



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE CIENCIAS

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

Tesis para optar al título Magíster en Ciencias Ambientales

**Efecto de la variabilidad climática sobre las capturas
de atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*) en el
Atlántico Sudoccidental**

**Lic. Rodrigo Forselledo Cladera
Laboratorio de Recursos Pelágicos – DINARA**

**Tutor: Dr. Leonardo Ortega
Laboratorio de Oceanografía – DINARA**

Tribunal: Dra. Carolina Crisci, Dr. Néstor Mazzeo, Dr. Walter Norbis

Montevideo, Uruguay

2019



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi tutor, Leonardo Ortega por haberme orientado y confiado en mí durante el desarrollo de esta tesis. Al tribunal, Carolina Crisci, Néstor Mazzeo y Walter Norbis, por los comentarios y sugerencias realizados, los cuales aportaron a la mejora de la tesis. A Andrés Domingo, Jefe del Laboratorio de Recursos Pelágicos de la DINARA, quien me ayudó en el desarrollo de la idea original, y me alentó a hacer la tesis. A mis compañeros del LaRPe, Seba, Fede, Philip, Lucía y Maite, con quienes compartí muchas discusiones y conversaciones sobre este trabajo. En particular a Sebastián Jiménez, quien me ayudó mucho en el desarrollo de los análisis realizados, así como en la interpretación de los resultados. A Alfredo Pereira, Jefe del Departamento de Biología Poblacional, que me apoyó durante el desarrollo de esta tesis. A Quique Paez que también me ayudó mucho en la interpretación estadística de los resultados. A mis padres, por siempre haberme alentado durante este proceso, y principalmente cuidado durante varios fines de semana a los niños. A Valeria (secretaria de la MaCa) por todo el asesoramiento y ayuda. A Diego y Martín, por las horas de juego que despejan la mente. Y especialmente a Jime, por toda su ayuda, paciencia, por escucharme y aconsejarme, y mucho más.

Tabla de Contenidos

AGRADECIMIENTOS	2
RESUMEN	5
INTRODUCCIÓN.....	8
Contexto pesquero global.....	8
Efecto de la variabilidad climática	9
El atún aleta amarilla	13
Pesquería en Uruguay.....	16
Justificación.....	17
OBJETIVO.....	20
Objetivos específicos	20
HIPÓTESIS.....	20
MATERIALES Y MÉTODOS	21
Área de estudio.....	21
Datos pesqueros	25
Datos ambientales	29
<i>Batimetría</i>	29
<i>Temperatura Superficial del Mar</i>	30
<i>Viento</i>	31
<i>Índice climático: El Niño Oscilación del Sur</i>	31
Análisis de la información	32
<i>Captura por unidad de esfuerzo</i>	32
<i>Análisis espacial</i>	33
<i>Regresión lineal partida</i>	34
<i>Análisis de coherencia - Wavelet</i>	35
<i>Modelos aditivos generalizados</i>	36
RESULTADOS	39
Esfuerzo pesquero y CPUE de aleta amarilla	39
Caracterización ambiental del área de estudio	45
Análisis de la información ambiental y pesquera	51
Modelos aditivos generalizados.....	54
DISCUSIÓN	60
General.....	60

Esfuerzo pesquero y CPUE de aleta amarilla	61
Caracterización ambiental del área de estudio	62
Análisis de la información ambiental y pesquera	64
CONCLUSIONES	70
PERSPECTIVAS	70
BIBLIOGRAFÍA.....	72
ANEXO I.....	1

RESUMEN

Los procesos climáticos tienen efectos drásticos sobre el funcionamiento de los sistemas biológicos marinos en un amplio rango de escalas temporales y espaciales. Uno de los efectos más importantes de la variabilidad climática en los ecosistemas marinos es el cambio en la distribución espacial de las especies, principalmente en respuesta al aumento de temperatura en los océanos. Observaciones recientes han demostrado cambios en la distribución de especies pelágicas estrechamente relacionadas con las variaciones en las condiciones oceánicas.

Diversos estudios han señalado la región del Atlántico sudoccidental, como un “hotspot” de calentamiento a nivel global ya que presenta una de las mayores tasas de aumento de la temperatura superficial del mar (TSM). Además, se ha reportado que, debido a los efectos del calentamiento global, la posición del frente de aguas cálidas en la región mantiene un desplazamiento hacia el sur.

En Uruguay una de las principales especies capturadas por la flota de palangre pelágico de deriva es el atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*). Dadas las preferencias de hábitat de esta especie, es probable que aumentos en las TSM y desplazamientos de los frentes hacia los polos, se reflejen en una ampliación de los rangos de distribución de la especie. Esta situación ya ha sido registrada en otras regiones del mundo de características similares. En este trabajo se propone analizar el efecto de la variabilidad climática sobre la distribución y abundancia del atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*) en el océano Atlántico sudoccidental.

Para esto, se utilizarán datos de capturas de esta especie por parte de la flota pesquera uruguaya de palangre pelágico de deriva en el período 1982-2010, información de TSM, anomalías de viento, y el Índice Oceánico de El Niño, el cual se utiliza para definir los eventos de El Niño Oscilación del Sur (ENSO por sus

siglas en inglés). Para analizar el efecto de las variables ambientales sobre las capturas se utilizaron modelos aditivos generalizados (GAM).

Se observó que la CPUE presenta gran variabilidad interanual. El análisis mensual de la CPUE muestra una clara estacionalidad con dos picos, uno en otoño y otro en primavera. No se observó una relación directa entre el aumento de la temperatura superficial del mar y las capturas de esta especie, observándose además que el rango óptimo de TSM para el área de estudio se encuentra por debajo de los rangos de preferencia reportados para esta especie, evidenciando esto una clara asociación de la especie a los frentes térmicos que caracterizan la zona del talud continental, muy probablemente asociada a migraciones tróficas. La estacionalidad observada en la CPUE coincide con la presencia de frentes más desarrollados en la región. Esta asociación con los frentes se ve afectada por los eventos ENSO, principalmente los extremos, causando un efecto positivo sobre la CPUE de aleta amarilla, particularmente en los eventos La Niña. Esto posiblemente se deba a que, durante estos eventos, donde se observa un enfriamiento en la región, los gradientes térmicos sean más fuertes, debido a un mayor transporte de la corriente de Malvinas por dentro de la plataforma favoreciendo esto a la presencia de la especie.

En el análisis ambiental, se ratificó la tendencia positiva al aumento de la TSM en el área, con un aumento anual de 0.025° C, observándose un cambio en el régimen, pasando de un período frío a uno cálido a partir de 1999. También se pudo observar que los vientos presentaron un cambio de régimen, tanto en su componente zonal como meridional, durante el período de estudio. Asimismo, se pudo evidenciar la influencia de los eventos del ENSO sobre las anomalías de TSM en la región.

Este es el primer estudio en el océano Atlántico sudoccidental que incluye eventos climáticos interanuales como el ENSO en el análisis del efecto de la

variabilidad climática sobre las capturas de atún aleta amarilla. Los resultados aquí presentados confirman que la variabilidad climática causada por diferentes procesos atmosféricos y oceánicos, tales como la presencia de frentes, la variabilidad de la TSM y los eventos ENSO, afectan la distribución y las capturas de atún aleta amarilla en el océano Atlántico sudoccidental, pero que hay factores externos intrínsecos de la flota (e.g. variación en los precios de mercado de la especie) que influyen sobre la misma.

Palabras clave: atún aleta amarilla, variabilidad climática, Atlántico sudoccidental, GAM

INTRODUCCIÓN

Contexto pesquero global

A nivel mundial, el producto de las capturas en pesquerías y la acuicultura alcanzaron en el año 2016 los 171 millones de toneladas, con un valor total de US\$ 362 mil millones de dólares. En 2015, el pescado representó alrededor de un 17% de la proteína animal consumida a nivel mundial. Para aproximadamente 3.200 millones de personas, el pescado es una importante fuente de alimento ya que representa el 20% de las proteínas animales necesarias en la alimentación. En términos de consumo per cápita, el consumo de pescado aumentó de 9,0 kg en 1961 a 20,2 kg en 2015, a una tasa media de aproximadamente un 1,5% anual. Además, las pesquerías y la acuicultura son la fuente de trabajo para aproximadamente 59,6 millones de personas considerando únicamente el sector primario (FAO 2018).

En el año 2016, las pesquerías representaron el 53% y la acuicultura el 47% del total producido. De las pesquerías, 79,3 millones de toneladas corresponden a pesquerías marinas (aproximadamente un 87%), registrándose un descenso de 1,9 millones de toneladas respecto al año anterior. Cerca de un 58% de este descenso corresponde a la baja en las capturas de anchoveta en Perú y Chile debido al efecto de El Niño 2015-2016 considerado como un evento fuerte. Las capturas combinadas de atún y especies afines se estabilizaron en alrededor de 7,5 millones de toneladas tras alcanzar un máximo histórico en 2014. Unas pocas especies (*Katsuwonus pelamis*, *Thunnus albacares*, *T. obesus* y *Scomberomorus* spp.) representan cerca del 75% de las capturas de este grupo (FAO 2018).

En los últimos años las capturas marinas se han mantenido estables, pero los bajos niveles de rendimiento respecto a períodos anteriores se deben principalmente a la sobrepesca, ya que se estima que a nivel mundial el 60% de los stocks pesqueros (ver **Cuadro 1**) se encuentran plenamente explotados y no soportan mayores capturas, y el 33% se encuentran sobreexplotados por lo que

medidas de manejo deberían ser implementadas para su recuperación. Se estima que el 43% de las principales especies de atunes comercializadas fue explotado a niveles biológicamente insostenibles en 2015, en tanto que el 57% fue explotado a niveles biológicamente sostenibles (FAO 2018).

Cuadro 1. Un stock constituye una unidad biológica de una especie que forma un grupo de características ecológicas similares. Con fines de evaluación, gestión y ordenación, los stocks son considerados como unidades discretas y pueden ser explotados de manera independiente (Cadrin et al. 2014, ICCAT 2016). Sin embargo, hay muchas incertidumbres a la hora de definir los límites geográficos espaciales y temporales de tales unidades biológicas (ICCAT 2016). La identificación de stocks se encuentra en continuo análisis, incorporando nuevas metodologías que permitan avanzar y cumplir con los requisitos de gestión y conservación de los recursos (Begg et al. 1999).

Efecto de la variabilidad climática

A pesar de esto, la sobrepesca no es la única causante de los bajos rendimientos pesqueros, ya que ha sido ampliamente demostrado que la variabilidad climática (ver **Cuadro 2**) tiene un gran efecto sobre las capturas, por ejemplo, como ya se mencionó, el efecto de El Niño sobre las capturas de anchoveta en el Pacífico sudeste. Los procesos climáticos tienen efectos drásticos sobre el funcionamiento de los sistemas biológicos marinos en un amplio rango de escalas temporales y espaciales (Rouyer et al. 2008). Variables climáticas oceánicas, tales como las corrientes o cambios en la temperatura del mar, acidificación, desoxigenación, causan efectos directos e indirectos sobre los stocks. Los directos actúan sobre la fisiología, el comportamiento, alteran el crecimiento, la capacidad reproductiva, la mortalidad, la distribución y los patrones migratorios. Los indirectos alteran la productividad, la estructura y la composición de los ecosistemas marinos de los cuales los peces dependen. Por lo

que es de esperar que estos cambios afecten la productividad y la capacidad de recuperación de los stocks pesqueros marinos (Brander 2007, 2010, Cheung et al. 2010, Miller et al. 2010, Sumaila et al. 2011).

Cuadro 2. Variabilidad climática refiere a las variaciones en la media del clima en escalas temporales anuales y decadales. Se entiende por variabilidad climática a los procesos climáticos naturales, los cuales pueden ser potenciados por efectos antropogénicos (IPCC, 2014).

Cambios producidos en las condiciones oceanográficas también provocan variaciones sobre la productividad primaria. Investigaciones recientes pronostican una disminución de la productividad primaria de los océanos cercana a un $6 \pm 3\%$ para el año 2100, que debido al efecto del aumento de la temperatura del mar y a los eventos El Niño Oscilación del Sur (ENSO por sus siglas en inglés) (ver **Cuadro 3**), produciría disminuciones más severas en zonas tropicales (Kwiatkowski et al. 2017). En latitudes medias, debido principalmente al aumento de la temperatura del mar y a variaciones en los regímenes de vientos, se espera que la capa de mezcla alcance profundidades menores, lo que provocará una disminución en el aporte de nutrientes llevando a una disminución de la productividad primaria (Hollowed et al. 2013). Zonas de alta productividad primaria son utilizadas como áreas de reclutamiento y alimentación por varias especies, por lo que su caída puede tener consecuencias sobre el reclutamiento de los stocks.

Cuadro 3. ENSO, El Niño Oscilación del Sur, refiere a la interacción atmósfera océano en la región ecuatorial del océano Pacífico, la cual resulta en una oscilación periódica de la temperatura superficial del mar (TSM) y la presión atmosférica. En los eventos cálidos (El Niño), las anomalías mensuales de TSM en esta región del Pacífico son mayores a 0,5° C por un período de al menos 5 meses consecutivos. Los eventos fríos (La Niña) son definidos de la misma forma, pero con anomalías mensuales de TSM menores a -0,5° C (*National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA*).

Uno de los principales efectos de la variabilidad climática en los ecosistemas marinos es el cambio en la distribución espacial de las especies (Perry 2005, Cheung et al. 2009, Sunday et al. 2012). En particular para los peces, la temperatura es el principal factor determinante de su distribución geográfica. Las especies tienden a abarcar todo el rango de temperaturas que fisiológicamente pueden tolerar, y en general en los océanos su distribución se encuentra muy cerca de los límites de estas temperaturas (Sunday et al. 2012, Ninawe et al. 2018). En este sentido, en respuesta al aumento de temperatura en los océanos, las especies buscan adaptarse. En el caso de especies más tolerantes, estas ampliarán sus rangos de distribución, mientras que las menos tolerantes verán sus distribuciones restringidas. Esto lleva a un cambio en la composición de las especies en algunas regiones, reemplazando especies de aguas más frías por especies de aguas más cálidas (Payne 2013, García Molinos et al. 2016, Ninawe et al. 2018). Este efecto en la composición de las comunidades y la distribución de las especies debido al aumento de la temperatura del mar ya ha sido observado en varios casos para algunos de los ecosistemas tropicales, templados y polares (MacNeil et al. 2010, Last et al. 2011, Robinson, Gledhill, et al. 2015, Morley et al. 2017). En el Atlántico sudoccidental, también se han registrado aumentos en el rango de distribución de algunas especies asociados a aguas tropicales y subtropicales, donde debido a

la variabilidad climática se observó una mayor influencia de aguas cálidas (e.g. Segura et al. 2009, Izzo et al. 2010, Milessi et al. 2012, Leoni et al. 2016).

Observaciones recientes han demostrado que las especies pelágicas, al igual que otras especies marinas, se encuentran estrechamente relacionadas con las variaciones en las condiciones oceánicas producidas a diferentes escalas por diferentes fenómenos, como por ejemplo el ENSO o la Oscilación Decadal del Pacífico (Lehodey & Maury 2010). El efecto de estas variaciones climáticas en especies pelágicas resulta principalmente en cambios en la distribución (Hobday et al. 2017, Sunday et al. 2012). En base a datos pesqueros, Dufour et al. (2010) observaron, como ya se ha registrado en varias especies terrestres (Brook 2009), las primeras evidencias de cambios en la fenología, en las migraciones y la distribución espacial en dos especies de atunes (*Thunnus thynnus* y *T. alalunga*) en el Golfo de Vizcaya. También observaron para *T. alalunga* un cambio en la distribución de la especie con tendencia hacia latitudes mayores (Dufour et al. 2010). Hobday (2010) analizó, en base a múltiples modelos climáticos que relacionan la temperatura con la distribución de la captura, los potenciales cambios en la distribución de 14 especies de grandes pelágicos capturados en pesquerías de palangre en Australia. Los resultados indican un cambio en la distribución hacia los polos y por lo tanto una ampliación en el rango de distribución de estas especies, a una tasa de cambio mayor a la observada en sistemas terrestres (Hobday 2010). Estos resultados reflejan el tipo de impacto que se puede esperar de la adaptación de las especies, en particular al aumento de la temperatura del mar, la cual sin duda continúa siendo el signo indiscutido de cambio climático (Popova et al. 2016).

El atún aleta amarilla

El atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*) (Bonaterre 1788) (**Figura 1**) es una especie migratoria, epipelágica que se distribuye en aguas tropicales y subtropicales de los océanos Atlántico, Pacífico e Índico, aproximadamente entre los 45°N y 45°S, pero la mayor proporción se encuentra entre los 20°N y 20°S (Sharp 2001, IEO 2006, Reygondeau et al. 2012, Pecoraro et al. 2017). Se estima una edad máxima de 8 años, y la talla máxima registrada para la especie es de 239 cm de largo horquilla (LH) (*International Game Fish Association 2001*), pero el rango de tallas de captura de estas especies se encuentra comúnmente entre 40 y 170 cm LH (ANON 2004).

Los juveniles permanecen en la región ecuatorial, más cercanos a las costas, presentando hábitos migratorios moderados. En el caso de los subadultos y adultos realizan grandes desplazamientos, alcanzando latitudes mayores y aguas oceánicas. En el Atlántico occidental, en la costa sur y sudeste de Brasil, se observan concentraciones de juveniles cerca de la costa y especímenes de talla mayor en aguas distantes. Zavala-Camin (1978) señala que los adultos realizan migraciones tróficas semestrales de marzo a agosto y de setiembre a febrero, entre las zonas ecuatoriales y el sur y sudeste de Brasil.

Esta especie, al igual que el resto de los atunes, posee un sistema circulatorio altamente desarrollado que incluye una red de vasos contracorriente (*retia mirabilia*), que reduce la pérdida de calor generada por la musculatura y le permite conservar el calor metabólico en el músculo rojo y en otras regiones del cuerpo como el cerebro, los ojos y las vísceras. Además, aumenta la eficiencia en el intercambio de oxígeno. Estas especializaciones favorecen una natación continua y rápida, reduciendo al mínimo la barrera termal para la explotación del hábitat y permitiendo al mismo tiempo una expansión de su distribución geográfica hacia altas latitudes y a grandes profundidades en el océano (Graham & Dickson 2004).



Figura 1. Ejemplar de atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*) de 154 cm (LH) capturado en aguas de Uruguay.

El tamaño y el estado de desarrollo del atún también afectan a su capacidad de conservar calor. Los adultos tienen una mayor masa y son capaces de conservar mayor cantidad de calor, por inercia térmica, que los juveniles (Brill et al. 1999, Maury 2005).

La temperatura es el principal factor que determina la distribución de esta especie, encontrándose preferentemente en aguas de entre 18° y 31° C, pasando más del 90% del tiempo en temperaturas superiores a los 22° C, y aproximadamente el 85% del tiempo en las capas superiores del océano, a profundidades menores a 75 m (Brill et al. 1999, Brill & Lutcavage 2001, Dagorn et al. 2006, Yen et al. 2012, Hoolihan et al. 2014). Esto mismo ha sido observado en Uruguay, donde un individuo al cual se le colocó un transmisor satelital registró en 15 días temperaturas de entre 11,6° C y 23,7° C, pero con una permanencia de casi el 88% del tiempo en temperaturas superiores a los 20° C, permaneciendo también cerca del 89% del tiempo en profundidades menores a 100 m. (Miller & Domingo 2016). A pesar de estas preferencias de temperatura,

los desplazamientos verticales de la especie no están solo definidos por la profundidad de la termoclina, sino también por la tolerancia fisiológica a cambios de temperatura corporales, así como a condiciones de bajo oxígeno (Schaefer et al. 2011).

Esta especie es capturada en todo su rango de distribución por las diferentes flotas pesqueras que operan en todos los océanos, mediante la utilización de diversos artes de pesca. En 2016, el atún aleta amarilla fue la octava especie más capturada a nivel mundial, con un total de cerca de 1.5 millones de toneladas, con un aumento de un 7,8% respecto a 2015 (FAO 2018).

En el océano Atlántico, es capturada principalmente por las pesquerías de cerco, las de cebo vivo, y las de palangre. Las pesquerías de cerco capturan casi un 80% del total reportado para el Atlántico. Esta pesquería se desarrolla principalmente en la región tropical de las costas de África, y captura individuos con una talla media de entre 40 y 70 cm. Las pesquerías de palangre operan en todo el océano Atlántico, y capturan principalmente subadultos y adultos, con una talla media próxima a los 140 cm (Pecoraro et al. 2017).

