

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



---

**Maestría en Ciencias  
en Oceanografía Física**

---

**Estructuras lagrangianas coherentes y distribución  
de vertebrados pelágicos en el Golfo de México**

Tesis

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

Presenta:

**Daniela Yolanda Munguía Cajigas**

Ensenada, Baja California, México

2020

Tesis defendida por

**Daniela Yolanda Munguía Cajigas**

y aprobada por el siguiente Comité

---

Dr. Julio Sheinbaum Pardo

Director de tesis

Dra. Paula Pérez Brunius

Dr. Oscar Sosa Nishizaki



---

Dr. José Gómez Valdés

Coordinador del Posgrado en Oceanografía Física

---

Dra. Rufina Hernández Martínez

Directora de Estudios de Posgrado

*Daniela Yolanda Munguía Cajigas © 2020*

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

Resumen de la tesis que presenta Daniela Yolanda Munguía Cajigas como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Física.

## **Estructuras lagrangianas coherentes y distribución de vertebrados pelágicos en el Golfo de México**

Resumen aprobado por:

---

Dr. Julio Sheinbaum Pardo

Director de tesis

Se investiga la posibilidad de relacionar la distribución y comportamiento de algunos pelágicos mayores en el Golfo de México con estructuras lagrangianas coherentes definidas como máximos de los campos de los exponentes de Lyapunov de tiempo finito. Estos campos fueron calculados a partir de corrientes geostróficas obtenidas de datos de altimetría y una climatología de corrientes de modelos numéricos de circulación de alta resolución. Se analizan en particular las estructuras atrayentes sobreponiendo en ellas las posiciones diarias de ballenas piloto y de atunes aleta azul del Atlántico. Se muestra como las ballenas, generalmente, nadan pegadas al quiebre de la plataforma continental donde parecen seguir estructuras asociadas con la interacción de remolinos ciclónicos y anticiclónicos con la topografía al desplazarse de la Bahía de Campeche hacia la costa. La mayoría de los atunes atraviesan de este a oeste el Golfo de México en forma muy rápida sin seguir, aparentemente, ningún patrón. Sin embargo, al llegar al oeste del Golfo empiezan a desplazarse más lentamente alrededor de diferentes estructuras atrayentes. Se analiza también la distribución de estructuras lagrangianas coherentes persistentes y la distribución estacional de atunes aleta azul, encontrando que la presencia de una estructura atrayente persistente en el noroeste del golfo, coincide con la región donde los atunes se mantienen durante su etapa reproductiva. Experimentos numéricos indican que dicha región tiene una circulación anticiclónica relativamente persistente que tiende a retener partículas, lo cual, debido al uso del hábitat, podría explicar la presencia de atunes aleta azul en esta región. La identificación de estructuras atrayentes nos ayudó a entender mejor algunos de los procesos involucrados en el transporte de partículas que pueden explicar la presencia de pelágicos. Por otra parte, seguir la evolución de estructuras atrayentes nos sirvió para identificar al menos dos procesos importantes que pueden favorecer el forrajeo de ballenas piloto y que representan un refugio para los atún aleta azul durante su etapa reproductiva en dos regiones diferentes del Golfo de México.

**Palabras clave: Exponentes de Lyapunov de tiempo finito, estructuras lagrangianas coherentes, depredadores tope, Golfo de México**

Abstract of the thesis presented by Daniela Yolanda Munguía Cajigas as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Physical Oceanography.

## **Lagrangian coherent structures and distribution of pelagic vertebrates in the Gulf of Mexico**

Abstract approved by:

---

Dr. Julio Sheinbaum Pardo  
Thesis Director

This research looks into the possibility of relating the distribution and behavior of several major pelagic species in the Gulf of Mexico to Lagrangian coherent structures defined as ridges of finite-time Lyapunov exponent fields. These fields were calculated using geostrophic velocities obtained from altimetry data and a climatology from high-resolution numerical circulation models. In particular, the attracting structures are analyzed by superimposing on them the daily position of pilot whales and Atlantic bluefin tuna. The findings show that the whales usually swim close to the continental shelf break, where they seem to follow structures associated with the interaction of cyclonic and anticyclonic eddies with the topography as they move from the Bay of Campeche toward the coast. Most of the tuna cross the Gulf of Mexico quickly from east to west, without following any evident pattern. Upon arriving in the western Gulf, however, they begin to move more slowly around different attracting structures. In a second analysis, where we observed the distribution of persistent Lagrangian coherent structures and the seasonal distribution of bluefin tuna, we found that the presence of a persistent attracting structure in the northwestern part coincides with the region where the tuna stay during their reproductive season. Numerical experiments indicate that the northwestern region of the Gulf has a relatively persistent anticyclonic circulation that tends to retain particles. Due to the use of the habitat, this could explain the presence of bluefin tuna in the region. The identification of attracting structures helped us to better understand some of the processes involved in particle transport that could explain the presence of pelagic species. Moreover, following the evolution of attracting structures served to identify at least two processes that might favor foraging by pilot whales and offer refuge to bluefin tuna during their reproductive season in two different regions of the Gulf.

**Keywords: Finite-time Lyapunov exponent, Lagrangian coherent structures, marine top predators, Gulf of Mexico**

## **Dedicatoria**

***A mis padres Lucy y Roberto.***

***A mis hermanos Luz y J. R.***

***A mis sobrinos Roberto, Sofía, Emilio, Emma e Inés. Ojalá la historia de su tía despierte su curiosidad por la ciencia.***

## **Agradecimientos**

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada por darme la oportunidad y apoyo para estudiar una maestría en Oceanografía Física.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría. No. de becario: 634594.

Al Consorcio de Investigación del Golfo de Mexico (CIGoM) proyecto 20144 Fondo de hidrocarburos SENER-CONACyT y al Proyecto PEMEX-CICESE: Medición y Análisis Metoceánico del Golfo de México OC20200084 por los apoyos recibidos en la parte final de este trabajo. Este trabajo es parte del esfuerzo multidisciplinario impulsado por CIGoM de generar una explicación integral del gran sistema ecológico del Golfo de México.

A mi director de tesis, Julio por ayudarme a formar una mejor historia y aventurarse a explorar trayectorias de animales y partículas.

A mis sinodales, Paula y Oscar por compartir su sabiduría, ayudarme a organizar las ideas y en especial por su trato tan amigable.

A Zury, Masao y Concha por compartir de manera tan amable su valioso trabajo con los peces pelágicos y las ballenas piloto en el Golfo de México.

A mis compañeros de generación y a los miembros del club polideportivo CNSDN-TEE por complementar las mañanas, tardes y noches de estudio con momentos llenos de buenas vibras, risas y diversión.

A mis compañeras del equipo de básquetbol femenino del CICESE por ayudarme a mejorar y balancear las energías.

A Luis Daniel por estar conmigo durante todo el viaje.

# Tabla de contenido

	Página
Resumen en español .....	ii
Resumen en inglés .....	iii
Dedicatoria .....	iv
Agradecimientos .....	v
Lista de figuras .....	viii
<b>Capítulo 1. Introducción</b>	
1.1. Antecedentes .....	4
1.2. Justificación .....	7
1.3. Objetivos .....	9
1.4. Área de estudio .....	9
1.4.1. El sistema de la corriente de Lazo .....	9
1.4.2. Estructuras climatológicas atrayentes .....	10
1.4.3. Estructuras climatológicas atrayentes del oeste del GoM .....	11
1.4.4. Distribución de vertebrados pelágicos en el Golfo de México ..	12
1.4.4.1. Atún aleta azul del Atlántico .....	12
1.4.4.2. Ballena piloto .....	13
<b>Capítulo 2. Metodología</b>	
2.1. Exponentes de Lyapunov de Tiempo Finito .....	15
2.2. Datos .....	18
2.2.1. Altimetría y velocidades geostróficas .....	18
2.2.2. Velocidades no geostróficas .....	19
2.2.3. Registros diarios .....	19
2.2.4. Registros históricos .....	20
2.3. Cálculo de densidades .....	21
<b>Capítulo 3. Resultados</b>	
3.1. LCS y trayectorias de atunes aleta azul .....	22
3.2. LCS y trayectorias de ballenas piloto .....	26
3.3. Distribución de los valores de los FTLEs .....	29
3.4. Estructuras persistentes y densidades de atún aleta azul .....	34
3.5. Resumen de los resultados .....	39
<b>Capítulo 4. Discusión</b>	
4.1. El movimiento de los vertebrados pelágicos y su relación con el ambiente .....	40
4.2. Ballenas piloto y estructuras sobre el talud .....	41
4.3. Atunes aleta azul y estructuras del norte .....	43

## **Tabla de contenido (continuación)**

### **Capítulo 5. Conclusiones**

<b>Literatura citada .....</b>	<b>46</b>
--------------------------------	-----------

## Lista de figuras

Figura	Página
1. Modelo conceptual de congregación de atunes y peces voladores en un dipolo formado detrás de las islas Palaos, tomado de Bakun (2006). . . . .	5
2. Depredadores tope sobre estructuras lagrangianas coherentes como máximos de exponentes de Lyapunov representados con mapas de colores. (a) Puntos de captura de párpadas del Pacífico, triángulos, sobre exponentes de Lyapunov de tiempo finito (máximos en tonos oscuros) frente a Japón. Tomada de Prants <i>et al.</i> (2012). (b) Trayectoria de vuelo de fragata pelágica, línea amarilla y estrategias de vuelo, puntos de colores (vuelo bajo en magenta, descenso rápido en azul, descenso lento en rojo, ascenso lento en verde y ascenso rápido en cyan) sobre exponentes de Lyapunov de tamaño finito (máximos en tonos oscuros) en el canal de Mozambique. Tomada de De Monte <i>et al.</i> (2012). (c) Trayectorias semanales de ballenas de aleta, puntos de colores (cada color representa una ballena), sobre exponentes de Lyapunov de tamaño finito (máximos en tonos cálidos) en el mar Mediterráneo. Tomada de Cotte <i>et al.</i> (2011). (d) Trayectoria de un elefante marino, línea negra y puntos de buceos de forrajeo, círculos blancos, sobre mapa del exponente de Lyapunov de tamaño finito (máximos en tonos verdes) en el Pacífico norte. Tomada de Abrahms <i>et al.</i> (2018). . . . .	6
3. Modelo conceptual de la circulación de gran escala del Golfo de México. Entrada de la corriente de Lazo por el estrecho de Yucatán, línea verde y salida de la corriente por el estrecho de Florida, línea negra. Ubicaciones de la corriente dentro del GoM en estado retraído, línea roja y en estado extendido, línea azul. Remolinos anticiclónicos de lazo, círculo naranja. Plataforma continental, polígono azul. Tomada de Otis <i>et al.</i> (2019). . . . .	10
4. Estructuras lagrangianas coherentes atrayentes obtenidas con salidas de modelos de alta resolución. (a) LCS atrayentes de calculadas con promedios diarios del modelo HYCOM para el mes de diciembre. Tomada de Duran <i>et al.</i> (2018). (b) LCS atrayentes anuales calculadas con promedios diarios del modelo NEMO. Tomada de Gough <i>et al.</i> (2019). Los colores indican los niveles de atracción, tonos cálidos representan más atracción. . . . .	11
5. Distribución de atunes aleta azul. (a) Trayectoria mensuales, líneas de colores, de un individuo marcado en la costa de Carolina del Norte, círculos y triángulos de colores. Tomada de Teo <i>et al.</i> (2007a). (b) Densidad de atunes basada en posiciones satelitales registradas durante 5 años (1999-2004) y registros de captura tomados de datos del <i>US scientific observer and US logbook data</i> . Tomada de Block <i>et al.</i> (2005). (c) Modelo de hábitat potencial calculado con el método MaxEnt por el Laboratorio de Ecología Pesquera del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) para el Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGoM). . . . .	13

## Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
6. Recorridos de animales seguidos dentro y fuera del GoM. (a) Trayectorias de nueve atunes aleta azul del atlántico en líneas de colores (cada color representa un individuo), marcados en las costas canadienses. (b) Trayectorias de siete ballenas piloto, líneas de colores (cada color representa un individuo), marcados en las costas veracruzanas y el contorno al interior del GoM representa la isobata de 200m. Los puntos rojos representan el inicio de la trayectoria y los puntos negros el fin. En los recuadros superiores se encuentra la duración y la distancia recorrida por cada individuo durante su marcaje, en rojo se resalta la trayectoria más larga. Nota: el código de colores por individuo que observamos esta figura será el mismo a lo largo de todo el trabajo. . . . .	20
7. Distribución estacional de atún aleta azul dentro del GoM. Posiciones de 44 atunes aleta azul de 11 años (2001-2012) de marcas de satelitales (puntos de colores). Los colores representan los registros por estaciones. Los recuadros grandes negros representan la malla en la que se calcularon las densidades de puntos. Esta información se puede encontrar como parte del material suplementario del trabajo de Rooker <i>et al.</i> (2019). . . . .	20
8. Trayectorias mensuales de atunes aleta azul, líneas de colores, sobre campos del FTLE atrayente con máximos en tonos oscuros. Cada punto en la trayectoria está separado un día. Cada color representa un individuo. Los puntos rojos son las posiciones iniciales y los negros las posiciones finales de las trayectorias. El contorno beige representa la isobata de 200 m asociada al talud continental. (a) Trayectorias de diciembre del 2010, (b) trayectorias de enero del 2011, (c) trayectorias de febrero del 2018 y (d) trayectorias de marzo del 2018. . . . .	23
9. Posiciones iniciales de trazadores pasivos sobre el campo de FTLE atrayente. Los puntos azules se encuentran posicionados sobre los centros de cuatro remolinos ciclónicos. Los puntos cyan se encuentran posicionados sobre las periferias de los mismos cuatro remolinos ciclónicos. Los puntos verdes se encuentran posicionados sobre los centros de cuatro remolinos anticiclónicos. Los puntos limón se encuentran posicionados sobre las periferias de los mismos cuatro remolinos anticiclónicos. El mapa de la derecha es un zoom al recuadro rojo del mapa de la izquierda. . . . .	24
10. Evolución en ventanas de cinco días de los trazadores de remolinos y trayectorias de tres atunes aleta azul sobre FTLE atrayente. La longitud de las líneas de colores representa la distancia que recorrieron los atunes en cinco días. Cada atún está identificado con un color distinto al de los trazadores. El código de colores de los trazadores es el mismo que la figura 9. . . . .	25

## Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
11. Trayectorias mensuales de ballenas piloto, líneas de colores, sobre campos del FTLE atrayente con máximos en tonos oscuros. Los puntos en las trayectorias están espaciados un día. Cada color representa un individuo. Los puntos rojos son las posiciones iniciales y los negros las posiciones finales de las trayectorias. El contorno beige representa la isobata de 200 m asociada al talud continental. (a) Trayectorias de mayo del 2018 y (b) trayectorias de junio del 2018. . . . .	26
12. Posiciones iniciales de trazadores pasivos sobre el campo de FTLE atrayente. Los puntos azules se encuentran posicionados sobre los centros de dos remolinos ciclónicos. Los puntos cyan se encuentran posicionados sobre las periferias de los mismos dos remolinos ciclónicos. Los puntos verdes se encuentran posicionados sobre los centros de dos remolinos anticiclónicos. Los puntos limón se encuentran posicionados sobre las periferias de los mismos dos remolinos anticiclónicos. El mapa de la derecha es un zoom al recuadro rojo del mapa de la izquierda. . . . .	27
13. Evolución de los trazadores de remolinos y trayectorias ballenas piloto sobre FTLE atrayente. La longitud de la líneas de colores representan la distancia que recorrió cada ballena en dos días. Cada ballena está identificada con un color distinto al de los trazadores. El código de colores de los trazadores es el mismo que el de la figura 12. . . . .	29
14. Distribución de los valores de los FTLE atrayentes evaluados en las trayectorias seguidas por los individuos en el GoM. (a) Atunes azules y (b) ballenas piloto. El alto de cada caja esta delimitado por los percentiles 25 y 75. La línea que se encuentra dentro de la caja es la mediana o el percentil 50. El largo de los bigotes de las cajas está delimitado por los valores mínimos (parte inferior de la caja) y máximos (parte superior de la caja). Las cruces rojas representan los valores atípicos. La línea horizontal negra representa el valor de la mediana de los campos del FTLE para todo el GoM. . . . .	30
15. Frecuencias relativas de los valores del FTLE atrayente en puntos de trayectorias diarias de pelágicos, barras grises y en los puntos de malla, barras negras. (a) Atunes aleta azul y (b) Ballenas piloto. La línea vertical roja representa el valor de la mediana de los campos del FTLE para todo el GoM. . . . .	31
16. Evolución diaria de valores de FTLE y anomalías del nivel del mar evaluados en puntos de trayectorias. (a) y (b) atunes aleta azul y (c) y (d) ballenas piloto. Cada color representa un individuo. Las líneas negras son la mediana de los FTLE y el cero en las anomalías del nivel del mar. Las áreas sombreadas representan eventos particulares en los que se encuentran valores altos de SLA y de FTLE. . . . .	32

## Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
17. Evolución diaria de valores de FTLE y anomalías del nivel del mar evaluados en puntos de trayectorias. (a) y (b) atunes aleta azul y (c) y (d) ballenas piloto. Cada color representa un individuo. Las líneas negras son la mediana de los FTLE y el cero en las anomalías del nivel del mar. . . . .	33
18. FTLE atrayente climatológico obtenido de la climatología del modelo NEMO.	35
19. Densidades de atún aleta azul durante invierno (enero, febrero y marzo) y primavera (abril, mayo y junio). . . . .	36
20. Promedios estacionales de densidades de partículas. Invierno (enero, febrero y marzo), primavera (abril, mayo y junio), verano (julio, agosto y septiembre) y otoño (octubre, noviembre y diciembre). . . . .	37
21. Posiciones iniciales de partículas de partículas sembradas en el noroeste del GoM. . . . .	38
22. Posiciones finales de partículas advectadas con promedios diarios de campos geostroficados. . . . .	38
23. Ballenas piloto en el Atlántico norte. (a) Densidades Kernel de las posiciones de 33 ballenas seguidas con marcadores satelitales. (b) Trayectoria de 15 días de una de las ballenas seguidas sobre un mapa de temperatura superficial del mar del 22 de julio del 2014. Tomadas de Thorne <i>et al.</i> (2017). . . . .	42
24. Atunes aleta azul en el Golfo de México durante su etapa reproductiva. (a) Porcentaje de uso del hábitat. Tomada de Teo <i>et al.</i> (2007b). (b) Hábitat potencial para desovar (abril a mayo) basado en un modelo de nicho ecológico. Tomada de Druon <i>et al.</i> (2016). . . . .	44

## Capítulo 1. Introducción

---

Los avances en percepción remota nos han permitido observar algunas propiedades del océano a diferentes escalas. Sumado a esto, la capacidad de crear sensores cada vez más completos, también ha hecho posible rastrear a diferentes animales marinos en sus viajes en búsqueda de alimento, refugio o reproducción (Hussey *et al.*, 2015). Gracias a toda esta información es que se ha podido estudiar el comportamiento de vertebrados pelágicos mayores en función de diferentes variables ambientales y variables dinámicas a diferentes escalas espacio-temporales.

Actualmente existen muchos estudios acerca de la distribución de vertebrados pelágicos y su relación con variables ambientales observadas de manera remota (e. g. Teo *et al.* 2007b). Sin embargo, debido a las condiciones de las cuencas y/o a la resolución de los datos no siempre es posible establecer relaciones claras entre los animales y su ambiente. Como alternativa o en conjunto con el estudio de variables ambientales, estudiar la dinámica de mesoescala es de gran relevancia para entender el manejo de energía y patrones de forrajeo de diferentes depredadores especialmente en regiones con condiciones oligotróficas, donde estructuras de meso y submesoescala como remolinos, filamentos y corrientes intensas, son las encargadas de fertilizar y proveer de alimento a los grandes depredadores (Mullin *et al.*, 2004) y (Cotte *et al.*, 2011).

Los métodos lagrangianos permiten entender directamente la dinámica de mesoescala a través del seguimiento de partículas que se mueven con las corrientes. Actualmente se pueden conocer los campos de corrientes en tiempos discretos a partir de observaciones de satélite y con ellos obtener trayectorias de partículas sintéticas. Las ecuaciones diferenciales obtenidas de estos campos representan sistemas dinámicos, lo que nos permite aplicar herramientas de análisis de dichos sistemas para entender el transporte en el océano. Un ejemplo de este tipo de herramientas son las estructuras lagrangianas coherentes (LCS por sus siglas en inglés) (Haller y Yuan, 2000).

