

## DINÁMICA TEMPORAL DE LA CAPTURA INCIDENTAL DE ATÚN ALETA AZUL (*THUNNUS THYNNUS*) Y SU RELACIÓN CON LA VARIABILIDAD AMBIENTAL EN AGUAS MEXICANAS DEL GOLFO DE MÉXICO

Alberto Abad-Urbarren<sup>1</sup>, Cesar Meiners<sup>1</sup>, Karina Ramírez López<sup>2</sup>, Sofía Ortega-García<sup>3</sup>

### SUMMARY

*In the past few decades Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) has been severely overfished due to its high commercial value, which has led to a drastic decline in stocks. In the Gulf of Mexico, which one of its main reproduction areas, it is caught as bycatch by the Mexican longline fleet fishing for yellowfin tuna (*Thunnus albacares*). This paper relates fishing data to oceanographic parameters for the purpose of studying their potential influence on the distribution of bluefin tuna catches in the Gulf of Mexico. Data relating to the bycatch of bluefin tuna by the Mexican longline fleet between 1994 and 2007 were used as well as time series of satellite images with Sea Surface Temperature (SST) data from the AVHRR sensor (1994-2007) and chlorophyll-a (Chla) concentration from the SeaWiFS (1998-2007). Bycatch of bluefin tuna occurred mainly in the first half of the year, with record highs in February and March, during which period a significant inverse relationship is observed ( $r^2=0.72$ ;  $g.l=9$ ;  $p<0.005$ ) between the evolution of the SST and the variation in the number of individuals caught. The production dynamics have a significant direct relationship ( $r^2=0.79$ ;  $g.l=2$ ;  $p<0.005$ ) with the catch distribution, with a three-month lag between the production peak and the record seasonal catches. These results indicate that the distribution of bluefin tuna bycatch in the Gulf of Mexico is conditioned by the SST and the Chla. In addition, the results suggest the possibility that bluefin tuna uses the Mexican waters of the Gulf of Mexico to reproduce, mainly in March and April.*

### RÉSUMÉ

*Le thon rouge de l'Atlantique (*Thunnus thynnus*) est, depuis ces dernières décennies, victime d'une intense surpêche due à sa valeur commerciale élevée, phénomène qui a entraîné une diminution drastique des stocks. Dans le golfe du Mexique, une de ses zones principales de reproduction, il est capturé accidentellement dans le cadre des manœuvres de pêche de la flottille palangrière mexicaine ciblant l'albacore (*Thunnus albacares*). Le présent travail met en corrélation les données des pêcheries avec les paramètres océanographiques dans l'objectif d'étudier leur possible influence sur la distribution des captures de thon rouge dans le golfe du Mexique. On a utilisé les données relatives à la capture accidentelle du thon rouge réalisée par la flottille palangrière mexicaine entre 1994 et 2007 et les séries temporelles des images satellite ainsi que les données de la température de surface de la mer (TSM) du capteur AVHRR (1994-2007) et de la concentration de la chlorophylle-a (Chla) du SeaWiFS (1998-2007). La capture accidentelle du thon rouge est principalement survenue pendant la première moitié de l'année, avec un maximum aux mois de février et de mars, période au cours de laquelle se produit une relation inverse significative ( $r^2=0,72$ ;  $g.l=9$ ;  $p<0,005$ ) entre l'évolution de la TSM et la variation du nombre de spécimens capturés. La dynamique productive garde une relation directe significative ( $r^2=0,79$ ;  $g.l=2$ ;  $p<0,005$ ) avec la distribution des captures, avec un décalage de trois mois entre le pic productif et le maximum saisonnier de captures. Ces résultats indiquent que la distribution de la capture accidentelle de thon rouge dans le golfe du Mexique est conditionnée par la TSM et la Chla. Par conséquent, il est possible que le thon rouge utilise les eaux mexicaines du golfe du Mexique pour se reproduire, principalement pendant les mois de mars et d'avril.*

### RESUMEN

<sup>1</sup> Universidad Veracruzana (UV). Dirección General de Investigaciones. Instituto de Ciencias Marinas y Pesquerías. Calle Hidalgo No. 617, Col. Río Jamapa, Boca Del Río, Veracruz, México; e-mail: abaduribarren@yahoo.es

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Pesca (INAPESCA). Dirección General Adjunta de Investigación Pesquera en el Atlántico. Av. Ejército Mexicano No. 106, Col. Ex-hacienda Ylang Ylang, Boca del Río, Veracruz, México.

<sup>3</sup> Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (CICIMAR). Av. Instituto Politécnico Nacional s/n Col. Playa Palo de Santa Rita, La Paz, B.C.S. México.

*El atún aleta azul o atún rojo del Atlántico (Thunnus thynnus) ha sufrido en las últimas décadas una intensa sobrepesca debido a su alto valor comercial, lo que ha ocasionado una drástica disminución de los stocks. En el golfo de México, una de sus principales áreas de reproducción, es capturado de manera incidental dentro de las maniobras de pesca de la flota palangrera mexicana sobre el atún aleta amarilla (Thunnus albacares). Este trabajo relaciona datos pesqueros con parámetros oceanográficos con el objetivo de estudiar la posible influencia de estos en la distribución de las capturas del atún aleta azul en el golfo de México. Se utilizaron datos relativos a la captura incidental del atún aleta azul por la flota palangrera mexicana entre 1994 y 2007 y series temporales de imágenes satelitales con datos de temperatura superficial del mar (TSM) del sensor AVHRR (1994-2007) y concentración de clorofila-a (Chla) del SeaWiFS (1998-2007). La captura incidental de atún aleta azul se produjo principalmente en la primera mitad del año, con máximos en los meses de febrero y marzo, periodo durante el cual se aprecia una relación inversa significativa ( $r^2=0.72$ ;  $g.l=9$ ;  $p<0.005$ ) entre la evolución de la TSM y la variación en el número de organismos capturados. La dinámica productiva guarda una relación directa significativa ( $r^2=0.79$ ;  $g.l=2$ ;  $p<0.005$ ) con la distribución de las capturas, con un desfase de tres meses entre el pico productivo y el máximo estacional de capturas. Estos resultados indican que la distribución de la captura incidental del atún aleta azul en el golfo de México está condicionada por la TSM y la Chla. Asimismo sugieren la posibilidad de que el atún aleta azul utilice aguas mexicanas del golfo de México para reproducirse, principalmente en los meses de marzo y abril.*

