



UNIVERSIDAD VERACRUZANA

---

INSTITUTO DE CIENCIAS MARINAS Y PESQUERÍAS

MAESTRÍA EN ECOLOGÍA Y PESQUERÍAS

**Distribución y preferencias oceanográficas del atún aleta azul  
*Thunnus thynnus* (Linnaeus, 1758) en el Golfo de México**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

**Maestro en Ecología y Pesquerías**

PRESENTA:

**Lic. Alberto Abad Uribarren**



UNIVERSIDAD VERACRUZANA

INSTITUTO DE CIENCIAS MARINAS Y PESQUERÍAS

MAESTRÍA EN ECOLOGÍA Y PESQUERÍAS

**Distribución y preferencias oceanográficas del atún aleta azul  
*Thunnus thynnus* (Linnaeus, 1758) en el Golfo de México**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

**Maestro en Ecología y Pesquerías**

PRESENTA:

**Lic. Alberto Abad Uribarren**

COMITÉ TUTORAL:

Dr. Cesar Meiners Mandujano (Director)

*Tutores*

Dr. Javier Bello Pineda

Dr. Mark Marín Hernández

Dr. Sergio Cerdeira Estrada

M. Karina Ramírez López



**Universidad Veracruzana**

**Instituto de Ciencias Marinas y Pesquerías  
Coordinación del Posgrado en Ecología y Pesquerías**

**C. ALBERTO ABAD URIBARREN  
ESTUDIANTE DE LA MAESTRÍA EN ECOLOGÍA Y PESQUERÍAS  
UNIVERSIDAD VERACRUZANA  
P R E S E N T E**

Habiendo sido debidamente revisado y aceptado el trabajo escrito de su tesis denominada "Distribución y preferencias oceanográficas del atún aleta azul en el Golfo de México" por los integrantes de su comité tutorial y estando todos ellos de acuerdo que tanto el contenido como el formato de este trabajo es satisfactorio como prueba escrita para sustentar su examen final de posgrado de la MAESTRIA EN ECOLOGÍA Y PESQUERÍAS se le autoriza a usted proceda a su impresión.

Sin otro particular, me es grato reiterarle la seguridad de mi más distinguida consideración.

ATENTAMENTE

"LIS DE VERACRUZ: ARTE, CIENCIA, LUZ"

Boca del Río, Ver. Junio 15 del 2011



INSTITUTO DE CIENCIAS MARINAS  
Y PESQUERÍAS  
Hidalgo 617 Col. Río Jamapa  
C. P. 94296  
Boca del Río, Ver.

**Dr. Virgilio Arenas Fuentes**  
Director

Calle  
Independencia  
No. 30  
Pisos 1 y 2  
Colonia Centro  
CP 94290  
Boca del Río,  
Veracruz,  
México  
  
Teléfono  
(229) 202 28 28

**A Gatusso**

## AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer especialmente a mi comité de tesis, Dr. Cesar Meiners, Dr. Javier Bello, Dr. Mark Marín, Maestra Karina Ramírez, y Dr. Sergio Cerdeira, por ofrecerme esta oportunidad de aprendizaje. A través de este proyecto he recibido de todos no solo el conocimiento necesario, sino también el apoyo, y sobre todo la paciencia para llevar a buen puerto esta tesis.

Especial agradecimiento al Programa Nacional de Observadores (FIDEMAR) y al Instituto Nacional de Pesca (INAPESCA) a través del Programa Atún-Golfo de México, por permitirme el acceso a tan valiosa información.

Estoy en deuda también con los colegas del Large Pelagic Lab de la Universidad de New Hampshire, en especial a la Dr. Molly Lutcavage , M. en C. Ben Galuardi y M. en C. Gilad Heinish.

Agradezco también a todo el personal docente y administrativo del Instituto de Ciencia marinas y Pesquerías de la Universidad Veracruzana, en especial al Dr. José Ake por sus valiosos consejos estadísticos, y al Dr. Alejandro Granados por su apoyo en los momentos que más lo he necesitado.

Por último, agradezco a la Agencia Española de la Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) por la concesión de la beca que permitió financiar estos estudios.

## RESUMEN

El atún aleta azul del Atlántico (AAZ) ha sido objeto de una intensa sobrepesca en las últimas décadas debido a su alto valor comercial, que ha ocasionado una drástica disminución del tamaño de sus stocks. En el Golfo de México, una de sus principales áreas de reproducción, esta especie es capturada incidentalmente por la flota palangrera mexicana que dirige su esfuerzo sobre el atún aleta amarilla. A la fecha no existen antecedentes acerca de las condicionantes de la ocurrencia del AAZ en aguas mexicanas del Golfo de México. El objeto principal de este trabajo consistió en relacionar datos derivados de la pesca con parámetros oceanográficos de sensores remotos satelitales, con el fin de elucidar la posible influencia de estos en la distribución espacio-temporal del AAZ en aguas mexicanas del Golfo de México. Se analizaron y relacionaron datos de capturas de 1994 a 2007 (579 individuos) y series temporales de imágenes satelitales con datos de temperatura superficial del mar (TSM) del sensor AVHRR/NOAA (1994-2007) y concentración de clorofila *a* (Chl-*a*) del SeaWiFS/Orb View-2 (1998-2007), así como datos batimétricos del proyecto ETOPO 2v2. La captura de AAZ, compuesta en su mayoría por individuos adultos, se produjo principalmente en la primera mitad del año, periodo durante el cual se apreció una relación inversa significativa ( $r^2=0.72$ ;  $g.l=9$ ;  $p<0.005$ ) entre la evolución de la TSM y la variación de individuos capturados. La distribución de las capturas de AAZ mostró una correlación positiva significativa ( $r^2=0.79$ ;  $g.l=2$ ;  $p<0.005$ ) con la dinámica de la Chl-*a*, con un desfase de tres meses entre el pico productivo y el máximo estacional de capturas. El AAZ exhibió una preferencia por aguas oceánicas con bajas concentraciones de clorofila *a* ( $0.1-0.25 \text{ mg m}^{-3}$ ) y con una TSM moderada ( $23-26 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Estos resultados indican que la distribución del AAZ en aguas mexicanas del Golfo de México está fuertemente condicionada por la dinámica térmica de la cuenca y dadas las coincidencias con lo descrito por otros autores para áreas de puesta, es muy probable que el AAZ utilice aguas mexicanas para reproducirse, principalmente entre los meses de febrero y abril.

**Palabras clave:** Atún aleta azul, Golfo de México, percepción remota

## ABSTRACT

During last decades, Atlantic bluefin tuna (BFT) has suffered an intense overfishing due to its high commercial value. This overfishing has caused a dramatical decline of its stocks. In the Gulf of Mexico, their primary spawning ground in the Western Atlantic, this species is incidentally fished by the Mexican longline fleet (targeted primary yellowfin tuna). So far, there is no historical information about the conditions which cause the presence of the BFT in the Mexican waters of the Gulf of Mexico. The main goal of this work was to couple BFT catch data from pelagic longline fisheries with oceanographic parameters derived from satellite remote sensing, in order to elucidate the potential influence of these elements on time-space distribution of BFT in Mexican waters. BFT catch data from 1994 to 2007 (579 individuals) was analyzed and related with time series of satellite images of sea surface temperature data (SST), obtained from the AVHRR/NOAA sensor (1994-2007), and chlorophyll *a* concentration (Chl-*a*) from the SeaWiFS/Orb View-2 (1998-2007), as well as bathymetric data from the project ETOPO 2v2. BFT catches, mainly composed of adult fish, has been carried out during the first half of the year. A significant inverse correlation ( $r^2=0.72$ ;  $g.l=9$ ;  $p<0.005$ ) between SST evolution and catches variation was observed in this period. Catch distribution of BFT showed a significant positive correlation ( $r^2=0.79$ ;  $g.l=2$ ;  $p<0.005$ ) with the dynamics of Chl-*a*, with time-lag of three months between the productive peak and the maximum of seasonal catch. BFT showed preference for oceanic waters with low concentrations of chlorophyll ( $0.1-0.25 \text{ mg m}^{-3}$ ) and moderate SST ( $23-26^\circ\text{C}$ ). These results indicate that distribution of BFT in Mexican waters is strongly conditioned by the basin thermal dynamics. Given the coincidences with findings of some other authors for spawning areas, it is quite likely that this fish uses Mexican waters to reproduce, mainly between February and April.

**Key words:** Bluefin tuna, Gulf of Mexico, remote sensing

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ANTECEDENTES .....	5
3. ÁREA DE ESTUDIO .....	10
3.1. Climatología .....	11
3.2. Principales características oceanográficas .....	12
4. OBJETIVO GENERAL .....	15
4.1. Objetivos particulares .....	15
5. MATERIAL Y METODOS .....	16
5.1. Datos .....	17
5.1.1. Datos pesqueros .....	17
5.1.2. Datos oceanográficos .....	18
5.2. Análisis .....	19
5.2.1. Análisis exploratorio de los datos .....	19
5.2.2. Distribución espacio-temporal de las capturas .....	19
5.2.3. Análisis de series de tiempo .....	20
5.2.4. Preferencias oceanográficas .....	21
6. RESULTADOS .....	23
6.1. Atributos poblacionales .....	23
6.2. Distribución temporal de las capturas .....	24
6.3. Distribución espacial de las capturas .....	29
6.4. Influencia de la dinámica oceanográfica en la distribución temporal de las capturas .....	35
6.5. Preferencias oceanográficas .....	40



7. DISCUSIÓN .....	49
8. CONCLUSIONES .....	59
9. LITERATURA CITADA .....	60
10. ANEXO I.....	70
11. ANEXO II.....	84

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Información relativa a cada individuo de atún aleta azul capturado incidentalmente por la flota mexicana palangrera que opera en el Golfo de México .....	17
Tabla 2. Características principales de los datos oceanográficos empleados .....	19
Tabla 3. Captura incidental de AAZ (número de individuos) por la flota mexicana palangrera en el Golfo de México con observadores del PNAAPD de 1994 a 2007.....	25
Tabla 4. Promedio mensual de la TSM estimada por percepción remota, asociada a los puntos de captura de atún aleta azul en el Golfo de México. Para cada columna los subíndices indican grupos estadísticamente similares (Tukey).....	45

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1. Zona Económica Exclusiva mexicana del Golfo de México y Mar Caribe. En gris claro se muestran los estados costeros (en orden descendente Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo). Los puntos rojos representan los principales puertos de la flota atunera mexicana ..... 10
- Figura 2. Perfil batimétrico de la cuenca del Golfo de México en metros. La línea roja indica la isobata de 200m, la cual marca el límite de la plataforma continental..... 11
- Figura 3. Composición mensual de TSM del sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) correspondiente al mes de febrero de 1998, en la que se puede observar el desprendimiento de un giro anticiclónico de la Corriente de Lazo y un viejo giro hacia el oeste. También se aprecian una serie de giros ciclónicos frontales a lo largo de los bordes exteriores de la Corriente de Lazo y de los dos grandes giros anticiclónicos..... 13
- Figura 4. Esquema simplificado de la aproximación metodológica empleada. ACP acrónimo de Análisis de Componentes Principales. BAT acrónimo de Batimetría..... 16
- Figura 5. Buffer (circulo negro) y puntos de muestreo (puntos azules) entorno a la posición final de la maniobra de pesca, sobre una imagen de temperatura superficial del mar AVHRR correspondiente al mes de enero de 1996. .... 22
- Figura 6. Distribución de tallas de la captura total (a) y de la captura diferenciada por sexos (b; machos = gris, hembras = rojo) de AAZ de la flota palangrera mexicana en el Golfo de México durante el periodo 1994-2007. .... 23
- Figura 7. Diagrama de caja (mediana, primer y tercer cuartil, mínimo y máximo) de la captura de AAZ en número de individuos acumulada por mes para el periodo 1994-2007. .... 24
- Figura 8. Evolución de la captura acumulada anual (promedio  $\pm$  Error Estándar) de AAZ por la flota palangrera mexicana del Golfo de México de 1994 a 2007. Las líneas horizontales continuas representan el valor promedio de captura para ese intervalo de tiempo (años), las discontinuas la desviación estándar..... 25
- Figura 9. Captura mensual en número de individuos de AAZ realizada por la flota palangrera mexicana en aguas mexicanas del Golfo de México en el periodo enero 1994-diciembre 2007. Las líneas punteadas señalan los meses enero de cada año..... 26
- Figura 10. Densidades espectrales de la serie de tiempo de captura de hembras (línea roja) y de machos (línea negra) ..... 27

Figura 11. Captura mensual en número de individuos) de AAZ en el Golfo de México en el periodo 1994-2007 diferenciada por sexo. Línea roja representa captura de hembras, negra machos. ....	28
Figura 12. Captura mensual (número de individuos) de AAZ en el Golfo de México 1994-2007 diferenciada por talla. Línea roja representa captura de juveniles (<200 cm. LF), negra adultos (>200 cm. LF). ....	28
Figura 13. Distribución espacial de las capturas de AAZ (n=579) realizadas por la flota comercial palangrera mexicana en el periodo 1994-2007 en la Zona Económica Exclusiva mexicana (ZEE) en el Golfo de México a) posición geográfica (longitud-latitud) de final de la maniobra de cobrado del arte de lances con captura positiva para AAZ; la línea gris indica el límite de la ZEE y b) número de individuos capturados por cuadrante de 1° x 1°; la línea gris representa la isobata de 200 m. ....	30
Figura 14. Distribución espacial de la captura incidental de atún aleta azul realizada por la flota comercial mexicana en el Golfo de México durante el periodo 1994-2007 acumulada por mes como número de lances con captura positiva por cuadrante de 1° x 1°. ....	32
Figura 15. Distribución espacial de la captura incidental anual de atún aleta azul realizada por la flota comercial palangrera mexicana en el Golfo de México. Ejemplo para los años 2000 (izquierda) y 2003 (derecha).....	33
Figura 16. Distribución espacial de la captura incidental de atún aleta azul realizada por la flota comercial palangrera mexicana en el Golfo de México entre 1994 y 2007 diferenciada por sexo a) hembras, b) machos.....	33
Figura 17. . Distribución espacial de la captura incidental de atún aleta azul realizada por la flota comercial mexicana en el Golfo de México entre 1994 y 2007 diferenciada por talla a) individuos por encima de los 200 cm y b) individuos por debajo de los 200 cm. ....	34
Figura 18. Primeras dos componentes principales de la serie de tiempo de capturas (1994-2007). La primera componente (CAPCP1) explico 37.4% de la variabilidad total de la serie de tiempo, la segunda (CAPCP2) el 19%.....	35
Figura 19. Captura mensual de AAZ para el periodo 1994-2007. Distribución temporal de las capturas (línea roja) y componente principal cíclica (estacional) de la serie de capturas mensuales (CAPCP1) (línea negra) .....	36
Figura 20. Valores medios mensuales de temperatura superficial del mar (TSM) (rojo) y valores de la componente principal cíclica (estacional) de la serie de capturas mensuales de atún	

aleta azul (CAPCP1) (negro) en el Golfo de México (30.5°N, 98°O, 18°O, 18°N) entre 1994-2007.....	37
Figura 21. Polígono rectangular (línea negra) que contiene el 95% de las posiciones geográficas de captura de AAZ (marcas amarillas) en aguas mexicanas del Golfo de México entre 1994-2007.....	37
Figura 22. Series de tiempo de concentración media mensual de Chl-a (Octubre 1997-Diciembre 2007) para toda la cuenca del Golfo de México (línea negra) y para un polígono en el que se realizaron el 95% de las capturas de AAZ, evitando al máximo área costera. ....	38
Figura 23. Primeras dos componentes principales de la serie de tiempo Chl-a (1994-2007).La primera componente (ChlaCP1) explico el 71.5 % de la variabilidad total de la serie de tiempo, la segunda (ChlaCP2) el 7.1% .....	38
Figura 24. Variabilidad de la componente principal uno de la concentración de Chl-a (color rojo) y valores de la componente principal cíclica (estacional) de la serie de capturas mensuales de atún aleta azul (CAPCP1) (negro) en el Golfo de México (30.5°N, 98°O, 18°O, 18°N) entre 1994.....	39
Figura 25. Evolución temporal de las anomalías del promedio de TSM (°C) para la cuenca del Golfo de México (línea) y anomalías de las capturas de atún aleta azul ( $\pm$ DE) de la flota palangrera mexicana (1994-2007).....	40
Figura 26. Composiciones mensuales de TSM (°C) correspondientes a los meses de enero a junio del 2005, derivadas del sensor AVHRR y posiciones de lances con captura positiva de atún aleta azul (puntos azules). ....	41
Figura 27. Distribución de las capturas de atún aleta azul en aguas mexicanas del Golfo de México (1994-2007) por clases de TSM (1°C). ....	42
Figura 28. Variabilidad de la TSM promedio asociada a las localizaciones de captura de atún aleta azul (desde ahora también denominada TSM preferencial) (círculos rojos) y la TSM promedio de la cuenca.....	43
Figura 29. Variación intermensual del promedio de TSM preferencial (media $\pm$ desviación estándar) línea continua, y captura total acumulada por mes en número de individuos línea discontinua. ....	44
Figura 30. Composiciones mensuales de concentración de clorofila a (mg m <sup>-3</sup> ) del sensor SeaWiFS y posiciones de lances con captura positiva de atún aleta azul (puntos rojos) para el periodo enero-junio de 2005.....	46

Figura 31. Distribución de las capturas de AAZ por clases de concentración de clorofila a (0.1 mg m-3) en el Golfo de México (1994-2007). .....	47
Figura 32. Variabilidad del promedio mensual de la Chl-a en los puntos de captura (círculos rojos) y del promedio de Chl-a para el polígono definido el apartado series temporales de este trabajo.....	48
Figura 33. Distribución de las capturas de atún aleta azul por clases de perfil batimétrico (200 m) en aguas mexicanas del Golfo de México (1994-2007). .....	48
Figura 34. Distribución de las posiciones de captura incidental atún aleta azul por la flota palangrera mexicana que faeno en la ZEE mexicana del Golfo de México de 1994 a 2007.....	49
Figura 35. Posiciones observadas de AAZ en el Golfo de México por cuadrantes de 1° x 1° a) posiciones de captura incidental por la flota palangrera mexicana (1994-2007) y b) posiciones combinadas de marcas satelitales (1999-2004) y captura incidental por la flota palangrera norteamericana (1992 -2004) extraído de Block (2005). .....	55

## 1. INTRODUCCIÓN

El atún aleta azul o atún rojo del Atlántico *Thunnus thynnus* (Linnaeus, 1758) ha fascinado a filósofos, pescadores y científicos desde hace miles de años debido a sus impresionantes características biológicas y su capacidad migratoria (Fromentin y Powers, 2005). Los atunes aleta azul (AAZ) son peces de gran tamaño que pueden llegar a medir más de 300 cm de longitud furcal y pesar 680 kg, son poderosos nadadores y poseen una capacidad endotérmica muy desarrollada (Magnuson *et al.*, 1994).

El AAZ habita en ecosistemas pelágicos de todo el Atlántico Norte, incluyendo el Golfo de México y el mar Mediterráneo (Mather *et al.*, 1995). Se trata de una especie altamente migratoria, que realiza extensas y rápidas migraciones entre áreas de alimentación, en aguas frías subpolares, y alejadas áreas de reproducción en aguas cálidas subtropicales (Mather *et al.*, 1995; Block *et al.*, 2005; Teo *et al.*, 2007a). Existen dos áreas y periodos principales plenamente reconocidos de desove del AAZ, el Golfo de México de Abril a Junio en el Atlántico occidental (Baglin, 1982) y el Mar Mediterráneo de Junio a Agosto en la parte oriental (Magnuson *et al.*, 1994; Mather *et al.*, 1995; Schaefer 2001); adicionalmente, algunos de los AAZ del oeste realizan la puesta en el Estrecho de Florida y Bahamas (Baglin, 1982; Block *et al.*, 2001).

Debido a la localización diferenciada de sus zonas de puesta, la Comisión Internacional para la Conservación del Atún Atlántico (ICCAT en sus siglas en ingles, <http://www.iccat.es>) administra el manejo de la pesquería de AAZ del Atlántico como dos stocks diferentes, este y oeste, separados por el meridiano 45°O (Fromentin y Powers, 2005). Sin embargo, estudios recientes indican aun cuando los stocks estén diferenciados durante los periodos reproductivos, exhiban comportamiento hogareño y fidelidad al lugar de puesta, ambos stocks se mezclan a través de los 45°O en áreas de alimentación comunes (Lutcavage *et al.*, 1999; Block *et al.*, 2005).

La pesca de AAZ ha sido histórica y culturalmente relevante para muchos pueblos del Mar Mediterráneo, donde ha sido explotado continua y significativamente por miles de años (Mather *et al.*, 1995; Fromentin y Powers, 2005). En años recientes, especialmente a partir del desarrollo del mercado de sushi-sashimi en Japón en la década de 1980, su pesca

se ha convertido en una actividad altamente rentable; situándose como uno de los recursos pesqueros más valiosos globalmente, alcanzando precios muy altos, sobre todo en el mercado japonés, donde un único ejemplar de AAZ del Pacífico (*Thunnus orientalis*) se vendió en 175,000 dólares americanos en Tokio (BBC, 2010). Como consecuencia de su aprecio, el AAZ se encuentra sometido a una intensa presión pesquera, resultando en una severa sobrepesca y un rápido descenso en su abundancia (ICCAT, 2007). La biomasa de reproductores de AAZ del stock oeste se ha reducido en 80% desde 1970, ello a pesar de que se desarrollara un plan de recuperación a 20 años a principios de la década de 1980 (Magnuson, 1994), evaluaciones recientes indican que el stock oeste continúa reduciéndose (ICCAT, 2007).

Entre los factores potenciales que contribuyen a la reducción del stock oeste, destacan la mortalidad por pesca de reproductores en pesquerías del Atlántico central de la unidad de manejo del este (Block *et al.*, 2005) y la captura incidental de reproductores en las pesquerías de palangre de superficie en el Golfo de México, cuya especie objetivo es el atún aleta amarilla (Teo y Block, 2010). El Golfo de México ha estado cerrado a la pesca dirigida sobre AAZ desde principios de la década de los 80 (Mather, 1995), sin embargo, datos de diversas fuentes indican que la captura incidental de AAZ en aguas norteamericanas del Golfo de México durante la temporada reproductiva es sustancial (Block *et al.*, 2005, Teo y Block, 2010). En aguas mexicanas la información disponible sobre captura incidental de AAZ es reducida y contradictoria (ver Noguez-Fuentes *et al.*, 2007; Base de datos ICCAT, <http://www.iccat.es/es/accesingdb.htm>).

Los esfuerzos de manejo realizados para reconstruir el stock del oeste y reducir la sobrepesca del stock este han tenido poco impacto, a grado tal que recientemente se propuso la inclusión del AAZ en el apéndice 1 del listado de la Convención sobre Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Flora y Fauna Salvajes (CITES en sus siglas en inglés) (Galuardi *et al.*, 2010). A pesar de que varios estudios han descrito el efecto de la variabilidad ambiental en la distribución espacial y dinámica poblacional del AAZ y otros atunes (p. ej. Lutcavage *et al.*, 1999; Royer *et al.*, 2004; Block *et al.*, 2005), los procedimientos empleados en ICCAT para realizar las evaluaciones de stock no consideran información sobre la variabilidad ambiental.



Dentro del Enfoque Ecosistémico del Manejo de Pesquerías (EEMP) se reconoce la necesidad de conservar la complejidad, estructura y función de los ecosistemas marinos, así como asegurar la sustentabilidad de las pesquerías y las comunidades humanas que mantienen (García *et al.*, 2003). Un objetivo principal del EEMP es expandir la consideración de la dinámica poblacional de peces a sus hábitats marinos (Cury *et al.*, 2008), mediante el entendimiento de los determinantes de los cambios en la abundancia y la distribución espacial de los stocks pesqueros explotados, discriminando los efectos pesqueros del forzamiento ambiental, para eventualmente implementar sistemas de manejo más efectivos (García *et al.*, 2003; Cury *et al.*, 2008).

Para contrarrestar la destrucción del hábitat, la mortalidad incidental de especies no objetivo y los cambios en la estructura y funcionalidad de los ecosistemas inducidos por la pesca (Link, 2002), bajo el EEMP se propone el aumento de la selectividad, ya sea sobre especies, stocks, tamaños, sexos, estación y/o espacio (Zhou *et al.*, 2010). El manejo espacio-temporal del esfuerzo pesquero en el Golfo de México podría reducir sustancialmente la captura incidental de AAZ (Hobday y Hartmann 2006; Teo *et al.*, 2010). Para ello es necesario conocer detalladamente la distribución de la especie objetivo y su captura incidental, y las condiciones ambientales que determinan dicha distribución (Teo y Block, 2010).

La comprensión de la estructura y diversidad del hábitat (zonas de puesta, áreas de alimentación, rutas migratorias) así como los patrones espaciales y temporales de distribución en relación con el ambiente oceánico, constituye la base para la conservación y manejo futuro de estos valiosos recursos (Block *et al.*, 2003). En este trabajo se conjuntaron datos pesqueros y datos oceanográficos con el propósito de determinar la influencia de las condiciones ambientales en la distribución del AAZ en aguas mexicanas del Golfo de México.

Las limitaciones experimentadas en estudios de oceanografía pesquera en décadas anteriores, para combinar datos pesqueros e información ambiental a través de escalas temporales y espaciales, han sido superadas gracias al desarrollo y perfeccionamiento de la percepción remota y los sistemas de información geográfica (Chen *et al.*, 2005). Debido a su cobertura global, la información procedente de la percepción remota satelital es una

herramienta eficiente para caracterizar ambientalmente amplias áreas del océano. Los sensores satelitales ofrecen información de temperatura superficial del mar (TSM), color oceánico (CO), entre otras, con una resolución espacial y temporal fina comparada con la información *in situ*.

Los datos oceanográficos derivados de satélite son utilizados en una gran variedad de formas en la investigación de ecosistemas oceanográficos (Lauri y Polovina, 2000). Un enfoque muy común es el relacionado con la construcción de mapas para identificar estructuras oceanográficas de mesoescala como frentes y giros, para elucidar las relaciones entre organismos marinos explotados y su hábitat. Debido a que actualmente se cuenta con series de tiempo de tales variables de más de diez años, pueden ser usadas para investigar la dinámica temporal del océano que pueden impactar directa o indirectamente en los ecosistemas marinos (Polovina y Howell, 2005). Por su parte, los sistemas de información geográfica son considerados como una poderosa herramienta para obtener, recopilar, analizar, sintetizar y relacionar grandes grupos de datos espaciales de distintas fuentes (Riolo, 2006).

Los resultados de este estudio mejoraran nuestra comprensión acerca del hábitat oceanográfico utilizado por el AAZ en aguas mexicanas del Golfo de México y cómo las condiciones ambientales afectan su distribución espacio-temporal. Así mismo, proporcionarán elementos de referencia para la construcción de un marco para el manejo y conservación de este recurso en el futuro.

## 2. ANTECEDENTES

La influencia de factores ambientales sobre la distribución de túnidos ha sido ampliamente estudiada. A partir de la década de los 50 varios trabajos destacaron la influencia que determinadas variables oceanográficas, principalmente la temperatura superficial del mar, ejercían en la distribución de diferentes especies de túnidos, tales como el atún aleta amarilla *Thunnus albacares* (Blackburn, 1969), patudo *Thunnus obesus* (Hanamoto, 1987) y la albacora *Thunnus alalunga* (Owen, 1969). Estos estudios conjuntaron datos pesqueros, tanto de origen comercial como de cruceros científicos, con medidas *in situ* las variables oceanográficas.

El uso de datos procedentes de percepción remota satelital (PRS) para la caracterización de hábitats marinos, y en especial las relaciones entre la distribución de especies con variables oceanográficas, comenzó en los inicios de la década de los 60, con el advenimiento de sensores satelitales capaces de medir la temperatura y el color del agua. Inicialmente estos datos se utilizaron casi exclusivamente en asistir a la actividad pesquera (Chassot, 2011), debido a su potencial para detectar condiciones oceanográficas óptimas para la presencia de especies de pelágicos mayores, especialmente atunes (Uda, 1973; Laurs y Lynn, 1977; Fiedler y Bernard, 1987; Stretta, 1991). Sin embargo, el colapso de algunas pesquerías y el reconocimiento de la sobrepesca como una problemática global, provocó que la investigación pesquera aplicada se moviera progresivamente hacia temas ecológicos y de conservación (Chassot, 2011).

Paralelamente se desarrollaron nuevas técnicas para caracterizar la distribución y los movimientos de diferentes especies pelágicas, con el fin obtener datos independientes de la pesca. Desde entonces, numerosos trabajos han utilizado telemetría acústica (Cayré, 1991; Block *et al.*, 1997; Lutcavage *et al.*, 2000), marcas de archivo (Royer *et al.*, 2005; Schaefer, 2007), marcas satelitales de archivo pop-up (PSATs en sus siglas en ingles) (Lutcavage *et al.*, 1999; Weng *et al.*, 2009) y censos aéreos (Royer *et al.*, 2004, Shick *et al.*, 2004), para relacionar la distribución de diferentes especies de túnidos con su medio ambiente.

Estas nuevas técnicas significaron un gran avance en el estudio de la distribución y movimiento de los túnidos, sin embargo, también poseen limitaciones importantes. Por ejemplo, la telemetría acústica provee datos muy precisos de sus movimientos (Block *et al.*, 1997, Brill *et al.*, 1999), sin embargo precisa de una plataforma de seguimiento, lo cual reduce sustancialmente los tiempos de muestreo. Las marcas de archivo registran series de tiempo más largas de la posición del pez, la temperatura ambiental e incluso algunas de la temperatura corporal (Block *et al.*, 1998; Teo *et al.*, 2007a), pero debido a la estimación indirecta de la posición geográfica, la magnitud del error es importante (Teo *et al.*, 2004). Además, un problema común de todos los experimentos con marcas electrónicas lo constituye el alto costo y el reducido tamaño de la muestra (Kirby, 2001).

Por lo anteriormente expuesto y pese al sesgo de origen, las series de datos pesqueros de larga duración combinadas con datos oceanográficos de PRS, han demostrado ser una herramienta robusta para comprender el efecto que la variabilidad ambiental ejerce en la distribución de especies pelágicas en escalas temporales no accesibles mediante cualquier otra técnica (p. ej. Maury *et al.*, 2001; Zaglia *et al.*, 2004; Santos *et al.*, 2006; Bridges *et al.*, 2009).

La Temperatura Superficial del Mar (TSM) y la Concentración de Clorofila a (Chl-a) son las dos variables ambientales estimadas por PRS más empleadas en la descripción y comprensión de los hábitats pelágicos de numerosas especies marinas, principalmente para elucidar el condicionamiento ambiental de su distribución. Estas variables son ampliamente utilizadas como descriptores de estructuras oceanográficas y de condiciones específicas para la realización un determinado proceso ecológico (Laurs y Polovina, 2000). Los datos de TSM provenientes de PRS aportan valiosa información para la detección de estructuras de mesoescala, incluyendo frentes y giros, así como para caracterizar hábitats en términos de preferencias térmicas (Laurs y Polovina, 2000). Varios estudios han utilizado la TSM para estudiar la relación entre grandes pelágicos y frentes oceánicos (p. ej. Podesta *et al.*, 1993; Shick y Lutcavage 2004) e intervalos térmicos preferenciales (p. ej. Brill *et al.*, 1999; Teo *et al.*, 2007b).

Tanto la alimentación como la reproducción de los atunes están fuertemente influenciadas por la temperatura del mar (Mather *et al.*, 1995). Esta influencia es muy

evidente en el desove, el cual se produce generalmente por encima de los 24°C (Mather *et al.*, 1995; Schaefer, 2001). Por ello, la variabilidad térmica puede afectar la distribución espacio-temporal de las especies de atunes en general, y del AAZ en particular (Bridges *et al.*, 2009).

La concentración superficial de Chl-a derivada de medidas satelitales de color del océano, constituye un indicador de la biomasa fitoplanctónica y de la producción primaria (Longhurst *et al.*, 1995). Esta información es útil para delimitar masas de agua e identificar afloramientos asociadas a la circulación de mesoescala. Al igual que con la TSM, los intervalos de Chl-a en los que ocurre una especie, pueden ayudar a caracterizar su hábitat (Polovina *et al.*, 2000). Por ejemplo, Royer *et al.* (2004) usaron datos de Chl-a para definir frentes productivos y relacionarlos con la distribución de juveniles de AAZ en el Mediterráneo, en tanto que Teo *et al.* (2007b) utilizaron datos de Chl-a y otras variables, para definir las preferencias oceanográficas del AAZ en el Golfo de México.

La distribución de los atunes, al igual que otras especies, está determinada por las preferencias particulares de la especie y las condiciones ambientales disponibles (Matthiopoulos, 2003), y a su vez las preferencias particulares dependerán del proceso ecológico dominante. Bajo esta óptica se pueden definir dos tipos de hábitat principales: el de alimentación y el de reproducción, los cuales suelen estar separados espacio-temporalmente, ya que se corresponden con requerimientos biológicos diferentes y para evitar que sus presas depreden sobre sus larvas (Druon, 2010).

A diferencia de los túnidos tropicales que desovan y se alimentan a lo largo de los océanos tropicales y subtropicales (Weng, 2009), el AAZ exhibe preferencias ambientales muy específicas para la reproducción (Fromentin y Fonteneau, 2001), lo que favorece la diferenciación de sus hábitats.

El hábitat de reproducción se caracteriza por aguas moderadamente cálidas, principalmente entre los 22 y 27°C, con concentraciones bajas de clorofila a (García *et al.*, 2005; Teo *et al.*, 2007b). Por su parte, la característica principal de los hábitats de alimentación del AAZ es la presencia de frentes térmicos y productivos estables (Lutcavage

*et al.*, 1997, 2000; Royer *et al.*, 2004), donde se produce una importante concentración de presas (Schick y Lutcavage, 2009).

Debido a la situación crítica en que se encuentran las poblaciones de AAZ, en años recientes numerosas investigaciones se han enfocado en caracterizar su distribución y comprender los mecanismos ambientales que la condicionan. Un área que ha recibido especial atención es el Golfo de México.

Block (2005) analizó datos de captura incidental de la flota comercial estadounidense, datos de captura de cruceros científicos y datos de posición de marcas satelitales para describir la distribución del AAZ. Observó una marcada estacionalidad (diciembre a junio) en la ocurrencia del AAZ en el Golfo de México, espacialmente heterogénea y dispersa ocupando prácticamente toda el área oceánica de la cuenca. La mayoría de los puntos de ocurrencia se situaron sobre el talud continental norte, entre las isobatas de 200 y 3000 m, aproximadamente entre los 25-28° N y 85-95° O.

Por su parte Teo *et al.* (2010) relacionaron los datos empleados por Block (2005) de distribución de la captura incidental por unidad de esfuerzo (CPUE) entre 1992 y 2005 con diferentes variables ambientales medidas por PRS. La CPUE más alta se produjo de marzo a junio con un máximo en abril, no se registraron capturas de julio a noviembre. Espacialmente, observaron una CPUE relativamente más alta en marzo y abril en la parte central y oeste del Golfo de México. Estimaron una correlación significativa entre las CPUE más altas y áreas con una altura del nivel del mar (ANM) negativa y TSM más frías, características de giros ciclónicos.

Con datos de posición de marcas satelitales y datos ambientales derivados de PRS, Teo *et al.* (2007b) estimaron las preferencias oceanográficas y el uso de hábitat del AAZ en el Golfo de México durante su fase reproductiva (Teo *et al.*, 2007a). La parte oeste del Golfo de México y la zona frontal de la Corriente de Lazo constituyeron el área de distribución principal. El AAZ prefirió aguas de moderada TSM (de 24 a 27°C), asociadas al talud continental exterior (perfiles de 2800-3400 m), bajas concentraciones de Chl-a (0.10-0.16 mg m<sup>3</sup>) y energía cinética moderada (indicativa de giros poco energéticos). La TSM preferencial experimentó diferencias significativas a lo largo de los meses.

Los meses de mayor presencia de AAZ en el Golfo de México definidos en Teo et al. (2010) coincidieron con la temporada de desove, entre abril y junio, estimada a partir de análisis histológicos de gónadas (Schaefer, 2001; Block *et al.*, 2005) y estudios de distribución de larvas (Richards, 1976; Richards y Potthoff, 1980); la distribución espacial de las larvas se asemejó también a lo expuesto por Block (2005). Así mismo, el AAZ prefirió aguas con características óptimas para el desove (Mather *et al.*, 1995; Schaefer, 2001; García *et al.*, 2005), principalmente a partir del mes de abril (Teo *et al.*, 2007b). Por lo tanto, la distribución del AAZ en el Golfo de México parece estar condicionada, sobre todo durante los meses de abril y mayo, por la búsqueda de condiciones ambientales óptimas para la reproducción.

Los estudios y hallazgos hasta ahora descritos adolecen, sin embargo, de la falta de un mayor número de observaciones más allá de las aguas norteamericanas del Golfo de México, lo cual resulta en una distribución sesgada hacia esta porción de la cuenca. Esta realidad, confirma la necesidad y pertinencia del presente trabajo para orientar la comprensión de la dinámica de distribución del AAZ en todo el Golfo de México.