Las LCS son líneas materiales que atraen o repelen a las partículas de fluido más que cualquier otra línea que se encuentre cercana a ellas (Peacock y Haller, 2013). En términos de sistemas dinámicos, las LCS repelentes y atrayentes representan la generalización de las variedades estables e inestables que dependen de los puntos fijos hiperbólicos que aparecen en flujos sin dependencia temporal o con dependen-

cia temporal periódica (Shadden *et al.*, 2005). Tanto en sistemas autónomos como en sistemas dependientes del tiempo, nos interesa estudiar las variedades y LCS porque permiten identificar regiones con diferentes características dinámicas (i. e. remolinos y frentes), así como entender las barreras de transporte y las características de los procesos de mezcla e intercambio entre ellas y sus alrededores.

Los remolinos oceánicos son de gran importancia para los científicos del mar, pues están presentes en todos los océanos y en todas las escalas. En particular, los remolinos de mesoescala pueden jugar un papel fundamental en mares marginales como el Golfo de México (GoM). Siendo la variabilidad espacio-temporal mas energética en el océano ha hecho que sean llamados el “tiempo del océano”, en analogía con tiempo atmosférico (Robinson, 1983). Debido a su dinámica no lineal, los remolinos de mesoescala pueden ser los responsables del transporte de sus propiedades de un lugar a otro y de modificar la distribución horizontal (i.e. parches y filamentación) y la estructura vertical de diferentes variables físicas, químicas y biológicas (Robinson, 1983) y (Olson, 1991).

Los remolinos son clasificados como anticiclónicos y ciclónicos por el sentido de su giro con respecto al de la rotación de la Tierra. Los remolinos anticiclónicos, muy intensos, forman un domo en la superficie del mar y tienden a hundir la termoclina, lo que permite que el volumen de agua contenido en el interior del remolino se más cálido que el del agua que lo rodea. Debido a esto los remolinos anticiclónicos son también llamados remolinos cálidos. Por el contrario, los remolinos ciclónicos, también intensos, forman una depresión en la superficie del mar y tienden a elevar la termoclina, lo que hace que el agua dentro del remolino sea mas fría que en sus alrededores y los lleve a ser nombrados remolinos fríos. La curvatura de las isopcnas hace que los ciclones estén mas estratificados con los nutrientes mas cerca de la superficie mientras que lo opuesto ocurre en los anticiclones.

La intensificación de un ciclón o el decaimiento de un anticiclón puede llevar nutrientes del interior del océano hacía la superficie donde pueden estimular el crecimiento del fitoplancton y así incrementar la productividad primaria, esto también puede producirse por la interacción de los remolinos con el viento (e.g. McGillicuddy y Robinson 1997 y Bakun 2006). En ambos remolinos las mayores velocidades se pueden encontrar en las periferias y los perfiles de las diferentes propiedades (i. e. tem-

peratura, salinidad y oxígeno) cambian con respecto a la distancia hacia el centro del remolino y con el tiempo. Es en sus fronteras donde existe un contraste importante de propiedades que puede considerarse como un frente en el que se generan inestabilidades que dan lugar a la formación de estructuras de submesoescala que tienen velocidades verticales intensas favoreciendo el intercambio con el océano profundo (Mahadevan, 2016). En este sentido se puede esperar la presencia de depredadores en búsqueda de comida o refugio (e. g. Luo *et al.* 2015, Gaube *et al.* 2018 y Braun *et al.* 2019).

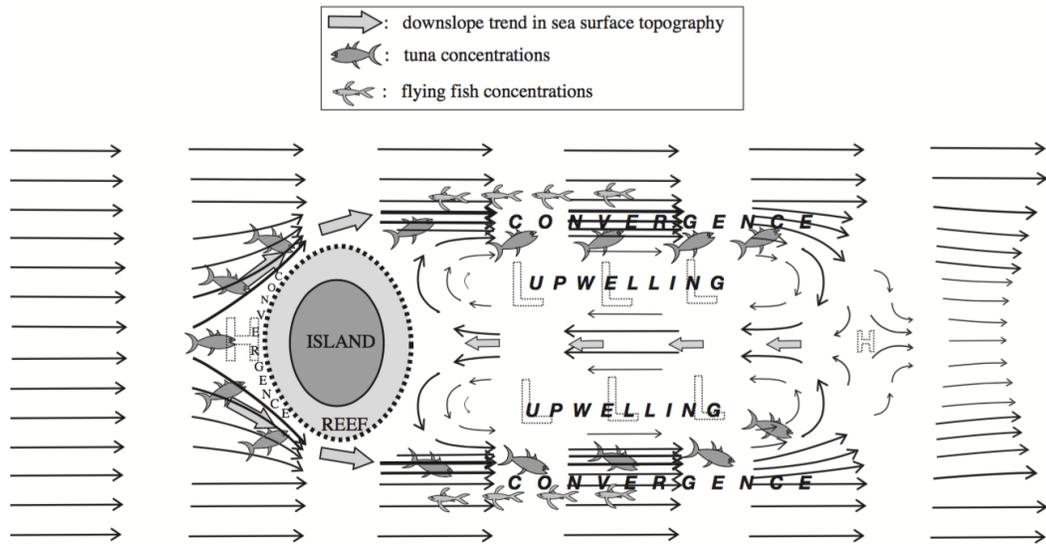
Otro proceso que es capturado por las LCS y que puede modificar la distribución de diferentes propiedades son los frentes. Aunque existen diferentes tipos, los frentes que se forman en el talud continental conocidos en inglés como *shelf-break fronts*, son bien conocidos por aumentar la productividad primaria (Mann y Lazier, 2005). Estos frentes son formados por gradientes de las propiedades (i. e. temperatura y salinidad) entre las aguas continentales y profundas que se encuentran en el quiebre de la plataforma (Chapman y Lentz, 1993) y (Condie, 1993). Si consideramos que las aguas de la parte somera/costera de la plataforma son menos densas que las aguas de la parte profunda (e.g. por presencia de agua dulce, calentamiento), la corriente sobre la plataforma puede hacer que el agua de fondo de la parte costera del quiebre suba a la superficie debido al transporte de Ekman de fondo. Ese tipo de circulación promueve la redistribución de los nutrientes en la columna de agua, lo que a su vez puede resultar favorable para la producción primaria (Franks, 1992) y (Mann y Lazier, 2005).

Por otra parte, se ha observado que debido a sus características dinámicas, los frentes tienden a concentrar material (presas) en la superficie, lo que hace que sean lugares favorables para el forrajeo de diferentes depredadores marinos, como aves marinas, mamíferos marinos (e. g. Hunt *et al.* 1990 y Bost *et al.* 2009 ) y peces pelágicos (e. g. Bakun 2006 y Snyder *et al.* 2017). La dinámica de estos frentes es complicada, ya que están influenciadas por los vientos y flujos superficiales además de que pueden ser inestables generando meandros y remolinos además de interactuar con remolinos de mesoescala de la parte profunda (Brink, 2016).

## 1.1. Antecedentes

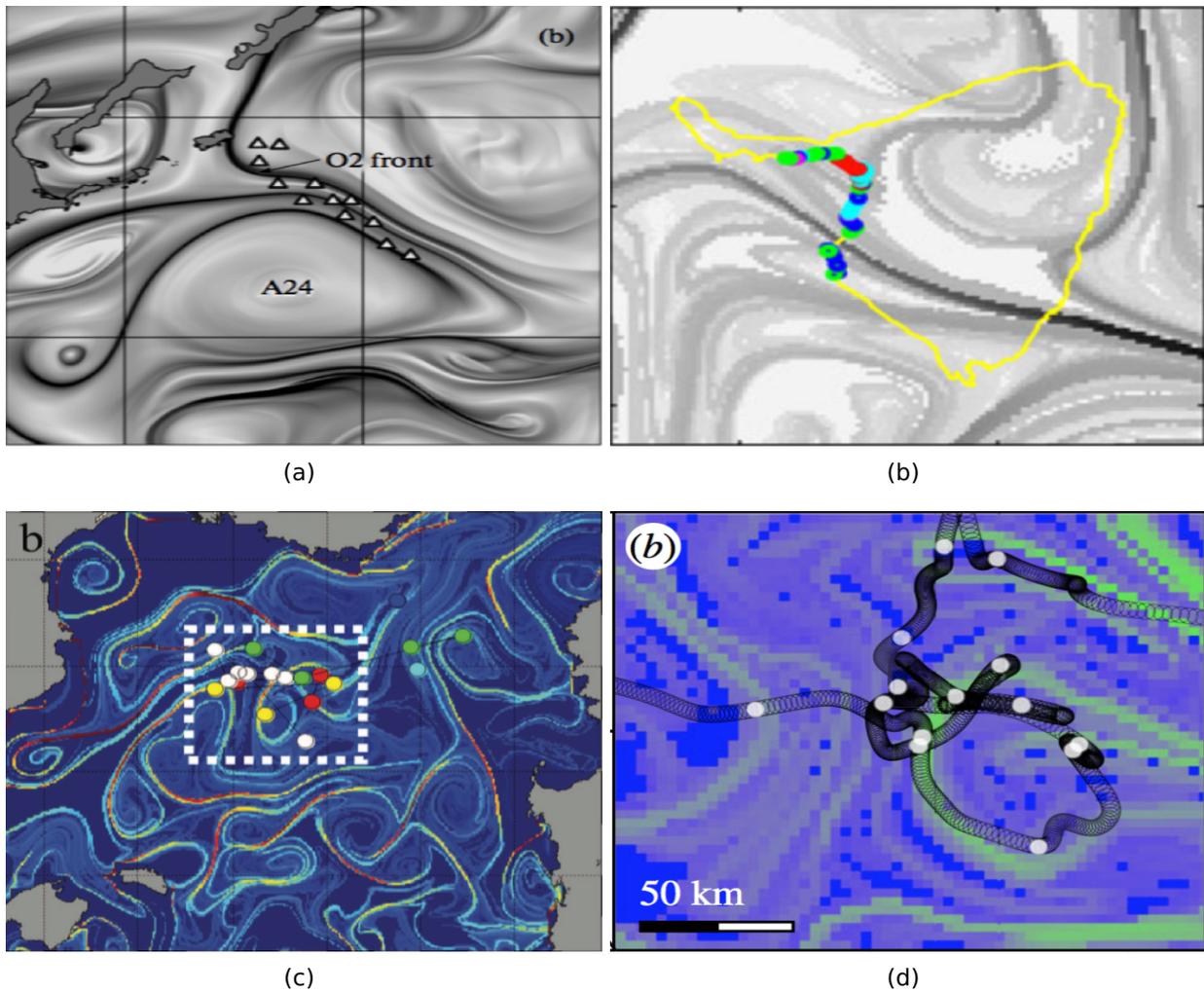
En el océano las LCS han sido usadas para identificar periferias de remolinos, frentes y corrientes intensas con el fin de entender el transporte de partículas pasivas en regiones donde la dinámica está dominada por este tipo de estructuras (e. g. Lekien *et al.* 2005 y Olascoaga 2010). Más recientemente se ha propuesto el uso de climatologías de modelos de circulación de alta resolución para calcular LCS climatológicas dentro del Golfo de México (e.g. Duran *et al.* 2018). Estas estructuras persistentes o climatológicas permiten identificar patrones de transporte recurrentes con los que también se pueden encontrar diferentes regiones dinámicas y explicar incluso lo sucedido durante eventos particulares, como los derrames de petróleo del Ixtoc y Macondo (Duran *et al.*, 2018). El control del transporte que ejercen las LCS *instantáneas* y climatológicas parece ser relevante para el movimiento y comportamiento de vertebrados pelágicos pues modifican constantemente las propiedades del ambiente en que estos se alimentan, reproducen y crían.

Algunas de las primeras ideas que sugirieron la posible relación entre vertebrados pelágicos y LCS fueron descritas por pescadores nativos de las islas Palaos ubicadas en el Pacífico ecuatorial frente a las costas del sur de las Filipinas. En dicha región el flujo se ve modificado por la presencia de las islas, lo que hace que se formen estructuras dipolares que concentran, en sus periferias, la comida de peces pequeños tales como peces voladores, los cuales a su vez, atraen a peces más grandes como atunes (figura 1), (Johannes (1981) en Bakun (2006)).



**Figura 1.** Modelo conceptual de congregación de atunes y peces voladores en un dipolo formado detrás de las islas Palaos, tomado de Bakun (2006).

Las ideas de los pescadores acerca de los remolinos y presencia de peces se han confirmado con el seguimiento satelital de estructuras lagrangianas coherentes y de vertebrados marinos con marcas microelectrónicas. Un ejemplo de este tipo de trabajos es el de Prants *et al.* (2012), donde se estudian las posiciones de barcos pesqueros y de LCS en la corriente de Kuroshio, donde durante el otoño del 2004, se registraron grandes capturas de parpada del Pacífico alineadas sobre LCS atrayentes (ver en figura 2 (a)). Los estudios de Tew Kai *et al.* (2009) y De Monte *et al.* (2012) sobre los vuelos de forrajeo de algunas fragatas pelágicas en el canal de Mozambique, también confirman que las LCS atrayentes tienden a acumular presas y así llamar la atención de depredadores. En ambos trabajos lograron observar que las fragatas son capaces de detectar LCS atrayentes desde el aire (ver figura 2 (b)), debido a la acumulación de otros depredadores subsuperficiales, por ejemplo atunes, quienes siguen a sus presas alineadas sobre estas estructuras. Por otra parte, Cotte *et al.* (2011) encontraron que, un grupo de ballenas de aleta del Mediterráneo buscan diferentes estructuras como filamentos y periferias de remolinos durante sus viajes semanales de forrajeo, como se observa en la figura 2 (c). Este tipo de comportamiento también fue registrado en el trabajo de Abrahms *et al.* (2018) quienes rastrearon elefantes marinos durante su migración sobre el Pacífico Norte (figura, 2) (d). En ambos trabajos sobre mamíferos marinos observaron que estos aprovechan la energía derivada de la actividad de mesoescala para optimizar sus estrategias de forrajeo.



**Figura 2.** Depredadores tope sobre estructuras lagrangianas coherentes como máximos de exponentes de Lyapunov representados con mapas de colores. (a) Puntos de captura de párpadas del Pacífico, triángulos, sobre exponentes de Lyapunov de tiempo finito (máximos en tonos oscuros) frente a Japón. Tomada de Prants *et al.* (2012). (b) Trayectoria de vuelo de fragata pelágica, línea amarilla y estrategias de vuelo, puntos de colores (vuelo bajo en magenta, descenso rápido en azul, descenso lento en rojo, ascenso lento en verde y ascenso rápido en cian) sobre exponentes de Lyapunov de tamaño finito (máximos en tonos oscuros) en el canal de Mozambique. Tomada de De Monte *et al.* (2012). (c) Trayectorias semanales de ballenas de aleta, puntos de colores (cada color representa una ballena), sobre exponentes de Lyapunov de tamaño finito (máximos en tonos cálidos) en el mar Mediterráneo. Tomada de Cotte *et al.* (2011). (d) Trayectoria de un elefante marino, línea negra y puntos de buceos de forrajeo, círculos blancos, sobre mapa del exponente de Lyapunov de tamaño finito (máximos en tonos verdes) en el Pacífico norte. Tomada de Abrahms *et al.* (2018).

Si bien los métodos lagrangianos utilizados en los trabajos mencionados previamente parecen tener las mejores propiedades para el análisis de estructuras de mesoescala, existen otras perspectivas (i. e. observaciones Eulerianas) que pueden usarse para entender procesos de mesoescala y el movimiento de pelágicos (e. g. Snyder *et al.* 2017, Gaube *et al.* 2018 y Braun *et al.* 2019). Con el uso de marcas satelitales

de tiburones blancos, (Gaube *et al.*, 2018) y de tiburones azules (Braun *et al.*, 2019), y series de tiempo de campos de anomalías del nivel del mar en el Atlántico Norte, los diferentes autores reportaron que los tiburones frecuentan muy seguido los interiores de remolinos anticiclónicos. En ambos trabajos se menciona que una posible razón del interés de los tiburones por los remolinos anticiclónicos, es que las condiciones de la columna de agua dentro del remolino les permiten realizar buceos más profundos para alcanzar a sus presas. Por otra parte, Snyder *et al.* (2017) observaron, con marcas de atunes albacora y mapas de temperatura superficial del mar del Pacífico norte frente a Baja California, que los atunes albacora usan los frentes como fuentes de energía con los que mejoran su forma de cazar a sus presas.

Otros estudios más comunes son aquellos en los que se analizan variables ambientales, como la temperatura del mar y sus gradientes, la concentración de clorofila, la energía cinética por remolinos y la batimetría en conjunto con la presencia de pelágicos (e. g. Maul *et al.* (1984), Block *et al.* (2001), Teo *et al.* (2007a), y Teo *et al.* (2007b)). En conjunto, con los trabajos ya mencionados, todos estos estudios conforman las bases para investigar la relación existente entre estructuras de circulación oceánica y el comportamiento de pelágicos mayores dentro del GoM, particularmente aquellas que pueden identificarse con estructuras lagrangianas coherentes.

## **1.2. Justificación**

En el trabajo de Bakun (2006) donde se estudian dos procesos físicos particulares, frentes y remolinos, que regulan procesos ecológicos como la dinámica poblacional se concluye que no basta con estudiar valores medios o rangos de valores de las variables ambientales (i.e. la gran escala) para entender los procesos ecológicos. Entonces, Bakun (2006) propone la investigación orientada a fenómenos de mesoescala y menor, pues generalmente son los encargados de modificar las propiedades del ambiente que funciona como hábitat para diferentes especies.

Desde la década pasada se han incrementado el número de estudios como los citados en la sección de antecedentes, en los que se investigan las relaciones entre el movimiento de vertebrados pelágicos y la circulación de los océanos aplicando herramientas lagrangianas. Sin embargo, a nivel nacional no se han desarrollado este tipo

de estudios. En particular, en el Golfo de México, no hemos podido encontrar trabajos en los que se relacionen los movimientos horizontales de vertebrados pelágicos como ballenas piloto (*Globicephala macrorhynchus*) y atunes aleta azul del Atlántico (*Thunnus thynnus*), con las estructuras lagrangianas coherentes derivadas de trayectorias resueltas numéricamente con campos de corrientes.

Afortunadamente, en el Golfo de México ya existe información de los movimientos horizontales de diferentes especies de vertebrados pelágicos a la par con la información satelital y de modelos de alta resolución con los que se obtienen campos de corrientes a diferentes escalas espacio-temporales. Esto, en gran parte, debido a los esfuerzos realizados por diferentes instituciones y consorcios de investigación, como el Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGoM) el cual está conformado por diversas instituciones mexicanas y cuyo principal objetivo es generar investigación dirigida al conocimiento de los diferentes procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en el Golfo de México. Es por eso que hoy en día es posible estudiar el tipo de problemas que involucran el movimiento de depredadores y su relación con los procesos dinámicos más relevantes en el Golfo de México.

Actualmente, podemos aplicar diversas metodologías para identificar y seguir las estructuras de mesoescala en el océano, muchas de ellas de carácter Euleriano (e. g. Souza *et al.* 2011 y Vortmeyer-Kley *et al.* 2019). Sin embargo, las técnicas lagrangianas, aunque tal vez un poco más complicadas de implementar, son más robustas para entender el transporte e identificar las estructuras coherentes (que transportan partículas) además de filamentos y otras estructuras más pequeñas. En este sentido, resulta ser de gran utilidad resolver el problema de advección material de partículas pasivas en el océano con técnicas lagrangianas y estimar las estructuras (LCS) que organizan el flujo (Peacock y Haller, 2013). Con ellas es que podemos entender mejor la dispersión de partículas, lo que a su vez nos puede dar ideas sobre la disponibilidad de alimento para diferentes depredadores. En particular nos interesa estudiar estructuras lagrangianas coherentes atrayentes, ya que permiten identificar zonas de convergencia o confluencia donde se espera exista una concentración mayor de partículas. Estas LCS parecen identificar estructuras que, como veremos adelante, coinciden con la presencia de depredadores.