#### KEYWORDS

*Bluefin tuna, Gulf of Mexico, Environmental variability, Time series analysis*

## 1. Introducción

El atún aleta azul o atún rojo del Atlántico ha sufrido en las últimas décadas una fuerte presión pesquera lo que ha desembocado en una drástica disminución de sus stocks (ICCAT, 2007). El stock del oeste, aquel que realiza su puesta en el Golfo de México (Baglin, 1982), ha visto reducida su biomasa de reproductores desde 1970 en un 80% (ICCAT 2007). Aunque en la actualidad no existe pesca dirigida hacia esta especie en el Golfo de México (Mather, 1995; Ramírez-López, 2009), uno de los factores potenciales que contribuyen a la reducción del stock es la captura incidental de reproductores en las pesquerías de palangre de superficie, cuya especie objetivo es el atún aleta amarilla (Teo y Block, 2010). Pese a los planes de recuperación desarrollados a principios de la década de 1980 (Magnuson, 1994), el stock oeste continua decreciendo, lo que pone de relevancia la necesidad de nuevas estrategias de manejo.

El conocimiento de las causas de la variabilidad en la abundancia de los stocks constituye en la actualidad una de las metas para un correcto manejo de las pesquerías (Hart *et al.*, 2011). Uno de los objetivos principales del Enfoque Ecosistémico del Manejo de Pesquerías (EEMP), es expandir la consideración de la dinámica poblacional de peces a sus hábitats marinos, mediante el entendimiento de los determinantes de los cambios en la abundancia y la distribución 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).

Es sabido que las variables ambientales afectan numerosos procesos en la biología de los peces, y se piensa que sus fluctuaciones constituyen uno de los principales factores en la variabilidad de los stocks pesqueros (Rouyer *et al.*, 2010). A pesar de que varios estudios han descrito el efecto de la variabilidad ambiental en la distribución y dinámica poblacional del atún aleta azul y otros atunes (Lutcavage *et al.*, 1999; Royer *et al.*, 2004; Block *et al.*, 2005; Bridges, 2009; Teo y Block, 2010), los procedimientos empleados actualmente para realizar las evaluaciones de stock no consideran información sobre la variabilidad ambiental.

Este trabajo analiza el comportamiento temporal de la captura incidental de atún aleta azul en aguas mexicanas del Golfo de México y su relación con la variabilidad ambiental, a través de la conjunción de datos pesqueros y datos ambientales derivados de mediciones satelitales.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Área de estudio

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

### 2.2. Datos pesqueros

En este estudio se utilizaron datos relativos a la captura incidental del atún aleta azul 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 facilitados por la Dirección General Adjunta de Investigación Pesquera en el Atlántico (DGAIPA) del Instituto Nacional de Pesca (INAPESCA) a través del Programa Atún del Golfo de México. El conjunto de datos abarcó todos los viajes de pesca con captura positiva para el atún aleta azul realizados por la flota atunera mexicana en el Golfo de México entre los años 1994-2007. A pesar de que no se tuvo acceso a datos de esfuerzo pesquero, lo cual supuso una desventaja a la hora de estandarizar la información, es importante destacar que el programa de observadores en el Golfo de México tiene una cobertura del 100% de los viajes de pesca (Solana-Sansores *et al.*, 2002), y que la información comprende 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 del atún aleta azul en el área y período de estudio. Dicha información incluyó la fecha del lance con captura positiva (mes) y el sexo, talla y peso aproximado del individuo capturado.

### 2.3. Datos ambientales

Se emplearon datos de temperatura superficial del mar (TSM) y concentración superficial de clorofila a (Chla) derivados de mediciones satelitales. Los datos de TSM, provenientes de los sensores AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) a bordo de satélites de la NOAA, se obtuvieron de la base de datos NOAA/NASA AVHRR *Ocean Pathfinder* versión 5 del PODAAC (Physical Oceanography Distributed Active Archive Center) (<http://poet.jpl.nasa.gov/>). Se utilizaron promedios mensuales de datos globales (GAC) para el periodo 1994-2007, obtenidos de pases descendentes (temperatura nocturna) de los satélites. La serie de tiempo se obtuvo promediando espacialmente los datos de TSM para toda la cuenca del Golfo de México. En el caso de la Chla, se utilizaron datos 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 Chla de datos globales de septiembre de 1997 a diciembre de 2007. A fin de evitar la variabilidad derivada de la zona costera, ya que prácticamente todas las capturas (99%) se produjeron en aguas oceánicas, a la hora de generar los promedios espaciales se consideró un polígono que abarcó la mayor parte de las posiciones de captura evitando al máximo zonas costeras (**Figure 2**).

### 2.4. Dinámica temporal de la captura incidental

Para estudiar la distribución temporal de las capturas se construyeron diferentes 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. A fin de comprobar el comportamiento homogéneo de la serie de tiempo de captura mensual en función de atributos poblacionales, sexo y estado de madurez, y descartar posibles segregaciones temporales en la ocurrencia, la serie original se dividió en subseries, hembras - machos y adultos - juveniles (se consideraron individuos juveniles aquellos por debajo de 200 cm de longitud furcal (Mather *et al.*, 1995). Se analizaron comparativamente 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).

