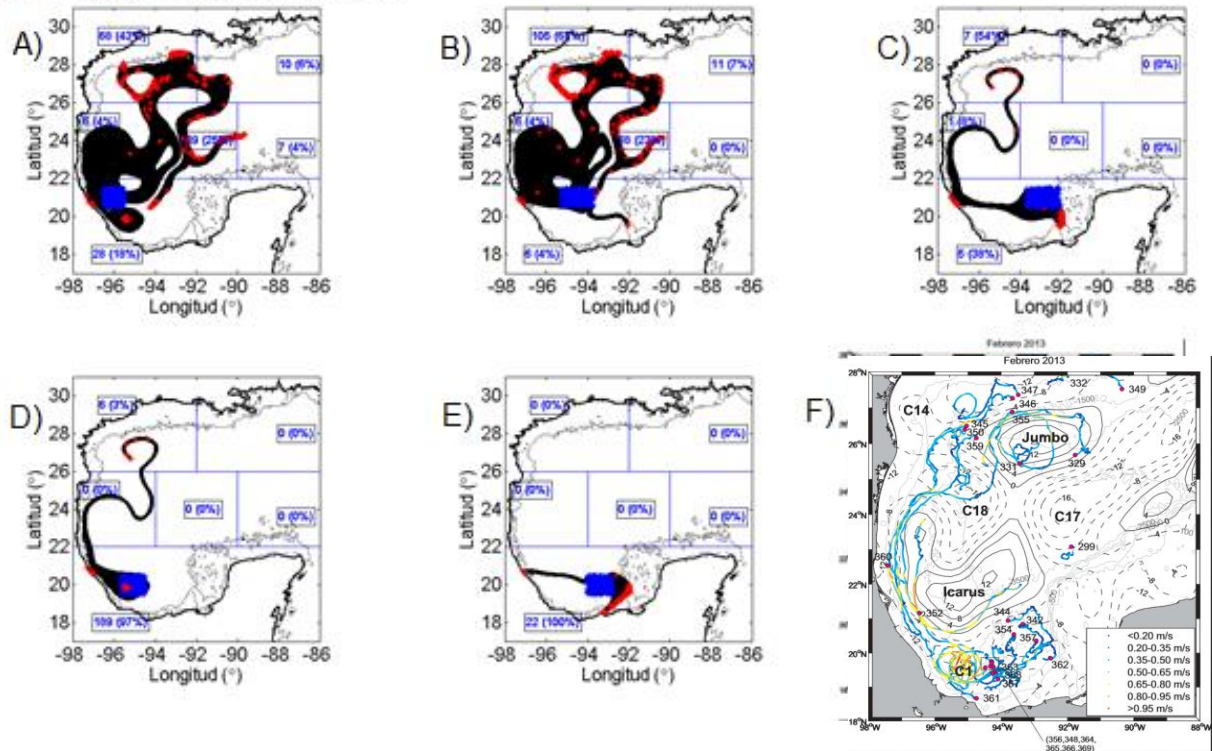


Figura 19: Mapa de dispersión correspondiente al mes de febrero del 2013 para cada zona de lanzamiento. La posición inicial de las partículas en color azul, sus posiciones finales en rojo y sus trayectorias a lo largo de los 100 días en negro. Imagen A: partículas liberadas en la zona de lanzamiento A; imagen B: partículas liberadas en la zona de lanzamiento B; imagen C: partículas liberadas en la zona de lanzamiento C; imagen D: partículas liberadas en la zona de lanzamiento D; imagen E: partículas liberadas en la zona de lanzamiento E; imagen F: campo promedio de altimetría para el mes de febrero del 2013 con las trayectorias de las boyas de deriva presentes en esa fecha, donde destaca la presencia de los remolinos anticiclónicos Jumbo e Ícarus.

En la Figura 20, en la que se representa el mes de octubre de 2009, el patrón de dispersión de las partículas es muy similar entre cada zona de lanzamiento, salvo para la zona de lanzamiento A (Figura 20A), ubicada muy cerca del anticiclón Darwin. Las partículas que abandonan la región de Campeche lo hacen por la región centro y la

gran mayoría quedan retenidas en el ciclón C9 ubicado en la región Oeste, y en su extensión por el medio golfo, al norte del anticiclón Darwin. Inicialmente, las partículas lanzadas en la zona A, se mueven anticiclónicamente sobre Darwin hasta que son advectadas de forma ciclónica en dirección suroeste. Las partículas que no fueron exportadas de la región de Campeche y que fueron lanzadas en las zonas de lanzamiento B, C, D y E (Figuras 20B, 20C, 20D y 20E), son retenidas en la región oriental del golfo de Campeche girando ciclónicamente. Esto puede ser debido a que el centro del giro ciclónico de Campeche se ha deformado y desplazado hacia el este por la penetración de Darwin en la región de Campeche, tal y como se aprecia en la Figura 20F, donde las trayectorias de las boyas reales no describen claramente el giro ciclónico. Cabe destacar que el anticiclón Darwin 2, ubicado en la región central del golfo fue capaz de advectar partículas en dirección noroeste-sureste.

Fecha lanzamiento: 30-Sep-2009

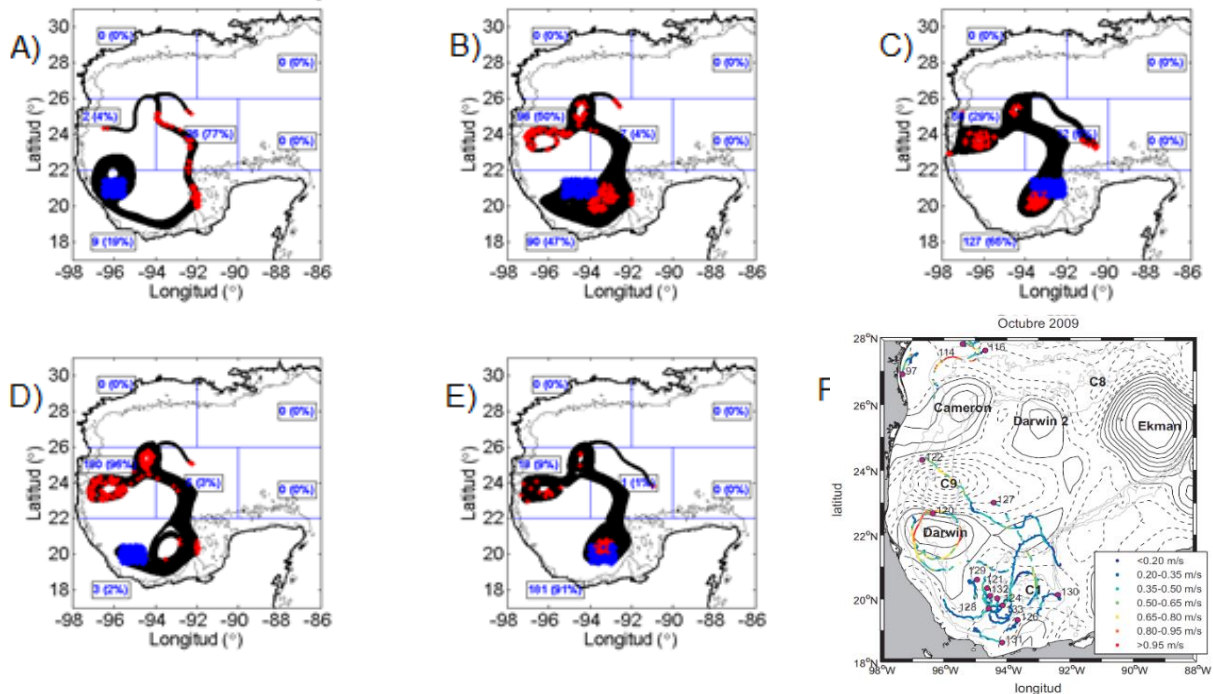


Figura 20: Mapa de dispersión correspondiente al mes de octubre del 2009 para cada zona de lanzamiento. La posición inicial de las partículas en color azul, sus posiciones finales en rojo y sus trayectorias a lo largo de los 100 días en negro. Imagen A: partículas liberadas en la zona de lanzamiento A; imagen B: partículas liberadas en la zona de lanzamiento B; imagen C: partículas liberadas en la zona de lanzamiento C; imagen D: partículas liberadas en la zona de lanzamiento D; imagen E: partículas liberadas en la zona de lanzamiento E; imagen F: campo promedio de altimetría para el mes de octubre del 2009 con las trayectorias de las boyas de deriva presentes en esa fecha, donde destaca la presencia de los remolinos anticiclónicos Ekman, Darwin y Cameron, así como el ciclónico C9.