### 3. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprende la Zona Económica Exclusiva (ZEE) mexicana del Golfo de México (Fig. 1), área donde realiza su actividad la flota comercial atunera mexicana (Ramírez-López, 2009).

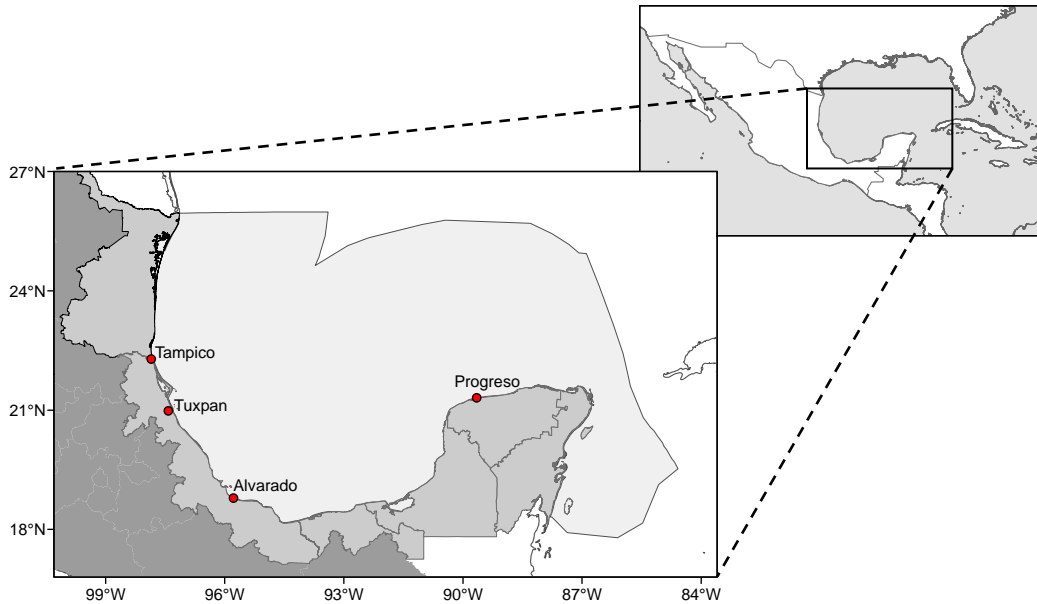


Figura 1. Zona Económica Exclusiva mexicana del Golfo de México y Mar Caribe. En gris claro se muestran los estados costeros (Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo). Los puntos rojos representan los principales puertos de la flota atunera mexicana.

El Golfo de México es una región marítima del Océano Atlántico situada entre México, Estados Unidos y Cuba. En México comprende los litorales de los estados de Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo (Fig. 1). Cuenta con 1.6 millones de  $\text{km}^2$  de superficie (Secretaría de Marina, 2002) de los cuales el 55% ( $0.9 \times 10^6 \text{ km}^2$ ) corresponden a la ZEE mexicana (Vidal-Lorandi *et al.* 1999).

Se trata de un sistema semicerrado con una entrada de agua oceánica por el mar Caribe, a través del Canal de Yucatán y con una salida al Océano Atlántico a través del Estrecho de la Florida, que en su región central alcanza una profundidad máxima entorno a los 3500 m (Oey *et al.*, 2005). Entre sus características morfológicas más sobresalientes



destaca una plataforma continental muy extendida al norte de la Península de Yucatán, al oeste de la Península de Florida y al sur de los estados de Texas y Luisiana, y muy angosta en la porción occidental de la cuenca, frente a las costas de Tamaulipas y Veracruz (Aguirre, 2002) (Fig. 2.)

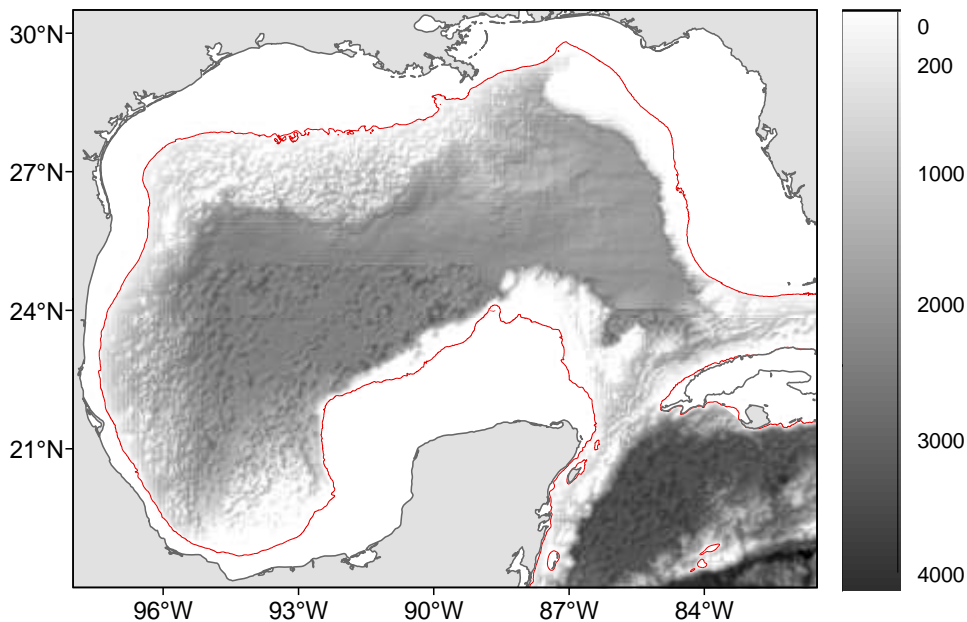


Figura 2. Perfil batimétrico de la cuenca del Golfo de México en metros. La línea roja indica la isobata de 200m, la cual marca el límite de la plataforma continental.

### 3.1. Climatología

Debido a su ubicación latitudinal el Golfo de México abarca diferentes regiones climáticas, desde tropical y subtropical hasta templado, con climas distintos a lo largo del año catalogados como épocas de “secas” (primavera), “lluvias” (verano, otoño) y “nortes” (invierno) (De Lanza-Espino y Gómez-Rojas, 2004). Está influenciado principalmente por dos tipos de eventos meteorológicos, los frentes atmosféricos o “nortes” y las tormentas tropicales y huracanes. En los meses de octubre a abril ocurren los frentes, que consisten en el intercambio de masas de aire frío y seco que viene del continente con las masas de aire marino tropical propias del Golfo. Durante el verano se presentan tormentas tropicales que se forman principalmente fuera del Golfo de México, las cuales eventualmente se trasladan

hacia la costa de Texas o Florida (Monreal-Gómez *et al.*, 2004b). Estas características meteorológicas sobre el golfo influyen no solo la zona costera, debido a la descarga de agua dulce, sino también en la porción oceánica modifican la posición de la termoclina haciéndola más profunda e influyen en la circulación general (Monreal-Gómez *et al.*, 2004a).

### **3.2. Principales características oceanográficas**

Entre sus principales características de mesoescala destacan la corriente de Lazo, los giros ciclónicos y anticiclónicos, la corriente de frontera oeste, la surgencia topográfica de Yucatán y los frentes que se producen con el encuentro de aguas de diferentes características (Monreal-Gómez *et al.* 2004a; Monreal-Gómez *et al.* 2004b).

La Corriente de Lazo es la característica dominante de la circulación en la parte este del Golfo de México. Es un flujo de agua cálida y de alta salinidad procedente del mar Caribe que entra en el golfo a través del Canal de Yucatán, circula anticiclónicamente generando una corriente en forma de lazo y abandona la cuenca por el Estrecho de Florida (Fig. 3), donde se une a la corriente de Florida. Su trayectoria e intensidad presentan una gran variabilidad estacional y anual (Aguirre, 2002; Monreal-Gómez *et al.* 2004a, 2004b; Zavala- Hidalgo *et al.*, 2003).

Una de las características oceanográficas clave en la zona oeste del Golfo son los giros ciclónicos y anticiclónicos de mesoescala asociados a la dinámica de la Corriente de Lazo (Monreal-Gómez *et al.* 2004b) (Fig. 3). Los grandes giros anticiclónicos (diámetro promedio de 300 km) se desprenden de la Corriente de Lazo a intervalos de entre 3 y 17 meses (Sturges y Leben, 2000) y se desplazan de este a oeste durante de varios meses hasta que colisionan con el talud continental y se desintegran dando origen a la formación de giros secundarios tanto ciclónicos como anticiclónicos (Lewis *et al.*, 1989). Estos giros anticiclónicos secuestran agua cálida de alta salinidad y son considerados productivamente pobres, sin embargo su confluencia con giros ciclónicos genera frentes geostroficados que pueden inducir productividad (Biggs, 1992, Monreal-Gómez *et al.* 2004a). Los giros ciclónicos están asociados con un aumento de la producción primaria y secundaria (Biggs y Müller-Karger, 1994; Monreal-Gómez *et al.* 2004a). Sobre la plataforma continental de

Florida, de Texas-Luisiana, y en la bahía de Campeche se observan giros ciclónicos semipermanentes de un diámetro aproximado de 150 km (Zabala-Hidalgo *et al.*, 2003, Monreal-Gómez *et al.* 2004a).

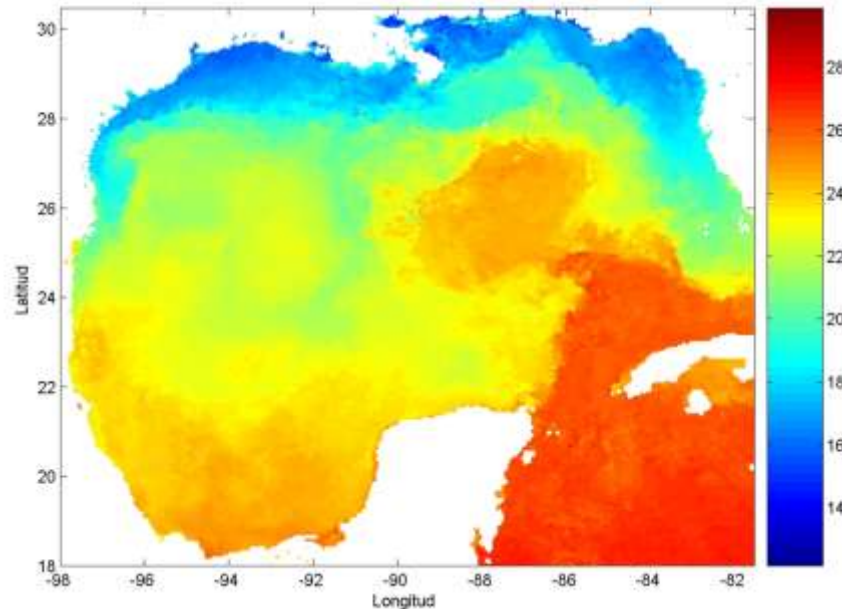


Figura 3.- Composición mensual de TSM del sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) correspondiente al mes de febrero de 1998, en la que se puede observar el desprendimiento de un giro anticiclónico de la Corriente de Lazo y un viejo giro hacia el oeste. También se aprecian una serie de giros ciclónicos frontales a lo largo de los bordes exteriores de la Corriente de Lazo y de los dos grandes giros anticiclónicos.

La temperatura superficial del mar (TSM) en el Golfo de México presenta una alta variabilidad temporal y espacial. Esta variabilidad es debida tanto a la dinámica oceánica asociada a la Corriente de Lazo y afloramientos costeros, como a flujos de calor océano-atmosfera (Virmani y Weisberg, 2003; Zabala-Hidalgo *et al.*, 2003). La variación de la TSM es sincrónica a través de la cuenca, los valores máximos promedio ocurren de julio a septiembre (entorno a los 29-30°C), mientras que las condiciones más frías se observan en los meses de febrero a marzo (entorno a los 19-20°C) (Müller-Karger *et al.*, 1991; Zavala-Hidalgo *et al.*, 2003; Manzano-Saravia y Salinas-Zabala, 2008). En la región oeste la amplitud de la variación de TSM es aproximadamente el doble que en la región este, debido al alejamiento de la influencia de la Corriente del Lazo, sus temperaturas mínima y máxima

se mantienen durante largos periodos en comparación a las del este, que tienen una duración menor por la continua intrusión de aguas cálidas del Caribe que entran al golfo vía la Corriente del Lazo (Müller-Karger *et al.*, 1991). Las regiones costeras del Golfo son generalmente más frías que la región central de la cuenca a lo largo de todo el año, exceptuando los meses de verano, donde la intrusión de la Corriente de Lazo ofrece un aporte relativamente uniforme de agua cálida (Virmani y Weisberg, 2003).

En general el Golfo de México es considerado como un mar poco productivo, sin embargo muestra una marcada variación espacial y estacional en la concentración de pigmentos fitoplanctónicos (Melo-González *et al.*, 2000). La concentración promedio de clorofila *a* para la zona oceánica es de  $0.2 \text{ mg/m}^3$ , incrementándose en la zona costera ( $> 0.5 \text{ mg/m}^3$ ) y alcanzando valores altos ( $5 \text{ mg/m}^3$ ) en algunas áreas influenciadas por los aportes de ríos, lagunas costeras y giros ciclónicos (Müller-Karger *et al.*, 1991). En aguas oceánicas la variación estacional de la concentración de pigmentos es sincrónica a través del Golfo, con los valores más altos ( $>0.18 \text{ mg m}^{-3}$ ) entre diciembre y febrero y los valores más bajos ( $\sim 0.06 \text{ mg m}^{-3}$ ) de mayo hasta julio. (Müller-Karger *et al.*, 1991).

#### **4. OBJETIVO GENERAL**

Describir y analizar la distribución espacio-temporal de la captura incidental del atún aleta azul, *Thunnus thynnus*, en aguas mexicanas del Golfo de México y su relación con la dinámica oceanográfica.

##### **4.1. Objetivos particulares**

Caracterizar la captura incidental del atún aleta azul, *T. thynnus*, realizada por la flota palangrera mexicana en el Golfo de México.

Describir la distribución espacio-temporal de las capturas incidentales de atún aleta azul, *T. thynnus*, en aguas mexicanas del Golfo de México.

Analizar los patrones de variabilidad de la temperatura superficial del mar y la concentración de clorofila a en el Golfo de México y su relación con la distribución del atún aleta azul, *T. thynnus*.

Definir las preferencias oceanográficas (temperatura superficial del mar, concentración de clorofila a y profundidad) del atún aleta azul, *T. thynnus*, en aguas mexicanas del Golfo de México.

## 5. MATERIAL Y MÉTODOS

Para la realización de este trabajo se conjuntaron dos grupos de datos independientes entre sí, por un lado datos pesqueros provenientes de la actividad de la flota atunera mexicana del Golfo de México, y por otro lado, datos oceanográficos obtenidos por PRS.

La secuencia simplificada de la aproximación metodológica empleada en este trabajo se sintetiza en el diagrama de flujo expuesto a continuación:

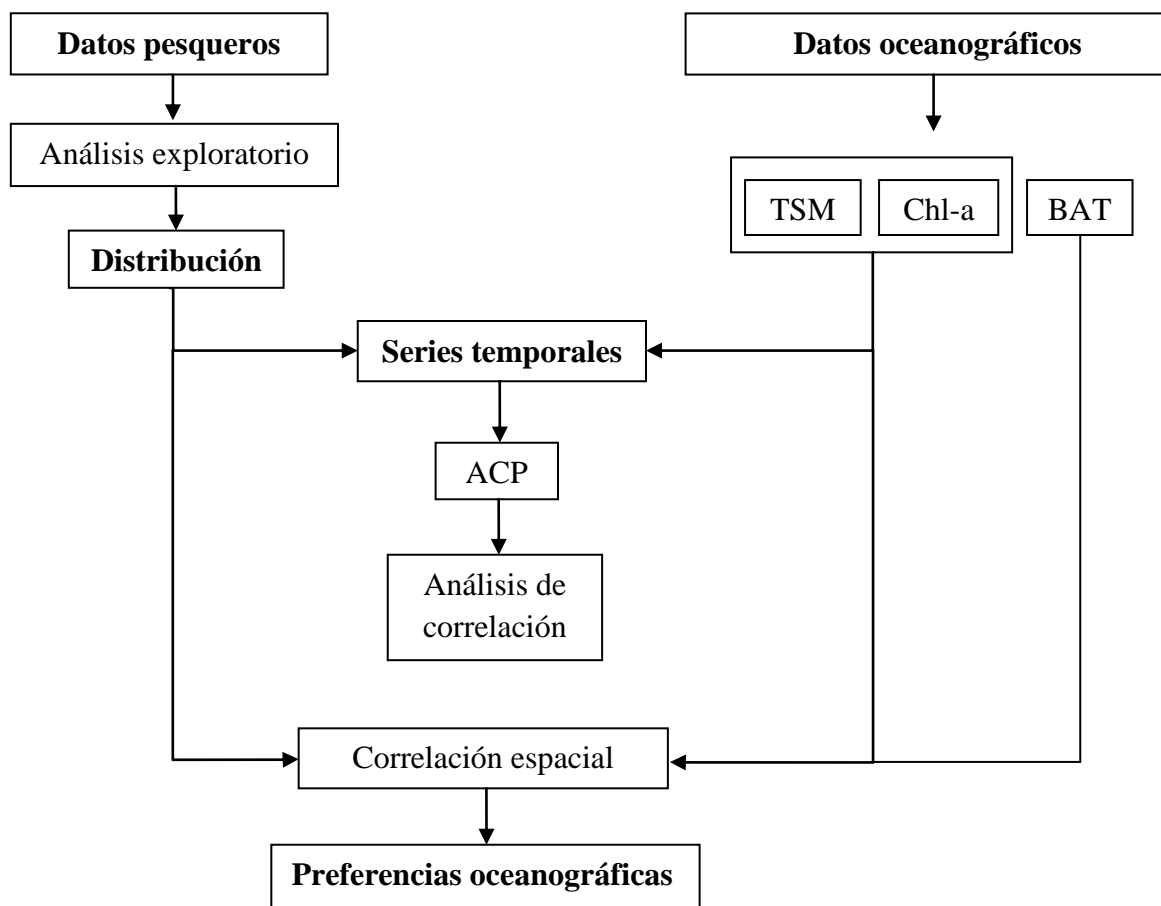


Figura 4. Esquema simplificado de la aproximación metodológica empleada. ACP acrónimo de Análisis de Componentes Principales. BAT acrónimo de Batimetría.

## 5.1 Datos

### 5.1.1 Datos pesqueros

En este estudio se utilizaron datos relativos a la captura incidental de AAZ realizada por la flota palangrera mexicana que opera en el Golfo de México. Estos datos provienen de la información recopilada por los observadores a bordo del Programa Nacional para el Aprovechamiento del Atún y Protección del Delfín (PNAAPD) y fueron facilitados por la Dirección General de Investigación Pesquera en el Atlántico (DGIPA) del Instituto Nacional de Pesca (INAPESCA) a través del Programa Atún-Golfo de México. Más información sobre el programa de observadores puede ser consultada en <http://www.fidemar.org/pnaapd.htm>.

El conjunto de datos abarcó todos los viajes de pesca con captura positiva para AAZ realizados por la flota atunera mexicana en el Golfo de México entre los años 1994-2007. Es importante destacar que se dispuso de los registros individualizados de todos los atunes capturados durante ese periodo, lo que significa que se contó con el universo completo de la captura incidental de AAZ en el área y período de estudio. La información comprendió la posición y fecha del lance con captura positiva y el sexo, talla y peso del individuo capturado, esta información se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1. Información relativa a cada individuo de atún aleta azul capturado incidentalmente por la flota mexicana palangrera que opera en el Golfo de México

Campo	Descripción
Posición de captura	Coordenadas geográficas en grados decimales de posición final de la maniobra de cobrado del arte
Fecha de captura	Mes, año
Parámetros biológicos	Sexo (macho, hembra, no determinado) Longitud Furcal (LF) en centímetros Peso estimado en kilogramos

### 5.1.2 Datos oceanográficos

Para la caracterización del hábitat oceánico se emplearon datos de temperatura superficial del mar y concentración superficial de clorofila derivados de mediciones satelitales, así como datos batimétricos derivados de la conjunción de mediciones in situ y de percepción remota (Tabla 2).

#### 5.1.2.1 Temperatura Superficial del Mar (TSM)

Se utilizaron datos de TSM provenientes de los sensores AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) a bordo de los satélites de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) obtenidos de la base de datos NOAA/NASA AVHRR *Ocean Pathfinder* versión 5 del PODAAC (Physical Oceanography Distributed Active Archive Center) del JPL Jet Propulsion Laboratory de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) (<http://poet.jpl.nasa.gov/>). Estos datos poseen una resolución espacial de 4 km al nadir en una proyección equidistante cilíndrica, con un error estimado entre 0.3 y 0.5°C. Se utilizaron promedios mensuales de datos globales (GAC) para el periodo 1994-2007, obtenidos de pases descendentes (temperatura nocturna) de los satélites, con nivel 3 de procesamiento (L3). Los productos finales fueron imágenes (longitud-latitud) en formato HDF (High Density Files) y GeoTIFF y archivos ASCII de datos mensuales del promedio espacial la TSM de la cuenca.

#### 5.1.2.2 Concentración de clorofila a (Chl-a)

Se utilizaron datos de Chl-a generados a partir de mediciones del sensor SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor) producidos y distribuidos por el DAAC (Distributed Active Archive Center) del Goddard Space Flight Center (GSFC) de la NASA (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>). Se usaron promedios mensuales de Chl-a de datos globales de septiembre de 1997 a diciembre de 2007, con un nivel de tratamiento L3m (L3 mapped), resolución espacial de 9 km en proyección equidistante cilíndrica y con una precisión aproximada de  $\pm 35\%$ . La calibración, validación y procesamiento final de las imágenes se llevó a cabo con el programa SeaDAS (*SeaWiFS Data Analysis System*). Los formatos de salida fueron HDF, GeoTIFF y ASCII.



### 5.1.2.3 Batimetría (BAT)

Se utilizaron datos batimétricos del proyecto ETOPO2v2 descargados de la página electrónica del *National Geophysical Data Center* (NGDC) de la NOAA (<http://www.ngdc.noaa.gov>). Estos datos provienen de la conjunción de datos altimétricos derivados de satélite y muestreos de alta resolución por barco, poseen una resolución espacial de malla de dos minutos y una precisión de un metro en la vertical; se obtuvieron en los formatos HDF y GeoTIFF.

Tabla 2. Características principales de los datos oceanográficos empleados

Variable	Sensor	Origen	Nivel de procesado	Resolución	Formato
TSM	AVHRR	PODAAC	L3	4 km mensual	HDF
		JPL			GeoTIFF
		NASA			ASCII
Chl-a	SeaWiFS	DAAC	L3m	9 km mensual	HDF
		GSFC			GeoTIFF
		NASA			ASCII
BAT		NGDC		2' x 2'	HDF
		NOAA			GeoTIFF

## 5.2 Análisis

### 5.2.1 Análisis exploratorio de las capturas

Se cuantificó la captura total acumulada, se estableció la proporción sexual de la captura y se determinó la estructura de tallas total y diferenciada por sexos de la captura de AAZ, considerando un intervalo de clase de 10 cm de LF. Se calcularon estadísticos descriptivos básicos de las tallas para conocer los atributos de la estructura de la población objetivo.

### 5.2.2 Distribución espacio-temporal de las capturas

Para estudiar la distribución temporal de las capturas se construyeron series de tiempo de (1) captura mensual, (2) captura mensual acumulada (de diferentes años) y (3) captura anual, para el periodo de estudio 1994-2007. La serie de tiempo de captura mensual

se dividió en dos series, una de machos y otra de hembras, las cuales fueron comparadas gráficamente y a través de un análisis de densidad espectral mediante el método de transformación discreta de Fourier (FDT) con el programa WinIDAMS 1.3 (UNESCO, 2008) para determinar si existía segregación temporal de la ocurrencia de machos y hembras de AAZ en el área de estudio. El mismo procedimiento se realizó para determinar posibles diferencias entre la ocurrencia de juveniles y adultos.

Se construyeron mapas en un entorno SIG (Sistemas de Información Geográfica) utilizando el programa ArcMap 9.2 (ESRI, 2007) para analizar la distribución espacial de la captura incidental de AAZ en aguas mexicanas del Golfo. Para ello se generaron dos tipos de mapas, aquellos que se representaron las posiciones geográficas de las capturas (latitud, longitud) y mapas de densidad de capturas por cuadrantes de  $1^\circ \times 1^\circ$  de (1) la captura total, (2) la captura mensual, (3) la captura mensual acumulada y (4) la captura anual; la misma secuencia se realizó para la captura diferenciada por sexo y por talla de madurez (juveniles, adultos) para determinar una potencial segregación espacial debida a tales atributos de la población. Para la realización de los mapas de densidad se utilizaron las extensiones X Tools Pro y Hawth's Tools. Los patrones potenciales de distribución se analizaron visualmente.

### ***5.2.3 Análisis de series de tiempo***

Para identificar la naturaleza y contribución relativa de la variabilidad oceanográfica a la captura de AAZ se construyeron series de tiempo de variables oceanográficas (TSM, Chl-a) y biológico-pesqueras (captura mensual) y se aplicó un análisis de componentes principales de series temporales (ACP) por el método de análisis espectral SSA (Singular Spectrum Analysis) con el programa Caterpillar Versión 1.00 (Caterpillar Group, 1997). La serie de tiempo de capturas se descompuso en componentes principales (CP) y se aislaron aquellos componentes que explicaron la mayor parte de la variabilidad de la serie original.

En el caso de la TSM, se construyó una serie de tiempo con el promedio mensual-espacial de temperatura para toda la cuenca, pero no se consideró la descomposición de la misma en CP debido al comportamiento eminentemente estacional y estacionario de la serie original. Para la Chl-a se construyó una serie de tiempo de la concentración media mensual

que representara lo más posible la productividad oceánica y evitara la variabilidad derivada de la zona costera, ya que prácticamente todas las capturas (99%) se produjeron en aguas oceánicas, y se descompuso en sus CP. Para conocer el tipo de relación y magnitud de la contribución de la TSM y la Chl-a sobre la dinámica de las capturas de AAZ, se realizaron análisis de correlación cruzadas (Sokal y Rohlf, 1981) por mínimos cuadrados en el programa Excel (Microsoft, 2007).

Por otro lado se analizó la influencia de las anomalías de TSM sobre la variabilidad intermensual de las capturas. Para ello se generaron series de tiempo de anomalías mensuales de TSM y de capturas de AAZ. Las anomalías se definieron como el valor mensual observado menos el promedio mensual de toda la serie. La serie de anomalías de TSM se suavizó por medias móviles de 12 meses para evidenciar la tendencia y se exploró el grado de asociación entre ambas series.

#### ***5.2.4 Preferencias oceanográficas***

Se determinaron los patrones de uso de hábitat oceanográfico del AAZ en aguas mexicanas del Golfo a partir de muestras de datos oceanográficos en la localización geográfica y fecha de cada posición de captura. Las posiciones de captura se superpusieron sobre las imágenes correspondientes de cada parámetro oceanográfico TSM, Chl-a y BAT. Debido a que los datos de posición de captura disponibles se correspondieron con la posición final del lance de pesca, se consideró un área ampliada o “buffer” concéntrica a la geoposición, como aproximación a la escala de la maniobra completa de pesca, y por tanto a la posición real de la captura, reduciendo la posibilidad de sesgar el muestreo de los parámetros oceanográficos.

Se definió un buffer de 60 km de radio (Fig. 5) en correspondencia con la distancia media del palangre empleado por la flota palangrera mexicana en el Golfo de México (Sosa-Nishisaki *et al.*, 2001). Con una rutina para Matlab 7.0, desarrollada para este trabajo en colaboración con el Large Pelagic Lab de la Universidad de New Hampshire, de cada buffer se extrajeron y promediaron ( $\pm$  desviación estándar) 300 puntos muestreados aleatoriamente bajo una distribución normal. Este valor promedio se consideró como el hábitat oceanográfico usado por el atún en ese momento.

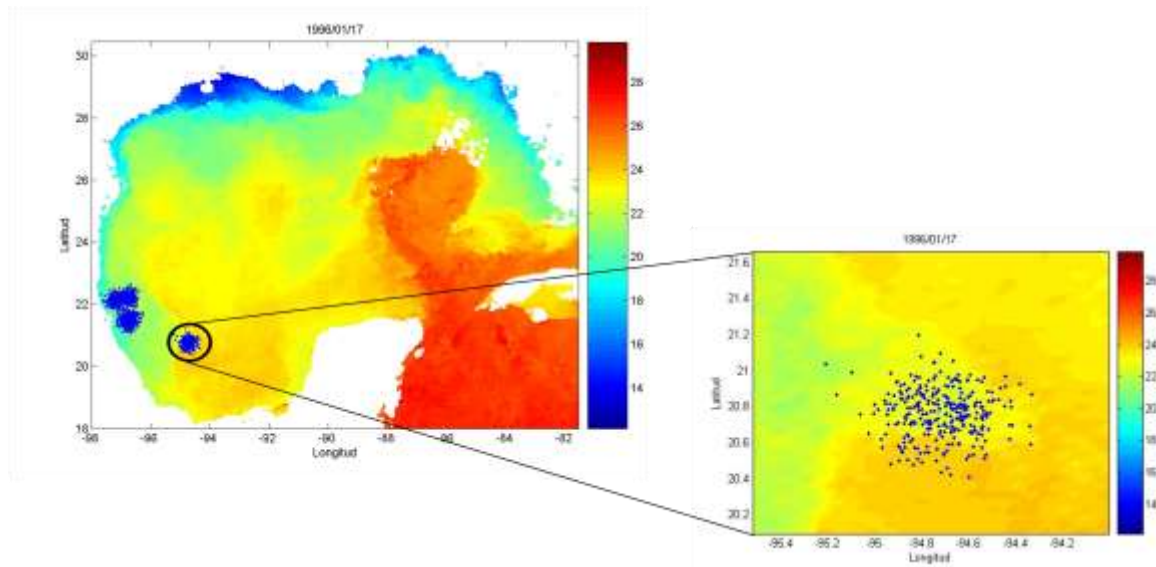


Figura 5. Buffer (circulo negro) y puntos de muestreo (puntos azules) entorno a la posición final de la maniobra de pesca, sobre una imagen de temperatura superficial del mar AVHRR correspondiente al mes de enero de 1996.

Para cada parámetro se definieron los intervalos preferenciales en función de la proporción de ocurrencia, el valor promedio total y el promedio mensual a lo largo de toda la serie, con respecto a la captura total y diferenciada por atributos poblacionales. Se aplicó una ANOVA de dos vías (Zar, 1999) para determinar si existe un efecto significativo del tiempo sobre los intervalos preferenciales el efecto del sexo y la talla, sobre los intervalos preferenciales, ambos análisis se llevaron a cabo en el paquete estadístico STATISTICA (Statsoft, Inc 2000).

## 6. RESULTADOS

### 6.1. Atributos poblacionales

En los 14 años de registro de captura a los que se tuvo acceso en este trabajo, se contabilizaron un total de 579 organismos. De estos, el 51% (n=294) fueron plenamente identificados como machos, el 30% (n=172) como hembras y el 19% (n=113) como no determinados (ND). El intervalo total de talla de los atunes capturados fue 120 - 380 cm LF (Fig. 6a), con una talla promedio de  $244.9 \pm 42.5$  cm. La distribución estuvo fuertemente sesgada hacia las tallas entre 230 y 280 cm LF, con una moda principal consistente en hembras y machos de 230-240 cm LF. Adicionalmente se observaron dos modas secundarias menores, una en 140-150 cm LF y la segunda en 360-380 cm LF. Teniendo en cuenta que la talla de primera madurez estimada para el stock oeste es de 200 cm LF (150 kg aproximadamente) (Mather *et al.*, 1995) los juveniles constituyeron el 11.23% (n=65) de la captura total. Como se puede apreciar en la Figura 6b, no se observaron diferencias importantes en la distribución de tallas por sexos.

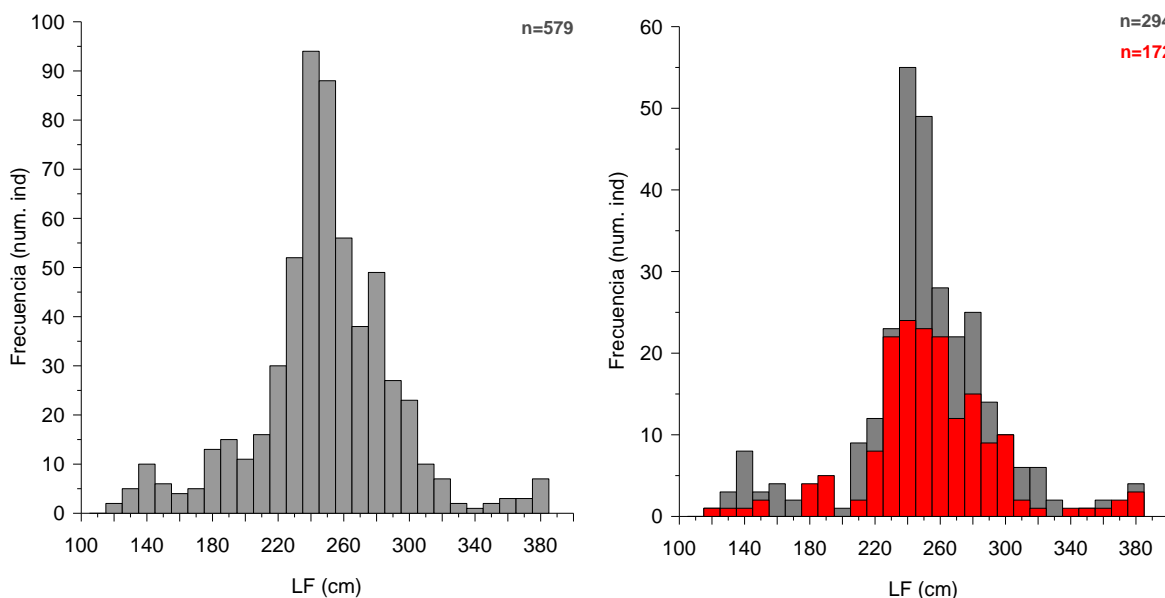


Figura 6. Distribución de tallas de la captura total (a) y de la captura diferenciada por sexos (b; machos = gris, hembras = rojo) de AAZ de la flota palangrera mexicana en el Golfo de México durante el periodo 1994-2007.

## 6.2. Distribución temporal de las capturas

La captura incidental de AAZ presentó una marcada estacionalidad. La mayor parte de ella (88%) se obtuvo durante el primer cuatrimestre del año, principalmente durante los meses de febrero y marzo con 30% y 34% respectivamente. En contraste, entre junio y noviembre prácticamente no se produjeron capturas (Fig. 7).

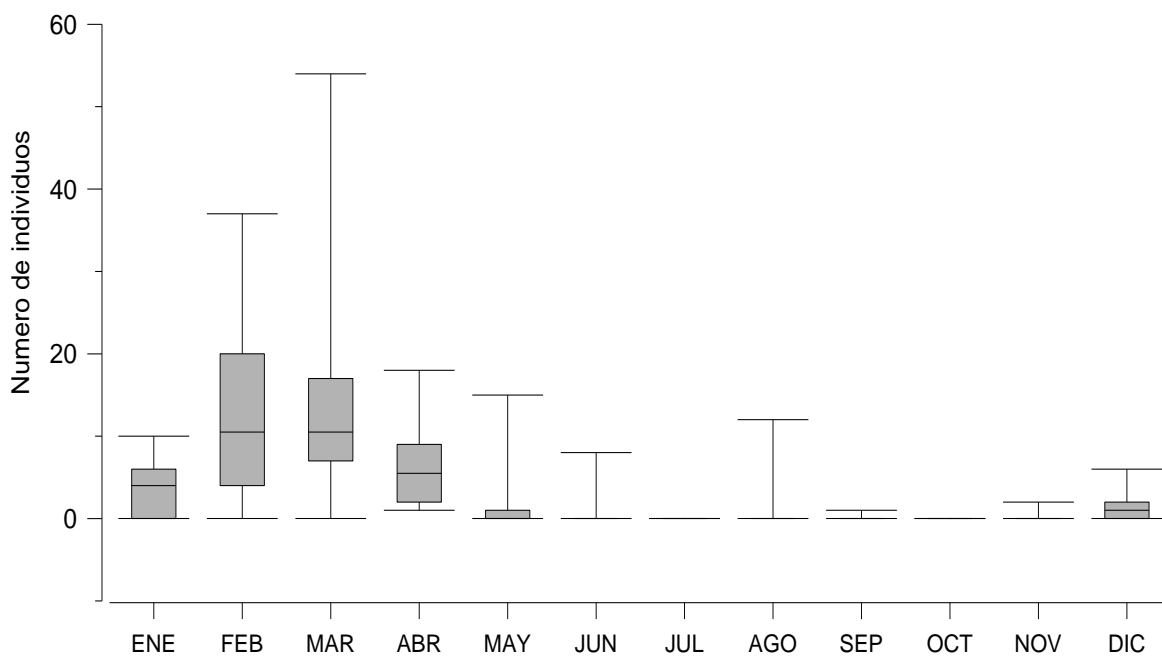


Figura 7. Diagrama de caja (mediana, primer y tercer cuartil, mínimo y máximo) de la captura de AAZ en número de individuos acumulada por mes para el periodo 1994-2007.