### 2.5 Relación entre la captura incidental y la variabilidad ambiental

Con el fin de identificar la naturaleza y contribución relativa de la variabilidad ambiental a la captura del atún aleta azul se construyeron series de tiempo de variables ambientales (TSM, Chla) 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). Las diferentes series de tiempo se descompusieron en sus componentes principales (CP) y se aislaron aquellos componentes que explicaron la mayor parte de la variabilidad de la serie original. Para conocer el tipo de relación y magnitud de la contribución de la TSM y la Chla sobre la dinámica temporal de las capturas

del atún aleta azul, se realizaron análisis de correlación cruzadas (Sokal y Rohlf, 1981) por mínimos cuadrados. 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, definidas como el valor mensual observado menos el promedio mensual de toda la serie, de TSM y de capturas; 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.

### 3. Resultados

#### 3.1 Dinámica temporal de la captura incidental

La captura incidental del atún aleta azul 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 (**Figure 3**). 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 del atún aleta azul en el año 2000 (**Figure 4**). A lo largo de la serie temporal se distinguieron dos periodos diferenciados entre sí, de 1994 a 1999 las capturas del atún aleta azul fueron moderadas ( $22.7 \text{ individuos} \cdot \text{año}^{-1} \pm 7.44$ ) y de 2000 a 2007 las capturas anuales se incrementaron sensiblemente ( $55.4 \text{ individuos} \cdot \text{año}^{-1} \pm 10.8$ ).

La distribución mensual de las capturas (**Figure 5**) indica que las temporadas de pesca del atún aleta azul 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 del atún aleta azul en el área de estudio, a razón de un mes cada 3-4 años; así en la temporada de 93-94, febrero de 94 fue el mes inicial de captura, mientras que en 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 (**Figure 6**), no obstante se observaron algunas temporadas en las 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). Así mismo no se observaron patrones diferenciados de la distribución temporal entre juveniles y adultos. En base a estos resultados se consideró un comportamiento homogéneo de la serie de tiempo de capturas independientemente de sus atributos poblacionales.

#### 3.1 Relación entre la captura incidental y la variabilidad ambiental

Las dos primeras CP del ACP de la serie mensual de capturas explicaron el 56.4% de la variabilidad total de la serie, contribuyendo la primera componente (CAPCP1) con el 37.4%. Las dos componentes mostraron un comportamiento armónico, CAPCP1 presentó un periodo de oscilación anual, mientras que la componente 2 (CAPCP2) de aproximadamente seis meses (**Figure 7**). Se consideró a CAPCP1 como la componente más representativa de la serie de capturas (**Figure 8**).

Debido al comportamiento eminentemente estacional y estacionario de la serie original de TSM no se consideró la descomposición de la misma en CP. La componente estacional de las capturas CAPCP1 mostró una correlación significativa inversa con la TSM ( $r = 0.86$ ,  $g.l = 166$ ,  $p < 0.0001$ ) (**Figure 9**). La dinámica térmica de la cuenca explicó un 74% de la variabilidad estacional de la captura incidental.

En el caso de la serie de Chla, las dos primeras CP explicaron el 78.6 % de la variabilidad total. La primera componente (ChlaCP1) contribuyó con el 71.5 % y mostró un carácter marcadamente estacional (**Figure 10**). La correlación entre ChlaCP1 y CAPCP1 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 Chla explicó el 79.3 % la variabilidad estacional de las capturas tres meses después (Fig. 11).

No se apreciaron correlaciones significativas entre la serie de anomalías de TSM y la distribución temporal de las capturas del atún aleta azul, 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 del atún aleta azul (**Figure 12**).

## 4. Discusión

### 4.1. Dinámica temporal de la captura incidental

La captura incidental del atún aleta azul 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 con lo registrado en aguas norteamericanas, se observó una coincidencia en el intervalo de presencia del atún aleta azul 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 a aguas mexicanas. Estos meses de máxima ocurrencia en aguas norteamericanas coinciden con la temporada pico de reproducción, estimada entre abril y junio (Mather *et al.*, 1995; Schaefer, 2001; Block *et al.*, 2005), por lo que, 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 en la ocurrencia entre las dos áreas puede deberse a que el atún aleta azul 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) es alcanzada antes en aguas mexicanas.

Interanualmente se observó una alta variabilidad en las capturas del atún aleta azul, apreciándose 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. Considerando datos de esfuerzo pesquero recogidos en Ramírez y Abad-Uribarren (2012) se puede concluir que solo parte de estas diferencias parecen estar relacionadas con la dinámica del esfuerzo pesquero de la flota. Si bien el esfuerzo promedio anual dirigido al atún aleta amarilla durante el segundo periodo duplicó al ejercido entre 1994 y 1999, 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 del atún aleta azul 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.

### 4.2 Relación entre la captura incidental y la variabilidad ambiental

Bajo el escenario de que la ocurrencia del atún aleta azul 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). Los resultados obtenidos indican que la dinámica térmica del Golfo de México influyó significativamente en la distribución del atún aleta azul. La TSM mostró periodos cálidos en verano y fríos en invierno muy marcados, indicando un ciclo anual recurrente, en coincidencia con lo descrito en la literatura (Müller-Karger *et al.*, 1991; Zavala-Hidalgo *et al.*, 2003). El ACP de las capturas 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 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 del atún aleta azul, 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; es decir, el incremento de la TSM se relacionó con un aumento de las capturas. El diferencial medio de temperatura entre principio de los 90 y mediados de la década del 2000 fue de aproximadamente 0.64°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 atún aleta azul perciba tarde el umbral térmico inductor del desarrollo gonádico (Fromentin y Powers, 2005; Heinisch *et al.*, 2008).

El adelanto sistemático observado del mes inicial de ocurrencia del atún aleta azul 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, 2004), se han advertido cambios de comportamiento a escalas temporales más finas (Dufour *et al.*, 2010). 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 atún aleta azul. 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).