La administración y manejo de esta especie como recurso pesquero corresponde a la Comisión Internacional para la Conservación del Atún Atlántico (CICAA, o ICCAT por su sigla en inglés). Esta Comisión se encarga de recopilar las estadísticas de esfuerzo y captura en el océano Atlántico, promueve la investigación y realización de evaluaciones de stock conjuntas con los países que la conforman. Como resultado de estas evaluaciones, la Comisión provee asesoramiento científico y se establecen cuotas de captura, que para esta especie corresponden a una cuota única para todo el Atlántico ya que se considera un único stock.

Pesquería en Uruguay

En Uruguay esta especie era capturada por la flota de palangre pelágico de deriva que operó de manera ininterrumpida entre los años 1981 y 2012 (ver detalles del arte de pesca en la sección Materiales & Métodos), siendo una de las principales especies desembarcadas (Mora & Domingo 2006). En el análisis de las capturas por parte de la flota uruguaya, sobre la base de información proveniente del Programa de observadores a bordo, se observa que las capturas se componen principalmente de individuos subadultos y adultos con una talla media de 111 cm a 113 cm de LH (Domingo et al. 2008a, 2009, Forselledo & Domingo 2016) con una talla máxima registrada de 194 cm (LH) (Domingo et al. 2008a).

Los mayores valores de CPUE de esta especie se observan principalmente en la zona cercana al talud continental (Domingo et al. 2009), coincidiendo con lo reportado para otras especies como el pez espada (*Xiphias gladius*) (Domingo et al. 2007) y especies capturadas incidentalmente como tortugas (Domingo et al. 2006) y aves marinas (Jiménez et al. 2009). A nivel estacional, los mejores rendimientos de CPUE de aleta amarilla se observaron en otoño y primavera (Domingo et al. 2008a, 2008b), y en temperaturas de entre 19° y 21° C (Domingo et al. 2009).

El análisis de las capturas de esta especie por la flota uruguaya presenta gran variabilidad interanual, con un pico en 2005 que posiblemente se deba a una mayor direccionalidad del esfuerzo de pesca hacia la captura de esta especie debido a las mejores condiciones de mercado (Domingo et al. 2008b). En general, las capturas presentan una tendencia negativa para todo el período en el que la flota de palangre estuvo operativa, con una tendencia más marcada a partir de mediados de los 90 y hasta los últimos años de la pesquería (Pons & Domingo 2009, Forselledo et al. 2017). Incluso el análisis de las capturas de Uruguay junto con las de Brasil también muestran una tendencia negativa (Pons

et al. 2009). Estas tendencias coinciden con las observadas en las flotas pesqueras de otros países que operan en el océano Atlántico (Huang 2017, Satoh & Matsumoto 2017, Walter 2017).

Justificación

Una de las principales características de la región del océano Atlántico sudoccidental es la confluencia de la Corriente de Brasil y la Corriente de Malvinas (CBM), la cual genera numerosos frentes termohalinos superficiales y sub-superficiales, conformando una de las regiones más energéticas del mundo (Acha et al. 2004, Saraceno et al. 2004, Piola & Matano 2017). Regiones frontales como la mencionada se caracterizan por una alta productividad biológica la cual genera condiciones óptimas para la alimentación de diversos organismos (Acha et al. 2004, 2015). Debido a estas características, la región sustenta un gran número de flotas pesqueras que, si bien las mismas se distribuyen ampliamente en el Atlántico sudoccidental, acumulan su mayor esfuerzo de pesca en la región de la CBM. Entre estas pesquerías se encuentran aquellas que se concentran en la explotación de grandes recursos pelágicos como son el pez espada (*Xiphias gladius*), varias especies de atunes (*T. obesus*, *T. albacares* y *T. alalunga*) y algunas de tiburones, principalmente tiburón azul (*Prionace glauca*) (Tuck et al. 2003, Huang 2011, Jiménez et al. 2016).

En el Atlántico sudoccidental las variaciones climáticas oceánicas están relacionadas con procesos de variación interanual (como eventos ENSO), así como con variaciones a gran escala que tienen un efecto sobre las corrientes y las propiedades de las masas de agua. Esta variabilidad atmosférica-oceánica multiescala afecta los ecosistemas incluyendo las pesquerías (Montecino & Lange 2009, Ortega et al. 2012). Diversos estudios han señalado la región del Atlántico sudoccidental, particularmente la zona sur de Brasil y Uruguay, como un “hotspot” de calentamiento a nivel global ya que presenta una de las mayores

tasas de aumento de la temperatura superficial del mar (TSM) (Sumaila et al. 2011, Lima & Wetthey 2012, Hobday & Pecl 2014). Además, se ha reportado que, debido a los efectos del calentamiento global, la posición del frente de aguas cálidas en la región del Atlántico sudoccidental, al igual que otros frentes subtropicales en los márgenes occidentales de los océanos, mantienen un desplazamiento hacia el sur (Ortega et al. 2016, Yang et al. 2016, Piola & Matano 2017). A pesar de esto, hasta el momento son pocos los estudios que se han desarrollado en el área que consideren el efecto que puede estar representando esta variabilidad climática sobre las pesquerías (Sumaila et al. 2011).

Dadas las preferencias de hábitat del atún aleta amarilla, es probable que aumentos en las TSM y desplazamientos de los frentes hacia los polos, se reflejen en una ampliación de los rangos de distribución de la especie. La región este de Australia, caracterizada por la presencia de la Corriente Oriental de Australia, la cual genera múltiples frentes y es zona de surgencias, ha sido definida como otro de los “hotspots” de calentamiento a nivel global, así como se pronostica un corrimiento de estos frentes hacia el sur (Hobday & Pecl 2014, Yang et al. 2016). Múltiples pesquerías se asocian a la presencia de estos frentes, y varios estudios ya han observado y pronostican cambios a corto y largo plazo en la composición y distribución de las especies, tanto bentónicas y demersales (Last et al. 2011, Robinson, Gledhill, et al. 2015), como pelágicas (Hobday 2010, Robinson, Hobday, et al. 2015). En particular, proyecciones realizadas sobre la distribución y capturas del atún aleta amarilla en esa región pronostican que las principales zonas de pesca de la especie se desplazaran hacia el sur y al este, evidenciando una ampliación en el rango de distribución de la misma (Dell et al. 2015).

Cambios en la distribución de las especies pueden generar impactos sobre las poblaciones explotadas como recursos pesqueros, sobre los ecosistemas y sobre los sistemas socio-económicos (FAO 2018). A pesar de que los principales recursos pelágicos son manejados y administrados por diferentes Organizaciones

Regionales de Pesca, es necesario profundizar en los esfuerzos de investigación sobre el impacto potencial de la variabilidad climática sobre estas especies con el fin de lograr mejores planes de manejo (Lehodey & Maury 2010).

Las evidencias de aumentos en la temperatura del mar, acidificación de los océanos, desoxigenación, desplazamientos hacia los polos de algunos de los principales sistemas de frentes, son claras y ampliamente registradas en la bibliografía internacional, y las proyecciones actuales pronostican peores escenarios (IPCC 2014). Esta situación, afecta a las pesquerías, las cuales representan una fuente importante de alimento y de sustento económico para la población mundial. Se estima, en un escenario con fuertes medidas para mitigar los efectos del cambio climático, una reducción del potencial máximo de captura en pesquerías de entre un 2,8 y un 12,1%. Mientras que, en un escenario sin medidas para mitigar los efectos del cambio climático, el potencial máximo de capturas podría reducirse entre un 16,2 y un 25,2% (Cheung et al 2018). Considerando los conocidos efectos de la variabilidad climática sobre las especies y las pesquerías que las explotan, y la falta de información sobre esta temática en la región, este trabajo se propone analizar en base a datos pesqueros el efecto de la variabilidad climática sobre la distribución y abundancia del atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*) en el océano Atlántico sudoccidental.

OBJETIVO

Analizar la distribución espacio-temporal del esfuerzo pesquero y la abundancia del atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*) por parte la flota uruguaya de palangre pelágico en la región del océano Atlántico sudoccidental y su relación con la variabilidad climática.

Objetivos específicos

- Caracterización ambiental del área de estudio, y análisis de cambios temporales en los patrones de las variables ambientales.
- Análisis de los efectos de las variables ambientales sobre las capturas de atún aleta amarilla.

HIPÓTESIS

La distribución y abundancia del atún aleta amarilla es afectada por la variabilidad climática causada por diferentes procesos atmosféricos y oceánicos como, por ejemplo, la presencia de frentes y la variabilidad de la temperatura superficial del mar y los eventos ENSO. Considerando las preferencias de la especie por aguas cálidas, el aumento de la temperatura superficial del mar en el área de estudio; se predice un cambio en la abundancia y la distribución de esta especie, asociado a las condiciones ambientales dominantes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio corresponde al océano Atlántico sudoccidental, incluyendo aguas de la Zona Económica Exclusiva (ZEE) de Uruguay, Zona Común de Pesca Argentino Uruguay, y aguas internacionales adyacentes de Argentina, Brasil y Uruguay. Particularmente incluye la plataforma continental (i. e. entre las isobatas de 50 y 200 m), talud (i. e. entre las isobatas de 200 y 3000 m), y aguas profundas (i. e. a partir de la isobata de 3000 m). La misma se caracteriza por su compleja hidrografía; en ella es posible observar la interacción de masas de agua con características termohalinas diferentes que presentan variación estacional e interanual (Guerrero & Piola 1997).

La zona se encuentra influenciada en superficie por Aguas Tropicales con temperaturas de aproximadamente 20° C y salinidades mayores a 36,00, advectadas al sur por la Corriente de Brasil (CB). Por debajo de la CB, fluye el Agua Subtropical o Agua Central del Atlántico Sur, con una temperatura que varía entre los 5 a 20° C y salinidades de entre 34,20 y 36,00 (Stramma & England 1999). Las Aguas Subantárticas con temperaturas entre 4° y 15° C y salinidades entre 33,70 y 34,15 son advectadas hacia el norte por la Corriente de Malvinas (CM). La convergencia de estas corrientes forma lo que se conoce como la Confluencia Brasil – Malvinas (CBM). Entre los 33° - 38° S la CB se separa de la plataforma en dirección SE y converge con la CM formando un intenso frente termohalino, conformando una de las regiones más energéticas del mundo (**Figura 2**) (Acha et al. 2004, Piola & Matano 2017). El punto de separación de la CB presenta una variación estacional, posiblemente reflejando el cambio general del Giro Subtropical en respuesta a la variación del anticiclón semipermanente del Atlántico Sur, siendo más norteño en el invierno que en el verano austral (Tomczak & Godfrey 2003, Piola & Matano 2017). Por lo que, durante el verano, la plataforma y el talud en esta zona son cubiertos por Aguas Tropicales superficiales de la Corriente de Brasil. Durante el invierno la advección de aguas

más frías y menos salinas provenientes de la Corriente de Malvinas, hacia el norte, resulta en un fuerte gradiente horizontal termohalino (Piola & Matano 2017).

Es sabido que las regiones frontales como esta, juegan un rol fundamental en los procesos ecológicos de los océanos. Se caracterizan por una alta productividad biológica y una gran biomasa fitoplanctónica, proporcionando la retención de muchos organismos, huevos, larvas y generando condiciones óptimas para la alimentación de pequeños organismos hasta peces, reptiles, aves y grandes mamíferos marinos (Yoder et al. 1994, Acha et al. 2004, 2015). La zona entre los 30° S y 40° S (frente a Uruguay, al Norte de Argentina y al Sur de Brasil) representa un ecotono de alta diversidad biológica (Calliari et al. 2003). A su vez, el frente del talud que se extiende desde los Burdwood Bank a lo largo de las Malvinas y el talud argentino hasta la CBM, frente a Uruguay, forma uno de los principales sistemas frontales de Sudamérica (Acha et al. 2004).

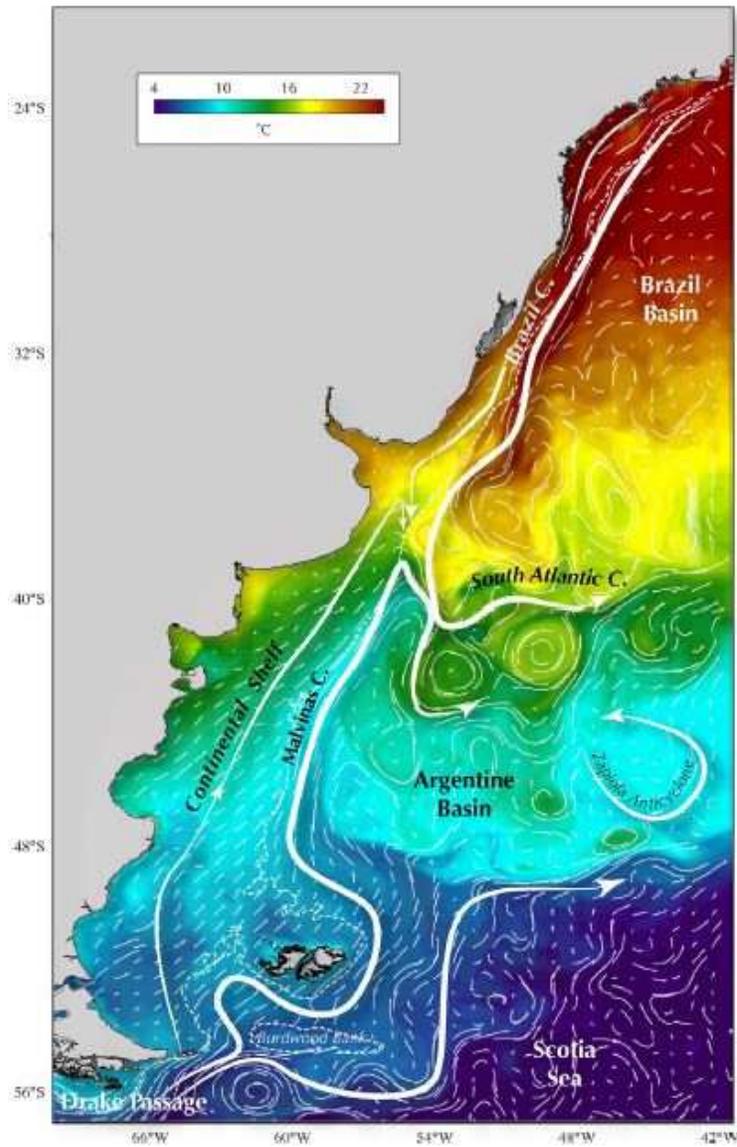


Figura 2. Esquema de las principales características de la circulación en el océano Atlántico sudoccidental, donde se observa la presencia de la Corriente de Brasil, la Corriente de Malvinas, y el punto donde se encuentran y forman de la Confluencia Brasil-Malvinas. El gradiente de colores indica la TSM basada en un modelo numérico de circulación regional (tomado de Piola & Matano 2017).

A la complejidad hidrográfica asociada a las masas de agua anteriormente mencionadas y la CBM en la región, debemos agregar aguas diluidas producto de la mezcla de aguas del Río de la Plata y aguas oceánicas adyacentes. La cuenca del Río de la Plata es la segunda cuenca más grande de Sudamérica y descarga, por las capas superiores, agua dulce rica en nutrientes hacia el mar. Mientras que aguas salinas de plataforma ingresan al estuario por las capas inferiores (Guerrero & Piola 1997). Esta dinámica se encuentra influenciada por el régimen de precipitaciones en la región, las cuales se ven fuertemente afectadas por eventos ENSO, principalmente durante los meses de primavera (Grimm et al. 2000). Durante los eventos El Niño (fase cálida), las precipitaciones aumentan en nuestra región, produciendo una mayor descarga de agua dulce en el Río de la Plata, mientras que lo contrario sucede durante los eventos La Niña (fase fría), donde disminuyen las precipitaciones y por lo tanto la descarga del río (Pisciottano et al. 1994, Cazes-Boezio et al. 2003, Barreiro 2010). Esta región ha sido identificada a nivel mundial como una de las cuales presenta un mayor aumento en las precipitaciones, y se espera que esta tendencia siga en aumento (Nagy et al. 2008).

En la región, los vientos también presentan un ciclo estacional, con un predominio durante el verano de vientos que forman parte del anticiclón del Atlántico sur que soplan del NEE. Durante el otoño los vientos rotan al SSW, y durante el invierno estos vientos son más intensos y de componente SW (Barreiro et al. 2014). Cambios en la intensidad y frecuencia de vientos fuertes ya ha sido observada en el área particularmente de componente sur (Escobar et al. 2004, Bischoff 2005, D'Onofrio et al. 2008, Gutiérrez et al. 2016).

Datos pesqueros

La información utilizada proviene de los Partes de Pesca de la flota uruguaya de palangre pelágico de deriva, la cual operó de manera ininterrumpida entre los años 1981 y 2012. Los Partes de Pesca son una declaración jurada que el Patrón de pesca de cada embarcación debe completar de la mejor manera posible para ser entregados a la Dirección Nacional de Recursos Acuáticos (DINARA). Los Partes incluyen información por lance de pesca (ver **Cuadro 4**), con fecha de calado, posición geográfica (latitud y longitud), temperatura superficial del mar, esfuerzo de pesca (en este caso en número de anzuelos) y detalle de la captura. En particular, para esta flota pesquera, la captura es en número de individuos y peso total estimado por especie.

Cuadro 4. Se define como lance de pesca a la maniobra que se realiza para la captura de peces. En particular para esta pesquería, se realiza un único lance de pesca por día con un único palangre el cual consta de entre 800 y 3.500 anzuelos.

El palangre pelágico de deriva es un arte de pesca pasivo, conformado por una línea principal suspendida en el agua por líneas secundarias (orinques) en cuyos extremos se ubican boyas. A la línea principal se fijan otras líneas secundarias (brazoladas) en las cuales se colocan los anzuelos (**Figura 3**) (Domingo et al. 2014). Este arte de pesca es ampliamente utilizado en todos los océanos para la captura de grandes peces pelágicos tales como pez espada, atunes y tiburones (Domingo et al. 2014). Variaciones en la configuración del arte de pesca suelen estar dadas principalmente por la especie objetivo de la pesquería.

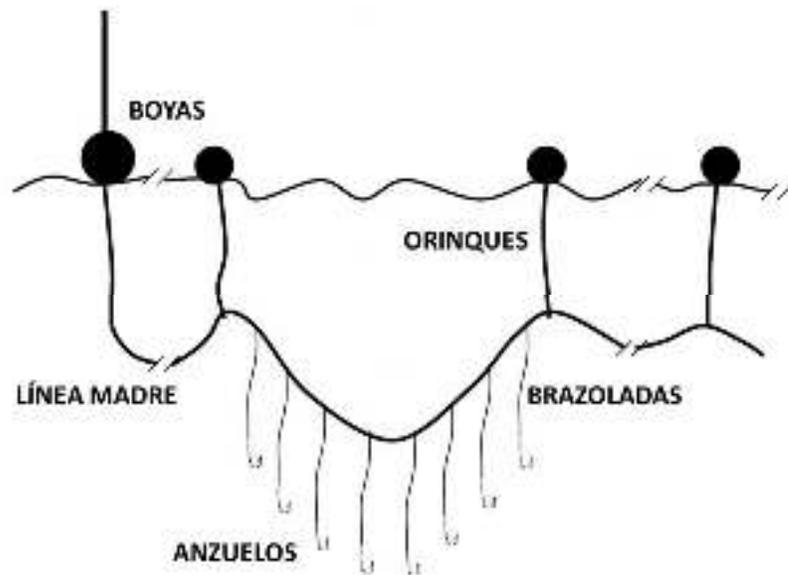


Figura 3. Representación esquemática de un palangre pelágico de deriva indicando sus componentes (tomado y modificado de Jiménez et al. 2009).

Durante el período que operó la flota uruguaya de palangre pelágico, se registraron 21.547 lances de pesca en el océano Atlántico (**Figura 4a**) con un total de 32.5 millones de anzuelos. Se realizó un extenso trabajo de revisión de la base de datos. Del total de lances, 528 fueron eliminados, principalmente por poseer información incompleta: esfuerzo no declarado, capturas no declaradas, problemas de fechas, problemas con la posición geográfica. También se eliminó el primer año de la pesquería (1981) ya que la misma comenzó a operar en setiembre (85 lances de pesca). También se eliminaron 1.913 lances de pesca correspondientes a algunos buques pesqueros de la flota que estuvieron dirigidos a la captura de atún albacora (*Thunnus alalunga*) y otros que estuvieron dirigidos a la captura de tiburón azul (*Prionace glauca*). Estos buques, que operaron principalmente en aguas oceánicas internacionales y en períodos más acotados (1984-1986 la de atún albacora, y 2004, 2009-2012 la de tiburón azul), registraron muy bajas capturas de atún aleta amarilla. La eliminación de estos

datos resultó en acotar la base de datos hasta el 2010, ya que durante los años 2011 y 2012 solo había buques dirigidos a la captura de tiburón azul.