La captura anual acumulada observó variaciones a lo largo del periodo de estudio, con un mínimo de 6 individuos en 1997 y un máximo de 123 individuos de AAZ en el año 2000 (Tabla 3). A lo largo de la serie temporal se distinguieron dos periodos diferenciados entre sí (Fig. 8), de 1994 a 1999 las capturas de AAZ fueron moderadas ( $22.7 \text{ individuos} \cdot \text{año}^{-1} \pm 7.44$ ) y de 2000 a 2007 las capturas anuales se incrementaron sensiblemente ( $55.4 \text{ individuos} \cdot \text{año}^{-1} \pm 10.8$ ).

Tabla 3.- Captura incidental de AAZ (número de individuos) por la flota mexicana palangrera en el Golfo de México con observadores del PNAAPD de 1994 a 2007

Mes/año	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	CAM
ENE	0	0	6	0	6	1	0	9	4	10	4	6	1	4	51
FEB	5	4	12	0	2	3	37	21	16	20	14	8	21	9	172
MAR	3	10	14	0	8	5	54	7	12	20	11	17	29	8	198
ABR	6	1	10	6	8	1	11	1	9	18	5	4	5	2	87
MAY	0	0	15	0	4	0	0	0	1	0	0	0	1	1	22
JUN	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	1	0	0	0	9
JUL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AGO	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	12
SEP	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2
OCT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NOV	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	1	4
DIC	0	0	0	0	0	5	1	3	6	1	2	0	2	2	22
CAA	14	16	57	6	28	15	123	41	50	69	38	35	60	27	579

CMA= captura acumulada mensual CAA = captura acumulada anual

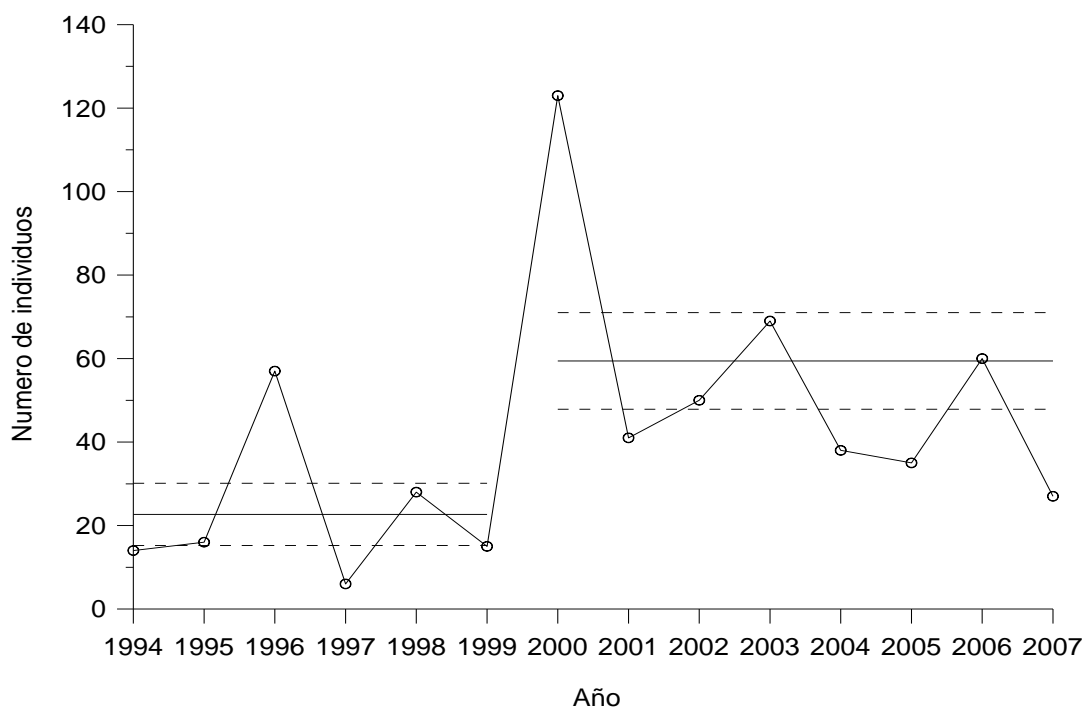


Figura 8. Evolución de la captura acumulada anual (promedio  $\pm$  Error Estándar) de AAZ por la flota palangrera mexicana del Golfo de México de 1994 a 2007. Las líneas horizontales continuas representan el valor promedio de captura para ese intervalo de tiempo (años), las discontinuas la desviación estándar

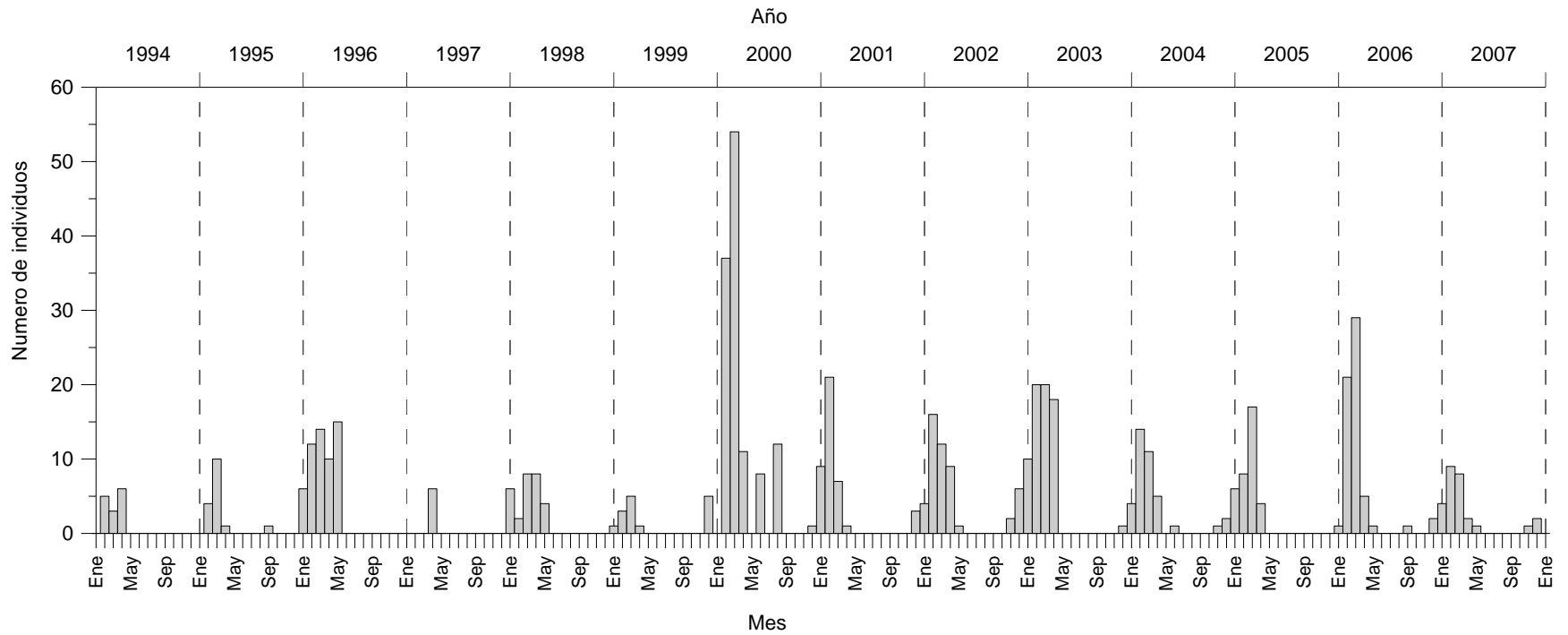


Figura 9. Captura mensual en número de individuos de AAZ realizada por la flota palangrera mexicana en aguas mexicanas del Golfo de México en el periodo enero 1994-diciembre 2007. Las líneas punteadas señalan los meses enero de cada año.



La distribución mensual de las capturas (Fig. 9) indica que las temporadas de pesca de AAZ comprenden parte del último trimestre de un año y el primer trimestre del siguiente año. Se observó un adelanto en el mes inicial de ocurrencia de AAZ en el área de estudio, a razón de un mes cada 3-4 años. Así en la temporada de 93-94, febrero de 94 de fue el mes inicial de captura, y para 06-07 la temporada de captura comenzó en noviembre de 2006.

La frecuencia temporal de ocurrencia de las capturas de machos y hembras no difirió significativamente (Fig. 10), no obstante se observaron algunas temporadas en los que la captura estuvo compuesta exclusivamente por hembras (96-97), machos (01-02) o el mes de ocurrencia inicial estaba copado por un único sexo (99-00, 04-05) (Fig. 11). Cabe destacar que en los años 1995 y 2002 todas las capturas fueron registradas como no determinadas. No se observaron patrones diferenciados de la distribución temporal entre juveniles y adultos (Fig. 12).

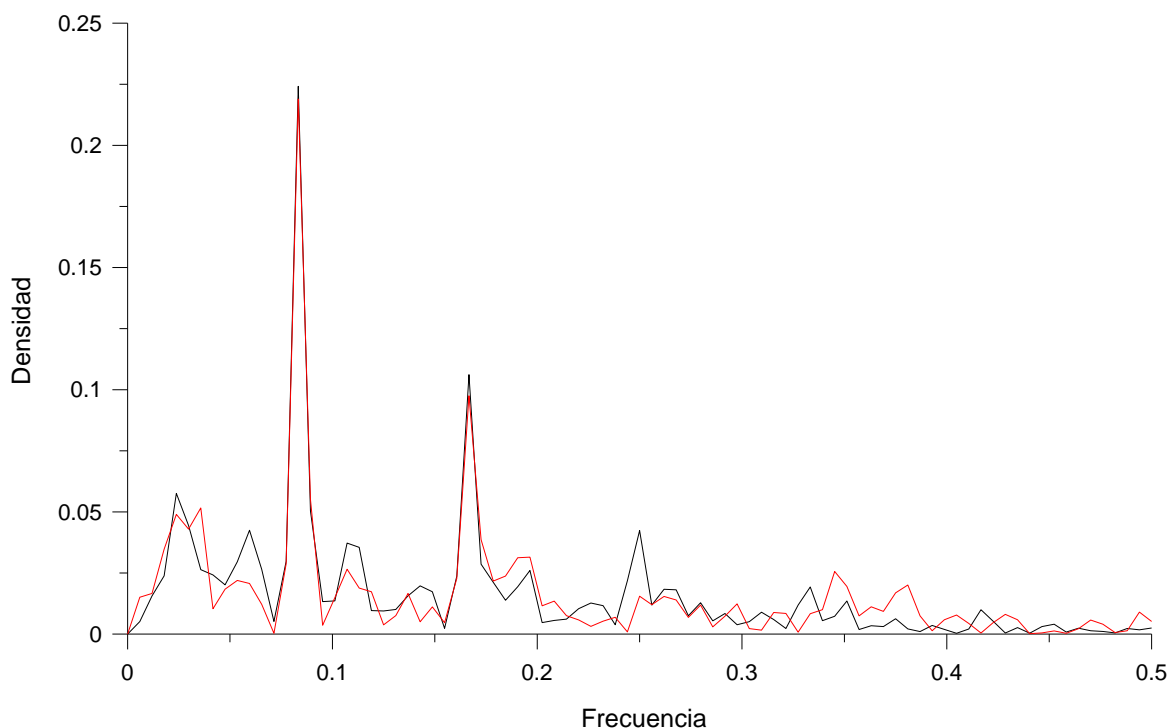


Figura 10. Densidades espectrales de la serie de tiempo de captura de hembras (línea roja) y de machos (línea negra)

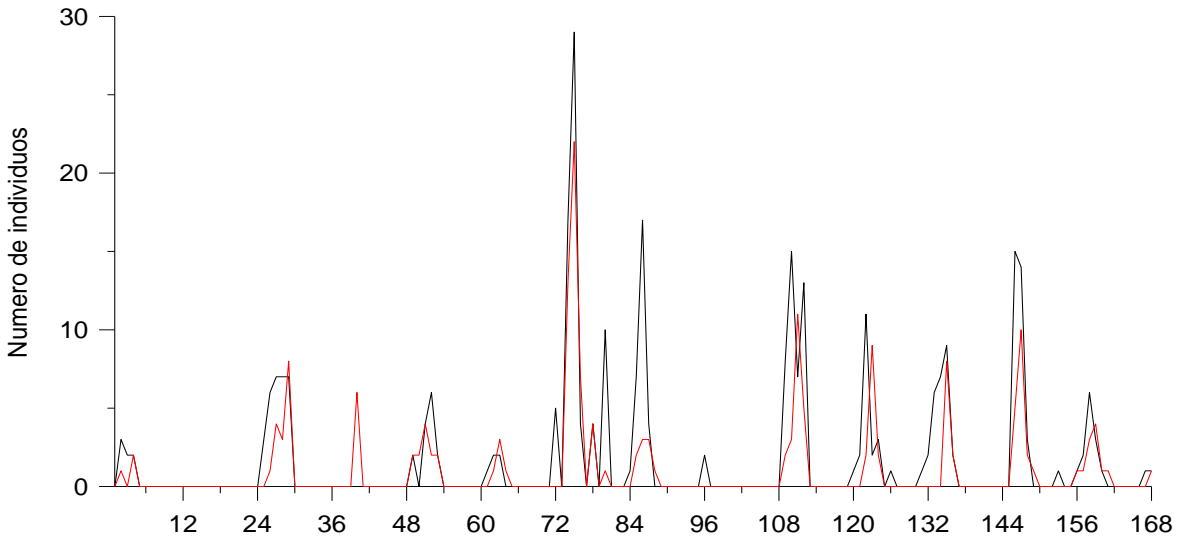


Figura 11. Captura mensual en número de individuos) de AAZ en el Golfo de México en el periodo 1994-2007 diferenciada por sexo. Línea roja representa captura de hembras, negra machos.

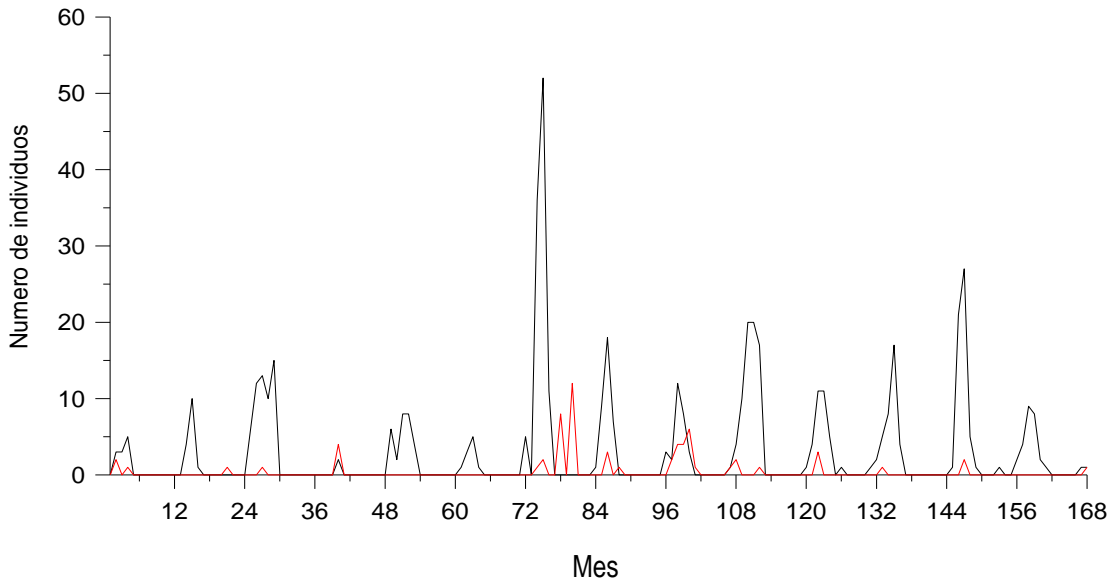


Figura 12. Captura mensual (número de individuos) de AAZ en el Golfo de México 1994-2007 diferenciada por talla. Línea roja representa captura de juveniles (<200 cm. LF), negra adultos (>200 cm. LF).

Sin embargo en el año 2000 se produjo una anomalía respecto a dicha igualdad, ya que se capturaron exclusivamente juveniles en el segundo semestre del año (Junio y Agosto). No se realizó en este caso un análisis de densidades espectrales ya que las capturas

de juveniles (11.23% del total) fueron sensiblemente más bajas que las de individuos adultos.

### **6.3. Distribución espacial de las capturas**

Las capturas de AAZ se distribuyeron prácticamente a lo largo de toda la ZEE mexicana del Golfo de México ocupando un área comprendida entre los 26°-19° N y 87-97°O (Fig. 13a). Las capturas se concentraron en el lado oeste de la cuenca (paralelo 90), en aguas frente al estado de Veracruz donde se encuentra el puerto base principal de la flota atunera (Tuxpan) (Fig. 13b). La distribución espacial de las capturas presentó una importante variabilidad intermensual a lo largo de toda la serie (ver ANEXO I). Sin embargo, considerando la captura histórica acumulada por mes, se observó una ocupación de la mayor parte del área de estudio, variando la densidad de posiciones de captura. No se apreció por tanto un patrón geográfico de distribución a lo largo del tiempo (Fig. 14).

A una escala anual, se observaron distribuciones distintas de las capturas, sin apreciarse de nuevo patrones geográficos definidos (Fig. 15). En cuanto a la distribución diferencial por atributos de la población no se observaron segregaciones espaciales de importancia ni por sexo (Fig. 16) y por talla de madurez (Fig. 17). Sin embargo, cabe destacar que las escasas capturas producidas en los meses de verano (junio, agosto, septiembre) fueron más cercanas a la plataforma continental (Fig. 14) y estuvieron compuestas exclusivamente por individuos juveniles.

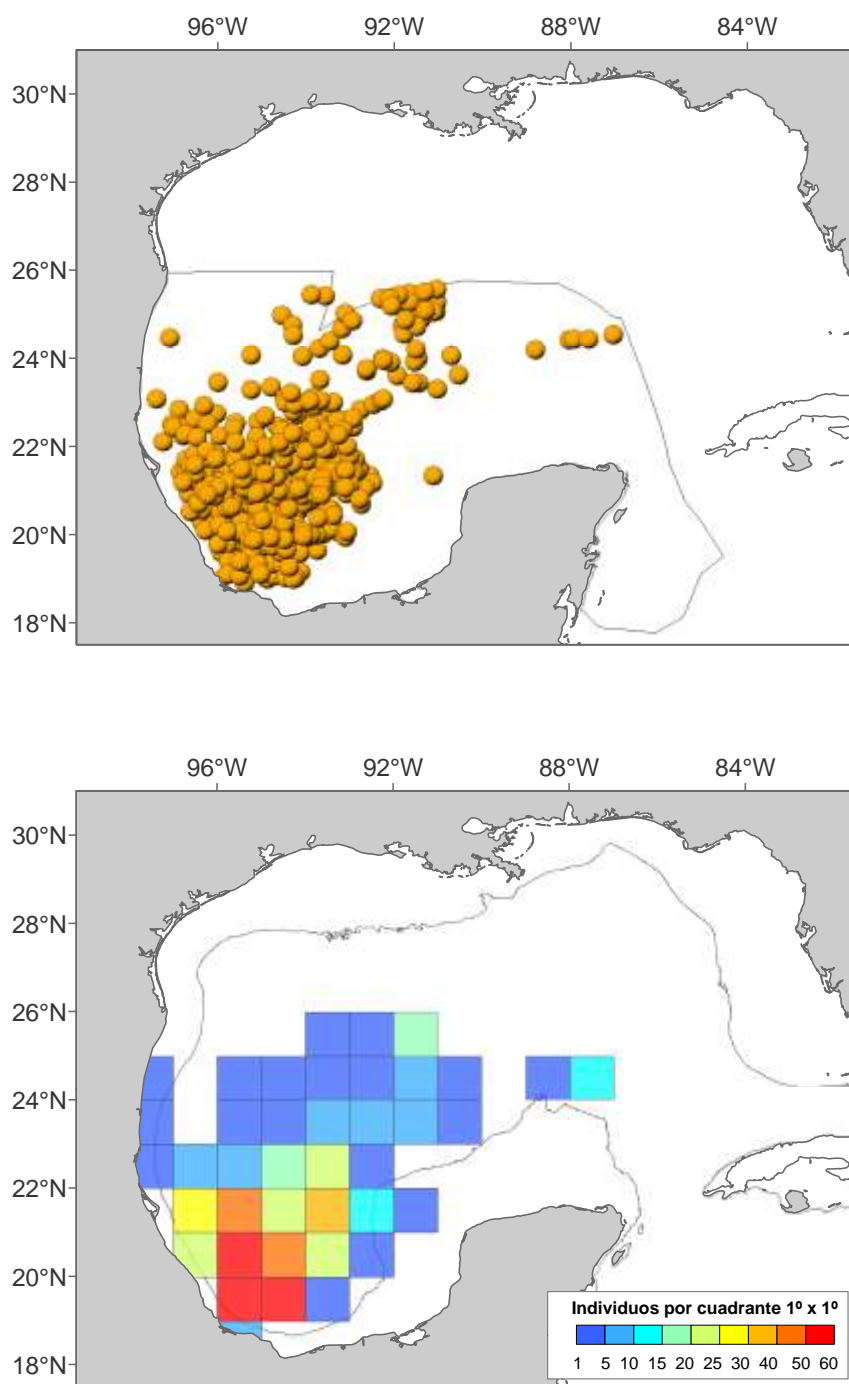
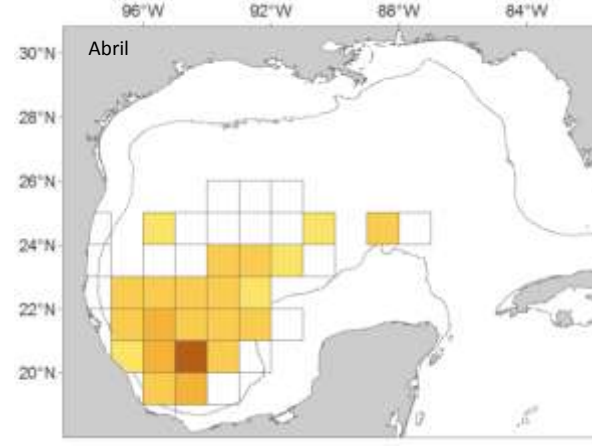
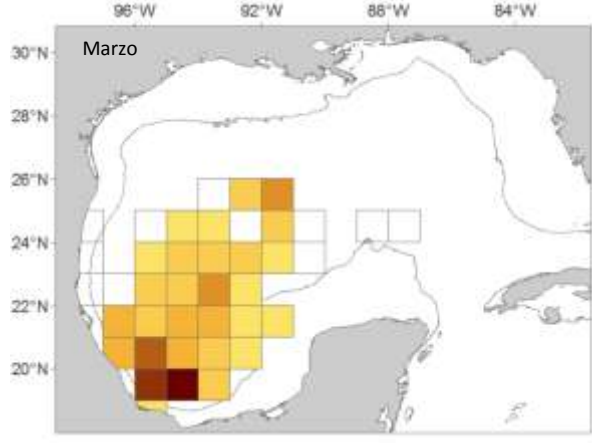
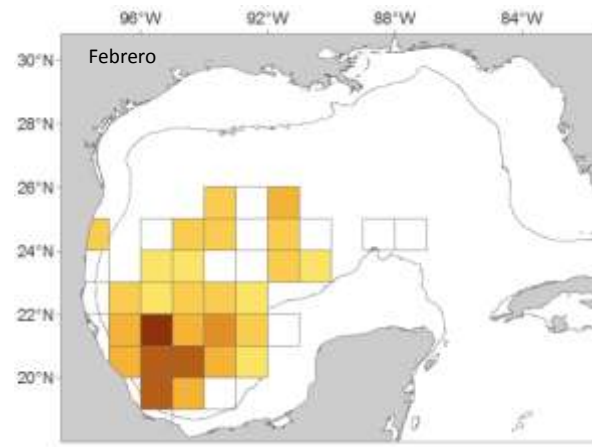
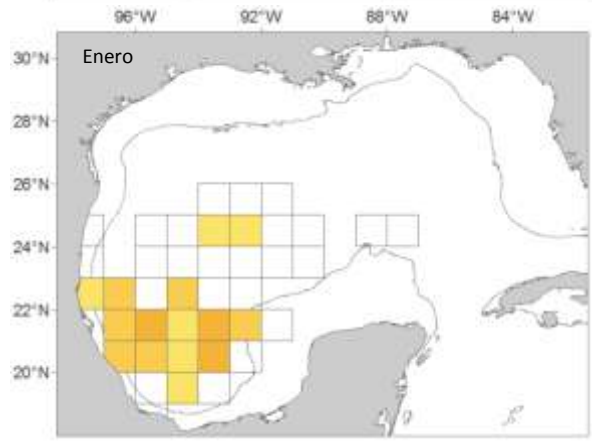
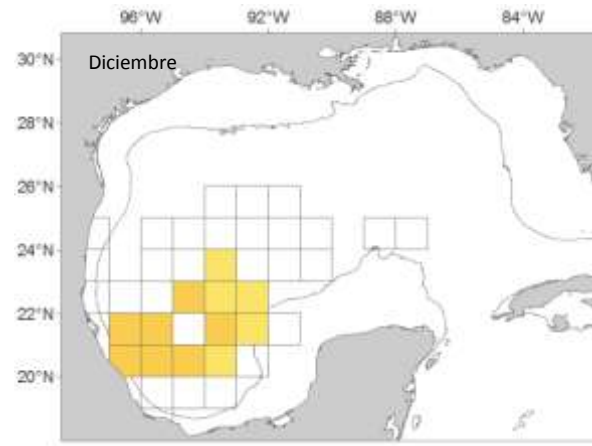
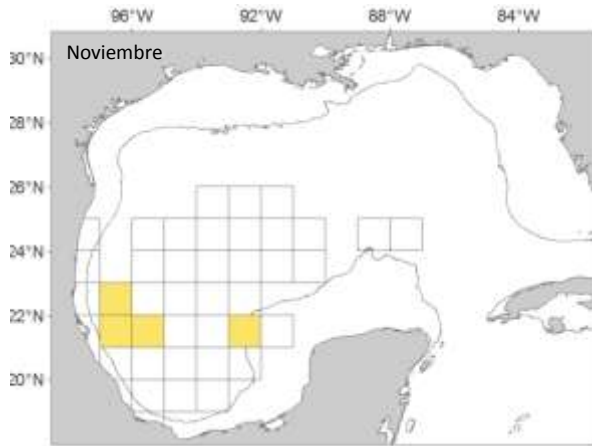


Figura 13. Distribución espacial de las capturas de AAZ (n=579) realizadas por la flota comercial palangrera mexicana en el periodo 1994-2007 en la Zona Económica Exclusiva mexicana (ZEE) en el Golfo de México a) posición geográfica (longitud-latitud) de final de la maniobra de cobrado del arte de lances con captura positiva para AAZ; la línea gris indica el límite de la ZEE y b) número de individuos capturados por cuadrante de 1° x 1°; la línea gris representa la isobata de 200 m.



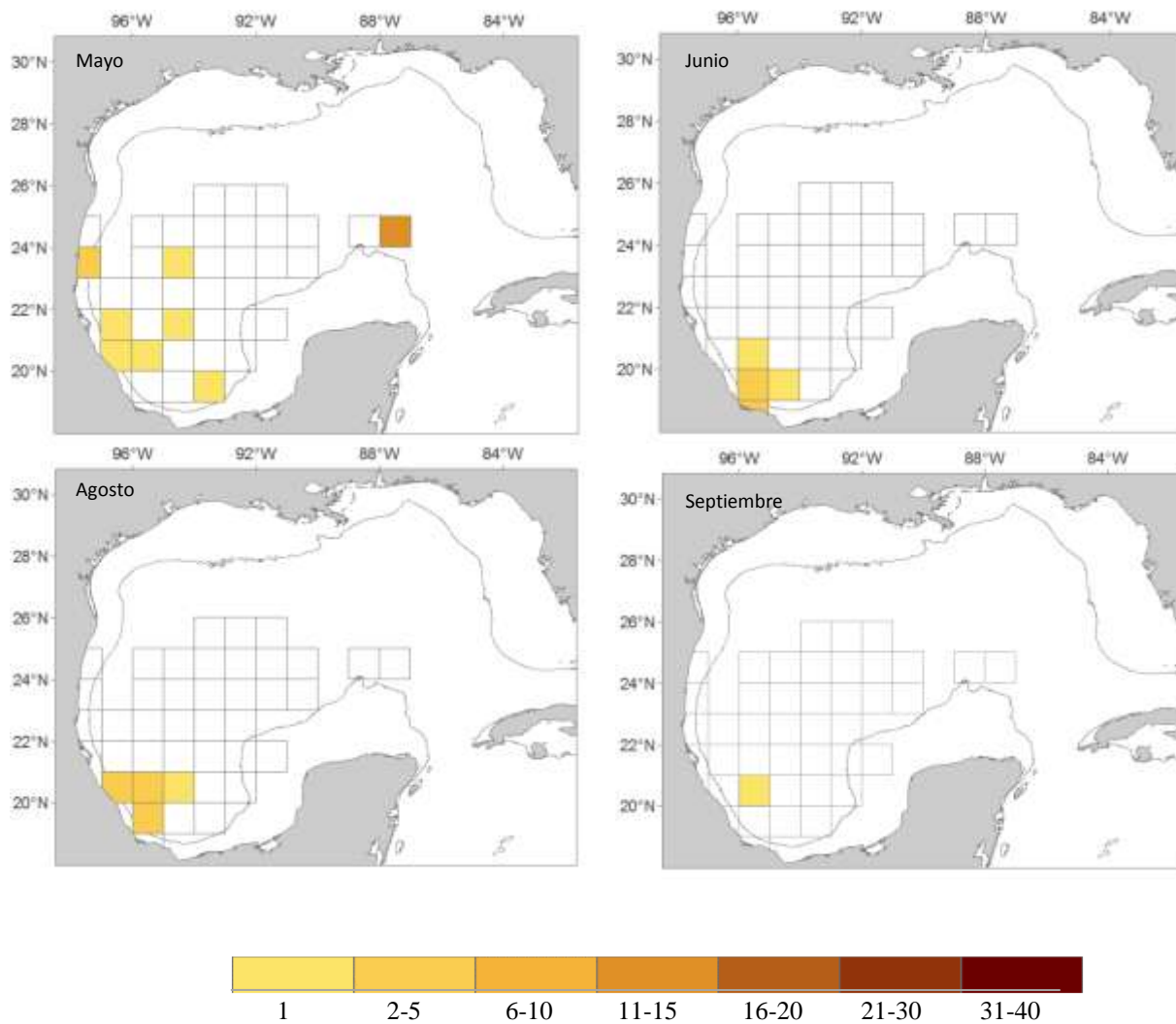


Figura 14. Distribución espacial de la captura incidental de atún aleta azul realizada por la flota comercial palangrera mexicana en el Golfo de México durante el periodo 1994-2007 acumulada por mes. Número de lances con captura positiva por cuadrante de 1° x 1°, cuadrantes.

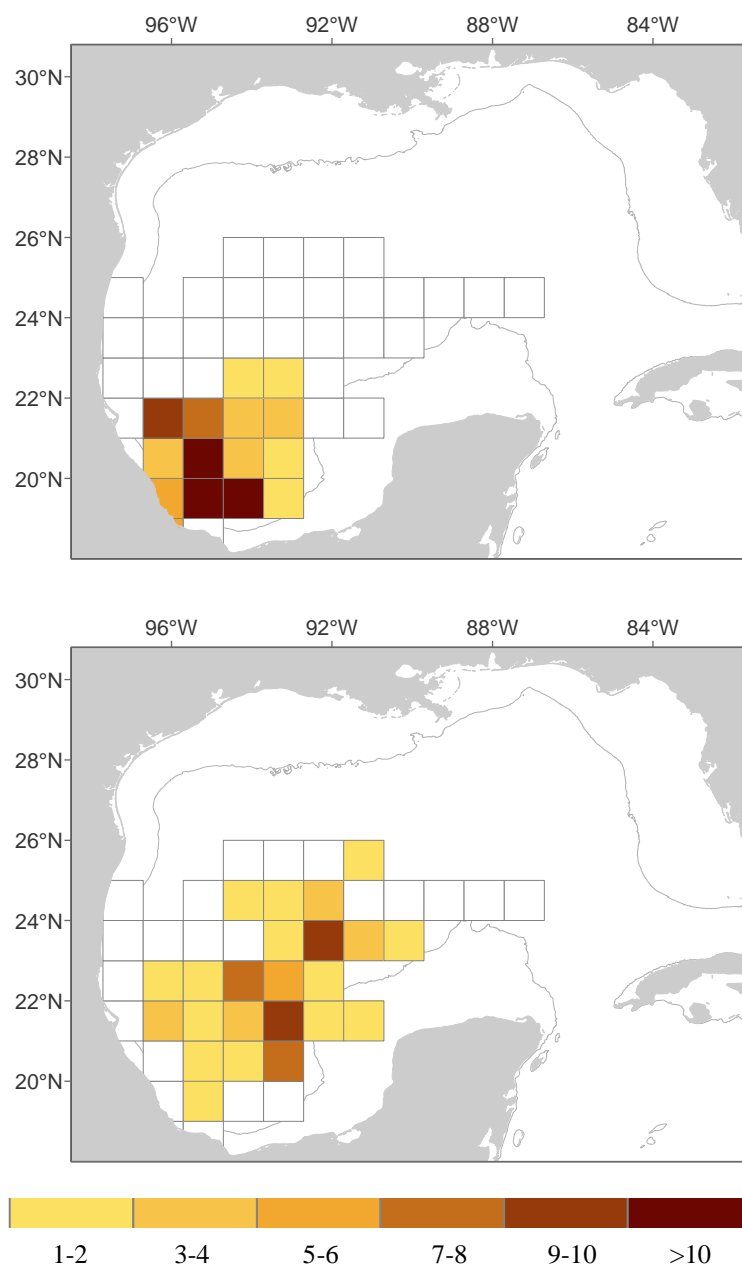


Figura 15. Distribución espacial de la captura incidental anual de atún aleta azul realizada por la flota comercial palangrera mexicana en el Golfo de México. Ejemplo para los años 2000 (izquierda) y 2003 (derecha).

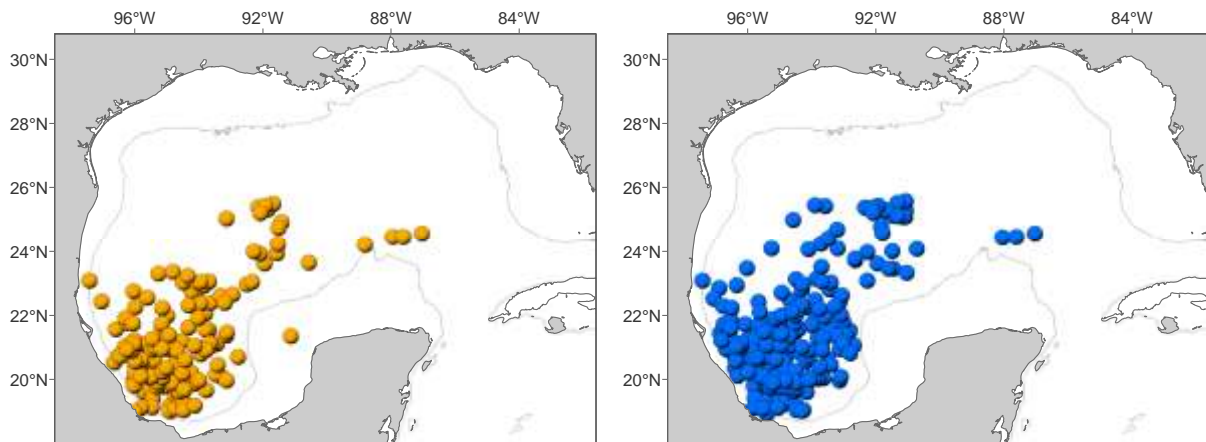


Figura 16. Distribución espacial de la captura incidental de atún aleta azul realizada por la flota comercial palangrera mexicana en el Golfo de México entre 1994 y 2007 diferenciada por sexo a) hembras, b) machos.

