



## **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología  
Biología Marina

Patrones de dispersión de crías de tortuga caguama (*Caretta caretta*), analizados por medio de modelos de corrientes oceánicas para el océano Atlántico, golfo de México y mar Caribe

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA:  
IÑAKY ITURBE DARKISTADE

TUTOR DR. F ALBERTO ABREU GROBOIS  
ICMYL, Mazatlán

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR

Dr. Raúl Aguirre Gómez  
Instituto de Geografía, UNAM  
Dr. Fausto Roberto Méndez de la Cruz  
Instituto de Biología, UNAM  
Dr. Rodolfo Riojas Nieto  
Fac. Ciencias, UNDI Sisal  
Dr. David Alberto Salas de León  
ICMYL, UNAM

MÉXICO, D. F. Marzo 2013



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Patrones de dispersión de crías de tortuga caguama (*Caretta caretta*), analizados por medio de modelos de corrientes oceánicas para el océano Atlántico, golfo de México y mar Caribe

A mi hija Enara:

Tú representas lo más hermoso y lo mejor de mi vida

## AGRADECIMIENTOS:

Quiero agradecer a mis padres Salvador y Rocío por su infinito apoyo y paciencia a mis locuras y aventuras. A mis hermanos Miren y Geiska con los que he podido contar toda mi vida. A todos mi amig@s que de una forma u otra me han apoyado y han sido partícipes de mis experiencias a lo largo de mi vida, son muchos y sería ingrato de mi parte dejar de mencionar alguno en estas líneas, pero a todos los recuerdo con cariño y están en mis pensamientos constantemente.

## Contenido

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Listado de Figuras y Tablas .....                                    | 4  |
| 2     | Introducción.....  | 5  |
| 2.1   | Historia de vida.....  | 5  |
| 2.2   | Ecología.....  | 7  |
| 2.3   | La tortuga caguama ( <i>Caretta caretta</i> , Linnaeus).....         | 8  |
| 2.3.1 | Clasificación taxonómica (Zug <i>et al.</i> , 2001).....             | 8  |
| 2.3.2 | Biología.....  | 8  |
| 3     | Antecedentes .....   | 10 |
| 4     | Justificación .....  | 13 |
| 5     | Objetivos.....   | 14 |
| 5.1   | Objetivo General .....   | 14 |
| 5.2   | Objetivos Específicos .....  | 14 |
| 6     | Zona de estudio .....  | 15 |
| 6.1   | Corrientes marinas .....   | 15 |
| 6.2   | Colonias seleccionadas.....  | 16 |
| 7     | Materiales y Métodos .....   | 18 |
| 7.1   | Simulaciones.....  | 18 |
| 7.2   | Interacciones con actividades antropogénicas .....                   | 19 |
| 7.2.1 | Pesquerías.....  | 19 |
| 7.2.2 | Derrame Petrolero DWH.....   | 22 |
| 7.2.3 | Genética .....   | 23 |
| 8     | Resultados .....   | 24 |
| 8.1   | Patrones de dispersión.....  | 24 |
| 8.2   | Convergencia en los patrones de dispersión.....                      | 28 |
| 8.2.1 | Patrones de agrupamiento .....                                       | 28 |
| 8.2.2 | Derrame de petróleo de la plataforma Deep Water Horizon .....        | 29 |
| 8.2.3 | Agregación en zonas de pesca .....                                   | 32 |
| 8.3   | Agregaciones en zonas de forrajeo.....                               | 34 |
| 8.3.1 | Lapsos de tiempo hasta reclutamiento en sitios de alimentación.....  | 34 |
| 8.3.2 | Comparación de los resultados de genética con las simulaciones ..... | 38 |
| 9     | Discusión.....   | 40 |
| 10    | Conclusiones.....  | 45 |
| 11    | Trabajos citados .....   | 46 |

## 1 Listado de Figuras y Tablas

|                |    |
|----------------|----|
| Figura 1.....  | 5  |
| Figura 2.....  | 9  |
| Figura 3.....  | 15 |
| Figura 4.....  | 16 |
| Figura 5.....  | 19 |
| Figura 6.....  | 20 |
| Figura 7.....  | 20 |
| Figura 8.....  | 22 |
| Figura 9.....  | 24 |
| Figura 10..... | 25 |
| Figura 11..... | 26 |
| Figura 12..... | 27 |
| Figura 13..... | 29 |
| Figura 14..... | 32 |
| Figura 15..... | 33 |
|                |    |
| Tabla 1.....   | 17 |
| Tabla 2.....   | 21 |
| Tabla 3.....   | 35 |
| Tabla 4.....   | 35 |
| Tabla 5.....   | 36 |
| Tabla 6.....   | 37 |
| Tabla 7.....   | 37 |
| Tabla 8.....   | 38 |
| Tabla 9.....   | 40 |
|                |    |
| Gráfica 1..... | 30 |
| Gráfica 2..... | 31 |
| Gráfica 3..... | 31 |



Existen siete especies de tortugas marinas, con cierta variación sobre el patrón de historias de vida. Las diferencias en las historias de vida de las especies pueden ser catalogadas según Bolten (2003), en tres tipos:

1. Desarrollo completo en la zona nerítica
2. Desarrollo juvenil temprano en la zona oceánica y desarrollo juvenil tardío en la zona nerítica
3. Desarrollo completo en la zona oceánica.

El ciclo se inicia cuando la hembra sale del mar y deposita sus huevos en la playa, los cuales pasan entre 42 y 91 días en incubación dependiendo de la temperatura del nido, las crías recién eclosionadas permanecen en el durante un par de días, finalizando la absorción del saco vitelino (Miller, 1997). Una vez completado este proceso las crías emergen y se dirigen al mar para iniciar la etapa oceánica conocida como “los años perdidos” (Carr, 1952) en los que son dispersadas principalmente por acción de las corrientes oceánicas. Se distingue este mecanismo de transporte, principalmente pasivo y ocurriendo en la fase pelágica, de aquel que realizan posteriormente cuando logran una independencia motriz durante la cual realizan *migraciones* propiamente. La duración y las tallas que alcanzan las tortugas en esta etapa juvenil, puede variar dependiendo de la especie y/o población. Por ejemplo: las tortugas caguamas del Atlántico Norte alcanzan una talla entre 46 y 70 cm en aproximadamente 10 años, mientras que, para este mismo intervalo de tamaño, las caguamas del Pacífico Norte tardan 15 años (Bjorndal *et al.*, 2000).

En la siguiente etapa del ciclo, las tortugas dejan el ambiente oceánico y se reclutan a uno nerítico (también conocidos como “hábitats de desarrollo bénticos”, Carr *et al.*, 1978), en zonas cercanas a la costa. Es en estos lugares donde continuarán su desarrollo hasta alcanzar la madurez sexual (Zug, 1995; Bass *et al.*, 2006; McClellan y Read, 2007). Estos hábitats de desarrollo no son permanentes, como lo demuestran Meylan *et al.* (2011), los juveniles pueden cambiar de lugar conforme van creciendo, en algunos casos trasladándose hasta 2000 km.

La última etapa se inicia una vez alcanzada la madurez sexual cuando las tortugas (tanto hembras como machos) realizan migraciones para su primera reproducción. Este ciclo migratorio entre sus sitios de reproducción y alimentación se repite subsecuentemente durante la vida reproductiva de los individuos (Ehrhart, 1982; Troëng *et al.*, 2005; Bowen y Karl, 2007).

Un aspecto particular del ciclo de las tortugas marinas es primeramente su instinto y capacidad para regresar a reproducirse a las playas donde nacieron, fenómeno conocido como “filopatría”. En la etapa madura, las tortugas regresan fielmente a la playa donde comenzaron su reproducción (“fidelidad al sitio de anidación”) pero también existe una fidelidad al hábitat de alimentación sobre el cual de alguna manera los individuos se

improntaron durante su fase de desarrollo. Todo esto provoca que las hembras realicen el mismo viaje una y otra vez entre ambos sitios (Lohmann *et al.*, 1997; Hays, 2000; Tucker, 2010) (figura 1).

La especie objeto de este estudio, la tortuga caguama (*Caretta caretta*), junto con la verde (*Chelonia mydas*), carey (*Eretmochelys imbricata*) y lora (*Lepidochelys kempii*) tienen una historia de vida tipo dos.

## 2.2 Ecología

Debido a la complejidad del ciclo de vida de las tortugas marinas, la distribución y abundancia así como las interacciones con otras especies apenas comienza a determinarse. Uno de los principales obstáculos al que nos enfrentamos al querer determinar cuál es la verdadera distribución y abundancia de las tortugas marinas es, que el número de tortugas en las diferentes poblaciones (para todas las especies), se ha visto severamente reducido por la presencia del hombre tanto debido a la explotación directa de éstas como recurso, como a la degradación de sus hábitats y la pesca incidental (King, 1982; Ross, 1982; Hillestad *et al.*, 1982; Campbell, 2003). Por lo anterior una de las interrogantes a la que actualmente nos enfrentamos es determinar el tamaño histórico de las poblaciones ya que el estudio científico de las poblaciones de estos organismos es reciente e inicio cuando ya las poblaciones estaban muy diezmadas.

Sin embargo existen registros históricos en diarios de navegación y de pesca donde se reflejan estas cantidades. Jackson en 1997, realiza un cálculo para el Mar Caribe basado en estos registros históricos y determina el número de hembras adultas de tortuga verde (*Chelonia mydas*) que pudieron haber habitado cuando Colón llegó a América, obteniendo una cantidad que para los estándares actuales es impensable: entre 33 y 39 millones de individuos. Incluso, utilizando información de la extensión de las praderas de pastos que actualmente existen en todo el caribe y con información de Bjorndal (1982) acerca de la cantidad de pasto que una tortuga verde adulta puede ingerir, proyecta un número de tortugas adultas (hembras y machos) cercano a 660 millones de ejemplares. En un segundo ejercicio similar, McClenachan (2006) calcula el número de hembras anidadoras de tortuga verde y carey (*Eretmochelys imbricata*) en 91 millones y 11 millones respectivamente. Como podemos ver estos números son mayores a los que propone Jackson.

La especie de tortuga marina mejor estudiada en cuanto su papel ecológico es la caguama (Bjorndal y Jackson, 2003). Las tortugas marinas transfieren una gran cantidad de nutrientes y energía desde las zonas de alimentación ricas en ellos, hacia las playas de anidación pobres en nutrientes, a través del desove de sus huevos en la arena, del 100% de los nutrientes el 73% se queda en la playa en forma de materia orgánica, lípidos, nitrógeno

Patrones de dispersión de crías de tortuga caguama (*Caretta caretta*), analizados por medio de modelos de corrientes oceánicas para el océano Atlántico, golfo de México y mar Caribe

y fósforo, el 26% restante lo constituyen las crías que regresan al mar después de eclosionar. Esto multiplicado por millones de hembras anidando nos da una perspectiva de su importancia (Bouchard y Bjorndal, 2000).

## 2.3 La tortuga caguama (*Caretta caretta*, Linnaeus)

### 2.3.1 Clasificación taxonómica (Zug *et al.*, 2001)

- ‡ Reino: Animal
- ‡ *Phylum*: Chordata
- ‡ Clase: Reptilia
  - Subclase: Anapsida
- ‡ Orden: Testudines
  - Suborden: Cryptodira
- ‡ Familia: Cheloniidae
  - Subfamilia: Caretteni
- ‡ Género: *Caretta*
- ‡ Especie: *caretta*

### 2.3.2 Biología

#### 2.3.2.1 Características anatómicas

**Carapacho:** moderadamente ancho; ligeramente aserrado en el margen posterior de los inmaduros; área engrosada en el carapacho arriba de la base de la cola (sobre la quinta vertebral) en adultos y subadultos; cinco pares de escudos costales, con el primer par (extremo anterior) más pequeño; longitud recta del carapacho (LRC) hasta 105 cm en el Atlántico nororiental, menor en algunas otras áreas, los adultos más pequeños se localizan en el Mediterráneo (hasta unos 90 cm). **Cabeza:** grande y triangular; ancho hasta 28 cm; dos pares de escamas prefrontales. **Extremidades:** aletas delanteras relativamente cortas en comparación con las de otras especies; dos uñas en cada aleta. **Coloración:** dorsalmente café claro a oscuro en las crías, generalmente sin manchas y café rojizo en subadultos y adultos; superficie ventral café en crías, amarillo a naranja en adultos y subadultos (figura 2). **Plastrón:** tres pares de escudos inframarginales. (Pritchard y Mortimer, 2000).



Figura 2 Tortuga caguama macho adulto (izquierda), en esta fotografía se puede apreciar la coloración del caparazón, así como de la piel de la tortuga. También es posible observar el tamaño de la cabeza con respecto a su cuerpo, el cual es grande en comparación a las otras especies de tortugas marinas. Cría de tortuga caguama (derecha), se aprecia la diferencia de coloración con respecto a los adultos.

### 2.3.2.2 Distribución

La tortuga caguama se distribuye en todos los océanos del planeta, en aguas templadas, algunas veces tropicales y sub-tropicales, aunque, debido al carácter migratorio de su comportamiento esta distribución es diferenciada, por lo que tenemos zonas donde solamente se presenta una de las etapas del ciclo de vida y otras donde puede haber dos o más de las mismas (Spotila, 2004). En el océano Atlántico se da la mayor concentración mundial en las anidaciones de esta especie y, con ayuda del estudio de marcadores moleculares, se ha determinado la existencia de siete subpoblaciones de tortuga caguama, cuatro que anidan en las costas de Estados Unidos, una que anida en las costas de Brasil, una que anida en las costas de Cabo Verde y la quinta que anida en todas las costas del Mar Caribe. En esta última región su mayor concentración de anidaciones se presenta en las costas del estado de Quintana Roo en México (Encalada *et al.*, 1998; Moncada Galván, 2001; The Turtle Expert Working Group, 2009).

En el Mar Mediterráneo se encuentra una población de tortuga caguama, la principal zona de anidación se encuentra en las costas de Grecia, principalmente en la isla de Zakynthos. Así mismo, también hay poblaciones anidantes en las costas de Turquía, Chipre, Libia, Israel, Egipto y Siria (Camiñas Hernández, 2005).

En el océano Índico se encuentra la zona de anidación considerada la segunda en importancia a nivel mundial debido al número de anidaciones por año se ubica en las playas de la Isla Masirah en Omán, seguida de las playas del Oeste de Australia, Sudáfrica,

Mozambique y Madagascar (Frazier, 1980; Spotila, 2004). El caso del Océano Pacífico es particular, ya que aunque existe presencia de la especie en toda la cuenca, en el lado oriental no existen reportes de anidación, al parecer esta zona solo es utilizada por las tortugas como zona de alimentación. En el lado occidental esta especie anida en las playas de Japón y Australia, además de tener áreas de forrajeo en el este del mar de China, Vietnam y Corea (Bowen *et al.*, 1995; Nichols *et al.*, 2000; Chaloupka *et al.*, 2008).

Debido a la falta de información acerca del transporte pasivo de las neonatos de tortuga caguama en la cuenta del océano Atlántico, en este trabajo se pretende utilizar sistemas computacionales para estudiar y simular el transporte pasivo dentro de campos de corrientes oceánicas producidos por modelos de circulación del Océano Atlántico occidental y predecir sus posibles trayectorias hacia las áreas de desarrollo nerítico

### 3 Antecedentes

Las primeras observaciones sobre la fase de dispersión de los neonatos de tortuga verde lo realizaron Carr y Ogren en 1960. Estos autores mencionan que la alimentación de las crías cambia de principalmente carnívora, a herbívora cuando son adultas y que este cambio involucra varios “pasos”, que requieren que las tortugas transiten entre diferentes lugares durante su desarrollo para encontrar el tipo y la cantidad de alimento adecuado para cada etapa. Es posible que esta ontogenia de alimentación sea el resultado de que el animal en desarrollo viaje largas distancias en grupos de edad (etapas de alimentación), distribuidos en diferentes estaciones a lo largo de una ruta de migración activa o pasiva a la deriva. Frick (1976) dio seguimiento a crías de tortuga verde inmediatamente después de entrar al agua concluyendo que los neonatos siguen un trayecto orientado, nadando constantemente después de cruzar la rompiente y pasar el arrecife y otros obstáculos de la zona costera. Destacan que las rutas de salida son extensiones aproximadas de los caminos tomados por las crías en su recorrido del nido al mar, la dirección no es mantenida mediante referencias visuales a un objeto fijo en la costa. Lo que determina la dirección es todavía un misterio, aunque es posible que las crías utilicen el contraste visual entre la playa y el mar, la dirección del oleaje y el sonido de las olas sobre la playa como referentes para orientarse hacia mar adentro. A diferencia de las crías que hacen el trayecto desde el nido pasando la zona de oleaje, las que son liberadas directamente en el mar se ven frenéticas y desorientadas.

En 1990 Lohman, Salmon y Wyneken realizaron experimentos donde liberaron un grupo neonatos de tortuga verde y tortuga laúd (*Dermochelys coriacea*) en el mar sin haber hecho el recorrido desde el nido hacia el mar. A otro grupo los colocaron en estanques que producían olas. Encontrando que en ambos casos los neonatos orientaban su nado en la dirección en la que venían las olas, por lo que llegaron a la conclusión que el mecanismo

que regula la orientación de los neonatos en la playa para encontrar su camino al mar y el que les permite orientarse en el mar, son independientes. Sin embargo, aclaran que estos experimentos no demuestran que los dos sistemas en condiciones naturales no trabajen juntos.

Collard y Ogren (1990) hacen una revisión de la información del ciclo de vida de la tortuga lora (*Lepidochelys kempii*), concentrándose en la etapa pelágica de los neonatos basados en dos premisas: Los neonatos de tortuga lora probablemente derivan más lejos de lo que nadan durante el primer año de vida o más y, es probable que su dispersión en el Golfo de México y el Oeste del Atlántico Norte esté más relacionada con el movimiento de masas de aguas superficiales que con la deriva por viento. Con lo anterior realizaron un análisis de los principales mecanismos de circulación en esta región con las siguientes conclusiones: Los probables patrones de dispersión de los neonatos pelágicos están relacionados a corrientes oceánicas superficiales específicas y a la deriva por viento. Un cambio en estas corrientes aún a pequeña escala, debe resultar en una variación en la dispersión entre las diversas cohortes de tortuga lora.