En la **Figura 4b** se observa que las cuadrículas con mayor esfuerzo de pesca se encuentran en aguas de la ZEE de Uruguay y aguas internacionales adyacentes. Por lo que, para lograr tener la mejor representación espacial y temporal durante todo el período de estudio, el área de estudio fue delimitada entre la latitud 31° S y 40° S, y entre la longitud 44° W y 57° W. Dentro de esta área, se realizaron 17.606 lances de pesca (24,4 millones de anzuelos), lo que corresponde al 92,6% de los lances totales factibles de ser utilizados, y el 81,7% de los lances totales de la flota previo al filtrado de la base de datos.

Todos los mapas que se presentan en esta tesis fueron realizados en ArcMap 10.6 y se utilizaron herramientas del paquete *Análisis Espacial*.

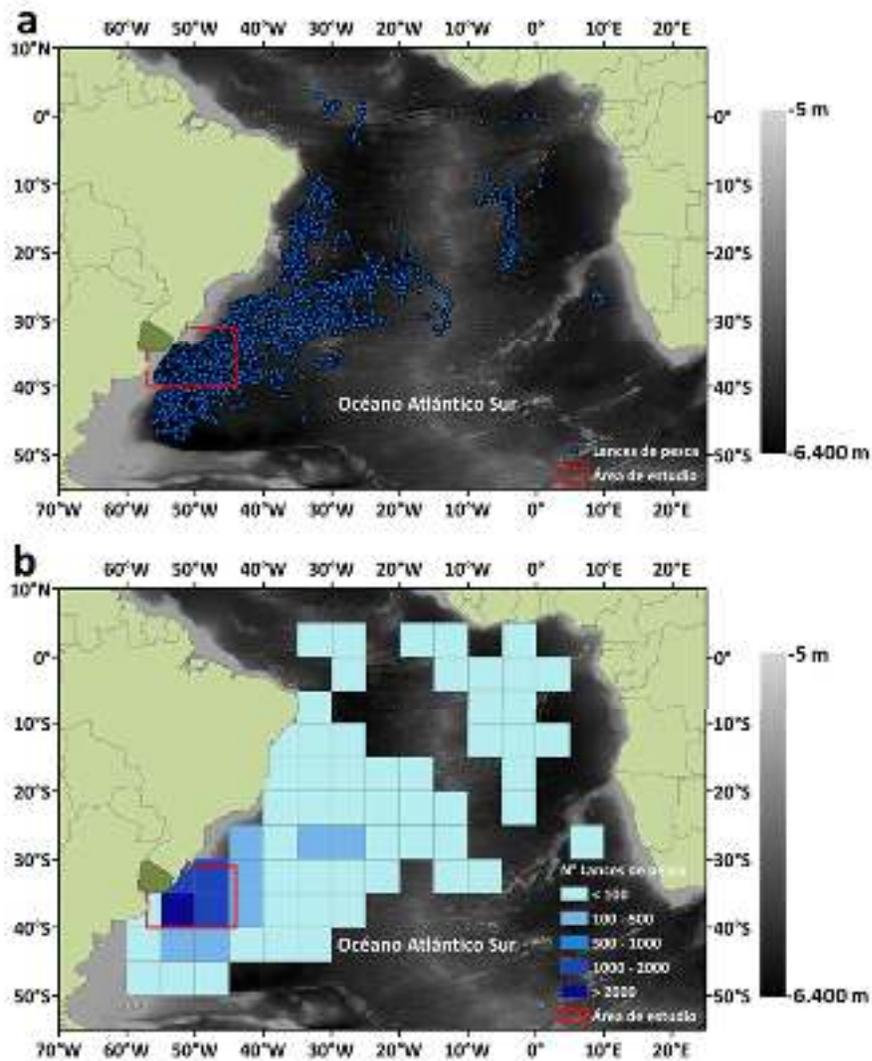


Figura 4. (a) Distribución de los lances de pesca realizados por la flota uruguaya de palangre pelágico en el período 1981 – 2012. (b) Número de lances de pesca de la flota uruguaya de palangre pelágico en el período 1981 – 2012 acumulados en cuadrículas de 5°x5°. En ambos mapas, el cuadro rojo delimita el área de estudio seleccionada (31°S – 40°S, 44°W – 57°W).

Datos ambientales

Batimetría

La información batimétrica del área de estudio se obtuvo del *General Bathymetric Chart of the Oceans* (GEBCO), “*GEBCO_2014 Grid, version 20141103*, www.gebco.net”. Esta base de datos cuenta con información continua sobre la elevación del terreno tanto en tierra como en el océano, con una resolución de 30 arc.sec. La información se genera mediante la combinación de información proveniente de estudios de sondeo del fondo marinos por buques, así como de la interpolación con datos satelitales (Weatherall et al. 2015).

Dado que el área de estudio abarca la plataforma continental, el talud y aguas profundas, y que las características del fondo inciden en las condiciones oceanográficas del área, se calculó el coeficiente de variación (CV) de profundidad para cada cuadrícula de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ del área de estudio para ser incluida en el análisis. El CV fue calculado como el desvío típico sobre la media, y cada cuadrícula contiene en promedio 3.589 datos (mínimo 3.140, máximo 3.600). Las cuadrículas con valores de coeficiente de variación más elevados representan aquellas en las cuales se observa una mayor diferencia entre las profundidades máximas y mínimas, representando principalmente aquellas cuadrículas que se encuentran sobre el talud, es decir aquellas con un máximo gradiente batimétrico. Mientras que las cuadrículas con valores más bajos representan aquellas en áreas de profundidades más constantes, principalmente las más oceánicas. El CV de la profundidad fue utilizado como variable predictiva en el análisis de la CPUE.

La información batimétrica fue integrada a la base de datos mediante la utilización de la librería *marmap* versión 1.0 (Pante & Simon-Bouhet 2013) del software libre *R* versión 3.4.4 (R Core Team 2018).

Temperatura Superficial del Mar

Los datos de temperatura superficial del mar (TSM) fueron obtenidos de la base de datos IRI/LDEO *Climate Data Library* del *National Centers for Environmental Information* (NCEI, anteriormente NCDC, *National Climatic Data Center*) de la NOAA. Esta base de datos se basa en el *Optimum Interpolation Sea Surface Temperature* (OISST version2), el cual es un análisis que combina información proveniente de satélites, barcos y boyas, e interpola datos, para generar un mapa mundial de la TSM con una resolución diaria en cuadrículas de $\frac{1}{4}^{\circ}$ latitud por $\frac{1}{4}^{\circ}$ de longitud (Reynolds et al. 2002, 2007, Banzon et al. 2016).

La información utilizada en este estudio, y que se obtuvo de las bases de datos antes mencionadas, es a nivel mensual en cuadrículas de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ para todo el período de estudio. Se calcularon anomalías de TSM a nivel de mes y de año, siendo anomalías con respecto a los valores medios mensuales en el caso de mes y para todo el período en el caso de año. Las anomalías mensuales fueron utilizadas para analizar la relación con los fenómenos ENSO, y las anuales para analizar las tendencias en el área y período de estudio.

También se utilizó información mensual con una resolución espacial de $\frac{1}{4}^{\circ}$ latitud por $\frac{1}{4}^{\circ}$ de longitud para calcular el coeficiente de variación (CV) de la TSM como forma de aproximación a la identificación de frentes. Al igual que para la batimetría, el CV fue calculado como el desvío típico sobre la media, y cada cuadrícula contiene 16 datos de TSM. Las cuadrículas con valores de coeficiente de variación más elevados representan mayor variabilidad de los datos en relación a la media de TSM, por lo que son consideradas como *proxy* de la presencia de frentes.

Tanto la TSM como el CV de la TSM fueron utilizadas como variables predictivas en el análisis de la CPUE.

Viento

Datos de viento en sus componentes zonal (U) y meridional (V) fueron obtenidos por mes y año para toda el área de estudio (31° S - 40° S, 44° W - 57° W). Dicha información se obtuvo de la base de datos de la NOAA, particularmente del NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*)/NCAR (*National Center for Atmospheric Research*) *Reanalysis Project* (Kalnay et al. 1996). A partir de los valores mensuales y los climatológicos (promedio del periodo 1971-2000) se calculó la anomalía para cada componente (e.g. U mes X - climatología de U mes X; idem V).

Las anomalías de viento fueron utilizadas para caracterizar la variabilidad y tendencias en el área en el período de estudio, así como variables predictivas en el análisis de la CPUE.

Índice climático: El Niño Oscilación del Sur

Se utilizó el Índice Oceánico de El Niño (ONI por su sigla en inglés), uno de los índices utilizados para la determinación de los eventos cálidos de El Niño y fríos de La Niña (ENSO, en inglés El Niño Southern Oscillation). La definición de estos eventos se basa en la media móvil de 3 meses de anomalías de temperatura superficial del mar en la región ecuatorial del océano Pacífico denominada El Niño 3.4 (5°N-5°S, 120°-170°W). Las anomalías de temperatura utilizadas en la definición de estos eventos provienen del *Extended Reconstructed Sea Surface Temperature, ERSST.v5* (Huang et al. 2017). Se considera que ocurre un evento El Niño (episodios cálidos) cuando el ONI es mayor o igual a 0,5° C por un periodo de al menos 5 meses consecutivos, y se considera un evento La Niña (episodios fríos) cuando el ONI es menor o igual a -0,5° C por el mismo periodo de tiempo.

Los eventos de El Niño y La Niña son clasificados en intensidad de acuerdo al promedio de las anomalías de los meses que superan el umbral de 0,5. En este

caso, y para incluir el ONI en los modelos como variable predictiva, se calculó la media de las anomalías mensuales para cada uno de los eventos. Por ejemplo, si 7 meses consecutivos tuvieron una anomalía de temperatura mayor a 0,5° C, se calculó la media de esos 7 valores, y la misma se asignó a esos 7 meses a fin de definir una aproximación de la intensidad de ese evento particular.

Los datos del ONI, así como los relativos a la intensidad de los eventos ENSO, se encuentran disponibles para su utilización en el sitio web del *National Weather Service* de la NOAA.

https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php

Análisis de la información

Captura por unidad de esfuerzo

La captura por unidad de esfuerzo (CPUE) es comúnmente utilizada como un índice de abundancia relativa, por lo que es uno de los principales insumos para caracterizar las tendencias poblacionales de peces mediante las evaluaciones de stock (Hilborn & Walters 1992, Maunder & Punt 2004). En este trabajo la misma se calculó como el número de individuos de atún aleta amarilla capturados cada 1.000 anzuelos:

$$CPUE = \frac{\text{número de individuos capturados}}{\text{Esfuerzo (número de anzuelos)}} \times 1.000$$

Distintos niveles de CPUE (en todos los casos siguiendo la misma fórmula) fueron calculados dependiendo del tipo de análisis realizado. En la descripción metodológica de cada uno de los análisis se detalla la CPUE utilizada.

La CPUE fue analizada en relación a la TSM mediante una “función de suavizado” (*smooth function*) utilizando la función “*geom_smooth*” de la librería *ggplot2*

versión 3.1.0 (Wickham 2016) del software libre R versión 3.4.4 (R Core Team 2018). La CPUE utilizada para este análisis es la misma que en los modelos GAM, para los cuales se presenta una descripción detallada más adelante en esta sección.

Análisis espacial

Para analizar la distribución espacial del esfuerzo de pesca y las capturas se utilizó la herramienta “Centro Medio” disponible en ArcMap 10.6. Esta herramienta es útil para realizar el seguimiento de cambios en la distribución, ya que permite representar las coordenadas (latitud y longitud) promedio en el área de estudio. Esta herramienta permite además calcular el centro medio (de aquí en adelante llamado centroide) ponderado por una variable de la siguiente manera:

$$\bar{X}_w = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad \bar{Y}_w = \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

donde x e y son las coordenadas (longitud y latitud respectivamente), y w es la variable con la que se va a ponderar el centroide.

En este estudio calculamos dos tipos de centroides anuales, uno ponderado por el esfuerzo por lance de pesca (en número de anzuelos) y el otro por la CPUE de atún aleta amarilla por lance de pesca. Además, se calculó un centroide general (todo el período de estudio) ponderado por el esfuerzo y otro ponderado por la CPUE. Con estos centroides generales se calcularon las anomalías anuales de

cada uno de los centroides correspondientes a fin de determinar posibles cambios en la distribución.

Regresión lineal partida

Se utilizaron regresiones lineales partidas para analizar el cambio en la distribución espacial del esfuerzo de pesca, y en el régimen de las anomalías de TSM y vientos.

La regresión lineal partida es un método simple para ajustar modelos lineales a datos en donde la relación entre la variable predictiva y la variable respuesta presenta uno o más puntos de inflexión. Una de las ventajas de este método es que el punto de inflexión no es fijado a priori, sino que es determinado por el modelo, junto con los intervalos de confianza del mismo (Muggeo 2003).

Para determinar el punto de inflexión que significaría el cambio, tanto en la distribución del esfuerzo como en el régimen de TSM y vientos, se utilizó para cada una de las variables la suma acumulada de sus anomalías. La suma acumulada de anomalías es un método utilizado en procesos industriales de control de calidad, ya que permite detectar pequeños cambios sostenidos en el tiempo que puedan afectar la producción (Manly & Mackenzie 2000). Esta metodología ha sido implementada también para la detección de cambios en los regímenes de procesos climáticos, donde los mismos se identifican por el cambio en la pendiente de la suma acumulada de anomalías (Yáñez et al. 1992, Beamish et al. 1999, Fiedler 2002, Ortega et al. 2016).

La regresión lineal partida se realizó utilizando la librería *segmented* versión 0.5-3.0 (Muggeo 2008) del software libre *R* versión 3.4.4 (R Core Team 2018).

Análisis de coherencia - Wavelet

Se realizaron análisis de coherencia de ondeletas (WTC, en inglés *Wavelet Transform Coherence*) entre dos variables. Los WTC son una herramienta matemática común muy poderosa para el análisis conjunto de dos series temporales que permiten probar y determinar las frecuencias en las que la co-variabilidad entre las dos series de tiempo es significativa y la persistencia temporal de dicha relación (Torrence & Compo 1998, Grinsted et al. 2004). El resultado es un índice contenido entre 0 (las series no presentan ningún tipo de sincronización) y 1 (alta co-variabilidad entre las series) (Berman et al. 2011). El test de significancia del WTC fue estimado mediante un test de Monte Carlo contra ruido rojo fijando la significancia estadística al 95% (Torrence & Webster 1999, Berman et al. 2011). En las figuras también se indica el cono de influencia (COI), este nos permitirá limitar los efectos de borde, los cuales son originados al principio y al final de la serie de tiempo; esto se debe a que la serie de tiempo con la que trabajamos es finita (Torrence & Compo 1998, Berman et al. 2011).

En este caso, se realizó un análisis de coherencia entre el ONI y las anomalías mensuales por año de temperatura superficial del mar con el fin de determinar si los eventos El Niño y La Niña están relacionados con la variabilidad de la TSM en el área de estudio.

También se realizó un WTC entre la TSM y la CPUE de atún aleta amarilla a fin de determinar si están correlacionadas, y determinar la periodicidad temporal de esas correlaciones. Para este análisis, la CPUE fue calculada a nivel mensual para cada año, agrupando los datos de esfuerzo y captura para cada mes y año. En los 29 años de datos mensuales, se detectaron datos faltantes correspondientes a meses en los que la flota pesquera no operó. El WTC debe trabajar con una serie temporal continua, por lo que se optó por utilizar una media móvil simple con un período de seis meses de ambas variables. En la serie temporal de TSM no hay

datos faltantes, pero como la media móvil suaviza las variaciones, la misma fue aplicada a ambas series de datos.

La media móvil simple se calcula como la media aritmética de los datos seleccionados, en este caso el promedio de seis meses consecutivos, comenzando en enero de 1982. Por lo que, en la serie temporal se pierden los primeros 5 meses, y el primer dato disponible corresponde a junio de 1982. Para el análisis WTC, luego de realizar la media móvil de la CPUE, la misma fue transformada mediante el logaritmo natural ya que es recomendable para los análisis de coherencia que los datos analizados no se alejen demasiado de la normalidad (Grinsted et al. 2004)

Los análisis de coherencia wavelet fueron realizados utilizando la librería *biwavelet* versión 0.20.17 (Gouhier et al. 2018) del software libre *R* versión 3.4.4 (R Core Team 2018).

Modelos aditivos generalizados

Para analizar la relación entre las variables ambientales seleccionadas y la captura por unidad de esfuerzo del atún aleta amarilla se utilizaron modelos aditivos generalizados (GAM) (Hastie & Tibshirani 1986). Estos modelos son ampliamente utilizados para el análisis de datos pesqueros relacionados con variables ambientales ya que en general las relaciones entre la variable respuesta y las variables predictivas no son lineales (Maury et al. 2001, Zagaglia et al. 2004, Howell & Kobayashi 2006, Mugo et al. 2010, Setiawati et al. 2015, Arrizabalaga et al. 2015, Lan et al. 2017, 2018, Coletto et al. 2019).

Estos modelos siguen el mismo enfoque que los modelos lineales generalizados (GLM) pero, como el efecto de las variables predictivas sobre la variable respuesta no se puede escribir de forma lineal, es necesario modelarlas de forma no lineal y no paramétrica. El único supuesto al utilizar los GAM es que la

variable respuesta es influenciada de alguna forma por cada una de las variables predictivas, y esta relación es definida por los propios datos. Por lo que, estas variables se modelan a través de una “función de suavizado” (*smooth function*) especificada al momento del ajuste del modelo (Hastie & Tibshirani 1986, Wood 2017). La función de suavizado son los denominados “*splines*”, y consisten en funciones definidas sobre bases de polinomios. En nuestro caso utilizamos los “*cubic regression splines*” (cs) (Wood 2017).

La bondad de ajuste de estos modelos se basa en el Criterio de Información de Akaike (AIC por su sigla en inglés) y el estadístico de Validación Cruzada Generalizada (GCV por su sigla en inglés). El GCV es específico de este tipo de modelos ya que se utiliza para estimar la curva de suavizado asociada a la variable predictiva (Wood 2017). En ambos casos (AIC y GCV), cuanto menor es el valor mejor es el modelo obtenido. Por lo que para la selección del modelo final se tuvieron en cuenta los valores de AIC, GCV, así como la significancia de cada una de las variables y el % de desviación explicada (Johnson & Omland 2004, Wood 2017).

El estudio de los residuos mediante el análisis diagnóstico de los modelos se realiza en las mismas condiciones que los modelos lineales habituales, y bajo los mismos supuestos de independencia, normalidad y homogeneidad de varianzas.

Para la realización de los modelos, los datos de esfuerzo y captura por lance de pesca fueron agrupados por mes y por año en cuadrículas de 1° de latitud por 1° de longitud para toda el área y período de estudio. De esta forma llevamos la escala temporal de los análisis a nivel de mes y la escala espacial a nivel de cuadrícula. La CPUE (variable respuesta) fue calculada para cada una de estas cuadrículas por mes y por año. Dado que la CPUE se supone con una distribución continua, se eligió la familia Gaussiana que se asocia con la función de identidad *link*. Para normalizar la distribución asimétrica de la CPUE la misma fue

transformada mediante el logaritmo natural, transformación que tiene un fuerte efecto sobre la forma de la distribución de los datos (Logan 2010). Teniendo en cuenta los lances con capturas de 0 individuos, se le sumó a todos los valores de CPUE un valor de 1 previo a la realización del logaritmo (Zainuddin et al. 2008, Logan 2010, Mugo et al. 2010).

A modo exploratorio, se realizó una matriz de correlación entre todas las variables. La construcción de los modelos se realizó desde el más complejo, aquel que incluye todas las variables, hacia el más simple. La simplificación del modelo se realizó de acuerdo a la significancia de cada una de las variables, eliminando aquellas no significativas. Como ya se mencionó, la elección del modelo de mejor ajuste se realizó mediante el AIC, GCV, la significancia de cada una de las variables y el % de desviación explicada.

A modo de determinar que tan bien se comporta el modelo seleccionado, se realizó una predicción mediante herramientas de Aprendizaje Supervisado. Para esto se entrenó al modelo con 2/3 de los datos, y se realizó una predicción sobre 1/3 de los datos. Este procedimiento se hizo 50 veces mediante un *loop* partiendo los datos aleatoriamente. El resultado es un indicador de error de las predicciones del modelo, para el cual se considera la media de la varianza explicada de estas 50 predicciones y su desvío estándar.