3.3.1 Conectividad durante los meses de retención máxima, intermedia y mínima.

Los resultados de la sección anterior sugieren que el momento de lanzamiento de las partículas tiene gran importancia en términos de la retención en la región de Campeche y, por lo tanto, en la conectividad del esta región con el resto del golfo de México. Por lo tanto, se repitió el análisis de la conectividad separando los meses de máxima retención, de retención intermedia y de mínima retención (Figura 21).

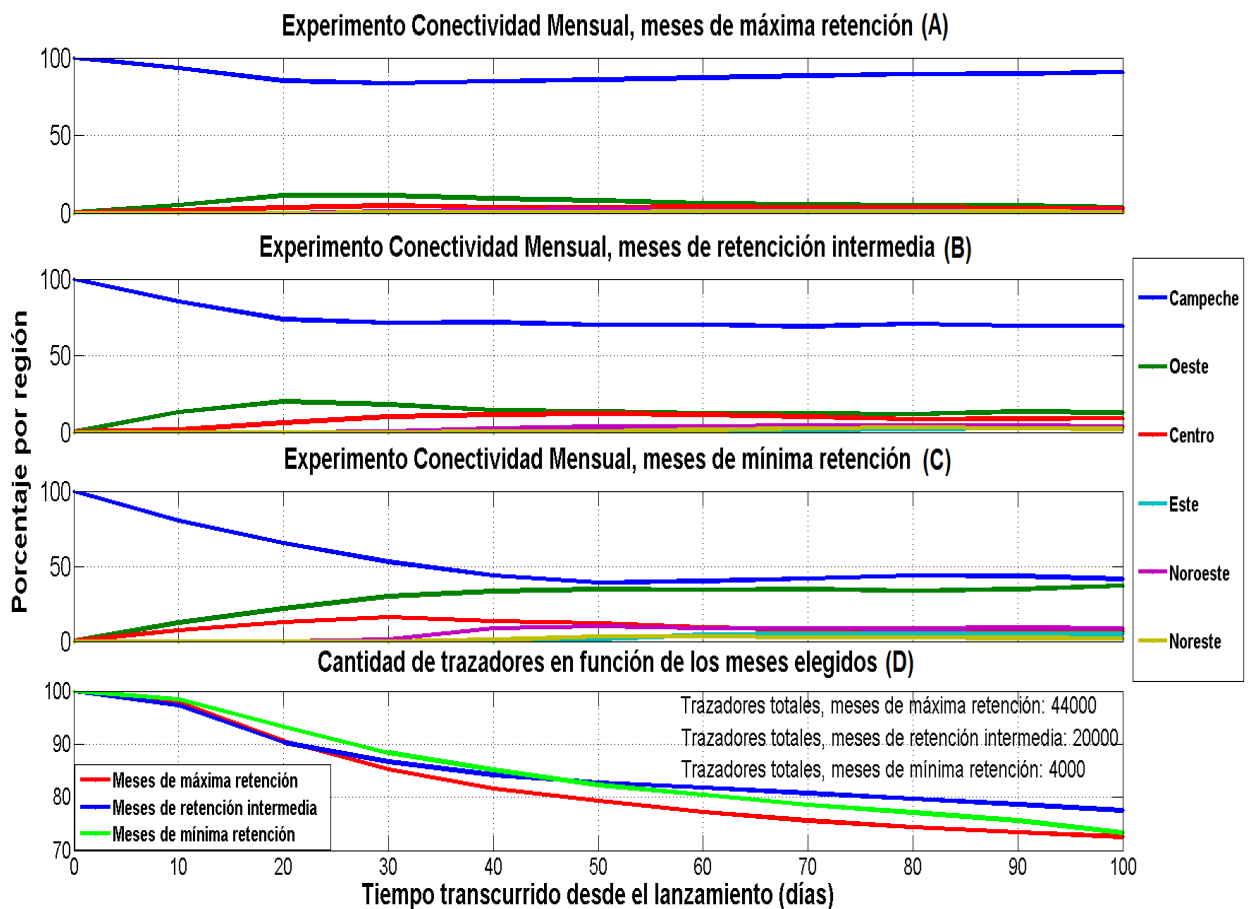


Figura 21: Gráfica Conectividad. Experimento “conectividad mensual”. Imagen A: resultados excluyendo los meses de máxima retención (aquellos con más del 80% de partículas en la región de Campeche a los 100 días). Imagen B: resultados utilizando los meses con retención entre el 80 y 50 % a día 100. Imagen C: resultados utilizando únicamente los meses de mínima retención (aquellos con menos del 50% de partículas en la región de Campeche a los 100 días). Línea azul: región de Campeche; línea verde: Región Oeste; línea roja: región Centro; línea azul celeste: región Este; línea magenta: región Noroeste; línea amarilla: región Noreste. Imagen D: porcentaje de trazadores activos para los meses de máxima retención (línea roja), retención intermedia (línea azul) y mínima retención (línea verde).

Se observa que para los patrones de los porcentajes por región para los meses de retención máxima e intermedia (Figuras 21A y 21B) no son diferentes a los de los porcentajes obtenidos con la totalidad de las partículas (Figura 9C). Sin embargo, respecto a los porcentajes obtenidos para los meses de mínima retención (Figura 21C), se observa que la región de Campeche libera partículas hasta el día 50 y luego los porcentajes de partículas permanecen aproximadamente constantes. Además, la región Oeste, para este caso en concreto, presenta una tendencia positiva durante todo el experimento. Esta información se podría interpretar como que la región de Campeche sigue presentando una alta capacidad de retención, y además, puede existir una recirculación de partículas entre las regiones Oeste, Centro y Campeche. Es relevante destacar que las partículas sugieren que la región Oeste en ocasiones se comporta como zona de retención, como muestra la Figura 22 en la que el giro ciclónico C9, bien definido, atrapó a un número considerable de partículas. Sin embargo, lo mismo no se pudo corroborar con las trayectorias de boyas reales, por la falta de boyas reales activas en dicha región.