Reich, Bjorndal y Bolten (2007) utilizaron isótopos estables de Carbono y Nitrógeno para identificar los hábitats, dietas y para estimar la duración de la etapa de vida “faltante” en los “años perdidos” de la tortuga verde. El objetivo era probar si la teoría propuesta por Archie Carr en los 80’s que los neonatos durante los 2 ó 3 primeros años de vida se desarrollaban en las aguas superficiales de hábitats oceánicos, en este caso del Atlántico Norte. Contrastaron los resultados de la tortuga verde contra los provenientes de tortuga caguama. Concluyeron que las crías de tortuga verde ocupaban un hábitat y tenían una dieta similar al de las caguamas, confirmándose la teoría de Carr; realizando una estimación de la duración de esta etapa pelágica de 2.8 a 4.6 años, muy similar a lo reportado en estudios de esqueletocronología para esta especie. Sin embargo, indican que las áreas geográficas utilizadas para estos fines hasta ese momento continúan siendo un misterio.

Blumenthal *et al.* (2009), utilizando datos oceanográficos de la deriva de partículas virtuales (que representaban a las tortugas) sobre corrientes superficiales, encontraron una correlación significativa entre los resultados de mezcla en sitios de convergencia proyectados por el acarreo de partículas y los datos de genética, lo cual indicó que las corrientes marinas tienen una influencia determinante sobre los patrones geográficos de mezclas en sitios donde convergen juveniles originarios de distintas colonias a nivel regional. Por lo anterior y debido a la complejidad de los patrones de corrientes regionales y locales, algunas áreas serán más diversas (con tortugas reclutándose de varias regiones), mientras que otras tendrán mayores niveles de reclutamiento proximal o local.

Putman *et al.* (2010) modelaron la deriva pasiva de neonatos de tortuga lora, hacia áreas de alimentación desde siete zonas de anidación dentro del Golfo de México utilizando el

programa de seguimiento de partículas ICHTHYOP y la información de corrientes superficiales de HYCOM (Modelo Híbrido Coordinado de Océano). Estos autores concluyeron que existe una correlación entre las condiciones para la migración y la cantidad de nidadas de una playa; que las zonas con las condiciones que facilitan la migración tienen una mayor cantidad de nidadas que las zonas que no la favorecen. Así mismo encontraron que para algunas regiones el éxito migratorio era relativamente constante, pero en otras variaba considerablemente de año en año, lo que permite especular que las condiciones oceánicas que facilitan o impiden la migración de los neonatos pueden ser factores importantes en la dinámica poblacional de la especie. Derivaron varias implicaciones para la conservación: se puede determinar en qué regiones se tendrían los mejores resultados al aplicar algún programa de conservación, además de poder predecir cuál sería el impacto del cambio climático en cada región al modificar los patrones de migración de los neonatos.

Hays *et al.* (2010) propusieron la hipótesis de que los sitios de alimentación utilizados por las tortugas no son seleccionados a partir de un comportamiento innato o aprendizaje social, sino que reflejan sus experiencias al ser acarreadas por las corrientes durante su etapa de neonatos o juveniles. Para derivar esta visión, se compararon los patrones migratorios de tortugas caguamas adultas monitoreados por vía satelital y simulaciones de deriva de partículas sobre corrientes superficiales usando un modelo hidrodinámico del Mar Mediterráneo acoplado a un algoritmo de seguimiento de partículas. De las 17 tortugas adultas rastreadas, 10 individuos (59%) viajaron al norte a zonas de alimentación en el Adriático, dos hacia el suroeste a Túnez y al este de Libia, dos permanecieron en Zákynthos cerca de la playa de anidación, dos más hacia otras zonas costeras de Grecia y una hacia Turquía. Las partículas mostraron un amplio patrón de dispersión desde Zákynthos, con una dicotomía general entre los escenarios de deriva al norte y al sur; con claras diferencias interanuales y estacionales. Por ejemplo más partículas terminaron al norte de Zákynthos en el 2000 comparadas con las de 1999 mostrando también importantes variaciones al cambiar la fecha de liberación. Los autores sugieren que los patrones de dispersión de los adultos después de la reproducción reflejan escenarios de deriva previos durante su fase como crías. Los mismos autores aceptan que para probar esta hipótesis será necesario extender y refinar este tipo de análisis a diferentes colonias de tortugas alrededor del mundo.

## 4 Justificación

Todas las especies de tortugas marinas que habitan las zonas costeras y/u oceánicas del país se consideran en peligro de extinción según las normas nacionales (NOM 059 SEMARNAT 2010) e internacionales (CITES, Lista Roja de la UICN, entre otras). Por lo tanto, son especies prioritarias para el país, requiriendo de acciones que permitan su recuperación. Si queremos generar estrategias de conservación efectivas para cualquier especie, es indispensable conocer su ciclo de vida, su distribución geográfica y temporal durante las diferentes fases del mismo. En el caso de las tortugas marinas el ciclo es complejo, dura varias décadas y tiene una gran distribución espacial por lo que en ocasiones, dependiendo de la fase de desarrollo, los organismos pasan variables periodos de tiempo en los litorales de dos o más países. Esto implica que su conservación no solo depende de esfuerzos locales, sino de la cooperación efectiva internacional entre los países que comparten el recurso.

Existen diversos tratados internacionales suscritos entre México y diferentes países para la protección de las tortugas marinas. Sin embargo, la información con la que se cuenta sobre algunas de las etapas del ciclo de vida, es insuficiente y en algunos casos inexistente. El presente trabajo pretende aportar mayor información sobre la distribución de los estadíos tempranos de neonatos de tortuga caguama durante la fase oceánica de su ciclo de vida en el Océano Atlántico. Con una capacidad en la actualidad muy limitada para realizar seguimientos de los organismos durante esta etapa del ciclo de vida, una de las técnicas que permite aportar conocimiento en este sentido es la simulación por computadora. A través de las simulaciones podemos predecir con grados de confianza medibles los derroteros que pudieran seguir las crías y que hasta ahora no se conocen. Los resultados obtenidos a partir de este estudio permitirán un mejor enfoque en las prácticas de conservación al tener un conocimiento más amplio sobre la posible distribución de los organismos, durante la fase pasiva de desarrollo, y su interacción con zonas de alta actividad antropogénica. Así mismo, será posible tener mejores elementos para predecir las zonas a donde las poblaciones de las especies arriban para iniciar su fase de desarrollo en zonas neríticas.

La justificación para este trabajo se basa, en que se cuenta con información base sobre la distribución de colonias, temporalidad de la etapa reproductiva y de nacimientos en la playa, además de la sofisticación suficiente en el análisis de corrientes oceánicas superficiales y la capacidad informática para el desarrollo de modelos, que nos permiten generar simulaciones con las cuales dar seguimiento virtual a los movimientos de las crías.

## 5 Objetivos

### 5.1 Objetivo General

Utilizar sistemas computacionales para estudiar y simular el transporte pasivo de neonatos de tortuga caguama (*Caretta caretta*) dentro de campos de corrientes oceánicas producidos por modelos de circulación del Océano Atlántico occidental y predecir sus posibles trayectorias hacia áreas de desarrollo nerítico.

### 5.2 Objetivos Específicos

1. Modelar los derroteros de dispersión por corrientes oceánicas para neonatos de tortuga caguama nacidos en las principales playas de anidación en la costa Atlántica de América y África, con especial atención a las de México.
2. Contrastar los patrones de dispersión modelados para diferentes orígenes, delimitando las zonas de mayor agregación.
3. Determinar el grado de interacción entre derroteros de dispersión de neonatos proveniente de las distintas poblaciones con la ubicación de potenciales amenazas, particularmente: a) la distribución del esfuerzo pesquero y b) el derrame petrolero del Deep Water Horizon en el 2010.
4. Comparar los patrones de distribución obtenidos a partir de las simulaciones contra los resultados publicados para la especie de composición genética en sitios de agregaciones marinas.

## 6 Zona de estudio

### 6.1 Corrientes marinas

Para este proyecto se utilizó información perteneciente a las corrientes ubicadas en el océano Atlántico. En este océano tenemos dos sistemas de corrientes que se encuentran interrelacionados uno en el norte y otro en el sur, tomando como punto divisorio el ecuador.

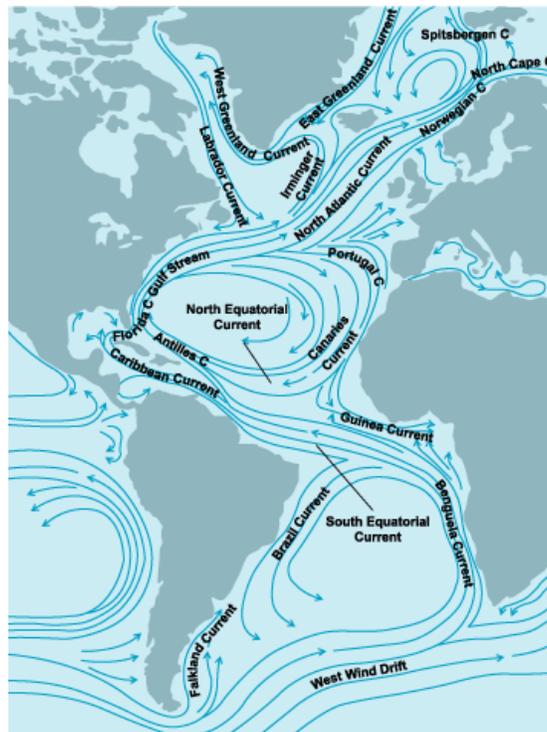


Figura 3 Mapa que muestra las principales corrientes superficiales del Océano Atlántico

Las corrientes principales en el Atlántico Norte (enlistadas de sur a norte) son: Corriente de Brasil, Corriente de Guyana, Sistema de la Corriente del Golfo (formado por las corrientes del Caribe, de Lazo, Florida y del Golfo), Corriente de las Azores, Corriente de las Canarias y la Corriente Nor-ecuatorial. Para el Atlántico Sur son: Corriente de Brasil, Corriente Sur-ecuatorial, Corriente de Benguela-Angola (Figura 3).

## 6.2 Colonias seleccionadas

La tortuga caguama tiene una distribución muy amplia dentro de la cuenca del océano Atlántico, con presencia en los dos hemisferios (Caldwell *et al.*, 1959; Kenneth, 1988). En este trabajo se escogieron colonias a estudiar con base en dos criterios principalmente: (1) las colonias de mayor abundancia poblacional (determinado a partir del número de anidaciones por año) por medio de lo cual pudimos garantizar seleccionar las de mayor relevancia y (2) la existencia de estudios de genética sobre las colonias y su presencia en sitios de agregaciones marinas. Como resultado de estos criterios se seleccionaron 17 colonias (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), distribuidas en toda la cuenca (Figura 4)

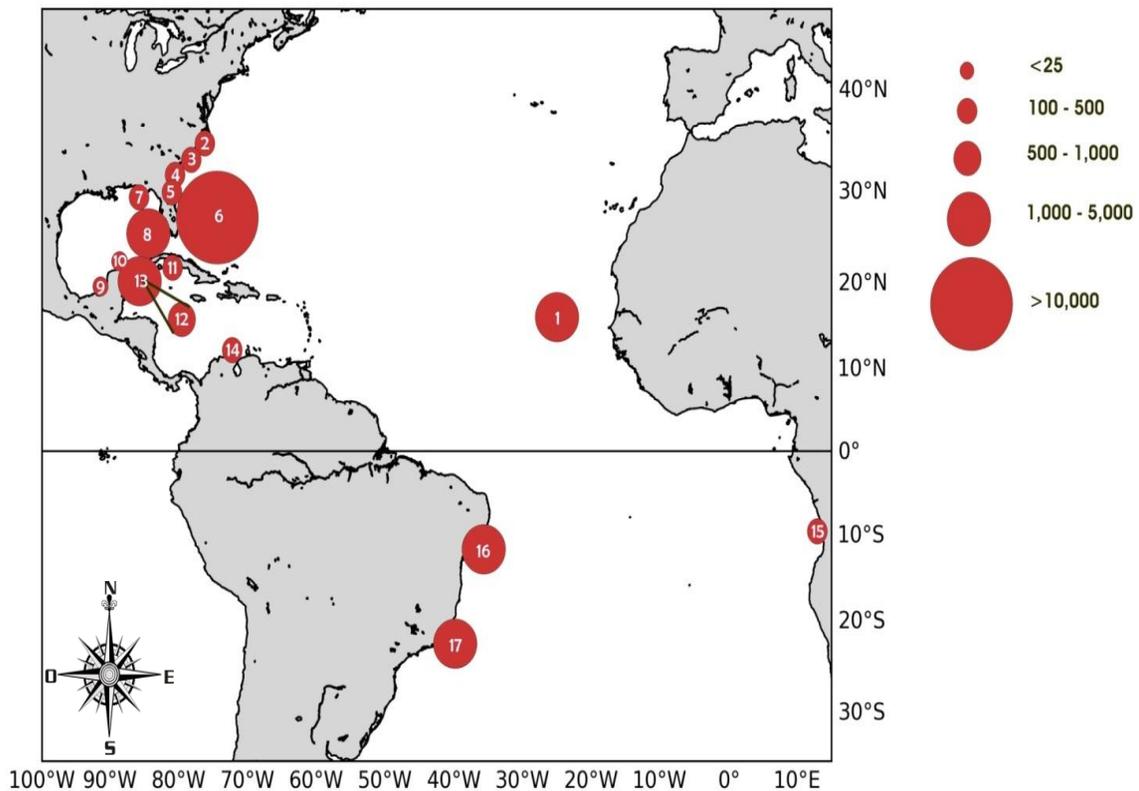


Figura 4 Ubicación y tamaño de cada una de las 17 colonias seleccionadas para la realización de las simulaciones, el tamaño de los círculos rojos es proporcional al tamaño de la colonia. Los números al interior de estos representan el número de lista de la tabla 1 (SWOT, 2006; Witt, 2010).

Patrones de dispersión de crías de tortuga caguama (*Caretta caretta*), analizados por medio de modelos de corrientes oceánicas para el océano Atlántico, golfo de México y mar Caribe

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. **Listado de colonias utilizadas para llevar a cabo la simulación del transporte de crías, tomado de Encalada *et al.* (1998), Marcovaldi y Guagni dei Marcovaldi (1999), Pearce (2001), Ceballos Fonseca (2004), State of the World's Sea Turtles (2006) y Varo Cruz (2010) .**

| #                         | Playa         | Estado         | País     | Anidaciones x año | Avivamiento |
|---------------------------|---------------|----------------|----------|-------------------|-------------|
| <b>Atlántico Noreste</b>  |               |                |          |                   |             |
| 1                         | Boa Vista     |                | C. Verde | 1,000-5,000       | Jul-Sep.    |
| <b>Atlántico Noroeste</b> |               |                |          |                   |             |
| 2                         | Baldhead      | NC             | EU       | 100-500           | Jun-Ago.    |
| 3                         | Cape Island   | SC             | EU       | 100-500           | Jun-Ago.    |
| 4                         | Sapelo        | Ga             | EU       | 100-500           | Jun-Ago.    |
| 5                         | Flagler       | FL             | EU       | 100-500           | Jun-Ago.    |
| 6                         | Melbourne     | Fl             | EU       | >10,000           | Jun-Ago.    |
| <b>Golfo de México</b>    |               |                |          |                   |             |
| 7                         | Saint Joseph  | Fl             | EU       | 100-500           | Jun-Ago.    |
| 8                         | Sarasota      | Fl             | EU       | 1,000-5,000       | Jun-Ago.    |
| 9                         | Isla Aguada   | Camp           | México   | <25               | Jun-Ago.    |
| 10                        | Las Coloradas | Yuc            | México   | <25               | Jun-Ago.    |
| 11                        | Cayo Largo    |                | Cuba     | 100-500           | Jun-Ago.    |
| <b>Mar Caribe</b>         |               |                |          |                   |             |
| 12                        | Cozumel       | Q. Roo         | México   | 500-1,000         | Jun-Ago.    |
| 13                        | X'cacel       | Q. Roo         | México   | 1,000-5,000       | Jun-Ago.    |
| 14                        | Media Guajira | Guaj           | Colombia | 100-500           | Jun-Ago.    |
| <b>Atlántico Sureste</b>  |               |                |          |                   |             |
| 15                        | Angola        |                | Angola   | 100-500           | Nov-Ene     |
| <b>Atlántico Suroeste</b> |               |                |          |                   |             |
| 16                        | Brasil Norte  | Sergipe        | Brasil   | 1,000-5,000       | Nov-Ene     |
| 17                        | Brasil Sur    | Espirito Santo | Brasil   | 1,000-5,000       | Nov-Ene     |

## 7 Materiales y Métodos

### 7.1 Simulaciones

El movimiento de las crías virtuales, se simuló utilizando el programa de seguimiento de partículas Ichthyop v. 2.21 (Lett *et al.*, 2008; de acuerdo a la implementación de Putman, et al., 2010) que interpola corrientes superficiales. Para realizar las simulaciones, se utilizó la salida estándar de datos oceanográficos de corrientes superficiales (0 m de profundidad), con una resolución espacial de 0.08 grados (~7 km) y un intervalo de tiempo de 1 día (Putman *et al.*, 2012), del Modelo Híbrido en Coordenadas del Océano (HYCOM, por sus siglas en inglés), HYCOM es forzado utilizando la fuerza y velocidad del viento, flujo del calor y precipitación; además utiliza la asimilación de datos para producir un modelo en retrospectiva a partir de datos satelitales de altimetría y medidas *in situ* provenientes de un conjunto global de batitermógrafos desechables (XBT's), flotadores ARGO y boyas fondeadas. Se ha demostrado que HYCOM resuelve de forma precisa procesos de meso-escala como corrientes oscilantes, frentes, filamentos y giros oceánicos (Chassignet *et al.*, 2007).

Se realizaron simulaciones con 2,700 crías virtuales (a partir de este punto utilizaremos el término partícula para referirnos a estas crías virtuales) para cada punto seleccionado, liberando 30 diarias durante los tres meses más importantes de la temporada de avivamiento para cada colonia. Para las colonias ubicadas en la costa atlántica de Estados Unidos, Golfo de México y Mar Caribe fue de junio a agosto; Cabo Verde de julio a septiembre; Brasil y Angola de noviembre a enero (Bjorndal y Meylan, 1983; Flora, Fauna y Cultura de México A.C., 2009; Marcovaldi y Chaloupka, 2007; Cejudo *et al.*, 1999).