Todos los modelos fueron realizados en el software libre *R* versión 3.4.4 (R Core Team 2018), utilizando para los GAM la librería *mgcv* versión 1.8-24 (Wood 2017).

RESULTADOS

Esfuerzo pesquero y CPUE de aleta amarilla

Durante el período 1982 – 2010, el esfuerzo de pesca de la flota uruguaya de palangre pelágico en el área de estudio fue de 17.606 lances de pesca y 24,4 millones de anzuelos. El mismo varió a nivel anual, con el máximo en 1984 y el mínimo en 2010 (**Figura 5a**), a nivel mensual la variación es menor, con el máximo en agosto y el mínimo en enero (**Figura 5b**).

Un total de 177.371 individuos (aproximadamente 3.200 toneladas) de atún aleta amarilla fueron capturados en 10.504 lances (60% del total de lances), mientras que en el restante 40% de los lances las capturas de esta especie fueron cero. La CPUE anual presenta gran variabilidad, con un valor máximo en 2005 (18,25 ind./1.000anz.), y un mínimo en 2009 (0,26 ind./1.000anz.) (**Figura 5a**). Asimismo, la CPUE mensual presenta una clara estacionalidad, con máximos en los meses de primavera (noviembre 13,04 ind./1.000anz.) y otoño (mayo 8,88 ind./1.000anz.), y mínimos en los meses de invierno (julio 3,87 ind./1.000anz.) y verano (enero 4,51 ind./1.000anz.) (**Figura 5b**).

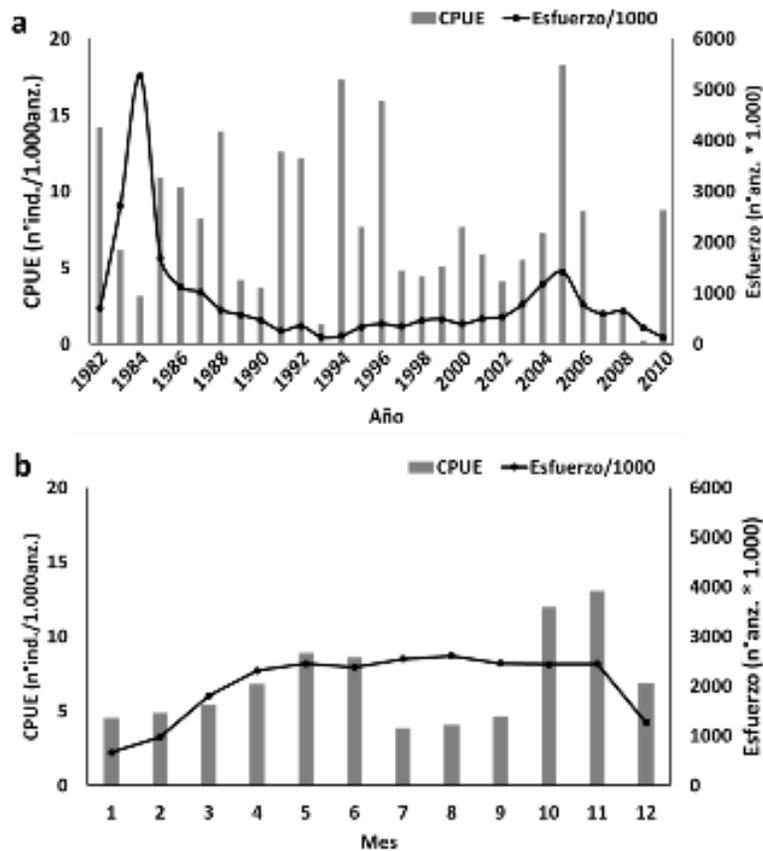


Figura 5. Esfuerzo pesquero y CPUE de atún aleta amarilla de la flota uruguaya de palangre pelágico de deriva en el área y período de estudio. (a) Anual (b) Mensual. En ambos casos, el esfuerzo pesquero es en número de anzuelos, y la CPUE (captura por unidad de esfuerzo) en número de individuos de atún aleta amarilla capturados cada 1.000 anzuelos.

En relación a la temperatura superficial del mar se observó que la TSM mínima de captura fue de 11,6° C (TSM media mensual de la cuadrícula). En el análisis de la CPUE y la TSM se observa que los valores máximos se encuentran entre los 16° y 17° C (**Figura 6a**). A valores de TSM mayores la CPUE disminuye, y a partir de los 21° C presenta una tendencia negativa de mayor pendiente, similar a la que

se observa en valores de TSM menores a 16° C. En cambio, si analizamos la proporción de lances positivos (número de lances con captura de atún aleta amarilla sobre el número de lances totales) por la TSM, observamos que el máximo se encuentra en 19° C (**Figura 6b**).

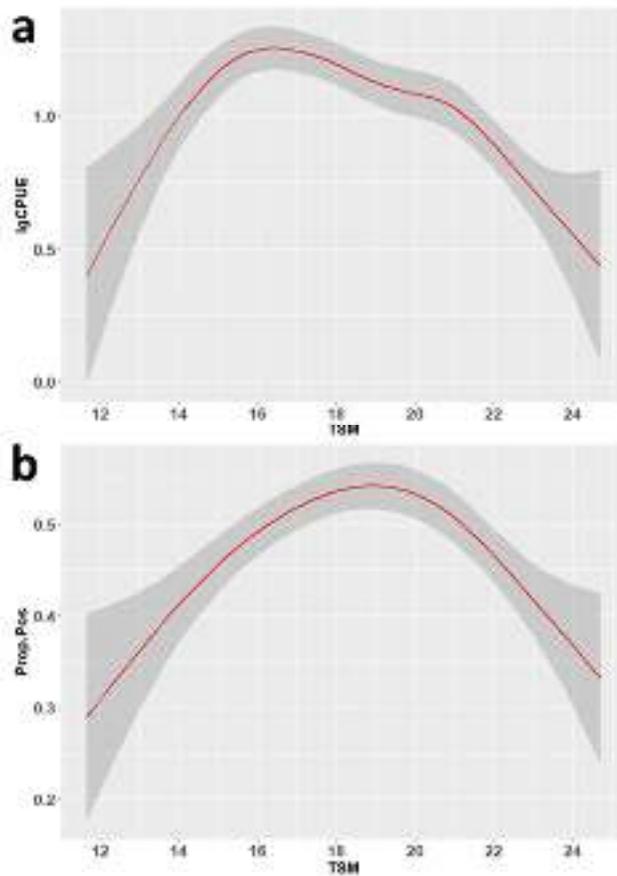


Figura 6. (a) Captura por unidad de esfuerzo (CPUE) de atún aleta amarilla en relación a la temperatura superficial del mar (TSM) para toda el área y período de estudio. (b) Proporción de lances positivos (número de lances con captura de atún aleta amarilla sobre lances totales) por TSM para toda el área y período de estudio.

La distribución espacial del esfuerzo y las capturas se presenta en la **Figura 7** mediante el estimado del centroide anual de los lances de pesca ponderado por el esfuerzo en número de anzuelos (**Figura 7a**) y el ponderado por la CPUE (**Figura 7b**). Se observa que el centroide anual ponderado por el esfuerzo tiene una distribución amplia y dispersa, principalmente a nivel longitudinal donde se observó una variación de casi $3,5^\circ$ entre el centroide más al este y el más al oeste. Mientras que el ponderado por la CPUE se encuentra agrupado en un área más restringida, con una variación longitudinal de $1,7^\circ$. A nivel latitudinal, no se observan diferencias entre el centroide ponderado por el esfuerzo y el ponderado por la CPUE, con una variación de $1,55^\circ$ y $1,50^\circ$ respectivamente entre el centroide más al norte y el más al sur. Por lo que, a pesar de que la distribución espacial del esfuerzo de pesca ha variado en los diferentes años, la distribución de la CPUE de aleta amarilla se concentra principalmente en la región del talud.

Debido al rango de dispersión longitudinal observado en los centroides anuales ponderados por el esfuerzo, se analizó la variación en la distribución mediante una regresión lineal partida de la curva acumulada de las anomalías de estos centroides. Se observa un primer período en el cual la flota se caracteriza por anomalías positivas, lo cual significa una ubicación más hacia el oeste que la media del período. En 1993 hay un punto de inflexión, donde la flota comienza a tener anomalías negativas lo cual significa una ubicación más hacia el este (**Figura 8a**). Este cambio, también es observado en la latitud, a pesar de ser de menor escala. Al comienzo del período de estudio, la flota presenta anomalías positivas (ubicación más al sur que la media del período), y en 1996 se observa un punto de inflexión donde el esfuerzo de la flota comienza a ubicarse más hacia el norte (**Figura 8b**).

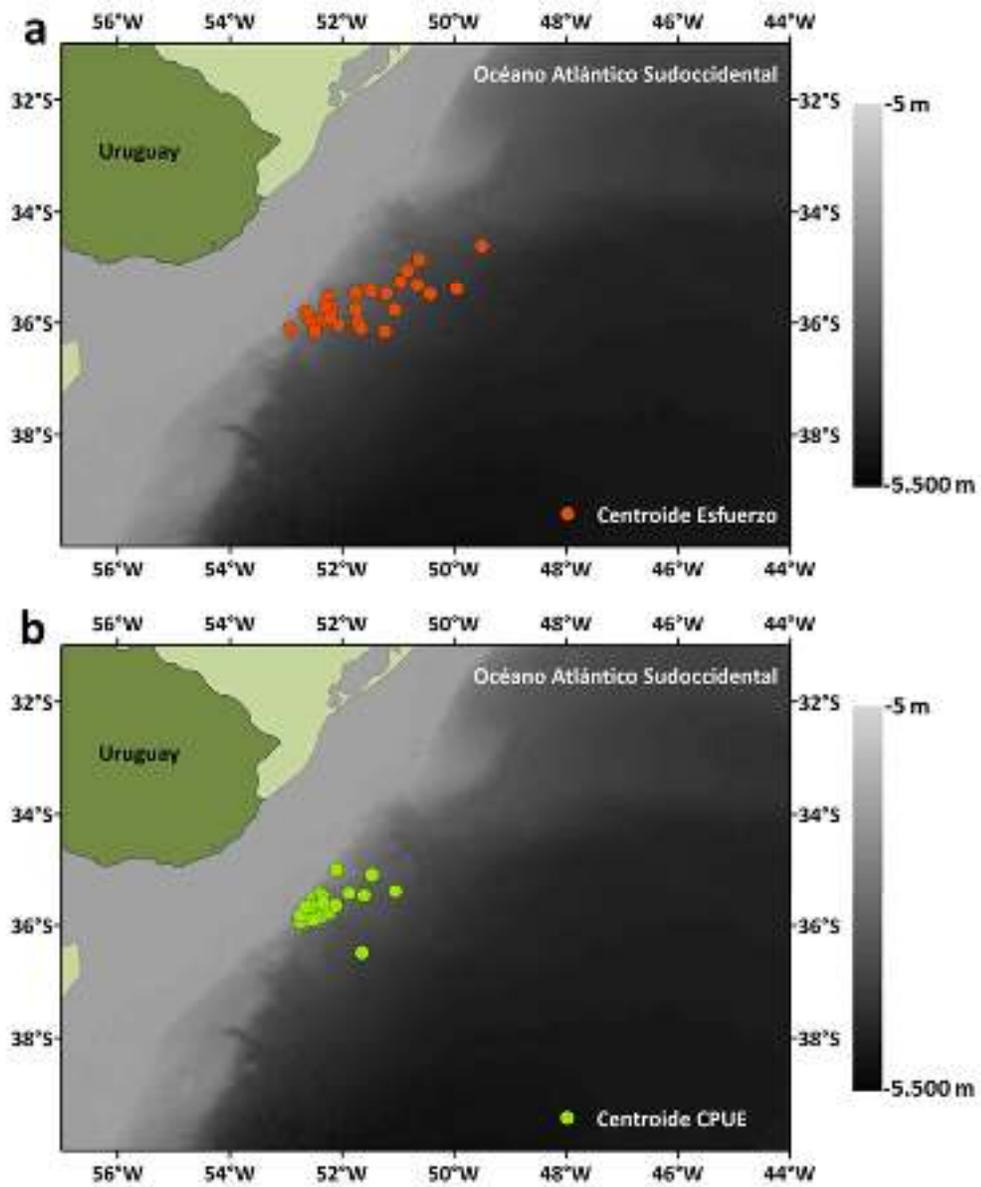


Figura 7. (a) Distribución de los centroides anuales ponderados por el esfuerzo en número de anzuelos por lance de pesca. (b) Distribución de los centroides anuales ponderados por la CPUE de atún aleta amarilla por lance de pesca. En ambos mapas, cada punto representa un año desde 1982 a 2010.

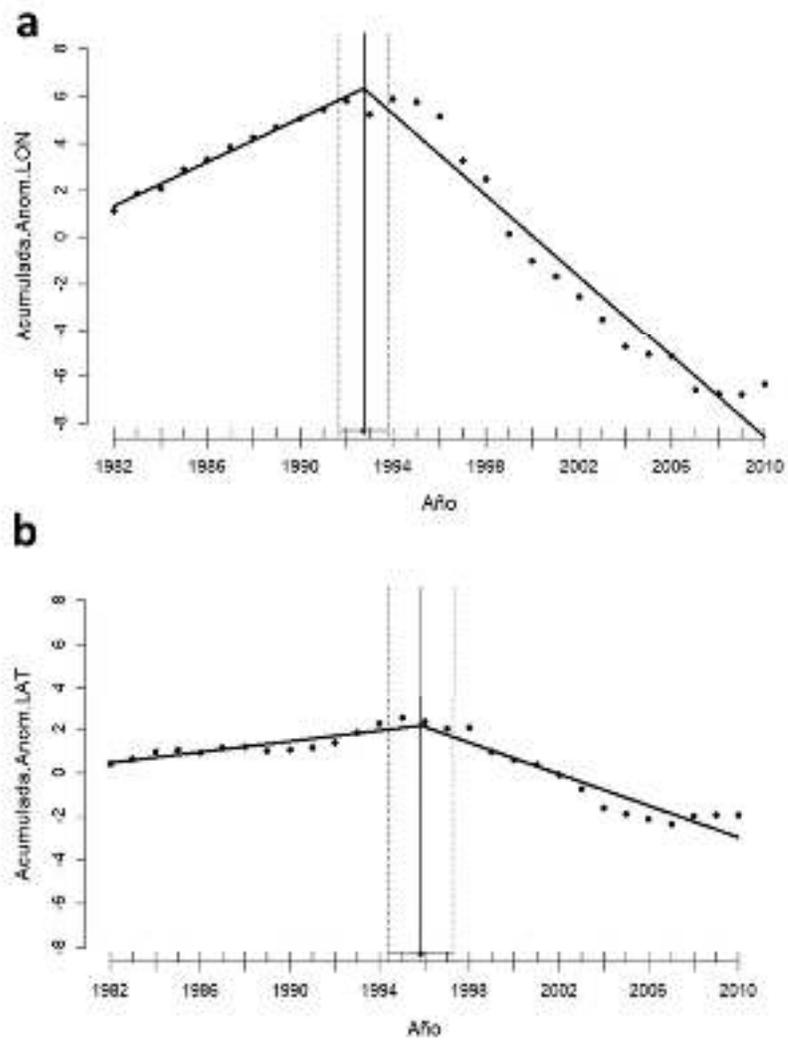


Figura 8. Regresión lineal partida del acumulado de anomalías de los centroides anuales ponderados por el esfuerzo de pesca. (a) Longitud. (b) Latitud. En ambos gráficos la línea negra representa el punto de inflexión estimado, y las líneas punteadas los intervalos de confianza superior e inferior 95%.

Caracterización ambiental del área de estudio

En la climatología de la temperatura superficial del mar se observó una gran variabilidad interanual en el área de estudio. La región noreste del área de estudio se caracteriza por presentar las TSM medias más elevadas (máximo 22° C), mientras que en la región suroeste encontramos las más frías (mínimo 11° C), coincidiendo con la presencia y ubicación media de las corrientes de Brasil (CB) y Malvinas (CM) (**Figura 9a**). Encontramos también cuadrículas muy variables en cuanto a su TSM, observándose principalmente las áreas con mayores desvíos estándar zonas costeras y de plataforma, influenciadas principalmente por la descarga del Río de la Plata, y aguas con menores desvíos estándar hacia áreas más oceánicas alejadas del talud (**Figura 9b**).

La TSM promedio del área de estudio presentó gran variabilidad interanual, el año más cálido del período fue 2005 (18,9° C, anomalía 0,57) y el más frío 1988 (17,3° C, anomalía -0,98). Las anomalías anuales de TSM muestran una tendencia positiva en el área y período de estudio, o sea, un incremento de la TSM (**Figura 10a**) de aproximadamente 0.025° C anuales, lo que significa un incremento de 0.73° C en el período de estudio (basado en un modelo lineal). A pesar de esto, se observa en la regresión lineal partida del acumulado de anomalías anuales (**Figura 10b**) una tendencia negativa hasta el año 1999, donde hay un punto de inflexión y el acumulado de anomalías pasa a tener una tendencia positiva. Este resultado indica que hasta finales de los 90s el área de estudio se encontraba en un período frío, y a partir de 1999 pasó a un período cálido el cual continúa hasta al menos el final del período de estudio.

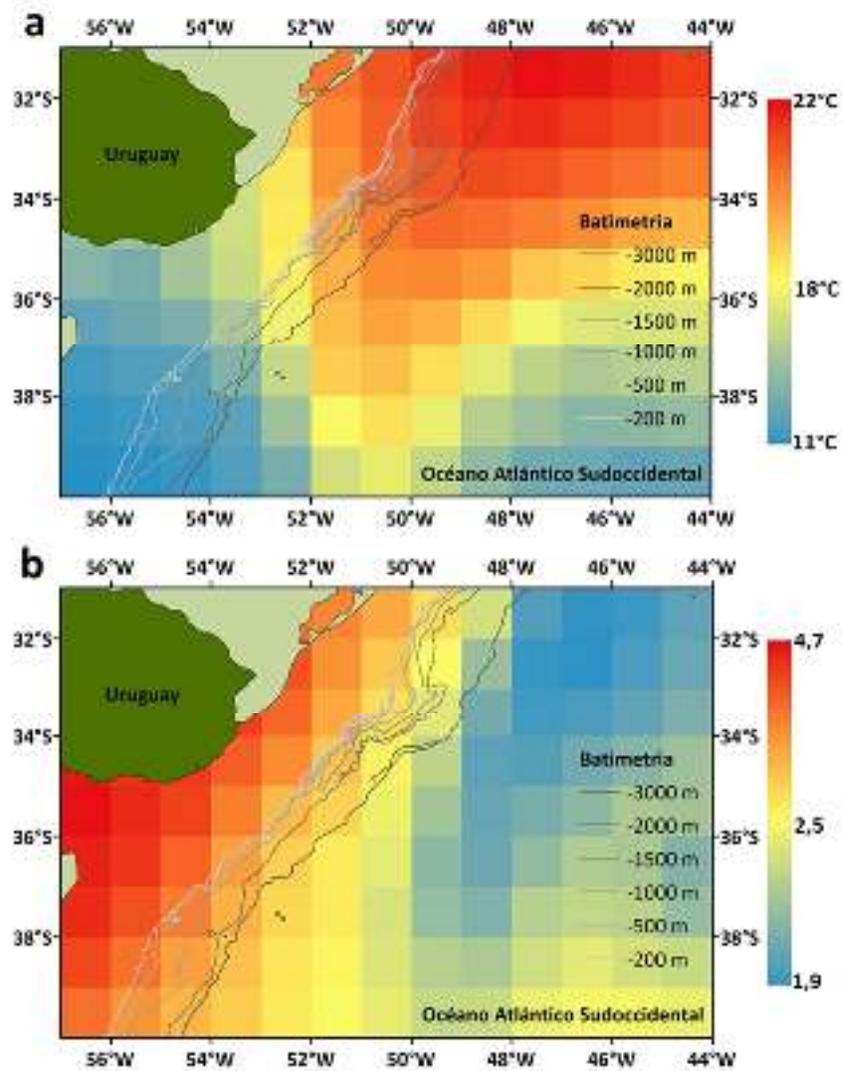


Figura 9. (a) Temperatura media superficial del mar (°C). (b) Desvío típico de la temperatura media superficial del mar. En ambos casos se considera toda el área y período de estudio en cuadrículas de $1^\circ \times 1^\circ$.