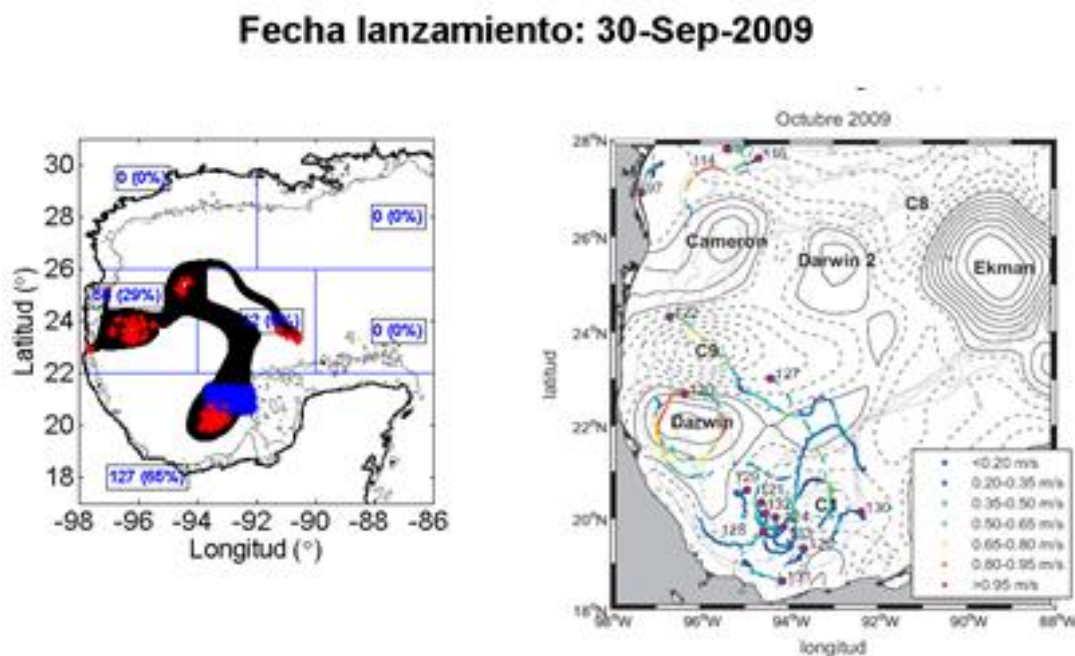


Figura 22: Imagen izquierda: mapa de dispersión correspondiente al mes de octubre del 2009 para zona de lanzamiento C. La posición inicial de las partículas en color azul, sus posiciones finales en rojo y sus trayectorias a lo largo de los 100 días en negro. Imagen derecha: campo promedio de altimetría para el mes de octubre del 2009 con las trayectorias de las boyas de deriva presentes en esa fecha, donde destaca la presencia de los remolinos anticiclónicos Ekman, Darwin y Cameron, así como el ciclónico C9.

3.3.1.1 Evaluación de la conectividad para meses de retención máxima, intermedia y mínima para boyas reales y simuladas

Para evaluar si la conectividad del golfo de Campeche con el resto del golfo estimada por las boyas reales y simuladas era dependiente del momento de la liberación del trazador, se calculó la conectividad para los meses de retención mínima, intermedia y máxima definidos en el análisis del experimento “conectividad mensual” (Figura 23).

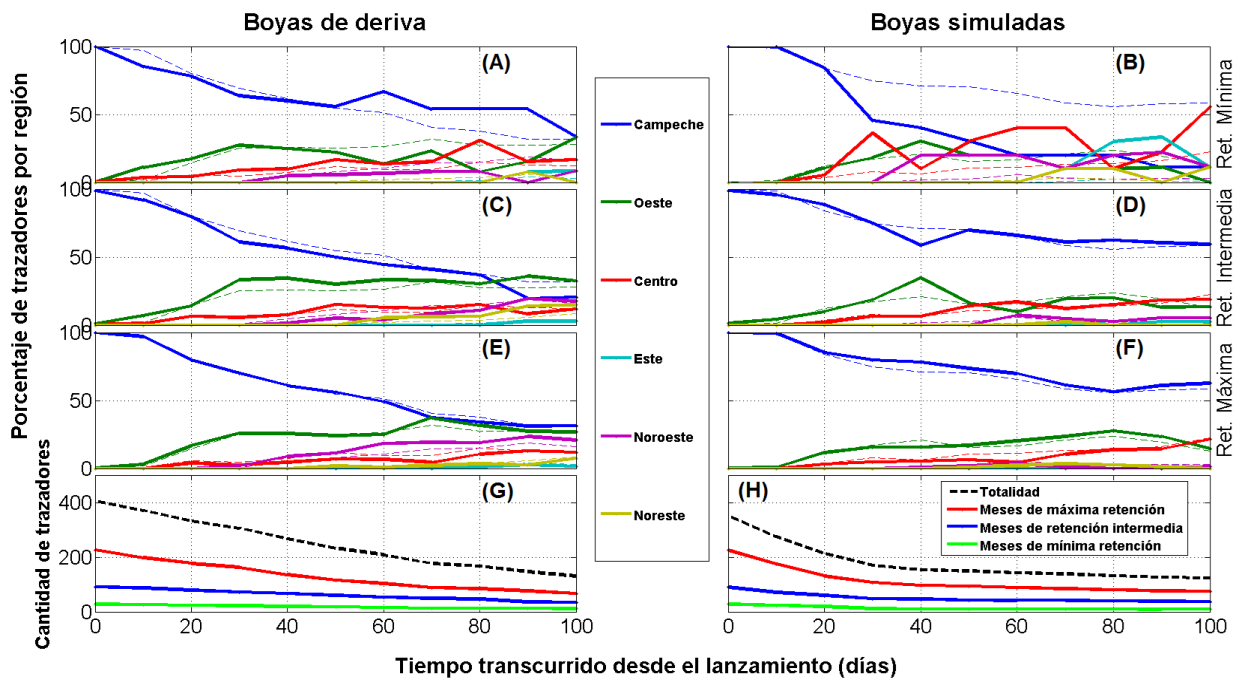


Figura 23: Gráficas de conectividad. Las imágenes de la primera columna (A, C, E y G) corresponden a las boyas reales. Las imágenes de la segunda columna (B, D, F y H) corresponden a las boyas simuladas. Las líneas continuas de las imágenes A, B, C, D, E y F corresponden a los porcentajes por región (azul, Campeche; verde, Oeste; rojo, Centro; cian, Este; magenta, Noroeste; amarillo, Noreste) para los meses de retención mínima (A, B), meses de retención intermedia (C, D) y meses de máxima retención (E, F), respectivamente. Las líneas discontinuas hacen referencia al total de los datos para cada región, tal y como se muestra en la Figura 8A y 8B. Las imágenes G y H representan la cantidad de trazadores en función del tiempo transcurrido tras su lanzamiento, existentes en cada clasificación mensual.

La información en términos de la conectividad para los meses de retención máxima, intermedia y mínima mostrada por las boyas reales (Figuras 23A, 23C y 23E) no es significativamente diferente a la arrojada por la totalidad de las boyas (Figura 9A). Las

boyas reales no ven cambios en términos de la retención de la región de Campeche a los 100 días según la clasificación de retención máxima, intermedia y mínima. De algún modo, las boyas reales no están sujetas a esas condiciones que tan dramáticas son para las partículas del experimento “conectividad mensual”. Para las boyas simuladas, durante los meses de retención intermedia y retención máxima (Figuras 23B y 23C), la conectividad mostrada no difiere de la estimada con la totalidad de los datos (Figura 9B), sin embargo, sí se aprecia una retención considerablemente menor a la del total durante los meses de mínima retención (Figura 23A), siendo de 11.5% para estos meses, frente al 58.5% de boyas simuladas totales retenidas en Campeche a los 100 días. Además, es destacable el diferente comportamiento de los porcentajes de boyas simuladas del resto de las regiones, en los meses de mínima retención, con respecto del total de datos: las regiones Oeste, Centro y Noroeste presentan porcentajes más elevados, y parece existir un intercambio de partículas entre la región Oeste y Centro. Sin embargo, hay que destacar que el número de datos para la clasificación de meses de retención mínima, intermedia y máxima es mucho más reducido que para la totalidad de los trazadores, lo cual puede implicar que las estadísticas no sean muy representativas (Figura 22 Gy H). Aun así, la tendencia de las boyas simuladas es más parecida a lo observado con el experimento “conectividad mensual” que para el caso de las boyas reales.

3.3.2 Compuestos de altimetría y de campos geostróficos

Para identificar las condiciones dinámicas que generan las diferencias en la capacidad de retención de la región de Campeche en función de la fecha de liberación de las partículas del experimento “conectividad mensual”, se han construido unos compuestos de anomalías de altimetría y velocidades geostróficas considerando todo el periodo de estudio, los meses de máxima retención, los meses de mínima retención y los de retención intermedia (Figuras de la 24 a la 27). El objetivo es visualizar las estructuras de mesoescala que dominan en cada periodo y ver si existe algún tipo de relación con el patrón de conectividad.

En la Figura 24 se muestra el compuesto para todo el periodo de estudio (de septiembre del 2007 a abril del 2013), en donde cabe notar la presencia del giro

ciclónico de Campeche y de una circulación anticiclónica que, a nivel promedio, se ubican en la región Oeste. Dada la separación que hay entre las dos estructuras, éstas no parecen interactuar entre sí. Considerando todo el periodo, la alta capacidad de retención de la región de Campeche parece estar relacionada con un giro ciclónico bien definido que no interactúa con la circulación anticiclónica promedio que se observa en la región Oeste.