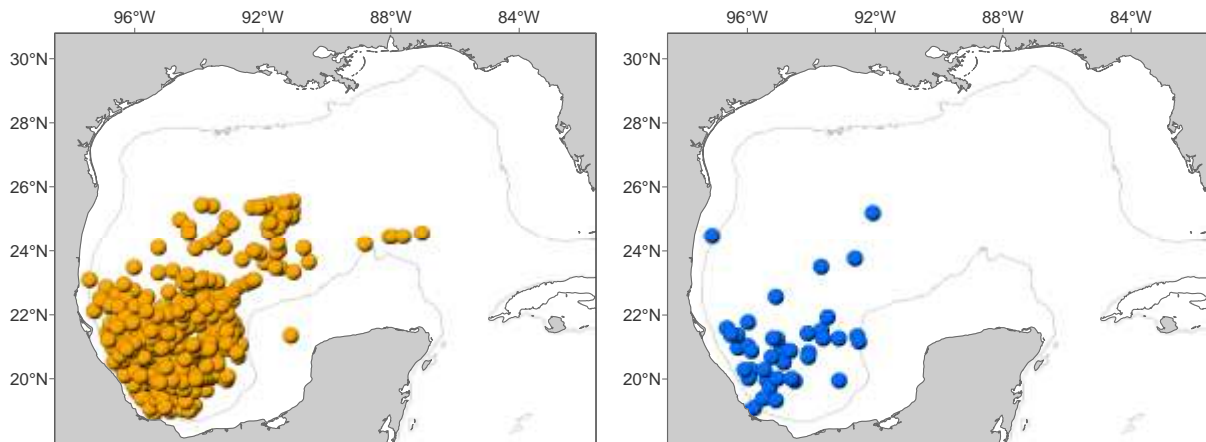


Figura 17. Distribución espacial de la captura incidental de atún aleta azul realizada por la flota comercial palangrera mexicana en el Golfo de México entre 1994 y 2007 diferenciada por talla a) individuos por encima de los 200 cm y b) individuos por debajo de los 200 cm.



#### 6.4. Influencia de la dinámica oceanográfica en la distribución temporal de las capturas

La descomposición de la serie temporal de captura indicó que las dos primeras CP explicaron el 56.4% de la variabilidad total de la serie, contribuyendo la primera componente (CAPCP1) con el 37.4%. Los dos componentes mostraron un comportamiento armónico, CAPCP1 presentó un periodo de oscilación anual, mientras que la componente 2 (CAPCP2) de aproximadamente seis meses (Fig. 18). Se consideró a CAPCP1 como la componente más representativa de la serie de capturas (Fig. 19).

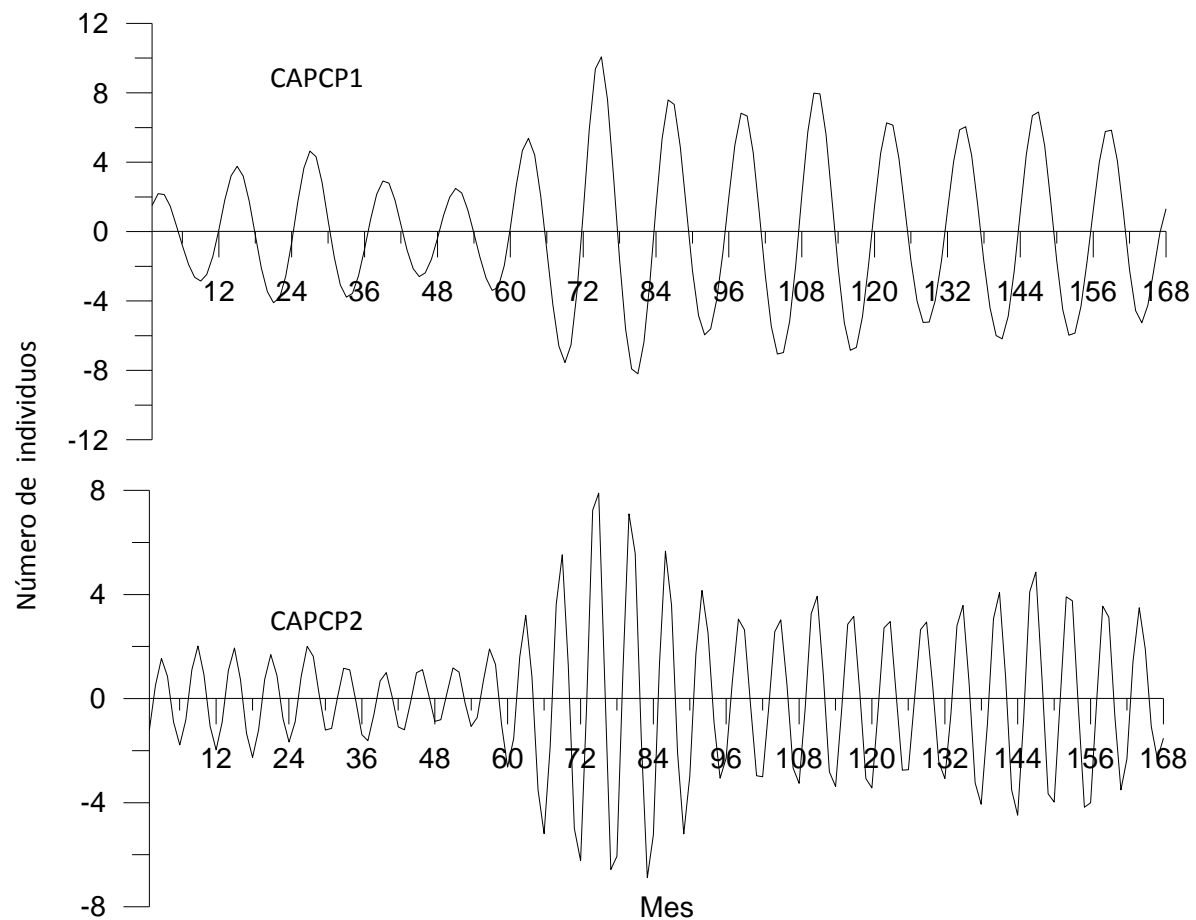


Figura18. Primeras dos componentes principales de la serie de tiempo de capturas (1994-2007). La primera componente (CAPCP1) explicó 37.4% de la variabilidad total de la serie de tiempo, la segunda (CAPCP2) el 19%

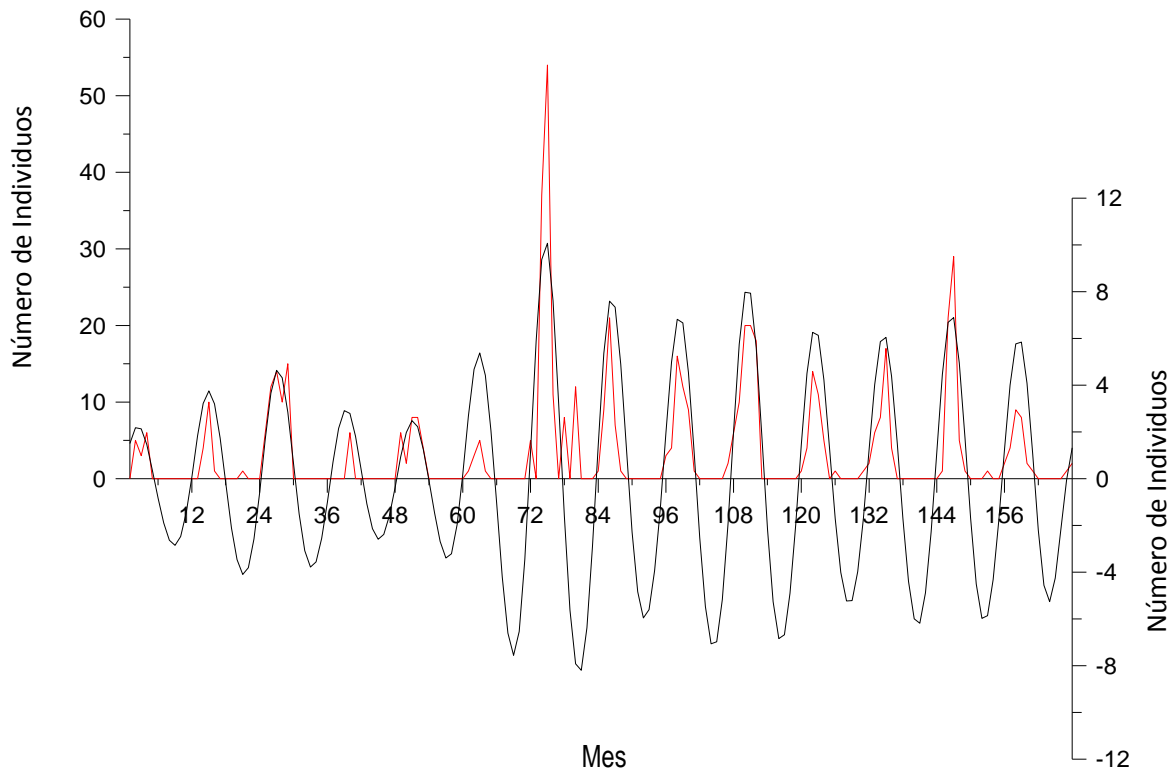


Figura 19. Captura mensual de AAZ para el periodo 1994-2007. Distribución temporal de las capturas (línea roja) y componente principal cíclica (estacional) de la serie de capturas mensuales (CAPCP1) (línea negra).

La componente estacional de las capturas CAPCP1 mostró una correlación significativa inversa con la TSM ( $r = 0.86$ ,  $g.l = 166$ ,  $p < 0.0001$ ). Lo que significa que la dinámica de TSM del Golfo de México explicó un 74% de la variabilidad estacional de la captura incidental del atún aleta azul (Fig. 20).

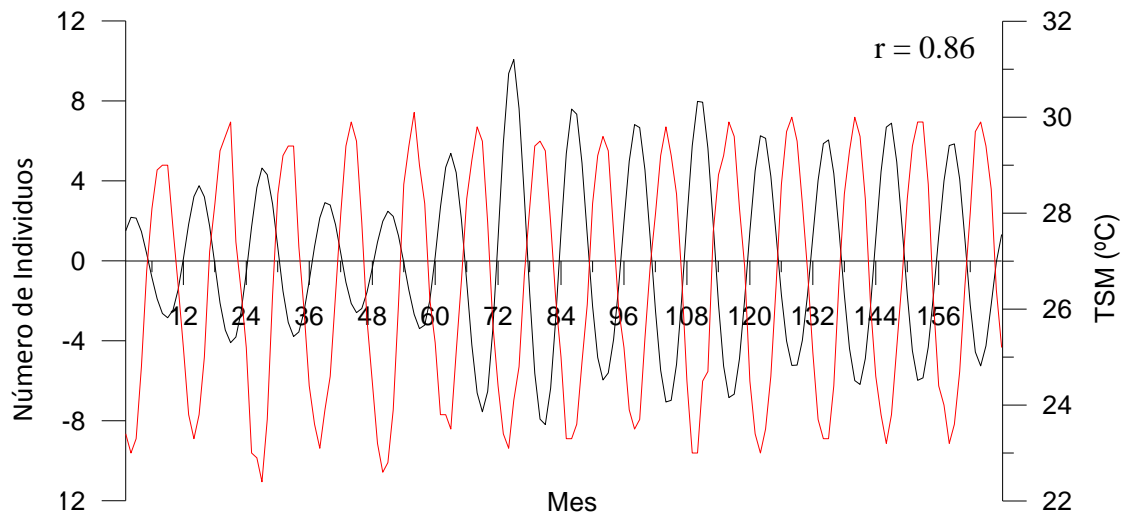


Figura 20. Valores medios mensuales de temperatura superficial del mar (TSM) (rojo) y valores de la componente principal cíclica (estacional) de la serie de capturas mensuales de atún aleta azul (CAPCP1) (negro) en el Golfo de México (30.5°N, 98°O, 18°O, 18°N) entre 1994-2007.

Las series de tiempo de Chl-a calculadas para toda la cuenca y para el polígono oceánico establecido (Fig. 21), mostraron comportamientos diferentes, la serie temporal del polígono presenta una marcada estacionalidad, que no es apreciable en la serie de toda la cuenca (Fig. 22).

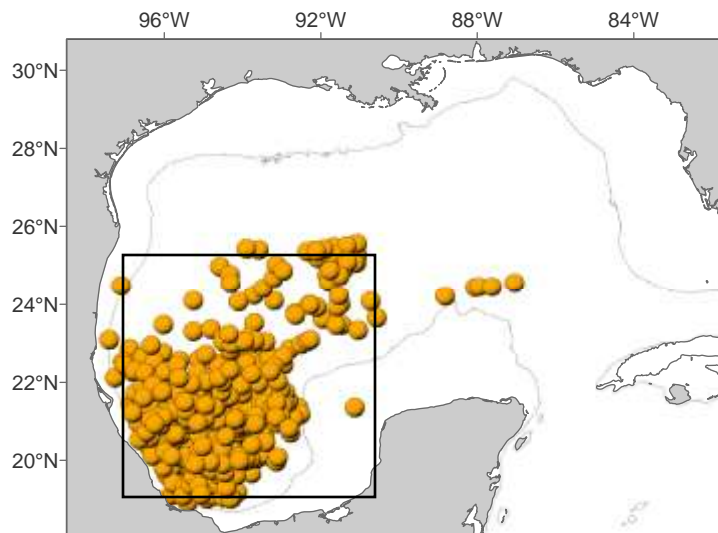


Figura 21. Polígono rectangular (línea negra) que contiene el 95% de las posiciones geográficas de captura de AAZ (marcas amarillas) en aguas mexicanas del Golfo de México entre 1994-2007.

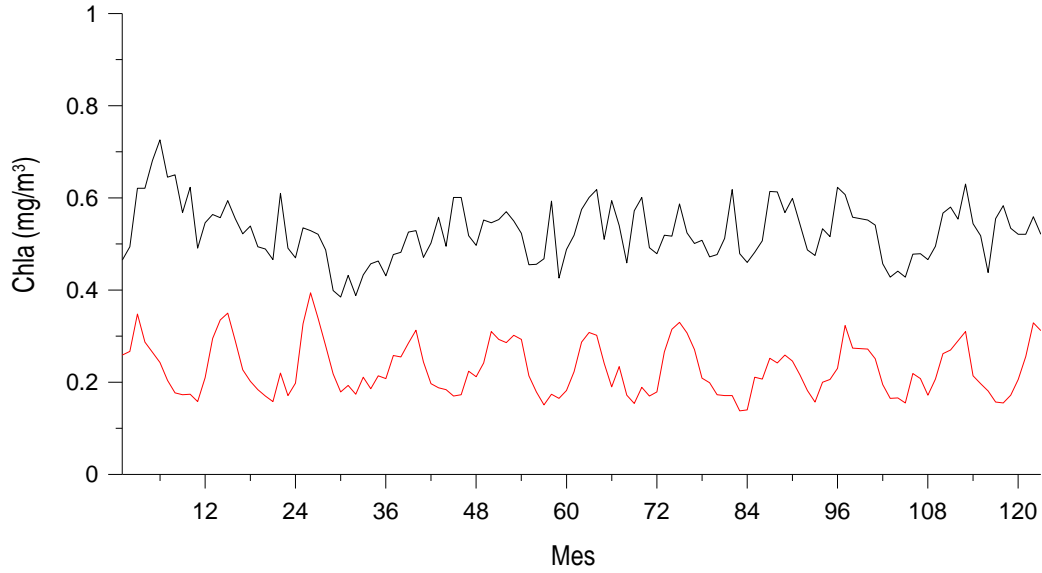
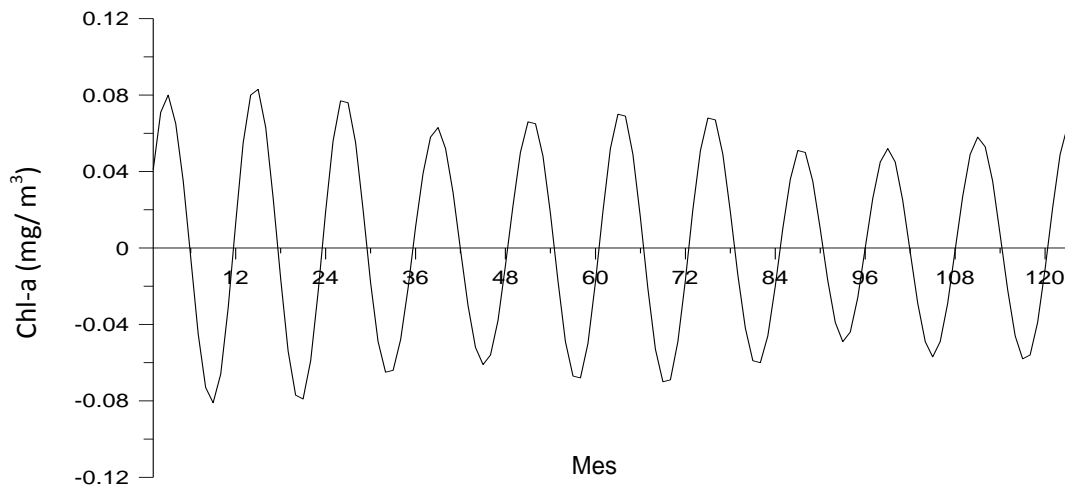


Figura 22. Series de tiempo de concentración media mensual de Chl-a (Octubre 1997-Diciembre 2007) para toda la cuenca del Golfo de México (línea negra) y para un polígono en el que se realizaron el 95% de las capturas de AAZ, evitando al máximo área costera.

El ACP realizado a los datos del polígono de Chl-a indicó que las dos primeras componentes explicaron el 78.6 % de la variabilidad total de la serie de Chl-a, la primera componente (Chl-aCP1) contribuyó con el 71.5 % y mostró un carácter marcadamente estacional (Fig. 23).



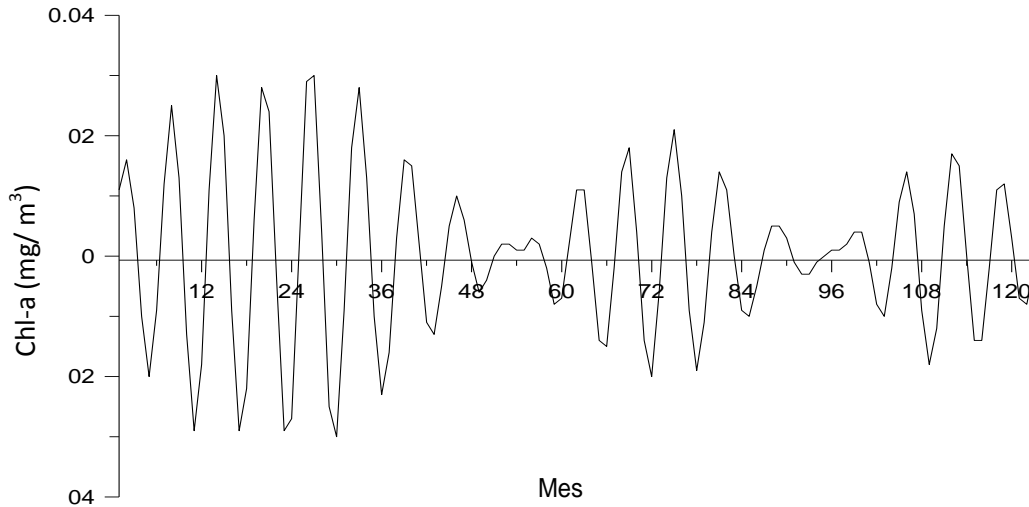


Figura 23. Primeras dos componentes principales de la serie de tiempo Chl-a (1994-2007). La primera componente (ChlCP1) explicó el 71.5 % de la variabilidad total de la serie de tiempo, la segunda (ChlCP2) el 7.1%.

La correlación entre esta serie y la componente principal estacional (CAPCP1) de la captura de AAZ fue significativa ( $r = 0.89$ ,  $g.l = 122$ ,  $p < 0.0001$ ) con un desfase de tres meses entre el pico productivo y el máximo anual de capturas, la variabilidad de la concentración de clorofila a, explicó el 79.3 % la variabilidad estacional de las capturas tres meses después (Fig. 19).

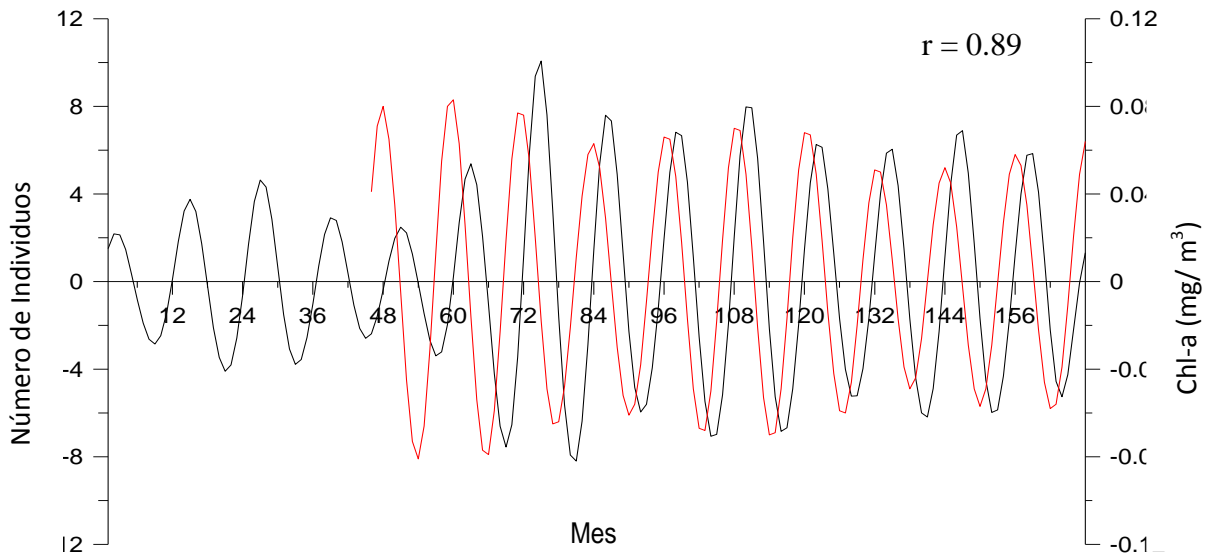


Figura 24. Variabilidad de la componente principal uno de la concentración de Chl-a (color rojo) y valores de la componente principal cíclica (estacional) de la serie de capturas mensuales de atún aleta azul (CAPCP1) (negro) en el Golfo de México (30.5°N, 98°O, 18°O, 18°N) entre 1994-2007.

No se apreciaron correlaciones significativas entre la serie de anomalías y la distribución temporal de las capturas de AAZ, sin embargo, se observó un cambio en la tendencia general de las anomalías térmicas, a partir del año 2002 la cuenca experimentó una fase más cálida que el resto de la serie, de hasta  $0.63^{\circ}\text{C}$  de diferencia. El periodo comprendido de finales de 1999 a mediados de 2001, fue una transición hacia la fase predominantemente cálida. Precisamente en esta transición fue donde se registraron las mayores capturas de AAZ (Fig. 25).

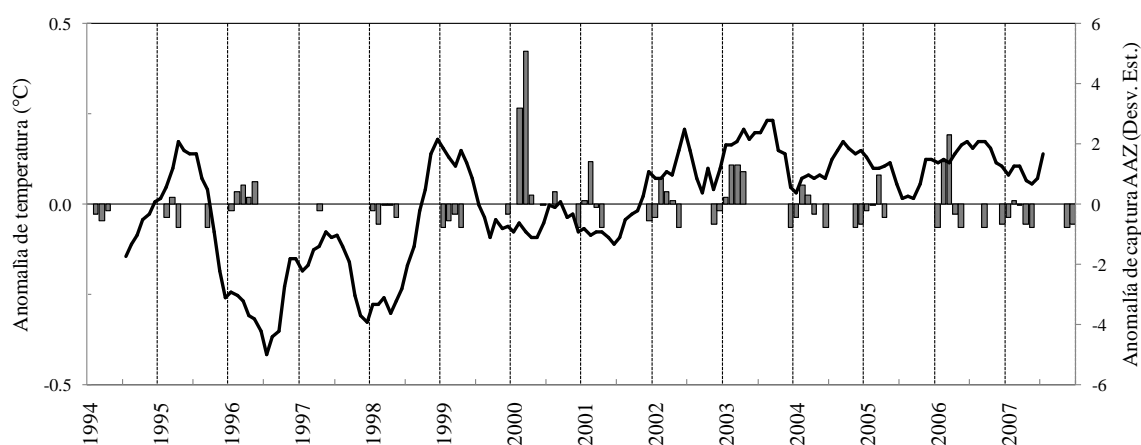


Figura 25. Evolución temporal de las anomalías del promedio de TSM ( $^{\circ}\text{C}$ ) para la cuenca del Golfo de México (línea) y anomalías de las capturas de atún aleta azul ( $\pm\text{DE}$ ) de la flota palangrera mexicana (1994-2007).

## 6.5. Preferencias oceanográficas

### 6.5.1. Temperatura superficial del mar

En la figura 26 se aprecia un ejemplo tipo de una secuencia de imágenes de TSM con las posiciones de captura mensual superpuestas (secuencia completa ver ANEXO I).

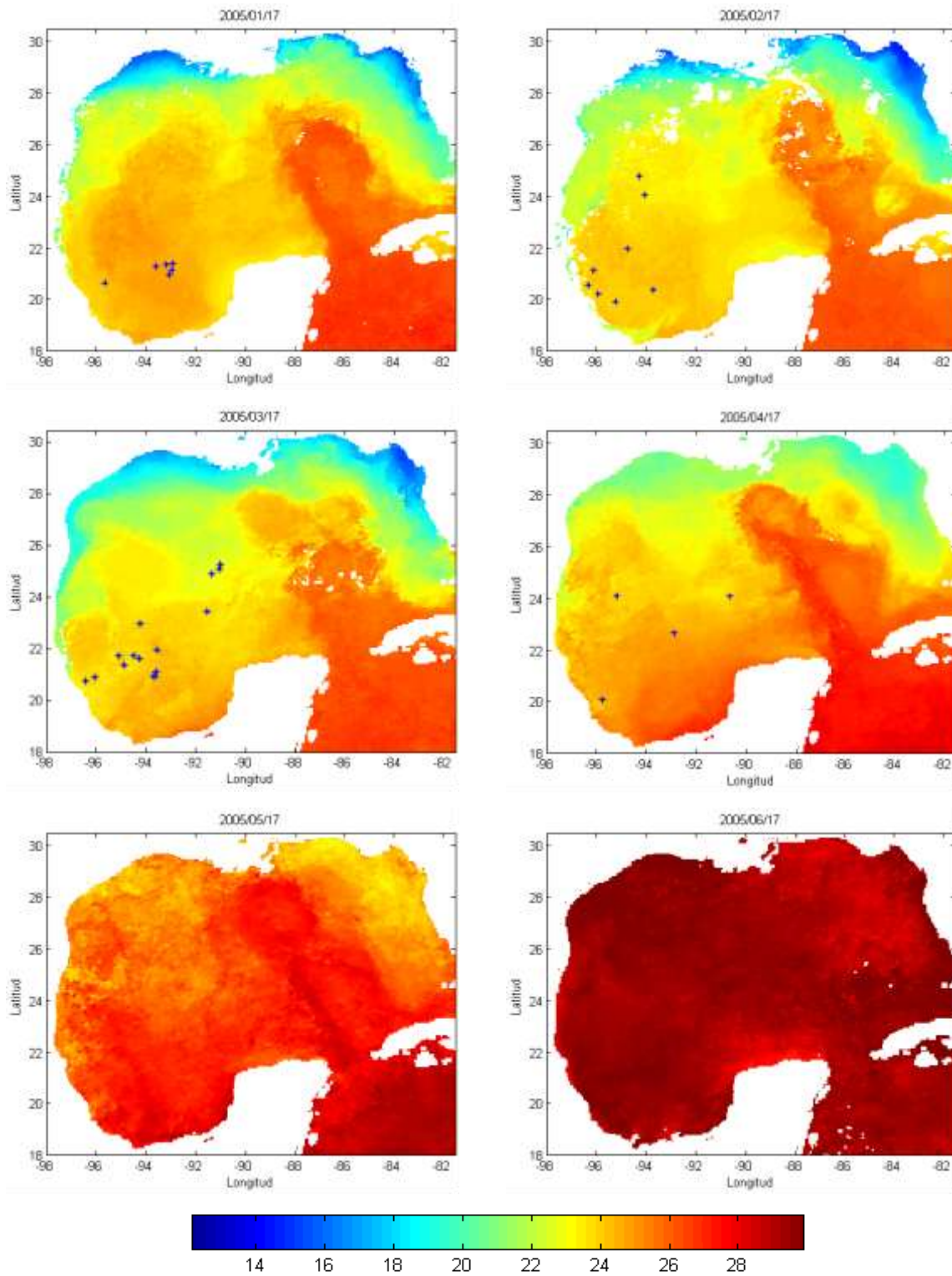


Figura 26.- Composiciones mensuales de TSM (°C) correspondientes a los meses de enero a junio del 2005, derivadas del sensor AVHRR y posiciones de lances con captura positiva de atún aleta azul (puntos azules).

El intervalo de TSM dentro del cual se realizaron las capturas de aleta azul en aguas mexicanas del Golfo de México fue de 21 a 30 °C, con una TSM promedio asociada a las posiciones de captura, en adelante TSM preferencial, de  $24.6 \pm 1.47$  °C. La mayoría de los puntos de captura de AAZ (86.5 %) se localizaron en áreas entre los 22 y los 26°C, con una preferencia por aguas entre 23-24°C (28.4%) y 24-25°C (26.5%) (Fig. 27).

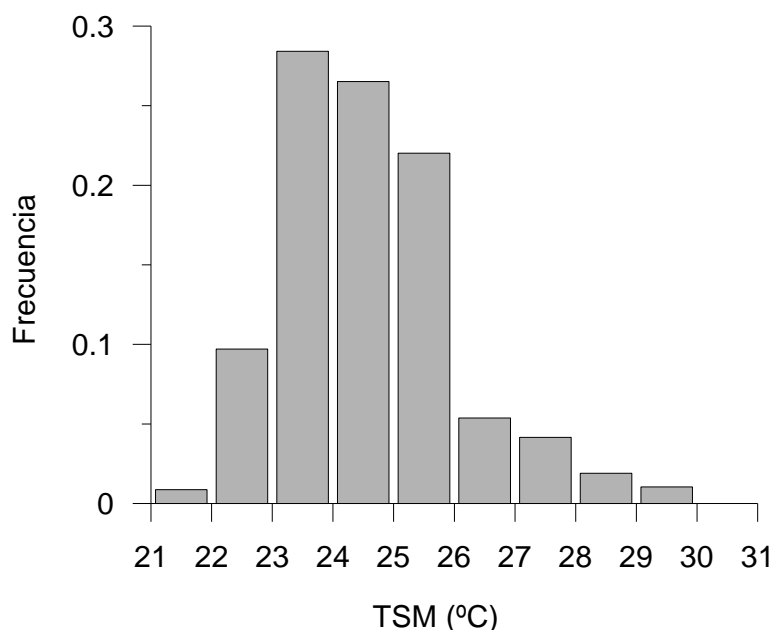


Figura 27.- Distribución de las capturas de atún aleta azul en aguas mexicanas del Golfo de México (1994-2007) por clases de TSM (1°C).

Las preferencias térmicas del AAZ presentaron una marcada estacionalidad, con ciclos anuales definidos (Fig. 28). Se observó una relación proporcional directa entre la el promedio de TSM preferencial y la temperatura promedio del Golfo de México ( $r = 0.927$ ,  $g.l = 69$ ,  $p < 0.0001$ ); la variabilidad de la TSM preferencial esta explicada en un 86% por la temperatura promedio que tenga la cuenca en un determinado momento.



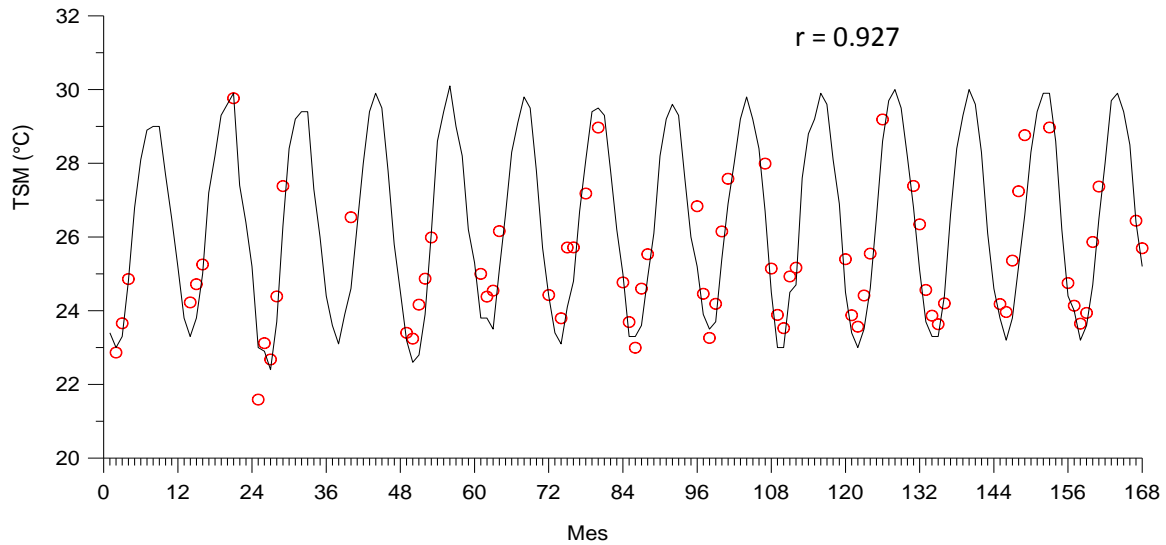


Figura 28. Variabilidad de la TSM promedio asociada a las localizaciones de captura de atún aleta azul (desde ahora también denominada TSM preferencial) (círculos rojos) y la TSM promedio de la cuenca.

Las mayores capturas se produjeron cuando el AAZ mostró preferencia por aguas más frías (entre 23 y 25 °C), reduciéndose a medida que se calienta su hábitat (Fig. 29). Los AAZ experimentaron preferencias térmicas (Tabla 4) significativamente diferentes entre meses ( $F_{9, 567} = 125.51$ ,  $p < 0.001$ ), sin efecto significativo debido al sexo de la captura (hembras-machos) ( $F_{5, 422} = 0.1$ ,  $p < 0.05$ ), ni a su estado de desarrollo sexual (juveniles-adultos) ( $F_{5, 527} = 3.67$ ,  $p < 0.001$ ). Para este análisis solo se consideraron los seis primeros meses de la serie (93% de las capturas) en los que sí hubo proporción de los atributos. Las pocas capturas que se produjeron en verano (junio y agosto), asociadas a altas temperaturas, fueron de individuos juveniles predominantemente (96.5 %,  $n=23$ ) y tuvieron lugar el mismo año (2000). Se observó un ajuste logarítmica negativo ( $r = 0.86$ ,  $g.l = 8$ ,  $p < 0.05$ ) entre la TSM preferencial y el numero de organismos capturados (Fig. 23 b).

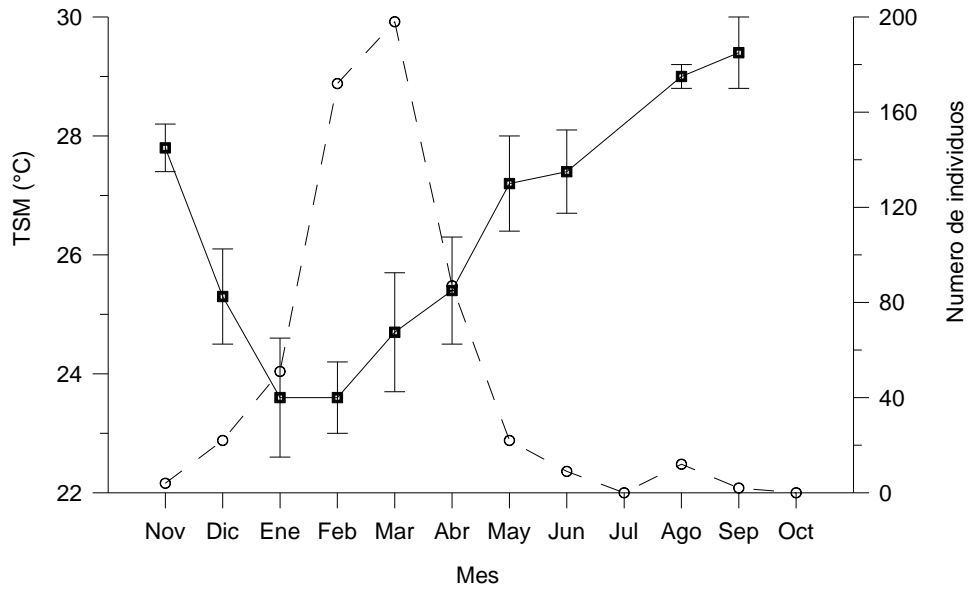


Figura 29. Variación intermensual del promedio de TSM preferencial (media  $\pm$  desviación estándar) línea continua, y captura total acumulada por mes en número de individuos línea discontinua.

### 6.5.2. Concentración de clorofila *a*

En la figura 30 se aprecia un ejemplo tipo de una secuencia de imágenes de Chl-*a* con las posiciones de captura mensual superpuestas (secuencia completa en ANEXO II).