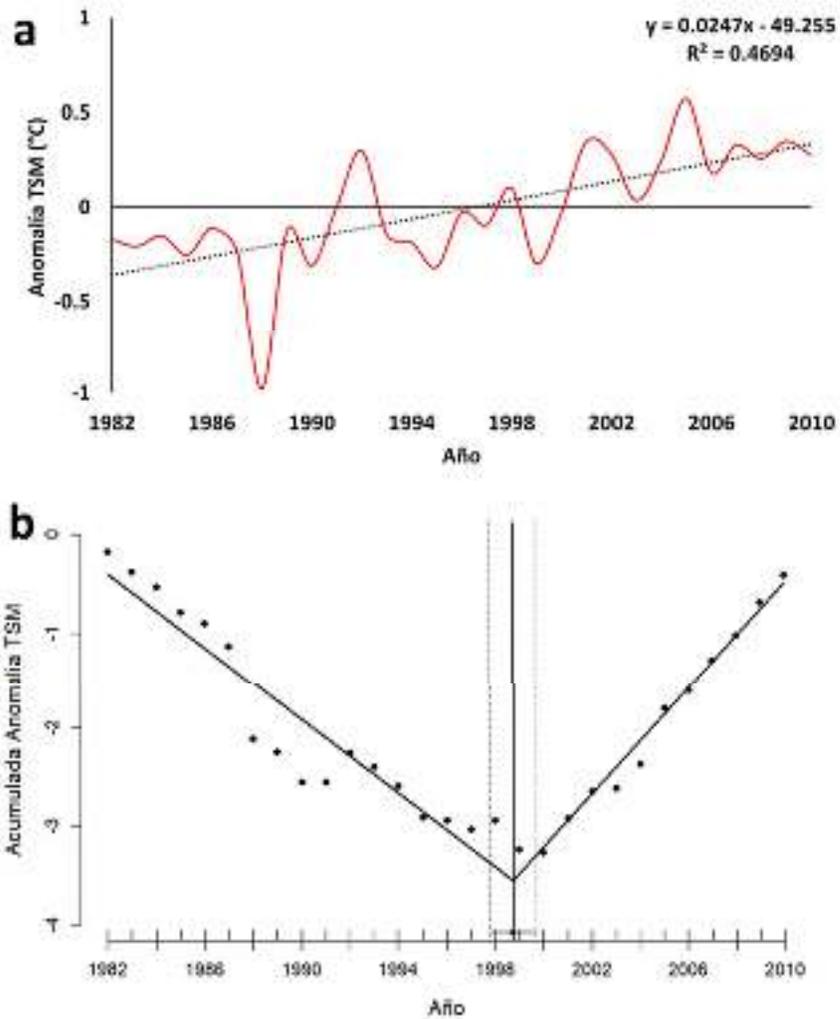


Figura 10. (a) Anomalías anuales de temperatura superficial del mar para el área y período de estudio. La línea punteada representa el resultado de un modelo lineal entre el año y la anomalía de TSM. Se presenta la ecuación de la recta y el ajuste R^2 del modelo. (b) Regresión lineal partida del acumulado de anomalías anuales de TSM en el área y período de estudio. La línea negra representa el punto de inflexión estimado, y las líneas punteadas los intervalos de confianza superior e inferior 95%.

Los vientos fueron analizados en sus dos componentes, el zonal (oeste – este, eje x) (**Figura 11a**) y el meridional (norte – sur, eje y) (**Figura 12a**). Las anomalías anuales de ambos componentes del viento muestran gran variabilidad interanual. La regresión lineal partida del acumulado de anomalías anuales evidencia un punto de inflexión en ambos componentes, 1995 para el viento zonal (**Figura 11b**) y 2004 para el meridional (**Figura 12b**). Lo que se traduce en que vientos zonales positivos (componente W) predominaron hasta 1995, donde luego empiezan a predominar vientos zonales negativos (componente E). En los vientos meridionales, se observó una predominancia de anomalías negativas (componente N) hasta el 2004, y un cambio hacia anomalías positivas (componente S) a partir de esa fecha.

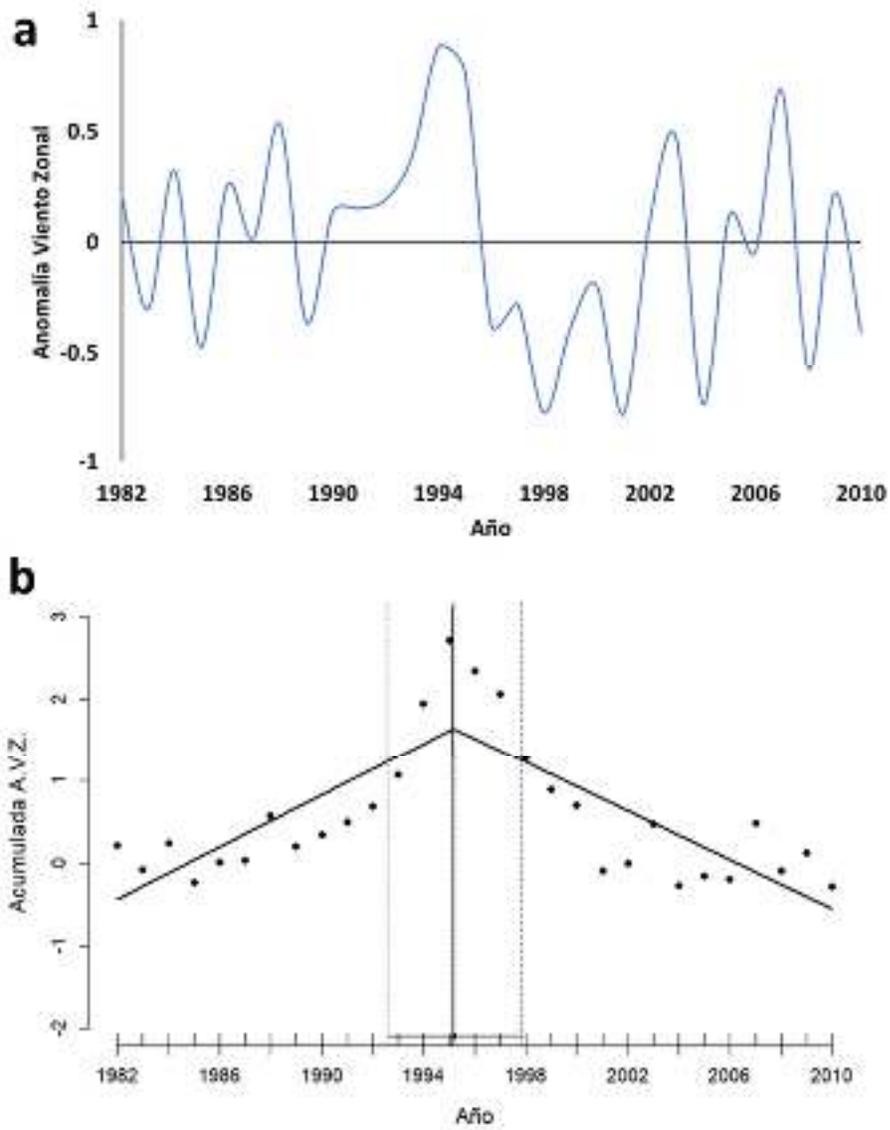


Figura 11. (a) Anomalías anuales de viento zonal (este – oeste) en el área de estudio. (b) Regresión lineal partida del acumulado de anomalías anuales de viento zonal (AVZ) en el área y período de estudio. La línea negra representa el punto de inflexión estimado, y las líneas punteadas los intervalos de confianza superior e inferior 95%.

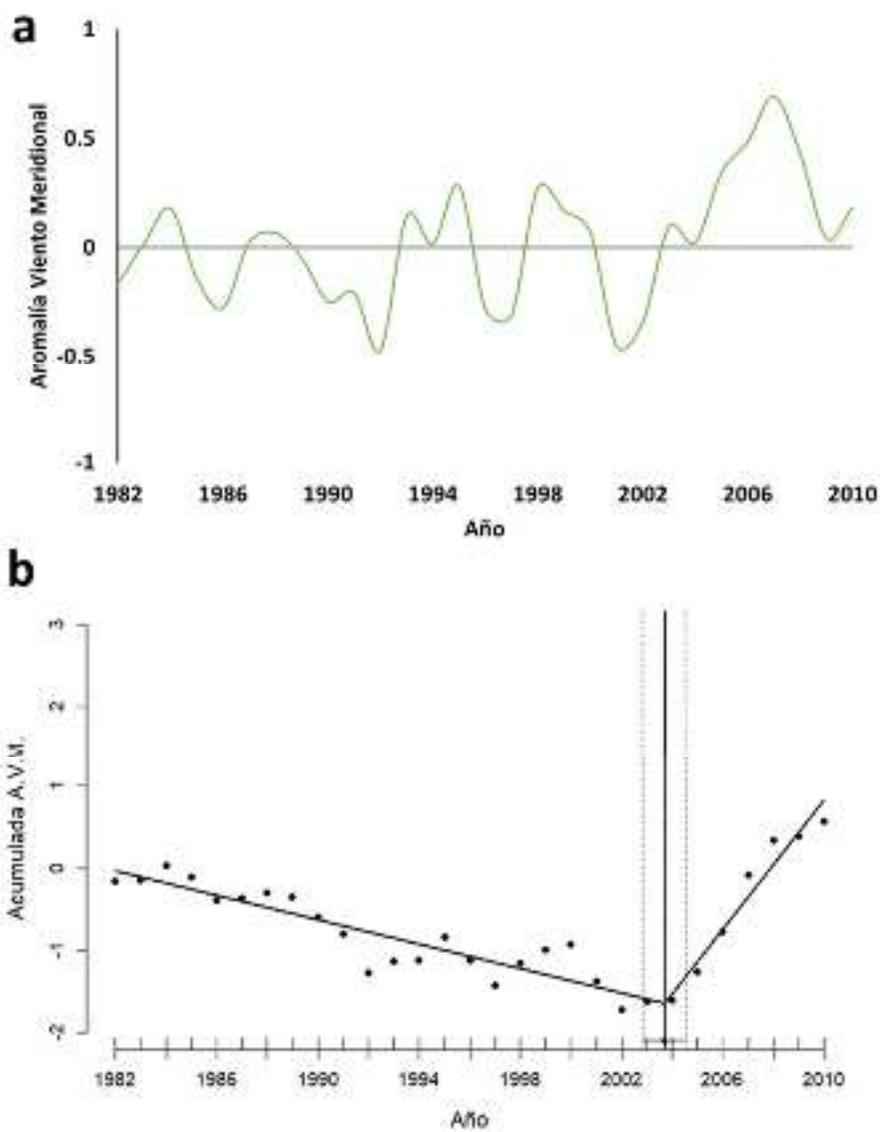


Figura 12. (a) Anomalías anuales de viento meridional (norte – sur) en el área de estudio. (b) Regresión lineal partida del acumulado de anomalías anuales de viento meridional (AVM) en el área y período de estudio. La línea negra representa el punto de inflexión estimado, y las líneas punteadas los intervalos de confianza superior e inferior 95%.

El análisis WTC entre el Índice Oceánico El Niño y las anomalías mensuales de TSM en el área y período de estudio presentó relaciones significativas en períodos intra-anales (4 – 8 meses) e interanuales entre 16 y 32 meses. La gran mayoría de estas relaciones significativas están relacionadas con eventos ENSO cálidos y fríos (1982-83; 1983-85; 1986-88; 1988-89; 1991-92; 1994-95; 1995-96; 1997-98; 1998-2001 2002-03; 2004-05; 2005-06; 2006-07; 2007-09; 2009-10) (**Figura 13**). Las relaciones en oscilaciones menores a 4 meses aparentan ser puntuales para algunos años (e.g. 1984-85, 1990-91, 2002-03), mientras que las que se encuentran entre 16 y 32 meses abarcan aproximadamente entre 3 y 4 años (e.g. 1989-91, 2004-07).

Análisis de la información ambiental y pesquera

En el análisis de la serie temporal se observa claramente el patrón oscilatorio dado por la estacionalidad de la TSM en el área de estudio, con temperaturas máximas en verano (21,73° C, febrero 22,05° C) y mínimas en invierno (15,18° C, agosto 15,02° C). Como ya fue mencionado, este patrón estacional representa claramente la dinámica del área, y la presencia de aguas más frías durante los meses de invierno, y presencia de aguas más cálidas en verano. En cambio, la CPUE resulta más variable, con puntos de coincidencia con la TSM y con puntos inversos (**Figura 14a**). En el WTC se observa que existe una relación significativa entre la TSM y la CPUE, a alta frecuencia desde los 4 a los 12 meses, siendo esta correlación más notoria a los 12 meses, la cual se observa entre los años 1986 y 1988, y de manera casi continua entre los años 1993 y 2006 (**Figura 14b**). Esto concuerda con la estacionalidad de la CPUE observada en la **Figura 5b**. En particular los años 1986 – 1988 y 1997 – 1998, coinciden con la relación significativa observada para esos años entre el ONI y las anomalías de TSM en el área de estudio (**Figura 13**), estando esos años además relacionados con eventos

ENSO, tanto El Niño como La Niña, de intensidad moderada a fuerte y muy fuerte.

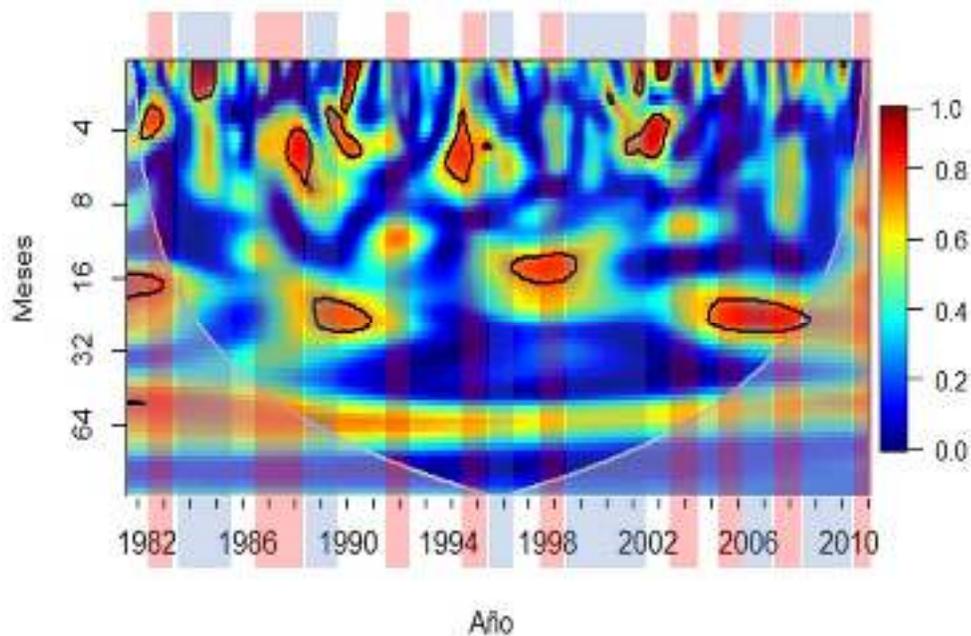


Figura 13. Análisis de coherencia wavelet (WTC) entre el Índice Oceánico El Niño (ONI) y las anomalías mensuales de temperatura superficial del mar en el área de estudio para el período 1982 – 2010. Las líneas negras encierran regiones significativas mayores a un 95% de confianza definidas según un test de Monte Carlo contra ruido rojo. La línea gris delimita el cono de influencia (COI), el cual permite limitar los efectos de borde. Las barras de colores sobre la figura representan los eventos El Niño (rojo) y La Niña (azul).

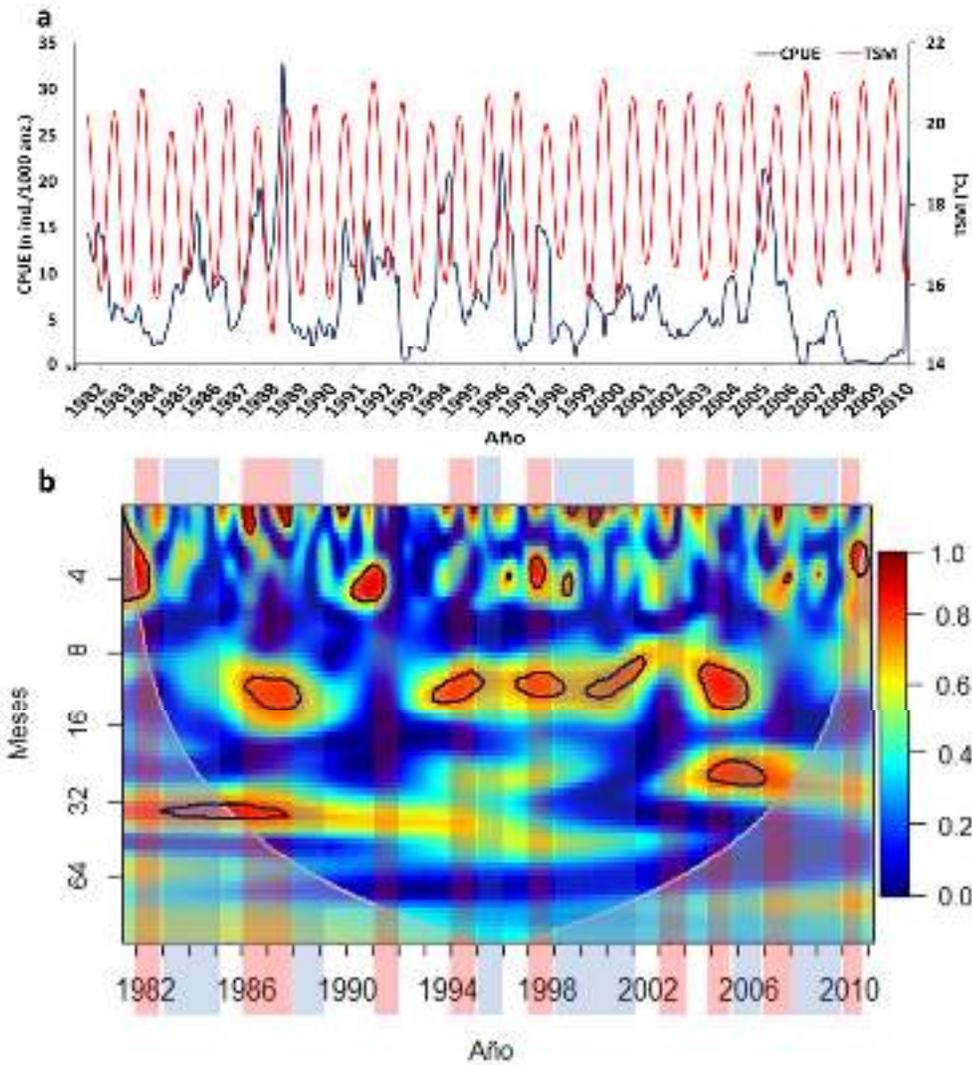


Figura 14. (a) Relación entre la temperatura superficial del mar en el área de estudio y la CPUE de atún aleta amarilla en la serie temporal analizada. (b) Análisis de coherencia wavelet (WTC) entre la temperatura superficial del mar y la CPUE de atún aleta amarilla en el período 1982 – 2010. Las líneas negras encierran regiones significativas mayores a un 95% de confianza definidas según un test de Monte Carlo contra ruido rojo. La línea gris delimita el cono de influencia (COI), el cual permite limitar los efectos de borde. Las barras de colores sobre la figura representan los eventos El Niño (rojo) y La Niña (azul).

Modelos aditivos generalizados

Como primer paso, se realizó un análisis exploratorio de las variables a ser utilizadas, el mismo demuestra que no existen altos valores de correlación entre las mismas por lo que ninguna es descartada (**Anexo I**). Asimismo, se observa que la interacción entre las variables y con la CPUE no presentan distribuciones lineales, por lo que el uso de modelos GAM resulta el análisis más pertinente.

En la construcción del modelo más complejo (GAM.1), el cual incluye las 8 variables predictivas, la Anomalía de viento zonal (AVZ) resultó no significativa ($p=0,27$). Por lo que se construyó un nuevo modelo (GAM.2) el cual incluye todas las variables menos la AVZ. En este modelo, todas las variables resultaron significativas ($p<0,05$).