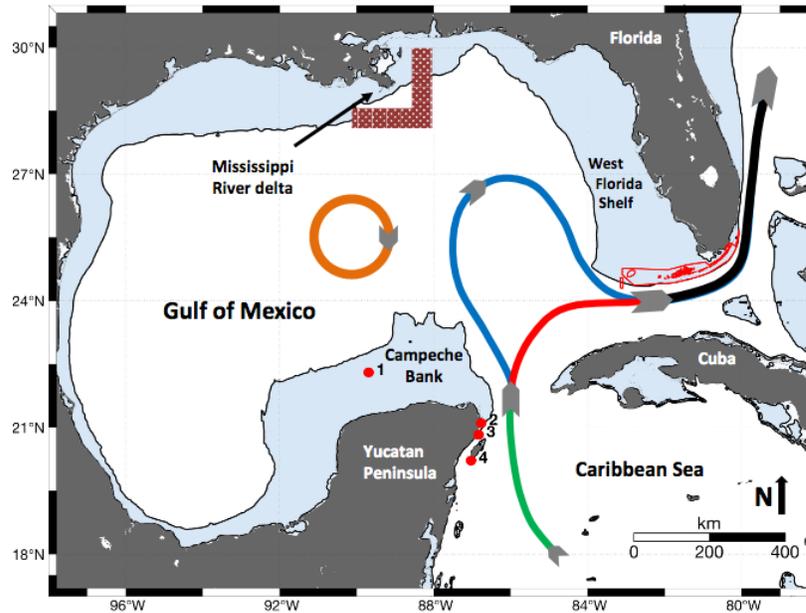
### **1.3. Objetivos**

El objetivo principal de esta tesis es investigar la posible relación entre la presencia y evolución de LCS en el GoM con el movimiento y distribución de vertebrados pelágicos. Específicamente, encontrar LCS atrayentes asociadas a la variabilidad de mesoescala obtenida a partir de corrientes geostróficas derivadas de datos de altimetría e identificar su conexión con los movimientos diarios de atunes aleta azul del Atlántico (*Thunnus thynnus*) y ballenas piloto (*Globicephala macrorhynchus*). Se propone también identificar LCS atrayentes persistentes (climatológicas) con campos de corrientes de una climatología diaria de corrientes obtenidas de salidas de un modelo numérico de circulación de alta resolución y buscar la relación con hábitats preferenciales de atún aleta azul durante su estadía en el GoM.

### **1.4. Área de estudio**

#### **1.4.1. El sistema de la corriente de Lazo**

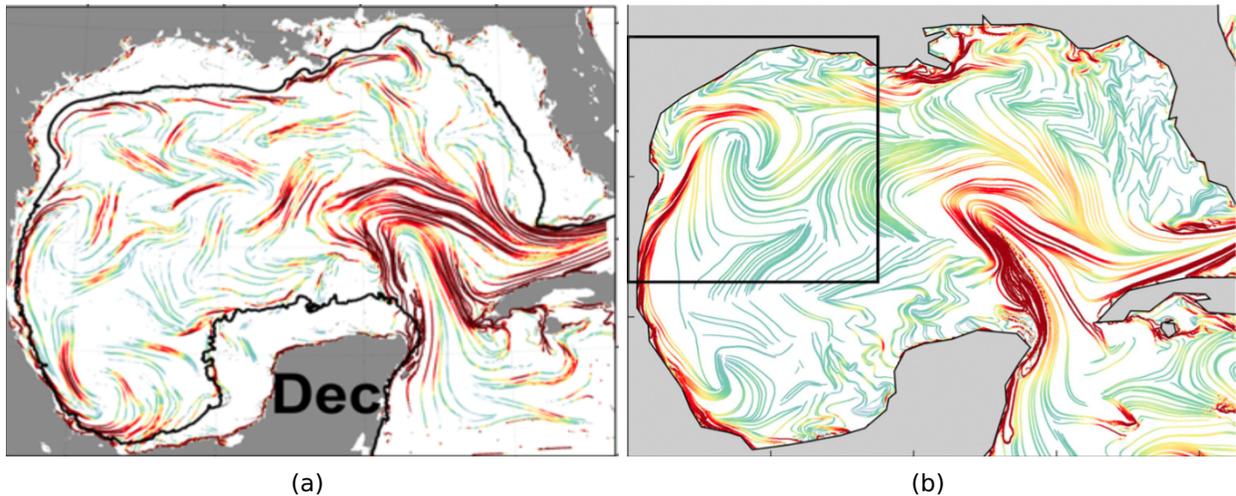
En el Golfo de México, como en otros mares, el transporte de partículas producto de la circulación oceánica, está dominado por estructuras de diferentes escalas espacio-temporales. La Corriente de Lazo es la estructura principal de la circulación del Golfo de México en la escala mayor (Schmitz *et al.*, 2005). De esta corriente se desprenden remolinos anticiclónicos, conocidos como remolinos de la Corriente de Lazo. Un esquema idealizado de estas estructuras se puede ver en la figura 3, donde se observa la entrada de la corriente por el estrecho de Yucatán y la salida por el estrecho de Florida, dos formas de la posición de la corriente una vez que entra por Yucatán y un remolino anticiclónico desprendido debido a la extensión de la corriente hacia el interior del GoM. Estos remolinos desprendidos frecuentemente viajan hacia el oeste y transportan agua desde el Caribe hasta el interior del Golfo (Indest *et al.*, 1989). En varias ocasiones la vida de estos remolinos termina al llegar al talud continental donde también se forman estructuras frontales que transportan agua a lo largo de la costa (Walker, 2005). Sin embargo los remolinos pueden también disiparse en forma sustancial antes de llegar a la costa (Meunier *et al.*, 2020).



**Figura 3.** Modelo conceptual de la circulación de gran escala del Golfo de México. Entrada de la corriente de Lazo por el estrecho de Yucatán, línea verde y salida de la corriente por el estrecho de Florida, línea negra. Ubicaciones de la corriente dentro del GoM en estado retraído, línea roja y en estado extendido, línea azul. Remolinos anticiclónicos de lazo, círculo naranja. Plataforma continental, polígono azul. Tomada de Otis *et al.* (2019).

#### 1.4.2. Estructuras climatológicas atrayentes

En el GoM existen diferentes patrones de circulación no todos ellos asociados al sistema de la Corriente de Lazo, que pueden relacionarse con LCS persistentes que atraen partículas, (e. g. Duran *et al.* 2018 y Gough *et al.* 2019). En la figura 4 podemos observar dos mapas en los que se observan LCS climatológicas de carácter atrayente calculadas con campos medios obtenidos a partir de salidas de modelos de circulación de alta resolución del Golfo de México. Estos modelos son el HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model) usado en Duran *et al.* (2018) y el modelo NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean) usado en Gough *et al.* (2019). Algunas de las estructuras que resaltan en estos mapas (tonos rojos), son la corriente de Lazo, el ciclón de Campeche, una corriente de frontera oeste a lo largo del talud del GoM y el “gancho” del Noroeste encontrado por (Gough *et al.*, 2019). De estas estructuras que se resaltan, tres se encuentran ubicadas al oeste del GoM.



**Figura 4.** Estructuras lagrangianas coherentes atrayentes obtenidas con salidas de modelos de alta resolución. (a) LCS atrayentes de calculadas con promedios diarios del modelo HYCOM para el mes de diciembre. Tomada de Duran *et al.* (2018). (b) LCS atrayentes anuales calculadas con promedios diarios del modelo NEMO. Tomada de Gough *et al.* (2019). Los colores indican los niveles de atracción, tonos cálidos representan más atracción.

#### 1.4.3. Estructuras climatológicas atrayentes del oeste del GoM

El transporte de partículas en el oeste del GoM está asociado a algunas de las estructuras que observamos en los mapas de LCS atrayentes climatológicas. Una de ellas es el ciclón de Campeche, el cual es una estructura ciclónica semipermanente que se encuentra al suroeste del Golfo en la Bahía de Campeche, cuyo origen y permanencia se sigue estudiando (Zavala Sansón, 2019). En el trabajo de Vázquez de la Cerda *et al.* (2005) se menciona que la formación del giro está asociada a la intensificación hacia el oeste del bombeo de Ekman y a la variación espacial de los vientos que inciden sobre la Bahía de Campeche. Sin embargo en estudios más recientes, tanto observacionales (e. g. Pérez-Brunius *et al.* 2013) como numéricos (e. g. Zavala Sansón 2019) se propone que la topografía juega un papel muy importante en circulación de la Bahía de Campeche que sigue la dinámica de un flujo barotrópico equivalente a los cambios en la batimetría y que para satisfacer la conservación de vorticidad potencial, sigue contornos geostrofos cerrados. Por otra parte, al noroeste del GoM, estudios de modelos numéricos de alta resolución han revelado una estructura anticiclónica atrayente en forma de gancho que se encuentra presente durante gran parte del año. El estudio de esta estructura es relativamente reciente y se piensa que está ligado la presencia regular de los remolinos de Lazo en la zona y una fuerte corriente de frontera oeste

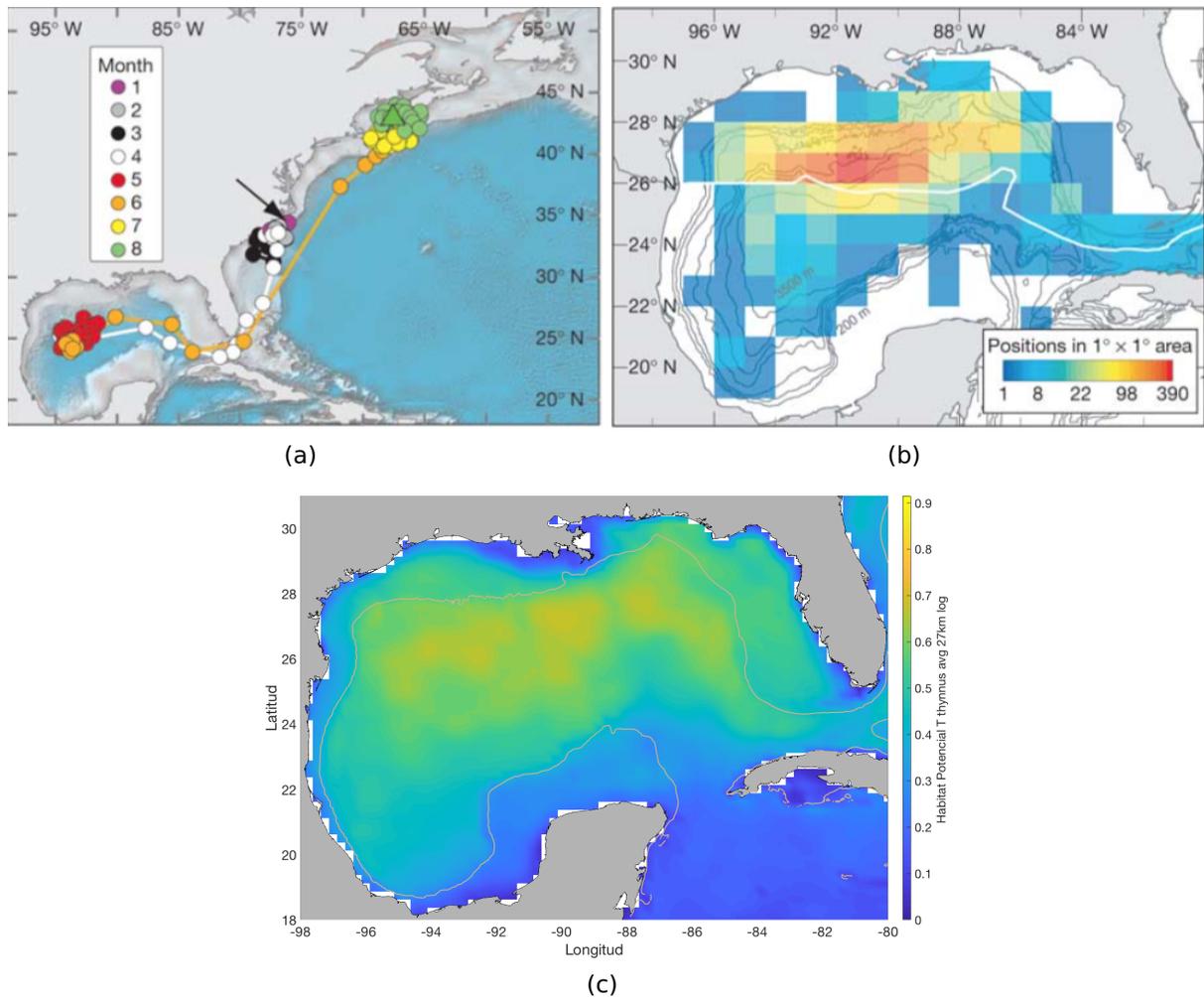
que también resalta en los mapas de LCS climatológicas, (Gough *et al.*, 2019).

En conjunto, los procesos atrayentes asociados a la dinámica del oeste del GoM pueden utilizarse para generar escenarios de transporte de partículas. Estos dos escenarios de transporte en el oeste del Golfo han sido revelados con trayectorias de derivadores que han sido apoyados con estadísticas de dos partículas. Uno de ellos es el transporte observado de sur a norte a lo largo del talud en la parte oeste del GoM y en parte el interior también, mientras que el otro es el escenario observado de retención de partículas en el interior de la Bahía de Campeche (e. g. Zavala Sansón *et al.* 2017).

#### **1.4.4. Distribución de vertebrados pelágicos en el Golfo de México**

##### **1.4.4.1. Atún aleta azul del Atlántico**

Estudios con marcas satelitales han revelado que los atunes aleta azul del Atlántico (*Thunnus thynnus*), de ahora en adelante referido como atún aleta azul, viajan desde el norte del Atlántico hacia las aguas cálidas del GoM para usarlo como zona de desove y crianza. Normalmente los atunes llegan al GoM durante el invierno y pueden permanecer en él hasta principios del verano (Teo *et al.*, 2007a) y (Rooker *et al.*, 2019). Un ejemplo de este tipo de movimiento horizontal recorrido por un atún aleta azul es el que se muestra en la figura 5 (a). Parte de los resultados del seguimiento de atunes han mostrado que el noroeste del GoM es un hábitat crítico durante la temporada de crianza (Block *et al.*, 2005). Esto se puede observar en la figura 5 (b) en la que se muestran altas densidades de atunes aleta azul en el noroeste del GoM. Esto coincide con los mapas de hábitat idóneo, como el que vemos en la figura 5 (c), donde, en tonos cálidos, se señalan altas probabilidades de presencia de atunes aleta azul en el norte del GoM. Las probabilidades que observamos en la figura 5 (c) dependen de las preferencias ambientales (p. ej. concentración de clorofila, temperatura y profundidad) y de avistamientos de los atunes aleta azul dentro del GoM. Para realizar estos mapas se sigue el método de máxima entropía, (Maxent, por sus siglas en inglés) descrito en Phillips *et al.* (2006).



**Figura 5.** Distribución de atunes aleta azul. (a) Trayectoria mensuales, líneas de colores, de un individuo marcado en la costa de Carolina del Norte, círculos y triángulos de colores. Tomada de Teo *et al.* (2007a). (b) Densidad de atunes basada en posiciones satelitales registradas durante 5 años (1999-2004) y registros de captura tomados de datos de *US scientific observer and US logbook data*. Tomada de Block *et al.* (2005). (c) Modelo de hábitat potencial calculado con el método MaxEnt por el Laboratorio de Ecología Pesquera del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) para el Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGoM).

#### 1.4.4.2. Ballena piloto

Los calderones tropicales o ballenas piloto (*Globicephala macrorhynchus*) son uno de los cetáceos más comunes en regiones costa afuera del GoM, (Jefferson y Schirot, 1997) y (Olson, 2009). En el norte del GoM, donde han sido más estudiadas, las ballenas piloto se encuentran, principalmente, sobre el quiebre de la plataforma durante todo el año, (Mullin *et al.*, 2004). Dicho comportamiento no es particular de las poblaciones del Golfo, pues de manera general las ballenas piloto frecuentan las aguas del talud gracias a que la dinámica asociada al quiebre de la plataforma es favorable pa-

ra su forrajeo, (Olson, 2009) y (Thorne *et al.*, 2017). Hasta el momento existen pocos estudios acerca de la distribución sureña de esta especie dentro del GoM y el seguimiento satelital de un grupo de ballenas piloto en las costas Veracruzanas, realizados por investigadores del CIGoM representa uno de los primeros esfuerzos para estudiar la distribución de esta especie en el sur del Golfo de México.

## Capítulo 2. Metodología

---

### 2.1. Exponentes de Lyapunov de Tiempo Finito

Actualmente existen diferentes técnicas para calcular LCS. En el trabajo de Hadjighasem *et al.* (2017) se discuten doce diferentes métodos usados para la detección de estas estructuras lagrangianas coherentes en flujos en dos dimensiones. De esos doce métodos de detección, el más completo es el método Geodésico descrito en Haller y Beron-Vera (2012) y en Onu *et al.* (2015). Por otra parte, uno de los métodos de detección de LCS más comunes y más simples es el de los exponentes de Lyapunov de Tiempo Finito (FTLE, por sus siglas en inglés), (e. g. Pierrehumbert y Yang 1993 y Shadden *et al.* 2005). Los FTLEs son una cantidad escalar con la que se mide la separación entre trayectorias de partículas inicialmente cercanas (Shadden *et al.*, 2005). Aunque en ciertas condiciones pueden no ser tan precisos como otros métodos (Hadjighasem *et al.*, 2017) para indentificar a las verdaderas LCS, para los fines de este trabajo la identificación de LCS a través de valores máximos del campo de FTLEs es suficiente, pues representan un método objetivo más simple de implementar que el método Geodésico y los resultados son similares.

El primer paso para estimar los FTLEs es obtener las trayectorias de partículas que evolucionan con los campos de corrientes  $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$  conocidos en tiempos finitos,  $t$  y en mallas,  $\mathbf{x} = (\phi, \theta)$  de longitud y latitud. Estas trayectorias están representadas por la solución de la ecuación diferencial vectorial, 1.

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) \quad (1)$$

Las soluciones de la ecuación 1 están dadas (se denotan) por el mapa de flujo  $F_{t_0}^{t_0+\tau}$  :  $\mathbf{x}(t = t_0) \mapsto \mathbf{x}(t = t_0 + \tau)$ , el cual lleva a las partículas con posiciones iniciales  $\mathbf{x}(t = t_0)$ , a las posiciones finales  $\mathbf{x}(t = t_0 + \tau)$  después de un tiempo de integración  $\tau$ . Sin embargo, lo que nos interesa es conocer la separación (estiramiento) entre partículas, por eso, una vez que encontramos las trayectorias, calculamos la separación entre trayectorias vecinas con respecto a sus separaciones iniciales. Debido a que estamos tratando con trayectorias que teóricamente se encuentran separadas infinitesimalmente, se desprecian términos cuadráticos y mayores para obtener la separación,  $\delta\mathbf{x}(t = t_0 + \tau)$ , a partir del Jacobiano del mapa de flujo, también conocido como gradiente de

deformación,  $\nabla F_{t_0}^{t_0+\tau}$ , el cual nos da la separación entre trayectorias o estiramiento de curvas materiales al tiempo  $t$  en función de su separación al tiempo inicial.

$$\delta \mathbf{x}(t = t_0 + \tau) = \nabla F_{t_0}^{t_0+\tau} \delta \mathbf{x}(t = t_0) \quad (2)$$

El gradiente de deformación se encuentra definido sobre la superficie de la Tierra usando coordenadas de longitud ( $\phi$ ) y latitud ( $\theta$ ) en la ecuación 3. En los trabajos de (Karrasch, 2015), y (Beron-Vera *et al.*, 2010) se pueden consultar los detalles de la formulación del gradiente de deformación en coordenadas esféricas que se escribe

$$\nabla F_{t_0}^{t+\tau} = \begin{bmatrix} \frac{\cos\theta(t=t_0+\tau)}{\cos\theta(t=t_0)} \frac{d\phi(t=t_0+\tau)}{d\phi(t=t_0)} & \cos\theta(t = t_0 + \tau) \frac{d\phi(t=t_0+\tau)}{d\theta(t=t_0)} \\ \frac{1}{\cos\theta(t=t_0)} \frac{d\theta(t=t_0+\tau)}{d\phi(t=t_0)} & \frac{d\theta(t=t_0+\tau)}{d\theta(t=t_0)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Una vez conocido el gradiente de deformación, podemos encontrar el máximo estiramiento que ocurre entre dos trayectorias inicialmente cercanas. Este máximo estiramiento está dado por los máximos eigenvalores del tensor de deformación derecho, también conocido como tensor de Cauchy-Green derecho.

$$CG_{t_0}^{t+\tau} = (\nabla F_{t_0}^{t+\tau})^T (\nabla F_{t_0}^{t+\tau}) \quad (4)$$

El tensor de deformación, CG, es simétrico y para flujos en dos dimensiones tiene dos eigenvalores positivos,  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$ , que pueden escribirse en forma analítica en función de su traza y determinante.

$$\lambda_1 = \frac{\text{traza}(CG)}{2} - \sqrt{\frac{\text{traza}(CG)^2}{2} - \det(CG)} \quad (5)$$

$$\lambda_2 = \frac{\text{traza}(CG)}{2} + \sqrt{\frac{\text{traza}(CG)^2}{2} - \det(CG)} \quad (6)$$

En función de los máximos eigenvalores  $\lambda_{max}$  y de un tiempo de integración,  $\tau$ , el exponente de Lyapunov de tiempo finito, definido en la ecuación 7, nos ayuda a medir la razón de separación de las trayectorias obtenidas como soluciones del sistema dinámico.

$$FTLE = \frac{1}{2\tau} \log(\lambda_{max}) \quad (7)$$

Para identificar LCS a través de los campos del FTLE es necesario identificar los valores máximos de este campo, pues son los que representan las regiones de máximo estiramiento. Cuando el sistema dinámico se resuelve hacia atrás en el tiempo, las regiones de máximo estiramiento representan regiones de máxima atracción del sistema que evoluciona hacia adelante en el tiempo (Peacock y Haller, 2013) y (Prants *et al.*, 2017).