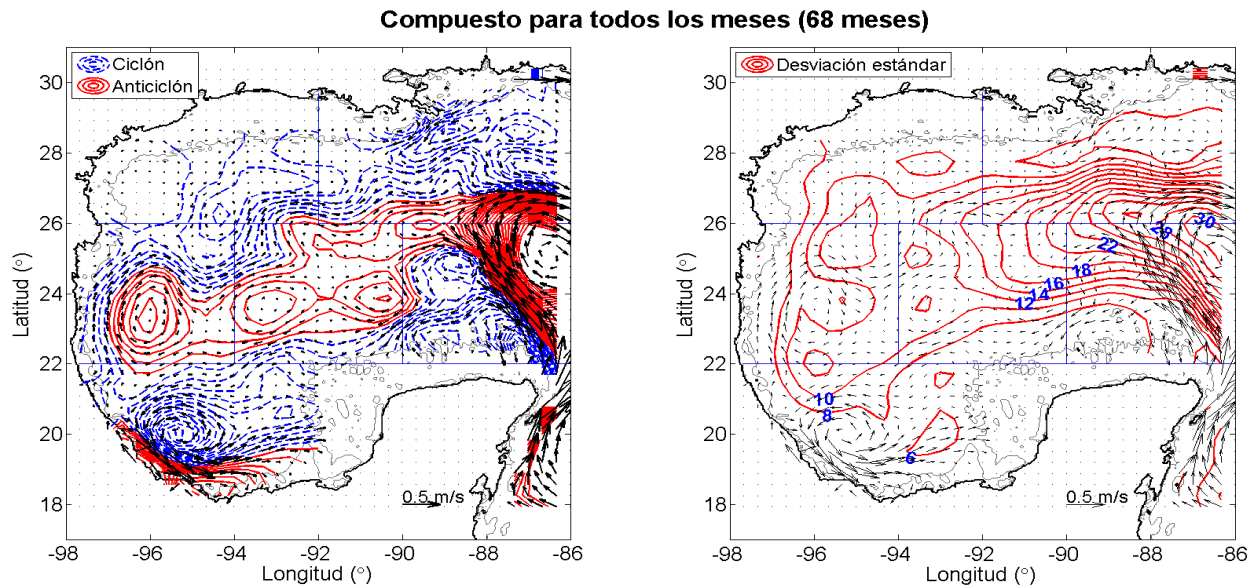


Figura 24: Compuesto de altimetría y velocidades geostróficas para el periodo de septiembre del 2007 a abril del 2013. Primera imagen: los vectores negros corresponden al campo geostrófico; las líneas discontinuas azules corresponden a giros anticiclónicos; las líneas continuas rojas corresponden a giros ciclónicos. Segunda imagen: desviación estándar (cm) de los datos de altimetría.

En la Figura 25 se muestra el compuesto para los meses de máxima retención. Este compuesto es muy similar al promedio, ya que se observa el giro de Campeche bien definido y sin interactuar con otras estructuras de mesoescala. En el compuesto construido para los meses de mínima retención (Figura 26), vemos que el giro ciclónico no está bien definido y los vectores de velocidad geostrófica muestran la penetración de la circulación anticiclónica en la región de Campeche. Observando el compuesto presentado para los meses de retención intermedia (Figura 27), se puede apreciar en las isolíneas de altimetría cómo es que la circulación anticiclónica ubicada en la región

oeste ha penetrado ligeramente en la región de Campeche, resultando en una interacción con el giro ciclónico, lo que puede estar generando un nivel de retención más bajo que la del promedio total.

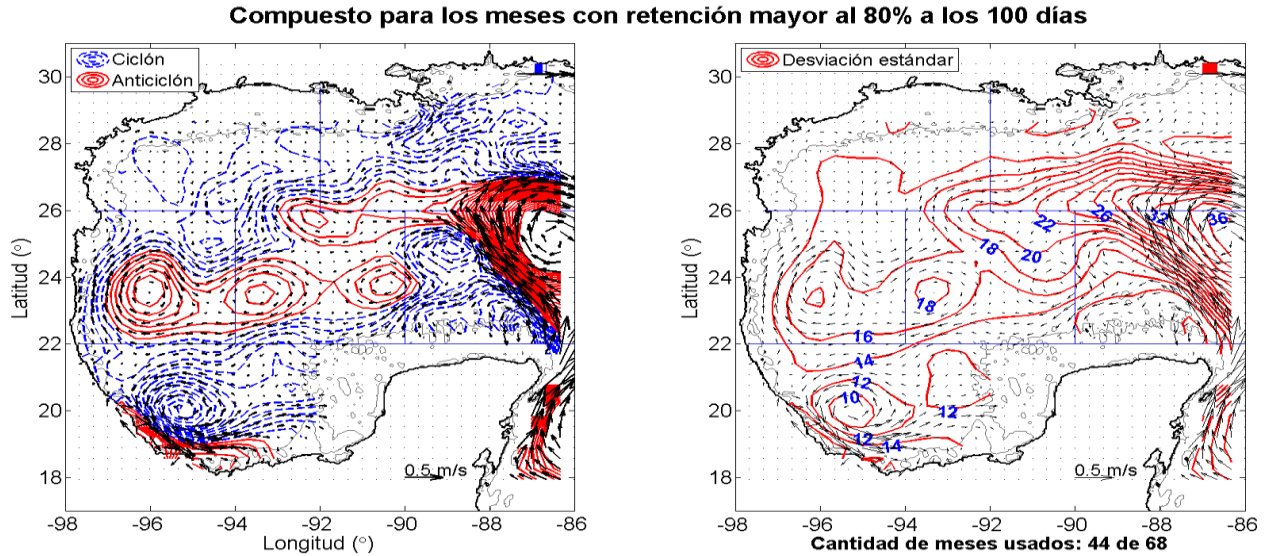


Figura 25: Compuesto de altimetría y velocidades geostróficas para los meses de retención mayor al 80% de partículas a los 100 días. Primera imagen: los vectores negros corresponden al campo geostrófico; las líneas discontinuas azules corresponden a giros anticiclónicos; las líneas continuas rojas corresponden a giros ciclónicos. Segunda imagen: desviación estándar (cm) de los datos de altimetría.

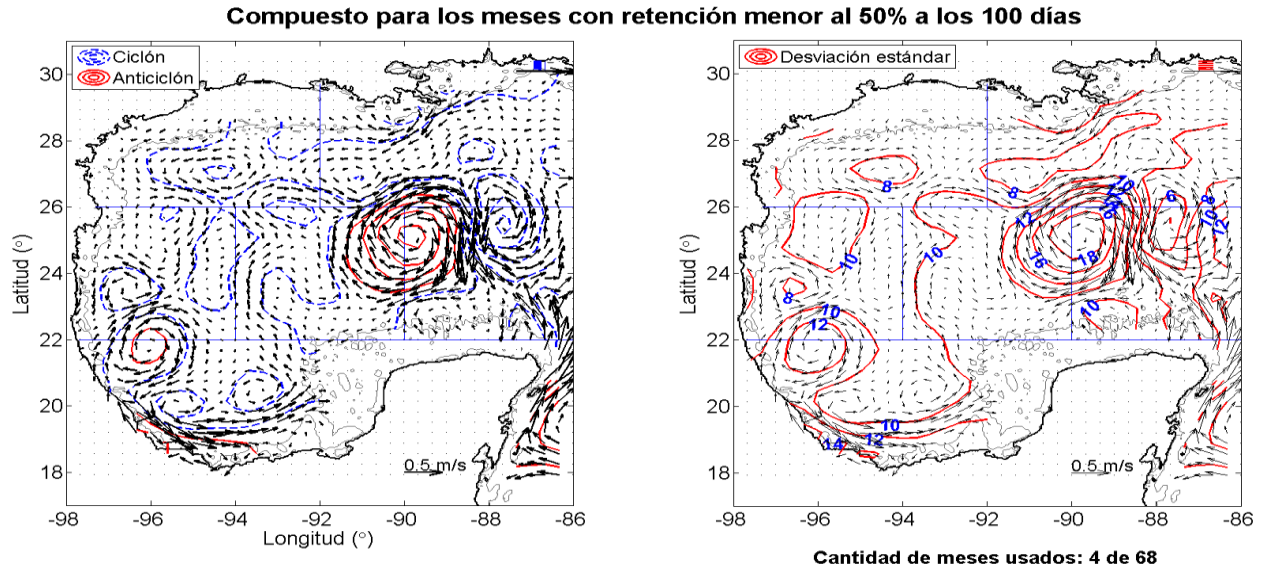


Figura 26: Compuesto de altimetría y velocidades geostróficas para los meses de retención menor al 50% de partículas a los 100 días. Primera imagen: los vectores negros corresponden al campo geostrófico; las líneas discontinuas azules corresponden a giros anticiclónicos; las líneas continuas rojas corresponden a giros ciclónicos. Segunda imagen: desviación estándar (cm) de los datos de altimetría.