De los dos modelos realizados, el segundo presentó un menor valor de AIC y GCV. Pero las diferencias entre los valores de bondad de ajuste de estos dos modelos son bajas (AIC 1,1; GCV 0,0004) (**Tabla 1**). Por lo que, de acuerdo al criterio de parsimonia, se seleccionó como mejor modelo el más simple (GAM.2), aquel que incluye 7 de las 8 variables predictivas. El porcentaje de desviación explicada total del modelo final es de 36,3%, siendo este, levemente menor (0,2%) al del primer modelo.

El modelo final seleccionado fue probado mediante Aprendizaje Supervisado. Prediciendo sobre una muestra aleatoria de un tercio de los datos, se obtuvo una varianza explicada de $0,33 \pm 0,02$. Aplicando el modelo para predecir sobre los datos de entrenamiento (dos tercios) se obtuvo una varianza explicada de $0,37 \pm 0,01$.

Los resultados gráficos del modelo GAM seleccionado se presentan en la **Figura 16** y pueden ser interpretadas como el efecto individual de cada una de las variables predictivas sobre la CPUE de atún aleta amarilla. La densidad relativa de puntos observados se presenta en el eje de las x. La línea negra representa el

ajuste de la función GAM que describe el efecto de la variable predictiva sobre la CPUE, y el sombreado gris indica los intervalos de confianza 95%.

Tabla 1. Resultado de los modelos GAM ajustados para el análisis del efecto de las variables predictivas seleccionadas sobre la variable respuesta CPUE de atún aleta amarilla. df: Grados de libertad; p-valor: valor de significancia de cada una de las variables incluidas en el modelo; GCV: Validación cruzada generalizada; AIC: Criterio de información de Akaike; R-sq: Ajuste R cuadrado; Dev.Expl.: % de desviación explicada. TSM: temperatura superficial del mar; CV_Prof.: Coeficiente de variación de la profundidad; CV_TSM: Coeficiente de variación de la TSM; AVM: Anomalía de Viento Meridional; AVZ: Anomalía de Viento Zonal; ONI: Índice Oceánico El Niño. Se destaca en gris el modelo final seleccionado (GAM.2).

MODELO	VARIABLES	df	p-valor	GCV	AIC	R-sq	Dev.Expl.
GAM.1	Año	8.965	< 2e-16	0.862	7363.019	0.35	36.50
	Mes	7.714	2.02E-13				
	TSM	4.855	< 2e-16				
	CV_Prof.	5.106	< 2e-16				
	CV_TSM	4.687	0.01020				
	AVM	3.147	0.03190				
	AVZ	4.368	0.27370				
	ONI	8.061	7.37E-05				
GAM.2	Año	8.975	< 2e-16	0.862	7361.911	0.35	36.30
	Mes	7.630	1.54E-13				
	TSM	4.906	< 2e-16				
	CV_Prof.	5.111	< 2e-16				
	CV_TSM	4.784	0.00925				
	AVM	3.243	0.04814				
	AVZ	4.368	0.27370				
	ONI	7.969	7.15E-05				

Se observan fluctuaciones anuales de los residuales parciales de la CPUE, con una tendencia general hacia la disminución hacia el final del período de estudio. En particular se observan años de mayor abundancia (87-95) y otro pico en el 2004, para luego descender (**Figura 16a**). Asimismo, la CPUE presenta valores más altos entre junio y diciembre (**Figura 16b**). Los residuales parciales de la CPUE mostraron una curva casi en forma de campana donde los mayores valores se observaron entre los 16° y 22,5° C (**Figura 16c**). El máximo se encuentra entre 17,5° y 18,5° C, luego de este máximo, la tendencia es negativa. Los residuales parciales de la CPUE tienden a aumentar a medida que aumenta el coeficiente de variación de la profundidad (**Figura 16d**), indicando que áreas con mayor variación de profundidad presentan mayores valores de CPUE. En el caso de los residuales parciales de la CPUE respecto al coeficiente de variación de la TSM se pudo ver valores mayores entre 0,035 y 0,125, y un máximo próximo a 0,085 y luego disminuye (**Figura 16e**). Se observa también que a valores más altos los intervalos de confianza son mayores debido a que cuadrículas mensuales con tan altos valores de CV_TSM son raros. Estos valores altos extremos corresponden principalmente a cuadrículas y meses con muy bajos valores de TSM y uno o muy pocos valores más altos, los cuales podrían estar indicando la presencia de frentes generados por la presencia de eddies. Los residuales parciales de la CPUE tienden a ser mayores cuando las anomalías de viento meridional son menores a -1,5 (anomalías de viento de componente N), y entre 0,1 y 2,5 (anomalías de viento de componente S), aunque los intervalos de confianza se amplían hacia valores extremos (**Figura 16f**). La CPUE mostró un patrón particular de variabilidad respecto al ONI, donde se observan máximos en los eventos El Niño y La Niña extremos, mientras que eventos leves tienden a ser bajos (**Figura 16g**).

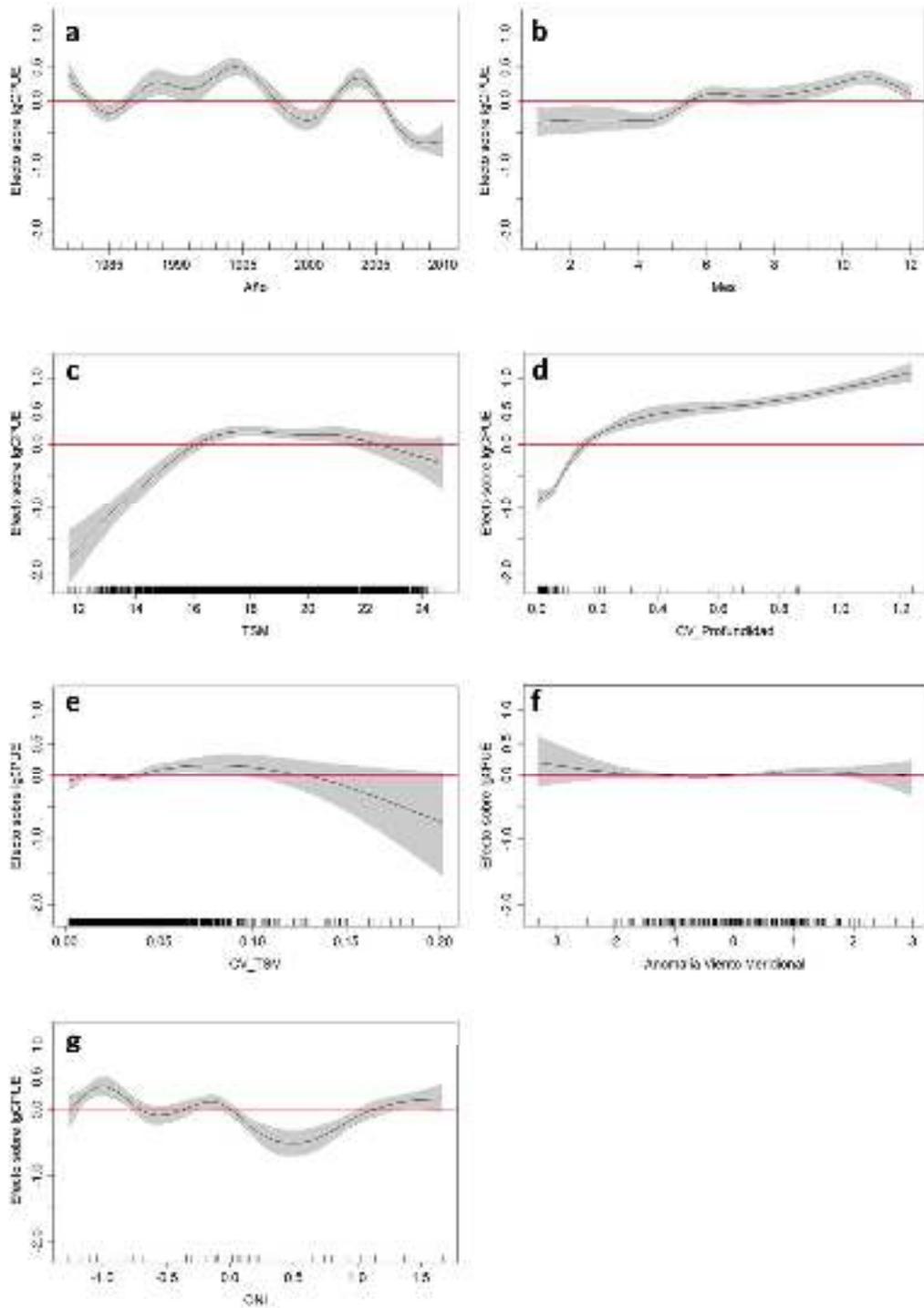


Figura 16. Ajuste del modelo GAM de la CPUE de atún aleta amarilla en función del (a) Año, (b) Mes, (c) TSM: temperatura superficial del mar, (d)

CV_Profundidad: Coeficiente de variación de la profundidad, (e) CV_TSM: Coeficiente de variación de la temperatura superficial del mar, (f) Anomalía de viento meridional, (g) ONI: Índice oceánico El Niño. El sombreado gris indica los intervalos de confianza 95%. La línea negra representa el ajuste de la función GAM que describe el efecto de la variable predictiva sobre la variable respuesta. La densidad relativa de puntos observados se presenta en el eje de las x.

En el análisis diagnóstico de los residuos del modelo final se observa que los mismos se ajustan muy bien a una distribución normal (**Figura 17a y 17c**) confirmando que la elección de la distribución Gaussiana para el modelo fue la correcta. Se observa en las **Figuras 17b y 17d** que ambas se encuentran fuertemente influenciadas por la cantidad de ceros en la base de datos. En la **Figura 17b** se observa que salvo por los ceros que se presentan como una línea casi continua de puntos, la dispersión es relativamente homogénea. La relación entre los valores ajustados y los respuesta parece tener una buena distribución lineal (**Figura 17d**).

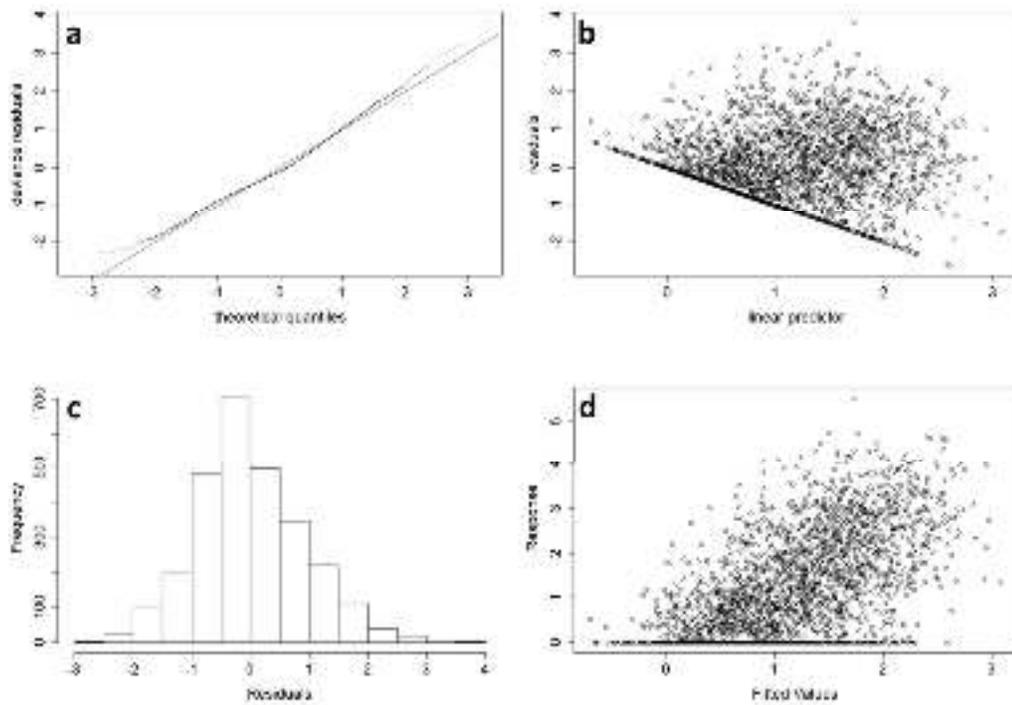


Figura 17. Análisis diagnóstico de los residuos del modelo GAM seleccionado. (a) Q-Q Plot; (b) Residuos vs predictor lineal; (c) Histograma de los residuos; (d) Variable respuesta vs. Valores ajustados del modelo.

DISCUSIÓN

General

Los resultados confirman que la variabilidad climática causada por diferentes procesos atmosféricos y oceánicos tales como, la presencia de frentes, las anomalías de viento y la variabilidad de la TSM determinada por eventos ENSO afecta la distribución y las capturas de atún aleta amarilla en el área de estudio. Esto comprueba la hipótesis planteada en este estudio, pero no la predicción, ya que a diferencia de otros estudios publicados (Zagaglia et al. 2004, Arrizabalaga et al. 2015, Gonzáles-Andrés et al. 2016, Lan et al. 2017), no se observó una relación directa positiva entre el aumento de la temperatura superficial del mar y las capturas de esta especie.

En el análisis ambiental, se ratificó la tendencia positiva al aumento de la TSM en el área (Lima & Wetthey 2012, Ortega et al. 2012, 2013, 2016, Hobday & Pecl 2014), observándose un cambio en el régimen pasando de un período frío a uno cálido a partir de 1999. También se pudo observar que los vientos, tanto en su componente zonal como meridional, presentan un cambio de régimen en 1995 y 2004 respectivamente. En este trabajo se pudo evidenciar la influencia de los eventos del ENSO sobre las anomalías de TSM en el área y período de estudio, observándose que los años donde las correlaciones son significativas coinciden con eventos ENSO. Si bien los efectos del ENSO han sido reportados en estudios anteriores, los mismos fueron realizados a nivel de la cuenca del Atlántico sur (Colberg et al. 2004, Barreiro 2010, Berman et al. 2011).

El análisis de la CPUE de aleta amarilla y las variables ambientales indican una clara asociación de la especie a los frentes que caracterizan la zona del talud continental. Esta asociación se ve afectada por los eventos ENSO, principalmente los moderados a fuertes, causando un efecto positivo sobre la CPUE de aleta amarilla, particularmente en los eventos La Niña.

Esfuerzo pesquero y CPUE de aleta amarilla

El análisis de la CPUE correspondiente a los 29 años del período de estudio presenta un escenario de gran variabilidad interanual. Estudios anteriores observaron una tendencia negativa en la CPUE de aleta amarilla para todo el período de estudio (Pons & Domingo 2009, Forselledo et al 2017) y, aunque más acentuada en la flota uruguaya, coincide con las observadas en las flotas pesqueras de otros países que operan en el océano Atlántico (Huang 2017, Satoh & Matsumoto 2017, Walter 2017). A pesar de esta tendencia negativa, la evaluación de stock de atún aleta amarilla realizada en 2016 por la CICAA para el océano Atlántico indica que, de acuerdo con las proyecciones realizadas hasta el año 2024, de mantenerse las capturas permitidas actuales, el stock de esta especie podría mantenerse saludable (ANON 2016).

El análisis mensual de la CPUE muestra una clara estacionalidad con dos picos, uno en otoño (mayo) y otro en primavera (noviembre). A pesar de la clara estacionalidad que también presenta la TSM, estas dos variables no siguen un mismo patrón. Los picos observados en la CPUE coinciden en parte con la estacionalidad de la presencia de frentes en la región, ya que otoño e invierno son las estaciones de frentes con mayor intensidad (mayor gradiente térmico), en primavera se suavizan y en verano se observan los más débiles (Barreiro et al 2014). La intensidad del frente durante el invierno podría atraer a la especie, pero las condiciones de TSM de la región durante esta estación se encuentran muy por debajo de los rangos de preferencia de la especie (18° a 31° C) (Brill et al. 1999, Brill & Lutcavage 2001, Dagorn et al. 2006, Yen et al. 2012, Hoolihan et al. 2014, Miller & Domingo 2016).

Esta asociación entre las capturas de la especie y los frentes se observa también en la distribución de los centroides. En relación a los centroides anuales ponderados por el esfuerzo de pesca se observa un cambio en la distribución de los mismos hacia 1993-1996, pasando de una ubicación al inicio del período más

hacia el SW de la media del período hacia una ubicación al NE de la media, donde el cambio más observable es a nivel longitudinal. Este cambio corresponde principalmente a un cambio en la especie a la cual se direccionaba el esfuerzo de pesca, pasando de atún ojo grande a pez espada (Mora & Domingo 2006, Forselledo et al. 2017). A pesar de este cambio en la distribución espacial del esfuerzo de pesca, los centroides anuales ponderados por la CPUE presentan muy poca variación espacial, concentrándose principalmente sobre la zona del talud, indicando una preferencia de la especie por esta región.

Caracterización ambiental del área de estudio

En la región se pudo distinguir una zona de alta variabilidad de la TSM que corresponde al área de influencia del Río de la Plata, seguida de la zona de convergencia y el borde del talud y una zona de escasa variabilidad. Esta última debe su baja variabilidad a la presencia de la Corriente de Brasil durante todo el año. Otras áreas que presentan una gran variabilidad estacional e interanual son moduladas principalmente por los cambios en los regímenes de viento asociados al centro de alta presión del Atlántico Sur. A nivel interanual los eventos ENSO influyen sobre el caudal del Río de la Plata aumentando en los eventos cálidos y disminuyendo en los eventos fríos (Pisciottano et al. 1994, Cazes-Boezio et al. 2003, Barreiro & Tippmann 2008, Barreiro 2010) afectando la hidrografía del área tanto a nivel de temperatura como de salinidad. Podría decirse que durante los eventos cálidos predominan condiciones similares al verano, en particular durante la primavera, por lo que los vientos predominantes son del N y desplazan la pluma de descarga del Río de la Plata hacia la plataforma externa, generando fuertes gradientes o frentes en la zona de talud. Mientras que en los períodos fríos se acentúan condiciones similares al invierno, con mayor influencia de vientos del S y de aguas subantárticas, reforzando los frentes térmicos del talud (Barreiro et al. 2014).

La tendencia positiva de la TSM con un aumento anual de 0.025°C y el predominio absoluto de anomalías positivas de temperatura a partir de 1999 evidencia un cambio de régimen en el área. Este aumento de la TSM coincide con los valores ya reportados para el área en otros estudios (Ortega et al. 2012, 2013, 2016). Además, el área presenta una de las mayores tasas de calentamiento a nivel mundial, por lo que ha sido identificada como uno de los 24 “hotspot” de calentamiento, los cuales presentan una tasa mayor que el restante 90% de los océanos (Lima & Wethey 2012, Hobday & Pecl 2014). Este calentamiento puede ser debido a cambios en la circulación marina, en particular una mayor influencia de las aguas cálidas de la Corriente de Brasil y a un debilitamiento en el transporte de la Corriente de Malvinas (Combes & Matano 2018). En este sentido se ha observado la migración hacia el S del frente de aguas cálidas (Ortega et al. 2016) lo que resulta en un calentamiento del área, en particular frente a aguas jurisdiccionales de Uruguay. Un factor clave en la variabilidad de la circulación superficial son los vientos; estos, causan diferentes efectos sobre las condiciones oceanográficas, afectan la circulación de las masas de agua, modifican la capa de mezcla, intensifican los frentes, y generan surgencias (Barreiro et al. 2014, Acha et al. 2015).

Para el período de estudio se pudo constatar cambios en las anomalías de viento tanto zonal como meridional prevaleciendo los vientos de componente W (zonal positivo) hasta mediados de los 90 para luego predominar los de componente E (zonal negativo). En el caso de los vientos meridionales el cambio se observó luego del 2004, predominando los vientos de componente S. Esta variabilidad en los vientos puede influir en la circulación de la zona y ser en parte uno de los factores causantes de ese aumento en la temperatura del área.

Si bien los efectos del ENSO sobre la TSM han sido reportados en estudios anteriores, dichos estudios han sido realizados a nivel de la cuenca del Atlántico sur (Colberg et al. 2004, Barreiro 2010, Berman et al. 2011). En este estudio se

demonstró que, en el área y período de estudio, los eventos ENSO influyeron sobre las anomalías de TSM. Mediante un análisis de coherencia se observó que los años donde las correlaciones entre el ENSO y las anomalías de TSM son significativas coinciden con eventos El Niño o La Niña. Este análisis no permite comprender cuál es el efecto de esos eventos sobre las anomalías de TSM, pero de acuerdo a Barreiro (2010), durante los eventos El Niño se produce un calentamiento de las aguas oceánicas cercanas a Brasil y Uruguay, mientras que se enfrían durante los eventos La Niña. Estos efectos no tienen un comportamiento lineal, ya que existen muchas variables (viento, precipitaciones, etc.) que se ven afectadas durante los mismos e influyen en las condiciones climáticas de la región (Colberg et al. 2004, Barreiro & Tippmann 2008, Arizmendi & Barreiro 2017).