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 atún aleta azul 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 del atún aleta azul 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; 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 atún aleta azul definido en este estudio.

## 5. Conclusiones

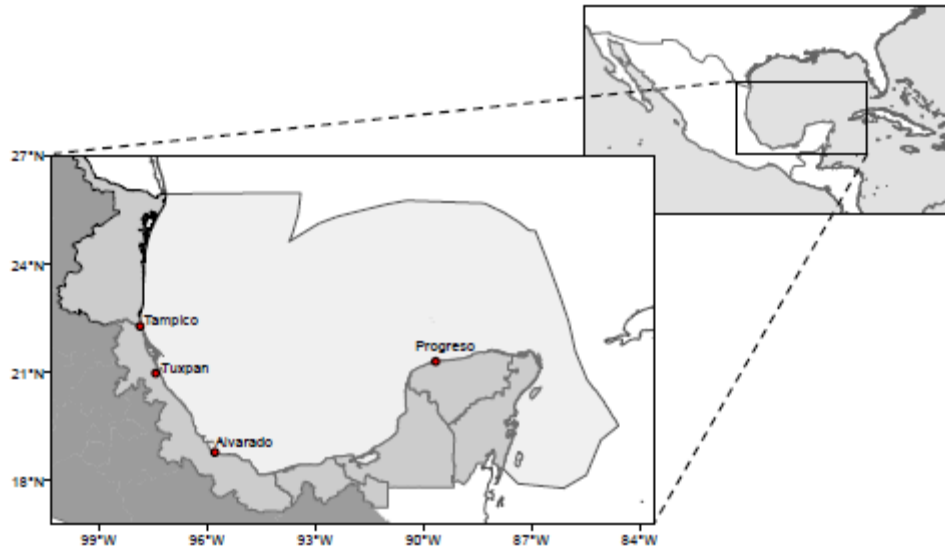
La ocurrencia del atún aleta azul en aguas mexicanas del Golfo de México presentó una marcada estacionalidad, produciéndose entre los meses de noviembre y junio, con máximos en los meses de febrero y marzo. Su presencia en el área se correspondió con características térmicas y productivas bien definidas, y parece estar relacionada con la actividad reproductiva. A lo largo del periodo de estudio se observó un adelanto sistemático en el mes inicial de ocurrencia de la especie en el área, lo cual podría estar asociado a una estrategia adaptativa para asegurar el éxito reproductivo ante el progresivo calentamiento del Golfo de México. Para corroborar estas hipótesis se sugiere llevar a cabo estudios histológicos de tejidos reproductivos y de distribución de larvas con el propósito de identificar claramente el hábitat reproductivo del atún aleta azul en aguas mexicanas del Golfo de México.

## Referencias bibliográficas

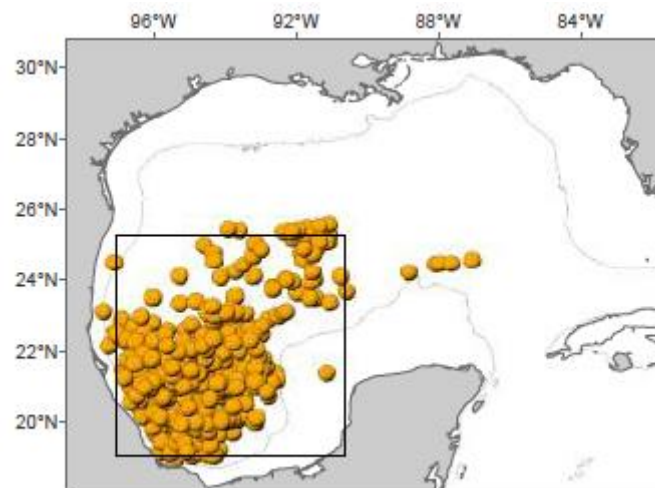
- Block, B.A., S.L.H. Teo, A. Walli, A. Boustany, M.J.W. Stokesbury, C.J. Farwell, K.C. Weng, H. Dewar, T.D. Williams. 2005. Electronic tagging and population structure of Atlantic bluefin tuna. *Nature* 434:1121-1127.
- Bridges, C.R., O. Krohn, M. Deflorio, G. De Metro. 2009. Possible SST and NAO influences 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Lutcavage, M., R.W. Brill, G.B. Skomal, B.C. Chase, P.W. Howey. 1999. Results of popup 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Ramírez-López, K. y A. Abad-Uribarren. 2012. Análisis de la captura incidental del atún aleta azul (*L. atlanticus*) por la flota palangrera mexicana en el Golfo de México, 1994-2011. *International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas, Collective Volume of Scientific Papers*
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Rouyer, T., J.M. Fromentin, N.C. Stenseth. 2010. Environmental noise affects the fluctuations of Atlantic large pelagics. *Progress In Oceanography* 86: 267-275.
- 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.
- 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.