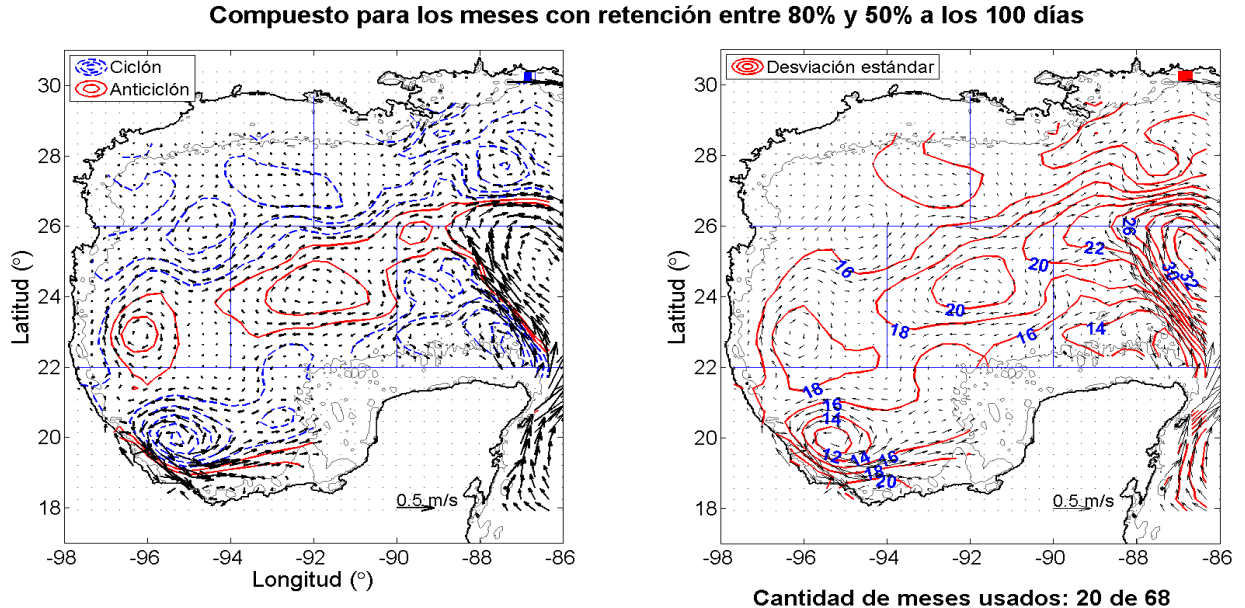


Figura 27: Compuesto de altimetría y velocidades geostróficas para los meses de retención mayor al 50% y menor al 80% de partículas a los 100 días. Primera imagen: los vectores negros corresponden al campo geostrófico; las líneas discontinuas azules corresponden a giros anticiclónicos; las líneas continuas rojas corresponden a giros ciclónicos. Segunda imagen: desviación estándar (cm) de los datos de altimetría.

En términos generales, lo que sugieren los compuestos de altimetría y velocidades geostróficas es que la capacidad de retención de la región de Campeche, estimada en el experimento “conectividad mensual”, se puede asociar a las estructuras de mesoescala dominantes en la región:

- Retención máxima (conectividad mínima) asociada a la presencia del giro ciclónico de Campeche cuándo éste no interactúa con otras estructuras de mesoescala.
- Retención mínima (conectividad máxima) asociada a la penetración de un remolino anticiclónico en la región de Campeche, y un giro ciclónico débil o inexistente.
- Retención intermedia asociada a la presencia del giro ciclónico que interactúa con un giro anticiclónico.

Es necesario dejar claro que el análisis de conectividad de la región de Campeche con el resto del golfo basado en las boyas reales y simuladas no mostró diferencias en la retención para estos tres tipos de condiciones (Figura 23). Solo se observaron estas diferencias al analizar las partículas del experimento “conectividad mensual”, cuyas trayectorias están dictadas por estimaciones geostróficas. Por lo tanto, hace falta explorar más qué tan relevantes son dichas estructuras en el nivel de retención observado en la región de Campeche.

3.4 Tiempos de residencia

El tiempo de residencia se definió como el tiempo transcurrido hasta el momento en que el trazador abandona la región de Campeche, por lo que representa el tiempo durante el cual el trazador estuvo moviéndose libremente en la región de Campeche. Sin embargo, es posible que se subestime el tiempo de residencia si es que se considera el instante que por primera vez el trazador sale de la región de Campeche, siendo que podría estar entrando y saliendo de la región durante cortos intervalos temporales. Esto sucede porque (1) la frontera de la región de Campeche es muy larga, (2) la variabilidad en la posición del giro de Campeche es alta, resultando en que parte de él puede ubicarse fuera de la región de Campeche y (3) un trazador atrapado en el giro ciclónico de Campeche tarda del orden de 7 días en darle la vuelta, por lo que en ese orden de días podría estar saliendo de y entrando a la región de Campeche. Para entender la

importancia e influencia de este tipo de situaciones, se calcularon los tiempos de residencia para los trazadores que permanecen más de 10, 20 o 30 días fuera de la región de Campeche antes de regresar, en caso de que lo haga. Los tiempos de residencia obtenidos después de aplicar dicha restricción no varían, por lo que se considera que un trazador ha abandonado definitivamente la región de Campeche trascurridos 10 días fuera de la región. No se tienen en cuenta a aquellos trazadores cuya trayectoria se interrumpe, ya sea dentro de la región de Campeche, al “llegar a costa”, o al cortarse la transmisión de datos en el caso de las boyas reales.