En resumen los pasos seguidos para calcular campos diarios de FTLEs son:

- Advectar partículas pasivas por 30 días con corrientes geostroficadas superficiales diarias.
- Calcular el Jacobiano del mapa de flujo y el tensor CG derecho.
- Calcular los eigenvalores del tensor de CG.
- Encontrar los máximos eigenvalores y calcular los FTLEs.

En (Duran *et al.*, 2018) y (Gough *et al.*, 2019) se define y discute la utilidad de calcular LCS persistentes a también denominadas climatológicas. La idea es obtener LCS que tienden a persistir más que otras y por lo tanto ejerzan un papel de mayor importancia en la organización del flujo. Sorprendentemente, dichas estructuras persistentes pueden calcularse en forma sencilla utilizando la climatología de corrientes de una región (ver en Duran *et al.* 2018) y calculando sus LCS asociadas.

Resumen de los pasos seguidos para los calcular campos mensuales del FTLE utilizados para el cálculo de LCS persistentes (climatológicas):

- Generar una climatología de corrientes calculando los promedios diarios de los datos de modelos de alta resolución.
- Advectar partículas pasivas en ventanas de 14 días con esta climatología de corrientes.
- Calcular el Jacobiano del mapa de flujo y el tensor CG derecho.
- Calcular promedios mensuales del tensor CG.
- Calcular los eigenvalores del tensor de CG.

- Encontrar los máximos eigenvalores y calcular los FTLEs.

Notas:

- Para resolver numéricamente la ecuación (1) se siembran partículas pasivas en el Golfo de México en un dominio que va de los 98°a los 80°de longitud oeste y de los 20°a los 30.8°de latitud norte. Inicialmente las partículas fueron posicionadas cada 2 km en la dirección este-oeste y cada 1.4 km en la dirección norte-sur.
- Utilizamos interpolación con splines para conocer las velocidades en las posiciones de las partículas en cualquier punto y para integrar usamos el método Runge-Kutta de cuarto orden.
- El tiempo de integración de 30 días es suficiente para capturar estructuras LCS diarias de mesoescala que revelan los patrones de circulación más sobresalientes del GoM, (Olascoaga, 2010).
- En el trabajo de Duran *et al.* (2018) se hicieron pruebas con diferentes tiempos de integración y destacaron que las LCS climatológicas no muestran gran sensibilidad a este parámetro. Entonces, decidimos usar un tiempo de integración que nos permitiera resaltar estructuras de mesoescala.
- El fin de usar coordenadas esféricas en este trabajo tiene como objetivo poder extender este tipo de cálculos a regiones mas grandes en el futuro.

## 2.2. Datos

### 2.2.1. Altimetría y velocidades geostróficas

A fin de encontrar LCS diarias utilizamos las velocidades geostróficas derivadas de los productos satelitales L4 de altimetría distribuidos por CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service). Estos datos se tienen desde 1993 hasta el presente con resolución temporal de un día y con resolución espacial de aproximadamente 27 km en mallas regulares para todo el globo. Los datos están disponibles para cualquier usuario en <http://marine.copernicus.eu>. También se utilizaron las imágenes de anomalías del nivel del mar para comparar con los valores de los campos del FTLE atrayente

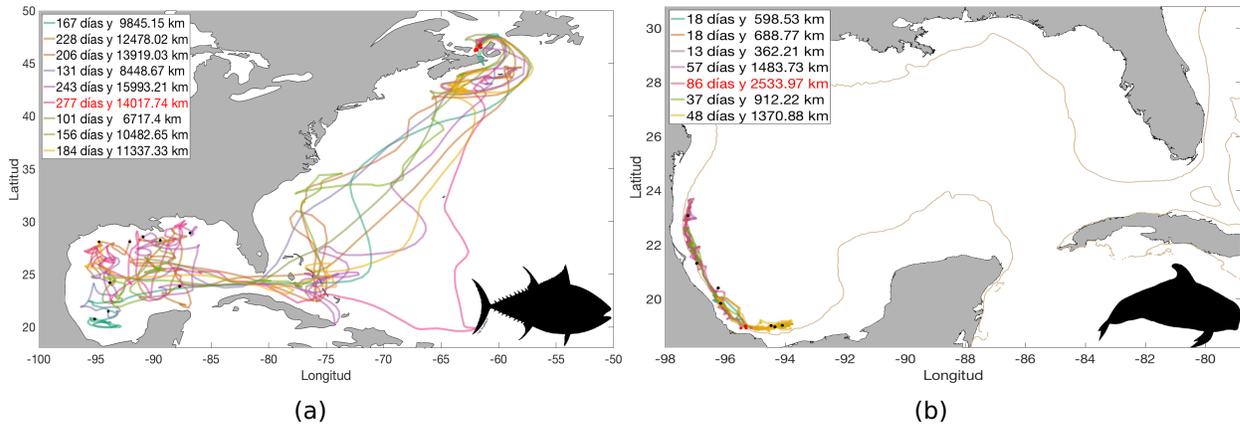
en los puntos geográficos donde se observan los pelágicos.

### **2.2.2. Velocidades no geostróficas**

Para calcular LCS climatológicas utilizamos las salidas del modelo numérico oceánico, NEMO. Este modelo numérico resuelve las ecuaciones primitivas del océano en coordenadas esféricas discretizadas en una malla tipo C y coordenadas verticales fijas. Para este trabajo se usó la configuración descrita en Jouanno *et al.* (2016) y Jouanno *et al.* (2018), quienes presentan salidas de alta resolución espacial, 2.8 km, en un dominio que va desde 78°W - 98°W y de los 14°N - 31°N. Este modelo es capaz de capturar procesos de submesoescala y representa adecuadamente las características principales de la dinámica del Golfo.

### **2.2.3. Registros diarios**

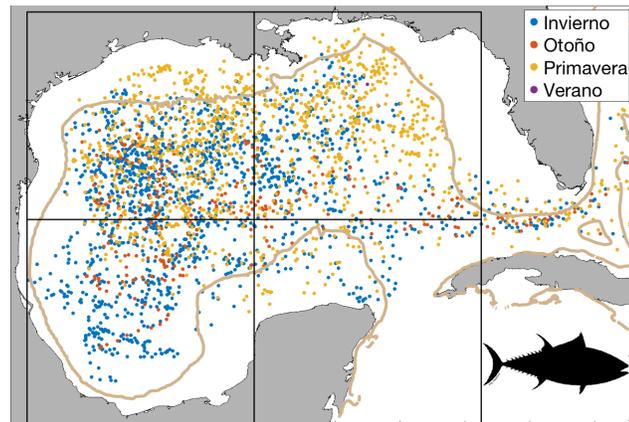
En este trabajo utilizamos las trayectorias del atún aleta azul del Atlántico (*Thunnus thynnus*) distribuidas por la ATN (Animal Telemetry Network) del IOOS (Integrated Ocean Observing System) que se encuentran disponibles para cualquier usuario en <http://atn.ioos.us>. Utilizamos las trayectorias de los atunes que fueron marcados con marcas MK10 un tipo de PATs (Pop up Archival Tags) que fueron puestas en las costas canadienses en el año 2010 descritas en (Wilson *et al.*, 2015) y sólo se utilizaron las trayectorias que entraron al GoM y permanecieron en él por al menos diez días. En la figura 6 (a) se pueden observar las trayectorias seguidas por nueve atunes aleta azul (líneas de colores), desde Canadá hasta el interior del Golfo de México. También usamos las trayectorias de siete ballenas piloto (*Globicephala macrorhynchus*) que fueron marcadas en el año 2018 en las costas de Veracruz, ver figura 6 (b). Las trayectorias de las ballenas fueron proporcionadas por la Dra. Concepción García Aguilar del proyecto CiGoM (comunicación personal).



**Figura 6.** Recorridos de animales seguidos dentro y fuera del GoM. (a) Trayectorias de nueve atunes aleta azul del atlántico en líneas de colores (cada color representa un individuo), marcados en las costas canadienses. (b) Trayectorias de siete ballenas piloto, líneas de colores (cada color representa un individuo), marcados en las costas veracruzanas y el contorno al interior del GoM representa la isobata de 200m. Los puntos rojos representan el inicio de la trayectoria y los puntos negros el fin. En los recuadros superiores se encuentra la duración y la distancia recorrida por cada individuo durante su marcaje, en rojo se resalta la trayectoria más larga. Nota: el código de colores por individuo que observamos esta figura será el mismo a lo largo de todo el trabajo.

#### 2.2.4. Registros históricos

Las posiciones del atún aleta azul para diferentes estaciones del año se obtuvieron de una recopilación de información de marcas realizada por (Rooker *et al.*, 2019). Los registros provienen una serie de trayectorias recopiladas desde el 2001 hasta el 2012, ver figura 7. La marcas utilizadas para seguir a los atunes aleta azul fue del tipo PAT (Pop up Archival Tag).



**Figura 7.** Distribución estacional de atún aleta azul dentro del GoM. Posiciones de 44 atunes aleta azul de 11 años (2001-2012) de marcas de satelitales (puntos de colores). Los colores representan los registros por estaciones. Los recuadros grandes negros representan la malla en la que se calcularon las densidades de puntos. Esta información se puede encontrar como parte del material suplementario del trabajo de Rooker *et al.* (2019).

### **2.3. Cálculo de densidades**

Se calcularon las densidades estacionales a partir de las posiciones diarias (puntos de colores de la figura 7) de los diferentes atunes aleta azul que entran al Golfo durante las diferentes estaciones del año. La densidad se estimó sumando el número de posiciones detectadas satelitalmente (puntos en la figura 7) dentro de las áreas de los recuadros de la figura 7 para cada una de las estaciones y después dividir entre el área de la región.

También se utilizó esta metodología para calcular densidades mensuales de las posiciones finales de partículas que fueron advectadas con campos diarios medios divididos por el número de días que tiene cada mes del año. Después de obtener las densidades mensuales se realizaron promedios de densidades para invierno (enero, febrero y marzo), primavera (abril, mayo y junio), verano (julio, agosto y septiembre) y otoño (octubre, noviembre y diciembre).

## Capítulo 3. Resultados

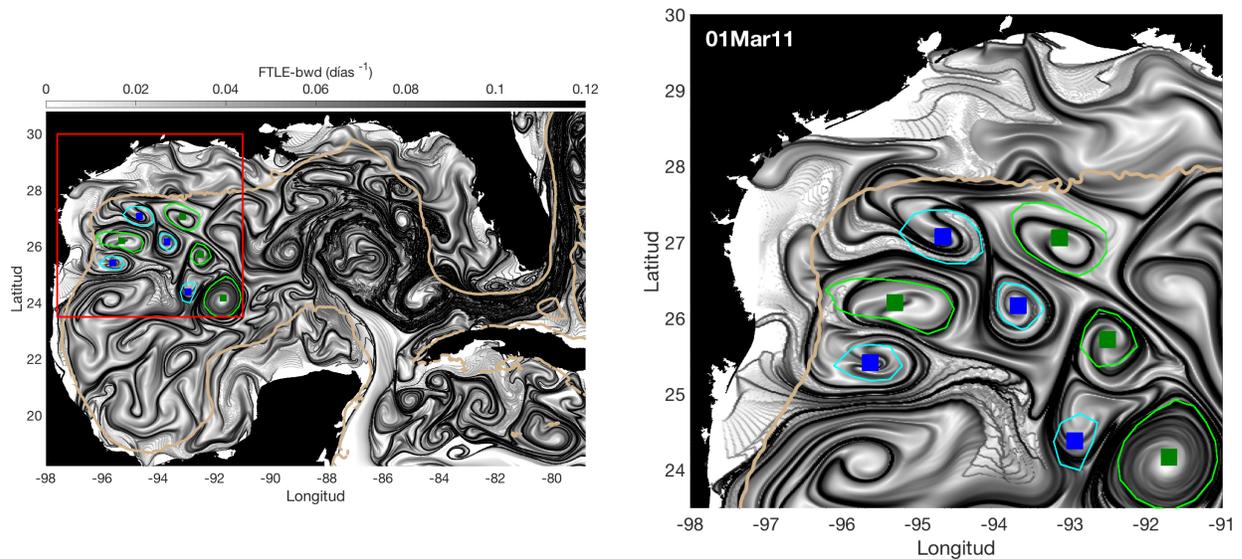
---

### 3.1. LCS y trayectorias de atunes aleta azul

Para encontrar una posible relación entre el comportamiento de los atunes aleta azul y las estructuras coherentes, comparamos las posiciones de LCS atrayentes (máximos del FTLE) con las posiciones diarias de los atunes durante los meses con más observaciones dentro del GoM. En la figura 8 observamos las trayectorias de nueve atunes, cada uno representado con colores diferentes sobre campos del FTLE (tonos oscuros representan LCS atrayentes) correspondientes a los meses de diciembre 2010 a marzo de 2011.

En diciembre, figura 8 (a) observamos cinco atunes dentro del GoM. Tres de ellos viajan por el oeste del GoM donde nadan entre dipolos en el noroeste y alrededor de un remolino en la Bahía de Campeche, uno más entra y nada directamente al oeste por el centro del Golfo. En enero, figura 8 (b), entran dos nuevos atunes y se mantienen al oeste de la corriente de Lazo. Los demás atunes permanecen en el oeste. Para el mes de febrero, figura 8 (c), entra otro atún y permanece en el este en regiones con altos valores del FTLE asociados a la intensa corriente de Lazo. Cuatro de los atunes que continuaban presentes en el Golfo viajan a la parte norte en zonas con remolinos; dos atunes se van al noroeste y otros dos más viajan hacia el lado oeste de la Corriente de Lazo. Uno de los atunes se queda en el suroeste, donde no resalta ninguna estructura en particular asociada. Para el mes de marzo, figura 8 (d), entra un individuo más que se mantiene en el este del GoM. Otro de los atunes que se mantiene en la parte este nada de norte a sur sin atravesar o rodear alguna estructura en particular. Tres atunes más se mantienen en el noroeste del GoM donde los altos valores de FTLE atrayentes resaltan al menos cuatro remolinos.

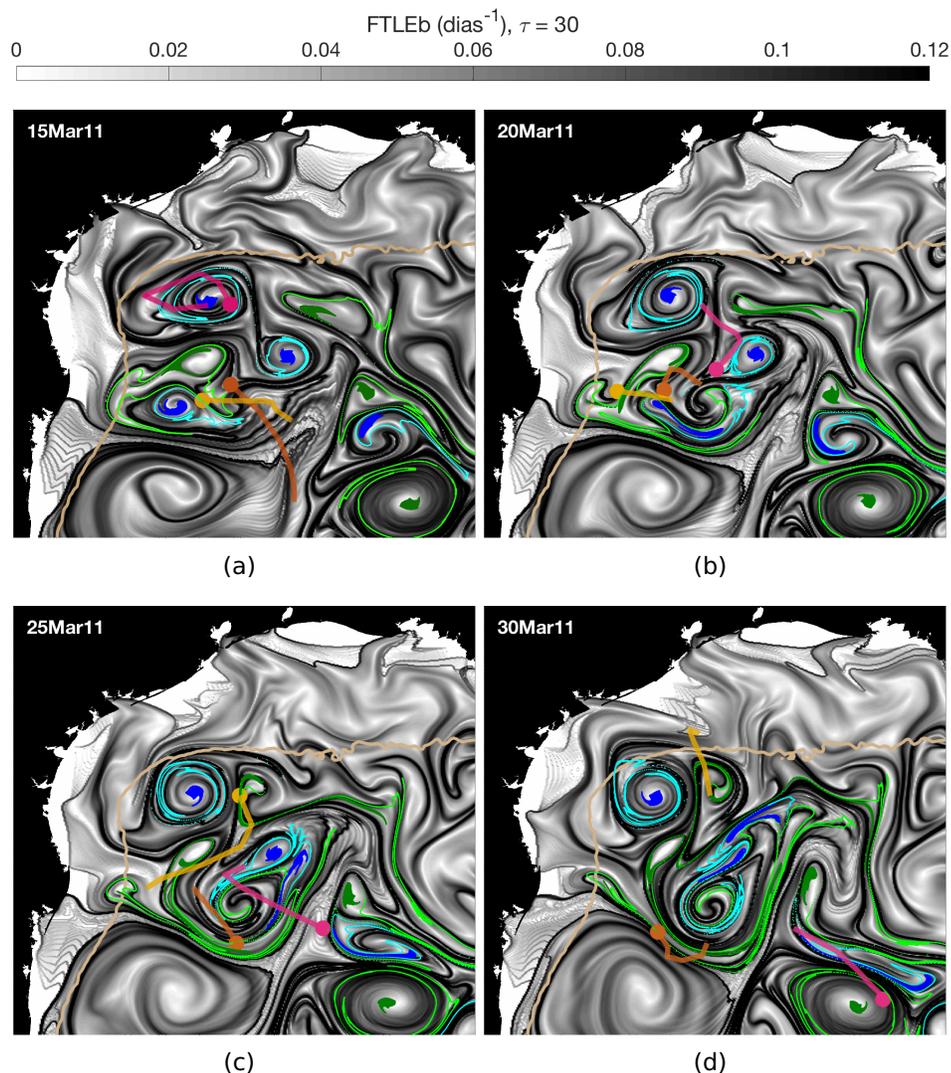




**Figura 9.** Posiciones iniciales de trazadores pasivos sobre el campo de FTLE atrayente. Los puntos azules se encuentran posicionados sobre los centros de cuatro remolinos ciclónicos. Los puntos cian se encuentran posicionados sobre las periferias de los mismos cuatro remolinos ciclónicos. Los puntos verdes se encuentran posicionados sobre los centros de cuatro remolinos anticiclónicos. Los puntos limón se encuentran posicionados sobre las periferias de los mismos cuatro remolinos anticiclónicos. El mapa de la derecha es un zoom al recuadro rojo del mapa de la izquierda.

Se observó la relación entre los campos de FTLE atrayentes del mes de marzo y las trayectorias durante cinco días de tres atunes (figura 10, líneas rosa, amarilla y naranja). Asimismo, se tomaron en cuenta las posiciones de los trazadores que se implantaron inicialmente en las periferias y centro de los remolinos anticiclónicos (tonos verdes) y ciclónicos (tonos azules), indicados en la figura 9. En los paneles (a), (b) y (c) de la figura 10 observamos que los tres atunes buscan y se mantienen en las regiones donde los remolinos ciclónicos y anticiclónicos interactúan. Estas interacciones son capaces de erosionar las fronteras de los remolinos, lo que puede favorecer la mezcla del material de los diferentes remolinos. En los cuatro recuadros de la figura 10 vemos que, de los ocho remolinos seguidos durante el mes de marzo de 2011, sólo dos mantienen su forma. Uno de ellos es el remolino anticiclónico que se encuentra en la esquina inferior derecha y el otro es el remolino ciclónico que se ubica más al norte cercano al talud y que es visitado por el atún cuyas trayectorias están representadas por líneas rosas, como se observa en la figura 10 (a). Este es un movimiento particular pues el atún de trayectorias color rosa gira en sentido contrario al del remolino ciclónico del norte durante cinco días, del 11 al 15 de marzo. Si seguimos a este atún en el siguiente panel, figura 10 (b), observamos que cinco días después llega a la periferia de otro remolino ciclónico, el cual comienza a intercambiar material con los demás

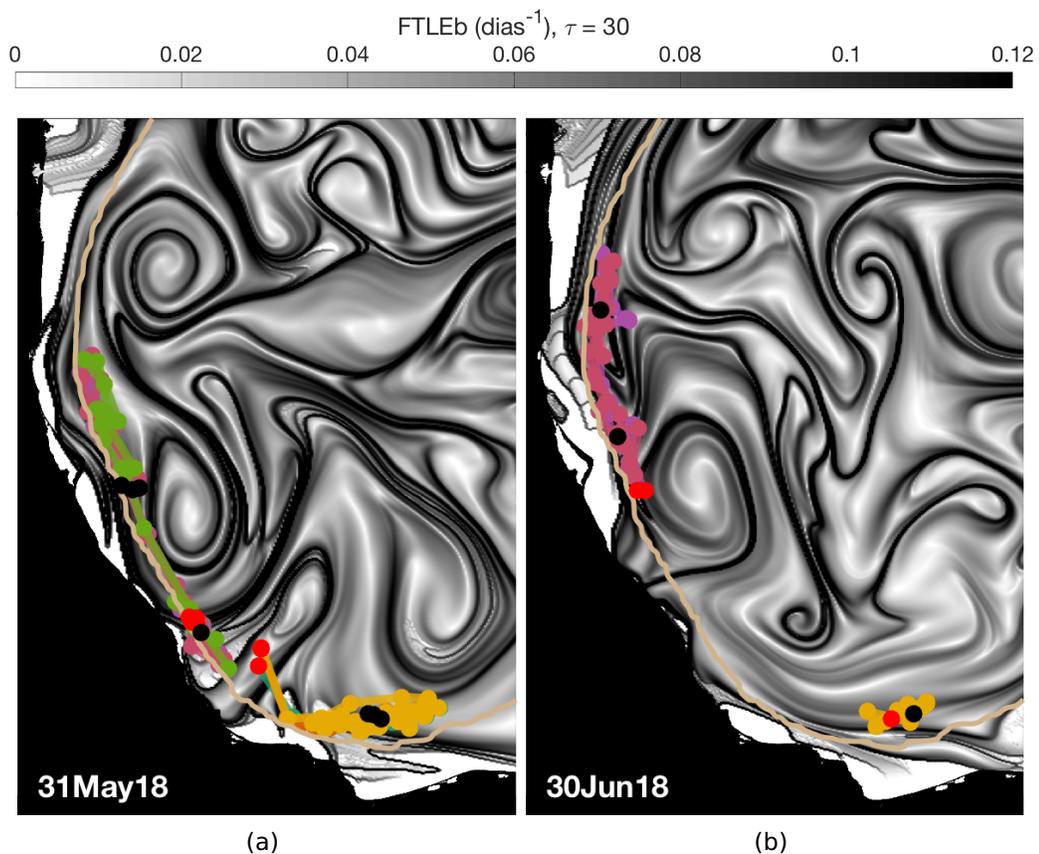
remolinos ya deformados. Cinco días después, figura 10 (c), este mismo atún atraviesa la zona de mezcla y comienza a desplazarse hacia el remolino anticiclónico de la esquina inferior izquierda. En el último panel, figura 10 (d), vemos como el atún de trayectoria color rosa llega al remolino anticiclónico y se mantiene sobre su periferia por cinco días, del 26 al 30 de marzo. Los otros dos atunes, de trayectorias amarillas y naranjas no rodean a ningún remolino en particular, pero como se menciona antes, se mantienen en la zona de mezcla donde se observa la mayor concentración de los trazadores. Las trayectorias del atún con trayectorias rosas son bastante particulares, pues es el único atún que interactúa con los dos remolinos que mantienen su forma.