Análisis de la información ambiental y pesquera

Como ya fue mencionado, tanto la CPUE como la TSM presentan una clara estacionalidad, pero con diferentes comportamientos. De todas formas, mediante un análisis de coherencia de la serie temporal completa de estas dos variables, se pudo constatar que la CPUE esta modulada por la variabilidad de alta frecuencia (4-12 meses) de la TSM probablemente asociado a la estacionalidad observada. La gran mayoría de los estudios que analizan las capturas de esta especie en relación al efecto de las variables ambientales encuentran una importante relación con la TSM (Arrizabalaga et al. 2015, Gonzáles-Andrés et al. 2016, Lan et al. 2017), salvo en áreas donde las temperaturas son más constantes y por lo tanto la TSM deja de ser la variable más importante y otras tales como el viento son las que tienen un mayor efecto (e.g. Zagaglia et al. 2004).

A pesar de ser una especie tropical, se observaron en el área capturas con muy baja TSM (11,6°C), en zonas de gradientes térmicos muy acentuados,

evidenciando posiblemente la presencia de frentes térmicos o eddies, los cuales son muy frecuentes en el área pues son generados en la zona de convergencia. Esta especie tiene preferencia por aguas cálidas, y a diferencia de gran parte de los estudios, se observó aquí que la CPUE y la TSM no presentan una relación directa positiva, si no que los valores de TSM con un efecto positivo sobre la CPUE se encuentran entre los 16° y 22,5° C. Estos valores se encuentran por debajo del rango de preferencia de TSM reportado para la especie en diversas áreas de todos los océanos, incluyendo Uruguay (18° a 31° C) (Brill et al. 1999, Brill & Lutcavage 2001, Dagorn et al. 2006, Yen et al. 2012, Hoolihan et al. 2014, Miller & Domingo 2016). Esto mismo ya había sido observado anteriormente para el área de estudio por Domingo et al. (2009), donde los menores valores de CPUE se registraron a TSM mayores a 25° C. Estas bajas temperaturas de captura pueden también estar relacionadas al tamaño de los individuos, ya que de acuerdo a lo reportado la flota uruguaya captura subadultos y adultos con una talla media de 111 cm a 113 cm (Domingo et al 2008a, 2009, Forselledo & Domingo 2016), los cuales pueden presentar una mayor tolerancia a TSM más bajas (Schaefer et al. 2011), mientras que individuos juveniles (50 cm) son capturados principalmente por pesquerías de cerco en regiones tropicales con TSM más elevadas (ANON 2004, Pecoraro et al. 2017).

La relación observada entre la CPUE y la TSM se encuentra también asociada al importante efecto positivo encontrado con el CV de la profundidad. Áreas con altos valores de CV representan la zona del talud continental, y son aquellas que presentaron un mayor efecto positivo sobre los valores de CPUE. En cambio, áreas con altos valores de TSM (mayores a 22° C) y bajos valores de CPUE se encuentran asociados a la región oceánica norte del área de estudio, la cual se caracteriza por bajos valores de CV ya que se encuentran en zonas profundas alejadas del talud donde la temperatura es elevada y uniforme.

Estos resultados, sumados al importante efecto del CV de la TSM, indican una estrecha relación de las capturas de atún aleta amarilla con la presencia de frentes térmicos, particularmente en el borde del talud, donde aguas Subantárticas, frías y diluidas circulan sobre la plataforma continental, mientras que las aguas cálidas y salinas de la CB circulan por el borde externo de la plataforma continental y área oceánica. Esto genera que los mayores gradientes térmicos superficiales se encuentren en la zona comprendida entre los 200 y 2.000 m de profundidad (Barreiro et al 2014). Cabe destacar que a modo general el frente subtropical del Atlántico Sur se define en superficie por un gradiente térmico que separa aguas subtropicales y subantárticas. Stramma & England (1999) usaron a nivel superficial la isoterma de 16° C para identificar este frente, por lo que esto reafirma que la especie se encuentra asociada al frente.

Los atunes son predadores visuales oportunistas, por lo que necesitan aguas claras para ubicar sus presas. Estudios han observado la preferencia de esta y otras especies de túnidos por aguas oligotróficas, con bajas concentraciones de clorofila y por lo tanto claras (Ramos et al. 1996, Brill et al. 2005, Mugo et al. 2010, Setiawati et al. 2015). Pero en aguas de estas características, en general la disponibilidad de alimento es baja, disminuyendo la probabilidad de encuentro entre predador y presa (Kirby et al. 2000). Por lo que, la distribución de las presas también tiene un importante efecto sobre la distribución de las especies predatoras (Kirby et al. 2000, Lezama-Ochoa et al. 2010). Las zonas de frentes son muy ricas en nutrientes, transformándose en una zona donde convergen grandes concentraciones de plancton, que atraen predadores tales como calamares, peces, aves y mamíferos (Yoder et al. 1994, Lehodey et al. 1997, Acha et al. 2004, 2015). En base a estudios de dieta del atún aleta amarilla en el océano Pacífico, se observó que estos se alimentan principalmente de calamares y pequeños peces pelágicos (Román Reyes 2005, Alatorre 2007). En la región del Atlántico sudoccidental, la distribución del calamar *Illex argentinus* y la anchoíta *Engraulis anchoita*, dos posibles presas muy abundantes, se encuentran

fuertemente asociadas a la presencia de frentes (Hansen et al. 2001, Waluda et al. 2001, Bazzino et al. 2005, Marrari et al. 2013, Haimovici et al. 2014). En particular para el calamar, se observó que grandes abundancias se asocian a TSM de entre 16° y 18° C (Waluda et al. 2001), temperaturas similares a las observadas aquí para el aleta amarilla. Estudios de isótopos estables de carbono-13 en diferentes especies presentes en la región del Atlántico sudoccidental, ubican al atún aleta amarilla como una especie que se encuentra sobre el talud, incluso más que otras especies pelágicas como el atún albacora, el pez espada y el tiburón azul (Jiménez et al. 2017). Por lo que, dadas las preferencias de temperaturas del atún aleta amarilla, las temperaturas de captura observadas, y la presencia de grandes abundancias de posibles presas asociadas a los frentes, es muy probable que, la asociación a los frentes tenga objetivos tróficos, buscando alimentarse en zonas altamente productivas, intentando permanecer en la parte del frente con temperaturas más cálidas y tolerables.

Como ya se mencionó, el viento tiene efectos sobre las condiciones oceanográficas (Escobar et al. 2004, Barreiro et al. 2014, Acha et al. 2015), pero también tiene efectos sobre los componentes biológicos del sistema. Diversos estudios han reportado que el viento puede causar cambios en el comportamiento de las especies, por ejemplo, en especies de grandes peces pelágicos se ha observado que las mismas buscan mayores profundidades durante eventos de mayor intensidad de vientos, lo que podría llevar a una disminución en la CPUE debido a la reducción del solapamiento de la distribución vertical de la especie con la profundidad de operación del arte de pesca (Bigelow et al. 1999). Este efecto ha sido observado en la región ecuatorial del océano Atlántico oeste, donde las mayores capturas de aleta amarilla se registraron en zonas de menor viento (Zagaglia et al. 2004). A pesar de estos antecedentes, no se encontró en este estudio una relación muy importante entre las anomalías de viento y la CPUE de aleta amarilla. De todas formas, se observó que el viento meridional tiene un efecto positivo sobre la CPUE, principalmente hacia

anomalías positivas, las cuales corresponden con vientos del sur. Este resultado apoya lo observado principalmente debido a que son los vientos predominantes en el período del año donde se observaron los mayores valores de CPUE (otoño tardío, invierno - primavera); además dada la relación de la especie con los frentes térmicos, los vientos de componente sur advectan aguas subantárticas hacia el norte sobre la plataforma, reforzando el frente térmico del talud (Escobar et al. 2004, Barreiro et al. 2014, Acha et al. 2015).

En relación a los eventos ENSO, se observó que tanto El Niño como La Niña tiene un efecto positivo sobre la CPUE de aleta amarilla, siendo más notorio en los eventos La Niña. Esto posiblemente se deba a que, durante estos eventos, donde se observa un enfriamiento en la región, los gradientes térmicos sean más fuertes, debido a un mayor transporte de la corriente de Malvinas por la plataforma (Ortega & Martínez 2007, Machado et al. 2013), favoreciendo esto a la presencia de la especie. Este desplazamiento de la CM, como ya fue mencionado, es ayudado por la predominancia de vientos de componente sur durante La Niña. Durante los eventos El Niño, se observa una tropicalización de la región, caracterizado por un aumento en la TSM y una mayor presencia de aguas provenientes de la descarga del Río de la Plata en la plataforma externa. Esto genera un frente de aguas diluidas que puede llegar a la plataforma externa aumentando la productividad (Machado et al. 2013), el cual podría también favorecer la presencia de la especie. Los resultados aquí presentados coinciden con lo reportado en otros estudios donde se ha observado que los eventos ENSO tienen un efecto sobre las capturas de las diferentes especies. Estos efectos, varían dependiendo de la especie, pero principalmente dependiendo de la región considerada, ya que los efectos de estos eventos no son iguales en todos los océanos. En general, se ha observado que los efectos del ENSO sobre las pesquerías de túnidos se relacionan principalmente con las variaciones en la TSM y la disponibilidad de alimento (Lehodey et al. 1997). Por ejemplo, en el océano Índico, se observó que los eventos ENSO son el principal factor de variabilidad en

las capturas de túnidos, estando esto asociado a las variaciones de la TSM, y siendo negativo el impacto de los eventos extremos (Kumar et al. 2014). En el océano Pacífico, se observó que las capturas de atún ojo grande aumentaron durante los eventos El Niño, probablemente debido a que la isoterma de 20° C se encontraba más superficial durante estos eventos, permitiendo a la especie encontrarse más cerca de la superficie, y por lo tanto más susceptible a la pesca (Howell & Kobayashi 2006). En la región del Pacífico tropical este, se observó que los eventos moderados ENSO no tienen un gran impacto sobre la CPUE de atún aleta amarilla. Mientras que eventos extremos, como El Niño de 1982, causó los menores rendimientos históricos de esta especie. Esto se debe al cambio en la profundidad de la termoclina, la cual reduce la productividad en la región, y por lo tanto causa un desplazamiento horizontal de la especie (De Anda-Montañez et al. 2004). Posiblemente, y al igual que ha sido mencionado en los ejemplos anteriores, los efectos que causan los eventos ENSO leves y moderados en las condiciones atmosféricas y oceanográficas no generen un gran impacto sobre estas especies, las cuales ya se ha demostrado en diversos estudios que presenta una gran capacidad y tolerancia a variaciones ambientales. Mientras que, eventos extremos causan importantes variaciones ambientales, las cuales, dependiendo de la región en estudio, generen condiciones óptimas o adversas. Dado que estas especies son altamente migratorias, puede causar desplazamientos tanto en el plano vertical como en el horizontal, aumentando o disminuyendo los rendimientos de pesca. En particular, en la región del Atlántico sudoccidental, los efectos del ENSO se asocian a variaciones en los regímenes de precipitaciones, vientos y TSM (Pisciottano et al. 1994, Cazes-Boezio et al. 2003, Colberg et al. 2004, Ortega & Martínez 2007, Barreiro & Tippmann 2008, Barreiro 2010, Machado et al. 2013, Arizmendi & Barreiro 2017). Tal vez, los efectos de los eventos leves y moderados no generen cambios oceanográficos importantes en el área de captura como para ser evidenciados en los rendimientos de esta especie.

CONCLUSIONES

- Este es el primer estudio en el océano Atlántico sudoccidental que incluye eventos climáticos interanuales como el ENSO en el análisis del efecto de la variabilidad climática sobre las capturas de atún aleta amarilla.
- Los resultados confirman que la variabilidad climática causada por diferentes procesos atmosféricos y oceánicos tales como, la presencia de frentes, las anomalías de viento, la variabilidad de la TSM y los eventos ENSO afecta la distribución y las capturas de atún aleta amarilla en el área de estudio.
- Contrario a lo esperado, no se observó una relación directa positiva entre el aumento de la temperatura superficial del mar y las capturas de esta especie. En este sentido, a pesar de constatar un aumento en la TSM media en el área de estudio, sumado a las evidencias de un desplazamiento del frente cálido hacia el sur, no se observó una ampliación en el rango de distribución de la especie.
- A pesar de la relación observada entre la CPUE de atún aleta amarilla y la variabilidad climática, en este estudio no se observó en la CPUE un patrón de ciclos interanuales asociados a eventos climáticos.

PERSPECTIVAS

La identificación de factores ambientales que modulan los patrones de abundancia y distribución de los recursos son claves para la planificación y adaptación de las estrategias de manejo pesquero en un escenario donde se predicen mayores cambios en las condiciones oceanográficas y atmosféricas las cuales afectan los rendimientos pesqueros. Los resultados aquí obtenidos destacan varios puntos importantes que deberían ser considerados sobre el

efecto de la variabilidad climática sobre las capturas de atún aleta amarilla. Estos resultados podrían permitir dar asesoramiento al sector pesquero interesado en la explotación de este recurso, ayudando a desarrollar una pesquería más eficiente y con mejores rendimientos. También podría colaborar en una mejor gestión del recurso, ya que es de particular relevancia la integración de modelos ambientales a las evaluaciones de stock de los recursos explotados, principalmente las que se realizan sobre esta especie en el marco de la CICAA.

BIBLIOGRAFÍA

- Acha EM, Mianzan HW, Guerrero RA, Favero M, Bava J (2004) Marine fronts at the continental shelves of austral South America. *Journal of Marine Systems* 44:83–105
- Acha EM, Piola A, Iribarne O, Mianzan H (2015) *Ecological Processes at Marine Fronts*. Springer International Publishing, Cham
- Alatorre Ramírez VG (2007) Hábitos alimenticios del atún aleta amarilla *Thunnus albacares* y barrilete *Katsuwonus pelamis* en cardúmenes mixtos del Océano Pacífico Oriental Tropical. Tesis Maestría en Manejo de Recursos Marinos. Instituto Politécnico Nacional. México.
- Anon (2004) 2003 ICCAT Atlantic Yellowfin Tuna Stock Assessment Session. Merida, Mexico, 21–26 July 2003. *Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, 56(2): 443–527.
- Anon (2016) Report of the Standing Committee in Research and Statistics (SCRS). Madrid, Spain, 3–7 October 2016.
- Arizmendi F, Barreiro M (2017) ENSO teleconnections in the southern hemisphere: A climate network view. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science* 27:093109
- Arrizabalaga H, Dufour F, Kell L, Merino G, Ibaibarriaga L, Chust G, Irigoien X, Santiago J, Murua H, Fraile I, Chifflet M, Goikoetxea N, Sagarminaga Y, Aumont O, Bopp L, Herrera M, Marc Fromentin J, Bonhommeau S (2015) Global habitat preferences of commercially valuable tuna. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 113:102–112
- Banzon V, Smith TM, Chin TM, Liu C, Hankins W (2016) A long-term record of blended satellite and in situ sea-surface temperature for climate monitoring, modeling and environmental studies. *Earth System Science Data* 8:165–176
- Barreiro M (2010) Influence of ENSO and the South Atlantic Ocean on climate predictability over Southeastern South America. *Climate Dynamics* 35:1493–1508
- Barreiro M, Tippmann A (2008) Atlantic modulation of El Niño influence on summertime rainfall over southeastern South America. *Geophysical Research Letters* 35
- Barreiro M, Martínez A, Ortega L, Rabellino J (2014) Capítulo 1.1: Hidrodinámica. En: ANCAP – FACULTAD DE CIENCIAS. 2014. Uruguay Margen Continental. Programa oceanográfico de caracterización del margen continental uruguayo. Zona Económica Exclusiva. Montevideo. 380p
- Bazzino G, Quiñones RA, Norbis W (2005) Environmental associations of shortfin squid *Illex argentinus* (Cephalopoda: Ommastrephidae) in the Northern Patagonian Shelf. *Fisheries Research* 76:401–416

- Beamish RJ, Noakes DJ, McFarlane GA, Klyashtorin L, Ivanov VV, Kurashov V (1999) The regime concept and natural trends in the production of Pacific salmon. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 56:516–526
- Begg GA, Friedland KD, Pearce JB (1999) Stock identification and its role in stock assessment and fisheries management: an overview. *Fisheries Research* 43:1–8
- Berman AL, Compagnucci R, Silvestri G (2011) Co-variabilidad de la temperatura superficial del mar entre cuencas del Hemisferio Sur. *Geoacta* 36:97–111
- Bigelow KA, Boggs H, He X (1999) Environmental effects on swordfish and blue shark catch rates in the US North Pacific longline fishery. *Fisheries Oceanography* 8:178–198
- Bischoff S (2005) Sudestadas. En: Barros V, Ménendez A, Nagy G (eds.) *El Cambio Climático en el Río de la Plata*. Buenos Aires, Argentina: Universidad de Buenos Aires, pp. 53–67.
- Brander KM (2007) Global fish production and climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104:19709–19714
- Brander K (2010) Impacts of climate change on fisheries. *Journal of Marine Systems* 79:389–402
- Brill RW, Block BA, Boggs CH, Bigelow KA, Freund EV, Marcinek DJ (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
- Brill R, Lutcavage M (2001) Understanding Environmental Influences on Movements and Depth Distributions of Tunas and Billfishes Can Significantly Improve Population Assessments. *American Fisheries Society Symposium* 25
- Brill RW, Bigelow KA, Musyl MK, Frietsches KA, Warrant EJ (2005) Bigeye tuna (*Thunnus obesus*) behavior and physiology and their relevance to stock assessments and fishery biology. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT* 57(2): 142–161
- Brook BW (2009) Global warming tugs at trophic interactions. *Journal of Animal Ecology* 78:1–3
- Cadrin SX, Karr LA, Mariani S (2014) Chapter One: Stock Identification Methods: An Overview. En: Cadrin SX, Karr LA, Mariani S, eds. (2014) *Stock Identification Methods: Applications in Fishery Science (Second Edition)*. Academic Press. 588 pp.
- Calliari D, Defeo O, Cervetto G, Gómez M, Giménez L, Scarabino F, Brazeiro A, Norbis W (2003) Marine life of Uruguay: Critical update and priorities for future research. *Gayana* 67:341–370

- Cazes-Boezio G, Robertson AW, Mechoso CR (2003) Seasonal Dependence of ENSO Teleconnections over South America and Relationships with Precipitation in Uruguay. *Journal of Climate* 16:1159–1176
- Cheung WWL, Lam VWY, Sarmiento JL, Kearney K, Watson R, Pauly D (2009) Projecting global marine biodiversity impacts under climate change scenarios. *Fish and Fisheries* 10:235–251
- Cheung WWL, Lam VWY, Sarmiento JL, Kearney K, Watson R, Zeller D, Pauly D (2010) Large-scale redistribution of maximum fisheries catch potential in the global ocean under climate change: Climate change impacts on catch potential. *Global Change Biology* 16:24–35
- Cheung WWL, Brueggeman J, Butenschön M (2018) Chapter 4: Projected changes in global and national potential marine fisheries catch under climate change scenarios in the twenty-first century. En: Barange M, Bahri T, Beveridge MCM, Cochrane KL, Funge-Smith S, Poulain F, eds. (2018) *Impacts of climate change on fisheries and aquaculture: synthesis of current knowledge, adaptation and mitigation options*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 627. Rome, FAO. 628 pp.
- Colberg F, Reason, C. J. C., Rodgers, K. (2004) South Atlantic response to El Niño–Southern Oscillation induced climate variability in an ocean general circulation model. *Journal of Geophysical Research* 109: 1–14
- Coletto JL, Pinho MP, Madureira LSP (2019) Operational oceanography applied to skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) habitat monitoring and fishing in south-western Atlantic. *Fisheries Oceanography* 28:82–93
- Combes V, Matano RP (2018) The Patagonian shelf circulation: Drivers and variability. *Progress in Oceanography* 167:24–43
- Dagorn L, Holland KN, Hallier J-P, Taquet M, Moreno G, Sancho G, Itano DG, Aumeeruddy R, Girard C, Million J, Fonteneau A (2006) Deep diving behavior observed in yellowfin tuna (*Thunnus albacares*). *Aquatic Living Resources* 19:85–88
- De Anda-Montañez JA, Amador-Buenrostro A, Martínez-Aguilar S, Muhlia-Almazán A (2004) Spatial analysis of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) catch rate and its relation to El Niño and La Niña events in the eastern tropical Pacific. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 51:575–586
- Dell JT, Wilcox C, Matear RJ, Chamberlain MA, Hobday AJ (2015) Potential impacts of climate change on the distribution of longline catches of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the Tasman sea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 113:235–245

- Domingo A, Sales G, Giffoni B, Miller P, Laporta M, Maurutto G (2006) Captura incidental de Tortugas Marinas con Palangre Pelágico en el Atlántico Sur por las Flotas de Brasil y Uruguay. Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT 59: 992-1002
- Domingo A, Mora O, Pons M, Miller P, Pereyra G (2007) Análisis de la CPUE y la composición de tallas del SWO (*Xiphias gladius*), capturado por la Flota Uruguaya (2001-2005) en el Atlántico SW. Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT 60: 1953-1963
- Domingo A, Pons M, Miller P, Passadore C, Mora O, Pereyra G (2008a) Distribución y composición de tallas de *Thunnus albacares* en el Atlántico SW, en base a la información del Programa Nacional de Observadores de la Flota Palangrera uruguaya (1998-2006). Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT, 62: 485-494
- Domingo A, Pons M, Miller P, Passadore C, Mora O, Pereyra G (2008b) Estadísticas del atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*) en la pesquería de palangre pelágico de Uruguay (1981-2006). Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT, 62: 495-511
- Domingo A, Rios M, Pons M (2009) Spatial and temporal distribution, size and sex composition of the yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the southwest Atlantic Ocean. Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT, 64: 999-1010
- Domingo A, Forselledo R, Miller P, Jiménez S, Mas F, Pons M (2014) Capítulo 3.1.2: Palangre. ICCAT. 2006-2016. Manual de ICCAT. Comisión internacional para la conservación del atún Atlántico. En: Publicaciones ICCAT [on line]. Actualizado 2016. [Citado 27/01/2009]. ISBN (Edición electrónica): 978-92-990055-0-7
- D'Onofrio EE, Fiore MME, Pousa JL (2008) Changes in the Regime of Storm Surges at Buenos Aires, Argentina. Journal of Coastal Research 1:260-265
- Dufour F, Arrizabalaga H, Irigoien X, Santiago J (2010) Climate impacts on albacore and bluefin tunas migrations phenology and spatial distribution. Progress in Oceanography 86:283-290
- Escobar G, Vargas W, Bischoff S (2004) Wind tides in the Rio de la Plata estuary: Meteorological conditions. International Journal of Climatology 24:1159-1169
- FAO (2018) El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2018. Cumplir los objetivos de desarrollo sostenible. FOOD & AGRICULTURE ORG, Roma
- Fiedler P (2002) Environmental change in the eastern tropical Pacific Ocean: review of ENSO and decadal variability. Marine Ecology Progress Series 244:265-283
- Forselledo R, Domingo A (2016) Yellowfin tuna: review of Task II size data reported by Uruguay. SCRS/P/2016/024. 2016 Yellowfin tuna Stock Assessment Meeting. San Sebastián, Spain.