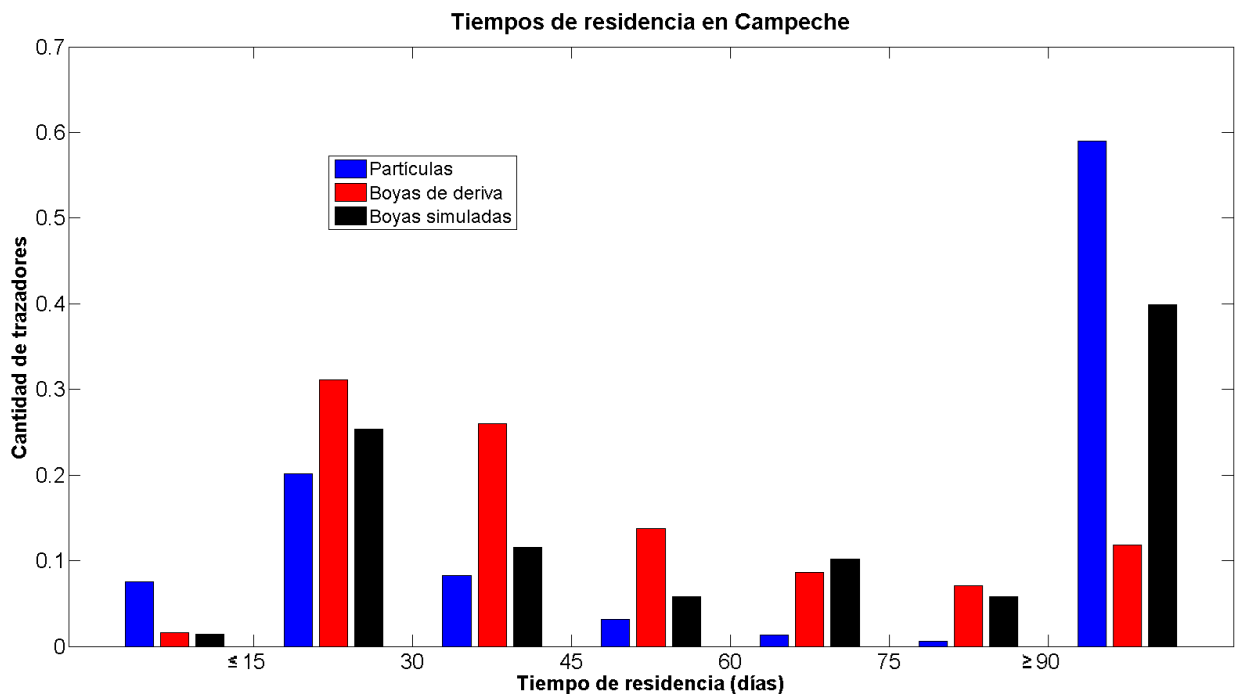


Figura 28: Histograma de frecuencias para el tiempo de residencia de los trazadores en la región de Campeche. Rojo, boyas reales; negro, boyas simuladas; azul, partículas del experimento “conectividad mensual”.

Los resultados, expresados en histogramas contruidos con bins de 15 días, muestran que hay un 60% de partículas del experimento “conectividad mensual” y un 40% de boyas simuladas que permanecen durante más de 90 días en la región de Campeche, mientras que solo el 10% de boyas reales duran más de 90 días en la región. Esto, nuevamente, indica que las partículas sintéticas están sobrestimando la capacidad de

retención de la región de Campeche. Las boyas reales presentan una mediana de 32 días de retención en la región de Campeche, mientras que para partículas y boyas simuladas se estimó una mediana de 100 y 60 días de retención respectivamente, por lo que claramente los tiempos de residencia obtenidos por aquellos trazadores advectados por corrientes medidas por AVISO sobreestiman los obtenidos con los de las boyas reales. Por último, se ha realizado el mismo cálculo para los meses de máxima retención y de mínima retención en busca de diferencias notables en los tiempos de residencia, pero los histogramas resultantes fueron similares a los obtenidos con base en todos los meses.

3.5 Tiempo de tránsito al norte

Se ha calculado el tiempo que tarda cada trazador en cruzar los 26° de latitud norte. Los histogramas resultantes fueron contruidos a partir de bins de 15 días. El tiempo de tránsito al norte de los tres tipos de trazadores tiene aproximadamente la misma probabilidad de ocurrir entre 30 y 90 días (Figura 29). Además, para los tres trazadores, la probabilidad de que el tiempo de tránsito entre la región de Campeche y el norte del golfo sea menor a 30 días es prácticamente nula (menor al 3%). La mayor diferencia es que las boyas simuladas muestran probabilidad nula de llegar antes de los 45 días a aguas norteamericanas.

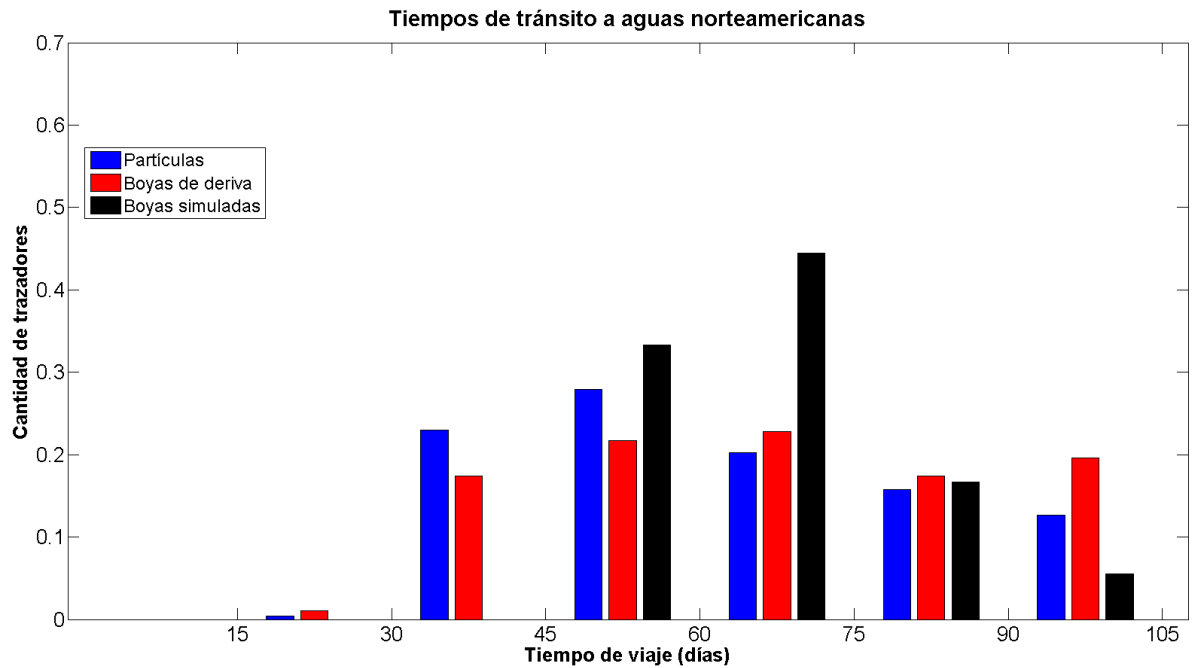


Figura 29: Histograma de frecuencias para el tiempo tránsito al norte. Rojo, boyas reales; negro, boyas simuladas; azul, partículas del experimento “conectividad mensual”.

Se ha realizado el mismo cálculo para los meses de máxima retención y de mínima retención en busca de diferencias notables en los tiempos de tránsito al norte, pero los histogramas resultantes son similares a los obtenidos al usar todos los meses.

Capítulo 4. Discusión y Conclusiones

4.1 Contexto oceanográfico

Desde un enfoque oceanográfico, en términos de conectividad estimada en base a las boyas reales, la región de Campeche es una región de retención (31.5% de las boyas reales a los 100 de experimento). El tiempo de residencia estimado fue muy variable, con una probabilidad cercana al 60% de permanecer menos de 45 días en Campeche, con una mediana del tiempo de residencia de 32 días. La advección hacia el norte de estas boyas se produce principalmente a través de la región Oeste. Tanto la región Oeste como la Centro se comportan como zonas de tránsito, expulsando tantas boyas como las que reciben. El tiempo de tránsito hacia aguas norteamericanas también es muy variable, pudiendo ser de 30 a más de 90 días con una probabilidad de ocurrencia similar. Aunque algunas boyas reales llegan a cruzar los 26° de latitud norte en 20 días, la probabilidad de que un trazador alcance aguas norteamericanas antes de los 30 días es menor al 3%. Transcurridos 100 días de experimento las regiones Este y Noreste apenas reciben trazadores (menos de 11% en cualquier instante). Las boyas reales presentaron un régimen de dispersión de tipo balístico (dependiente de t^2) desde las 3 horas hasta antes de los 10 días, y de tipo caminata aleatoria o browniano (lineal con el tiempo) a partir de ese momento.