Tabla 4. Promedio mensual de la TSM estimada por percepción remota, asociada a los puntos de captura de atún aleta azul en el Golfo de México. Para cada columna los subíndices indican grupos estadísticamente similares (Tukey)

MES	TSM preferencial (°C)				
	Captura total	Captura hembras	Captura machos	Captura juveniles	Captura adultos
Enero	23.6 ± 1.0 (n=51) <sub>a</sub>	23.5 ± 0.5 (n=7)	23.6 ± 1.0 (n=31)	24.5 ± 0.3 (n=3)	23.5 ± 1.0 (n=48)
Febrero	23.6 ± 0.6 (n=172) <sub>a</sub>	23.6 ± 0.6 (n=34)	23.5 ± 0.6 (n=99)	23.1 ± 0.6 (n=13)	23.6 ± 0.6 (n=159)
Marzo	24.7 ± 1.0 (n=198) <sub>b</sub>	24.8 ± 1.0 (n=78)	24.7 ± 1.1 (n=83)	24.6 ± 1.0 (n=9)	24.7 ± 1.0 (n=189)
Abril	25.4 ± 0.9 (n=87) <sub>c</sub>	25.5 ± 0.9 (n=34)	25.2 ± 0.9 (n=41)	25.9 ± 0.9 (n=13)	25.3 ± 0.9 (n=74)
Mayo	27.2 ± 0.8 (n=22) <sub>d</sub>	27.2 ± 0.9 (n=12)	27.2 ± 0.7 (n=9)	-	27.2 ± 0.8 (n=21)
Junio	27.4 ± 0.7 (n=9) <sub>d</sub>	27.3 ± 0.5 (n=4)	27.5 ± 1.0 (n=5)	27.2 ± 0.3 (n=8)	-
Julio	-	-	-	-	-
Agosto	29.0 ± 0.2 (n=12) <sub>e</sub>	-	29.0 ± 0.2 (n=10)	29.0 ± 0.2 (n=12)	-
Septiembre	29.4 ± 0.6 (n=2) <sub>e</sub>	-	-	-	-
Octubre	-	-	-	-	-
Noviembre	27.8 ± 0.4 (n=3) <sub>d</sub>	-	-	-	27.2 ± 0.7 (n=3)
Diciembre	25.3 ± 0.8 (n=19) <sub>bc</sub>	-	25.3 ± 0.9 (n=13)	25.3 ± 0.5 (n=3)	25.3 ± 0.8 (n=17)

El promedio mensual de la TSM asociada a las puntos de captura experimento diferencias significativas entre meses (F (9, 567)=125.51, p<<0.001, ANOVA). Sexo, desarrollo (incluir).

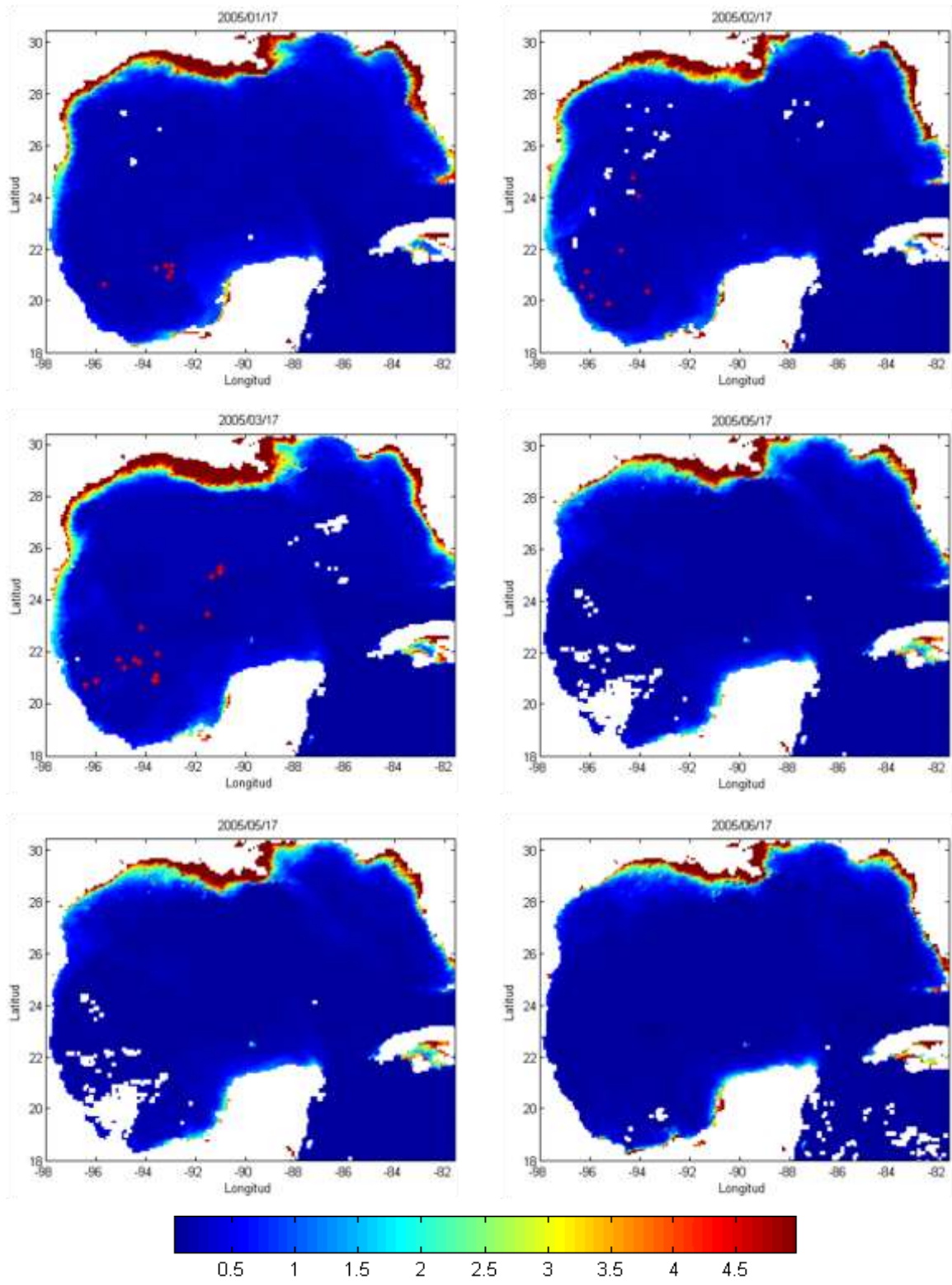


Figura 30.- Composiciones mensuales de concentración de clorofila *a* ( $\text{mg m}^{-3}$ ) del sensor SeaWiFS y posiciones de lances con captura positiva de atún aleta azul (puntos rojos) para el periodo enero-junio de 2005.

Se consideró como aberrantes aquellos datos por encima de  $1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  y por tanto fueron excluidos del análisis, lo anterior considerando los bajos niveles de Chl-a reportados para la zona oceánica del Golfo de México (Müller-Karger *et al.*, 1991), a la precisión de las medidas satelitales (McClain *et al.*, 2004) y a posibles errores en la identificación de los individuos capturados por parte de los observadores a bordo. El 97% de las capturas se produjeron en aguas con una Chl-a inferior a este límite. La mayoría de las posiciones de captura (69%) se situaron en aguas con bajas concentraciones superficiales de clorofila ( $0.10\text{-}0.25 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ), con una marcada preferencia por  $0.15\text{-}0.20 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  (39%) (Fig. 31). La Chl-a media asociada a los puntos de captura para todo el periodo de estudio fue de  $0.21 \pm 0.15 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

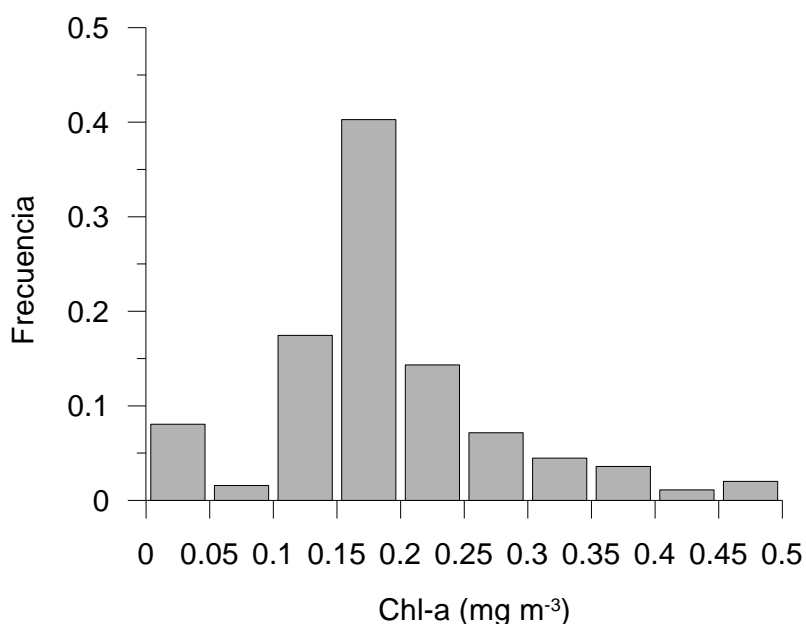


Figura 31. Distribución de las capturas de AAZ por clases de concentración de clorofila a ( $0.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) en el Golfo de México (1994-2007).

Al igual que en el caso de la TSM, el AAZ experimentó una variación temporal en las preferencias de Chl-a, con promedios mensuales mínimos de  $0.05$  y máximos entorno a  $0.35 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Sin embargo, la temporalidad de estas variaciones no fue tan marcada como en la TSM (Fig. 32).

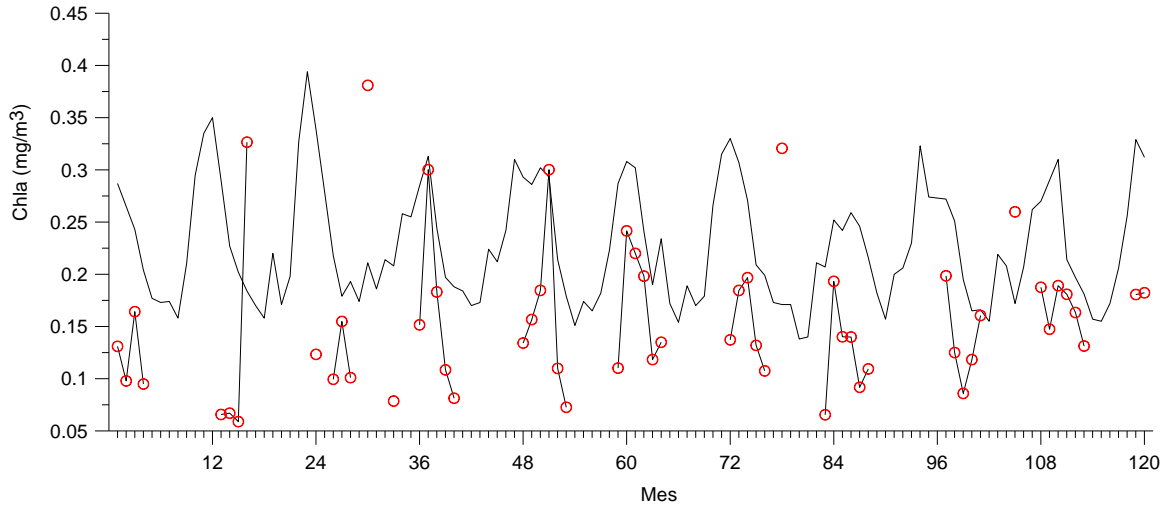


Figura 32. Variabilidad del promedio mensual de la Chl-a en los puntos de captura (círculos rojos) y del promedio de Chl-a para el polígono definido el apartado series temporales de este trabajo.

### 6.5.3. Batimetría

Las capturas de AAZ se produjeron a lo largo de todo el dominio batimétrico (Fig.33), sin embargo el AAZ mostró una fuerte preferencia por aguas oceánicas, únicamente el 1.3% de las capturas se produjeron sobre la plataforma continental (Fig. 34).

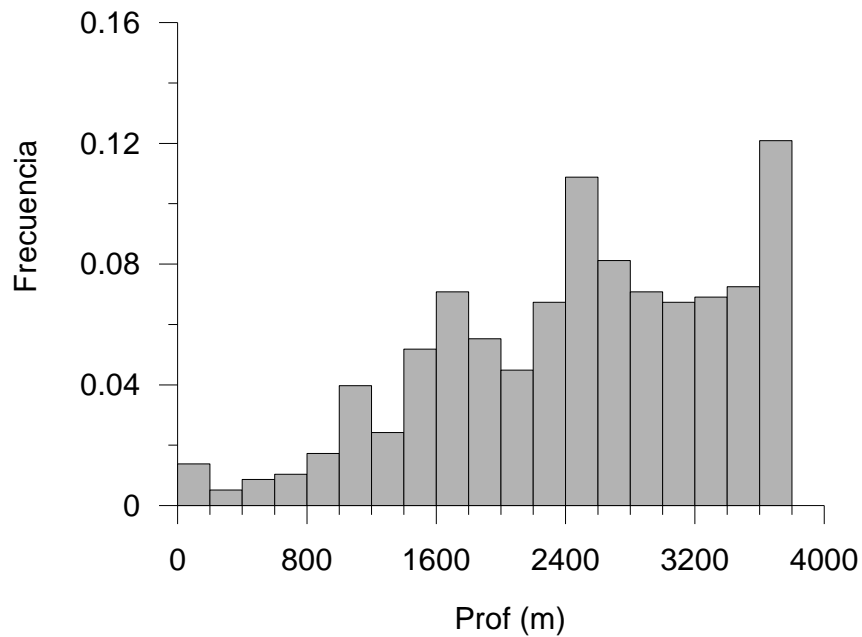


Figura 33. Distribución de las capturas de atún aleta azul por clases de perfil batimétrico (200 m) en aguas mexicanas del Golfo de México (1994-2007).

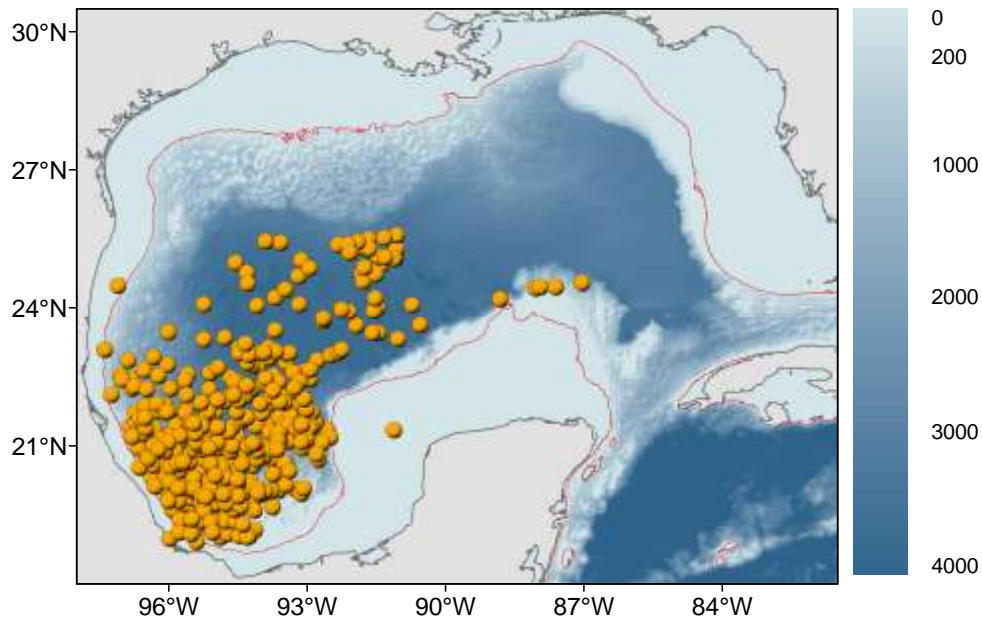


Figura 34. Distribución de las posiciones de captura incidental atún aleta azul por la flota palangrera mexicana que faeno en la ZEE mexicana del Golfo de México de 1994 a 2007 superpuestas sobre un perfil batimétrico de ETOPO 2v2. La línea roja representa la isobata de 200 m.

## 7. DISCUSIÓN

La utilización de datos derivados de la pesca comercial, aunque sometidos a un sesgo derivado de la elección de las áreas de pesca, constituyen grupos de datos sobre la distribución de una especie disponibles de bajo costo (Mugo *et al.*, 2010) y de extensión geográfica y temporal relevantes. Datos de captura por unidad de esfuerzo (CPUE) han sido ampliamente utilizados en pesquerías como índices relativos válidos de la ocurrencia y abundancia, máxime cuando no se dispone de otro tipo de información (Lehodey *et al.*, 1998; Mugo *et al.*, 2010).

Para la realización de este trabajo no se tuvo acceso a datos de esfuerzo de pesca, pero la amplitud temporal de la serie de capturas, la precisión de la posición de captura individual, la cobertura total de todos los viajes de pesca y la información biológica

pormenorizada de cada individuo capturado justificaron sobradamente aproximar la ocurrencia de AAZ a través de sus capturas.

Las capturas registradas en aguas mexicanas fueron inferiores a las registradas en aguas norteamericanas para periodos similares; el número total de individuos capturados entre 2007 y 2008 (Beerkircher *et al.*, 2009) prácticamente fue igual al total capturado en aguas mexicanas para el periodo del 1994 al 2007. Esta diferencia se reduce en términos de CPUE; mientras que Teo y Block (2010) registraron una CPUE promedio superior a 0.4 individuos por cada 1000 anzuelos (ind/1000 anz) para los meses de abril y mayo (1992-2005) en aguas norteamericanas, el registro más alto del que se pudo disponer a una escala mensual para aguas mexicanas fue de 0.1 ind/1000 anz en marzo de 1995 (ICCAT Bases de datos estadísticas). Independientemente de estas comparaciones preliminares de CPUE, es necesario disponer de datos de esfuerzo relativos al AAZ para poder evaluar correctamente, en lo sucesivo, el impacto de la captura incidental en aguas mexicanas.

La mayor parte de la captura estuvo compuesta por individuos adultos, de acuerdo con el criterio vigente que considera una talla de madurez para el stock oeste de 200 cm de LF (Mather *et al.*, 1995), y un poco más de 10%, de individuos juveniles (primera clase de edad 110-120 cm). Proporciones muy similares fueron descritas por Beerkircher *et al.* (2009) en aguas norteamericanas. La presencia de individuos juveniles puede deberse tanto a una posible sobreestimación de la talla de madurez del stock oeste (Schaefer, 2001; Knapp *et al.*, 2010), como a un patrón de comportamiento hogareño repetitivo, bajo el cual los individuos jóvenes aprenden de los adultos las rutas migratorias a áreas con condiciones óptimas de puesta (Fromentin y Powers, 2005). Esto concuerda con registros de una amplia gama de tallas en bancos de reproductores migrantes en el Mediterráneo (Ravier y Fromentin, 2004).

La captura incidental del AAZ en aguas mexicanas del Golfo de México presentó una marcada estacionalidad, produciéndose principalmente de noviembre a mayo, y concentrándose en los meses de febrero y marzo. Al contrastar estos resultados con lo registrado en aguas norteamericanas, se observó una coincidencia en el intervalo de presencia del AAZ en la cuenca (Block *et al.*, 2005; Galuardi *et al.*, 2010), pero los meses



de mayor ocurrencia: abril y mayo (Teo y Block, 2010), estuvieron desfasados un mes, respecto de la ocurrencia máxima en aguas mexicanas.

Los meses de máxima ocurrencia de AAZ en aguas norteamericanas coinciden con su temporada pico de reproducción, estimada entre abril y junio (Mather *et al.*, 1995; Schaefer, 2001; Block *et al.*, 2005). A pesar de que no se dispone de información que relacione los picos de ocurrencia en aguas mexicanas con la actividad de puesta, es probable que exista la misma relación. Bajo este escenario el desfase temporal de la ocurrencia entre las dos áreas puede deberse a que el AAZ encuentra condiciones favorables para la puesta antes en aguas mexicanas. En el Mediterráneo, Heinisch *et al.* (2008) observaron un patrón espacio-temporal de maduración gonádica, con un pico inicial a mediados de mayo en la parte este y durante junio y julio en la parte central y oeste, correlacionado con la dinámica de calentamiento de la cuenca. En el caso del Golfo de México el calentamiento se produce latitudinalmente de sur a norte, por lo que la barrera térmica de puesta (entorno a los 24°C) se alcanzada antes en aguas mexicanas.

En cuanto a las particularidades de las series de captura de AAZ, es importante señalar que se reportaron capturas esporádicas de AAZ en meses atípicos, septiembre de 1995, junio y agosto 2000, períodos a lo largo de los cuales no se registraron capturas en aguas norteamericanas (Teo y Block, 2010). La captura registrada de estos meses estuvo compuesta por individuos de talla juvenil, por lo que cabe la posibilidad de que se trate de errores de identificación a bordo, ya que la diferenciación entre juveniles de AAZ y adultos de atún aleta amarilla, no es sencilla. De cualquier forma, estos eventos fueron puntuales y sin trascendencia evidente sobre la dinámica de distribución de la especie en el Golfo de México considerando la serie de tiempo completa.

Interanualmente se observó una alta variabilidad de la captura de AAZ. Se apreciaron dos periodos claramente diferenciados, el primero de 1994 a 1999 con niveles bajos a moderados de captura y el segundo periodo de 2000 a 2007, con capturas sensiblemente mayores que las del primer periodo. El año 2000 constituyó el punto de inflexión entre los dos periodos mencionados, y presentó el mayor nivel de captura de toda la serie temporal.

El origen de éstas diferencias de captura, en principio están relacionadas con la dinámica del esfuerzo pesquero de la flota, no contamos con datos de la CPUE incidental de AAZ, pero el esfuerzo promedio anual dirigido al atún aleta amarilla durante el segundo periodo duplicó al ejercido entre 1994 y 1999 (*ver* Ramírez-López, 2009), sin embargo, la dinámica del esfuerzo no explica en modo alguno la captura máxima del año 2000, ya que se ejerció el mismo esfuerzo pesquero en 1999 y 2000, pero se capturaron diez veces más individuos de AAZ en éste último. Teo y Block (2010) observaron fuertes incrementos de la CPUE en aguas norteamericanas precisamente a partir del año 2000, y sugirieron, después de considerar como causas posibles los cambios en los equipos de pesca o el incremento de la biomasa de reproductores, la posibilidad de que la razón principal haya sido un aumento en el esfuerzo dirigido hacia la especie. Sin embargo, no consideraron forzamientos ambientales sobre la dinámica de las capturas, tales como eventos climáticos extremos de gran escala. El Niño de 1997-1998 y su impacto sobre el calentamiento del Golfo de México en 1999 (Manzano-Saravia y Salinas-Zabala, 2008), puede ser una explicación plausible de las bajas capturas registradas en ese año.

La ocurrencia del AAZ en el Golfo de México se relaciona principalmente con motivos reproductivos. Su distribución dependerá del balance entre las condiciones ambientales requeridas por los reproductores para realizar la puesta y las requeridas por las larvas para su crecimiento y supervivencia (Chambers, 1997; Teo *et al.*, 2007a). La dinámica térmica del Golfo de México influyó significativamente en la distribución del AAZ. La TSM mostró periodos cálidos en verano y fríos en invierno muy marcados, indicando un ciclo anual recurrente, en coincidencia con lo descrito por Müller-Karger *et al.* (1991) y Zavala-Hidalgo *et al.* (2003). El análisis de componentes principales de las capturas de AAZ permitió aislar el patrón estacional recurrente relacionado con la dinámica térmica. Esta relación fue de tipo inverso proporcional; la captura tendió a incrementarse con el inicio del ciclo de enfriamiento y a decrecer con el inicio del ciclo de calentamiento. Los picos temporales de ocurrencia de AAZ se relacionaron con temperaturas promedio en torno a los 24°C, que coincide con la barrera térmica estimada para la puesta (Mather *et al.* 1995; Schaefer 2001; García *et al.* 2005).

A pesar de que no se apreciaron relaciones estadísticas concluyentes entre la anomalía mensual de TSM y la captura de AAZ, vale la pena destacar que se observó un incremento de la TSM media de la cuenca (anomalías positivas) a partir de mediados de 1998 y 1999, y que éste cambio de tendencia de las anomalías coincidió temporalmente con el cambio de tendencia observado en la captura anual de AAZ, es decir, el incremento de la TSM se relacionó con un aumento de las capturas, el diferencial media de temperatura entre principio de los 90 y mediados de la década del 2000 fue de aproximadamente  $0.64^{\circ}\text{C}$ . Esta relación concuerda con lo descrito por Bridges et al. (2009) en áreas de puesta del Mediterráneo, sin embargo advierten también, que este calentamiento podría reducir la ventana de oportunidad de reproducción, porque las condiciones óptimas de puesta se alcanzarían antes, ocasionando que el AAZ perciba tarde el umbral térmico inductor del desarrollo gonádico (Fromentin y Powers, 2005; Heinisch *et al.*, 2008).

Por otro lado, el adelanto sistemático observado del mes inicial de ocurrencia del AAZ en aguas mexicanas podría estar relacionado también con el calentamiento descrito y la modificación de la ventana reproductiva. No obstante que la temporalidad de ocurrencia al área de puesta se mantiene prácticamente constante (Bridges *et al.*, 2009), y de que no se han producido cambios importantes en las rutas migratorias desde hace cientos de años (Ravier y Fromentin, 2001), se han advertido cambios de comportamiento a escalas temporales más finas. Dufour et al. (2010) observaron cambios en la temporalidad y distribución espacial del AAZ durante sus migraciones tróficas en el océano Atlántico noreste asociados a un cambio de régimen climático. Determinaron que a medida que las anomalías térmicas son más positivas las capturas ocurren antes y se extienden por más tiempo. El adelanto promedio de la ocurrencia a lo largo de 25 años fue de aproximadamente 20 días.

Recientemente Muhling et al. (2011) propusieron escenarios térmicos futuros en el Golfo de México, para estudiar los efectos potenciales del cambio climático sobre la distribución del AAZ. Sus escenarios indicaron que el calentamiento progresivo de la cuenca podría provocar un adelanto temporal y una reducción de la ventana térmica favorable para la puesta. En menos de un siglo se produciría un aumento de las condiciones favorables a principios de la primavera (marzo) frente al escenario actual donde las

condiciones favorables predominan en el Golfo a finales de la primavera (mayo); además la duración de este escenario favorable se reduciría sensiblemente.

Considerando todo lo anterior, parece que solo parte del adelanto de la ocurrencia podría explicarse como una respuesta adaptativa para asegurar el éxito reproductivo ante el calentamiento de la cuenca. El adelanto observado en aguas mexicanas es sensiblemente mayor (90 días en 14 años) respecto a procesos homólogos como el descrito por Dufour *et al.* (2010) y la variabilidad potencial de las condiciones térmicas de la cuenca (Muhling *et al.* 2011). Las preferencias térmicas no indicaron que el adelanto se correspondiera con el acceso a la misma TSM de entrada previa a alcanzar del umbral térmico. Por lo que es probable que parte de esta variabilidad dependa de la distribución espacio-temporal del esfuerzo pesquero sobre el atún aleta amarilla. Razón por la cual es muy importante realizar análisis integrales que consideren la dinámica del esfuerzo para comprender de forma amplia las interacciones que condicionan la distribución del aleta azul en aguas mexicanas.

La concentración de clorofila *a* también se correlacionó significativamente con la distribución del AAZ en la cuenca. La distribución temporal de las capturas presentó una relación directa robusta y recurrente con la concentración de clorofila con un desfase de 3 meses. Varios autores han descrito la preferencia del AAZ en fase reproductiva por aguas con bajas concentraciones de clorofila (García *et al.*, 2005; Teo *et al.*, 2007b), ya que la baja productividad podrían reducir la depredación sobre huevos y larvas (Teo *et al.*, 2007b). Druon (2010) sin embargo, consideró que estos bajos niveles de clorofila podrían relacionarse con la presencia de concentraciones importantes de zooplancton, principalmente copépodos, base de la dieta de las larvas de AAZ en sus primeros estadios (Fromentin y Powers, 2005). Considerando que algunos modelos de cadenas tróficas consideran períodos de 1 a 1.5 meses entre los picos fitoplanctónicos y el establecimiento de comunidades de zooplancton (Margalef, 1967,1969; Gómez, 1996; Márquez, 2009), y que las concentraciones máximas de clorofila observadas en el área de estudio se produjeron entre diciembre y febrero, lo cual concuerda con el patrón general de distribución de clorofila para toda la cuenca del Golfo (Müller-Karger *et al.*, 1991), sería razonable encontrar máximos de zooplancton entre febrero y abril. Esta temporalidad coincide con el patrón general de distribución del AAZ definido en este estudio.

Espacialmente el AAZ presentó una amplia distribución, que incluyó gran parte del área oceánica de la porción oeste del Golfo de México, lo cual coincide con el patrón espacial de ocupación propuesto por Block et al. (2005) (Fig. 35b), basado en datos de posición de marcas satelitales y datos de captura de la flota palangrera norteamericana. En el presente estudio, se observó una importante agregación de posiciones de captura frente a la costa central de Veracruz (Fig. 35a). Parte de esta dinámica parece estar relacionada con la dinámica de distribución del esfuerzo pesquero (*ver* Solana-Sansores y Ramírez-López 2006).

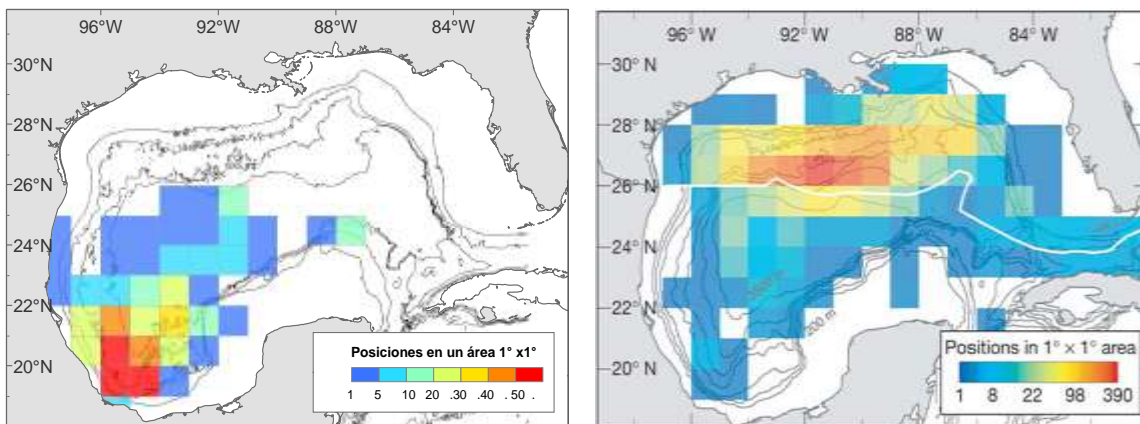


Figura 35. Posiciones observadas de AAZ en el Golfo de México por cuadrantes de 1° x 1° a) posiciones de captura incidental por la flota palangrera mexicana (1994-2007) y b) posiciones combinadas de marcas satelitales (1999-2004) y captura incidental por la flota palangrera norteamericana (1992 -2004) extraído de Block (2005).

En el patrón propuesto por Block et al. (2005) se puede observar cierta agregación en la misma área de las mayores capturas mexicanas (Fig. 35b), lo que sugiere que por alguna razón, el AAZ prefirió esa área y/o condiciones ambientales durante el periodo de ocurrencia. Esta convergencia espacial es muy sugerente, ya que proviene de fuentes distintas de datos, por un lado los derivados de la pesquería mexicana y por el otro los de seguimiento de marcas satelitales de individuos marcados en aguas norteamericanas. Cabe destacar también, el incremento relativo de la densidad de posiciones de captura en la parte central del extremo norte del área de estudio, que se correspondió con el límite sur-central del área de máxima densidad de posiciones descrita en Block et al. (2005) (Fig. 35a y b). Basados en los elementos coincidentes y complementarios descritos, existen dos regiones

principales de distribución del AAZ en el Golfo de México, sobre el talud frente a las costas de Veracruz y sobre el talud frente a las costas de Luisiana y Misisipi.

A pesar de que la distribución espacial fue temporalmente heterogénea a una escala fina, una vez agrupadas las capturas de diferentes años por mes de ocurrencia, se observó que la extensión ocupada fue consistente en el tiempo, con variaciones de la densidad de posiciones de captura. No se apreciaron por tanto, patrones geográficos que definieran la distribución, la cual parece estar más relacionada con las características ambientales dominantes en el área y los requerimientos específicos de la especie.

Los resultados de este estudio mostraron que durante su estancia en aguas mexicanas, el AAZ exhibió una preferencia por aguas sobre el talud continental, con temperaturas moderadas y bajas concentraciones de clorofila. Las preferencias térmicas del AAZ en aguas mexicanas se correspondieron con los requerimientos asociados a la actividad de puesta descritos en la literatura. Si bien se considera que el AAZ prefiere temperaturas por encima de los 24°C para realizar la puesta (Mather *et al.*, 1995; Schaefer, 2001; García *et al.*, 2005), el intervalo favorable para realizar esta actividad parece ser más amplio. Teo *et al.* (2007 b) observaron en el Golfo de México que el atún en fase de puesta ocurre en aguas con una TSM entre 23 y 30°C, prefiriendo temperaturas de 24 a 27 °C. Por su parte Alemany *et al.* (2010) a través de estudios de larvas en las Islas Baleares, estimaron que el atún inicia la puesta a temperaturas superiores a los 20.5°C y preferencialmente en el intervalo de 21.5 a 26.5°C.

En la parte mexicana del Golfo de México el AAZ se encontró en aguas con una temperatura superficial entre los 21 y 30° C; Teo y Block (2010) registraron el mismo intervalo para las capturas de la flota norteamericana. Mostró preferencia por áreas con temperaturas moderadamente cálidas entre los 23 y los 26°C. La temperatura preferencial presentó variaciones a lo largo de los meses, con un patrón recurrente interanual. Esta variabilidad se correlacionó de manera inversa con la ocurrencia. Los meses de mayor ocurrencia (febrero, marzo y abril) se correspondieron con una preferencia por temperaturas superficiales promedio entre los 23 y los 26°C. Durante su estancia en aguas mexicanas ocupó hábitats con características térmicas favorables de puesta aproximadamente de enero a mayo.

El AAZ manifestó una preferencia por aguas con baja concentración superficial de clorofila entre 0.10 y 0.25 mg m<sup>-3</sup>. Este comportamiento fue en gran medida similar a lo descrito por Teo et al. (2007 b) durante la fase reproductiva (0.1-0.16 mg m<sup>-3</sup>) y García et al. (2005), quienes determinaron una relación entre la distribución de larvas y bajas concentraciones de clorofila, sin reportar los niveles. Estas concentraciones son consistentes con la relación potencial entre la distribución de la actividad de puesta y la producción secundaria.

Durante el periodo de estudio el AAZ se distribuyó en aguas oceánicas, prefiriendo aguas sobre el talud continental, de nuevo coincidiendo con lo encontrado por Teo et al. (2007b). Es poco probable que este comportamiento se relacione con un uso directo del fondo, sino más bien con la preferencia por áreas con giros de mesoescala los cuales interactúan con la topografía del fondo (Teo *et al.*, 2007b). Varios trabajos (García *et al.*, 2005; Teo *et al.*, 2007b; Teo y Block, 2010) han reportado relaciones potenciales entre la distribución del AAZ en fase de puesta y giros de mesoescala. En el presente trabajo no se consideró este análisis debido a la resolución temporal de los datos de captura, a pesar de que una exploración visual sugiere cierta asociación recurrente con estructuras oceanográficas, tales como el giro ciclónico semipermanente de Campeche (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2003). Todos estos resultados refuerzan la hipótesis, en espera de análisis histológicos de tejidos reproductivos, que las aguas mexicanas constituyen un área potencial de puesta para el AAZ, principalmente entre febrero y abril.

La captura incidental de reproductores por la flota de palangre superficial en el Golfo de México puede suponer una amenaza potencial sobre el stock oeste, dada la drástica situación por la que atraviesa (Teo y Block, 2010). A pesar de que la pesquería mexicana no ha excedido la Captura Total Admisible (CTA ó TAC en inglés) anual asignada por la ICCAT (25 Tm), no se debe subestimar su impacto potencial sobre la población. En este estudio se caracterizó el hábitat preferencial del atún en aguas mexicanas del Golfo de México y se analizaron las coincidencias con las definiciones del hábitat potencial de puesta. Este conocimiento es fundamental para poder desarrollar estrategias de manejo efectivas de stocks bajo riesgo evidente de colapso generalizado, que reduzcan la

interacción entre la especie y la actividad de pesca considerando dimensiones espaciotemporales.

Entre las líneas prioritarias de trabajo futuras para subsanar las interrogantes surgidas de este estudio, se sugiere llevar a cabo estudios histológicos de tejidos reproductivos y de distribución de larvas de AAZ, para definir el hábitat esencial de reproducción-reclutamiento, así como la obtención de datos de distribución independientes de la pesca (por ejemplo usando marcas satelitales de archivo pop-up) y el desarrollo de modelos predictivos del hábitat esencial de puesta. Finalmente, los resultados de este estudio, evidencian la importancia del programa de observadores a bordo, la sistematización de la información del mismo por parte del Instituto Nacional de la Pesca y confirman la pertinencia de mantener el esfuerzo actual de seguimiento de la pesquería que tan valiosa información científica está generando.