**Figura 10.** Evolución en ventanas de cinco días de los trazadores de remolinos y trayectorias de tres atunes aleta azul sobre FTLE atrayente. La longitud de las líneas de colores representa la distancia que recorrieron los atunes en cinco días. Cada atún está identificado con un color distinto al de los trazadores. El código de colores de los trazadores es el mismo que la figura 9.

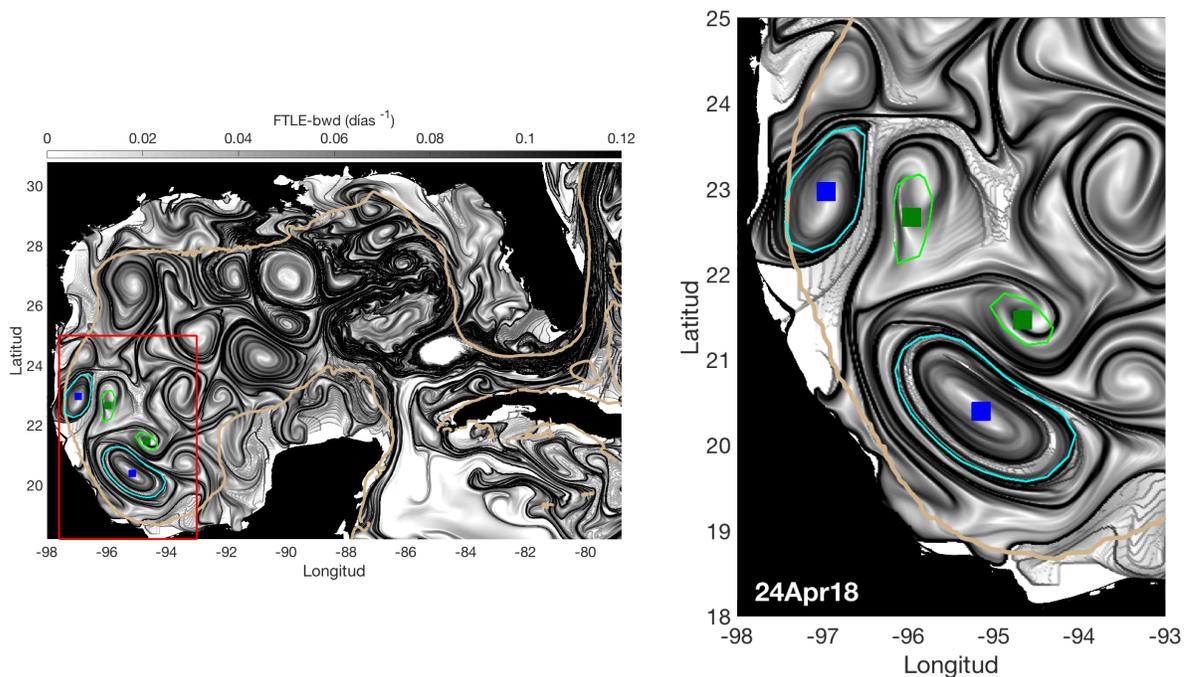
### 3.2. LCS y trayectorias de ballenas piloto

También comparamos los campos de LCS atrayentes con las trayectorias de ballenas piloto representadas en la figura 11 con líneas de colores, donde cada color identifica un individuo y son seguidas durante mayo y junio de 2018. De la figura 11 (a) lo primero que resalta de las trayectorias es que las ballenas nadan claramente sobre el talud continental, donde también inciden gran cantidad de estructuras atrayentes. El grupo de siete ballenas que fue marcado se dividió en dos: un grupo con cuatro ballenas que viajó al norte y un grupo con tres que viajó al sur. En la figura 11 (a) se puede observar que las ballenas ya no se encuentran juntas pues observamos una separación entre los puntos rojos que representan las posiciones de las ballenas durante el primer día de mayo. Por lo general se pueden encontrar LCS atrayentes a lo largo del quiebre de la plataforma y surge la pregunta si las ballenas siguen dicho quiebre o a las LCS, como se discute a continuación.



**Figura 11.** Trayectorias mensuales de ballenas piloto, líneas de colores, sobre campos del FTLEb atrayente con máximos en tonos oscuros. Los puntos en las trayectorias están espaciados un día. Cada color representa un individuo. Los puntos rojos son las posiciones iniciales y los negros las posiciones finales de las trayectorias. El contorno beige representa la isobata de 200 m asociada al talud continental. (a) Trayectorias de mayo del 2018 y (b) trayectorias de junio del 2018.

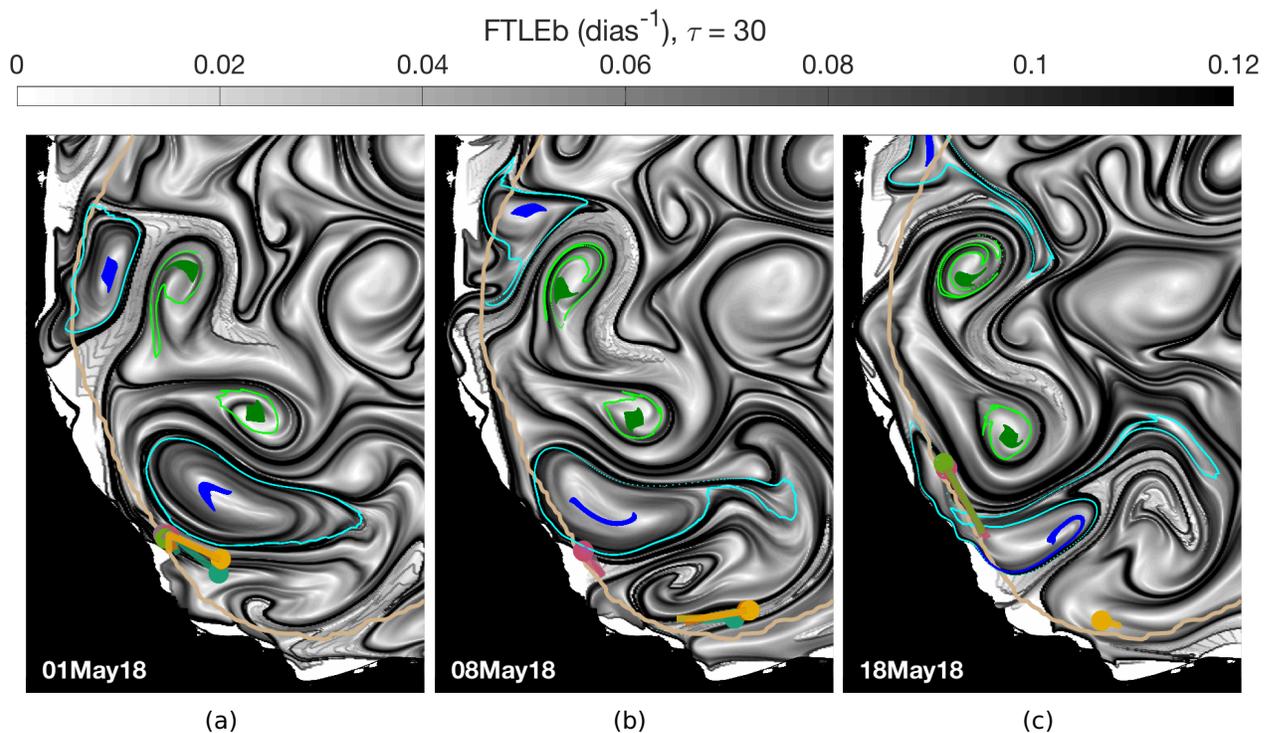
Con el propósito de ilustrar la interacción entre ballenas y LCS atrayentes a lo largo del talud, repetimos los experimentos con trazadores de remolinos pero ahora en la Bahía de Campeche y para diferentes fechas, figura 12. En estos nuevos experimentos se siguieron dos remolinos anticiclónicos y dos remolinos ciclónicos. Aunque no se muestra en ninguna figura, el remolino ciclónico más grande, que se observa en la figura 12 se formó en la Bahía de Campeche desde finales de enero 2018. Después de su formación, este remolino se trasladó lentamente hacia el oeste de la Bahía de Campeche. El día que marcaron las ballenas, 24 de abril del 2018, el remolino ciclónico se encontraba cerca del talud acompañado por otros remolinos y comenzaba a deformarse, figura 12.

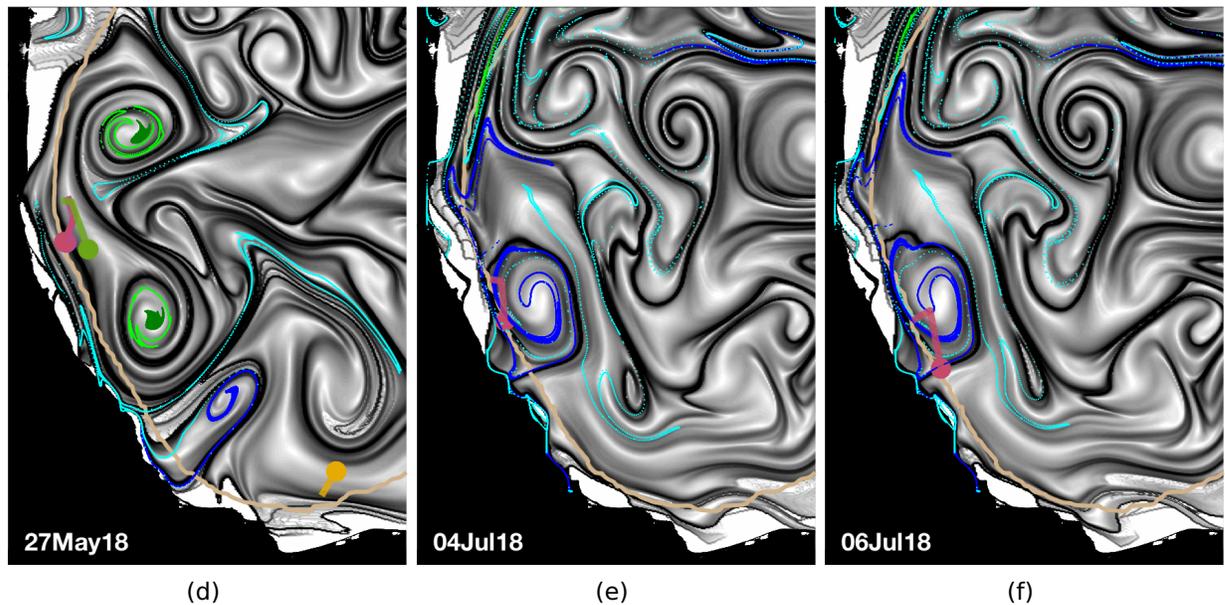


**Figura 12.** Posiciones iniciales de trazadores pasivos sobre el campo de FTLE atrayente. Los puntos azules se encuentran posicionados sobre los centros de dos remolinos ciclónicos. Los puntos cian se encuentran posicionados sobre las periferias de los mismos dos remolinos ciclónicos. Los puntos verdes se encuentran posicionados sobre los centros de dos remolinos anticiclónicos. Los puntos limón se encuentran posicionados sobre las periferias de los mismos dos remolinos anticiclónicos. El mapa de la derecha es un zoom al recuadro rojo del mapa de la izquierda.

Días después, a principios de mayo, figura 13 (a) y (b), podemos ver que la separación del grupo de ballenas coincide con el choque del remolino ciclónico grande con el talud. Diez días después, figura 13 (c) vemos una parte del material de la periferia del remolino ciclónico grande, representado con puntos color cian, se dispersa sobre LCS atrayentes (tonos oscuros del campo de FTLE), que se ubican perpendiculares al talud. Otra parte del material se dispersa hacia el norte sobre LCS atrayentes que siguen el

talud y sobre las cuales también nadan las ballenas de trayectorias verdes y rosas. En la figura 13 (d) observamos como las ballenas de trayectorias verdes y rosas nadan de vuelta al sur sobre LCS atrayentes a lo largo del talud y también vemos que la ballena de trayectorias amarillas, que se encuentra más al sur que las otras, se despega del talud y se acerca a una estructura en forma de gancho anticiclónico que atrapa un poco del material que se encontraba inicialmente en la periferia del remolino ciclónico grande. Después de casi dos meses, a principios de julio (figura 13 (e) y (f)), la última ballena de trayectoria rosa y que sigue registrando posiciones, vuelve a convivir con el remolino ciclónico donde el material inicialmente puesto en el centro se observa ahora sobre todo el interior del remolino. En el panel (f) de la figura 13 podemos observar como la ballena se aleja del talud y entra al remolino. En las figuras 13 (e) y (f) vemos como gran parte de las partículas contenidas dentro y en las periferias del ciclón fueron advectadas hacia el norte después de que el remolino llegó al talud y se deformó.





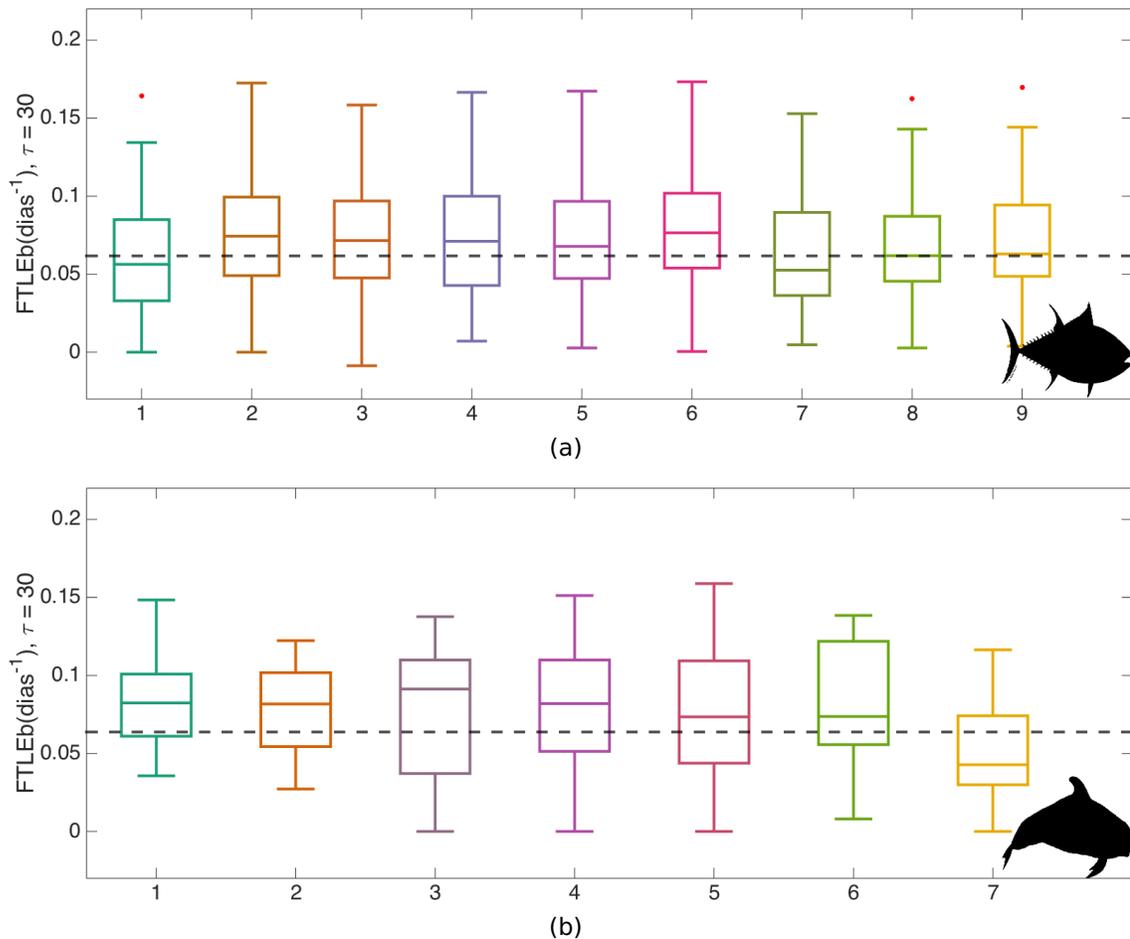
**Figura 13.** Evolución de los trazadores de remolinos y trayectorias ballenas piloto sobre FTLE atrayente. La longitud de la líneas de colores representan la distancia que recorrió cada ballena en dos días. Cada ballena está identificada con un color distinto al de los trazadores. El código de colores de los trazadores es el mismo que el de la figura 12.

### 3.3. Distribución de los valores de los FTLEs

Para tratar de cuantificar la cercanía de las trayectorias de los diferentes animales a las LCS calculamos series de tiempo de campos diarios de FTLEs y evaluamos su valor en cada punto de las trayectorias de atunes y ballenas. Establecimos como umbral, para clasificar valores altos de FTLE atrayentes, el valor de la mediana de los valores de los campos de FTLE que cubren todo el GoM, tonos blancos y negros de las figuras anteriores. Para entender mejor la distribución de valores de FTLEs en los puntos sobre las trayectorias de los nueve atunes aleta azul y de las siete ballenas piloto, realizamos diagramas de cajas, figura 14. En estos diagramas la distribución de valores de FTLE sobre la trayectoria de cada individuo está representada por una caja de color y el umbral representado por una línea horizontal punteada negra, indica valores altos de FTLEs. Cada caja es del color correspondiente al color de las trayectorias de cada individuo marcadas en las figuras previas.

Lo primero que queremos resaltar de las figuras 14 (a) y (b) es que, la mayoría de las líneas horizontales que se encuentran dentro de las cajas están por encima de la línea horizontal negra punteada. Es decir, que la distribución de las medianas de los FTLE en puntos sobre trayectorias de la mayoría de los individuos, está por en-

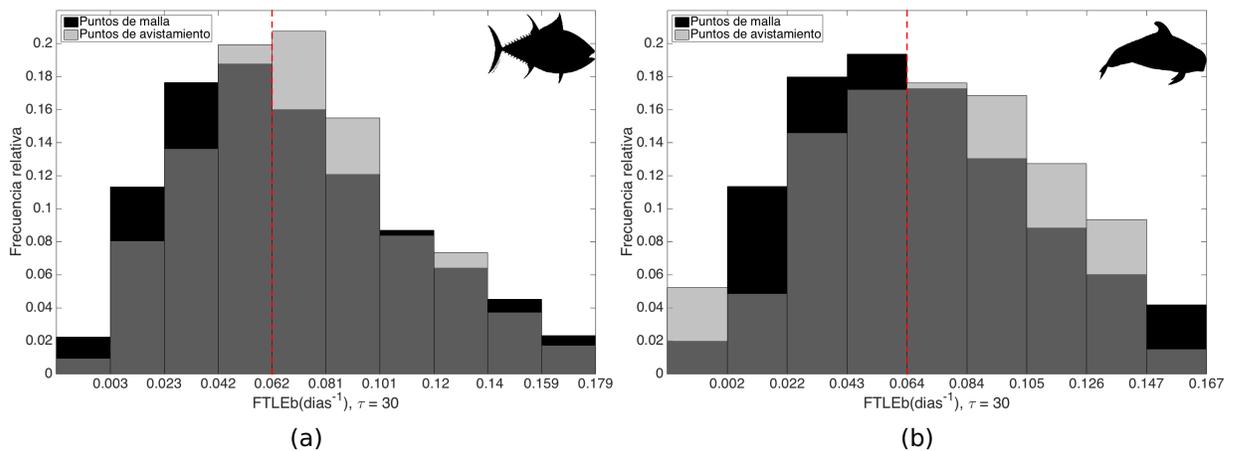
cima del umbral. Esto indica que, durante su seguimiento dentro del GoM, siete de los nueve atunes y seis de las siete ballenas estuvieron nadando más frecuentemente sobre valores altos de FTLE atractivos. Contrario a lo que observamos en el análisis espacio-temporal realizado con los mapas de FTLE atractivo sobre las trayectorias de diferentes individuos, los diagramas de cajas no presentan grandes diferencias individuo a individuo, ni entre especies.