Una vez definidas las playas desde las cuales se iniciarían las simulaciones (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), se realizó una búsqueda en Google Earth (Google Inc., 2011), para localizar cada una de ellas, para cada una se trazó un polígono a 10 km de la costa, el cuál fue utilizado para definir la zona de liberación de las crías virtuales, cada polígono tiene 5 km de ancho y una longitud variable dependiendo del tamaño de la playa en la cual se esté trabajando. Las partículas fueron liberadas del año 2004 al 2010, con lo que se obtuvieron tiempos de deriva de 6 años consecutivos, abarcando con esto el tiempo que se calcula la duración promedio (Musick y Limpus, 1997) o la máxima (Bjorndal *et al.*, 2000) de la etapa oceánica del ciclo de vida de esta especie. Para su análisis y mapeo se diseñaron algoritmos en lenguaje Python (Python Software Foundation, 1990-2011), permitiendo con esto la visualización de las trayectorias y posiciones de las tortugas.

Con el propósito de mostrar las zonas de aglomeración de las partículas en el océano Atlántico, este último se dividió con una cuadrícula con celdas de  $10^{\circ} \times 10^{\circ}$  (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) y se contaron el número de partículas que aparecían en cada celda con una frecuencia de 30 días hasta completar los 6 años de simulación; los datos obtenidos fueron normalizados a 100% y se aplicó la prueba de Análisis de Componentes Principales (Timm, 2002) para determinar la relación entre las partículas de las diferentes colonias y como esta cambiaba durante el transcurso de la deriva.

Patrones de dispersión de crías de tortuga caguama (*Caretta caretta*), analizados por medio de modelos de corrientes oceánicas para el océano Atlántico, golfo de México y mar Caribe

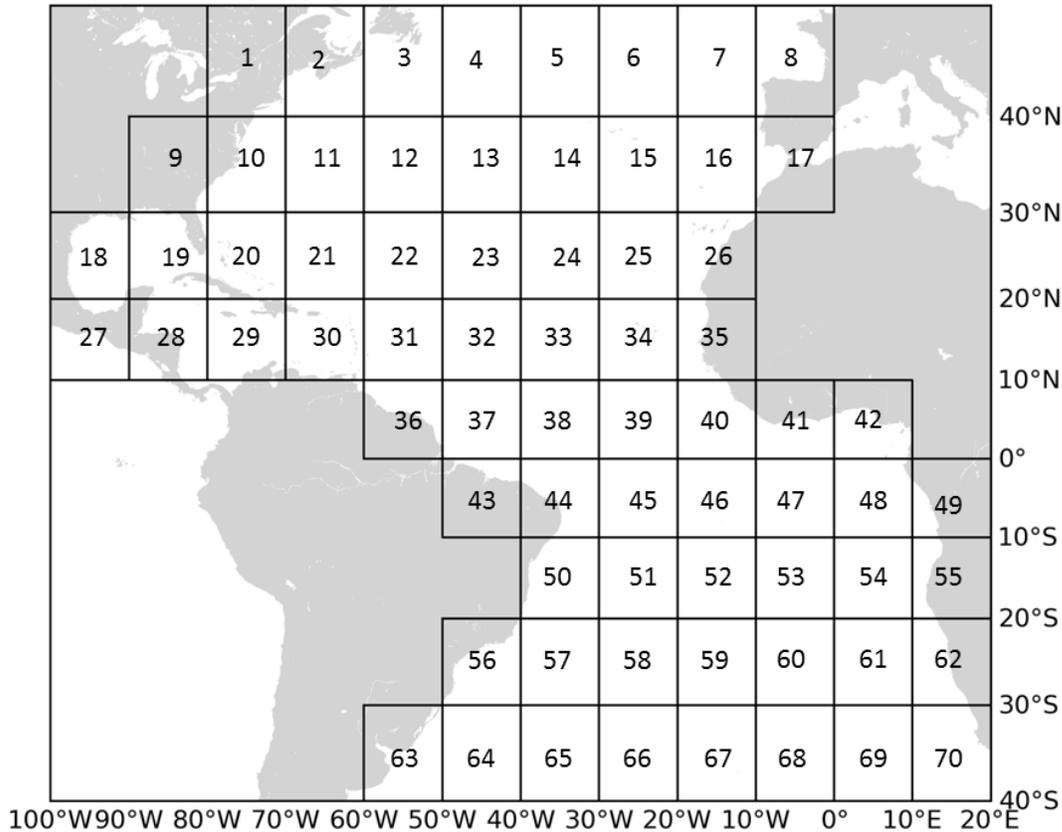


Figura 5 Mapa del Océano Atlántico dividido con una cuadrícula, en donde cada sección tiene un tamaño de 10° × 10°.

## 7.2 Interacciones con actividades antropogénicas

### 7.2.1 Pesquerías

Para el análisis sobre pesca incidental, se definieron las zonas de pesca a las que las crías potencialmente pudieran potencialmente pudieran arribar con ayuda de las corrientes, en caso del Atlántico Norte (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.), se utilizaron las definidas por el Centro de Ciencias Pesqueras del Sudeste (SFSC) del Servicio Nacional de Pesquerías Marinas (NMFS) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los estados Unidos de América (NOAA) (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.) (Cramer, 1999; Kot *et al.*, 2010). Para el Atlántico Sur (

), en la zona de las costas brasileñas se utilizaron las zonas de pesca propuestas por Sales *et al.* (2008), para el resto del área, se designaron de forma arbitraria debido a la falta de trabajos hechos con anterioridad en la zona.

Patrones de dispersión de crías de tortuga caguama (*Caretta caretta*), analizados por medio de modelos de corrientes oceánicas para el océano Atlántico, golfo de México y mar Caribe

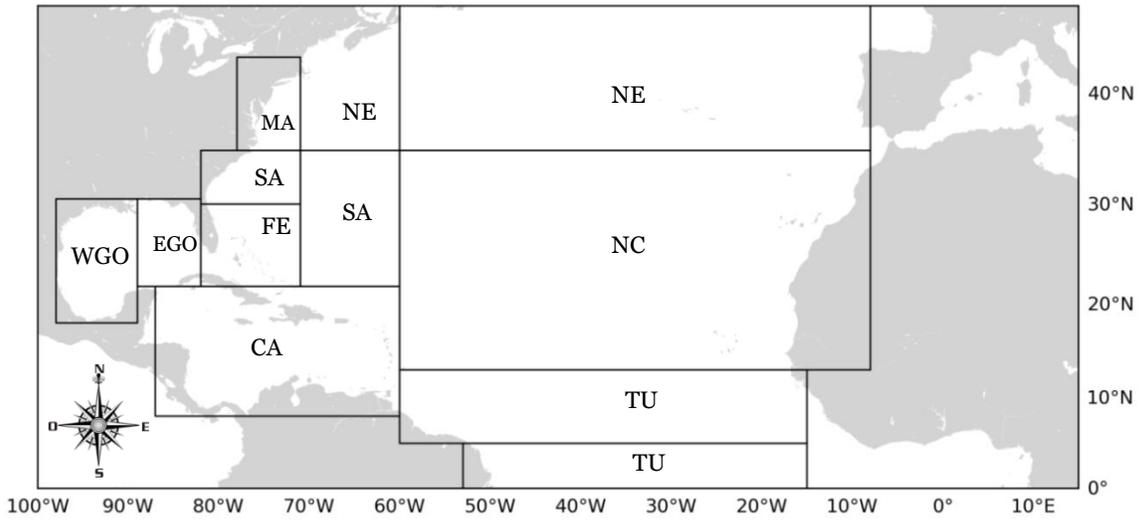


Figura 6 Mapa de las zonas de pesca del Atlántico Norte utilizadas por la NOAA (Kot *et al.*, 2010).

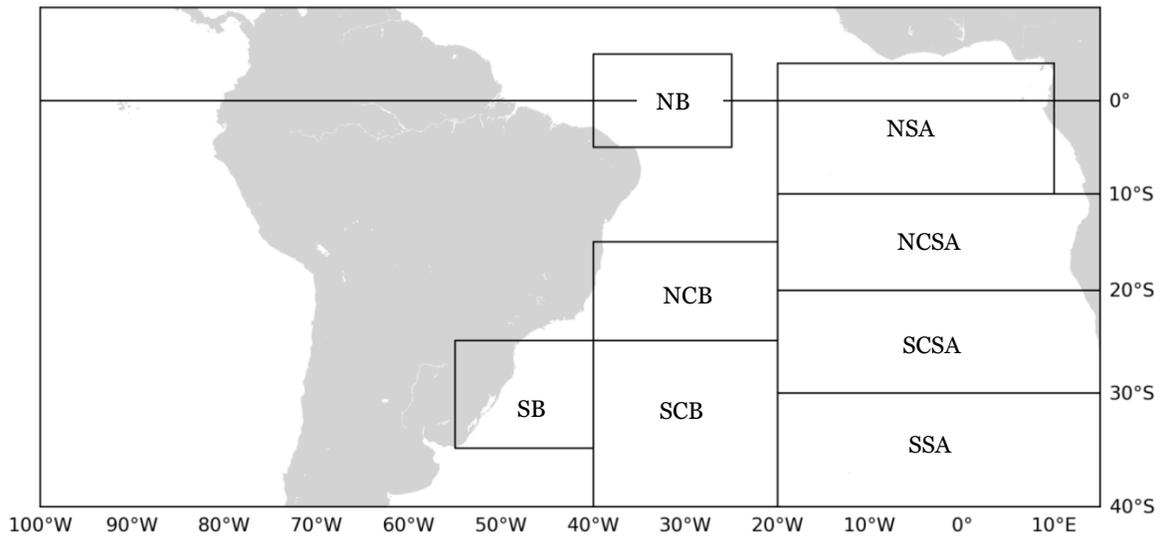


Figura 7 Mapa de las zonas de pesca del Atlántico Sur utilizadas por Sales *et al.* (2008), modificadas por el autor.

Patrones de dispersión de crías de tortuga caguama (*Caretta caretta*), analizados por medio de modelos de corrientes oceánicas para el océano Atlántico, golfo de México y mar Caribe

Para una mejor identificación las zonas fueron renombradas (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**); el siguiente paso fue determinar a los 6 años de simulación el porcentaje de partículas que se encontraban dentro de estas zonas, para cada una de las colonias.

Tabla 1 Nombres completos y siglas de las zonas de pesca utilizadas para el análisis de los datos obtenidos en las simulaciones. Los nombres y ubicaciones de las zonas de pesca están basados en los artículos de Sales *et al.* (2008) y Kot *et al.*, (2010). En el caso del Atlántico Sur las zonas fueron renombradas y aparecen entre paréntesis a un lado del nombre asignado en este trabajo; los nombres con asterisco, corresponden a zonas que fueron creadas específicamente para este trabajo, por lo que no tienen referencia en la literatura,

| Abreviatura | Nombre completo               |
|-------------|-------------------------------|
| CAR         | Caribbean                     |
| FEC         | Florida East Coast            |
| EGOM        | East Gulf of Mexico           |
| WGOM        | West Gulf of Mexico           |
| MAB         | Mid Atlantic Bight            |
| NCA         | North Central Atlantic        |
| NEC         | Northeast Coastal             |
| NED         | Northeast Distant             |
| SAB         | South Atlantic Bight          |
| SAR         | Sargasso                      |
| TUN         | Tuna North                    |
| TUS         | Tuna South                    |
| NB          | North Brazil (Zone 1)         |
| NCB         | North Central Brazil (Zone 2) |
| SCB         | South Central Brazil (Zone 4) |
| SB          | South Brazil (Zone 3)         |
| NSA         | North South Atlantic*         |
| NCSA        | North Central South Atlantic* |
| SCSA        | South Central South Atlantic* |
| SSA         | South South Atlantic*         |

Patrones de dispersión de crías de tortuga caguama (*Caretta caretta*), analizados por medio de modelos de corrientes oceánicas para el océano Atlántico, golfo de México y mar Caribe

### 7.2.2 Derrame Petrolero DWH

El estudio de caso del potencial de interacción de las partículas con el derrame petrolero de la plataforma Deep la plataforma Deep Water Horizon, se llevó a cabo comparando la zona de influencia del derrame con el derrame con el porcentaje de partículas de las colonias cercanas que permanecieron dentro de esta zona y cuánto de esta zona y cuánto tiempo permanecían dentro de la misma (

Figura 8). Para realizar lo anterior, se determinó que la zona de influencia del derrame quedaba contenida dentro de una de las celdas de la cuadrícula con la que se realizó el análisis de aglomeración de las partículas; se calculó el porcentaje de partículas a los 6 meses, uno y dos años de simulación.

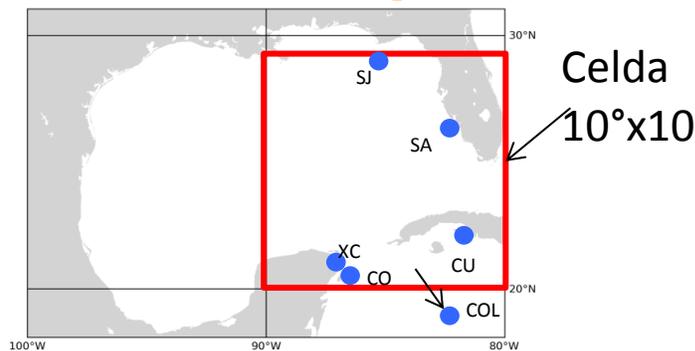


Figura 8 Imagen que muestra la zona de influencia del derrame petrolero del Deep Water Horizon. Se muestra también en el recuadro inferior el área utilizada para el análisis (línea roja); así como, la ubicación de las colonias involucradas en el mismo (SJ= Saint John, SA=Sarasota, XC=X'cabel, CO= Cozumel, CU= Cuba y COL= Colombia)

### 7.2.3 Genética

Se realizó un comparativo entre estudios de genética y las simulaciones de este estudio, en el Atlántico Norte se utilizaron zonas que han sido estudiadas debido a la presencia de juveniles de tortuga caguama: islas Azores, Madeira, Canarias y costa de Andalucía (Bolten *et al.*, 1993; Monzón Argüello *et al.*, 2009; Godley *et al.*, 2010). En el caso de las colonias del Atlántico Sur se utilizó la información proporcionada por Reis *et al.* (2009), que ubican una zona a 800 km de la costa de Brasil llamada Elevação do Rio Grande, donde se han localizado juveniles de esta especie y se han extraído muestras para su análisis. Se realizaron dos pruebas de correlación de Spearman (Motulsky, 1995), para evaluar la relación entre los resultados de ambos trabajos. Una de las pruebas comparó los resultados desde el punto de vista de las zonas de forrajeo, estas son las áreas a las cuales las tortugas llegan después de su etapa oceánica y la otra se realizó desde al punto de vista de las colonias es decir desde las playas donde nacen las crías.

## 8 Resultados

### 8.1 Patrones de dispersión

Los resultados de las trayectorias simuladas de las tortugas durante un periodo de 6 años (2004-2010) para las 17 colonias seleccionadas (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), se agruparon en 4 regiones: Atlántico Norte (colonias de Balhead, Cape Island, Sapelo, Flagler, Melbourne y Boa Vista); Golfo de México (Sarasota, Saint John, Isla Aguada y Las Coloradas); Mar Caribe (Cozumel, X'cacel, Cayo Largo y Media Guajira) y Atlántico Sur (Brasil Norte, Brasil Sur y Angola). De las 17 colonias simuladas, partículas provenientes de 15 de ellas alcanzaron los sitios de alimentación ubicados en el margen oriental del Atlántico Norte, las dos únicas excepciones fueron para las partículas provenientes de las colonias de Brasil Sur y Angola.

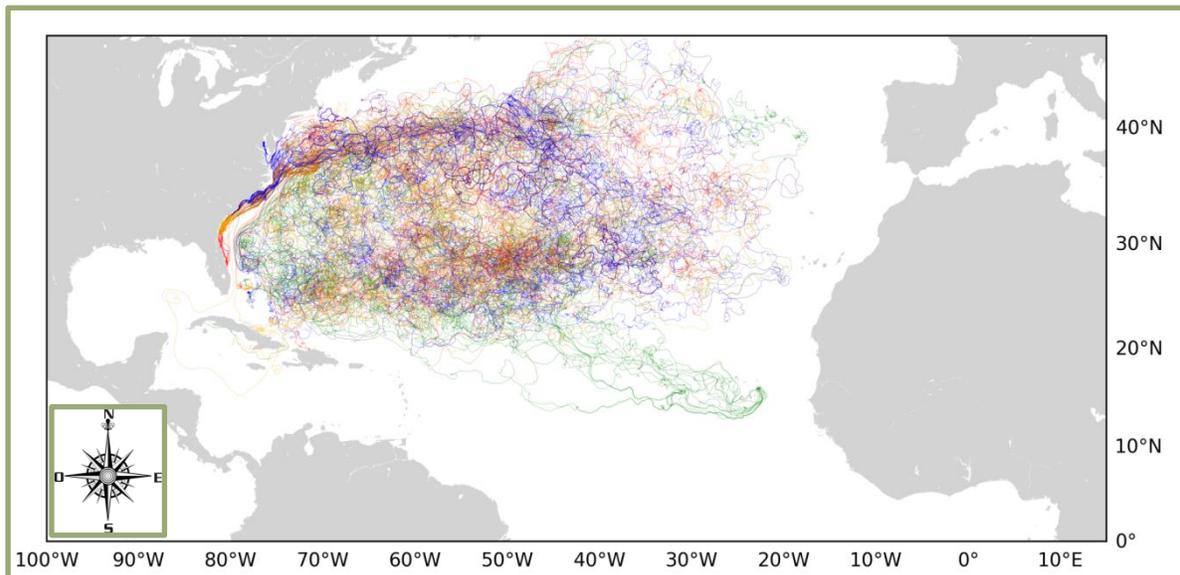


Figura 9 Mapa de las trayectorias de partículas liberadas de colonias del Atlántico Norte; Baldhead (azul); Cape Island (rojo); Sapelo (olivo); Flagler (naranja); Melbourne (índigo) y Boa Vista (verde).