## 8. CONCLUSIONES

Las series temporales largas, detalladas y sistemáticas de la captura incidental de atún aleta azul, *Thunnus thynnus*, de la flota palangrera mexicana, son una fuente de información válida para realizar inferencias acerca de su distribución y ocurrencia.

La captura incidental de atún aleta azul, *T. thynnus*, realizada por la flota palangrera mexicana entre 1994 y 2007 estuvo compuesta mayoritariamente por individuos adultos.

La ocurrencia del atún aleta azul, *T. thynnus*, tuvo lugar en la mayor parte de la Zona Económica Exclusiva mexicana del Golfo de México, principalmente de noviembre a mayo.

La distribución del atún aleta azul, *T. thynnus*, estuvo condicionada principalmente por la dinámica de la temperatura superficial del mar en aguas mexicanas del Golfo de México.

El atún aleta azul, *T. thynnus*, mostró preferencia por aguas oceánicas, con temperaturas moderadamente cálidas (23-26°C) y baja concentración de clorofila *a* (0.1-0.25 mg m<sup>-3</sup>).

Las aguas mexicanas del Golfo de México constituyen un área potencial de reproducción del atún aleta azul, *T. thynnus*, principalmente entre febrero y abril.

## 9. LITERATURA CITADA

- Aguirre, R. 2002. *Los mares mexicanos a través de la percepción remota III.1*. Instituto de Geografía, UNAM. Editorial Plaza y Valdés, S.A. de C.V. México DF, México. 93 pp.
- Aleman, F., L. Quintanilla, P. Velez-Belchi, A. Garcia, D. Cortes, J.M. Rodriguez, M.L. Fernandez de Puellas, C. Gonzales-Pola and J.L. Lopez-Jurado. 2010. Characterization of the spawning habitat of Atlantic bluefin tuna and related species in the Baleric Sea (western Mediterranean). *Progress in Oceanography* 86:21-38.
- Baglin, R.E. 1982. Reproductive biology of western Atlantic bluefin tuna. *Fishery Bulletin* 80: 121-134.
- Beerkircher, L., C. A. Brown, V. Restrepo. 2009. Pelagic observer program data summary, Gulf of Mexico bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) spawning season 2007 and 2008; and analysis of observer coverage levels. NOAA Technical Memorandum NMFSSSEFSC-588. 33 pp.
- Biggs, D. C. 1992. Nutrients, plankton, and productivity in a warm-core ring in the western Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research* 97:2143-2154.
- Biggs, D. C. y F. E. Muller-Karger. 1994. Ship and satellite observations of chlorophyll stocks in warm- and cold- core rings in the western Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research* 99: 7371– 7384.
- Blackburn, M. 1969. Conditions related to upwelling which determine distribution of tropical tunas off western Baja California. *Fishery Bulletin* 68(1): 147-176.
- Block, B.A., J.E. Keen, B. Castillo, H. Dewar, E.V. Freund, D.J. Marcinek, R.W. Brill, C. Farwell. 1997. Environmental preferences of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) at the northern extent of its range. *Marine Biology* 130: 119-132.
- Block, B.A., H. Dewar, C. Farwell, E.D. Prince. 1998. A new satellite technology for tracking the movements of Atlantic bluefin tuna. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 95: 9384-9389.
- Block, B.A., H. Dewar, S.B. Blackwell, T.D. Williams, E.D. Prince, C.J. Farwell, A. Boustany, S.L.H. Teo, A. Seitz, A. Walli, D. Fudge. 2001. Migratory movements, depth preferences, and thermal biology of Atlantic bluefin tuna. *Science* 293: 1310–1314.

- Block, B.A., A. Boustany, S. Teo, A. Walli, C.J. Farwell, T. Williams, E.D. Prince, M. Stokesbury, H. Dewar, A. Seitz, K. Weng. 2003. Distribution of western tagged Atlantic bluefin tuna determined from archival and pop-up satellite tags. *International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas, Collective Volume of Scientific Papers* 55(3): 1127-1139.
- Block, B.A., S.L.H. Teo, A. Walli, A. Boustany, M.J.W. Stokesbury, C.J. Farwell, K.C. Weng, H. Dewar, T.D. Williams. 2005. Electronic tagging and population structure of Atlantic bluefin tuna. *Nature* 434:1121-1127.
- Bridges, C.R., O. Krohn, M. Deflorio, G. De Metrio. 2009. Possible SST and NAO influences on the Eastern bluefin tuna stock. The in-exfish approach. *International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas, Collective Volume of Scientific Papers* 63: 138-152.
- Brill, R.W., B.A. Block, C.H. Boggs, K.A. Bigelow, E.V. Freund, D.J. Marcinek. 1999. Horizontal movements and depth distribution of large adult yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) near the Hawaiian Islands, recorded using ultrasonic telemetry: implications for the physiological ecology of pelagic fishes. *Marine Biology* 133:395-408.
- BBC. 2010. Tuna weighs in at record price. BBC News. <<http://news.bbc.co.uk/go/pr/fr/-/2/hi/asia-pacific/8440758.stm>> (ultimo acceso 15 junio de 2011).
- Cayré, P. 1991. Behaviour of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) and skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) around fish aggregating devices (FADs) in the Comoros Islands as determined by ultrasonic tagging. *Aquatic Living Resources* 4:1-12.
- Chambers, R.C. 1997. Environmental influences on egg and propagule sizes in marine fishes. Pp 63-102. En: Chambers, R.C., Trippel, E.A. (eds.). *Early life history and recruitment in fish population*. Chapman & Hall, New York, USA. pp 632.
- Chasot, E., S. Bonhommeau, G. Reygondeau, K. Nieto, J.J. Polovina, M. Huret, N.K. Dulvy, H. Demarcq. 2011. Satellite remote sensing for an ecosystem approach to fisheries management. *ICES Journal of Marine Science* 68 (4): 651-666.
- Chen, I.C., P.F. Lee, W.N. Tzeng. 2005. Distribution of albacore (*Thunnus alalunga*) in the Indian Ocean and its relation to environmental factors. *Fisheries Oceanography* 14(1): 71-80.

- Cury, P.M., Y.J. Shin, B. Planque, J.M. Durant, J.M. Fromentin, S. Kramer-Schadt, N.C. Stenseth, M. Travers, V. Grimm. 2008. Ecosystem oceanography for global change in fisheries. *Trends in Ecology and Evolution* 23(6): 338-346.
- De Lanza-Espino G. y J.C. Gómez-Rojas. 2004. Características físicas y químicas del Golfo de México. Pp. 103-132. En: Caso *et al.* (eds.). *Diagnóstico ambiental del Golfo de México*. Instituto Nacional de Ecología, México D.F., México. 1047 pp.
- Druon, J.N. 2010. Habitat mapping of the Atlantic bluefin tuna derived from satellite data: Its potential as a tool for the sustainable management of pelagic fisheries. *Marine Policy* 34: 293–297.
- Dufour, F., H. Arrizabalaga, X. Irigoien, J. Santiago. 2010. Climate impacts on albacore and bluefin tunas migrations phenology and spatial distribution. *Progress in Oceanography* 86(1-2): 283-290.
- Dunn, D.C, A.M. Boustany, P.N. Halpin. 2011. Spatio-temporal management of fisheries to reduce by-catch and increase fishing selectivity. *Fish and Fisheries* 12: 110-119.
- Fiedler, P. y H. Bernard. 1987. Tuna aggregation and feeding near fronts observed in satellite imagery. *Continental Shelf Research* 7, 871-88.
- Fromentin, J.M. y A. Fonteneau (2001). Fishing effects and life history traits: A case-study comparing tropical versus temperate tunas. *Fisheries Research* 53: 133-150.
- Fromentin J.M. y J.E. Powers. 2005. Atlantic bluefin tuna: population dynamics, ecology, fisheries and management. *Fish and Fisheries* 6(4): 281–306.
- Galuardi B., F. Royer, W. Golet, J. Logan, J. Neilson, M. Lutcavage. 2010. Complex migration routes of Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) question current population structure paradigm. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* 67: 966-976.
- García S.M., A. Zerbi, C. Aliaume, T. Do Chi, G. Lasserre. 2003. The ecosystem approach to fisheries. Issues, terminology, principles, institutional foundations, implementation and outlook. FAO Fisheries Technical Paper 443. 71 pp.
- García, A., F. Alemany, P. Velez-Belchí, J.L. López-Jurado, D. Cortés, J.M. de la Serna, C. González Pola, J.M. Rodríguez, J. Jansá, T. Ramírez. 2005. Characterization of the bluefin tuna spawning habitat off the Balearic archipelago in relation to key oceanographic features and associated environmental conditions. *International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas, Collective Volume of Scientific Papers* 58(2): 535-549.

- Gómez, A. 1996. Causas de la fertilidad en el Nororiente de Venezuela. *Interciencia* 21(3): 140-146.
- Hanamoto, E. 1987. Effect of oceanographic environment on bigeye tuna distribution. *Bulletin of the Japanese Society of Fisheries Oceanography* 51(3): 203-216.
- Heinisch, G., A. Corriero, A. Medina, F.J. Abascal, J.M. de la Serna, R. Vassallo-Agius, A. Belmonte-Ríos, A. García, F. de la Gándara, C. Fauvel, et al. 2008. Spatial-temporal pattern of bluefin tuna (*Thunnus thynnus* L. 1758) gonad maturation across the Mediterranean Sea. *Marine Biology* 154 (4): 623-630.
- Hobday, A.J., K. Hartmann. 2006. Near real-time spatial management based on habitat predictions for a longline bycatch species. *Fisheries Management and Ecology* 13: 365-380.
- International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas (ICCAT). 2007. Report of the Standing Committee on Research and Statistics (SCRS). Madrid, España, Octubre 1-5, 2007. 213 pp.
- ICCAT. Base de datos de estadísticas ICCAT. <http://www.iccat.es/es/accesingdb.htm>
- Kirby, D.S. 2001. On the integrated study of tuna behaviour and spatial dynamics: tagging and modelling as complementary tools. Pp. 407-420. En Sibert J.R., J.L. Nielson (eds.). *Electronic Tagging and Tracking in Marine Fisheries*. Kluwer Academic Publishers, Boston, USA. 484 pp.
- Knapp, J.M., G. Heinisch, M. Lutcavage. 2010. Preliminary results on the reproductive status of Atlantic bluefin tuna sampled in the Gulf of México during spawning season, 2007-2008. *International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas, Collective Volume of Scientific Papers* 65(3): 822-827.
- Laurs, R.M. y Lynn, R.J. 1997. Seasonal migration of North Pacific Albacore, *Thunnus alalunga*, into North American coastal waters: distribution, relative abundance and association with Transition Zone water. *Fishery Bulletin* 75, 795-822.
- Laurs R.M. y J.J. Polovina. 2000. Satellite remote sensing: an important tool in fisheries oceanography. Pp. 146-157. En: Harrison P.J., T.R. Parsons (eds.). *Fish and Aquatic Resources Series 4. Fisheries Oceanography: An Integrative Approach to Fisheries Ecology and Management*. Blackwell Science, Oxford, UK. 347 pp.
- Lehodey, P., J.M. Andre, M. Bertignac, J. Hampton, A. Stoens, C. Menkes, L. Mémery, N. Grima. 1998. Predicting skipjack tuna forage distributions in the equatorial Pacific using a coupled dynamical biogeochemical model, *Fisheries and Oceanography* 7(3/4), 317-325.

- Lewis, J.K., A.D. Kirwan, G.Z. Forristall. 1989. Evolution of a warm-core ring in the Gulf of Mexico, Lagrangian observations. *Journal of Geophysical Research* 94: 8163-8178.
- Link, J. 2002. What does ecosystem-based fisheries management mean? *Fisheries* 27:18-21.
- Lutcavage, M., J. Goldstein, S. Kraus. 1997. Distribution, relative abundance, and behavior of giant bluefin tuna in New England waters, 1995. *International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas, Collective Volume of Scientific Papers* 46 (2): 332-347.
- Lutcavage, M., R.W. Brill, G.B. Skomal, B.C. Chase, P.W. Howey. 1999. Results of pop-up satellite tagging of spawning size class fish in the Gulf of Maine: do North Atlantic bluefin tuna spawn in the mid-Atlantic? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* 56: 173-177.
- Lutcavage, M., R.W. Brill, G.B. Skomal, B.C. Chase, J.L. Goldstein, J. Tutein. 2000. Tracking adult North Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) in the northwestern Atlantic using ultrasonic telemetry. *Marine Biology* 137: 347-358.
- Magnuson, J. J., B. A. Block, R. B. Deriso, J. R. Gold, W. S. Grant, T. J. Quinn, S. B. Saila, L. Shapiro, E. D. Stevens. 1994. *An assessment of Atlantic bluefin tuna*. National Academy Press, Washington D.C., USA. 148 pp.
- Manzano-Saravia M. M. y C.A. Salinas-Zabala. 2008. Variabilidad estacional e interanual de la concentración de clorofila a y temperatura superficial del mar en la región occidental del Golfo de México: 1996-2007. *Interciencia* 33 (9): 628-634.
- Margalef, R. 1967. The food web in the pelagic environment. *Helgoländer Meresunters* 15: 548-559
- Margalef, R. 1969. El ecosistema pelágico del Mar Caribe. *Sociedad de Ciencias Naturales La Salle* 29(82): 5-37
- Márquez, B., J. Díaz-Ramos, L. Troccoli, B. Marín, R. Varela. 2009. Densidad, biomasa y composición del zooplancton, en el estrato superficial de la cuenca de Cariaco, Venezuela. *Revista de Biología Marina y Oceanografía* 44(3): 737-749.
- Mather, F.J., J.M. Mason, A.C. Jones. 1995. *Historical document: life history and fisheries of Atlantic Bluefin Tuna*. Miami, Florida: NOAA SEFSC. NOAA Technical Memorandum NMFS-SEFSC-370. 165 pp.

- Matthiopoulos, J. 2003. The use of space by animals as a function of accessibility and preference. *Ecological Modelling* 159(2-3): 239-268.
- Maury, O., D. Gascuel, F. Marsac, A. Fonteneau, A.L. De Rosa. 2001. Hierarchical interpretation of nonlinear relationships linking yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) distribution to the environment in the Atlantic Ocean. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* 58: 458-469.
- McClain, C. R., G.C. Feldman, S.B. Hooker. 2004. An overview of the SeaWiFS project and strategies for producing a climate research quality global ocean bio-optical time series. *Deep Sea Research Part II* 51: 5–42.
- Melo-González N., F.E. Müller-Karger, S. Cerdeira, R. Pérez, I. Victoria del Río, P. Cárdenas, I. Mitrani. 2000. Near-surface phytoplankton distribution in the western Intra-Americas Sea: The Influence of El Niño and weather events. *Journal of Geophysical Research* 105 (C6): 14029-14043.
- Monreal-Gómez M.A., D.A. Salas de León, A. Gracia-Gasca. 2004a. Golfo de México, Circulación y Productividad. *Ciencias* 76: 24-33.
- Monreal-Gómez M.A., D.A. Salas de León, H. Velasco-Mendoza. 2004b. La hidrodinámica del Golfo de México. Pp. 47-68. En: Caso *et al.* (Eds.). Diagnóstico ambiental del Golfo de México. Instituto Nacional de Ecología, México DF, México. 1047 pp.
- Mugo, R., S-I. Saitoh, A. Nihira., T. Kuroyama. 2010. Habitat characteristics of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) in the western North Pacific: a remote sensing perspective. *Fisheries Oceanography* 19(5): 382-396.
- Muhling, B.A., S-K. Lee, J.T. Lamkin, Y. Liu. 2011. Predicting the effects of climate change on bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) spawning habitat in the Gulf of Mexico. *ICES Journal of Marine Science* 68 (6): 1051-1062.
- Müller-Karger F.E., J.J. Walsh., R.H. Evans, M.B. Meyers. 1991. On the seasonal phytoplankton concentration and Sea Surface Temperature cycles of the Gulf of Mexico as determined by satellites. *Journal of Geophysical Research* 96(C7): 12,645–12,665.
- Noguez-Fuentes, J.F., M.J. Dreyfus-León, H. Robles-Ruiz. 2007. Análisis de la pesca de atún con palangre en el Golfo de México durante las fases de luna nueva y llena. *Hidrobiológica* 17(2): 91-99.

- Oey L.-Y., T. Ezer, H.-C. Lee. 2005. Loop Current, Rings and Related Circulation in the Gulf of Mexico: A Review of Numerical Models and Future Challenges. *Geophysical Monograph Series* 1-25
- Owen R.W. 1969. Oceanographic conditions in the northeast Pacific Ocean and their relation to the albacore fishery. *Fishery Bulletin* 66(3): 503-526.
- Podestá, G.P., J.A. Browder, J.J. Hoey. 1993. Exploring the association between swordfish catch rates and thermal fronts on U.S. longline grounds in the western North Atlantic. *Continental Shelf Research* 13: 253-277.
- Polovina J.J. y E.A. Howell. 2005. Ecosystem indicators derived from satellite remotely sensed oceanographic data for the North Pacific. *ICES Journal of Marine Science* 62(3): 319-327.
- Ramírez-López, K. 2009. Datos estadísticos de la flota palangrera Mexicana dedicada a la pesca del atún aleta amarilla en el Golfo de México durante el periodo 1994 a 2007. *International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas, Collective Volume of Scientific Papers* 64(4): 1159-1170.
- Ravier, C. y J.M. Fromentin. 2004. Are the long-term fluctuations in Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) population related to environmental changes? *Fisheries Oceanography* 13: 145-160.
- Richards, W.J. 1976. Spawning of bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) in the Atlantic Ocean and adjacent seas. *International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas, Collective Volume of Scientific Papers* 5(2): 267-278.
- Richards W.J. y T. Potthoff. 1980. Distribution and abundance of bluefin tuna larvae in the Gulf of Mexico in 1977 y 1978. *International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas, Collective Volume of Scientific Papers* 9 (2): 433-441.
- Riolo, R. 2006. A geographic information system for fisheries management in American Samoa. *Environmental Modeling & Software* 21: 1025-1041.
- Royer, F. J.M. Fromentin, P. Gaspar. 2004. Association between bluefin tuna schools and oceanic features in the western Mediterranean. *Marine Ecology Progress Series* 269: 249-263.
- Royer, F. J.M. Fromentin, H. Farrugio, P. Gaspar. 2005. Determining bluefin tuna habitat through frontal features in the Mediterranean Sea. *International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas, Collective Volume of Scientific Papers* 58(4): 1275-1284.



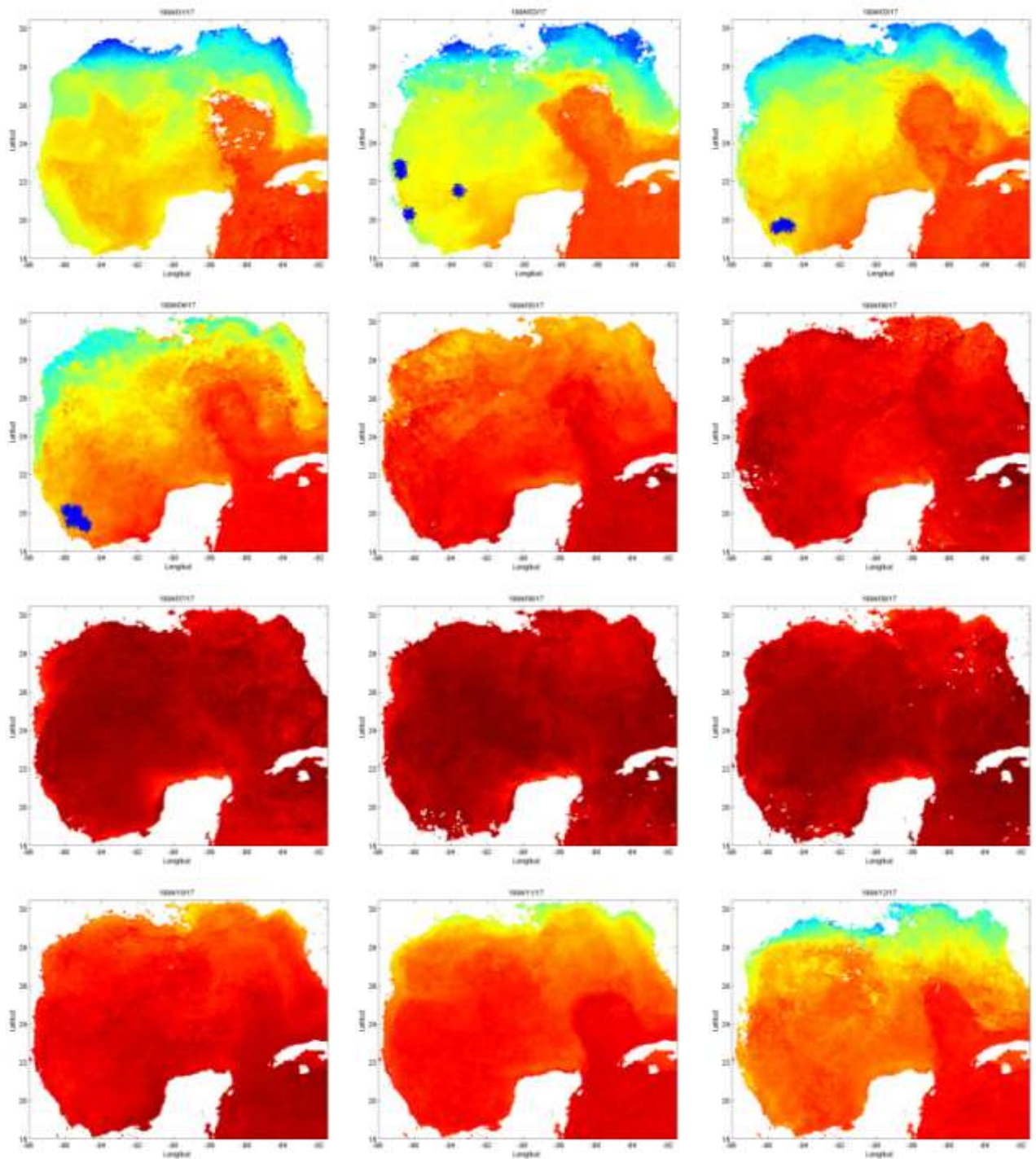
- Santos, A.M.P., A.F.G. Fíuza, R.M. Laurs. 2006. Influence of SST on catches of swordfish and tuna in the Portuguese domestic longline fishery. *International Journal of Remote Sensing* 27(15): 3131-3152.
- Schaefer, K.M. 2001. Reproductive biology of tunas. Pp 225–270. En: Block B.A., Stevens E.D. (eds.). *Tunas: Physiology, Ecology, and Evolution*. Academic Press, San Diego, USA. 468 pp.
- Schaefer, K.M., D.W Fuller, B.A. Block. 2007. Movements, behavior, and habitat utilization of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the northeastern Pacific Ocean, ascertained through archival tag data. *Marine Biology* 152: 503-525.
- Schmitz, W.J. 2003. Notes on the circulation in and around the Gulf of Mexico. Volume I: A Review of the Deep Water Circulation. <http://www.hartheresearchinstitute.org/whats-news/books>.
- Secretaría de Marina. 2002. Atlas de dinámica costera de la República Mexicana. Secretaría de Marina-Armada de México.
- Shick, R.S. y M.E. Lutcavage. 2009. Inclusion of prey data improves prediction of bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) distribution. *Fisheries Oceanography* 18(1): 77-81.
- Shick, R.S., J. Goldstein, M.E. Lutcavage. 2004. Bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) distribution in relation to sea surface temperature fronts in the Gulf of Maine (1994–96). *Fisheries Oceanography* 13(4): 225–238.
- Sokal, R.R. y J.F. Rohlf. 1981. *Biometry: the principles and practice of statistics in biological research 2nd ed.* W. H. Freeman and Company, San Francisco, USA. 859 pp.
- Solana-Sansores, R. y K. Ramírez-López. 2006. Análisis de la pesquería mexicana del atún en el Golfo de México, 2004. *International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas, Collective Volume of Scientific Papers* (59)2: 525-535.
- Sosa-Nishisaki, O., H. Robles, M.J Dreyfus-León, y O. Ceseña. 2001. La pesca de atún con palangre en el Golfo de México (primer semestre del 2001). *PNAAPD, El Vigía*, Órgano informativo del PNAAPD 6(13): 20-23.
- Stretta, J.M. 1991. Forecasting tuna fishery with aerospatial remote sensing. *International Journal of Remote Sensing* 12 (4): 771-779.

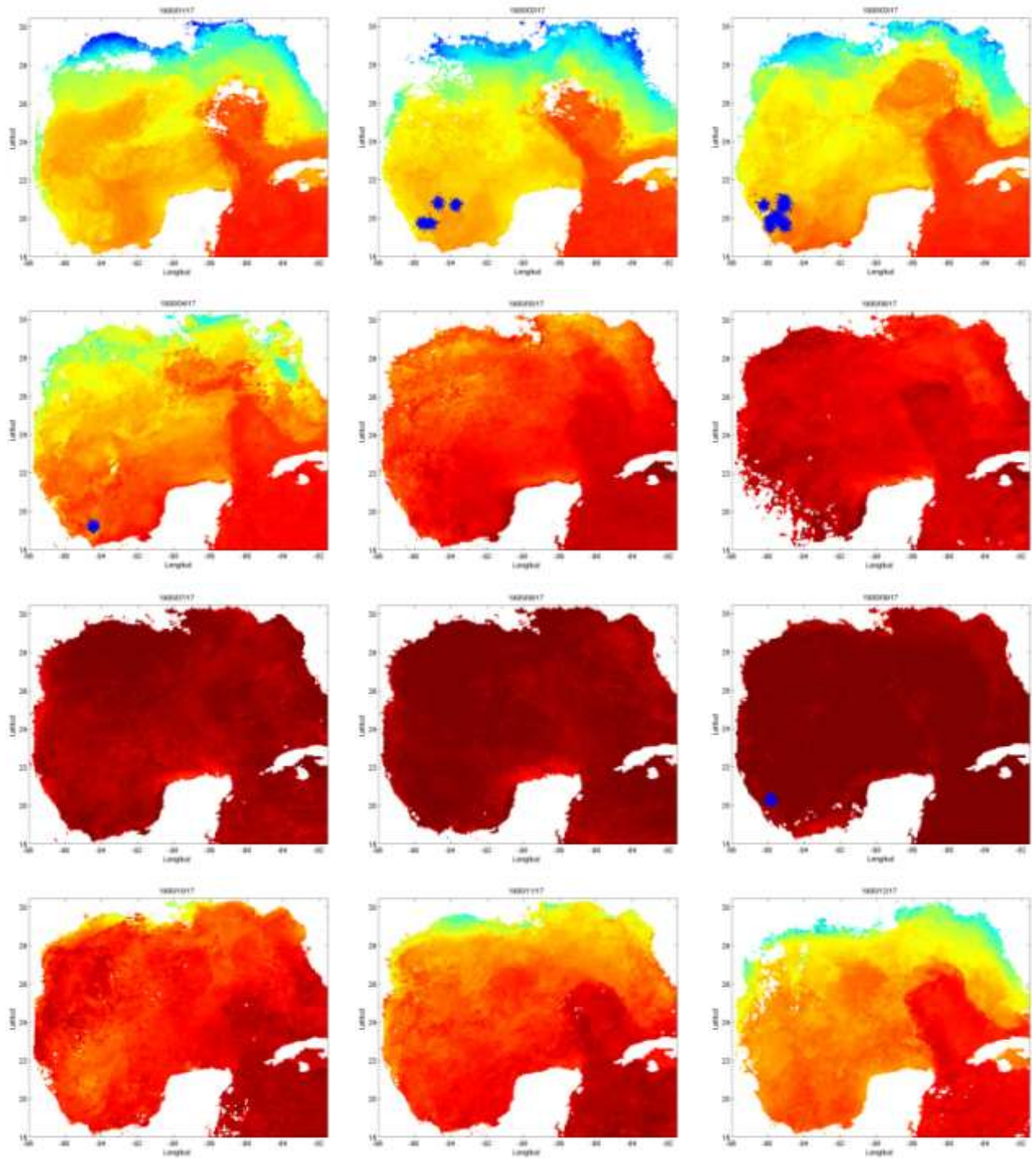
- Sturges, W. y R. Leben. 2000. Frequency of ring separations from the Loop Current In the Gulf of Mexico: A revised estimate. *Journal Physical Oceanography* 30: 1814-1818.
- Teo, S.L.H., A. Boustany, S. Blackwell, A. Walli, K.C. Weng, B.A. Block. 2004. Validation of geolocation estimates based on light level and sea surface temperature from electronic tags. *Marine Ecology Progress Series* 283: 81-98.
- Teo, S.L.H., A. Boustany, H. Dewar, M.J.W. Stokesbury, K.C. Weng, S. Beemer, A.C. Seitz, C.J. Farwell, E.D. Prince, B.A. Block. 2007a. Annual migrations, diving behavior, and thermal biology of Atlantic bluefin tuna, *Thunnus thynnus*, on their Gulf of Mexico breeding grounds. *Marine Biology* 151: 1–18.
- Teo, S.L.H., A. Boustany, B.A. Block. 2007b. Oceanographic preferences of Atlantic bluefin tuna, *Thunnus thynnus*, on their Gulf of Mexico breeding grounds. *Marine Biology* 152: 1105-1119.
- Teo S.L.H. y B.A. Block. 2010. Comparative influence of ocean conditions on yellowfin and Atlantic bluefin tuna catch from longlines in the Gulf of Mexico. *PLoS ONE* 5(5): e10756. doi:10.1371/journal.pone.0010756.
- Uda, M. 1973. Pulsative fluctuation of oceanic fronts in association with the tuna fishing grounds and fisheries. *Journal of the Faculty of Marine Science and Technology* 7: 245-265.
- Vidal-Lorandi F.V., V.M.V. Vidal-Lorandi, P.F. Rodríguez-Espinosa, L. Zambrano-Salgado, J. Portilla-Casillas, R. Rendón-Villalobos, B. Jaimes de la Cruz. 1999. Circulación del Golfo de México. *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural* 49: 1-15.
- Virmani J.I. y R.H. Weisberg. 2003. Features of the Observed Annual Ocean Atmosphere Flux Variability on the West Florida Shelf. *Journal of Climate* 16: 734-745.
- Weng, K.C., M.J.W. Stokesbury, A.M. Boustany, A.C. Seitz, S.L.H. Teo, S.K. Miller, B.A. Block. 2009. Habitat and behaviour of yellowfin tuna *Thunnus albacares* in the Gulf of Mexico determined using pop-up satellite archival tags. *Journal of Fish Biology* 74: 1434–1449.
- Zagaglia, C., J.A. Lorenzetti, J.L. Stech. 2004 Remote sensing data and longline catches of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the equatorial Atlantic. *Remote Sensing of Environment* 93: 267-281.

- Zavala-Hidalgo J., S. Morey, J. O'Brien. 2003. Seasonal circulation on the western shelf of the Gulf of México using a high resolution numerical model. *Journal of Geophysical Research* 108: 33-89.
- Zar, J.H. 1999. *Biostatistical Analysis*. Prentice Hall, New Jersey, USA. 663 pp.
- Zhou, S. A.D.M. Smith, A.E. Punt, A.J. Richardson, M. Gibbs, E.A. Fulton, S. Pascoe, C. Bulman, P. Bayliss, K. Sainsbury. 2010. Ecosystem-based fisheries management requires a change to the selective fishing philosophy. *PNAS* 107 (21): 9485–9489.

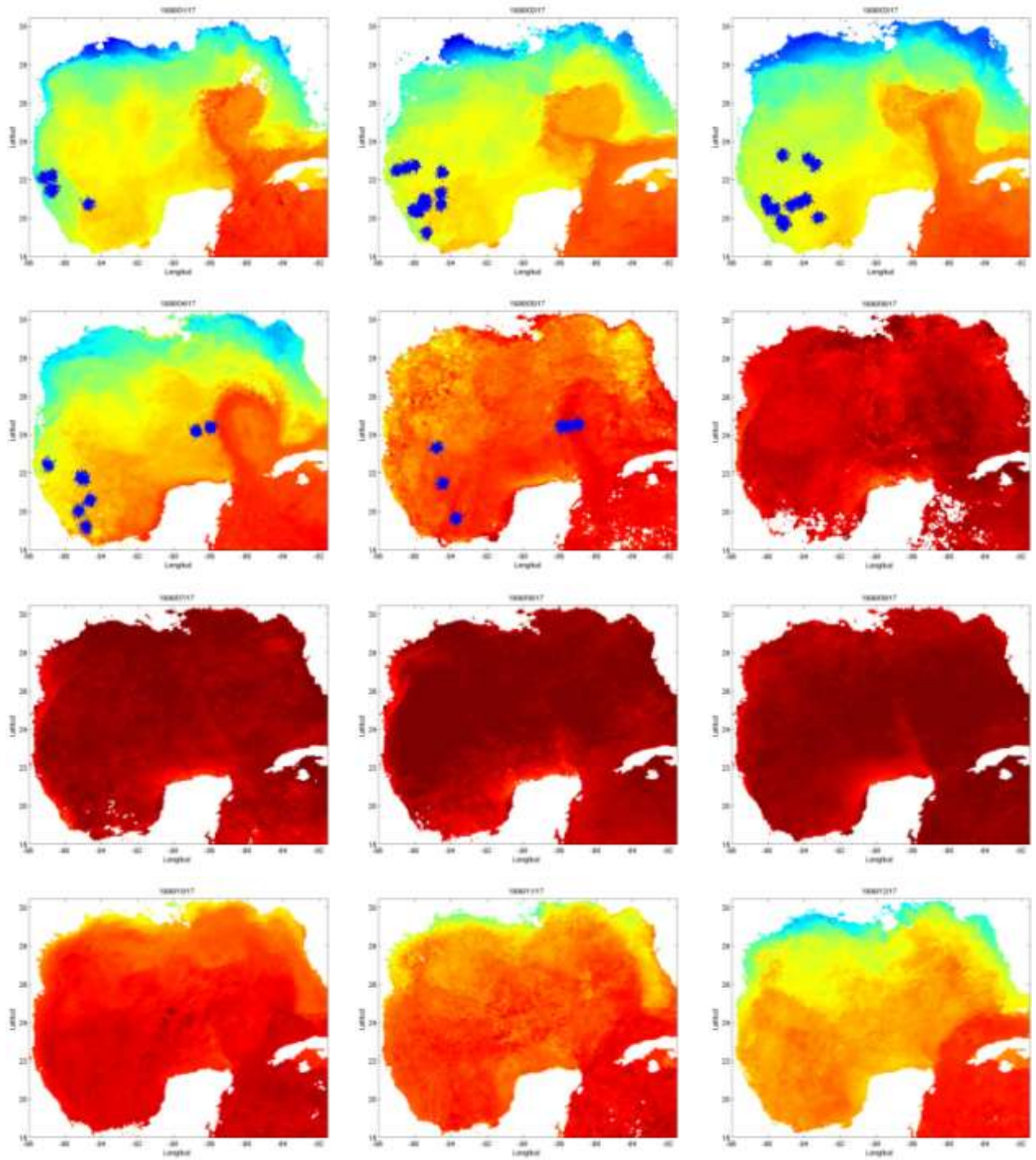
ANEXO I. Posiciones de captura de atún aleta azul por la flota mexicana palangrera entre 1994 y 2007 sobre composiciones mensuales de temperatura superficial del mar del sensor AVHRR.