**Figura 14.** Distribución de los valores de los FTLE atractivos evaluados en las trayectorias seguidas por los individuos en el GoM. (a) Atunes azules y (b) ballenas piloto. El alto de cada caja está delimitado por los percentiles 25 y 75. La línea que se encuentra dentro de la caja es la mediana o el percentil 50. El largo de los bigotes de las cajas está delimitado por los valores mínimos (parte inferior de la caja) y máximos (parte superior de la caja). Las cruces rojas representan los valores atípicos. La línea horizontal negra representa el valor de la mediana de los campos del FTLE para todo el GoM.

A diferencia de los diagramas de cajas donde se conserva la distribución de cada individuo, en la figura 15, observamos las frecuencias relativas de los valores de FTLE (barras grises tenues) en todos los puntos de trayectoria registrados por especie sobre las frecuencias relativas de los valores de los campos del FTLE de todo el GoM (barras

negras). Los histogramas representan la cantidad de puntos que caen en diferentes rangos de valores del FTLE atrayente, normalizada por la cantidad de registros que hay en todo el GoM y en las trayectorias de los vertebrados pelágicos. Los histogramas (barras grises), que representan los valores del FTLE visitados por los atunes aleta azul, figura 15 (a), y por las ballenas piloto, figura 15 (b), no muestran una preferencia marcada por los valores que sobrepasan el umbral (línea punteada roja) que distingue los valores altos del FTLE atrayente. En general, observamos que los valores más cercanos al umbral son los que cuentan con las frecuencias más altas. Sin embargo, en ambas especies, observamos que el rango con la mayor frecuencia relativa, la barra más alta, se encuentra a la derecha del umbral, es decir que es mayor que la mediana de los campos del FTLE atrayente que cubren todo el GoM.

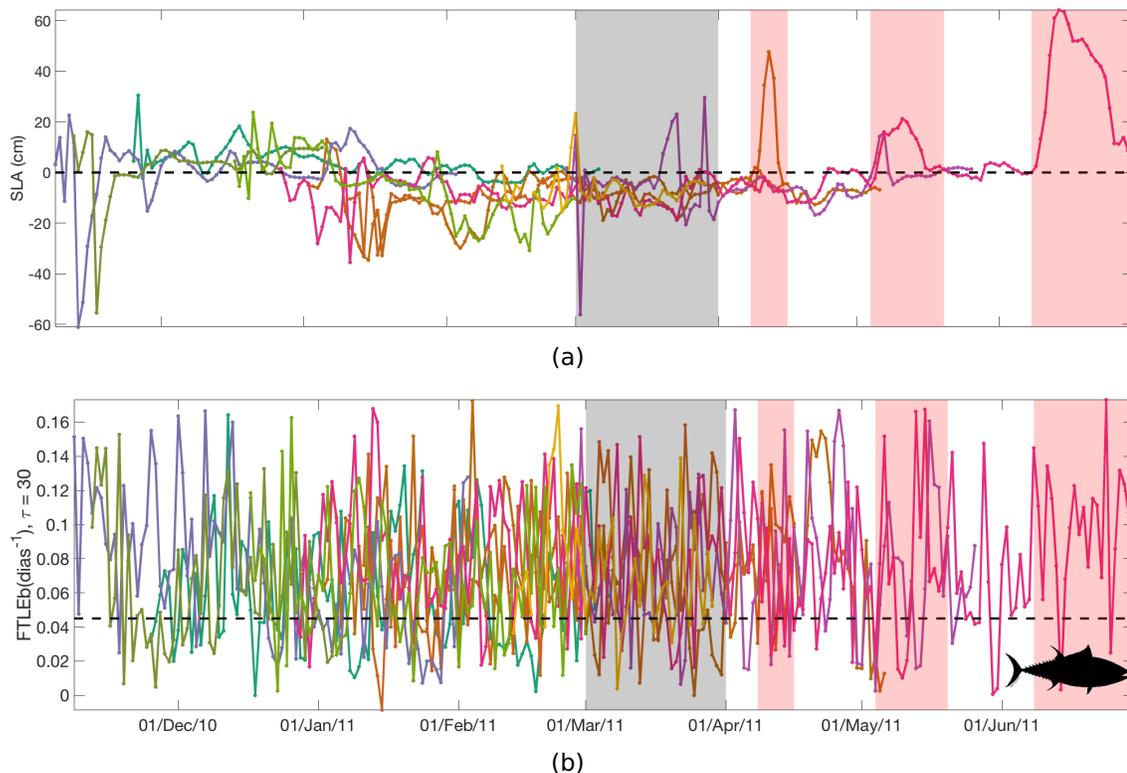


**Figura 15.** Frecuencias relativas de los valores del FTLE atrayente en puntos de trayectorias diarias de pelágicos, barras grises y en los puntos de malla, barras negras. (a) Atunes aleta azul y (b) Ballenas piloto. La línea vertical roja representa el valor de la mediana de los campos del FTLE para todo el GoM.

También obtuvimos la evolución temporal de anomalías de nivel del mar evaluados en puntos de trayectorias, figuras 16 y 17. Con esto lo que podemos identificar son eventos en los que animales conviven con estructuras que modifican la superficie del mar como los remolinos ciclónicos, (anomalías negativas del nivel del mar) y remolinos anticiclónicos (anomalías positivas del nivel del mar). En las figuras 16 y 17 los eventos descritos en los análisis previos son los se encuentran dentro de las áreas grises sombreadas y los eventos por describir son las que están dentro de las área rojas sombreadas.

Un par de eventos no descritos previamente son los que identificamos como picos

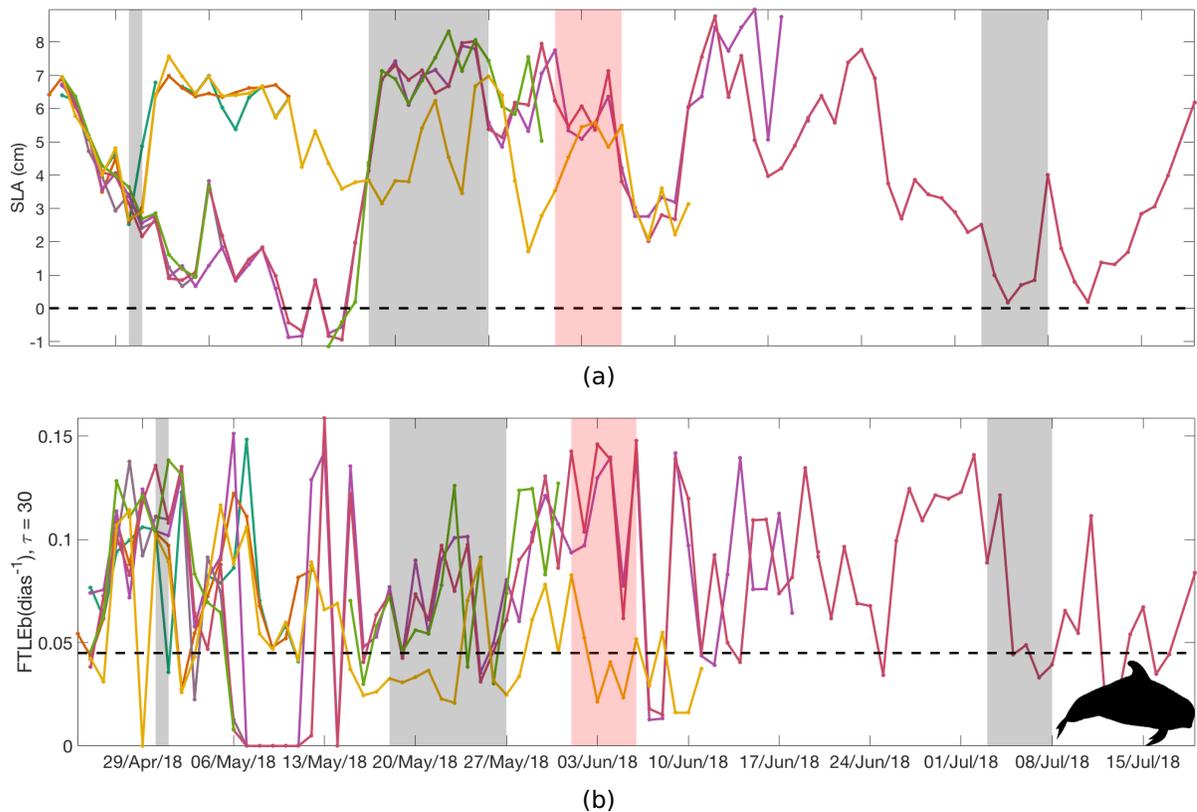
de anomalías de nivel del mar (SLA, por sus siglas en inglés) que coinciden con valores altos del FTLE (áreas rojas sombreadas en la figura 16), que están asociados a la presencia de atunes sobre estructuras relacionadas con la Corriente de Lazo. Estos eventos particulares no corresponden a la entrada de los atunes al GoM si no a eventos en los que los atunes vuelven y nadan, en la mayoría de los casos, en la periferia oeste de la corriente. Un caso particular de este tipo de encuentros es el del atún “rosa” a finales de junio, pues este atún nada sobre la corriente durante un evento de extensión de la corriente de Lazo. Las líneas punteadas, rosa, amarilla y naranja que se encuentran dentro del área sombreada gris, corresponden a la presencia de tres atunes en el noroeste del GoM durante el mes de marzo que ya fueron descritas anteriormente (figura 10). Dentro de esa misma área sombreada también se encuentra una línea morada que representa la presencia de un atún sobre la corriente de Lazo al mismo tiempo que los otros atunes nadaban sobre los remolinos en el noroeste.



**Figura 16.** Evolución diaria de valores de FTLE y anomalías del nivel del mar evaluados en puntos de trayectorias. (a) y (b) atunes aleta azul y (c) y (d) ballenas piloto. Cada color representa un individuo. Las líneas negras son la mediana de los FTLE y el cero en las anomalías del nivel del mar. Las áreas sombreadas representan eventos particulares en los que se encuentran valores altos de SLA y de FTLE.

De nuevo identificamos dentro de áreas sombreadas grises los eventos descritos previamente y en áreas sombreadas rojas los eventos no descritos. En orden crono-

lógico, los eventos que ocurren son: la separación del grupo de ballenas que resalta por la separación de las líneas hacia valores muy diferentes de anomalías del nivel del mar pero parecidos en valores altos de FTLEs. Después está el evento de finales de mayo en el que las ballenas del norte nadan sobre LCS atrayentes pegadas al talud (líneas punteadas verde, rosa y bugambilia). Un evento nuevo que no se describe en los resultados anteriores es el que ocurre a principios de junio y que se encuentra delimitado por el área sombreada roja. Durante este evento observamos que las ballenas que viajan al norte llegan a nadar sobre estructuras anticiclónicas con valores altos de FTLE atrayente, mientras que la única ballena que sigue registrando posiciones en la parte sur, línea punteada amarilla, no nada sobre valores altos de FTLE atrayente pero sí en anomalías positivas del nivel del mar. Hacia el final de la serie de tiempo aparece de nuevo el evento en el que la única ballena que sigue registrando posiciones (línea punteada rosa), entra y sale de un remolino ciclónico, que en los puntos de trayectoria no presenta anomalías negativas del nivel del mar pero sí valores altos y bajos del FTLE atrayente, indicadores de que en poco tiempo entró y salió del remolino.



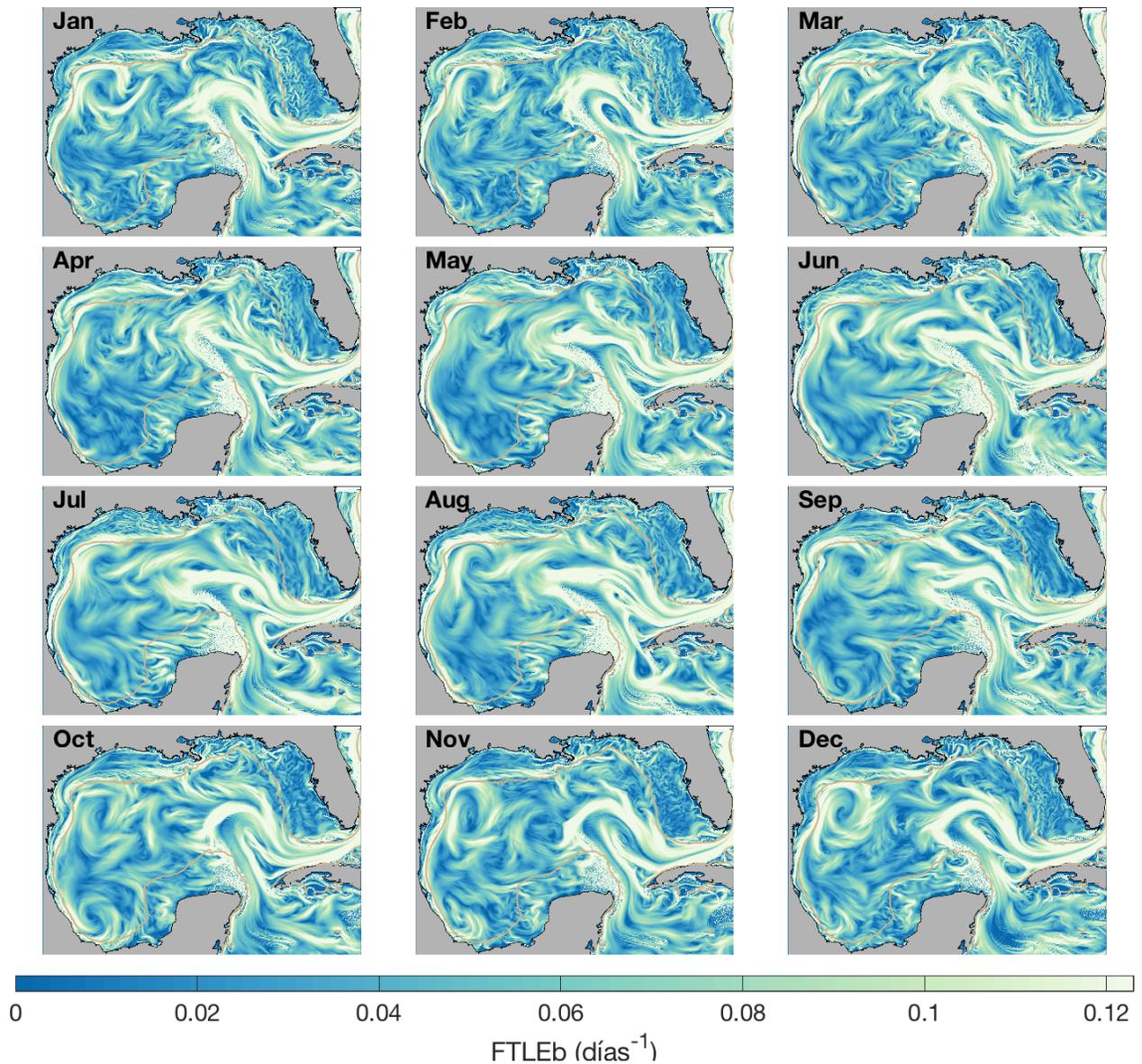
**Figura 17.** Evolución diaria de valores de FTLE y anomalías del nivel del mar evaluados en puntos de trayectorias. (a) y (b) atunes aleta azul y (c) y (d) ballenas piloto. Cada color representa un individuo. Las líneas negras son la mediana de los FTLE y el cero en las anomalías del nivel del mar.

### 3.4. Estructuras persistentes y densidades de atún aleta azul

La idea de identificar estructuras persistentes es que aunque pudiera pensarse que en general las LCS son efímeras y muy variables, dentro del desorden que ocurre a diferentes escalas espacio-temporales, existen estructuras lagrangianas más persistentes que tienden a organizar el flujo. El enfoque de esta parte del trabajo es más robusto, pues se incorporan más datos de posiciones geográficas de atunes aleta azul y un análisis lagrangiano que resulta de campos medios de corrientes resultados de una simulación de 20 años del modelo NEMO que además incluyen velocidades geostroóficas y ageostroóficas. Para entender la dinámica de mesoescala y distribución de los atunes aleta azul durante diferentes temporadas (figura 6), realizamos un análisis climatológico para determinar estructuras lagrangianas coherentes persistentes en el GoM.

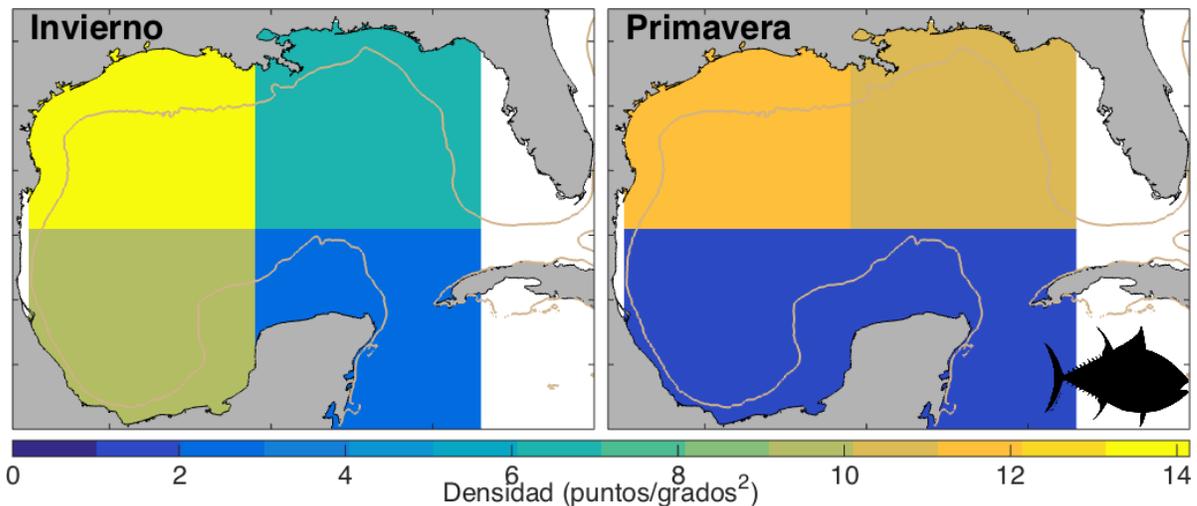
Siguiendo la metodología de Duran *et al.* (2018) y Gough *et al.* (2019), se calcularon LCS climatológicas o persistentes utilizando la climatología diaria de los campos de velocidad obtenidos de la simulación de 20 años del modelo de alta resolución, NEMO. Como se describe en la sección de metodología, se calcularon promedios mensuales del tensor de CG basados en esta climatología y con ellos se calcularon los campos de FTLEs para cada mes.

En la figura 18 observamos los campos mensuales de los FTLEs atrayentes calculados con esta metodología en donde encontramos valores altos del FTLE, representados en tonos claros en la figura 18 en todo el GoM. Sin embargo, hay un par de estructuras que permanecen ubicadas en las mismas regiones a lo largo del año. Una de ellas es la corriente de Lazo que varía de posición y forma pero se mantiene con valores altos del FTLE durante todo el año. La otra es la estructura en el noroeste del GoM que parece indicar la presencia de un giro anticiclónico. Este giro cambia un poco su forma pero se mantiene con valores altos durante todo el año. A diferencia del giro del noroeste y las diferentes estructuras asociadas al sistema de la corriente de Lazo, el ciclón de Campeche sólo se puede identificar claramente como un giro durante el mes de octubre, lo cual podría ser una deficiencia del modelo que tiende a producir un ciclón de Campeche más debilitado.