Entre las simulaciones cuyas trayectorias se originan en colonias del Atlántico norte (Figura 9), se destaca las trayectorias desde Cabo Verde que en su deriva hacia el noroeste alcanzan primeramente las islas Bahamas y se incorporan a la Corriente del Golfo, pero dentro del tiempo simulado (6 años) casi completan el circuito, alcanzando las islas Azores. Es relevante; sin embargo, que la mayor proporción de las partículas provenientes de esta colonia se mantienen en la zona conocida como mar de los Sargazos. La dispersión a partir

de las colonias de Estados Unidos fue distinta; éstas al principio de la simulación se mantuvieron cerca de la costa siguiendo la corriente del chorro y la mayoría de ellas a la altura de la costa del estado de Virginia comenzaron a internarse en el océano Atlántico hasta alcanzar las islas Azores, Madeira y Canarias. Al igual que las partículas de Cabo Verde, la mayor parte de las partículas provenientes de esta zona se distribuyeron en el mar de los Sargazos. Cabe hacer notar que hay una mínima proporción de las mismas que se internan tanto en el Mar Caribe como en el Golfo de México.

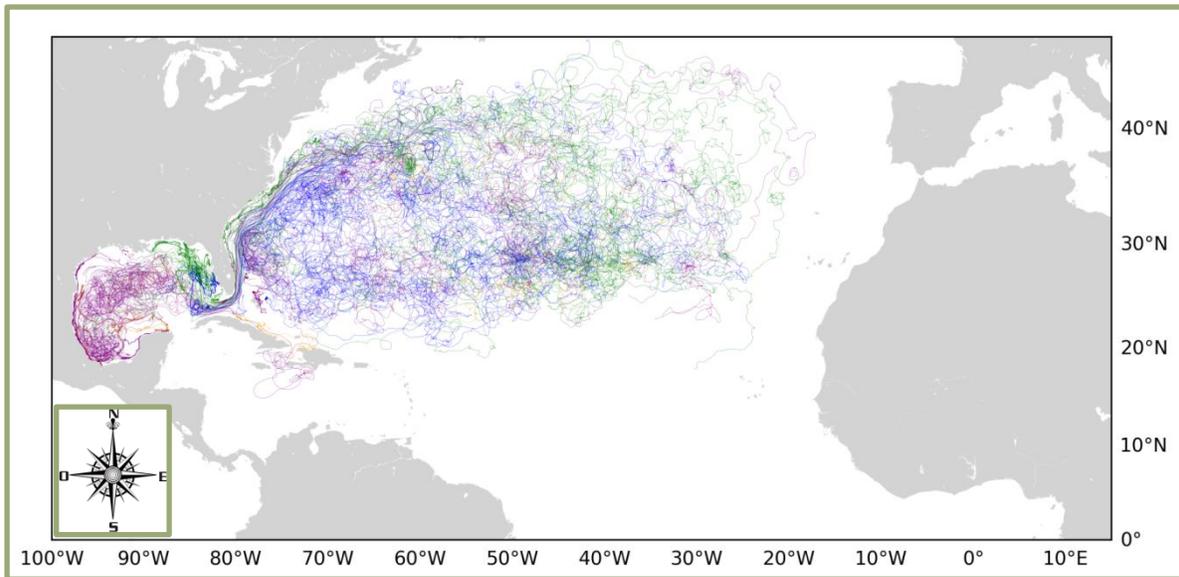


Figura 10 Mapa de las trayectorias de partículas liberadas de colonias del Golfo de México; Sarasota (azul); Saint John (verde), Isla Aguada (morado) y Las Coloradas (naranja).

Las trayectorias de las partículas provenientes de colonias que se encuentran dentro del golfo de México (Figura 10), tuvieron dos comportamientos contrastantes; en el primer caso aquellas provenientes de las colonias ubicadas en la Península de La Florida después de pasar un tiempo dentro del golfo se internaron en la Corriente de Lazo y se dirigieron al Atlántico Norte donde se concentraron en el Mar de los Sargazos, algunas de ellas alcanzando las islas Azores, Madeira y Canarias. El segundo comportamiento corresponde a las colonias ubicadas en la Península de Yucatán, en su caso las partículas se distribuyeron inicialmente y extensamente por el Golfo de México para posteriormente, con ayuda de la Corriente de Lazo, llegar al cabo de 6 años al Mar de los Sargazos.

Para las colonias ubicadas en la región del Mar Caribe (Figura 11), se aprecia que todas pasan por el Canal de Yucatán y se integran a la Corriente de Lazo para eventualmente llegar al Atlántico Norte. Un aspecto que podemos resaltar es la diferencia entre el movimiento de las colonias de Cozumel y X'cabel. En el caso de la primera vemos como una parte de las partículas se quedan dentro del remolino que se forma dentro de la Corriente de Lazo para posteriormente continuar su trayecto hacia el Atlántico, mientras, el otro grupo (en menor número), se distribuye dentro del Golfo de México. Las partículas originadas en X'cabel, en su mayoría, se integran casi de inmediato a la Corriente de Lazo y son transportadas hacia el Atlántico Norte. Sin embargo una pequeña proporción se distribuye hacia adentro del golfo. En el caso de las partículas de la colonia de Cuba se observa que estas no se integran inmediatamente a la Corriente de Lazo, sino que pasan un tiempo dentro del Mar Caribe. Sin embargo una vez que atraviesan el Canal de Yucatán, tienen el mismo comportamiento que las partículas originadas en la colonia de Cozumel. Las partículas de la colonia de Colombia, atravesaron todo el Caribe siguiendo la corriente del mismo nombre, hasta internarse en la Corriente de Lazo y continuar su recorrido hacia el Océano Atlántico. Cabe destacar que partículas de todas las colonias llegan hasta las islas Azores, Madeira y Canarias; sin embargo, su número es reducido comparado con las que se mantienen dentro del Mar de los Sargazos.

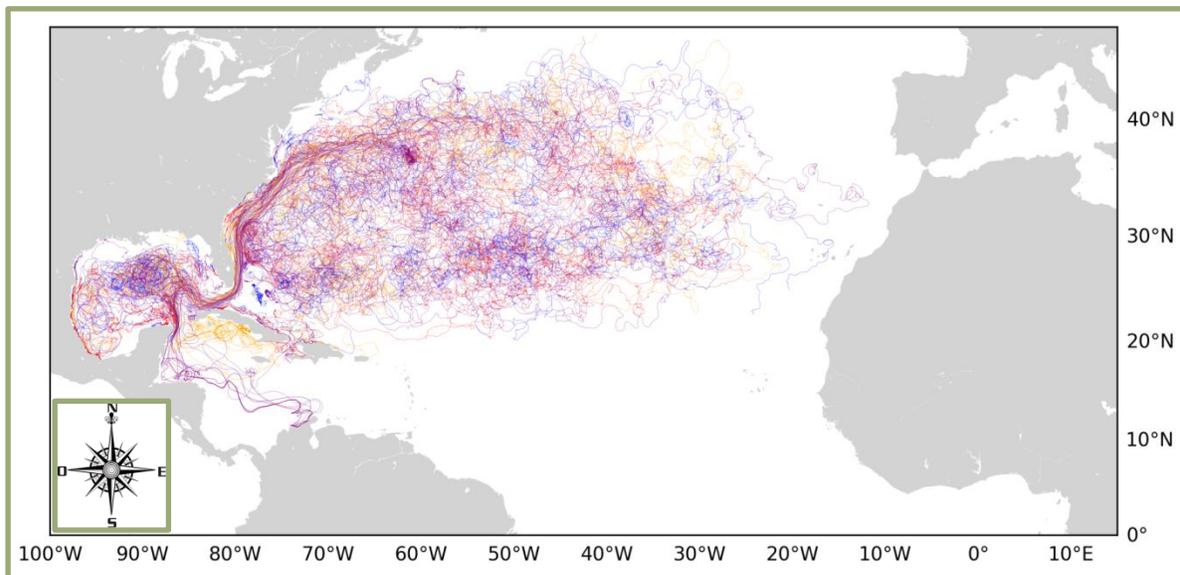


Figura 11 Trayectorias de partículas liberadas de colonias del Mar Caribe; Cozumel (azul); X'cabel (rojo); Cayo Largo (naranja) y Media Guajira (morado).

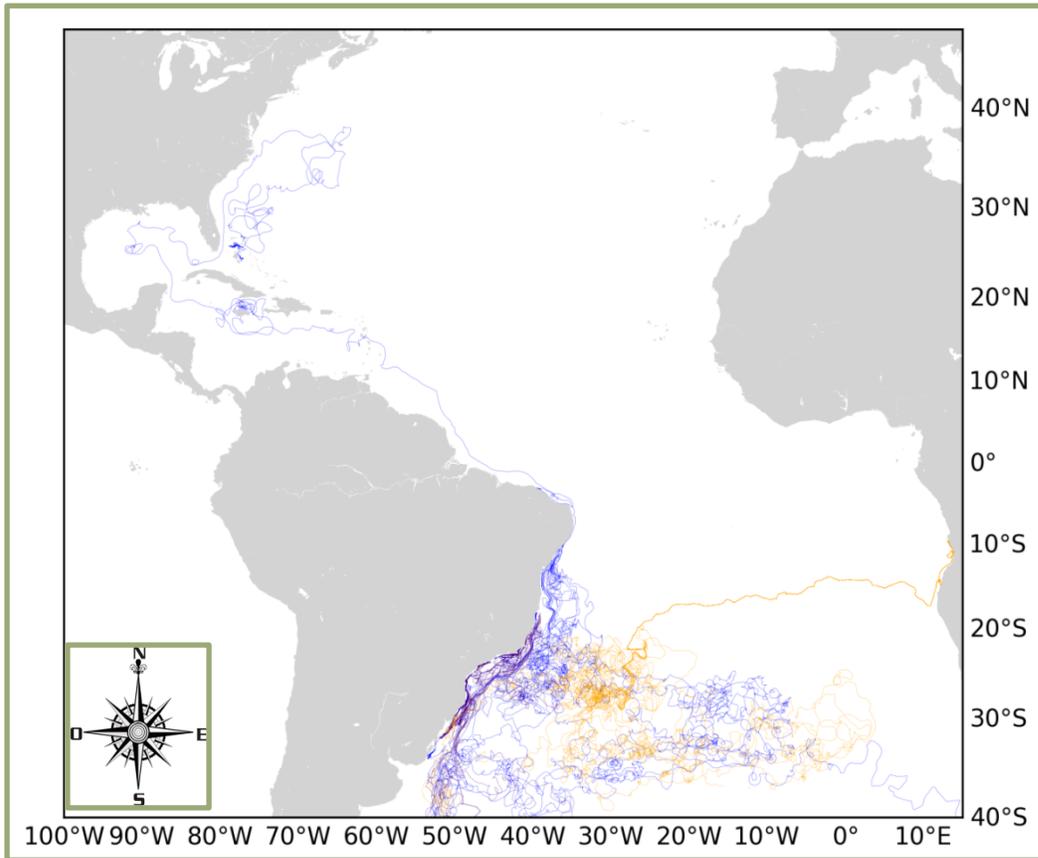


Figura 12 Trayectorias de partículas liberadas de colonias del Atlántico Sur; Brasil Norte (azul); Brasil Sur (índigo) y Angola (naranja).

Para las trayectorias de partículas provenientes de las colonias ubicadas en el Atlántico Sur (Figura 11 Trayectorias de partículas liberadas de colonias del Mar Caribe; Cozumel (azul); X'cacel (rojo); Cayo Largo (naranja) y Media Guajira (morado).

), lo primero que destaca es que una porción minoritaria de aquellas liberadas en playas de la región norte de Brasil tomaron una dirección norte, ingresando al Mar Caribe, pasando al Golfo de México, y llegando hasta el Atlántico Norte. El resto (la mayoría) de éstas, junto con las que provienen de la región sur de Brasil tomaron un rumbo sur, para posteriormente dirigirse al centro del Atlántico Sur. En el caso de las provenientes de Angola, estas se dirigieron al oeste y cerca de las costas brasileñas se comenzaron a distribuir por el Atlántico Sur.

Es importante mencionar que ninguna de las partículas liberadas de las colonias del Atlántico Norte, Golfo de México y Mar Caribe, atravesaron el ecuador para ingresar al Atlántico Sur. En contraposición, aunque en menor proporción, algunas de las partículas originarias de la región norte de Brasil ingresaron a varias zonas del Atlántico Norte.

## 8.2 Convergencia en los patrones de dispersión

### 8.2.1 Patrones de agrupamiento

Los resultados obtenidos además de ilustrar los patrones individuales de los derroteros esperados por el transporte pasivo de los juveniles, también resaltan zonas en donde partículas de diversos orígenes convergen.

Para confirmar si las partículas provenientes de colonias ubicadas en la misma región compartían hábitats durante las simulaciones, se realizó un Análisis de Componentes Principales. En la Figura 13 se muestran los resultados de los análisis realizados a las simulaciones a los 6 meses, 1, 2 y 6 años, las cuales nos permiten demostrar que las partículas comparten hábitats durante las simulaciones, cuanto más hábitat comparten más cercanos se encuentran los puntos que las representan, estas agrupaciones se encuentran encerradas en círculos en cada una de las gráficas. La más clara de ellas es el grupo formado por las colonias ubicadas en el Sureste y Suroeste del Atlántico (BRN, BRS y ANG) el cual está representado en todas las gráficas; el segundo grupo es el que integran las colonias provenientes del Atlántico Noroeste (BH, CI, SAP, FLA y MB), cabe hacer notar que las distancias entre los puntos son mayores que en el grupo anterior, a tal grado que en la gráfica de un año, la colonia de BH queda completamente separada y no forma parte del grupo. En los casos de las colonias provenientes del Golfo de México (SAR, SJ, CAM, YUC) y del Mar Caribe (XC, COZ, CUB y MG), si presentan agrupaciones pero son menos uniformes que las de las primeras dos regiones analizadas; con las del golfo observamos que las que se mantienen agrupadas en tres de las cuatro gráficas son CAM y YUC, solo en la primera a los 6 meses vemos que el grupo lo forman SAR y YUC; para el caribe la situación es similar, vemos que a los 6 meses no se forma ningún agrupamiento entre las colonias de esta región, este se presenta en las gráficas de uno y dos años, con la particularidad que la colonia CUB se mantiene separada de las demás de esta región que si se agrupan. Es importante resaltar lo que sucede en la gráfica de los 6 años, en la cual se forman 3 grupos muy distinguibles uno perteneciente a las colonias del Atlántico Sur, el segundo con dos de las colonias del Golfo de México (CAM y YUC) y el tercero que está formado por el resto de las colonias las cuales provienen de cuatro regiones diferentes Atlántico Noroeste (BH, CI, SAP, FLAG y MB), Atlántico Noreste (BV), Golfo de México (SJ y SAR) y Mar Caribe (XC, COZ, CUB y MG).

Patrones de dispersión de crías de tortuga caguama (*Caretta caretta*), analizados por medio de modelos de corrientes oceánicas para el océano Atlántico, golfo de México y mar Caribe

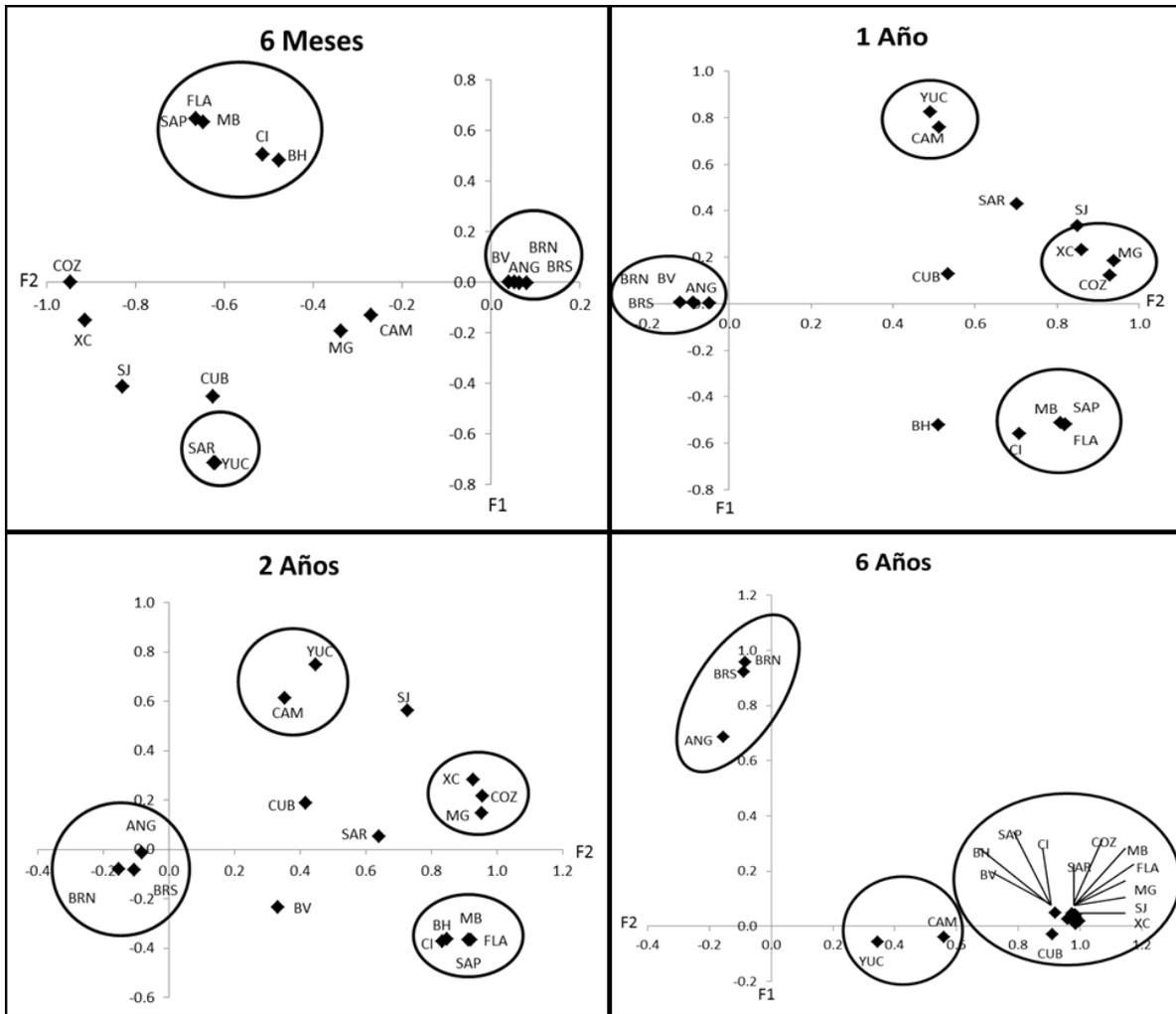


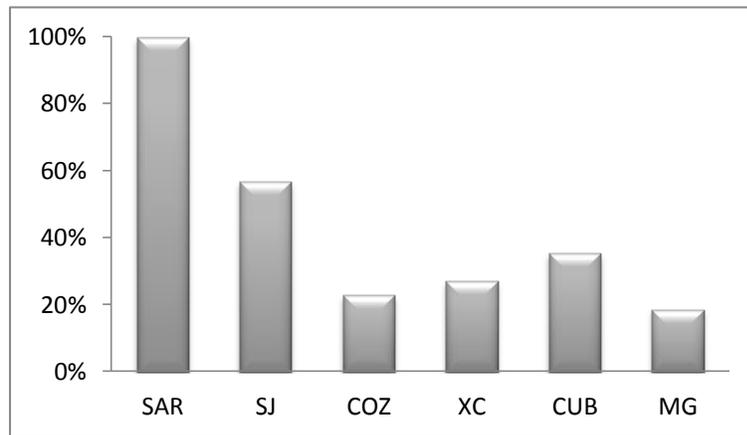
Figura 13 Resultados de los análisis de componentes principales, para la simulación a los 6 meses, 1, 2 y 6 años. Encerrados en círculos se encuentran los grupos detectados mediante este análisis.