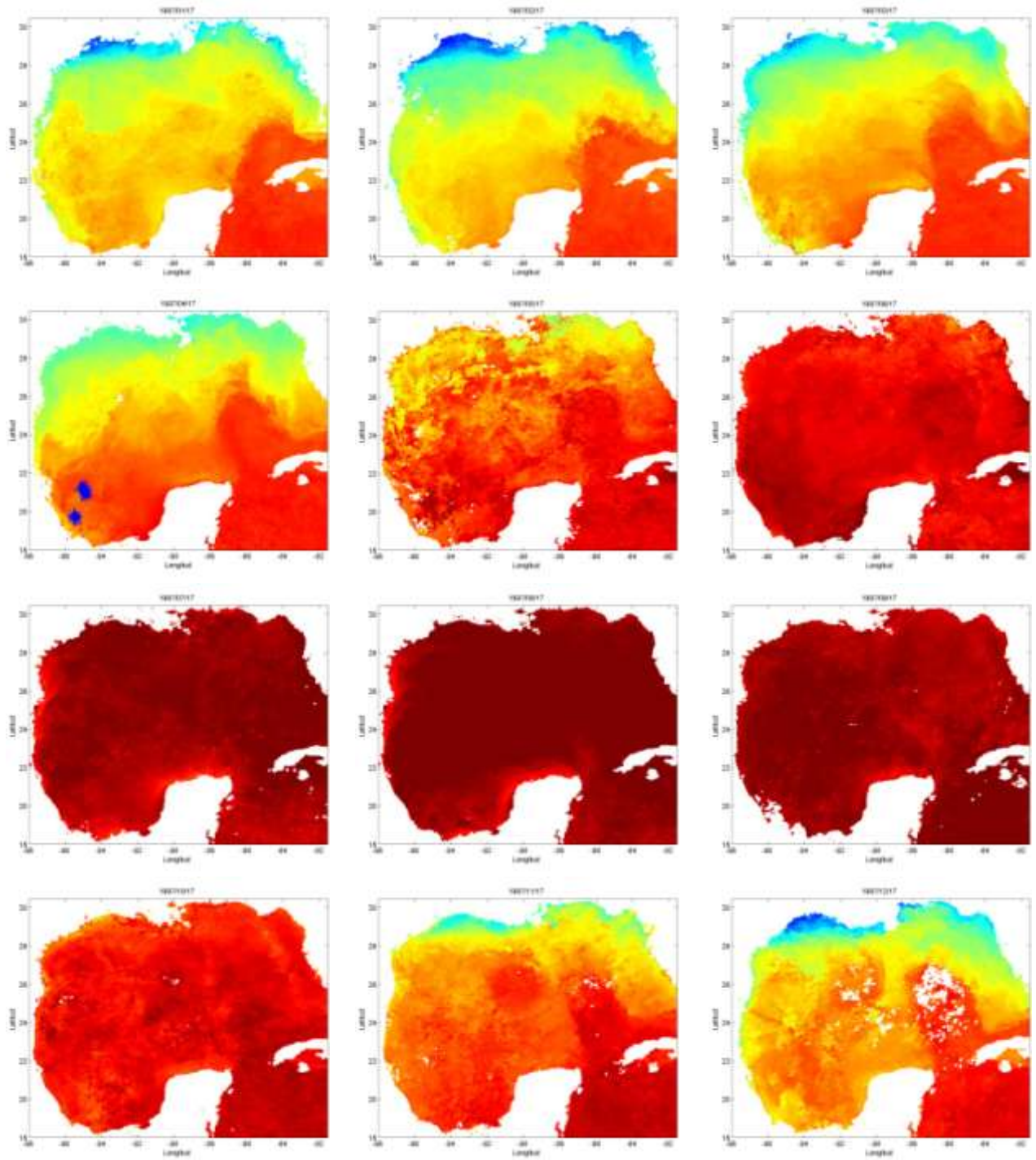
1994



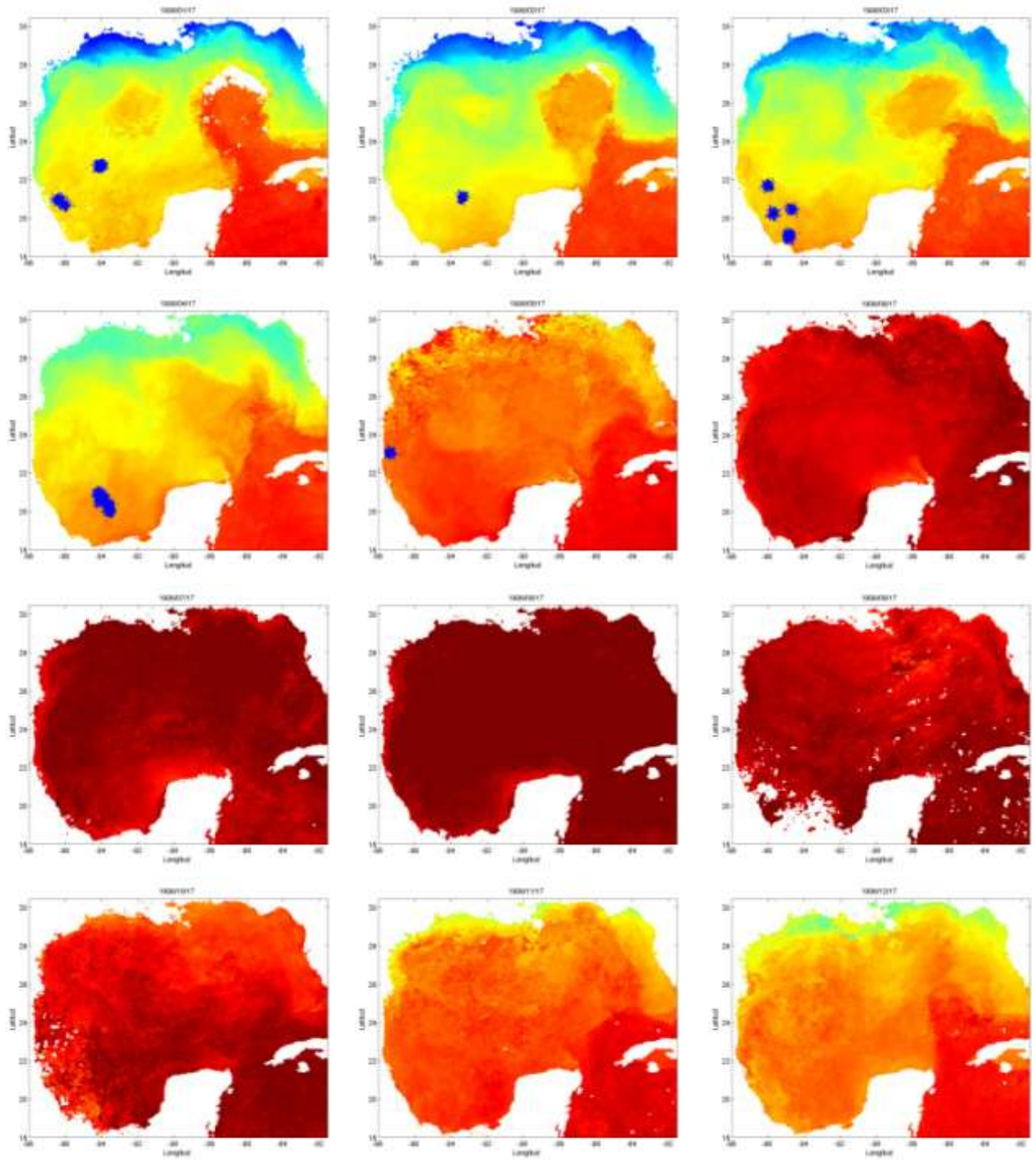




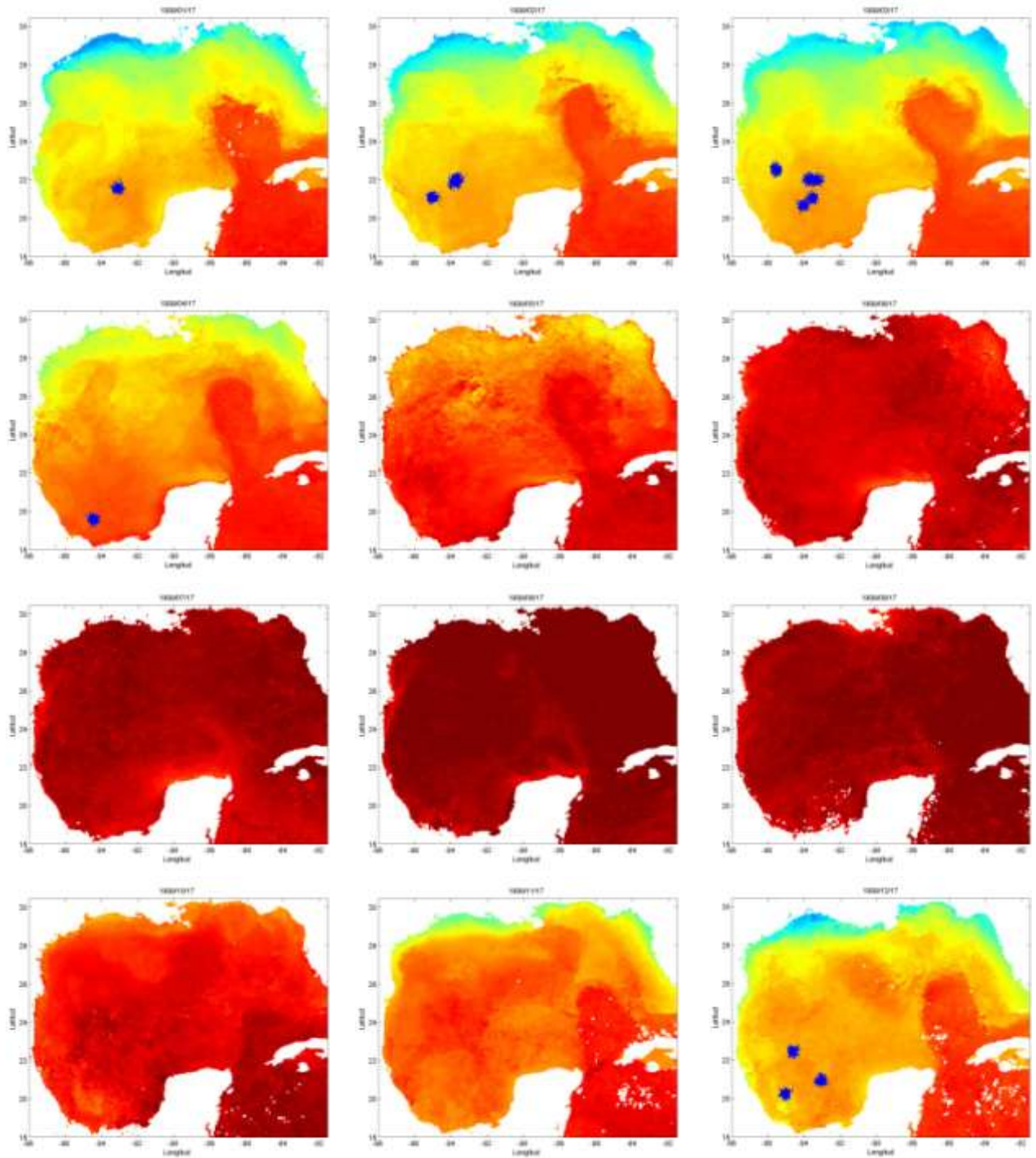




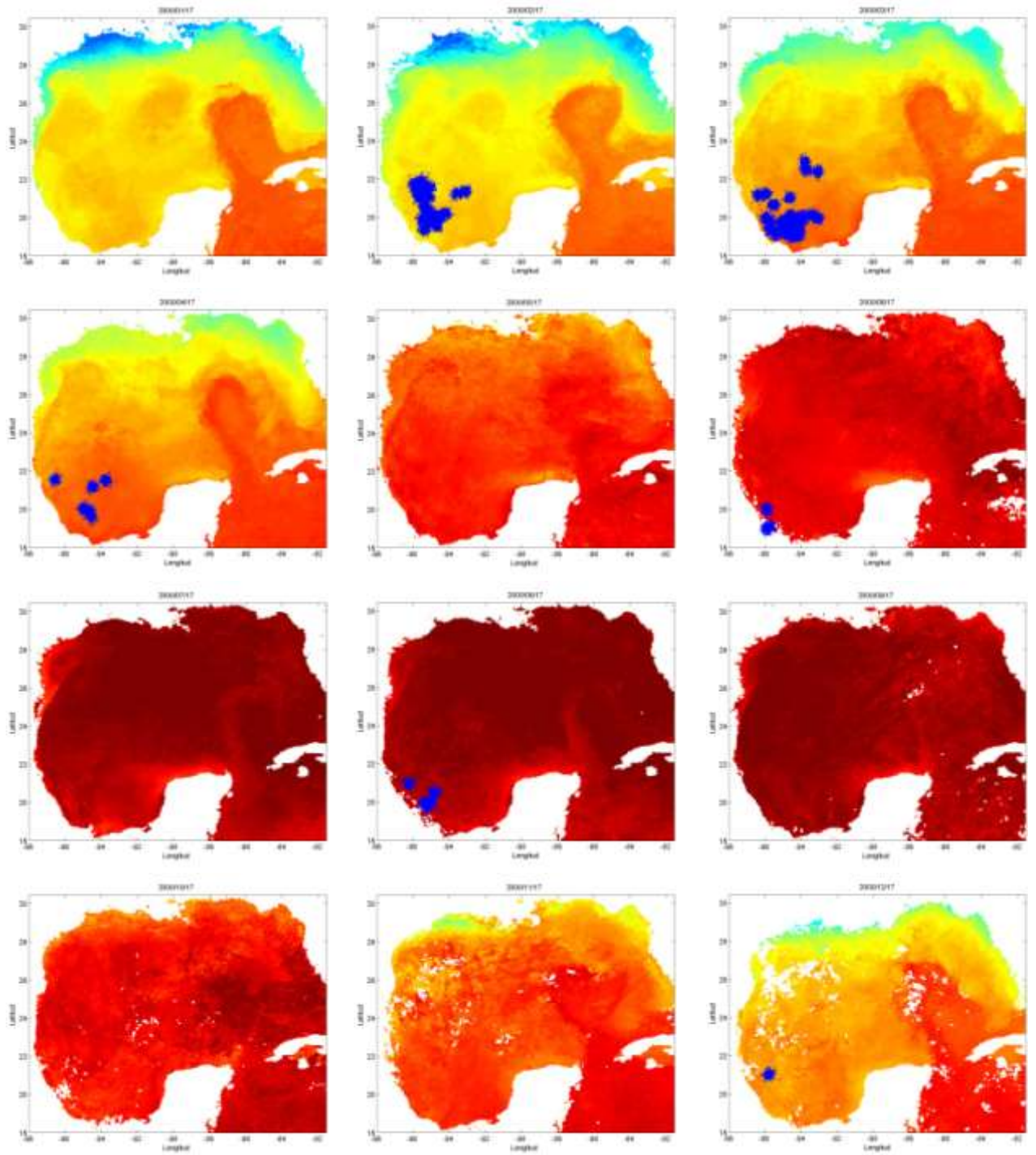






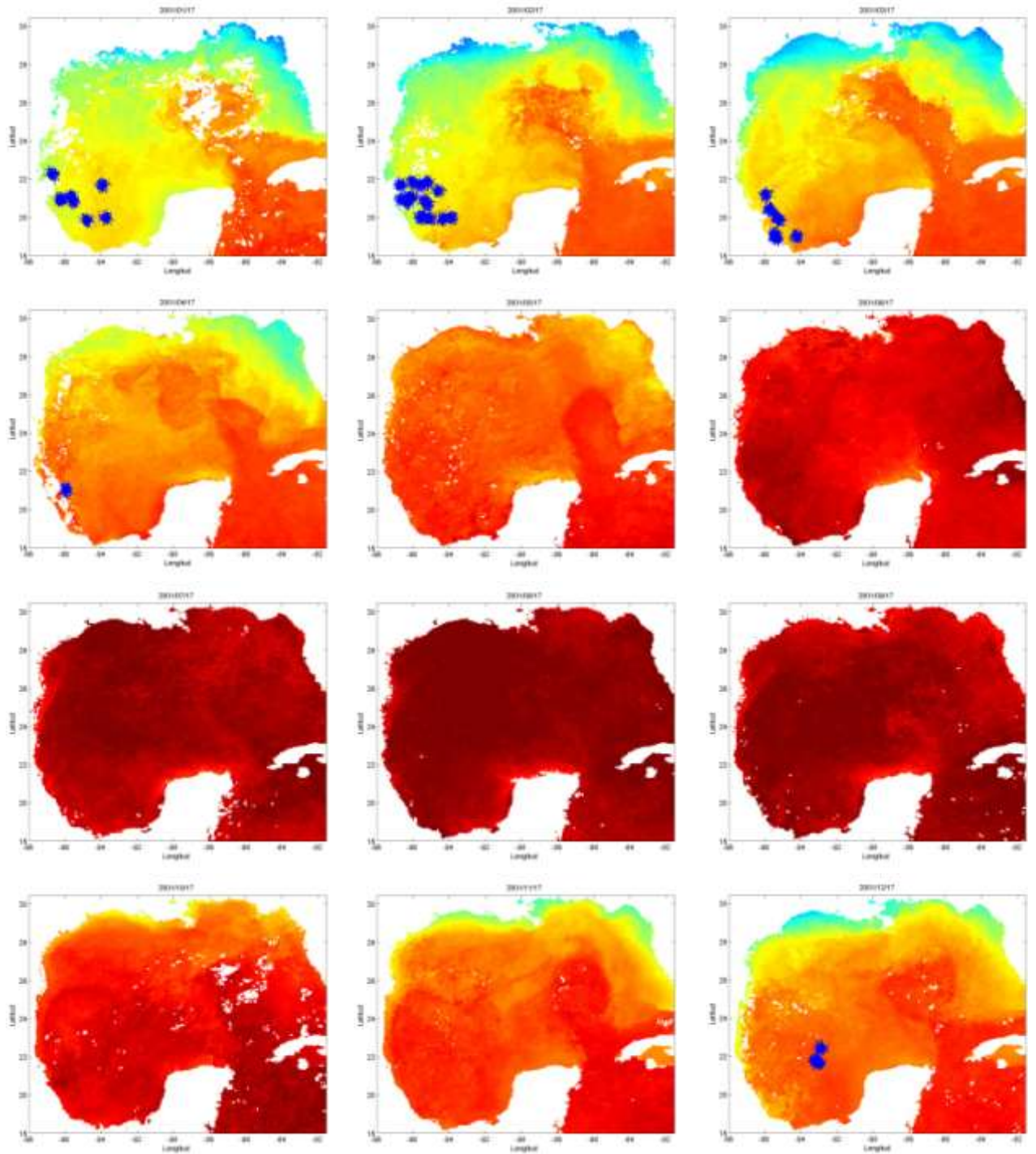


2000

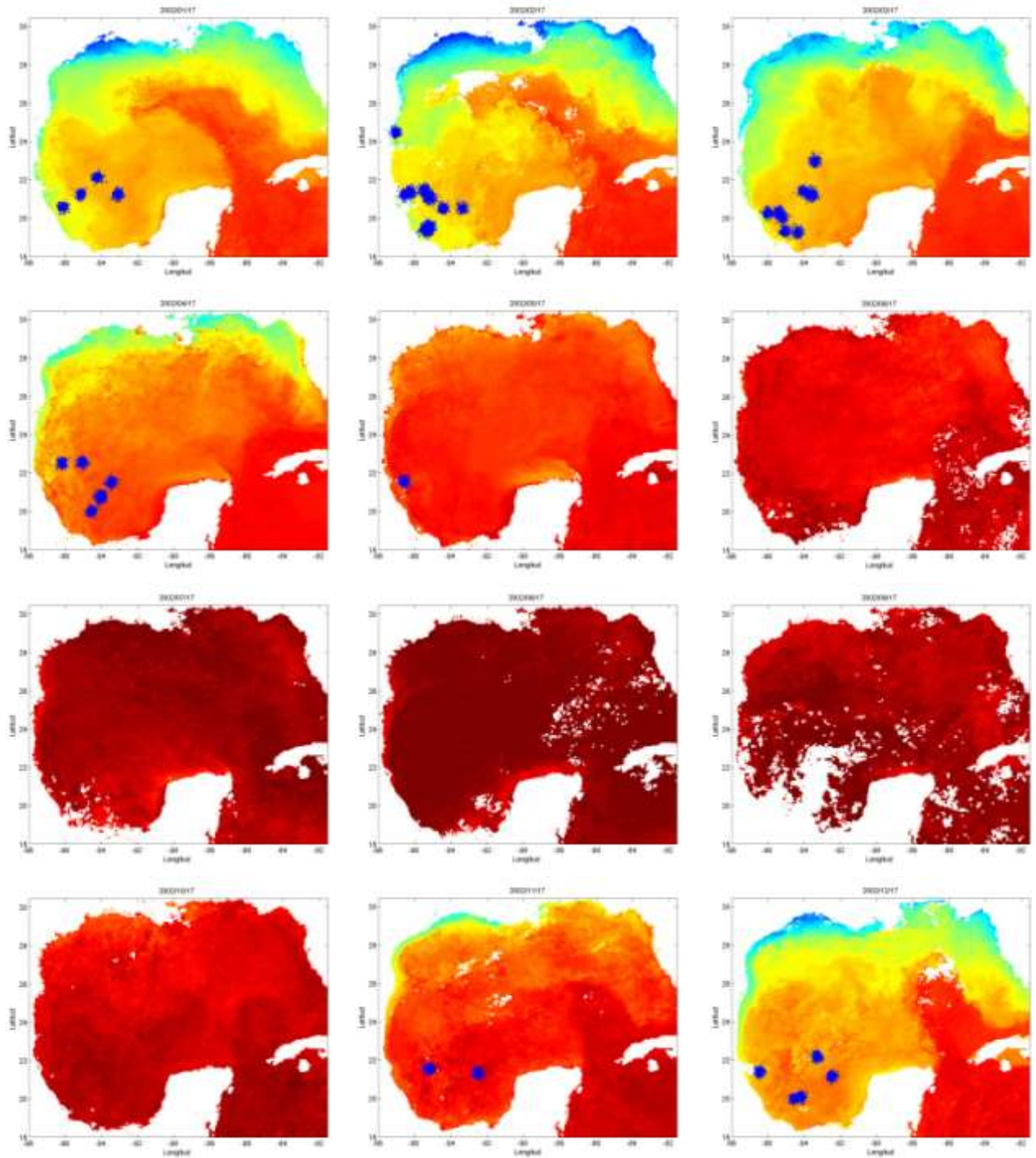




2001

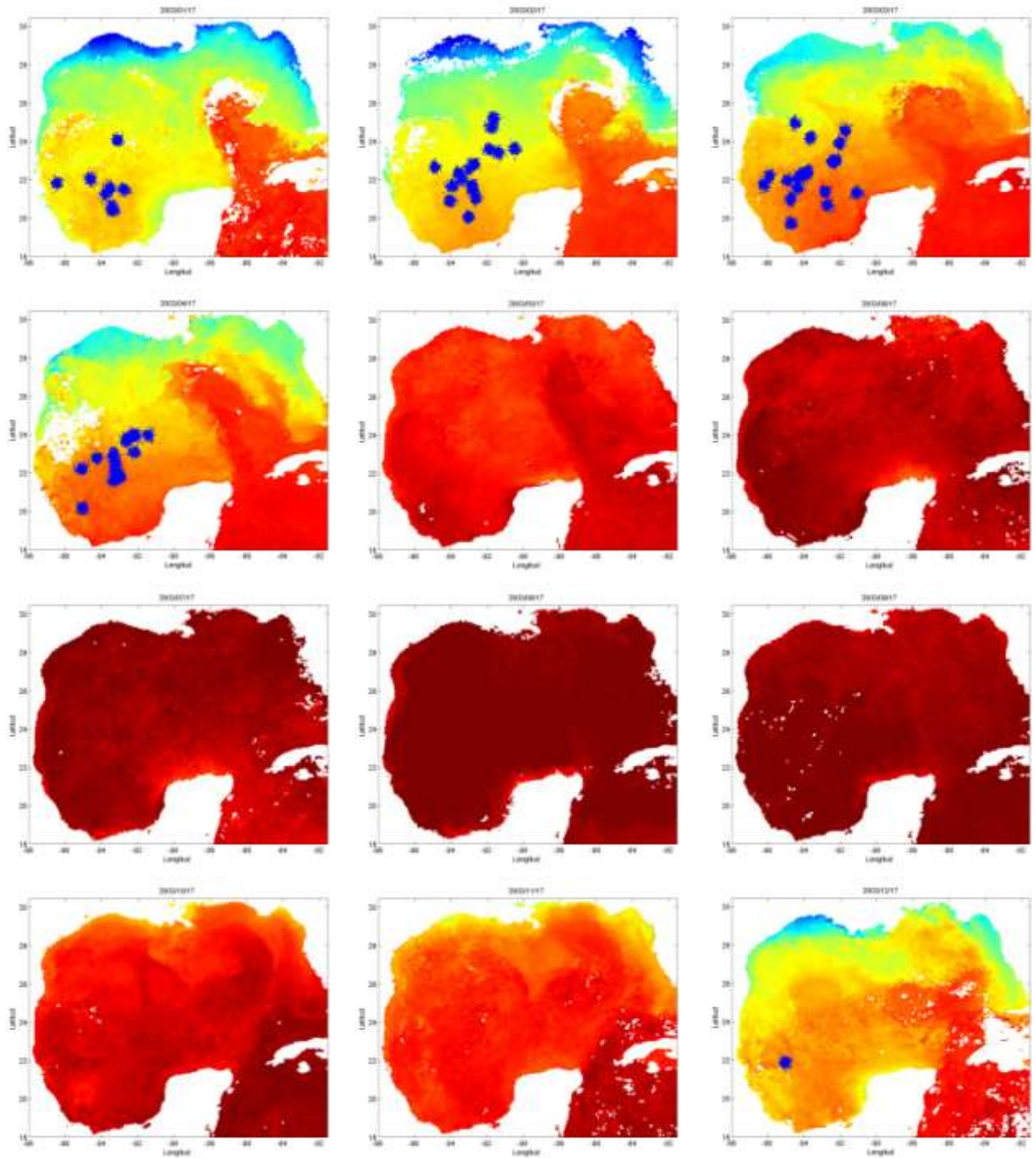


2002

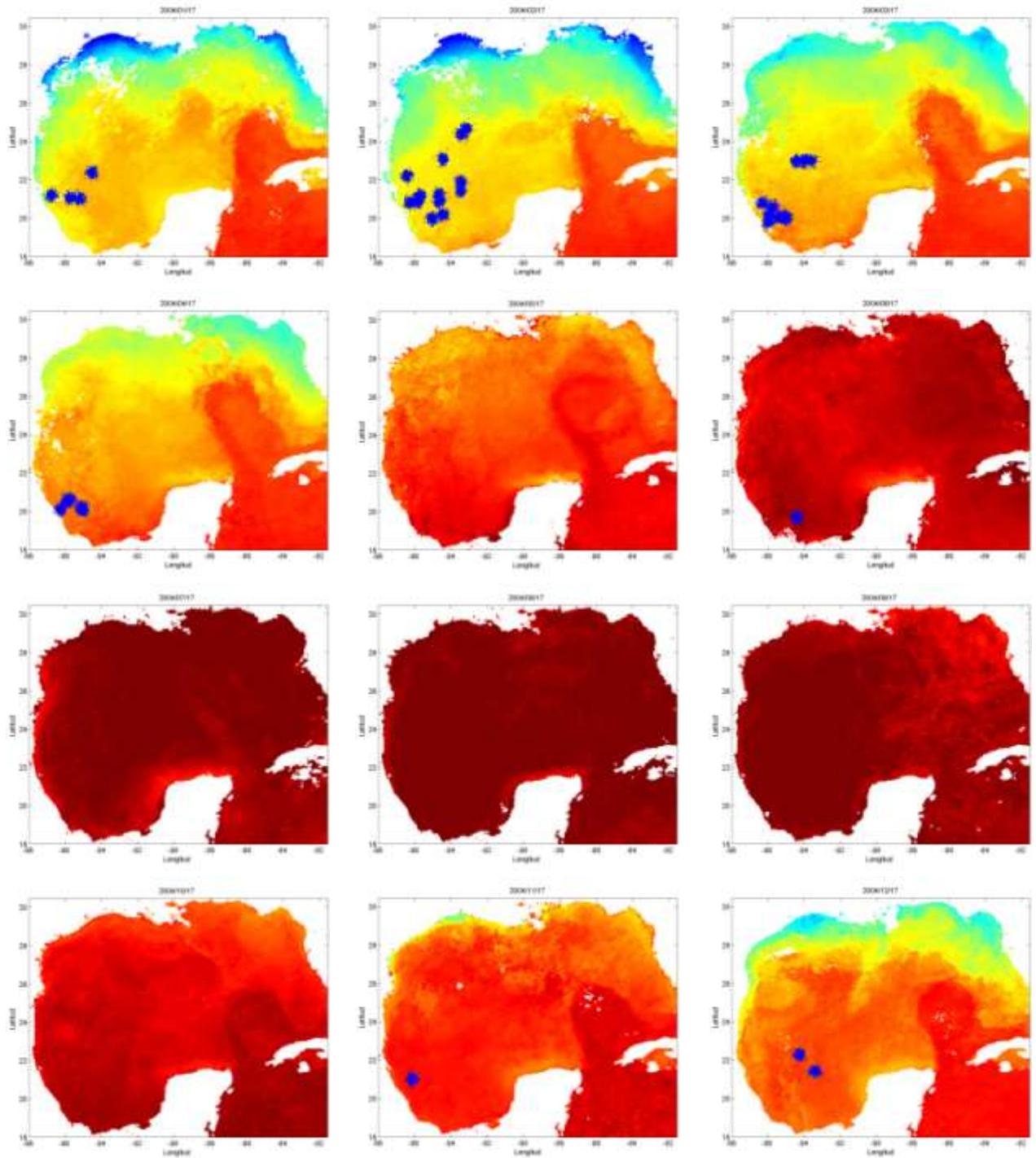




2003

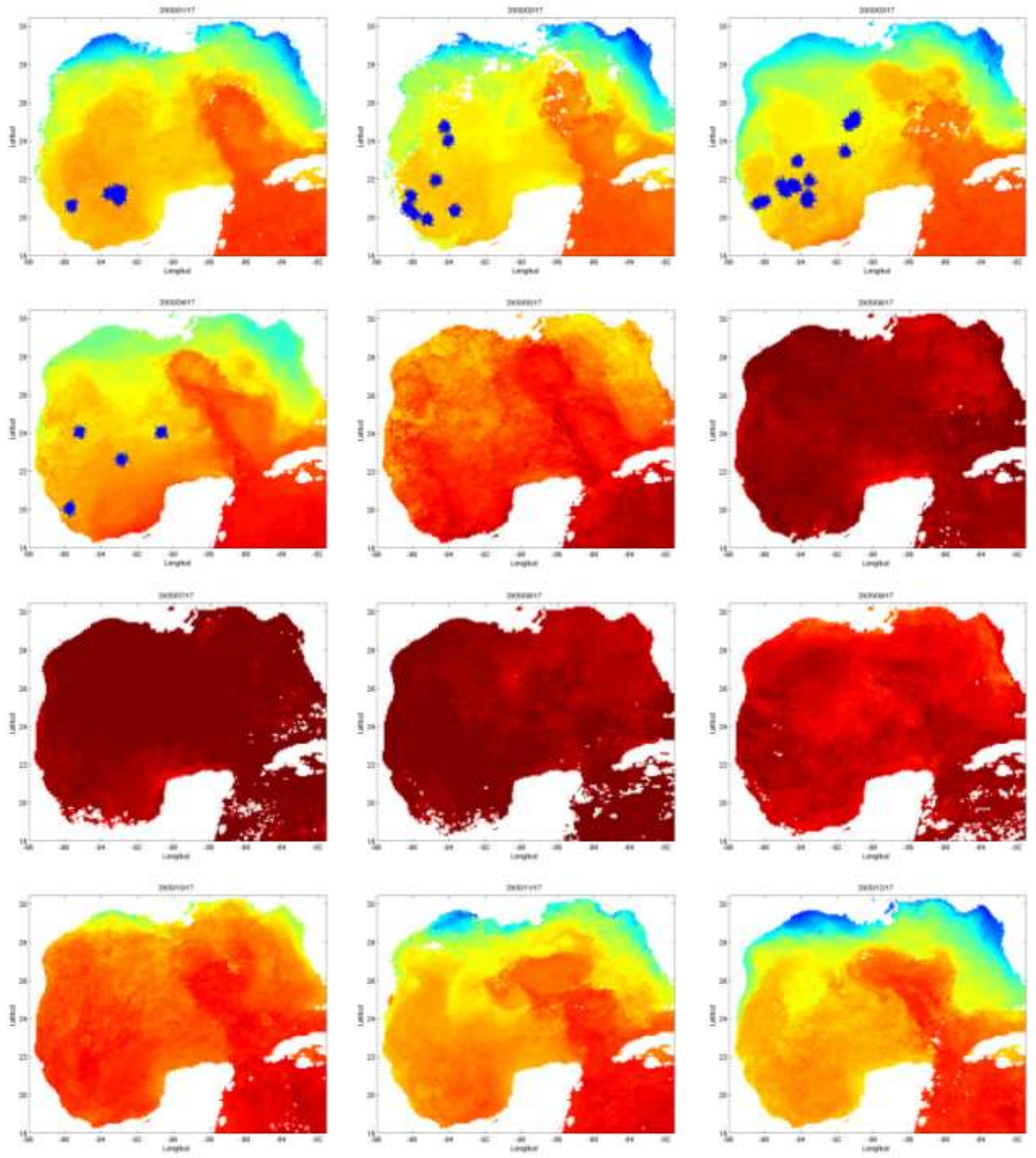


2004

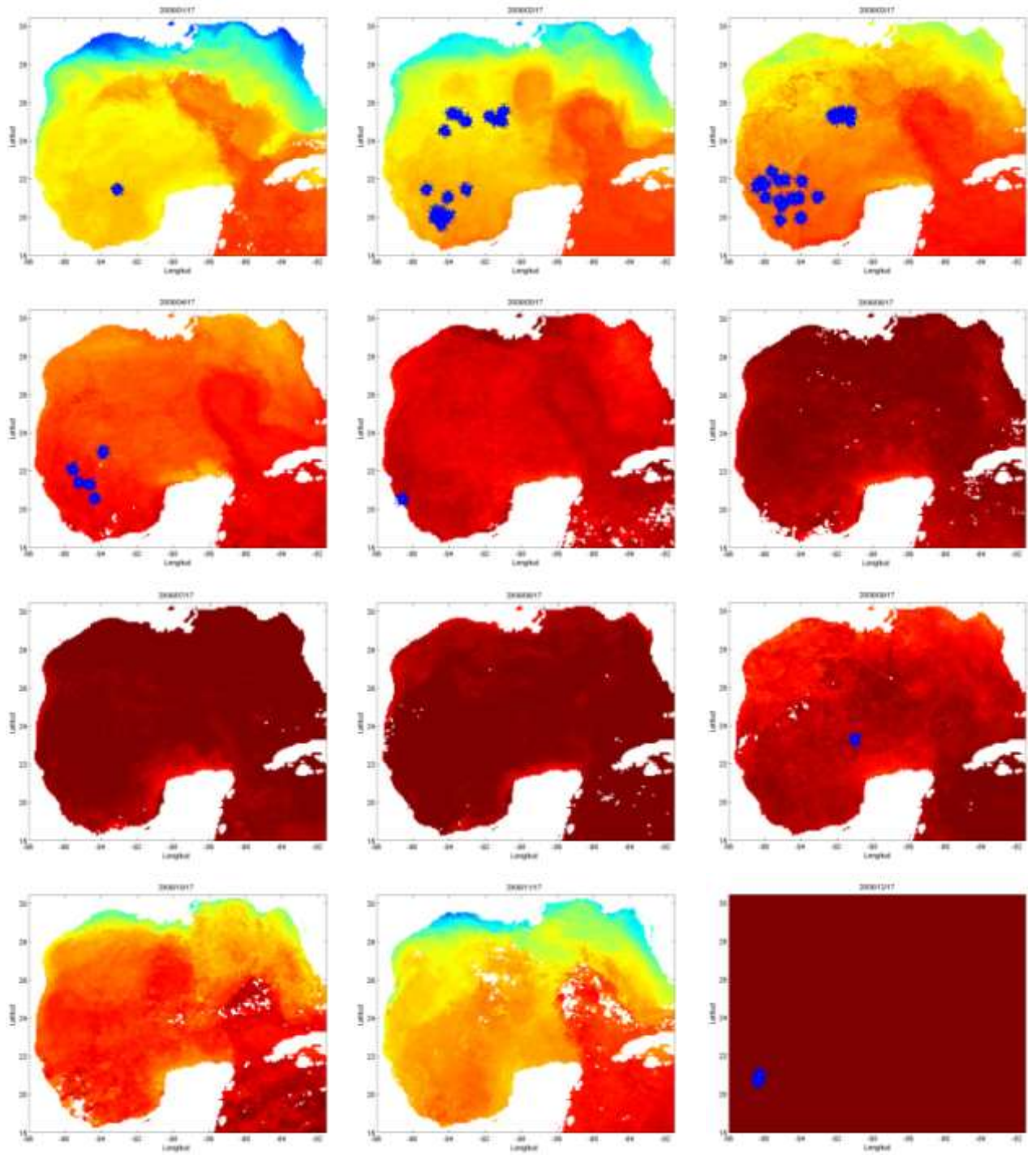




2005

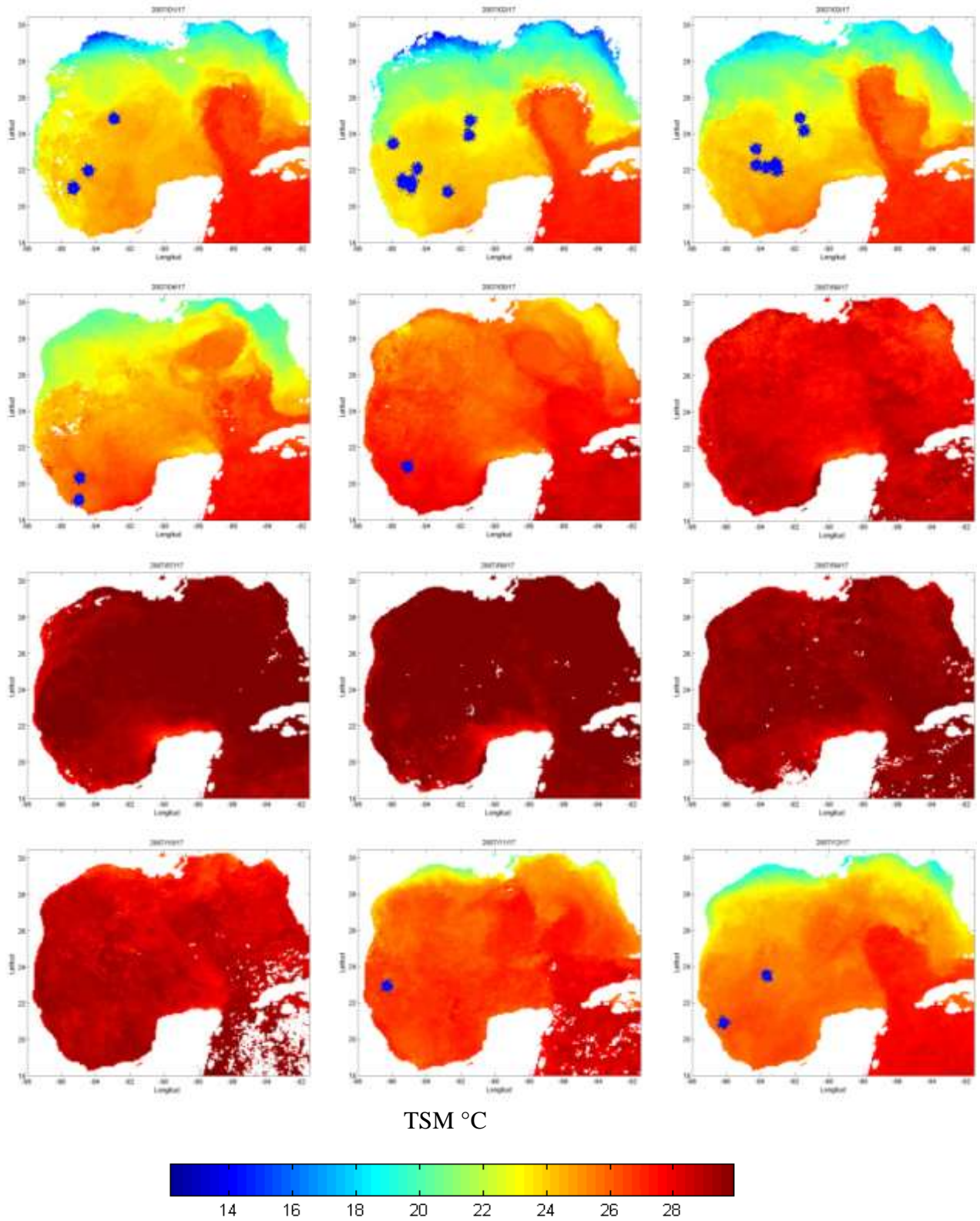


2006



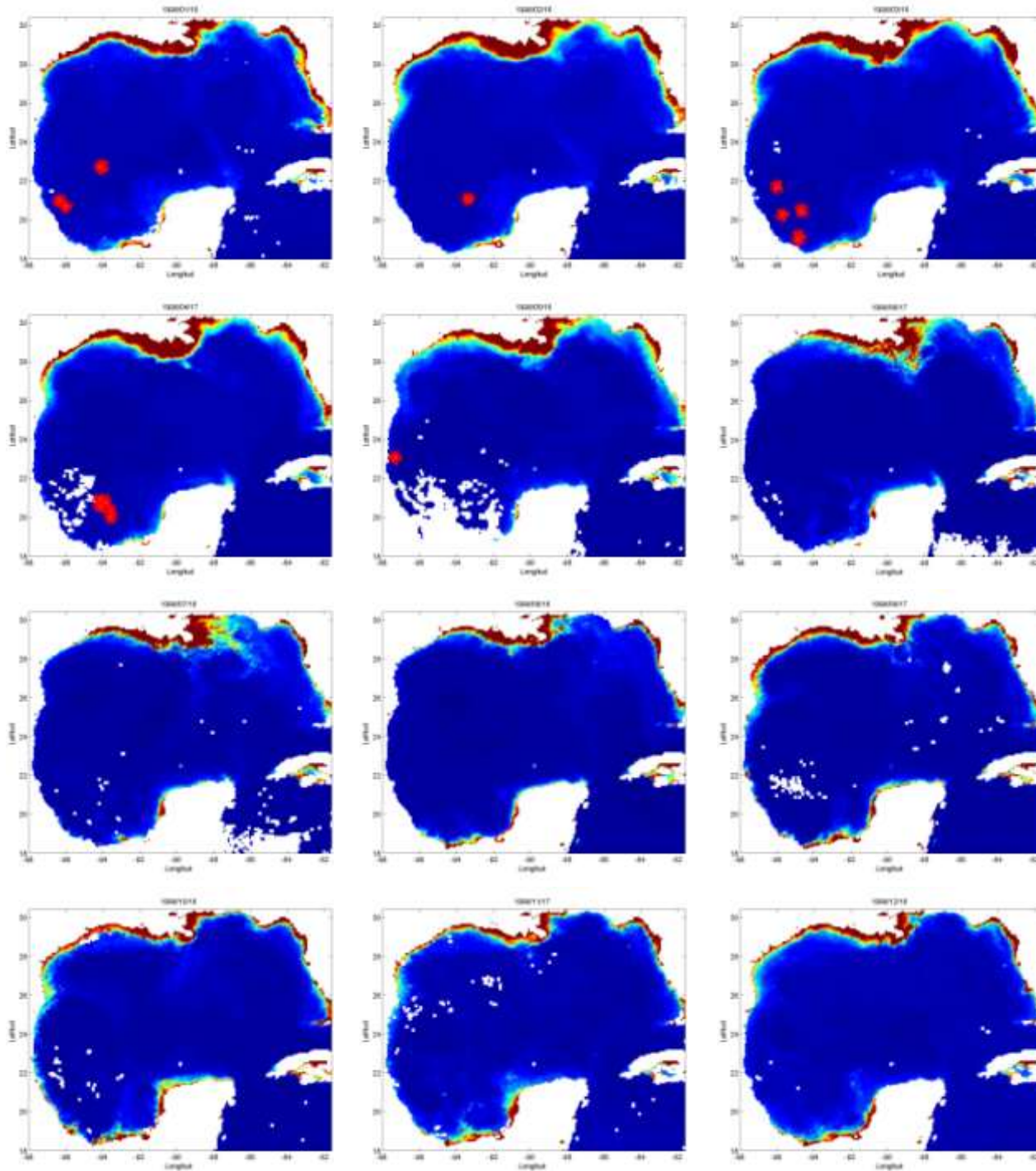


2007