**Figura 18.** FTLE atrayente climatológico obtenido de la climatología del modelo NEMO.

Para representar la información de registros históricos de atún aleta azul que se observan en la figura 7, se calcularon las densidades estacionales como se describe en la metodología. Sólo se muestran las estaciones que presentaban el mayor número de observaciones de atunes aleta azul dentro del GoM. En el invierno las densidades más altas se concentran en la parte oeste del GoM. Para la primavera las densidades más altas se encuentran en el norte del GoM. De manera general, el noroeste del GoM cuenta con las densidades más altas de atún.



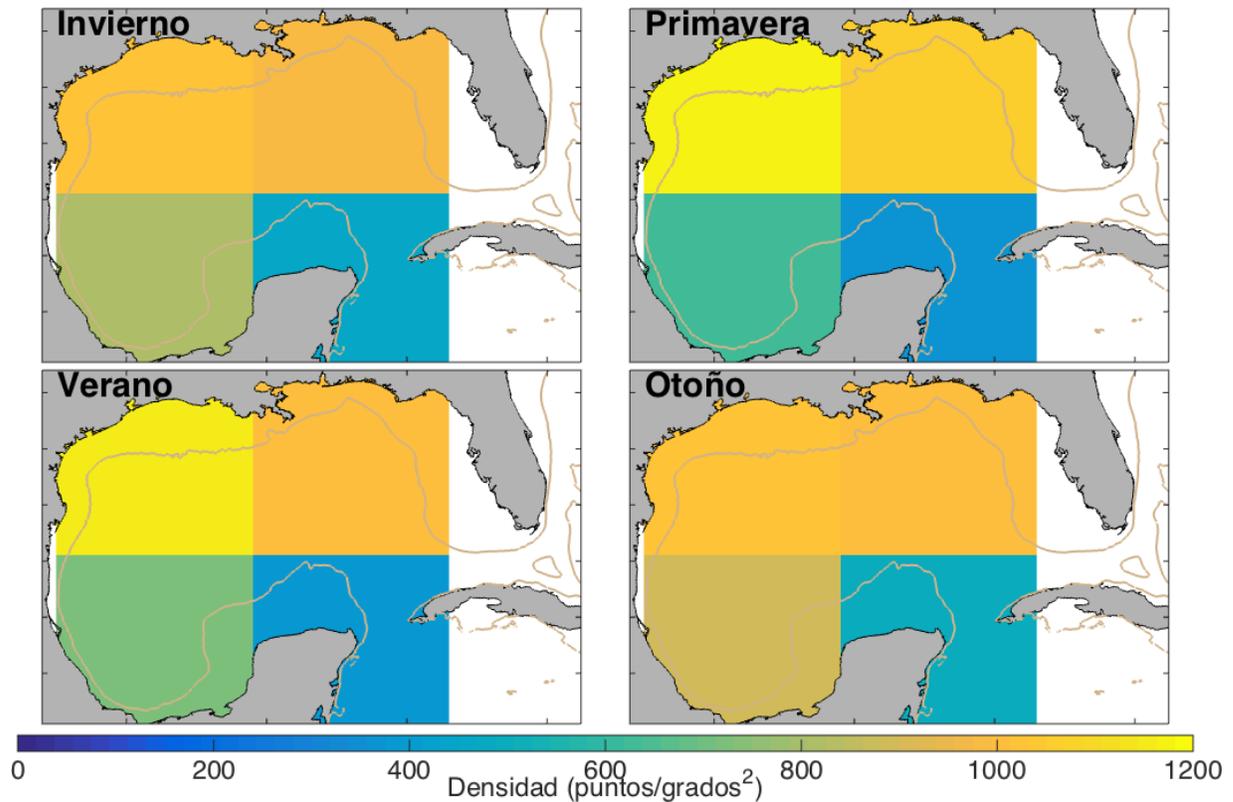
**Figura 19.** Densidades de atún aleta azul durante invierno (enero, febrero y marzo) y primavera (abril, mayo y junio).

Con los mapas de los campos mensuales de los FTLEs, figura 18, observamos que el norte del GoM es una región con estructuras atrayentes persistentes durante todo el año. En esta misma región es donde también encontramos el mayor número de observaciones de atunes, figura 19. Entonces, para confirmar que el noroeste del GoM es una región que tiende a mantener partículas, realizamos un par de experimentos donde advectamos partículas utilizando la climatología diaria de los campos de velocidad obtenidos del modelo de alta resolución, NEMO y con la climatología diaria de los campos de velocidad geostrofica.

Para el primer experimento lo que hicimos fue sembrar partículas por todo el GoM el día uno de cada mes y advectarlas por el número de días que tiene cada mes. Después de mover partículas, contamos el número total de partículas que quedan, al final de cada mes, en cada una de las regiones o pixeles de la malla de la figura 7 y lo dividimos entre el área del pixel. Este cálculo lo hicimos de manera individual para cada mes, por lo que, obtuvimos densidades en malla para los doce meses del año. Después calculamos densidades estacionales promedio a partir de las densidades mensuales. Con ello obtuvimos mapas de densidades para las cuatro estaciones del año: invierno (enero, febrero y marzo), primavera (abril, mayo y junio), verano (julio, agosto y septiembre) y otoño (octubre, noviembre y diciembre), figura 20.

En la figura 20 observamos que las densidades más altas se concentran en las regiones del norte y en específico en el noroeste donde se presenta una estructura

atrayerente a lo largo de todo el año, figura, 18. Para la región del noroeste, las densidades más altas se encuentran durante primavera y verano. En el noreste no se observa un cambio marcado entre estaciones y la densidad más alta se encuentra durante la primavera. En el suroeste y sureste las densidades más altas se presentan durante el otoño.

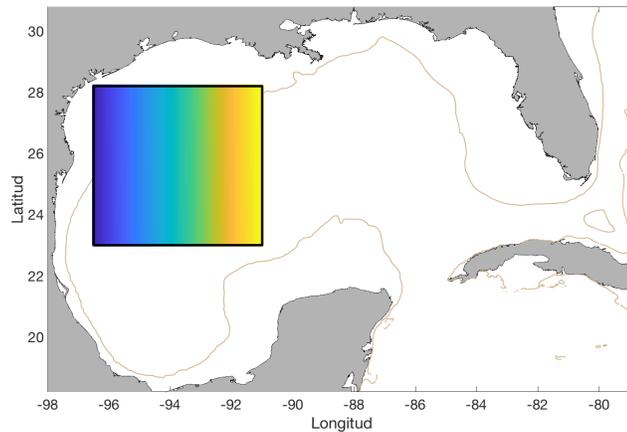


**Figura 20.** Promedios estacionales de densidades de partículas. Invierno (enero, febrero y marzo), primavera (abril, mayo y junio), verano (julio, agosto y septiembre) y otoño (octubre, noviembre y diciembre).

Como observamos en los resultados de las densidades de partículas, figura 20 y de atunes aleta azul, figura 19, el noroeste del GoM es la región que concentra las densidades más altas y donde también encontramos una estructura atrayerente persistente, figura 18, la cual puede ser la encargada de concentrar a las partículas y a los peces. Debido a los resultados obtenidos y para confirmar la naturaleza atrayerente del giro anticiclónico del noreste, obtenido a partir de datos del modelo numérico NEMO, realizamos un segundo experimento.

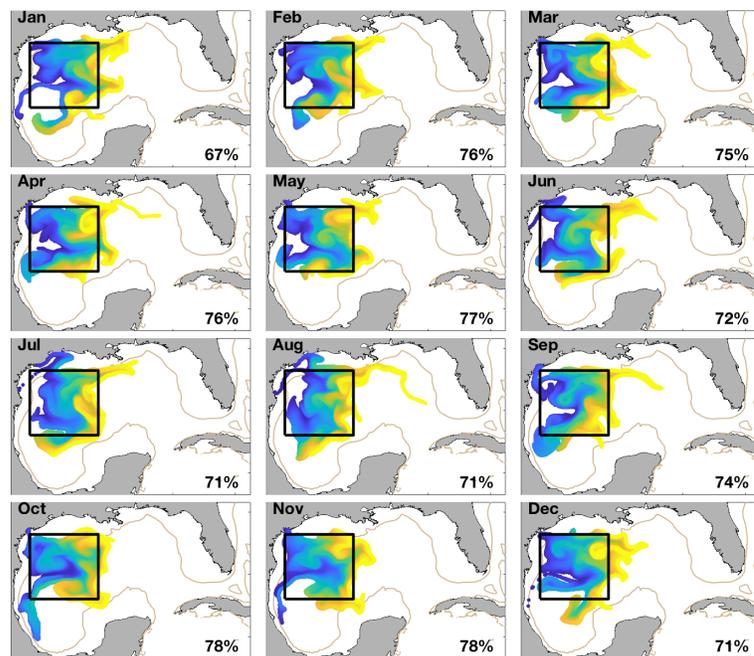
En este nuevo experimento advectamos partículas sembradas sólo en el noroeste del GoM, como se observa en la figura 21, utilizando promedios diarios de velocidades geostroficadas. Las partículas fueron sembradas el primer día del mes y se advectaron

durante el número de días que tiene el mes. Finalmente se calcularon los porcentajes de partículas que se mantienen dentro del recuadro negro que se observa en la figura 21.



**Figura 21.** Posiciones iniciales de partículas de partículas sembradas en el noroeste del GoM.

En la figura 22 observamos las posiciones finales de las partículas y el porcentaje de partículas que se queda dentro del recuadro donde fueron sembradas. Durante todo el año observamos que más del 65 % de las partículas se quedan dentro del recuadro negro por al menos un mes, lo cual es coherente con los resultados que muestran densidades altas de partículas advectadas con el modelo NEMO y de animales en el noroeste del GoM.



**Figura 22.** Posiciones finales de partículas advectadas con promedios diarios de campos geostroficados.

### 3.5. Resumen de los resultados

Con las posiciones diarias y trazadores pasivos sobre campos atrayentes de FTLEs encontramos que las ballenas piloto se mueven siguiendo el quiebre de la plataforma continental. Donde observamos que nadan sobre las estructuras influenciadas por la interacción de remolinos de la Bahía de Campeche con el talud. A diferencia de los ballenas, los atunes entran muy rápido al GoM sin seguir alguna estructura en particular. Sin embargo, observamos que los que nadan hacia el noroeste del GoM y hacia la parte oeste de la corriente de Lazo, se mueven alrededor y sobre estructuras que se forman debido a diferentes mecanismos. Con los resultados obtenidos a partir de los análisis de estructura persistente climatológicas, podemos concluir que el noroeste del GoM es una región con estructuras atrayentes persistentes, que tiende a concentrar partículas y que es frecuentada constantemente por los atunes aleta azul durante el invierno y la primavera.

Con los diagramas de cajas y las series de tiempo obtenidas del seguimiento diario y FTLEs atrayentes sobre las posiciones de ballenas piloto y atunes aleta azul en el GoM, observamos que los registros individuales de la mayoría de los pelágicos se encuentran sobre valores altos de estos FTLEs la mayoría del tiempo. Sin embargo, la distribución de FTLEs atrayentes evaluados en los puntos de trayectorias separados solamente por especie, no parece estar sesgada hacia los valores más altos. La distribución de estos valores es más parecida a una distribución normal, con mayor frecuencia relativa en valores cercanos a la mediana.

## Capítulo 4. Discusión

---

### 4.1. El movimiento de los vertebrados pelágicos y su relación con el ambiente

Una de las actividades más costosas, energéticamente, para un vertebrado pelágico es su desplazamiento de un lugar a otro (Domenici *et al.*, 2007). El desempeño que cada uno de los individuos lleva a cabo al moverse para realizar diferentes actividades es uno de los factores fundamentales en la determinación de su dinámica poblacional y la sustentabilidad de los ecosistemas, (Domenici *et al.*, 2007) y (Nathan *et al.*, 2008). Parte importante del movimiento y el desempeño de los diferentes animales marinos, está directamente influenciado por el ambiente en el que se desenvuelven, mismo que está determinado por diferentes factores ambientales, como las corrientes, la temperatura y el oxígeno; y cuya variabilidad ocurre a diferentes escalas espacio-temporales (Allen *et al.*, 2018). Particularmente para los depredadores marinos, las variaciones en el ambiente pueden impactar en el desempeño de sus movimientos o en sus estrategias de forrajeo, (e.g. Bost *et al.* (2009) y Abrahms *et al.* (2018)).

La mayoría de los depredadores tope son encontrados donde sus presas son abundantes, lo cual, muchas veces, depende las condiciones ambientales. En el ambiente marino, las relaciones entre las presas y las condiciones oceanográficas pueden ser encontradas al menos de dos maneras. Una es estudiando las condiciones que son favorables para aumentar la productividad primaria y la otra es estudiando las condiciones que pueden fomentar la acumulación de sus presas (Gregr y Trites, 2001). Una gran desventaja de estudiar el desplazamiento de los depredadores en función de las condiciones ambientales favorables para la producción primaria, es que existe un desfase temporal entre los procesos involucrados en la producción primaria y secundaria y la presencia del depredador. Sin embargo, este desfase puede verse reducido si se establecen ideas sobre la distribución de animales en función de los factores asociados a la acumulación de presas. De cualquier forma, todo dependerá de la escala espacio-temporal a la cual se esté capturando la información con la que se relacionan el depredador, la presa y el ambiente (Gregr y Trites, 2001), (Nathan *et al.*, 2008) y (Allen *et al.*, 2018).

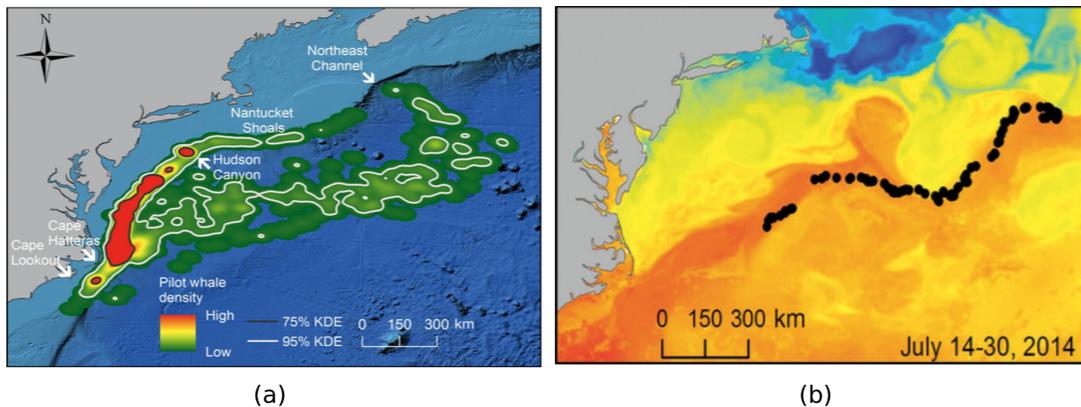
Un par de procesos físicos con respuestas ecológicas directas e indirectas son los

frentes y los remolinos (Owen, 1981), los cuales son capaces de modificar la distribución de variables abióticas y bióticas (Mann y Lazier, 2005). En general, los impactos en el transporte de partículas y en procesos ecológicos que tienen los frentes y remolinos son especialmente importantes para los procesos cuyas variaciones temporales y espaciales son del orden de días a meses y de decenas a cientos de kilómetros. Ejemplos de estos impactos sobre procesos ecológicos son: el aumento y mantenimiento de la producción de organismos, la acumulación de presas, el aumento en las interacciones entre niveles tróficos, refugios de reproducción y la creación y de nuevas comunidades (Owen, 1981).

En particular en el Golfo de México, los procesos de mesoescala dominan su circulación y son de gran importancia para entender el transporte de partículas y la distribución horizontal y vertical de las propiedades del Golfo. Las herramientas de sistemas dinámicos aplicadas para ubicar y seguir estructuras lagrangianas coherentes fueron muy útiles para identificar algunas de estas estructuras de mesoescala que muchas veces son las encargadas de organizar el transporte y aunque tal vez de manera indirecta, afectar la distribución espacio-temporal de, en nuestro caso de estudio, dos especies de vertebrados pelágicos que habitan o visitan el Golfo de México.

#### **4.2. Ballenas piloto y estructuras sobre el talud**

El quiebre de la plataforma, parece ser un lugar de interés para depredadores, en particular para depredadores profundos, como las ballenas piloto (Olson, 2009) y esto no fue una excepción para las siete ballenas piloto marcadas en las costas de Veracruz. La mayor parte del tiempo que fueron seguidas, estuvieron muy cercanas al quiebre de la plataforma, lo que coincide con los trabajos de Mullin *et al.* (2004) y Thorne *et al.* (2017) (ver figura 23 a). En este último trabajo también observaron que un par de ballenas se alejaron del quiebre de la plataforma, siguiendo lo que parece un frente, ver figura 23 (b). En nuestro caso de estudio, las ballenas piloto no mostraron un alejamiento de la isobata de 200 m (representativa del quiebre del talud) por mucho tiempo.



**Figura 23.** Ballenas piloto en el Atlántico norte. (a) Densidades Kernel de las posiciones de 33 ballenas seguidas con marcadores satelitales. (b) Trayectoria de 15 días de una de las ballenas seguidas sobre un mapa de temperatura superficial del mar del 22 de julio del 2014. Tomadas de Thorne *et al.* (2017).

Una razón por la que a las ballenas les es conveniente permanecer cerca del talud es que, la dinámica de los lugares con topografía abrupta puede favorecer sus oportunidades de forrajeo. Esto debido a que se crean las condiciones dinámicas favorables para el mismo o porque son lugares donde se incrementa la densidad de sus presas (Genin, 2004), (Olson, 2009), (Thorne *et al.*, 2017). En el trabajo de Genin (2004) se mencionan cinco mecanismos que pueden provocar acumulación de presas y depredadores sobre lugares con topografía abrupta (i. e. quiebre de plataforma y cañones submarinos). Estos cinco mecanismos de agregación y acumulación están asociados a los flujos verticales y a los comportamientos de los animales que responden a las condiciones ambientales (i. e. migración vertical del zooplancton) (Genin, 2004). En cuanto a los flujos verticales, estos a su vez, pueden ser provocados, en un orden de días a semanas y de decenas a cientos de kilómetros, por la interacción entre el fondo y algunos fenómenos de meso y submesoescala.

En nuestro caso de estudio, la interacción de los remolinos con la corriente y el frente sobre el quiebre de la plataforma puede hacer que, en parte, dicho frente se separe del quiebre topográfico y las presas de las ballenas se desplacen a otros lados al menos temporalmente. Este desplazamiento parece concordar con el movimiento de estructuras coherentes que son seguidas por las ballenas, aunque también podría ser que este seguimiento de las LCS se debe a un cambio en sus estrategias de forrajeo. Podría especularse, por ejemplo, que las LCS tienen el efecto de acercar a las presas hacia la superficie, lo que puede permitirles hacer buceos de forrajeo más someros y

así gastar menos energía. En el trabajo de Abrahms *et al.* (2018) se sugiere que las zonas con mucha actividad de mesoescala son favorables para el consumo de energía de depredadores tope; ya sea porque acumulan a sus presas o porque optimizan sus estrategias de forrajeo.

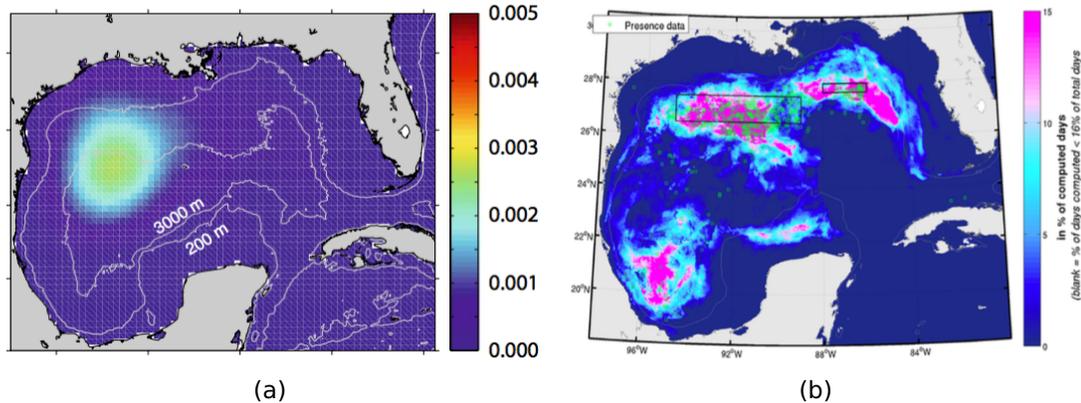
### **4.3. Atunes aleta azul y estructuras del norte**

Durante las diferentes etapas de su vida, muchos peces pelágicos se enfrentan a diferentes retos impuestos por su ambiente. Como larvas, la columna de agua puede ser demasiado viscosa y restringir su movimiento debido a la gran demanda energética que este puede tener. Sin embargo, con el paso del tiempo, las larvas crecen y son capaces de superar los obstáculos impuestos por algunas de las características del fluido. Después como adultos, la locomoción de los peces pelágicos puede cambiar según sus necesidades tales como: su alimentación, reproducción, migración y protección de depredadores. En este sentido, el desempeño individual en la locomoción es muy relevante para el desarrollo de los diferentes peces pelágicos (Secor, 2015).