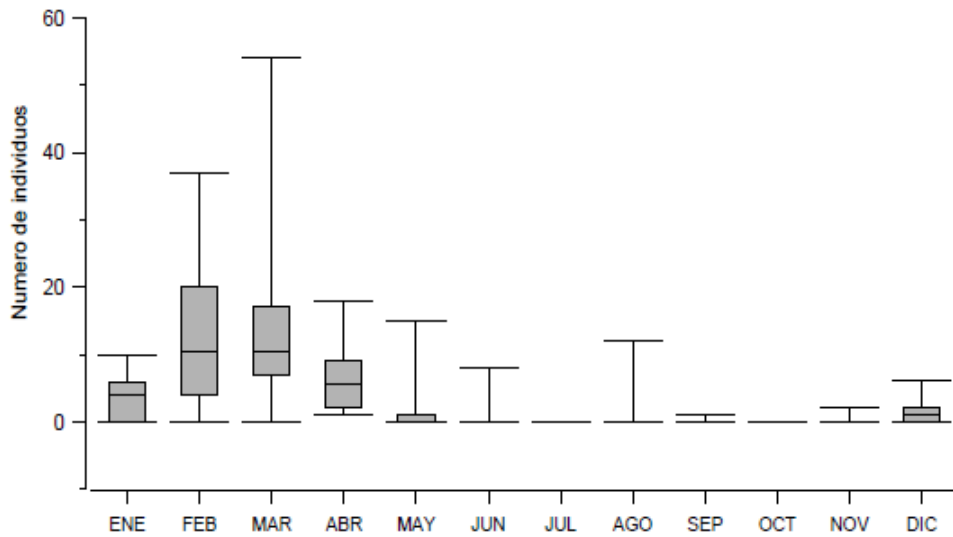




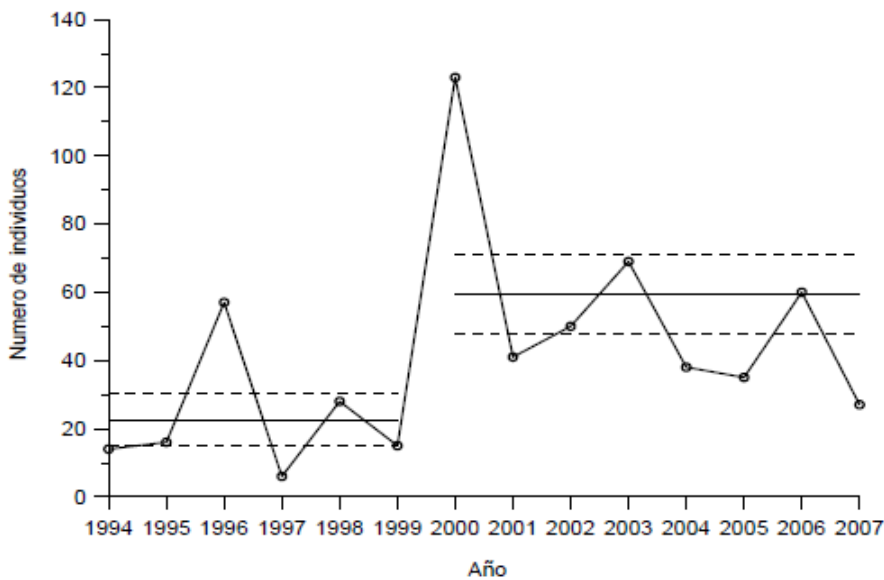
**Figura 1.** Zona Económica Exclusiva (ZEE) mexicana del Golfo de México y Mar Caribe. En gris claro se muestran los estados costeros (Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo). Los puntos rojos representan los principales puertos de la flota atunera mexicana.



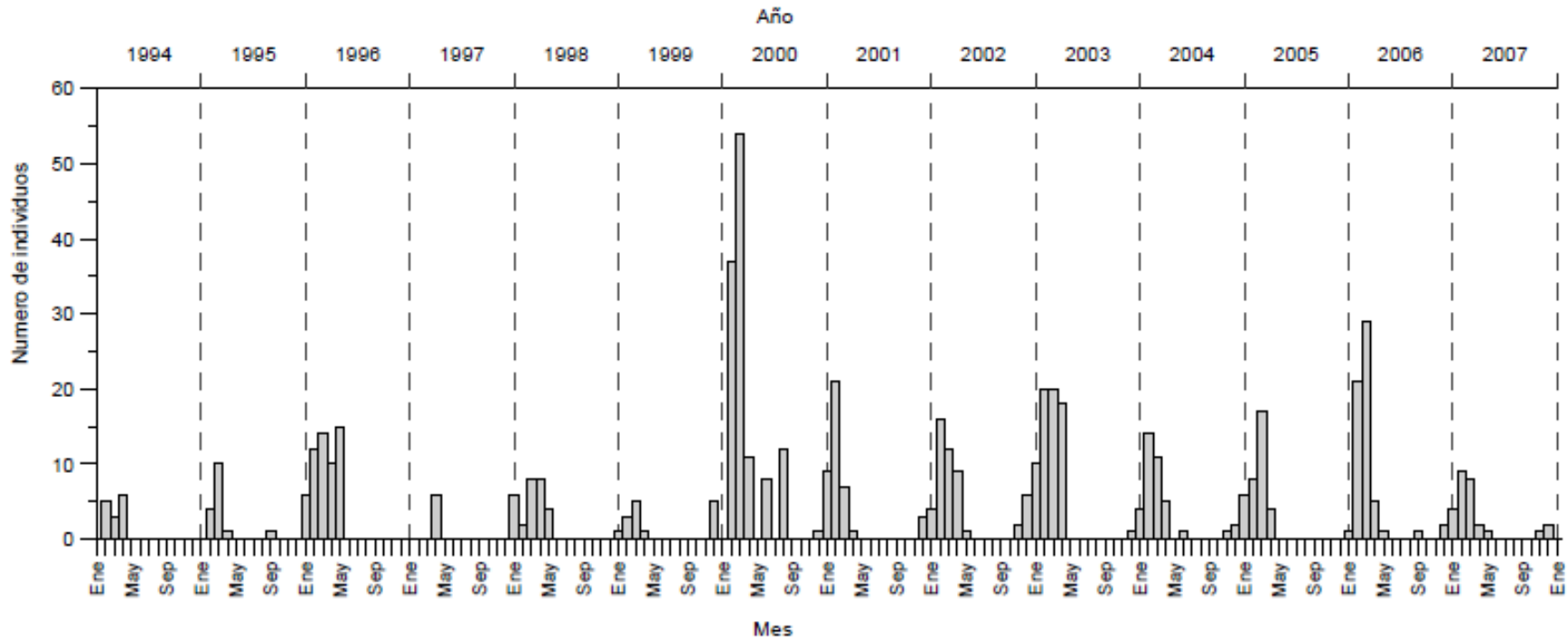
**Figura 2.** Polígono rectangular (línea negra) que contiene el 95% de las posiciones geográficas (marcas amarillas) de captura incidental del atún aleta azul o atún rojo del Atlántico (*Thunnus thynnus*) en aguas mexicanas del Golfo de México entre 1994- 2007.