### 8.2.2 Derrame de petróleo de la plataforma Deep Water Horizon

La trayectoria de las partículas que representan las tortugas en sus primeros ciclos de vida tiene grandes implicaciones no solo para el conocimiento del ciclo de vida de las tortugas marinas, sino también debido al impacto que las actividades humanas están teniendo en los ecosistemas marinos, en particular en lo que respecta a las tortugas marinas, y que resulta muy complicado de cuantificar, la técnica que se está empleando en este estudio nos permite evaluar que colonias de tortugas pueden verse en riesgo ante ciertas actividades humanas. Un ejemplo es el impacto del derrame de petrolero de la plataforma Deep Water Horizon, del cual se conoce su zona de influencia, con eso se logró determinar que colonias

se pudieron ver afectadas al encontrarse dentro de esta zona, para esto se consideró la cantidad y tiempo que las partículas pasaron dentro del área de influencia del derrame.

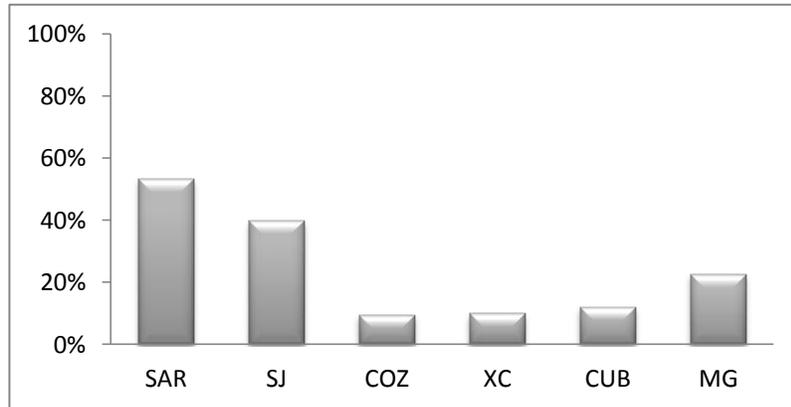
Los resultados muestran como las partículas pueden pasar varios años y en grandes cantidades dentro de una región bajo el efecto de un evento como el derrame petrolero, lo que posiblemente maximizaría sus efectos a largo plazo (Gráficas 1, 2 y 3). También se muestra como existe un impacto diferenciado para cada colonia debido al número y tiempo que las partículas pasan en la zona. El análisis se realizó para los 6 años de simulación, a pesar de ello, no se obtuvieron valores después de los dos años, lo que nos indicó que las partículas habían salido de la zona, por ello es que las gráficas solo abarcan hasta el segundo año y no los seis años de la simulación



Gráfica 1 Porcentaje de partículas dentro de la zona de influencia del derrame petrolero a los 6 meses de simulación.

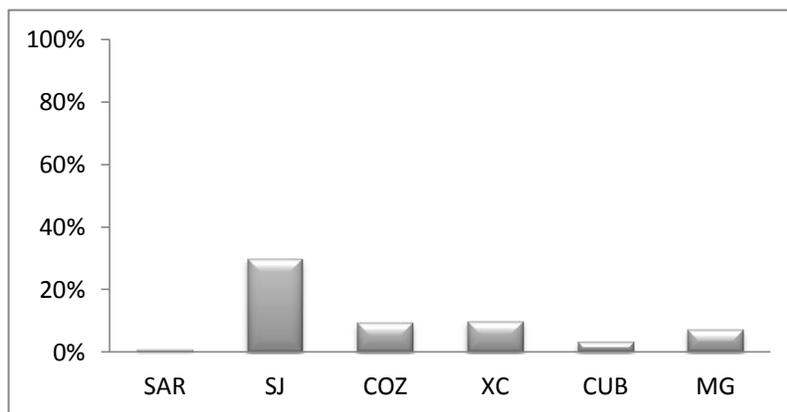
A los 6 meses de simulación (Gráfica 1) el 100% de las partículas provenientes de Sarasota (SA) se encontraron dentro de la zona de influencia del derrame, caso diferente fue para la colonia de Saint John (SJ), que a pesar de ser la que más cerca se encuentra de la zona del derrame sus partículas tuvieron un comportamiento muy distinto, a los 6 meses el 60% de las mismas se encontraban dentro, El resto de colonias (COZ, XC, CUB y MG), a los seis meses tuvieron porcentajes de partículas entre el 15% (MG) y 30% (CUB)

Patrones de dispersión de crías de tortuga caguama (*Caretta caretta*), analizados por medio de modelos de corrientes oceánicas para el océano Atlántico, golfo de México y mar Caribe



**Gráfica 2** Porcentaje de partículas dentro de la zona de influencia del derrame petrolero al primer año de simulación.

Al año (Gráfica 2) de iniciada la simulación dentro de la zona de influencia del derrame quedaban menos del 40% de las partículas provenientes de SAR, en el caso de SJ el porcentaje se redujo hasta alcanzar el 40%, para el resto de las colonias los valores se redujeron hasta menos del 15%, excepto para las partículas de la colonia MG la cual tuvo un ligero aumento del 5% alcanzando el 20%, esto puede explicarse porque esta colonia es la que más alejada se encuentra de la zona del derrame y por lo tanto sus partículas son las que más tiempo tardaron en alcanzarla.



**Gráfica 3** Porcentaje de partículas dentro de la zona de influencia del derrame petrolero al segundo año de simulación.

En el segundo año (Gráfica 3) las partículas de SAR prácticamente habían desaparecido de esta región; en cambio las provenientes de la colonia SJ y a pesar de que su número decrece nuevamente alcanzando el 30%, queda como la colonia con mayor cantidad de partículas

para ese momento. En el caso de las colonias provenientes de COZ, XC, CUB y MG todas tuvieron valores por debajo del 10.

### 8.2.3 Agregación en zonas de pesca

La Figura 14 muestra el porcentaje de partículas presentes en cada una de las zonas de pesca para el Atlántico Norte al finalizar los 6 años de simulación. Se utilizó esta edad, debido a que es la edad mínima calculada por Bjorndal *et al.* (2000), a la cuál las crías de tortuga marina comienzan su reclutamiento de la etapa oceánica a la nerítica y ya cuentan con el tamaño suficiente para morder los anzuelos de las líneas de pesca.

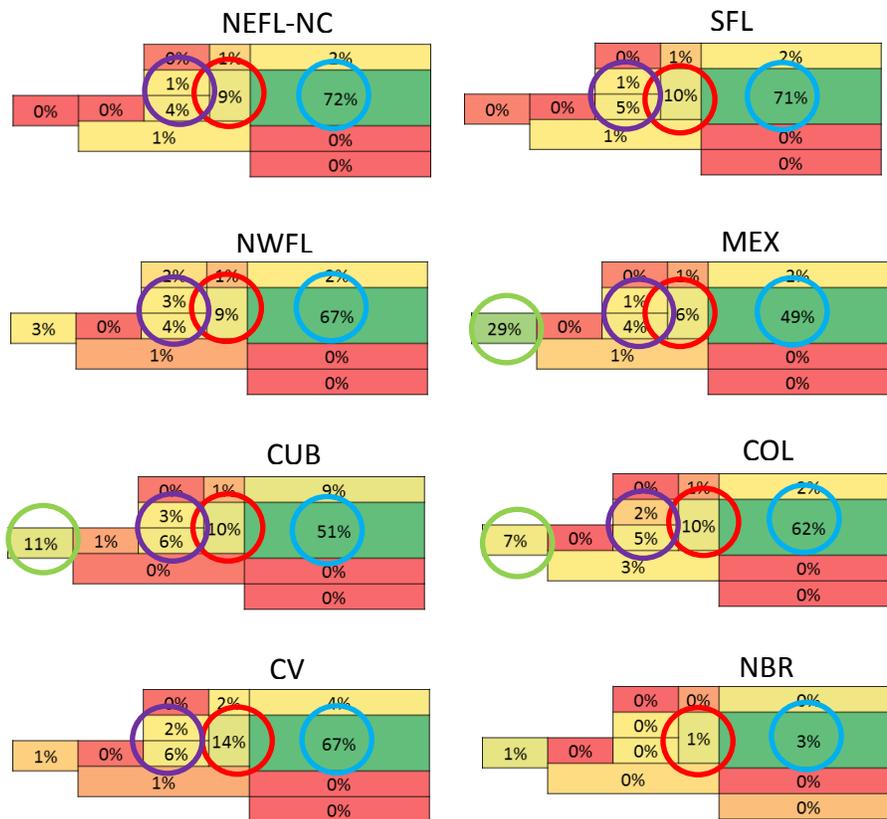


Figura 14 Porcentajes de partículas en las diferentes zonas de pesca del Atlántico Norte a los 6 años de simulación, se destacan con círculos las zonas en orden de mayor a menor porcentaje, donde el azul representa a la más importante, el rojo a las segundas en importancia y el morado para las terceras, en el caso de las colonias de Cuba (CUB), Colombia (COL) y México (MEX), presentan un caso particular con una cuarta área con un porcentaje relevante a estas corresponden los círculos de color verde. Los colores de las áreas representan su importancia debido al porcentaje de partículas presentes en ellas, verde para las más importantes, amarillo para las segundas en importancia, anaranjado para las terceras y rojo en las que no se registra presencia de partículas. Las zonas de pesca ilustradas en estas figuras representan áreas simplificadas de los polígonos identificados en la [Figura 13](#) (no se encuentra el origen de la referencia.).

Como se puede observar encontramos coincidencias muy importantes en la distribución de las partículas para las diferentes colonias, la zona de pesca en el Atlántico Norte con el mayor porcentaje de partículas es NCA, (círculo azul), todas las colonias tuvieron como la más importante a esta zona, con valores que van del 49 al 72% del total de partículas; en el caso de Brasil Norte (NBR), el porcentaje también es con respecto al total de partículas provenientes de esa región, hay que recordar que solo una porción muy pequeña de las mismas atravesó el ecuador, por esto es que los valores son tan pequeños comparados con el resto. La zona SAR (círculo rojo) se presentó como la segunda en importancia para la acumulación de partículas, excepto para las colonias de México y Cuba en las cuales es la tercera; para estas dos colonias la segunda en importancia es WGO (círculo verde), hay que resaltar que para la colonia de Colombia también es muy importante encontrándose en tercera posición. Por último encontramos otras dos zonas que destacan y en las cuales hubo partículas provenientes de todas las colonias (excepto Brasil), FEC y SAB (círculo morado).

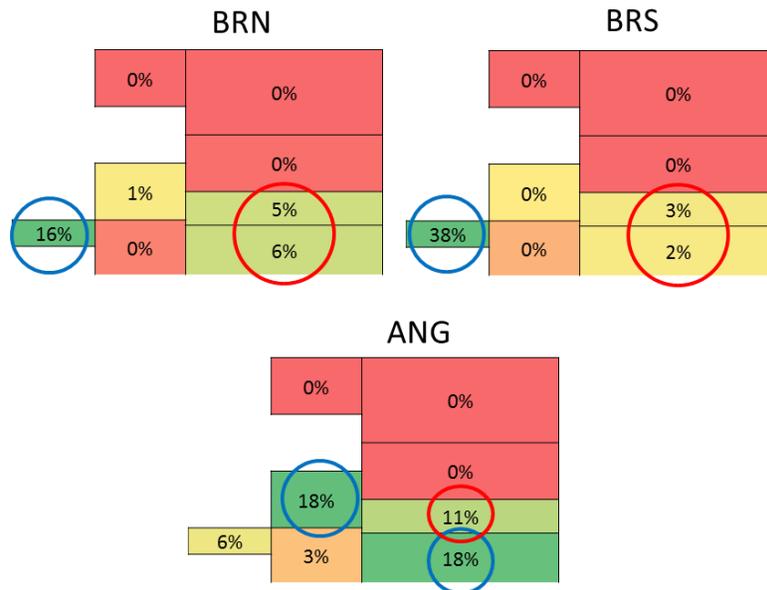


Figura 15 Porcentajes de partículas en las diferentes zonas de pesca del Atlántico Sur a los 6 años de simulación, se destacan con círculos las zonas con mayor porcentaje, azul para las de mayor porcentaje y rojo para las segundas. Los colores de las áreas representan su importancia debido al porcentaje de partículas presentes en ellas, verde para las más importantes, amarillo para las segundas en importancia, anaranjado para las terceras y rojo en las que no se registra presencia de partículas. Las zonas de pesca ilustradas en estas figuras representan áreas simplificadas de los polígonos identificados en la [Figura 14](#) (No se encuentra el origen de la referencia.).

De manera análoga para el hemisferio sur (Figura 15; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) la principal zona de distribución de las partículas de Brasil Norte y Sur es SB (16 y 38% del total de partículas liberadas; círculo azul), Para Angola las principales zonas de concentración de partículas correspondió a NCB y SSA ambas con un 18% de las partículas (círculo azul). Otras zonas importantes para las colonias brasileñas (círculo rojo) son SCSA y SSA con 5 y 6% para BRN y 3 y 2% para BRS respectivamente, en el caso de Angola estas dos zonas son igualmente importantes con el 11 y 18% respectivamente.

### 8.3 Agregaciones en zonas de forrajeo

Para evaluar la capacidad predictiva de nuestros sistemas, se compararon los resultados de los modelos de partículas en dos maneras: (1) las escalas de tiempo requeridos para una deriva pasiva desde las colonias reproductoras hasta los sitios de alimentación mejor estudiados para la especie y (2) la composición por origen de acuerdo a nuestros modelos y aquella reportada a partir de estudios genéticos sobre composición por stocks en los sitios de alimentación.

#### 8.3.1 Lapsos de tiempo hasta reclutamiento en sitios de alimentación

Las ubicaciones de hábitats de alimentación estudiados fueron obtenidas de Monzón-Argüello *et al.* (2009) en las islas Azores, Madeira, Canarias y costa de Andalucía, en el Atlántico Norte. En el caso del Atlántico Sur, se utilizó la información proporcionada por Reis *et al.* (2009), el cuál indica una zona a 800 km de la costa de Brasil que es utilizada por las tortugas caguama como zona de alimentación. Cabe aclarar que no determinan la posición ni el tamaño de dicha región, solo que es conocida como Elevação do Rio Grande (Elevación del Rio Grande), debido a lo cual se realizó una estimación aproximada. De las 17 colonias estudiadas solo las ubicadas en Angola y la zona sur de Brasil no contribuyeron con individuos a las zonas de alimentación del Atlántico Norte. Asimismo, las partículas de colonias ubicadas en el Atlántico Norte no contribuyeron a las zonas de alimentación localizada en el Atlántico Sur.

Las partículas provenientes de tres playas de anidación (MB, COZ and XC), pudieron llegar a las islas Azores dentro del primer año después de su nacimiento (**Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Para la mayoría de las colonias, el tiempo máximo de llegada fue de entre dos y cuatro años, con excepción de las colonias de Brasil Norte y Cabo Verde, que tuvieron un pico entre los cuatro y los cinco y medio años. Los resultados de las simulaciones apuntan a que los individuos de las colonias anidadoras que pueden llegar a las islas Azores, son: Melbourne Beach, FL; Sapelo Beach, GA; Flagler Beach, FL; Baldhead Island, NC; Saint John, FL; Cozumel, QR; X'cacel, QR; Cape Island, SC;

Patrones de dispersión de crías de tortuga caguama (*Caretta caretta*), analizados por medio de modelos de corrientes oceánicas para el océano Atlántico, golfo de México y mar Caribe

Sarasota, FL; Media Guajira, COL; Cayo Largo, CUB; Isla Aguada, CAM; Las Coloradas, YUC; Boa Vista, CV and Brasil Norte.