Parte importante de la vida de muchos de los grandes pelágicos, como los atunes aleta azul, es su migración. En el caso de los atunes aleta azul, una de las principales actividades que hace que migren es la búsqueda alimento y de lugares óptimos para su reproducción, desove y desarrollo de sus larvas. En particular, resultados del seguimiento satelital de atunes aleta azul del Atlántico han revelado que existen dos poblaciones delimitadas por su hábitat de reproducción, el Golfo de México y el Mar Mediterráneo. Ambas poblaciones pueden llegar a traslaparse en el Atlántico Norte durante sus viajes de forrajeo (Block *et al.*, 2001) y (Block *et al.*, 2005). Los individuos seguidos en este trabajo forman parte de la población de atunes aleta azul del oeste del Atlántico, los cuales entran, contracorriente, al Golfo de México por el estrecho de Florida.

Los resultados de los nueve atunes seguidos en el interior del GoM muestran que los atunes nadan através y alrededor de diferentes estructuras por todo el Golfo sin mantener un patrón muy claro, como en el caso de las ballenas piloto. En algunos eventos logramos observar como los atunes nadan sobre LCS ubicadas en el oeste del GoM y sobre LCS formadas al oeste de la corriente de Lazo. Un resultado que

obtuvimos en este trabajo y que ya ha sido reportado en Block *et al.* (2005), Teo *et al.* (2007a), Teo *et al.* (2007b) y Druon *et al.* (2016) es que el noroeste del GoM, una región dominada por estructuras de mesoescala en la que arriban varios remolinos del Lazo además de tener su propia actividad local, es una región frecuentada por los atunes aleta azul durante su etapa reproductiva, ver en figura 24.



**Figura 24.** Atunes aleta azul en el Golfo de México durante su etapa reproductiva. (a) Porcentaje de uso del hábitat. Tomada de Teo *et al.* (2007b). (b) Hábitat potencial para desovar (abril a mayo) basado en un modelo de nicho ecológico. Tomada de Druon *et al.* (2016).

Los movimientos diarios de los vertebrados pelágicos, los análisis de LCS climatológicas nos ayudaron a identificar una estructura atrayente persistente en el noroeste del GoM, reportada previamente en Gough *et al.* (2019). La naturaleza atrayente de esta región se ve reflejada en los experimentos con trayectorias de partículas, que coinciden con lo encontrado en Miron *et al.* (2017) y Gough *et al.* (2019) quienes sugieren que la atracción es producto de a una circulación sobre la plataforma norte y oeste que tiende a converger hacia esta región, además de un flujo anticiclónico asociado a una corriente de frontera oeste. Por otra parte, la ubicación de esta estructura coincide con la región en la que se encuentran las mayores densidades de atún aleta azul registrados dentro del GoM con marcas satelitales y donde los mapas de hábitat muestran las probabilidades más altas. En conjunto con los estudios previos de seguimiento satelital, los modelos hábitat idóneo (figuras 5 (c) y 24 (c)) apoyan la idea de que las condiciones ambientales del norte y en especial del noroeste, por su naturaleza atrayentes, son favorables para el desove y/o refugio de larvas de los atunes, lo cual coincide con el tipo de comportamiento de los atunes que migran hacia el Mediterráneo, donde la mayor cantidad de larvas es encontrada en giros anticiclónicos (Bakun, 2006).

## Capítulo 5. Conclusiones

---

En este trabajo logramos indentificar al menos dos procesos de la dinámica me-soescala del GoM que resultan favorables para los animales. Un proceso que está relacionado con los movimientos de ballenas, es la interacción entre los remolinos anticiclónicos y ciclónicos que viajan desde la bahía de Campeche hacia el talud, los cuales generan otras estructuras que viajan a lo largo de la costa que favorecen las oportunidades de forrajeo de las ballenas piloto. Otro de los procesos está a asociado a las estructuras atrayentes y las capacidades de movimiento de los atunes aleta azul que hacen que el noroeste del GoM funcione como hogar para sus larvas donde se mantienen protegidas de depredadores. Los resultados obtenidos en este trabajo apoyan las ideas propuestas por Bakun (2006) quien menciona que es necesario investigar los fenómenos de mayor frecuencia (i.e. frentes y remolinos) para entender mejor algunos de los procesos ecológicos. Sin embargo, en este trabajo, no establecimos una relación estadística determinista entre las estructuras atrayentes y los movimientos de los pelágicos en el GoM.

En un futuro se podría complementar el trabajo con información de las profundidades de buceo de los vertebrados pelágicos y la estructura vertical de las propiedades ambientales y dinámicas de los lugares que visitan (e. g. Luo *et al.* 2015). En ese trabajo integran la componente vertical de variables ambientales para obtener el contenido de calor de la columna de agua y lo comparan con posiciones de pelágicos en el GoM. Por otra parte, en la parte horizontal, se podrían utilizar observaciones de campos de velocidades con mayor resolución horizontal y temporal para identificar estructuras de submesoescala y ver si la relación con las posiciones es más directa. Incluso algo que fue una limitante para este trabajo fue que los campos de corrientes geostróficas utilizados, cuentan con una resolución espacial muy pobre en zonas cercanas a la costa; por lo que, se podría mejorar esta investigación con campos con mayor resolución en regiones más cercanas a la costa. Con los datos actuales, se podrían aplicar diferentes técnicas de detección de LCS, tal como el método Geodésico o de alguna manera filtrar la gran cantidad de LCS que observamos en todo el GoM.

## Literatura citada

- Abrahms, B., Scales, K. L., Hazen, E. L., Bograd, S. J., Schick, R. S., Robinson, P. W., y Costa, D. P. (2018). Mesoscale activity facilitates energy gain in a top predator. *Royal Society*.
- Allen, R. M., Metaxas, A., y Snelgrove, P. V. R. (2018). Applying movement ecology to marine animals with complex life cycles. *Annual Review of Marine Science*, pp. 19–42.
- Bakun, A. (2006). Fronts and eddies as key structures in the habitat of marine fish larvae: opportunity, adaptive response and competitive advantage. *Scientia Marina*, **70**(2): 105–122.
- Beron-Vera, F., Olascoaga, M. J., y Goni, G. (2010). Surface ocean mixing inferred from different multisatellite altimetry measurements. *Journal of Physical Oceanography*, pp. 2466–2480.
- Block, B., Dewar, H., Blackwell, S. B., Williams, T., Prince, E. D., Farwell, C. J., Boustany, A. M., Teo, S. L. H., Seitz, A., Walli, A., y D., F. (2001). Migratory movements, depth preferences, and thermal biology of Atlantic bluefin tuna. *Science*, pp. 1310–1314.
- Block, B. A., Teo, S. L. H., Walli, A., Boustany, A. M., Stokesbury, M. J. W., Farwell, C. J., Weng, K. C., Dewar, H., y Williams, T. (2005). Electronic tagging and population structure of Atlantic bluefin tuna. *Nature*, **434**: 1121–1127.
- Bost, C., Cotté, C., Bailleul, F., Cherel, Y., Charrassin, J., Guinet, C., Ainley, D., y Weimerskirch, H. (2009). The importance of oceanographic fronts to marine birds and mammals of the southern oceans. *Journal of Marine Systems*, **78**(3): 363–376.
- Braun, C. D., Gaube, P., Sinclair-Taylor, T. H., Skomal, G. B., y Thorrold, S. R. (2019). Mesoscale eddies release pelagic sharks from thermal constraints to foraging in the ocean twilight zone. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **116**(35): 17187–17192.
- Brink, K. (2016). Cross-shelf exchange. *Annual Review of Marine Science*, **8**(1): 59–78.
- Chapman, D. C. y Lentz, S. J. (1993). Trapping of a coastal density front by the bottom boundary layer. *Journal of Physical Oceanography*.
- Condie, S. A. (1993). Formation and stability of shelf break fronts. *Journal of Geophysical Research*.
- Cotte, C., d'Ovidio, F., Chaigneau, A., Lévy, M., Taupier-Letage, I., Mate, B., y Guinet, C. (2011). Scale dependent interactions of mediterranean whales with marine dynamics. *Limnology and Oceanography*.
- De Monte, S., Cotte, C., d'Ovidio, F., Lévy, M., Le Corre, M., y Weimerskirch, H. (2012). Frigatebird behaviour at the ocean–atmosphere interface: integrating animal behaviour with multi-satellite data. *Journal of The Royal Society Interface*.
- Domenici, P., Claireaux, G., y McKenzie, D. J. (2007). Environmental constraints upon locomotion and predator–prey interactions in aquatic organisms: an introduction. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **362**(1487): 1929–1936.

- Druon, J.-N., Fromentin, J.-M., Hanke, A. R., Arrizabalaga, H., Damalas, D., Tičina, V., Quílez-Badia, G., Ramirez, K., Arregui, I., Tserpes, G., y et al. (2016). Habitat suitability of the atlantic bluefin tuna by size class: An ecological niche approach. *Progress in Oceanography*, **142**: 30–46.
- Duran, R., Beron-Vera, F. J., y Olascoaga, M. J. (2018). Extracting quasi-steady Lagrangian transport patterns from the ocean circulation: An application to the Gulf of Mexico. *Scientific Reports*, **8**(1).
- Franks, P. J. S. (1992). Phytoplankton blooms at fronts: patterns, scales and physical forcing mechanisms. *Reviews in Aquatic Sciences*.
- Gaube, P., Braun, C. D., Lawson, G. L., McGillicuddy, D. J., Penna, A. D., Skomal, G. B., Fischer, C., y Thorrold, S. R. (2018). Mesoscale eddies influence the movements of mature female white sharks in the Gulf Stream and Sargasso Sea. *Scientific Reports*, **8**(1).
- Genin, A. (2004). Bio-physical coupling in the formation of zooplankton and fish aggregations over abrupt topographies. *Journal of Marine Systems*, **50**(1-2): 3–20.
- Gough, M. K., Beron-Vera, F., Olascoaga, M. J., Sheinbaum, J., Jouanno, J., y Duran, R. (2019). Persistent Lagrangian transport patterns in the northwestern Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography*, **49**(2): 353–367.
- Gregr, E. J. y Trites, A. W. (2001). Predictions of critical habitat for five whale species in the waters of coastal British Columbia. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **58**(7): 1265–1285.
- Hadjighasem, A., Farazmand, M., Blazeovski, D., Froyland, G., y Haller, G. (2017). A critical comparison of lagrangian methods for coherent structure detection. *Chaos*, **27**(053104-053104-25).
- Haller, G. y Beron-Vera, F. (2012). Geodesic theory of transport barriers in two-dimensional flows. *Physica D*.
- Haller, G. y Yuan, G. (2000). Lagrangian coherent structures and mixing in two-dimensional turbulence. *Physica D*, (147): 352–370.
- Hunt, G. L., Harrison, N. M., y Cooney, R. T. (1990). The influence of hydrographic structure and prey abundance on foraging of least auklets. *Studies in Avian Biology*.
- Hussey, N. E., Kessel, S. T., Aarestrup, K., Cooke, S. J., Cowley, P. D., Fisk, A. T., Harcourt, R. G., Holland, K. N., Iverson, S. J., Kocik, J. F., y et al. (2015). Aquatic animal telemetry: A panoramic window into the underwater world. *Science*, **348**(6240): 1255642–1255642.
- Indest, A., Kirwan, A., Lewis, J.K.wis, J., y Reinersman, P. (1989). A synopsis of mesoscale eddies in the Gulf of Mexico. *Elsevier Oceanography Series*.
- Jefferson, T. y Schirot, A. J. (1997). Distribution of cetaceans in the offshore Gulf of Mexico. *Mammal Society*.
- Jouanno, J., Ochoa, J., Pallàs-Sanz, E., Sheinbaum, J., Andrade-Canto, F., Candela, J., y Molines, J.-M. (2016). Loop current frontal eddies: Formation along the Campeche Bank and impact of coastally trapped waves. *Journal of Physical Oceanography*, **46**(11): 3339–3363.

- Jouanno, J., Pallàs-Sanz, E., y Sheinbaum, J. (2018). Variability and dynamics of the Yucatan upwelling: High-resolution simulations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, (123): 1251–1262.
- Karrasch, D. (2015). Attracting Lagrangian coherent structures on Riemannian manifolds. *Chaos*, pp. 087411–1–087411–9.
- Lekien, F., Coulliette, C., Mariano, A. J., Ryan, E. H., Shay, L. K., Haller, G., y Marsden, J. (2005). Pollution release tied to invariant manifolds: A case study for the coast of Florida. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, **210**(1-2): 1–20.
- Luo, J., Ault, J. S., Shay, L. K., Hoolihan, J. P., Prince, E. D., Brown, C. A., y Rooker, J. R. (2015). Ocean heat content reveals secrets of fish migrations. *PLOS ONE*, **10**(10): e0141101.
- Mahadevan, A. (2016). The impact of submesoscale physics on primary productivity of plankton. *Annual Review of Marine Science*, **8**(1): 161–184.
- Mann, K. H. y Lazier, J. R. N. (2005). *Dynamics of Marine Ecosystems*. Wiley-Blackwell.
- Maul, G. A., Williams, F., Roffer, M., y Sousa, F. M. (1984). Remotely sensed oceanographic patterns and variability of bluefin tuna catch in the Gulf of Mexico. *Oceanologica acta*.
- McGillicuddy, D. J. y Robinson, A. R. (1997). Eddy-induced nutrient supply and new production in the sargasso sea. *Deep-Sea Research I*.
- Meunier, T., Sheinbaum, J., Pallàs-Sanz, E., Tenreiro, M., Ochoa, J., Ruiz-Angulo, A., Carton, X., y de Marez, C. (2020). Heat content anomaly and decay of warm-core rings: the case of the Gulf of Mexico. *Geophysical Research Letters*, **47**(3).
- Miron, P., Beron-Vera, F. J., Olascoaga, M. J., Sheinbaum, J., Pérez-Brunius, P., y Froyland, G. (2017). Lagrangian dynamical geography of the Gulf of Mexico. *Scientific Reports*, **7**(1).
- Mullin, K. D., Hoggard, W., y Hansen, L. J. (2004). Abundance and seasonal occurrence of cetaceans in outer continental shelf and slope waters of the north-central and northwestern Gulf of Mexico. *Gulf of Mexico Science*, **22**(1).
- Nathan, R., Getz, W. M., Revilla, E., Holyoak, M., Kadmon, R., Saltz, D., y Smouse, P. E. (2008). A movement ecology paradigm for unifying organismal movement research. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **105**(49): 19052–19059.
- Olascoaga, M. (2010). Isolation on the west Florida shelf with implications for red tides and pollutant dispersal in the Gulf of Mexico. *Nonlinear Processes Geophysics*.
- Olson, D. B. (1991). Rings in the ocean. *Annual Review Earth Planet*.
- Olson, P. (2009). Pilot whales: *Globicephala melas* and *G. macrorhynchus*. En: W. F. Perrin, B. Würsig, y J. G. M. Thewissen (eds.), *Encyclopedia of Marine Mammals*. Academic Press, pp. 847–852.
- Onu, K., Huhn, F., y Haller, G. (2015). Lcs tool: A computational platform for Lagrangian coherent structures. *Journal of Computational Science*.

- Otis, D., Le Hénaff, M., Kourafalou, V., McEachron, L., y Muller-Karger, F. (2019). Mississippi river and Campeche bank (Gulf of Mexico) episodes of cross-shelf export of coastal waters observed with satellites. *Remote Sensing*, **11**(6): 723.
- Owen, R. W. (1981). Fronts and eddies in the sea: mechanisms, interactions and biological effects. *Anal. Mar. Ecosyst.*.
- Peacock, T. y Haller, G. (2013). Lagrangian coherent structures: The hidden skeleton of fluid flows. *Physics Today*.
- Pérez-Brunius, P., García-Carrillo, P., Dubranna, J., Sheinbaum, J., y Candela, J. (2013). Direct observations of the upper layer circulation in the southern Gulf of Mexico. *Deep-Sea Research II*.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., y Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, pp. 231–259.
- Pierrehumbert, R. T. y Yang, H. (1993). Global mixing on isentropic surfaces. *Journal of atmospheric sciences*, **50**(15).
- Prants, S. V., Uleysky, M. Y., y Budyansky, M. V. (2012). Lagrangian coherent structures in the ocean favorable for fishery. *Doklady Earth Sciences*, **447**(1): 1269–1272.
- Prants, S. V., Uleysky, M. Y., y Budyansky, M. V. (2017). *Lagrangian Oceanography: Large-scale Transport and Mixing in the Ocean*. Springer.
- Robinson, A. R. (1983). *Eddies in marine science*. Springer-Verlag.
- Rooker, Jay, R., Dance, M. A., Wells, R. J. D., Ajemian, M. J., Block, B. A., Castleton, M., Drymon, J. M., Falterman, B. J., Franks, J. S., Hammerschlag, N., Hendon, J. M., Hoffmayer, E. R., Kraus, R. T., McKinney, J. A., Secor, D. H., Stunz, G. W., y Walter, J. F. (2019). Population connectivity of pelagic megafauna in the Cuba-Mexico-United States triangle. *Nature*, pp. 1–13.
- Schmitz, W., Biggs, D., Lugo-Fernandez, A., Oey, L., y Sturges, W. (2005). A synopsis of the circulation in the Gulf of Mexico and on its continental margins. *in Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and Models*, pp. 11–29.
- Secor, D. H. (2015). *Migration ecology of marine fishes*. Johns Hopkins University Press.
- Shadden, S. C., Lekien, F., y Marsden, J. E. (2005). Definition and properties of Lagrangian coherent structures from finite-time Lyapunov exponents in two-dimensional aperiodic flows. *Physica D*, **212**: 271–304.
- Snyder, S., Franks, P. J. S., Talley, L. D., Xu, Y., y Kohin, S. (2017). Crossing the line: Tunas actively exploit submesoscale fronts to enhance foraging success. *Limnology and Oceanography Letters*, **2**(5): 187–194.
- Souza, J. M. A. C., de Boyer Montégut, C., y Le Traon, P. Y. (2011). Comparison between three implementations of automatic identification algorithms for the quantification and characterization of mesoscale eddies in the South Atlantic Ocean. *Ocean Science*, **7**(3): 317–334.

- Teo, S. L. H., Boustany, A., Dewar, H., Stokesbury, M. J. W., Weng, K. C., Beemer, S., Seitz, A. C., Farwell, C. J., Prince, E. D., y Block, B. A. (2007a). Annual migrations, diving behavior, and thermal biology of Atlantic bluefin tuna, *Thunnus thynnus*, on their Gulf of Mexico breeding grounds. *Marine Biology*, **151**(1): 1–18.
- Teo, S. L. H., Boustany, A. M., y Block, B. (2007b). Oceanographic preferences of Atlantic bluefin tuna, *Thunnus thynnus*, on their Gulf of Mexico breeding grounds. *Marine Biology*.
- Tew Kai, E., Vincent, R., Sudre, J., Weimerskirch, H., Lopez, C., Hernandez-Garcia, E., Marsac, F., y Garçon, V. (2009). Top marine predators track Lagrangian coherent structure. *Proceedings of the National Academy of Sciences*.
- Thorne, L., Foley, H., Baird, R., Webster, D., Swaim, Z., y Read, A. (2017). Movement and foraging behavior of short-finned pilot whales in the Mid-Atlantic Bight: importance of bathymetric features and implications for management. *Marine Ecology Progress Series*, **584**: 245–257.
- Vázquez de la Cerda, A., Reid, R., DiMarco, S., y Jochens, A. (2005). Bay of Campeche circulation: An update. in *Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and Models*, pp. 279–293.
- Vortmeyer-Kley, R., Holtermann, P., Feudel, U., y Gräwe, U. (2019). Comparing eulerian and lagrangian eddy census for a tide-less, semi-enclosed basin, the baltic sea. *Ocean Dynamics*.
- Walker, N. (2005). Wind and eddy-related shelf/slope circulation processes and coastal upwelling in the northwestern Gulf of Mexico. in *Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and Models*, pp. 279–293.
- Wilson, S., Jonsen, I., Schalert, R., Ganong, J. E., Castleton, M., Spires, A., Boustany, A. M., Stokesbury, J. W., y Block, B. (2015). Tracking the fidelity of Atlantic bluefin tuna released in Canadian waters to the Gulf of Mexico spawning grounds. *Canadian journal of fisheries and aquatic sciences*, **72**(11): 1700–1717.
- Zavala Sansón, L. (2019). Nonlinear and time-dependent equivalent-barotropic flows. *Journal of Fluid Mechanics*, **871**: 925–951.
- Zavala Sansón, L., Pérez-Brunius, P., y Sheinbaum, J. (2017). Surface relative dispersion in the southwestern Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography*, **47**(2): 387–403.