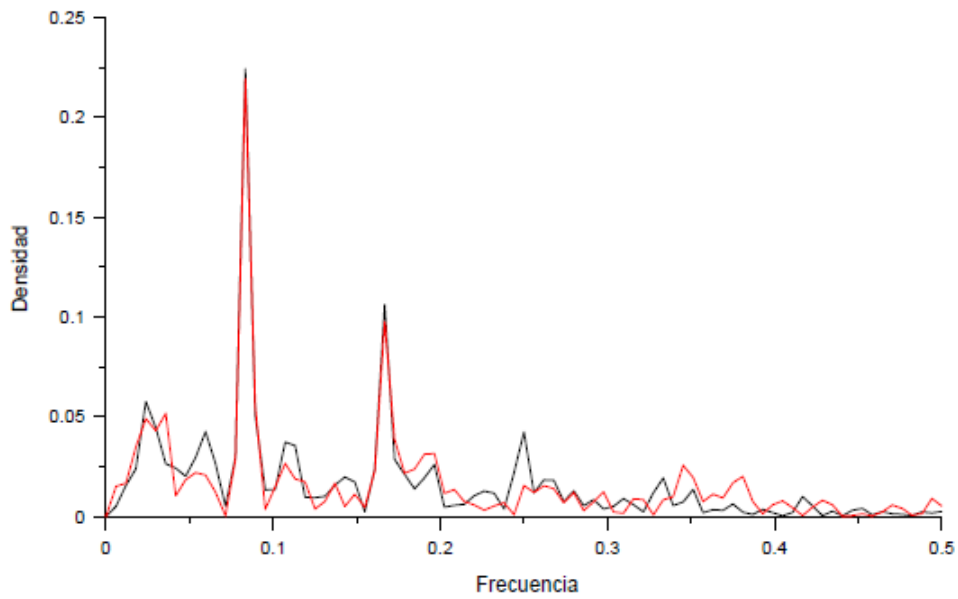
**Figura 3.** Diagrama de caja (mediana, primer y tercer cuartil, mínimo y máximo) de la captura incidental del atún aleta azul o atún rojo del Atlántico (*Thunnus thynnus*) en número de individuos acumulada por mes para el periodo 1994-2007.



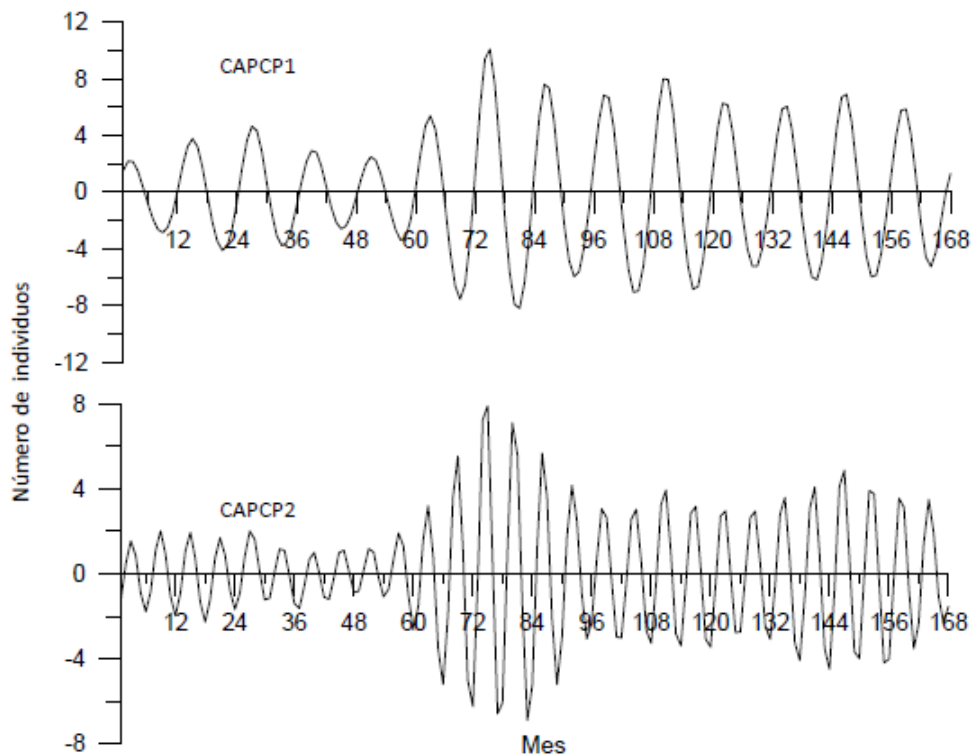
**Figura 4.** Evolución de la captura acumulada anual (promedio  $\pm$  Error Estándar) de la captura incidental del atún aleta azul o atún rojo del Atlántico (*Thunnus thynnus*) por la palangrera mexicana del Golfo de México de 1994 a 2007. Las líneas horizontales continuas representan el valor promedio de captura para ese intervalo de tiempo (años), las discontinuas la desviación estándar.