**Tabla 2** Porcentaje calculado de arribo de tortugas de las diferentes colonias a las Islas Azores, para una simulación de seis años con intervalos de seis meses; la escala de colores indica su valor, en verde se muestran los valores más altos.

| Años         | BH          | CI          | SAP         | FLA         | MB          | SAR         | SJ          | CUB        | YUC        | CAM        | COZ         | XC          | MG          | BV         | BN         | AN         | BS         |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|------------|
| 0.5          | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           | 0          | 0          | 0          | 0           | 0           | 0           | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 1.0          | 0.7         | 0           | 0           | 0           | 0.2         | 0           | 0           | 0          | 0          | 0          | 0.1         | 0.2         | 0           | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 1.5          | 5.0         | 0.5         | 0.3         | 0.0         | 1.2         | 0           | 0           | 0.2        | 0          | 0          | 0.9         | 2.6         | 0.2         | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 2.0          | 5.9         | 4.4         | 4.0         | 4.8         | 4.6         | 1.4         | 1.9         | 1.1        | 0.0        | 0.3        | 3.3         | 3.7         | 1.7         | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 2.5          | 2.7         | 2.9         | 4.6         | 4.6         | 3.9         | 1.8         | 1.8         | 1.2        | 0.3        | 0.3        | 2.5         | 2.5         | 1.9         | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 3.0          | 1.3         | 2.4         | 4.1         | 3.9         | 4.1         | 4.0         | 4.0         | 2.1        | 2.6        | 1.7        | 3.0         | 2.3         | 3.6         | 0.1        | 0.0        | 0          | 0          |
| 3.5          | 1.2         | 2.0         | 3.6         | 3.4         | 3.0         | 2.8         | 3.8         | 1.6        | 1.5        | 2.6        | 2.8         | 2.3         | 2.4         | 0.3        | 0.0        | 0          | 0          |
| 4.0          | 0.6         | 0.7         | 1.2         | 1.0         | 1.1         | 1.3         | 2.1         | 0.4        | 0.8        | 0.9        | 0.9         | 0.8         | 1.1         | 0.8        | 0.1        | 0          | 0          |
| 4.5          | 0.6         | 0.7         | 0.7         | 1.0         | 1.0         | 1.1         | 1.5         | 0.4        | 0.8        | 0.9        | 0.9         | 0.7         | 1.2         | 1.8        | 0.2        | 0          | 0          |
| 5.0          | 0.5         | 0.5         | 1.0         | 0.9         | 0.7         | 0.9         | 1.1         | 0.6        | 0.4        | 1.0        | 1.1         | 0.5         | 0.7         | 1.7        | 0.1        | 0          | 0          |
| 5.5          | 0.3         | 0.2         | 0.6         | 0.1         | 0.4         | 0.6         | 0.6         | 0.3        | 0.3        | 0.3        | 0.7         | 0.4         | 0.7         | 1.1        | 0.0        | 0          | 0          |
| 6.0          | 0.1         | 0.1         | 0.2         | 0.4         | 0.4         | 0.2         | 0.4         | 0.6        | 0.2        | 0.1        | 0.4         | 0.2         | 0.2         | 0.5        | 0.0        | 0          | 0          |
| <b>Total</b> | <b>18.9</b> | <b>14.4</b> | <b>20.4</b> | <b>20.1</b> | <b>20.6</b> | <b>14.0</b> | <b>17.2</b> | <b>8.3</b> | <b>6.9</b> | <b>8.1</b> | <b>16.6</b> | <b>16.3</b> | <b>13.6</b> | <b>6.3</b> | <b>0.6</b> | <b>0.0</b> | <b>0.0</b> |

**Tabla 3** Porcentaje calculado de arribo de tortugas de las diferentes colonias a las Islas Madeira, para una simulación de seis años con intervalos de seis meses; la escala de colores indica su valor, con rojo se muestran los valores más altos.

| Años         | BH         | CI         | SAP        | FLA        | MB         | SAR        | SJ         | CUB        | YUC        | CAM        | COZ        | XC         | MG         | BV         | BN         | AN         | BS         |
|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0.5          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 1.0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 1.5          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 2.0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 2.5          | 0.0        | 0          | 0.0        | 0          | 0.0        | 0.0        | 0          | 0          | 0          | 0          | 0.1        | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 3.0          | 0.6        | 0.4        | 0.2        | 0.3        | 0.4        | 0.1        | 0.1        | 0.1        | 0          | 0.0        | 0.1        | 0.2        | 0.2        | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 3.5          | 0.1        | 0.3        | 0.3        | 0.4        | 0.4        | 0.0        | 0.2        | 0.2        | 0.1        | 0          | 0.1        | 0.1        | 0.0        | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 4.0          | 0.2        | 0.2        | 0.4        | 0.3        | 0.2        | 0.4        | 0.4        | 0.2        | 0.1        | 0.1        | 0.3        | 0.3        | 0.2        | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 4.5          | 0          | 0.0        | 0.1        | 0.9        | 0.1        | 0.1        | 0.1        | 0.0        | 0.1        | 0.1        | 0.1        | 0.0        | 0.1        | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 5.0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0.0        | 0          | 0          | 0.0        | 0          | 0.1        | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 5.5          | 0.2        | 0.1        | 0.5        | 0.4        | 0.2        | 0.6        | 0.5        | 0.1        | 0.3        | 0.4        | 0.3        | 0.3        | 0.2        | 0.4        | 0.1        | 0          | 0          |
| 6.0          | 0.3        | 0.3        | 0.4        | 0.3        | 0.7        | 0.9        | 0.9        | 0.3        | 0.2        | 0.4        | 0.4        | 0.2        | 0.5        | 0.4        | 0.0        | 0          | 0          |
| <b>Total</b> | <b>1.5</b> | <b>1.5</b> | <b>2.1</b> | <b>2.6</b> | <b>2.1</b> | <b>2.1</b> | <b>2.1</b> | <b>0.9</b> | <b>0.9</b> | <b>1.1</b> | <b>1.4</b> | <b>1.3</b> | <b>1.3</b> | <b>0.9</b> | <b>0.1</b> | <b>0.0</b> | <b>0.0</b> |

Para las Islas Madeira (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), las partículas requirieron del doble de tiempo para alcanzarlas, comparándolas con el requerido para las

que arribaron a las islas Azores. Las primeras partículas llegaron después de dos y medio años de deriva, arribando en dos oleadas distintas, la primera entre los tres y cuatro años de simulación y la segunda a los seis; otra diferencia evidente es el porcentaje de partículas que llegaron a las Azores es un orden de magnitud mayor que para Madeira. Las partículas de las colonias que pueden llegar a las Islas Madeira son; Flagler, FL; Melbourne, FL; Sarasota, FL; Saint John, FL; Sapelo, GA; Baldhead, NC; Cape Island, SC; Cozumel, QR; X'cacel, QR; Media Guajira, COL; Isla Aguada, CAM; Las Coloradas, YUC; Cayo Largo, CUB; Boa Vista, CV Y Brasil Norte.

**Tabla 4** Porcentaje calculado de arribo de tortugas de las diferentes colonias a las Islas Canarias, para una simulación de seis años con intervalos de seis meses; la escala de colores indica su valor, con rojo se muestran los valores más altos.

| Años         | BH         | CI         | SAP        | FLA        | MB         | SAR        | SJ         | CUB        | YUC        | CAM        | COZ        | XC         | MG         | BV         | BN         | AN         | BS         |
|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0.5          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 1.0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 1.5          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 2.0          | 0          | 0          | 0.0        | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 2.5          | 0.0        | 0          | 0          | 0.0        | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0.0        | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 3.0          | 0.0        | 0.1        | 0.1        | 0.1        | 0.1        | 0.1        | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0.1        | 0.0        | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 3.5          | 0.0        | 0.0        | 0          | 0.2        | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 4.0          | 0.3        | 0.3        | 0.3        | 0.2        | 0.3        | 0.2        | 0.2        | 0.1        | 0.1        | 0.1        | 0.2        | 0.1        | 0.1        | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 4.5          | 0          | 0          | 0.0        | 0.4        | 0.0        | 0          | 0.0        | 0.0        | 0          | 0.0        | 0          | 0          | 0.1        | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 5.0          | 0.0        | 0          | 0          | 0          | 0          | 0.0        | 0.1        | 0          | 0.0        | 0.0        | 0.1        | 0.1        | 0.1        | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 5.5          | 0.1        | 0.1        | 0.0        | 0.1        | 0.1        | 0.1        | 0.3        | 0.1        | 0.3        | 0.1        | 0.0        | 0.1        | 0.2        | 0.3        | 0.1        | 0          | 0          |
| 6.0          | 0.7        | 0.7        | 1.6        | 1.1        | 1.1        | 1.4        | 2.0        | 0.6        | 0.6        | 1.3        | 1.4        | 1.1        | 1.2        | 1.2        | 0.0        | 0          | 0          |
| <b>Total</b> | <b>1.2</b> | <b>1.3</b> | <b>2.1</b> | <b>2.3</b> | <b>1.6</b> | <b>1.9</b> | <b>2.6</b> | <b>0.9</b> | <b>1.0</b> | <b>1.6</b> | <b>1.7</b> | <b>1.5</b> | <b>1.7</b> | <b>1.5</b> | <b>0.1</b> | <b>0.0</b> | <b>0.0</b> |

Las simulaciones mostraron que las partículas arribaron a las Islas Canarias entre dos y dos y medio años de deriva, provenientes de 4 colonias (SAP, BH, FLA y MG). No obstante, el mayor porcentaje se presentó de los 5.5 a los 6 años, durante los últimos 6 meses de la simulación (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Las colonias que contribuyen con partículas a las Islas Canarias son: Saint John, FL, seguida por Flagler Beach, FL; Sapelo, GA; Sarasota, FL; Cozumel, QR; Media Guajira, COL; Melbourne, FL; Isla Aguada, CAM; X'cacel, QR; Boa Vista, CV; Cape Island, SC; Baldhead, NC; Las Coloradas, YUC; Cayo Largo, CUB y Brasil Norte.

Prácticamente ninguna de las partículas de las colonias simuladas (17) alcanzaron la zona de Andalucía durante la simulación (< 1%), solo dos colonias FLA y BN tuvieron valores del 0.1%, el resto tuvieron valores por debajo o no contribuyeron con ninguna partícula. (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Cabe hacer notar que ninguna partícula entró en esta región antes de cinco años de simulación. Las colonias que llegaron

Patrones de dispersión de crías de tortuga caguama (*Caretta caretta*), analizados por medio de modelos de corrientes oceánicas para el océano Atlántico, golfo de México y mar Caribe

a Andalucía son: Flagler, FL; Brasil Norte, Baldhead, NC; Sapelo, GA; Sarasota, FL; Saint John, FL and X´cabel, QR.

**Tabla 5** Porcentaje calculado de arribo de tortugas de las diferentes colonias a la costa de Andalucía, para una simulación de seis años con intervalos de seis meses; la escala de colores indica su valor, con rojo se muestran los valores más altos

| Años         | BH         | CI         | SAP        | FLA        | MB         | SAR        | SJ         | CUB        | YUC        | CAM        | COZ        | XC         | MG         | BV         | BN         | AN         | BS         |
|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0.5          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 1.0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 1.5          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 2.0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 2.5          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 3.0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 3.5          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 4.0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 4.5          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 5.0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 5.5          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0.1        | 0          | 0          |
| 6.0          | 0.0        | 0          | 0.0        | 0.1        | 0          | 0.0        | 0.0        | 0          | 0          | 0          | 0          | 0.0        | 0          | 0.0        | 0.0        | 0          | 0          |
| <b>Total</b> | <b>0.0</b> | <b>0.0</b> | <b>0.0</b> | <b>0.1</b> | <b>0.0</b> | <b>0.1</b> | <b>0.0</b> | <b>0.0</b> |

**Tabla 6** Porcentaje calculado de arribo de tortugas de las diferentes colonias a Elevação do Rio Grande, para una simulación de seis años con intervalos de seis meses; la escala de colores indica su valor, con rojo se muestran los valores más altos.

| Años         | BN          | AN          | BS          |
|--------------|-------------|-------------|-------------|
| 0.5          | 0.04        | 0           | 0           |
| 1.0          | 0.04        | 0           | 0           |
| 1.5          | 0.04        | 0           | 0           |
| 2.0          | 0           | 0           | 0           |
| 2.5          | 0           | 0           | 0           |
| 3.0          | 0           | 0           | 0           |
| 3.5          | 0           | 0           | 0           |
| 4.0          | 0           | 0.07        | 0           |
| 4.5          | 0           | 1.22        | 0           |
| 5.0          | 0           | 1.15        | 0           |
| 5.5          | 0.04        | 2.30        | 0.04        |
| 6.0          | 0           | 1.41        | 0.04        |
| <b>Total</b> | <b>0.15</b> | <b>6.15</b> | <b>0.07</b> |

Las partículas provenientes de la colonia de Brasil Norte alcanzaron la zona de Elevação do Rio Grande durante los primeros seis meses de la simulación, las partículas de la colonia de

Angola lo hicieron a los cuatro años y las de Brasil Sur a los cinco y medio (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). El momento de máxima contribución ocurre a los 5 años de deriva; el origen con mayor aporte de partículas es la colonia de Angola con el 6.15%, seguida por Brasil Norte 0.15% y Brasil Sur 0.07%.

Estos resultados muestran que partículas de todas las colonias liberadas al mismo tiempo alcanzan los sitios de alimentación compartidos, con distintas duraciones para sus desplazamientos. Consecuentemente y, particularmente si los derroteros atraviesan hábitats con diferentes regímenes térmicos, cabría de esperarse que sus tasas de crecimiento y desarrollo sean distintas. De ser correcto, al extrapolarlo a la realidad las tortugas juveniles encontradas en estos sitios de alimentación podrían tener la misma edad con tallas diferentes o diferentes edades pero con tallas similares.

### 8.3.2 Comparación de los resultados de genética con las simulaciones

Uno de los métodos indirectos para estudiar lo relativo al origen de los juveniles encontrados en las zonas de alimentación del Atlántico Norte (Bolten *et al.*, 1993; Bowen *et al.*, 2004), es la genética, gracias a esta técnica ha sido posible aclarar y/o confirmar muchos aspectos del ciclo de vida de las tortugas marinas. El trabajo más reciente para el Atlántico Norte es el realizado por Monzón Argüello (2009), que estudia los orígenes de las tortugas caguama presentes en las Islas Azores, Madeira y Canarias; así como, en las costas de Andalucía, a partir de su perfil genético. Dado que este trabajo también engloba investigaciones hechas por otros autores en las mismas regiones, los resultados obtenidos de las simulaciones son comparados a los de este autor.

Tabla 7 Porcentaje de composición genética (Monzón Argüello, 2009) y de arribo de partículas a los 6 años de eclosión a zonas de forrajeo (Sim) en: NEFL-NC, Noreste de Florida-Carolina del Norte; NWFL, Noroeste de Florida; SFL, Sur de Florida; MEX, México abarcando costas de Campeche, Yucatán y Quintana Roo; CUB, Cuba; COL, Colombia; CV, Cabo Verde; BR, Zona Norte de Brasil.

|         | Azores |       | Madeira |       | Canarias |       | Andalucía |       |
|---------|--------|-------|---------|-------|----------|-------|-----------|-------|
|         | Monzón | Sim   | Monzón  | Sim   | Monzón   | Sim   | Monzón    | Sim   |
| NEFL-NC | 6.30   | 12.75 | 8.60    | 10.11 | 8.50     | 10.75 | 6.70      | 20.11 |
| NWFL    | 0.50   | 0.67  | 0.90    | 1.02  | 1.50     | 1.04  | 0.80      | 2.81  |
| SFL     | 82.80  | 81.65 | 66.60   | 83.18 | 68.70    | 77.91 | 76.90     | 18.82 |
| MEX     | 1.10   | 1.86  | 3.30    | 1.47  | 6.50     | 2.03  | 3.30      | 4.53  |
| CUB     | 0.00   | 0.14  | 0.00    | 0.15  | 0.00     | 0.17  | 0.00      | 0.00  |
| COL     | 0.00   | 0.04  | 0.00    | 0.04  | 0.00     | 0.06  | 0.00      | 0.00  |
| CV      | 4.80   | 2.78  | 13.20   | 3.84  | 6.80     | 7.77  | 6.80      | 25.57 |
| BR      | 1.30   | 0.10  | 2.00    | 0.18  | 2.20     | 0.28  | 1.00      | 28.15 |

En la Tabla 7 se observa la comparación del análisis centrado en las zonas de forrajeo propuestas en el trabajo de Monzón con los resultados de las simulaciones, para las islas Azores, Madeira y Canarias, se pueden apreciar pequeñas diferencias entre los porcentajes de tortugas que aportan las diferentes colonias; sin embargo, existe una correlación entre los dos trabajos para los sitios mencionados (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). En cambio en el caso de Andalucía las diferencias son mucho mayores, a tal grado que no existe una correlación entre los resultados de los dos trabajos (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Tabla 9 Comparativo del análisis centrado en la zonas de forrajeo realizado por Monzón y las simulaciones. Monzón con las simulaciones; en negritas se muestran los valores significativos.

| Forrajeo  | Spearman R  | p-level       |
|-----------|-------------|---------------|
| Azores    | <b>0.84</b> | <b>0.0093</b> |
| Madeira   | <b>0.95</b> | <b>0.0004</b> |
| Canarias  | <b>0.97</b> | <b>0.0001</b> |
| Andalucía | 0.69        | 0.0599        |

En la tabla 10 se muestran los valores obtenidos por Monzón y por las simulaciones en el análisis centrado en las colonias, como podemos observar, a simple vista los resultados de los dos estudios son muy diferentes, para confirmarlo se aplicó la prueba de correlación de Spearman (Motulsky, 1995), encontrándose relación en los resultados para la zona de NEFL-NC, esto se debe a la forma en que la prueba trabaja, la cuál ordena los datos por su valor y si ordenamos de mayor a menor los valores obtenidos en el estudio de genética y los de la simulación, resulta que el orden es el mismo en ambos casos, por lo cuál la prueba encuentra un valor de correlación tan alto; para todos los demás casos la prueba demuestra que no existe relación entre los resultados (Tabla 8).