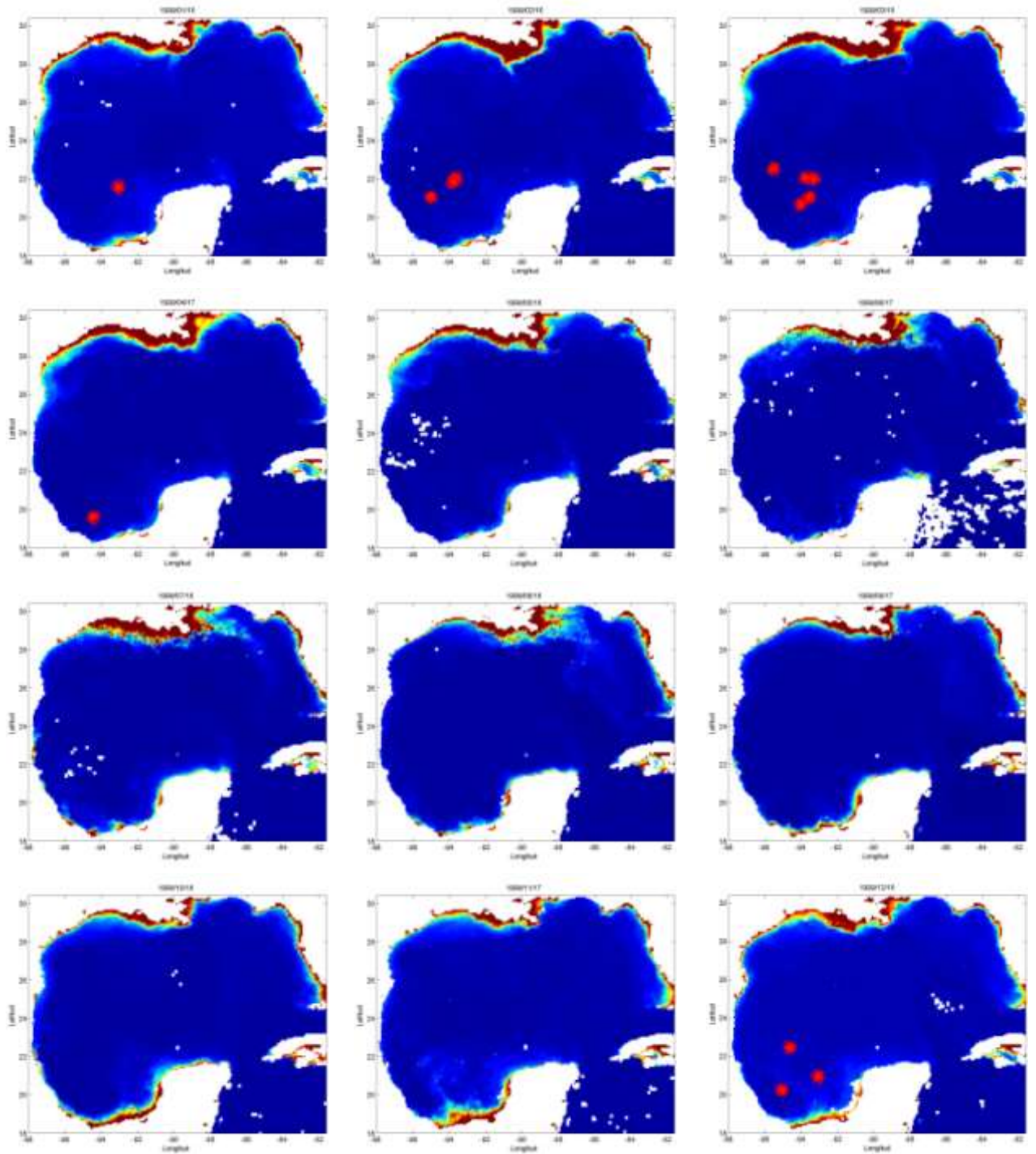


ANEXO II. Posiciones de captura de atún aleta azul por la flota mexicana palangrera entre 1998 y 2007 sobre composiciones mensuales de clorofila *a* del sensor SeaWiFS.

1998

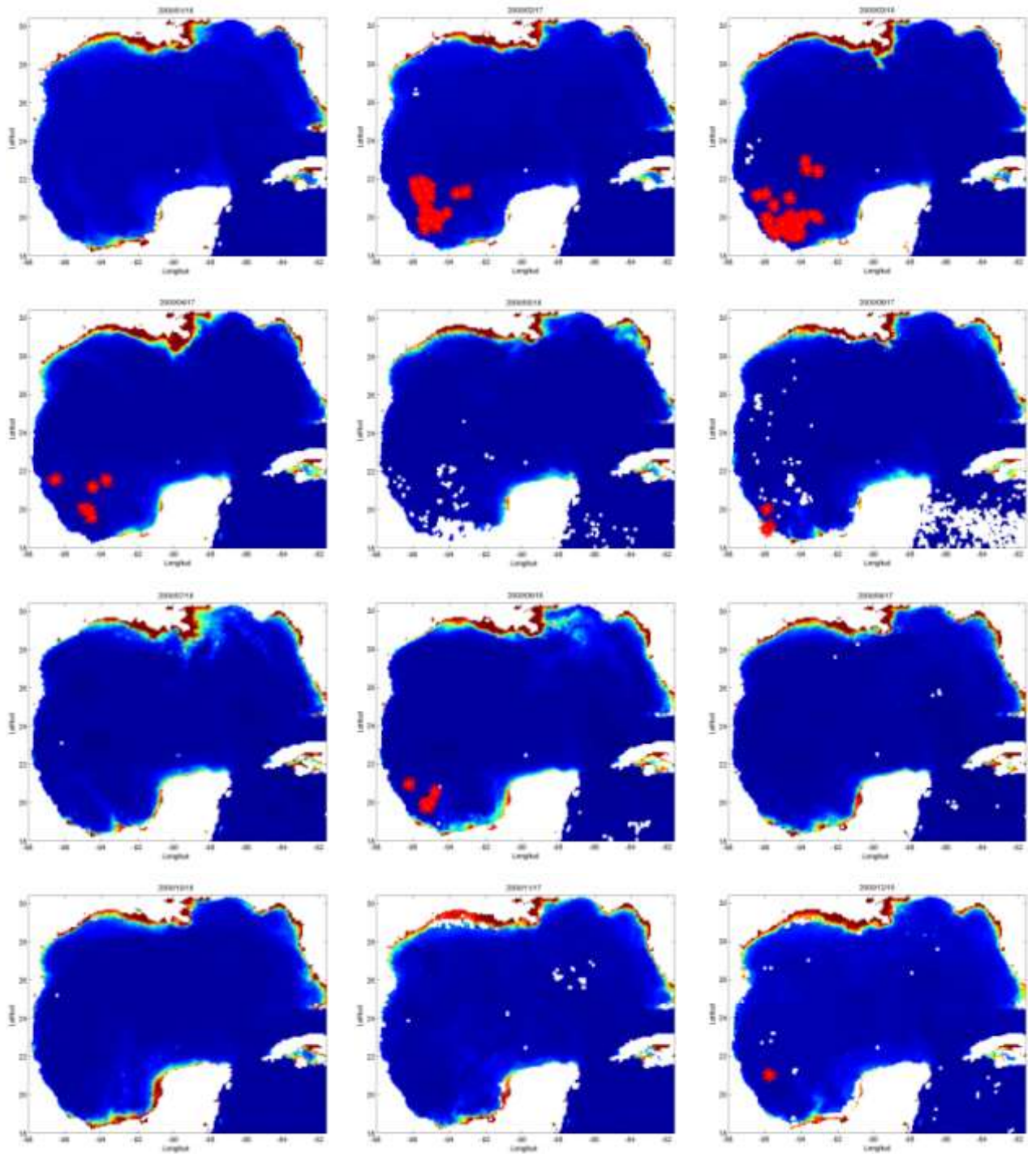


1999

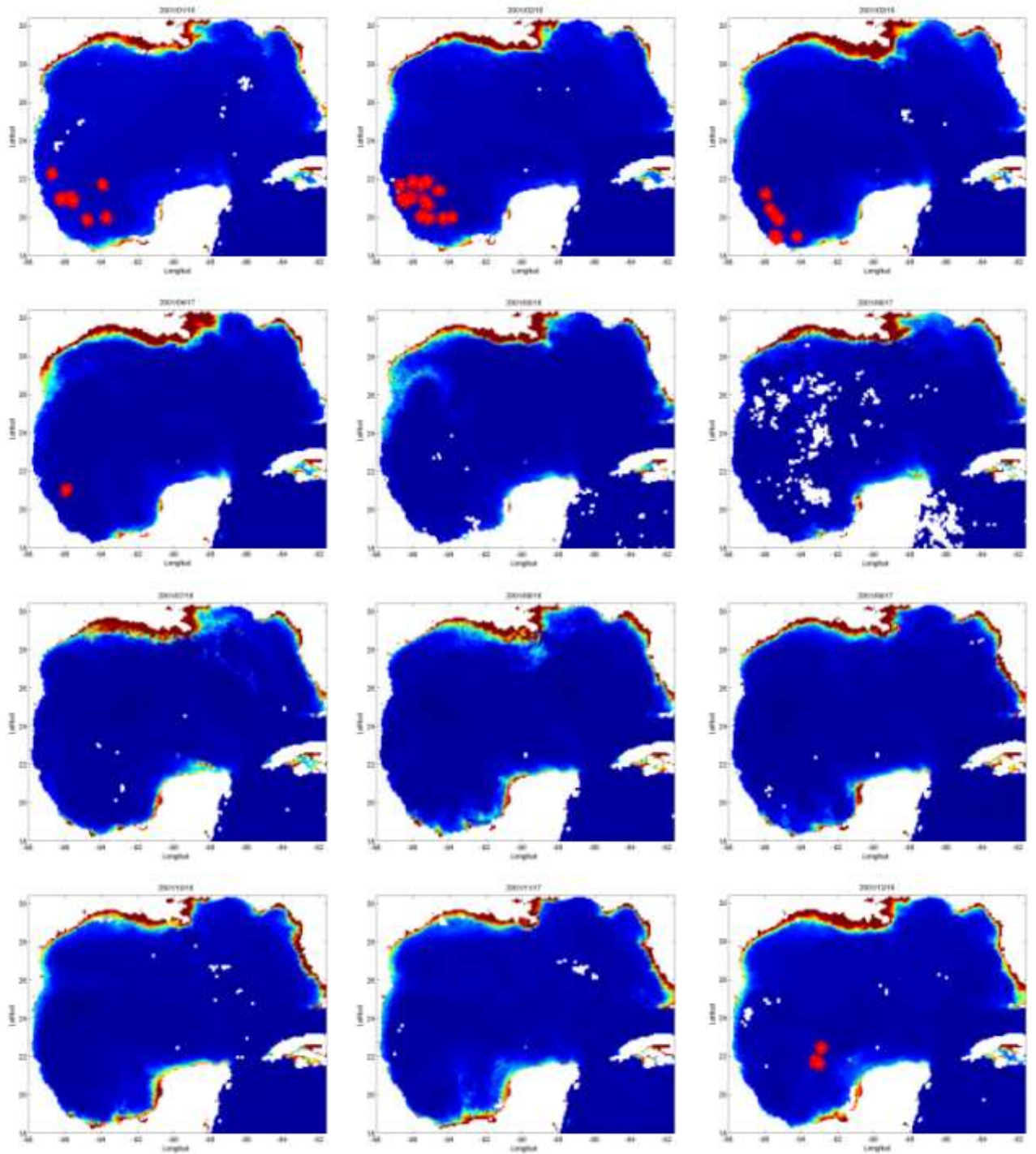




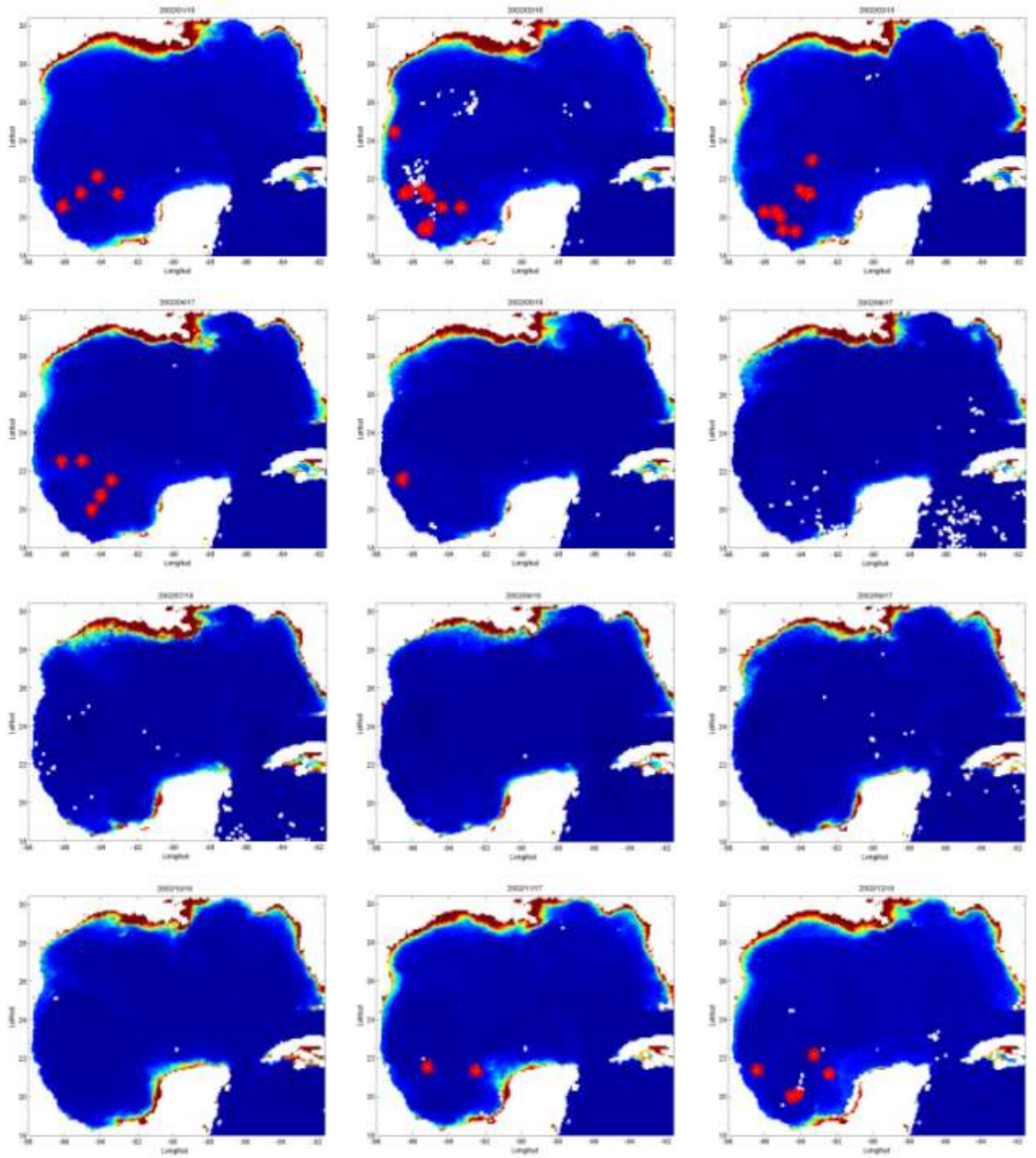
2000



2001

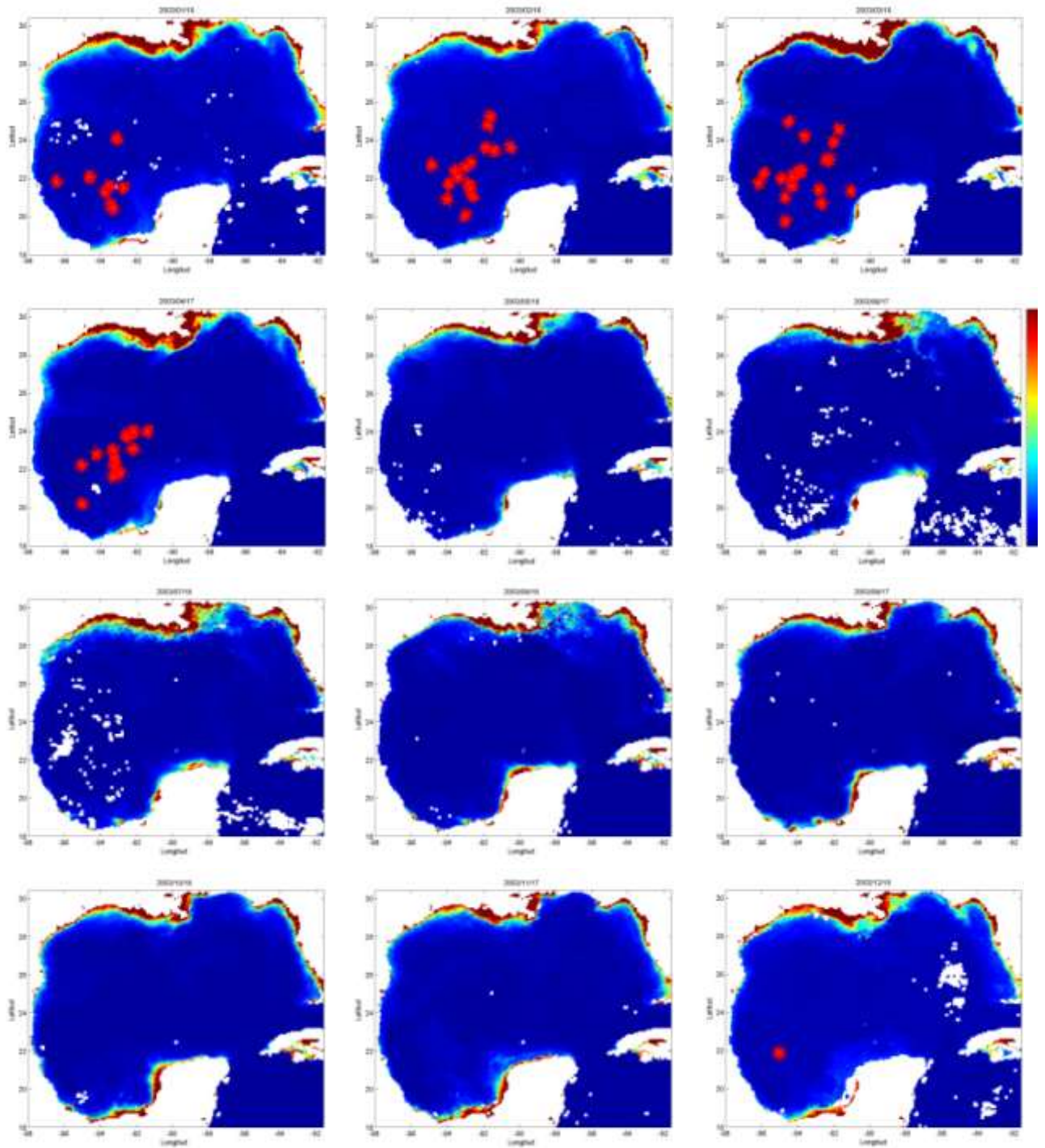


2002

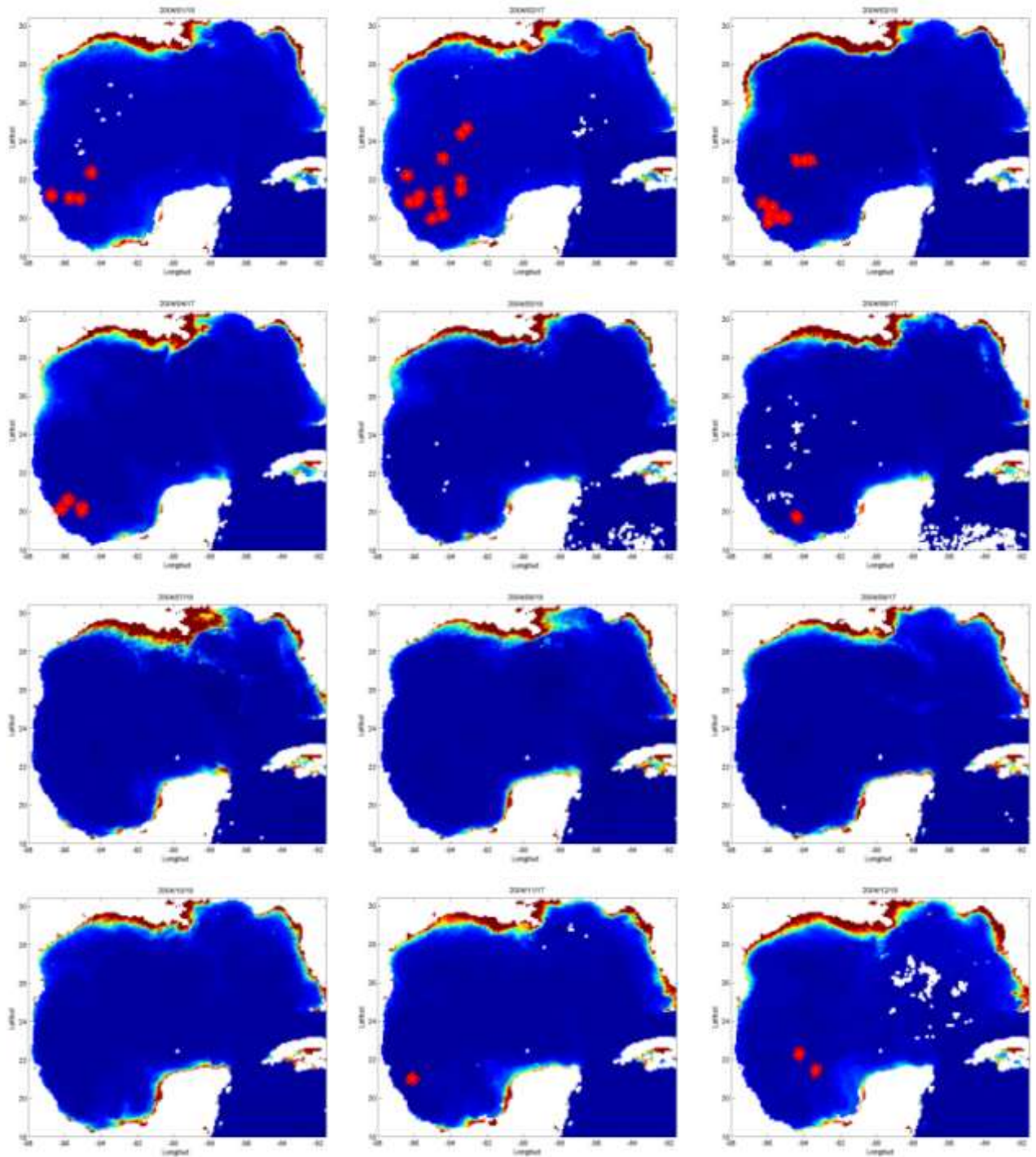




2003

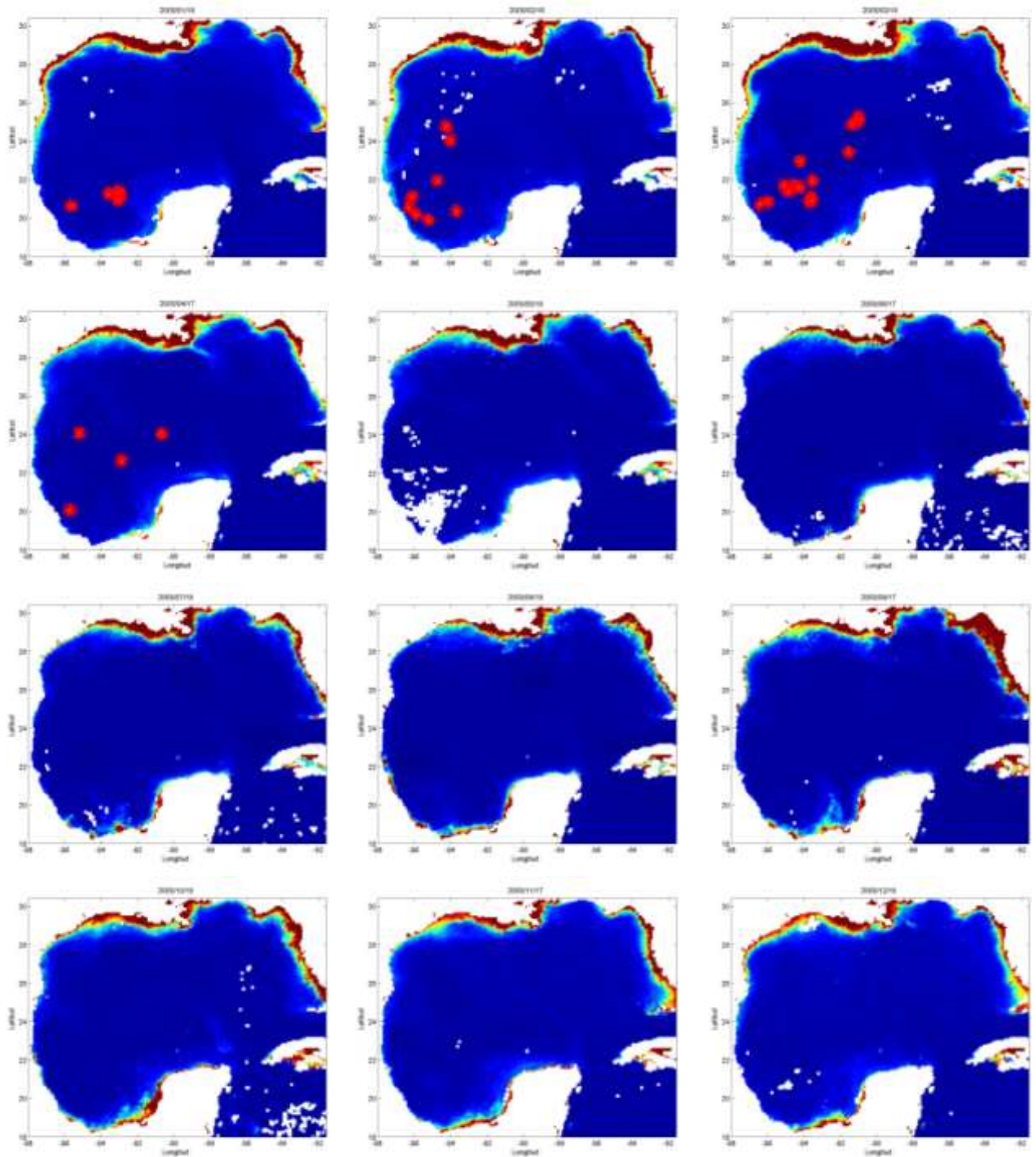


2004

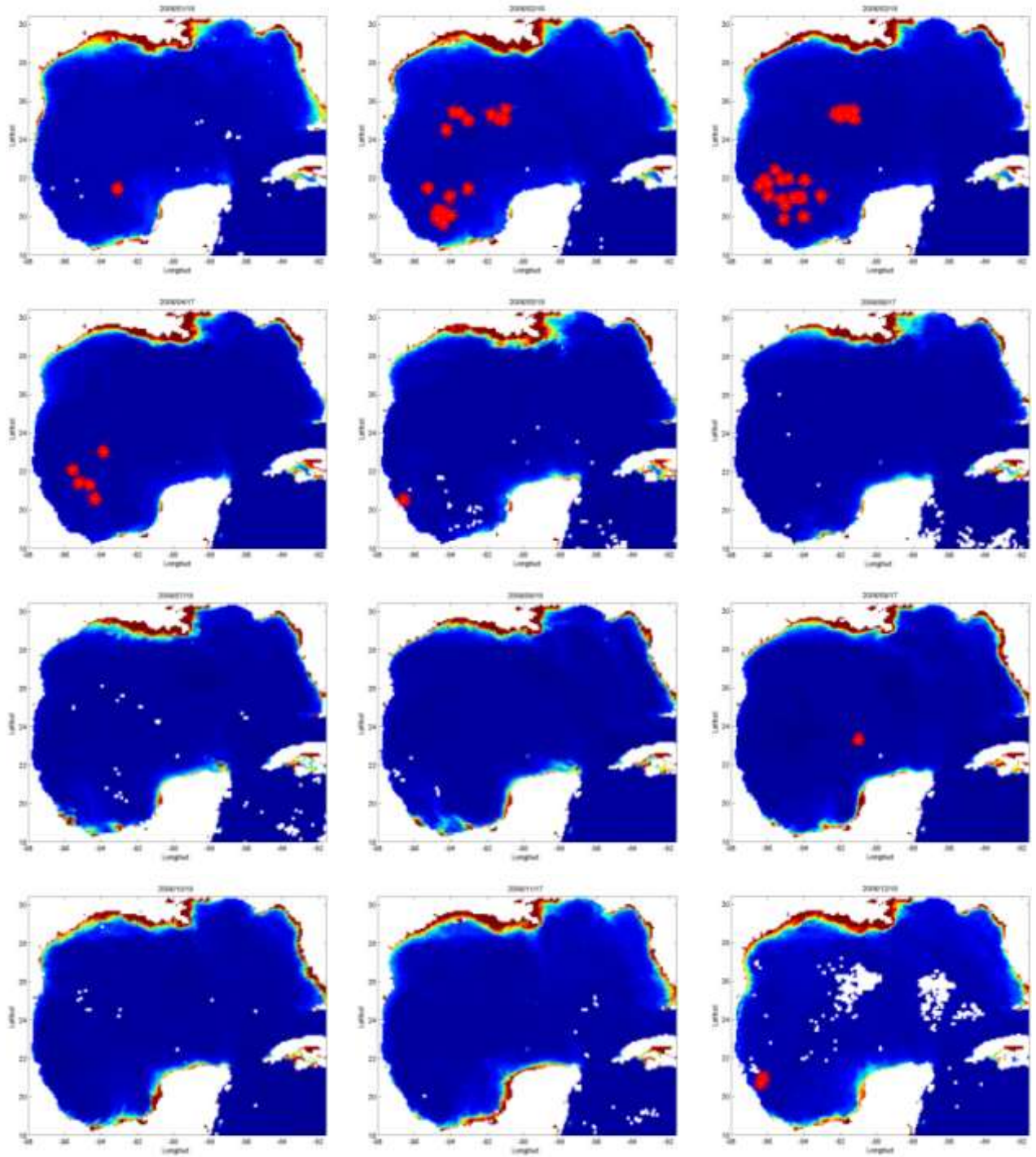




2005



2006



2007