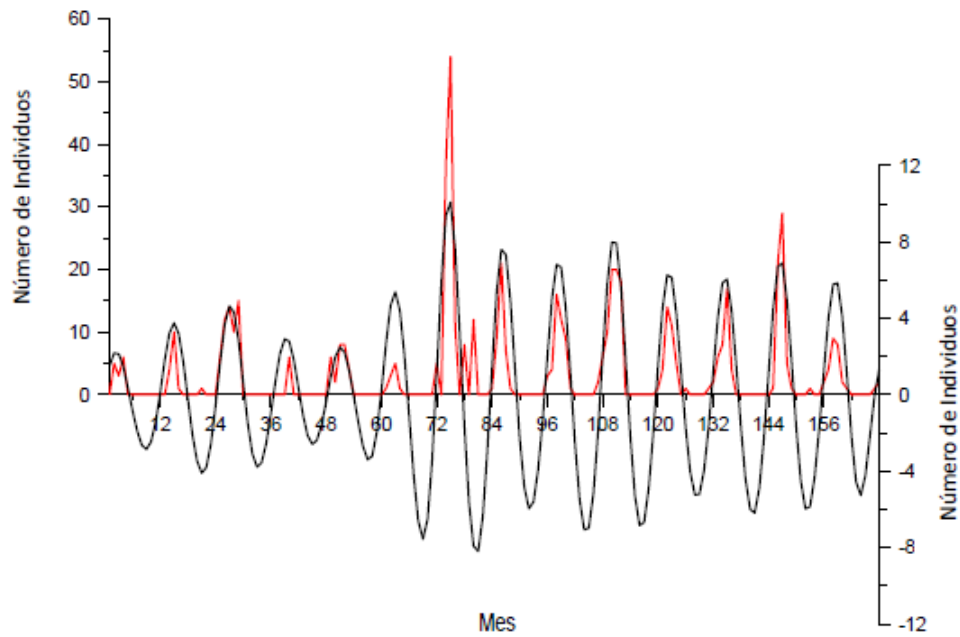
**Figura 5.** Captura incidental mensual en número de individuos del atún aleta azul o atún rojo del Atlántico (*Thunnus thynnus*) realizada por la flota palangrera mexicana en aguas mexicanas del Golfo de México en el periodo enero 1994-diciembre 2007. Las líneas punteadas señalan los meses enero de cada año.



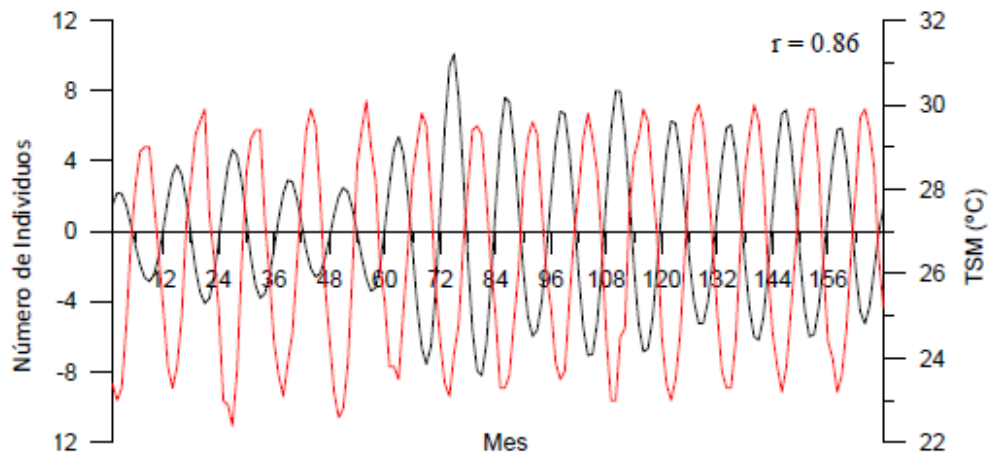
**Figura 6.** Densidades espectrales de la serie de tiempo de captura de hembras (línea roja) y de machos (línea negra) del atún aleta azul o atún rojo del Atlántico (*Thunnus thynnus*).



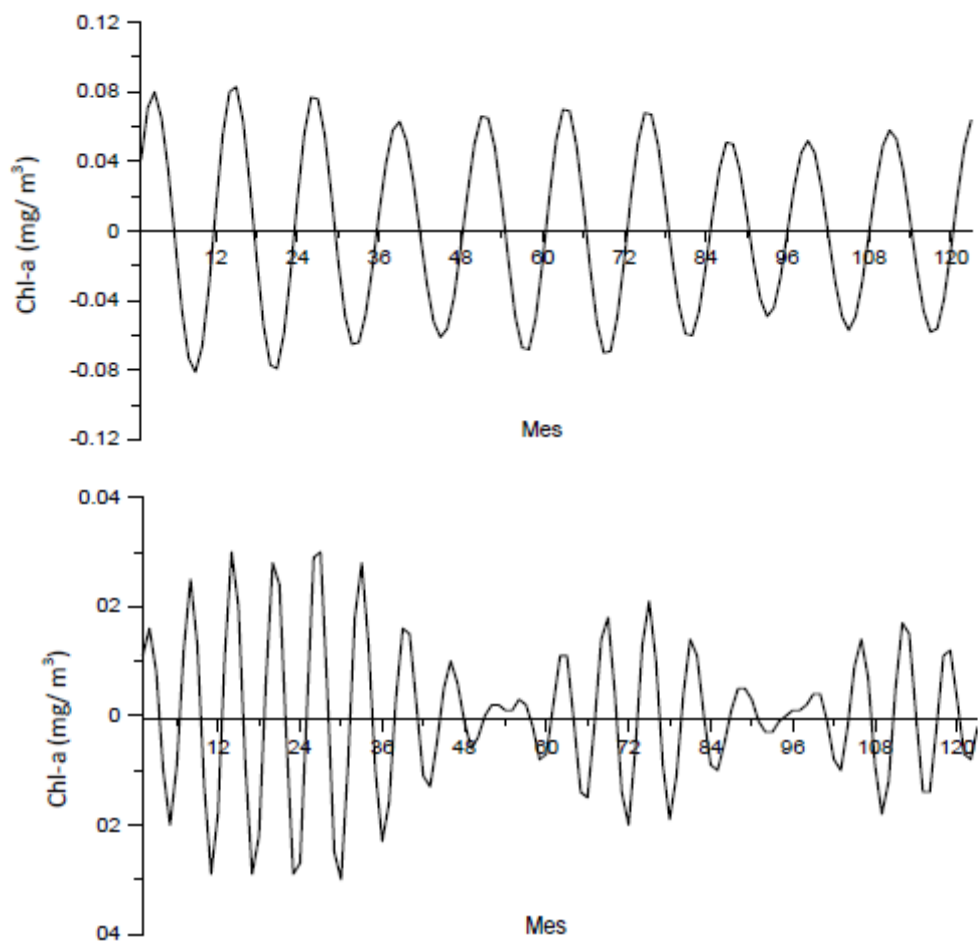
**Figura 7.** Primeras dos componentes principales de la serie de tiempo de captura incidental del atún aleta azul o atún rojo del Atlántico (*Thunnus thynnus*) (1994-2007). La primera componente (CAPCP1) explicó 37.4% de la variabilidad total de la serie de tiempo, la segunda (CAPCP2) el 19%.