Tabla 10 Comparativo del análisis centrado en las colonias realizado por Monzón Argüello (2009) y las simulaciones.

|           | NEFL-NC |      | SFL  |      | NWFL |      | MEX  |      | CUB |     | COL |      | CV  |     | BR   |     |
|-----------|---------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|------|-----|
|           | Mon     | Sim  | Mon  | Sim  | Mon  | Sim  | Mon  | Sim  | Mon | Sim | Mon | Sim  | Mon | Sim | Mon  | Sim |
| <b>Az</b> | 23.9    | 19.9 | 29.6 | 20.1 | 20.0 | 14.0 | 12.7 | 16.4 | 0.0 | 8.3 | 0.0 | 13.6 | 7.8 | 6.3 | 13.5 | 0.6 |

Patrones de dispersión de crías de tortuga caguama (*Caretta caretta*), analizados por medio de modelos de corrientes oceánicas para el océano Atlántico, golfo de México y mar Caribe

|             |      |      |      |      |      |      |      |      |     |      |     |      |      |      |      |      |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|-----|------|------|------|------|------|
| <b>Mad</b>  | 19.3 | 1.6  | 19.3 | 2.1  | 20.0 | 2.1  | 23.2 | 1.3  | 0.0 | 0.9  | 0.0 | 1.3  | 15.9 | 0.9  | 14.9 | 0.1  |
| <b>Can</b>  | 13.1 | 1.4  | 12.7 | 1.6  | 20.9 | 1.9  | 34.2 | 1.5  | 0.0 | 0.9  | 0.0 | 1.7  | 5.1  | 1.5  | 12.0 | 0.1  |
| <b>And</b>  | 17.5 | 0.0  | 27.6 | 0.0  | 19.6 | 0.0  | 18.7 | 0.0  | 0.0 | 0.0  | 0.0 | 0.0  | 10.2 | 0.0  | 10.7 | 0.1  |
| <b>Desc</b> | 26.1 | 77.1 | 10.7 | 76.2 | 19.5 | 82.0 | 11.2 | 80.7 | 0.0 | 89.9 | 0.0 | 83.3 | 61.0 | 91.2 | 48.8 | 99.0 |

Tabla 8 Tabla de valores de la correlación Spearman ( $p < 0.05$ ), de la comparación de los resultados del análisis centrado en colonias de Mozón con las simulaciones; en negritas se muestran los valores significativos.

| Colonia | Spearman R  | p-level     |
|---------|-------------|-------------|
| NEFL-NC | <b>0.90</b> | <b>0.04</b> |
| SFL     | -0.30       | 0.62        |
| NWFL    | -0.36       | 0.55        |
| MEX     | -0.60       | 0.28        |
| CV      | 0.20        | 0.75        |
| BRA     | 0.56        | 0.32        |

Es pertinente aclarar que los análisis aquí presentados están basados en suposiciones que simplifican al máximo esta etapa del ciclo de vida de las tortugas marinas, esto se hizo así con el objetivo de obtener una base metodológica y de resultados que no existía, sobre la cuál comenzar y, a partir de esta ir construyendo modelos cada vez mas complejos y cercanos a la realidad.

## 9 Discusión

Desde los inicios del estudio del ciclo de vida de la tortuga caguama, se resaltó el gran vacío de información sobre el desplazamiento y ubicación de la fase oceánica de este ciclo. Se suponía que durante esta fase ocurría un transporte pasivo de los neonatos de tortuga caguama en el Atlántico Norte mediado por las corrientes (Caldwell y Carr, 1959). Pero debido a la gran ausencia de conocimiento sobre esta etapa extremadamente difícil de estudiar, se le bautizó como “el año perdido” (“the lost year”). No fue sino hasta 1986 que se confirmó este transporte y el uso de este término queda mas como una expresión metafórica que como una realidad (Carr, 1986) y, como ahora se sabe que los juveniles permanecen varios años en su fase pelágica, en vez de “el año perdido” se debería referir en vez a “los años perdidos”. La dificultad que implica dar seguimiento directo (rastreo satelital e *in situ*) a estas crías y juveniles ha llevado a modelar el comportamiento de

partículas en “océanos virtuales”, como una forma de explicar y visualizar esta etapa del ciclo de vida de las tortugas que perdura como la menos comprendida de toda la historia natural de las tortugas marinas (Witherington, 2002).

Uno de los trabajos pioneros fue el realizado por Hays y Marsh (1997), que fueron los primeros en utilizar un modelo del Atlántico Norte para simular el transporte pasivo de crías, simulando partículas liberadas frente a la costa este de la península de la Florida, con varias limitantes en ese entonces debido a simplificaciones en aspectos biológicos y ecológicos en los modelos y escasa precisión en los parámetros físicos del medio. Este tipo de investigaciones se ha extendido para la determinación de la dispersión de crías en el océano (Hays *et al.*, 2010; Putman *et al.*, 2010) gracias al mejoramiento en tecnología computacional y modelaje numérico de alta resolución a escala global que se desarrolló para estudiar y clarificar los mecanismos de transporte oceánico de varias especies de peces (Kim *et al.*, 2007; Zenimoto *et al.*, 2009; Kitagawa *et al.*, 2010).

Las mejoras en la precisión de las simulaciones de dispersión de partículas en el ámbito oceánico se pueden resaltar al comparar los modelos de corrientes oceánicas utilizados actualmente contra los de Hays y Marsh (1997); por ejemplo, en su modelo la resolución horizontal de los datos es de  $\sim 1^\circ$  y el campo de velocidad fue interpolado para trabajar a profundidades en el intervalo de 25 a 75 m, mientras que en el de este estudio la resolución es de  $0.08^\circ$  y el campo de velocidad es superficial a 0 m de profundidad. Debido a lo anterior podemos observar como sus partículas inician su recorrido hacia el este muy al norte a la altura de las costas de Canadá. En el caso de este trabajo, las partículas inician el recorrido mucho más al sur frente a las costas del estado de Virginia en los Estados Unidos. Esto da como resultado que ninguna de las partículas en las simulaciones, tengan una trayectoria que supere los  $40^\circ$  de latitud norte, disminuyendo considerablemente la probabilidad de que las partículas alcancen las costas de Inglaterra. Otra diferencia a destacar es el tiempo que a las partículas les toma para alcanzar la zona oriental del Atlántico, en su trabajo Hays y Marsh presentan una gráfica que muestra que el tiempo mínimo de simulación para que las partículas alcancen esa zona es de 3.25 años, mientras que la mayoría de ellas lo hacen a los 3.75 años. En los resultados de este trabajo el tiempo mínimo para que las partículas alcancen la región de las islas Azores es de un año, con la mayoría de las partículas llegando entre los 2 y 3.5 años. En general, las actuales capacidades computacionales han permitido que este enfoque se convierta en una accesible y poderosa herramienta para comprender la ecología de fases tempranas de organismos que se desarrollan en el hábitat pelágico

Aunque existen otros trabajos que utilizan el modelado de partículas para tortugas marinas, esta investigación es una de las primeras que lo hace de una forma exhaustiva, abarcando la totalidad de las principales colonias de anidación relevantes dentro de una cuenca oceánica.

Blumenthal *et al.* (2009), realizaron simulaciones de transporte de crías de tortuga carey en la zona del Golfo de México y el Mar Caribe utilizando un modelo de corrientes con características semejantes a las del usado en este trabajo lo que permite comprar las trayectorias de las partículas provenientes de mismas zonas de anidación o cercanas. En lo general, las trayectorias de partículas originarias en el golfo de México, son muy similares, manteniéndose dentro del golfo durante un período, para posteriormente por medio de la Corriente de Lazo dirigirse al Atlántico Norte. En el caso de las partículas provenientes del Mar Caribe, observamos el mismo comportamiento, donde primero se mantienen dentro del Caribe, para posteriormente pasar por el Canal de Yucatán hacia el Golfo de México y por medio de la Corriente de Lazo dirigirse hacia el Atlántico Norte.

A través de los trabajos de simulación se confirma y se obtienen rasgos de mayor precisión sobre la dispersión de crías de las tortugas marinas ocasionada con las corrientes oceánicas como se han descrito en los trabajos de oceanografía física. Sin embargo, también se producen resultados sorprendentes no fácilmente deducibles de los patrones de corrientes. Por ejemplo, las simulaciones del presente trabajo sugieren una ruta de dispersión de crías de tortuga caguama originarias en sus colonias más norteñas en la costa de Brasil hacia el hemisferio norte, mientras que este patrón no fue observado ni para las liberaciones de las colonias del mismo país en sus zonas sureñas, ni las originarias en la costa occidental de África. Por otro lado, ningún patrón de dispersión para partículas liberadas en colonias del hemisferio norte indica derroteros que las lleven al hemisferio sur. Evidentemente, este acarreo hacia el hemisferio norte es causado por la Corriente Sur Ecuatorial del Atlántico al separarse de la Corriente de Brasil que corre por la costa de ese país con dirección hacia el sur. Este resultado es sorprendente toda vez que no se conoce acerca de un intercambio de la especie entre los hemisferios pero sugiere que se debe indagar sobre esta posibilidad usando otras metodologías.

Aprovechando el gran potencial de las simulaciones de este estudio para elucidar las trayectorias de las crías de tortuga marina, se logró abordar varias interrogantes sobre posibles interacciones temporales y espaciales entre stocks de la tortuga caguama en el Océano Atlántico. Por ejemplo, por primera vez se cuenta con una metodología con la cual se puede clarificar analíticamente cuáles colonias utilizan las mismas corrientes marinas, en qué zonas en particular y comparar los tiempos en que residen dentro de ellas. En la mayoría de los casos, la asociación temporal y espacial ocurre a escalas regionales. Por ejemplo, las que provienen del Golfo de México se agrupan con las del golfo, las del Caribe con las del Caribe, y así sucesivamente. Esto es un descubrimiento muy importante, ya que nos permite evaluar el comportamiento de las partículas no solo de forma local (colonia por colonia), sino de forma regional. Podemos evaluar con mayor precisión los impactos que las actividades humanas tienen sobre las poblaciones de tortugas marinas durante diversas etapas de su ciclo de vida, que por la naturaleza de sus dimensiones o susceptibilidad a características ambientales están sujetas a diferentes tipos de presiones

Para ejemplificar lo anterior se realizaron dos evaluaciones de impactos antropogénicos sobre las colonias de tortuga caguama. En el primero se analizó el posible efecto del derrame de petróleo de la plataforma Deep Water Horizon, el cuál abarcó una importante porción del noreste del Golfo de México y potencialmente podría haber impactado a todas las poblaciones de tortugas marinas del Golfo de México y Mar Caribe; sin embargo se desconoce cuáles fueron las colonias impactadas y a qué nivel, porque no existen mecanismos para determinen el número real de tortugas impactadas por estos eventos, solo se cuenta con información muy parcial de las tortugas vivas o muertas detectadas en ese momento. Los derrames petroleros aunque infrecuentes pueden tener consecuencias catastróficas para las tortugas marinas, ya que tienen el potencial de afectar a cientos o miles de individuos provocándoles la muerte de forma más o menos inmediata o a través de impactos de mediano y largo plazo sobre su salud y fisiología (Lutcavage *et al.*, 1995; Milton *et al.*, 2003). Evidentemente, las fases tempranas del ciclo de vida serían las más vulnerables por su tamaño pero también por carecer de capacidades natatorias para desplazarse a zonas fuera de peligro.

Una forma de comenzar a llenar este vacío de información es a través de la utilización de modelos como el desarrollado en esta investigación, lo cual se puede constatar en los resultados de la misma. El impacto de un derrame petrolero aunque puntual, puede ser muy significativo para algunas colonias debido al número de partículas presentes y al tiempo que pasan circulando por la zona afectada. Los resultados del presente estudio indican que en el caso de la colonia de Sarasota (Florida) durante los primeros 6 meses de la simulación, el 100% de las partículas provenientes de esa colonia se mantuvieron dentro de la zona de impacto del derrame del Deep Water Horizon. Se demuestra también cómo el impacto no solo es para las partículas de las colonias cercanas, si no para algunas que se encuentran a miles de kilómetros de distancia, como la colonia de Colombia la cuál llega a tener el 20% de sus partículas dentro del área de influencia. La principal ventaja de este modelo es que, puede utilizarse durante eventos como un derrame petrolero, para predecir escenarios de afectación y de ser posible tomar las medidas de prevención pertinentes.

Para el segundo experimento se comparó la información sobre captura incidental de tortugas marinas por medio de la pesca con palangre en el Atlántico, esto debido a que es una de las actividades humanas que mayor impacto tienen en las poblaciones de tortugas marinas en todo el mundo, este impacto se debe a que la historia de vida de las tortugas marinas, resulta en poblaciones vulnerables a la extinción frente a una intensa presión de pesca de los individuos subadultos y adultos (Lewison *et al.*, 2004), Por lo anterior es importante determinar el grado de impacto sobre estas poblaciones y minimizarlo.

Para lograr esto se han hecho análisis de los reportes de captura incidental de tortugas marinas de las flotas pesqueras alrededor del mundo; sin embargo, estos reportes no tienen la misma calidad y precisión por lo que los resultados varían substancialmente en espacio y tiempo, lo que ha dificultado su análisis y por lo tanto a soluciones que ayuden a su

disminución (Lewison y Crowder, 2007). El presente trabajo aporta una nueva forma de analizar el problema utilizando un método indirecto, enfocándose en el inicio de la etapa nerítica y donde se ubican esas tortugas en el océano. Lewison *et al.* (2004), presenta un mapa con el esfuerzo pesquero en todo el Atlántico con una escala de colores donde los mas oscuros corresponden a donde hay mas esfuerzo, si lo comparamos con los resultados obtenidos en las simulaciones, observamos que en el Atlántico Norte en la zona NCA, es donde mas partículas se acumularon y esta a su vez coincide con la región donde hay una mayor concentración del esfuerzo pesquero. Esto mismo sucede en el Atlántico Sur en la zona SB (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), la cuál presenta la mayor concentración de partículas para las colonias de Brasil y la mayor concentración del esfuerzo pesquero.

Después de comparar los datos de las simulaciones con los resultados de estudios de genética centrados en las zonas de forrajeo y los centrados en las colonias, encontramos que para el primer escenario (simulaciones *vs* zonas de forrajeo), los resultados arrojan porcentajes muy similares entre los dos estudios; sin embargo cuando los revisamos para el segundo escenario (simulaciones *vs* colonias), se puede observar que los valores no tienen ninguna coincidencia.

La explicación para estas diferencias, se encuentran en los factores que los influyen, en el primer escenario son dos factores principalmente los que influyen en la distribución y abundancia de las tortugas en esos lugares 1) las corrientes marinas y 2) el tamaño de la colonia de origen. Como hemos podido comprobar todas las colonias del Hemisferio Norte utilizan el sistema del giro para trasladarse de un lugar a otro, por lo que todas tienen el mismo potencial de alcanzar los mismo lugares, lo que hace la diferencia en este caso es el tamaño de la colonia de origen, mientras mas grande sea la colonia mayor número de tortugas podremos encontrar en las zonas de forrajeo, en este caso la colonia del sur de Florida (SFL) es tan grande que siempre será la dominante, aun cuando tengan la misma probabilidad de arribar a ese lugar que la colonia de Colombia que es una de las mas pequeñas. En el segundo escenario el factor que determina la distribución de las crías son las corrientes marinas, factor que los estudios de genética per sé no pueden tomar en cuenta y de ahí que existan diferencias tan grandes con respecto a las simulaciones, que precisamente están diseñadas para utilizar las corrientes como el medio de distribución de las partículas.

## 10 Conclusiones

El transporte pasivo de crías es una explicación factible de la distribución de juveniles de tortuga caguama en las diferentes áreas de alimentación del Atlántico Nororiental; islas Azores, Madeira y Canarias. Lo anterior se explica porque las corrientes marinas tienen una dirección que facilita la llegada de partículas a esos lugares. La excepción la encontramos en el caso de Andalucía, donde la presencia de crías de tortuga caguama no se explica por medio del transporte pasivo, esto probablemente se deba a que las corrientes en el Atlántico no tienen una dirección que facilite el transporte de partículas hacia esa región. Las partículas provenientes de colonias dentro de la misma región (ejemplo: Golfo de México, Mar Caribe, etc.), poseen edades de llegada a las zonas de forrajeo muy similares, además de compartir el hábitat desde el inicio de su recorrido. Por el contrario partículas de distintas regiones, poseen edades de llegada a las zonas de forrajeo diferentes y no comparten el hábitat durante su recorrido.

Los modelos de dispersión nos aportan una explicación factible de la distribución de crías en los sitios conocidos de alimentación; sin embargo, otra de las funciones igualmente importante que pueden desempeñar estos modelos es predecir donde podrían ubicarse zonas donde las crías podrían estar reuniéndose por efecto de las corrientes (hot spots), permitiendo con esto un ahorro de recursos humanos y materiales en su estudio, enfocándolos en estas zonas para la confirmación de la presencia de tortugas.

El impacto del hombre sobre las poblaciones de tortugas marinas es innegable; sin embargo, evaluar dicho impacto durante el inicio del ciclo de vida de las tortugas una vez que están en el agua, es muy complejo. Las simulaciones numéricas se presentan como una opción para evaluar algunos de estos impactos, ya que nos permiten estudiar el movimiento de las partículas; así como, el tiempo que pasan en la zona de influencia del impacto antropogénico; esto se puede hacer desde una micro-escala (playa de anidación), hasta una macro-escala (cuenca oceánica).

Es importante resaltar que falta mucho por incorporar del comportamiento y la fisiología de las tortugas marinas en estos modelos. Información que en gran medida sigue sin conocerse

o apenas se está comenzando a publicar. Sin embargo, se ha podido mostrar que el uso de esta herramienta, puede aportar gran cantidad de información para un mejor entendimiento de esta etapa del ciclo de vida de las tortugas marinas.

## 11 Trabajos citados

- Bass, A. L., Epperly, S. P., & Braun-Mcneill, J. (2006). Green Turtle (*Chelonia mydas*) Foraging and Nesting Aggregations in the Caribbean and Atlantic: Impact of Currents and Behavior on Dispersal. *Journal of Heredity*, 97(4), 346-354.
- Begon, M., Townsend, C. R., & Harper, J. L. (2006). *Ecology: from individuals to ecosystems* (Cuarta ed.). Oxford, Inglaterra: Blackwell Publishing.
- Bjorndal, K. A. (1982). The Consequences of Herbivory for the Life History Pattern of the Caribbean Green Turtle, *Chelonia Mydas*. En K. A. Bjorndal (Ed.), *Biology and Conservation of Sea Turtles* (págs. 111-116). Washington: Smithsonian Institution Press.
- Bjorndal, K. A., & Jackson, J. B. (2003). Roles of sea turtles in marine ecosystems: Reconstructing the past. En P. L. Lutz, J. A. Musick, & J. Wyneken, *The biology of sea turtles* (Vol. 2, pág. 455). Boca Raton, Florida, USA: CRC Press.
- Bjorndal, K. A., Bolten, A. B., & Martins, H. R. (2000). Somatic growth model of juvenile loggerhead. *Marine Ecology Progress Series*, 202, 265-272.
- Blumenthal, J. M., Abreu Grobois, F. A., Austin, T. J., Broderick, A. C., Bruford, M. W., Coyne, M. S., y otros. (2009). Turtle groups or turtle soup: dispersal patterns of hawksbill turtles in the Caribbean. *Molecular ecology*, 18(23), 4841-4853.
- Bolten, A. B. (2003). Variation in sea turtles life history patterns: neritic vs. oceanic developmental stages. En P. L. Lutz, J. A. Musick, J. Wyneken, P. L. Lutz, J. A. Musick, & J. Wyneken (Edits.), *The biology of sea turtles* (Vol. 2, págs. 243-257). Boca Raton, Florida, USA: CRC Press LLC.
- Bolten, A. B., Martins, H. R., Bjorndal, K. A., & Gordon, J. (1993). Size distribution of pelagic stage loggerhead sea turtles in the waters around the Azores and Madeira. *Arquipélago*, 11(A), 49-54.