El análisis de los trazadores sintéticos sugiere que la retención de la región de Campeche se sobrestima (58.5% de boyas simuladas y 80% de partículas a los 100 días). Además, esta retención puede variar en función de las estructuras de mesoescala que dominen el golfo de México. De esta manera, se presentarán mínimos de retención de trazadores sintéticos en aquellas situaciones donde el giro de Campeche no está bien desarrollado debido a la interacción con algún giro anticiclónico desprendido de la corriente del Lazo que ha penetrado a la región de Campeche, y máximos retentivos durante periodos en los que el giro ciclónico de Campeche esté presente y bien desarrollado. Sin embargo, no se encontró evidencia de la influencia de las estructuras de mesoescala en la retención de boyas reales en la región de Campeche y no queda claro por qué hay una diferencia tan notoria al respecto entre los

trazadores reales y los sintéticos. Falta analizar con más detalle el efecto que los anticiclones del Lazo u otras estructuras de mesoescala del interior del golfo puedan tener en la expulsión de trazadores de la región de Campeche. El tiempo de residencia estimado en base a los trazadores sintéticos predicen un 40% (boyas simuladas) o hasta 60% (partículas del experimento “conectividad mensual”) de probabilidad de pasar más de 90 días en esta región, por lo que se está sobrestimado el tiempo de residencia estimado con las boyas reales, tal y como sucede con la capacidad retentiva de la región de Campeche. La advección hacia el norte de las boyas simuladas y partículas del experimento “conectividad mensual” se produce tanto por la región Oeste como por la Centro, ambas funcionando como regiones de tránsito. Cabe mencionar que el análisis de las partículas del experimento “conectividad mensual” sugiere que la región Oeste puede funcionar como región de retención si un giro ciclónico está ubicado en ella. El tiempo de tránsito al norte, tal y como sucede con las boyas reales, es muy variable, pudiendo ser de 30 a 90 días con una probabilidad de ocurrencia similar para los dos tipos de trazadores. No se apreciaron variaciones en los tiempos de residencia en Campeche y de tránsito al norte asociadas a la presencia o ausencia de estructuras de mesoescala que sí afectaron a la retención de los trazadores virtuales en Campeche. Independientemente del trazador analizado y de las condiciones dinámicas que dominen el golfo de México, transcurridos 100 días de experimento las regiones Este y Noreste apenas reciben trazadores (menos de 11% en cualquier instante)

El análisis de las zonas de lanzamiento de trazadores, independientemente del trazador utilizado, demostró que aquellos lanzados en la zona de lanzamiento D, la más próxima a la ubicación promedio del giro de Campeche, fueron retenidos en el giro en mayor proporción que los trazadores lanzados en el resto de zonas.

Las boyas simuladas y las partículas del experimento “conectividad mensual”, así como las boyas reales, muestran el carácter retentivo del golfo de Campeche y un comportamiento similar en el patrón de dispersión, presentando un régimen de tipo balístico (dependiente de t^2) desde las 3 horas hasta antes de los 10 días, y de tipo caminata aleatoria o browniano (lineal con el tiempo) a partir de ese momento. La dispersión observada por las boyas reales fue, por lo general, dos veces más alta que

la de las boyas simuladas y entre 3 y 4 veces mayor a la de las partículas del experimento “conectividad mensual”, pero esta diferencia en magnitudes se produce por una mayor dispersión mostrada por las boyas reales en los momentos iniciales (antes de las 3 horas). Estas diferencias en la dispersión absoluta durante las 3 primeras horas pueden ser debidas a que las velocidades geostróficas con las que son advectadas las boyas simuladas y las partículas subestiman las velocidades de las boyas reales.

Este estudio podrá ser utilizado para estimar, como una primera aproximación, tiempos de residencia de larvas de especies de organismos de interés comercial en la región de Campeche y sus posibles destinos finales en el golfo de México. Aunque no se ha podido demostrar la influencia de estructuras de mesoescala en la capacidad retentiva de la región de Campeche en base a las boyas reales, las estimaciones de la conectividad en base a los trazadores sintéticos sugieren los máximos retentivos ocurren cuando el giro de Campeche está bien definido. Esta información, aplicada a estudios de distribución de organismos, concuerda con las conclusiones de los estudios realizados por Sabatés y Olivar (1996) y Flores-Coto, C. et al. (2014), en los que exponen que el choque entre giros (estando ambos giros bien formados) y el choque entre un giro y una corriente, generan frentes que funcionan como barreras que restringen el movimiento de organismos de un área a otra, lo cual, en términos de la conectividad de la región de Campeche con el resto del golfo de México, se corresponde con una situación de máxima retención (mínima conectividad). Flores-Coto et al. (2014) encuentran que la asociación de larvas características de la parte oceánica del golfo de Campeche, se encuentra aislada de otras asociaciones de larvas, ubicadas en la plataforma de Tabasco-Campeche y en la plataforma de Yucatán, y sugieren que esto es debido a la presencia del giro ciclónico de Campeche.

Utilizando la información sobre el tiempo de tránsito al norte obtenida por las boyas de deriva, y dado que las larvas oceánicas presentan un ciclo de vida de aproximadamente 30 días, es posible que éstas lleguen a cruzar la frontera de la Zona Económica Exclusiva de México, aunque con una probabilidad baja (menor al 3%).

En caso de un derrame de crudo ocasionado en el golfo de Campeche, este estudio podrá proporcionar información aproximada de los tiempos de tránsito a otras regiones del golfo de México de dicho vertido, aunque únicamente proporcionaría una idea para los casos más extremos debido a que el movimiento y advección de una partícula de aceite no depende únicamente de las estructuras de meso y submesoescala, sino que está sujeta a otros factores como la sedimentación y la degradación fisicobiológica, entre otros (Scholz et al., 1999). La información de los tiempos de residencia también es de utilidad para inferir el daño que un hipotético derrame en el golfo de Campeche pudiera ocasionar en las poblaciones de larvas específicas de la parte oceánica del golf, por ejemplo, dado que los tiempos de residencia más probables estimados para las boyas de deriva son del orden del ciclo de vida de las larvas, y que estas son retenidas en el giro de Campeche (Flores-Coto, C. et al., 2014), entonces un hipotético derrame podría afectar a toda las poblaciones de larvas ahí presentes.

4.2 Diferencias entre los tres trazadores

El uso de datos derivados de altimetría para obtener información sobre la dispersión y conectividad del golfo de Campeche con el resto del golfo de México indicó que esta aproximación sobrestima la capacidad de retención de la región de Campeche en aproximadamente un 30% (en el caso de las boyas simuladas) o hasta un 51% (en el caso de las partículas del experimento “conectividad mensual”). También se sobrestiman los tiempos de residencia en un 30% (en el caso de las boyas simuladas) o un 50% (en el caso de las partículas del experimento “conectividad mensual”). La comparación de la separación entre pares de trazadores sintéticos y reales muestra que la separación máxima entre sus trayectorias es de aproximadamente 300 km y ocurre entre los 50 y 100 días. En términos dispersivos, durante las primeras 3 horas la dispersión es mayor para las boyas reales (8 km^2 longitudinalmente y 7.5 km^2 latitudinalmente a las 3 horas) que para las boyas simuladas (6 km^2 longitudinalmente y 4.6 km^2 latitudinalmente a las 3 horas) y las partículas (2.2 km^2 longitudinalmente y 2.3 km^2 latitudinalmente a las 3 horas), momento a partir del cual los regímenes de dispersión son los mismos salvo por el momento en el que se produce el cambio de

régimen. Se observa un patrón de saturación de la dispersión, que puede ser debida al tamaño de la cuenca a nivel longitudinal, y a una alta correlación durante un largo periodo con las estructuras de mesoescala a nivel latitudinal, no tan apreciable para las boyas reales.

Una de las posibles razones por la cual el comportamiento de los trazadores sintéticos es diferente al de los trazadores reales, puede ser que las velocidades de los sintéticos están subestimadas frente a la de las boyas reales por los siguientes motivos:

- Los trazadores sintéticos no están sujetos a procesos ageostróficos.
- La escala espacial y temporal de los reportes de AVISO provocan que se subestimen las velocidades geostroficas.
- El efecto de la fricción artificial de los trazadores sintéticos cuando se acercan a regiones costeras: debido a la implementación de una máscara de costa, donde la velocidad se ha hecho 0, se genera una zona de velocidades muy bajas que no es representativa de la realidad.
- Advección de trazadores sintéticos hacia la plataforma continental frente a Campeche (Figura 19E, por ejemplo), mientras que las boyas reales no son advectadas en esa dirección (Figura 8).