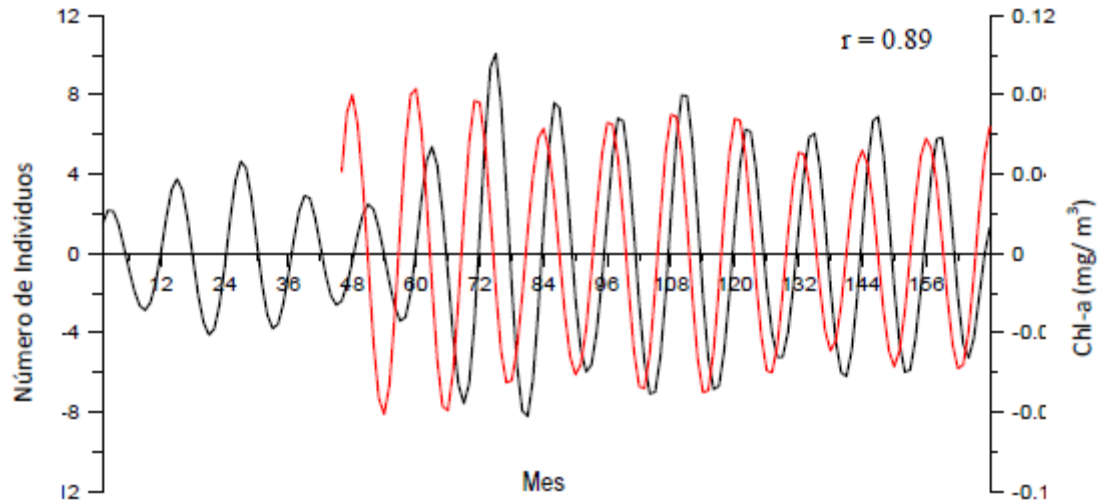
**Figura 8.** Captura incidental mensual del atún aleta azul o atún rojo del Atlántico (*Thunnus thynnus*) para el periodo 1994-2007. Distribución temporal de las capturas (línea roja) y componente principal cíclica (estacional) de la serie de capturas mensuales (CAPCP1) (línea negra).



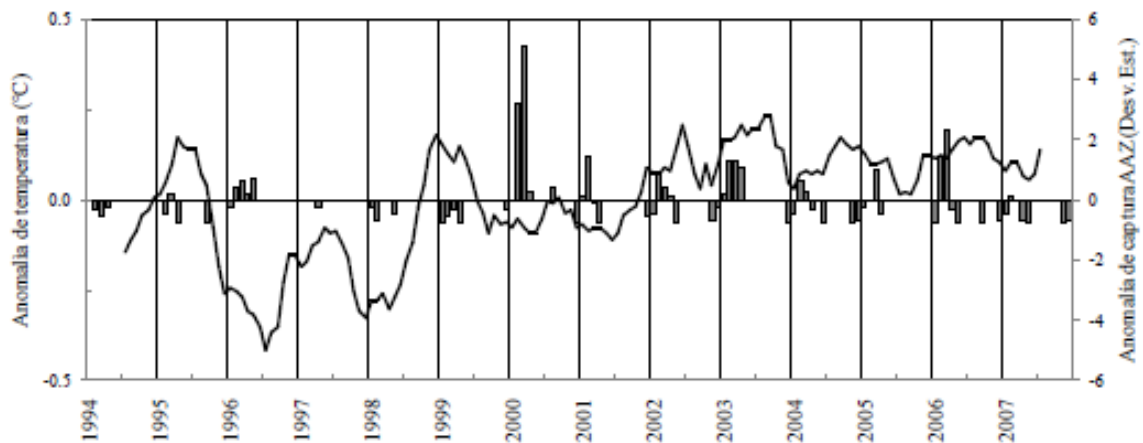
**Figura 9.** Valores medios mensuales de temperatura superficial del mar (TSM) (rojo) y valores de la componente principal cíclica (estacional) de la serie de la captura incidental del atún aleta azul o atún rojo del Atlántico (*Thunnus thynnus*) (CAPCP1) (negro) en el Golfo de México (30.5°N, 98°O, 18°O, 18°N) entre 1994-2007.



**Figura 10.** Primeras dos componentes principales de la serie de tiempo Chla (1994-2007). La primera componente (ChlaCP1) explica el 71.5 % de la variabilidad total de la serie de tiempo, la segunda (ChlaCP2) el 7.1%.



**Figura 11.** 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 del atún aleta azul o atún rojo del Atlántico (*Thunnus thynnus*) (CAPCP1) (negro) en el Golfo de México (30.5°N, 98°O, 18°O, 18°N) entre 1994-2007.



**Figura 12.** Evolución temporal de las anomalías del promedio de TSM (°C) para el Golfo de México (línea) y anomalías de la captura incidental del atún aleta azul o atún rojo del Atlántico (*Thunnus thynnus*) ( $\pm$ DE) de la flota palangrera mexicana (1994-2007).