Patrones de dispersión de crías de tortuga caguama (*Caretta caretta*), analizados por medio de modelos de corrientes oceánicas para el océano Atlántico, golfo de México y mar Caribe

- Bouchard, S. S., & Bjorndal, K. A. (2000). Sea turtles as biological transporters of nutrients and energy from marine to terrestrial ecosystems. *Ecology*, *81*(8), 2305-2313.
- Bowen, B. W., & Karl, S. A. (2007). Population genetics and phylogeography of sea turtles. *Molecular ecology*, *2007*(16), 4886-4907.
- Bowen, B. W., Abreu Grobois, F. A., Balazs, G. H., Kamezaki, N., Limpus, C. J., & Ferl, R. J. (1995). Trans-Pacific migrations of the loggerhead turtle (*Caretta caretta*) demonstrated with mitochondrial DNA markers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *92*(9), 3731-3734.
- Bowen, B. W., Bass, A. L., Chow, S.-M., Bostrom, M., Bjorndal, K. A., Bolten, A. B., y otros. (2004). Natal homing in juvenile loggerhead turtles (*Caretta caretta*). *Molecular ecology*, *13*(12), 3797-3808.
- Burger, A. E. (1993). Estimating the Mortality of Seabirds Following Oil Spills : Effects of Spill Volume. *Marine Pollution Bulletin*, *26*(3), 140-143.
- Caldwell, D. K., Carr, A., & Ogren, L. H. (1959). The Atlantic loggerhead sea turtle, *Caretta caretta caretta* (L.), in america. *Bulletin of the Florida State Museum*, *4*(10), 293-349.
- Camiñas Hernández, J. A. (2005). *Biología y comportamiento migratorio de la tortuga boba (Caretta caretta Linnaeus, 1758) en el Mediterráneo Occidental*. Universidad Complutense de Madrid, Departamento de Zoología y Antropología Física. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Campbell, L. M. (2003). Contemporary culture, use, and conservation of sea turtles. En P. L. Lutz, J. A. Musick, & J. Wyneken, *The biology of sea turtles* (Vol. 2, pág. 455). Boca Raton, Florida, USA: CRC Press.
- Carr, A. (1952). *Handbook of turtles: the turtles of the United States, Canada, and Baja California*. Ithaca, New York, USA: Cornell University Press.
- Carr, A. (1979). Proceedings of the World Conference on Sea Turtle Conservation. En K. A. Bjorndal (Ed.), *Notes on the Behavioral Ecology of Sea Turtles* (págs. 19-26). Washington D.C.: Smithsonian Institution Press.
- Carr, A. (1986). Rips , FADS , and Little Loggerheads . *Bioscience*, *36*(2), 92-100.
- Ceballos Fonseca, C. (2004). Distribución de playas de anidación ya áreas de alimentación de tortugas marinas y sus amenazas en el caribe colombiano. *Investigaciones Marinas*, *33*(851), 79-100.

Patrones de dispersión de crías de tortuga caguama (*Caretta caretta*), analizados por medio de modelos de corrientes oceánicas para el océano Atlántico, golfo de México y mar Caribe

- Chaloupka, M., Kamezaki, N., & Limpus, C. (2008). Is climate change affecting the population dynamics of the endangered Pacific loggerhead sea turtle? *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 356(1-2), 136-143.
- Chassignet, E. P., Hurlburt, H. E., Smedstad, O. M., Halliwell, G. R., Hogan, P. J., Wallcraft, A. J., y otros. (2007). The HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model) data assimilative system. *Journal of Marine Systems*, 64(1-4), 60-83.
- Collard, S. B., & Ogren, L. H. (1990). Dispersal scenarios for pelagic post-hatchling sea turtles. *Bulletin of Marine Science*, 47(1), 233-243.
- Consortium for Data Assimilative Model. (s.f.). *hycom.org*. Recuperado el 02 de 06 de 2001, de [www.hycom.org](http://www.hycom.org)
- Cramer, J., & Adams, H. M. (1999). Pelagic longline bycatch. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, 49(4), 288-299.
- Ehrhart, L. M. (1982). A review of sea turtle reproduction. En K. A. Bjorndal (Ed.), *Biology and Conservation of Sea Turtles* (págs. 29-38). Washington D.C.: Smithsonian Institution Press.
- Encalada, S. E., Bjorndal, K. A., Bolten, A. B., Zurita, J. C., Schroeder, B., Possardt, E., y otros. (1998). Population structure of loggerhead turtle (*Caretta caretta*) nesting colonies in the Atlantic and Mediterranean as inferred from mitochondrial DNA control region sequences. *Marine Biology*, 130(4), 567-575.
- Francisco Pearce, A. (2001). *Contrasting population structure of the loggerhead (Caretta caretta) using mitochondrial and nuclear DNA markers*. Universidad de Florida. Gainesville: Universidad de Florida.
- Frazier, J. (1980). Exploitation of marine turtles in the Indian Ocean. *Human Ecology*, 8(4), 329-370.
- Godley, B. J., Barbosa, C., Bruford, M., Broderick, A. C., Catry, P., Coyne, M. S., y otros. (2010). Unravelling migratory connectivity in marine turtles using multiple methods. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 47(4), 769-778.
- Google Inc. (17 de 5 de 2011). <http://www.google.com/intl/es/earth/index.html>. Recuperado el 2010-2011
- Grupo de Especialistas en Tortugas Marinas UICN/CSE. (2000). *Técnicas de Investigación y Manejo para la Conservación de las Tortugas Marinas (Traducción al español)*. (K. L. Eckert, K. A. Bjorndal, F. A. Abreu Grobois, M. Donnelly, Edits., R. Briseño Dueñas, F. A. Abreu Grobois, L. Sartí Martínez, A. Barragán Rocha, J. C. Cantú, M.

Patrones de dispersión de crías de tortuga caguama (*Caretta caretta*), analizados por medio de modelos de corrientes oceánicas para el océano Atlántico, golfo de México y mar Caribe

Jiménez, y otros, Trads.) Washington, DC, EUA: SSC/IUCN Marine Turtle Specialist Group.

Hays, G. C. (2000). The implications of variable remigration intervals for the assessment of population size in marine turtles. *Journal of theoretical biology*, 206, 221-227.

Hays, G. C., & Marsh, R. (1997). Estimating the age of juvenile loggerhead sea turtles in the North Atlantic. *Canadian Journal of Zoology*, 75(1), 40-46.

Hays, G. C., Fossette, S., Katselidis, K. A., Mariani, P., & Schofield, G. (2010). Ontogenetic development of migration: Lagrangian drift trajectories suggest a new paradigm for sea turtles. *Journal of the Royal Society, Interface / the Royal Society*, 7(50), 1319-27.

Hendrickson, J. R. (1980). The Ecological Strategies of Sea Turtles. *American Zoology*, 20, 597-608.

Hillestad, H. O., Richardson, J. I., McVea, C., & Watson, J. M. (1982). Worldwide incidental capture of sea turtles. En K. A. Bjorndal (Ed.), *World Conference on Sea Turtle Conservation* (págs. 489-495). Washington: Smithsonian Institution Press.

Jackson, J. C. (1997). Reefs since Columbus. *Coral Reefs*, 16, 23-32.

Kenneth, D. C. (1988). *Synopsis of the biological data on the loggerhead sea turtle *Caretta caretta* (Linnaeus 1758)*. U.S. Fish and Wild Service, National Ecology Research Center. Gainesville, Florida: U.S. Fish and Wild Service.

Kim, H., Kimura, S., Shinoda, A., Kitagawa, T., Sasai, Y., & Sasaki, H. (2007). Effect of El Niño on migration and larval transport of the Japanese eel (*Anguilla japonica*). *ICES Journal of Marine Science*, 64(7), 1387-1395.

King, W. F. (1982). Historical review of the decline of the green turtle and the hawksbill. En K. A. Bjorndal (Ed.), *Biology and Conservation of Sea Turtles* (págs. 183-188). Washington: Smithsonian Institution Press.

Kitagawa, T., Kato, Y., Miller, M. J., Sasai, Y., Sasaki, H., & Kimura, S. (2010). The restricted spawning area and season of Pacific bluefin tuna facilitate use of nursery areas: A modeling approach to larval and juvenile dispersal processes. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 393(1-2), 23-31.

Kot, C. Y., Boustany, A. M., & Halpin, P. N. (2010). Temporal patterns of target catch and sea turtle bycatch in the US Atlantic pelagic longline fishing fleet. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 67(1), 42-57.

- Lewison, R. L., & Crowder, L. B. (2007). Putting longline bycatch of sea turtles into perspective. *Conservation biology : the journal of the Society for Conservation Biology*, 21(1), 79-86.
- Lewison, R. L., Crowder, L. B., Read, A. J., & Freeman, S. A. (2004). Understanding impacts of fisheries bycatch on marine megafauna. *Trends in Ecology & Evolution*, 19(11), 598-604.
- Lohmann, K. J., Witherington, B. E., Lohmann, C. M., & Salmon, M. (1997). Orientation, Navigation, and Natal Beach Homing in Sea Turtles. En P. L. Lutz, J. A. Musick, P. L. Lutz, & J. A. Musick (Edits.), *The Biology of Sea Turtles* (Vol. 1, pág. 432). Boca Raton, Florida, USA: CRC Press LLC.
- Lutcavage, M. E., Lutz, P. L., Bossart, G. D., & Hudson, D. M. (1995). Physiologic and Clinicopathologic Effects of Crude Oil on Loggerhead Sea Turtles. *Archives of environmental contamination and toxicology*, 28(4), 417-422.
- Marcovaldi, M. A., & Guagni dei Marcovaldi, G. (1999). Marine turtles of Brazil: the history and structure of Projeto TAMAR-IBAMA. *Biological Conservation*, 91(1), 35-41.
- McClellan, C. M., & Read, A. J. (2007). Complexity and variation in loggerhead sea turtle. *Biology Letters*, 2007(3), 592-594.
- McClenachan, L., Jackson, J. B., & Newman, M. J. (2006). Conservation implications of historic sea turtle nesting beach loss. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 4(6), 2990-296.
- Meylan, P. A., Meylan, A. B., & Gray, J. A. (2011). The ecology and migrations of sea turtles 8. Test of the developmental habitat hypothesis. *Bulletin of the American Museum of Natural History*, 357, 3-62.
- Miller, J. D. (1997). Reproduction in Sea Turtles. En P. L. Lutz, & J. A. Musick, *The Biology of Sea Turtles* (págs. 51-81). Boca Raton, Florida, USA: CRC Press LLC.
- Milton, S., Lutz, P., & Shigenaka, G. (2003). Oil toxicity and impacts on sea turtles. En G. Shigenaka, *Oil and Sea Turtles: Biology, Planning, and Response* (págs. 35-47). NOAA .
- Moncada Galván, F. (2001). Status and Distribution of the Loggerhead Turtle , *Caretta caretta* , in the Wider Caribbean Region. En K. L. Eckert, & F. A. Abreu Grobois (Ed.), *Proceedings of the Regional Meeting: "Marine Turtle Conservation in the Wider Caribbean Region: A Dialogue for Effective Regional Management* (págs.

Patrones de dispersión de crías de tortuga caguama (*Caretta caretta*), analizados por medio de modelos de corrientes oceánicas para el océano Atlántico, golfo de México y mar Caribe

36-40). WIDECAST, IUCN/SSC/MTSG, WWF, UNEP Caribbean Environment Programme.

Monzón Argüello, C., Rico, C., Carreras, C., Calabuig, P., Marco, A., & López Jurado, L. F. (2009). Variation in spatial distribution of juvenile loggerhead turtles in the eastern Atlantic and western Mediterranean Sea. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 373(2), 79-86.

Motulsky, H. (1995). *Intuitive Biostatistics*. New York: Oxford University Press.

Nichols, W. J., Resendiz, A., Seminoff, J. A., & Resendiz, B. (2000). Transpacific migration of a loggerhead turtle monitored by satellite telemetry. *Bulletin of Marine Science*, 67(3), 937-947.

Polovina, J. J., Balazs, G. H., Howell, E. A., Parker, D. M., Seki, M. P., & Dutton, P. H. (2004). Forage and migration habitat of loggerhead (*Caretta caretta*) and olive ridley (*Lepidochelys olivacea*) sea turtles in the central North Pacific Ocean. *Fisheries Oceanography*, 13(1), 36-51.

Pritchard, P. C., & Mortimer, J. A. (2000). Taxonomía, morfología externa e identificación de las especies. En K. L. Eckert, K. A. Bjorndal, F. A. Abreu Grobois, M. Donnelly, K. L. Eckert, K. A. Bjorndal, F. A. Abreu Grobois, & M. Donnelly (Edits.), *Técnicas de Investigación y Manejo para la Conservación de las Tortugas Marinas* (F. A. Abreu Grobois, L. Sarti Martínez, A. Barragán Rocha, J. C. Cantú, M. Jiménez, & J. Peña, Trads., pág. 270). Washington D.C., Columbia, USA: SSC/IUCN Marine Turtle Specialist Group.

Putman, N. F., Shay, T. J., & Lohmann, K. J. (2010). Is the Geographic Distribution of Nesting in the Kemp's Ridley Turtle Shaped by the Migratory Needs of Offspring? *Is the Geographic Distribution of Nesting in the Kemp's Ridley Turtle Shaped by the Migratory Needs of Offspring?*, 50(3), 305-14.

Putman, N. F., Verley, P., Shay, T. J., & Lohmann, K. J. (2012). Simulating transoceanic migrations of young loggerhead sea turtles: merging magnetic navigation behavior with an ocean circulation model. *Journal of Experimental Biology*, 215(11), 1863-1870.

Reis, E. C., Soares, L. S., Vargas, S. M., Santos, F. R., Young, R. J., Bjorndal, K. A., y otros. (2009). Genetic composition, population structure and phylogeography of the loggerhead sea turtle: colonization hypothesis for the Brazilian rookeries. *Conservation Genetics*, 11(4), 1467-1477.

Patrones de dispersión de crías de tortuga caguama (*Caretta caretta*), analizados por medio de modelos de corrientes oceánicas para el océano Atlántico, golfo de México y mar Caribe

- Ross, J. P. (1982). Historical decline of loggerhead, ridley and leatherback sea turtles. En K. A. Bjorndal (Ed.), *Biology and Conservation of Sea Turtles* (págs. 189-195). Washington: Smithsonian Institution Press.
- Sales, G., Giffoni, B. B., & Barata, P. C. (2008). Incidental catch of sea turtles by the Brazilian pelagic longline fishery. *Journal of the Marine Biological Association of the UK*, 88(4), 853-864.
- Spotila, J. R. (2004). *Sea Turtles*. Baltimore, Maryland, USA: The Johns Hopkins University Press and Oakwood Arts.
- State of the World's Sea Turtles. (2006). *A global glimpse of loggerhead nesting*. Arlington VA: State of the World's Sea Turtles.
- The Turtle Expert Working Group. (2009). *AN ASSESSMENT OF THE LOGGERHEAD TURTLE POPULATION IN THE WESTERN NORTH ATLANTIC OCEAN*. NOAA. Springfield, Virginia: National Technical Information Service.
- Timm, N. H. (2002). *Applied Multivariate Analysis*. New York, USA: Springer-Verlag.
- Troëng, S., Evans, D. R., Harrison, E., & Lagueux, C. J. (2005). Migration of green turtles *Chelonia mydas* from Tortuguero, Costa Rica. *Marine Biology*, 148(2), 435-447.
- Tucker, A. D. (2010). Nest site fidelity and clutch frequency of loggerhead turtles are better elucidated by satellite telemetry than by nocturnal tagging efforts: Implications for stock estimation. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 383(1), 48-55.
- Varo Cruz, N. (2010). *Biología reproductora de la tortuga boba (Caretta caretta, Linneo, 1758), en la isla de Boavista, Archipiélago de Cabo Verde*. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Biología. Las Palmas de Gran Canaria: Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- Witherington, B. E. (2002). Ecology of neonate loggerhead turtles inhabiting lines of downwelling near a Gulf Stream front. *Marine Biology*, 140(4), 843-853.
- Witt, M. J., Hawes, L. A., Godfrey, M. H., Godley, B. J., & Broderick, A. C. (2010). Predicting the impacts of climate change on a globally distributed species: the case of the loggerhead turtle. *The Journal of experimental biology*, 213(6), 901-911.
- Zenimoto, K., Kitagawa, T., Miyazaki, S., Sasai, Y., Sasaki, H., & Kimura, S. (2009). The effects of seasonal and interannual variability of oceanic structure in the western Pacific North Equatorial Current on larval transport of the Japanese eel *Anguilla japonica*. *Journal of Fish Biology*, 74(9), 1878-1890.

Patrones de dispersión de crías de tortuga caguama (*Caretta caretta*), analizados por medio de modelos de corrientes oceánicas para el océano Atlántico, golfo de México y mar Caribe

Zug, G. R. (1995). Growth in juvenile loggerhead sea turtles in the North Pacific pelagic habitat. *Copeia*, 1995(2), 485-487.

Zug, G. R., Vitt, L. J., & Caldwell, J. P. (2001). *Herpetology: An introductory Biology of Amphibians and Reptiles* (2 ed.). San Diego, California, USA: Academic Press.