Al no quedar claro el porqué de las diferencias en el comportamiento de los tres trazadores analizados, se propone analizar a futuro si se pueden obtener trayectorias sintéticas con los datos de altimetría que sean más realistas considerando las siguientes condiciones y criterios:

- Escoger las regiones de lanzamiento del experimento “conectividad mensual” centradas en los puntos de lanzamiento de las boyas de deriva, lo cual decidió no realizarse en este trabajo debido a la proximidad de estos puntos a la costa (y por ende a la máscara de tierra donde la velocidad se ha hecho nula, donde se corta la trayectoria de un alto porcentaje de partículas).
- Añadir variabilidad estocástica al cálculo de trayectorias sintéticas para simular los procesos de pequeña escala.

- Modificar el comportamiento de los trazadores sintéticos al acercarse a la plataforma continental. Por ejemplo, se puede imponer una condición de reflexión con la frontera.
- Incrementar la velocidad geostrófica en un porcentaje basado en la diferencia promedio entre la velocidad de las boyas reales y las obtenidas por AVISO.
- Interpolar las velocidades geostróficas derivadas de altimetría a una malla más fina y con una mejor resolución temporal.

Lista de Referencias

- Arvizu-Martinez, J. (1987). Fisheries activities in the gulf of California, Mexico. *CalCOFI Report*, Vol.: 28, 32-36.
- Barron, M. G. (2012). Ecological impacts of the Deepwater Horizon oil spill: implications for immunotoxicity. *Toxicol Pathol* published online 21 November 2011. doi: 10.1177/0192623311428474.
- Butler, M. J., Paris, C. B., Goldstein, J. S., Matsuda, H., and Cowen, R. K. (2011). Behavior constrains the dispersal of long-lived spiny lobster larvae. *Marine Ecology Progress Series*. Vol.: 422, 223-237.
- Chakravarti, I. M., Laha, R. G. and Roy, J. D. (1967). *Handbook of Methods of Applied Statistics*, Vol.: 1, John Wiley and Sons, pp. 392-394. New York.
- Cordero, N. (2015). Variabilidad estacional inducida por viento en la circulación del golfo de Campeche. (Tesis de Maestría) Centro de Investigación y de Educación Superior de Ensenada, Baja California., Ensenada, México.
- Cowen, R. K. and Sponaugle, S. (2002). Larval Dispersal and Marine Population Connectivity. *Annual Review of Marine Science*. Vol.: 1, 443-466. doi: 10.1146/annurev.marine.010908.163757.
- Cowen, R. K. and Sponaugle, S. (2009). Larval dispersal and marine population connectivity. *Annual Review of Marine Science*, 1, 443-466.
- Flores-Coto, C., Sanvicente-Añorve, L., Zavala-García, F., Zavala-Hidalgo, J., & Funes-Rodríguez, R. (2014). Environmental factors affecting structure and spatial patterns of larval fish assemblages in the southern Gulf of Mexico. *Revista de biología marina y oceanografía*. Vol.: 49(2), 307-321.
- Johnson, D. R., Perry, H. M., and Lyczkowski-Shultz, J. (2013). Connections between Campeche Bank and red snapper populations in the Gulf of Mexico via modeled larval transport. *Transactions of the American Fisheries Society*. Vol.: 142, 50-5. doi: 10.1080/00028487.2012.720630.
- Koszalka, I., LaCasce, J. H., and Mauritzen, C. (2013). In pursuit of anomalies - Analyzing the poleward transport of Atlantic Water with surface drifters. *Deep-Sea Research II*. Vol.: 85, 96-108.
- LaCasce, J. H. (2008). Statistics from lagrangian observations. *Progress in Oceanography*. Vol.: 77, 1-29.
- Leben, R. (2005). Altimeter-derived loop current metrics. In: Sturges, W., Lugo-Fernández, A. (eds). *Circulation in the Gulf of Mexico: observations and models*. Geophysical Monograph Series. (Vol.: 161, 181-202). American Geophysical Union, Washington, D. C.
- Manning, J. P., McGillicuddy Jr., D. J., Pettigrew, N. R., Churchill, J. H., and Incze, L. S. (2009). Drifter observations of the Gulf of Maine Coastal Current. *Continental Shelf Research*. Vol.: 29, 835-845.

- Marinone, S. G., Gutiérrez, O. Q., and Parés-Sierra, A. (2004). Numerical simulation of larval shrimp dispersion in the northern region of the Gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. Vol.: 60, 611-617. doi:10.1016/j.ecss.2004.03.002.
- Marinone, S. G. (2012). Seasonal surface connectivity in the Gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. Vol.: 100, 133-141. doi:10.1016/j.ecss.2012.01.003.
- Mitarai, S., Siegel, D. A., Watson, J. R., Dong, C., and McWilliams, J. C. (2009). Quantifying connectivity in the coastal ocean with application to the Southern California Bight. *Journal Of Geophysical Research*. Vol.: 114. doi:10.1029/2008JC005166.
- Muhling, B. A., Roffer, M. A., Lamkin, J. T., Ingram, G. W., Upton, M. A., Gawlikowski, G., and Richards, W. J. (2012). Overlap between Atlantic bluefin tuna spawning grounds and observed Deepwater Horizon surface oil in the northern Gulf of Mexico. *Marine pollution bulletin*, 64(4), 679-687.
- Paris, C. B., Chérubin, L. M., and Cowen, R. K. (2002). Surfing, spinning, or diving from reef to reef: effects on population connectivity. *Marine Ecology Progress Series*. Vol.: 347, 285-300. doi: 10.3354/meps06985.
- Pérez-Brunius, P., García-Carrillo, P., Dubranna, J., Sheinbaum, J., and Candela, J. (2013). Direct observations of the upper layer circulation in the southern Gulf of Mexico. *Deep-Sea Research II*. Vol.: 85, 182-194.
- Rooker, J. R., Kitchens, L. L., Dance, M. A., Wells, R. D., Falterman, B., and Cornic, M. (2013). Spatial, temporal, and habitat-related variation in abundance of pelagic fishes in the Gulf of Mexico: potential implications of the Deepwater Horizon oil spill. *PloS one*, 8(10), e76080.
- Sandoval, E. (2011). Estudio del ciclón en el Golfo de Campeche con datos lagrangeanos y experimentos de laboratorio. (Tesis de Maestría, Centro de Investigación y de Educación Superior de Ensenada, Baja California). Recuperada de: <http://www.biblioteca.cicese.mx>.
- Sabates, A., & Olivar, M. P. (1996). Variation of larval fish distributions associated with variability in the location of a shelf-slope front. *Marine ecology progress series. Oldendorf*, 135(1), 11-20.
- Schmitz Jr., (2005). Cyclones and Westward Propagation in the Shedding of Anticyclonic Rings from the Loop Current. In: Sturges, W., Lugo-Fernandez, A. (eds). *Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and Models*. American Geophysical Union, Washington, D. C. doi: 10.1029/161GM18.
- Scholz, D. K., Kucklick, J. H., Pond, R., Walker, A. H., Bostrom, A., and Fischbeck, P. (1999). Fate of spilled oil in marine waters: where does it go?, what does it do?, how do dispersant affect it?. *American Petroleum Institute*. Number 4691.
- Taylor, G. I. (1921). Diffusion by continuous movements. *Proceedings London Mathematical Society*. Vol: 20, 196-212.

- Thorrold, S. R., Zacherl, D. C., and Levin, L. A. (2007). Population connectivity and larval dispersal using geochemical signatures in calcified structures. *Oceanography*. Vol. 20, No. 3.
- Vázquez-de la Cerda, A. M., Reid, R. O., DiMarco, S. F., Jochens, A. E., (2005). Bay of Campeche circulation: an update. In: Sturges, W., Lugo-Fernández, A. (eds). *Circulation in the Gulf of Mexico: observations and models*. Geophysical Monograph Series. (Vol.: 161, 279–293). American Geophysical Union, Washington, D. C.