- Forselledo R, Mas F, Domingo A (2017) Update of standardized CPUE of yellowfin tuna, *Thunnus albacares*, caught by Uruguayan longliners in the southwestern Atlantic Ocean (1982-2010). Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT, 73: 382-403
- García Molinos J, Halpern BS, Schoeman DS, Brown CJ, Kiessling W, Moore PJ, Pandolfi JM, Poloczanska ES, Richardson AJ, Burrows MT (2016) Climate velocity and the future global redistribution of marine biodiversity. Nature Climate Change 6:83–88
- González-Andrés C, F. M. Lopes P, Cortés J, Sánchez-Lizaso JL, Pennino MG (2016) Abundance and Distribution Patterns of *Thunnus albacares* in Isla del Coco National Park through Predictive Habitat Suitability Models (D Hyrenbach, Ed.). PLOS ONE 11:e0168212
- Gouhier TC, Grinsted A, Simko V (2018) R package biwavelet: Conduct Univariate and Bivariate Wavelet Analyses.
- Graham JB, Dickson KA (2004) Tuna comparative physiology. The Journal of Experimental Biology 207: 4015-4024
- Grimm AM, Barros VR, Doyle ME (2000) Climate Variability in Southern South America Associated with El Niño and La Niña Events. Journal of Climate 13:35–58
- Grinsted A, Moore JC, Jevrejeva S (2004) Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. Nonlinear Processes in Geophysics 11:561–566
- Guerrero RA, Piola AR (1997) Masas de agua en la plataforma continental. En: El Mar Argentino y sus recursos pesqueros, 1: 107-118.
- Gutiérrez O, Panario D, Nagy GJ, Bidegain M, Montes C (2016) Climate teleconnections and indicators of coastal systems response. Ocean & Coastal Management 122:64–76
- Haimovici M, Santos RA dos, Bainy MCRS, Fischer LG, Cardoso LG (2014) Abundance, distribution and population dynamics of the short fin squid *Illex argentinus* in Southeastern and Southern Brazil. Fisheries Research 152:1–12
- Hansen JE, Martos P, Madirolas A (2001) Relationship between spatial distribution of the Patagonian stock of Argentine anchovy, *Engraulis anchoita*, and sea temperatures during late spring to early summer. Fisheries Oceanography 10:193–206
- Hastie T, Tibshirani R (1986) Generalized Additive Models. Statistical Science 1:297–310
- Hilborn R, Walters CJ (1992) Quantitative fisheries stock assessment: choice, dynamics and uncertainty. Springer, Dordrecht

- Hobday AJ (2010) Ensemble analysis of the future distribution of large pelagic fishes off Australia. *Progress in Oceanography* 86:291–301
- Hobday AJ, Pecl GT (2014) Identification of global marine hotspots: sentinels for change and vanguards for adaptation action. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 24:415–425
- Hobday AJ, Arrizabalaga H, Evans K, Scales KL, Senina I, Weng KC (2017) International collaboration and comparative research on ocean top predators under CLIOTOP. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 140:1–8
- Hollowed AB, Barange M, Beamish RJ, Brander K, Cochrane K, Drinkwater K, Foreman MGG, Hare JA, Holt J, Ito S, Kim S, King JR, Loeng H, MacKenzie BR, Mueter FJ, Okey TA, Peck MA, Radchenko VI, Rice JC, Schirripa MJ, Yatsu A, Yamanaka Y (2013) Projected impacts of climate change on marine fish and fisheries. *ICES Journal of Marine Science* 70:1023–1037
- Hoolihan JP, Wells RJD, Luo J, Falterman B, Prince ED, Rooker JR (2014) Vertical and Horizontal Movements of Yellowfin Tuna in the Gulf of Mexico. *Marine and Coastal Fisheries*, 6:211-222
- Howell EA, Kobayashi DR (2006) El Niño effects in the Palmyra Atoll region: oceanographic changes and bigeye tuna (*Thunnus obesus*) catch rate variability. *Fisheries Oceanography* 15:477–489
- Huang H-W (2011) Bycatch of high sea longline fisheries and measures taken by Taiwan: Actions and challenges. *Marine Policy* 35:712–720
- Huang H-W (2017) Standardized catch rate index for yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) from the Taiwanese longline fishery in the Atlantic Ocean, 1970-2014. *Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, 73: 404-422
- Huang B, Thorne PW, Banzon VF, Boyer T, Chepurin G, Lawrimore JH, Menne MJ, Smith TM, Vose RS, Zhang H-M (2017) Extended Reconstructed Sea Surface Temperature, Version 5 (ERSSTv5): Upgrades, Validations, and Intercomparisons. *Journal of Climate* 30:8179–8205
- ICCAT (2016) Manual de ICCAT. Comisión internacional para la conservación del atún Atlántico. En: Publicaciones ICCAT [on line]. Actualizado 2016. ISBN (Edición electrónica): 978-92-990055-0-7
- IEO (2006) Capítulo 2.1.1: Rabil. ICCAT. 2006-2016. Manual de ICCAT. Comisión internacional para la conservación del atún Atlántico. En: Publicaciones ICCAT [on line]. Actualizado 2016. [Citado 27/01/2009]. ISBN (Edición electrónica): 978-92-990055-0-7
- IPCC (2014) Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on

Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

Izzo P, Milessi AC, Ortega L, Segura AM (2010) First record of *Aluterus scriptus* (Monacanthidae) in Mar del Plata, Argentina. Marine Biodiversity Records 3, E40. doi:10.1017/S1755267210000369

Jiménez S, Domingo A, Brazeiro A (2009) Seabird bycatch in the Southwest Atlantic: interaction with the Uruguayan pelagic longline fishery. Polar Biology 32:187–196

Jiménez S, Domingo A, Brazeiro A, Defeo O, Wood AG, Froy H, Xavier JC, Phillips RA (2016) Sex-related variation in the vulnerability of wandering albatrosses to pelagic longline fleets: Wandering albatrosses and pelagic longline fleets. Animal Conservation 19:281–295

Jiménez S, Xavier JC, Domingo A, Brazeiro A, Defeo O, Viera M, Lorenzo MI, Phillips RA (2017) Inter-specific niche partitioning and overlap in albatrosses and petrels: dietary divergence and the role of fishing discards. Marine Biology 164

Johnson JB, Omland KS (2004) Model selection in ecology and evolution. Trends in Ecology & Evolution 19:101–108

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, Collins W, Deaven D, Gandin L, Iredell M, Saha S, White G, Woollen J, Zhu Y, Leetmaa A, Reynolds R, Chelliah M, Ebisuzaki W, Higgins W, Janowiak J, Mo KC, Ropelewski C, Wang J, Jenne R, Joseph D (1996) The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. Bulletin of the American Meteorological Society 77:437–471

Kirby DS, Fiksen O, Hart PJB (2000) A dynamic optimisation model for the behaviour of tunas at ocean fronts. Fisheries Oceanography 9:328–342

Kumar P, Pillai GN, Manjusha U (2014) El Nino Southern Oscillation (ENSO) impact on tuna fisheries in Indian Ocean. SpringerPlus 3:591

Kwiatkowski L, Bopp L, Aumont O, Ciais P, Cox PM, Laufkötter C, Li Y, Séférian R (2017) Emergent constraints on projections of declining primary production in the tropical oceans. Nature Climate Change 7:355–358

Lan K-W, Lee M-A, Chou C-P, Vayghan AH (2018) Association between the interannual variation in the oceanic environment and catch rates of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the Atlantic Ocean. Fisheries Oceanography 27:395–407

Lan K-W, Shimada T, Lee M-A, Su N-J, Chang Y (2017) Using Remote-Sensing Environmental and Fishery Data to Map Potential Yellowfin Tuna Habitats in the Tropical Pacific Ocean. Remote Sensing 9:444

Last PR, White WT, Gledhill DC, Hobday AJ, Brown R, Edgar GJ, Pecl G (2011) Long-term shifts in abundance and distribution of a temperate fish fauna: a response to

climate change and fishing practices: Long-term shifts in a temperate fish fauna. *Global Ecology and Biogeography* 20:58–72

Lehodey P, Bertignac M, Hampton J, Lewis A, Picaut J (1997) El Niño Southern Oscillation and tuna in the western Pacific. *Nature* 389:715–718

Lehodey P, Maury O (2010) Climate Impacts on Oceanic TOP Predators (CLIOTOP): Introduction to the Special Issue of the CLIOTOP International Symposium, La Paz, Mexico, 3–7 December 2007. *Progress in Oceanography* 86:1–7

Leoni V, González S, Ortega L, Scarabino F, Failla Siquier G, Dutra A, Rubio L, Abreu M, Serra W, Alonzo Campi AG, Stampar SN, Morandini AC (2016) *Tamoya haplonema* (Cnidaria: Cubozoa) from Uruguayan and adjacent waters: oceanographic context of new and historical findings. *Marine Biodiversity Records* 9:92

Lezama-Ochoa A, Boyra G, Goñi N, Arrizabalaga H, Bertrand A (2010) Investigating relationships between albacore tuna (*Thunnus alalunga*) CPUE and prey distribution in the Bay of Biscay. *Progress in Oceanography* 86:105–114

Lima FP, Wethey DS (2012) Three decades of high-resolution coastal sea surface temperatures reveal more than warming. *Nature Communications* 3:704

Logan M (2010) *Biostatistical Design and Analysis Using R: A Practical Guide*. Wiley-Blackwell, Oxford, UK

Machado I, Barreiro M, Calliari D (2013) Variability of chlorophyll-a in the Southwestern Atlantic from satellite images: Seasonal cycle and ENSO influences. *Continental Shelf Research* 53:102–109

MacNeil MA, Graham NAJ, Cinner JE, Dulvy NK, Loring PA, Jennings S, Polunin NVC, Fisk AT, McClanahan TR (2010) Transitional states in marine fisheries: adapting to predicted global change. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 365:3753–3763

Manly BFJ, Mackenzie D (2000) A cumulative sum type of method for environmental monitoring. *Environmetrics* 11:151–166

Marrari M, Signorini SR, McClain CR, Pájaro M, Martos P, Viñas MD, Hansen J, Dimauro R, Cepeda G, Buratti C (2013) Reproductive success of the Argentine anchovy, *Engraulis anchoita*, in relation to environmental variability at a mid-shelf front (Southwestern Atlantic Ocean). *Fisheries Oceanography* 22:247–261

Maunder MN, Punt AE (2004) Standardizing catch and effort data: a review of recent approaches. *Fisheries Research* 70:141–159

Maury O, Gascuel D, Marsac F, Fonteneau A, Rosa A-LD (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 Sciences 58:458–469

Maury O (2005) How to model the size-dependent vertical behaviour of bigeye (*Thunnus obesus*) tuna in its environment. Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT, 57: 115-126

Milessi AC, Colonello JH, Cortes F, Lasta CA, Waessle JA, Allega L (2012) Extensión del límite austral de distribución de tres especies de peces óseos tropicales en la costa de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. Latin American Journal of Aquatic Research 40:1061–1065

Miller K, Charles A, Barange M, Brander K, Gallucci VF, Gasalla MA, Khan A, Munro G, Murtugudde R, Ommer RE, Perry RI (2010) Climate change, uncertainty, and resilient fisheries: Institutional responses through integrative science. Progress in Oceanography 87:338–346

Miller P, Domingo A (2016) Preliminary analysis of short-term, high resolution habitat use of a yellowfin Tuna (*Thunnus albacares*) in the Southwestern Atlantic Ocean, and insights into a predation event. SCRS/2016/052. En: Informe de la Reunión ICCAT de 2016 de Preparación de datos de Rabil. San Sebastián, España.

Montecino V, Lange CB (2009) The Humboldt Current System: Ecosystem components and processes, fisheries, and sediment studies. Progress in Oceanography 83:65–79

Mora O, Domingo A (2006) La flota atunera uruguaya: Evolución y tendencias (1981-2004). Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT, 59(2):608-614.

Morley JW, Batt RD, Pinsky ML (2017) Marine assemblages respond rapidly to winter climate variability. Global Change Biology 23:2590–2601

Muggeo VMR (2003) Estimating regression models with unknown break-points. Statistics in Medicine 22:3055–3071

Muggeo VMR (2008) segmented: an R Package to Fit Regression Models with Broken-Line Relationships. R News 8:20–25

Mugo R, Saitoh S-I, Nihira A, Kuroyama T (2010) Habitat characteristics of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) in the western North Pacific: a remote sensing perspective: Skipjack tuna habitat from RS & GIS in western NP. Fisheries Oceanography 19:382–396

Nagy GJ, Bidegain M, Caffera RM, Norbis W, Ponce A, Pshennikov V, Severov DN (2008) Fishing strategies for managing climate variability and change in the estuarine front of the Rio de la Plata. In: Leary N, Adejuwon J, Barros V, Burton I, Kulkarni J, Lasco R. eds. Climate change and adaptation, pp. 353–370. Sterling, VA, USA, Earthscan.

- Ninawe AS, Indulkar ST, Amin A (2018) Impact of Climate Change on Fisheries. In: Biotechnology for Sustainable Agriculture. Elsevier, p 257–280
- Ortega L, Castilla J, Espino M, Yamashiro C, Defeo O (2012) Effects of fishing, market price, and climate on two South American clam species. *Marine Ecology Progress Series* 469:71–85
- Ortega L, Celentano E, Delgado E, Defeo O (2016) Climate change influences on abundance, individual size and body abnormalities in a sandy beach clam. *Marine Ecology Progress Series* 545:203–213
- Ortega L, Celentano E, Finkl C, Defeo O (2013) Effects of Climate Variability on the Morphodynamics of Uruguayan Sandy Beaches. *Journal of Coastal Research* 289:747–755
- Ortega L, Martínez A (2007) Multiannual and Seasonal Variability of Water Masses and Fronts Over the Uruguayan Shelf. *Journal of Coastal Research* 233:618–629
- Pante E, Simon-Bouhet B (2013) marmap: A Package for Importing, Plotting and Analyzing Bathymetric and Topographic Data in R (GJ-P Schumann, Ed.). *PLoS ONE* 8:e73051
- Payne MR (2013) Climate change at the dinner table: Fisheries. *Nature* 497:320–321
- Pecoraro C, Zudaire I, Bodin N, Murua H, Taconet P, Díaz-Jaimes P, Cariani A, Tinti F, Chassot E (2017) Putting all the pieces together: integrating current knowledge of the biology, ecology, fisheries status, stock structure and management of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*). *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 27:811–841
- Perry AL (2005) Climate Change and Distribution Shifts in Marine Fishes. *Science* 308:1912–1915
- Piola AR, Matano RP (2017) Ocean Currents: Atlantic Western Boundary—Brazil Current/Falkland (Malvinas) Current. In: Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Elsevier
- Pisciottano, G, Díaz A, Cazes G, Mechoso CR (1994) El Niño-Southern Oscillation Impact on Rainfall in Uruguay. *Journal of Climate*, 7:1286–1302
- Pons M, Domingo A (2009) Standardized CPUE of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) caught by the Uruguayan pelagic longline fleet (1981-2007). *Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT* 64: 988-998
- Pons M, Travassos P, Domingo A, Hazin H, Hazin F (2009) Standardized CPUE of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) caught by the Uruguayan and Brazilian pelagic longline fleets (1980-2006). *Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, 63: 977-987

- Popova E, Yool A, Byfield V, Cochrane K, Coward AC, Salim SS, Gasalla MA, Henson SA, Hobday AJ, Pecl GT, Sauer WH, Roberts MJ (2016) From global to regional and back again: common climate stressors of marine ecosystems relevant for adaptation across five ocean warming hotspots. *Global Change Biology* 22:2038–2053
- R Core Team (2018) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Ramos AG, Santiago J, Sangra P, Canton M (1996) An application of satellite-derived sea surface temperature data to the skipjack (*Katsuwonus pelamis* Linnaeus, 1758) and albacore tuna (*Thunnus alalunga* Bonaterre, 1788) fisheries in the north-east Atlantic. *International Journal of Remote Sensing* 17:749–759
- Reygondeau G, Maury O, Beaugrand G, Fromentin JM, Fonteneau A, Cury P (2012) Biogeography of tuna and billfish communities: Biogeography of tuna and billfish communities. *Journal of Biogeography* 39:114–129
- Reynolds RW, Rayner NA, Smith TM, Stokes DC, Wang W (2002) An Improved In Situ and Satellite SST Analysis for Climate. *Journal of Climate* 15:1609–1625
- Reynolds RW, Smith TM, Liu C, Chelton DB, Casey KS, Schlax MG (2007) Daily High-Resolution-Blended Analyses for Sea Surface Temperature. *Journal of Climate* 20:5473–5496
- Robinson LM, Gledhill DC, Moltschaniwskyj NA, Hobday AJ, Frusher S, N.Barrett, Stuart-Smith J, Pecl GT (2015) Rapid assessment of an ocean warming hotspot reveals “high” confidence in potential species’ range extensions. *Global Environmental Change* 31:28–37
- Robinson LM, Hobday A., Possingham HP, Richardson AJ (2015) Trailing edges projected to move faster than leading edges for large pelagic fish habitats under climate change. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 113:225–234
- Román Reyes JC (2005) Análisis del contenido estomacal y la razón de isótopos estables de carbono (13C) y nitrógeno (15N) del atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*) y delfín manchado (*Stenella attenuata*) y delfín tornillo (*Stenella longirostris*) del Océano Pacífico oriental. Tesis Doctorado en Ciencias Marinas. México.
- Rouyer T, Fromentin J-M, Menard F, Cazelles B, Briand K, Pianet R, Planque B, Stenseth NC (2008) Complex interplays among population dynamics, environmental forcing, and exploitation in fisheries. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105:5420–5425
- Saraceno M, Provost C, Piola AR, Bava J, Gagliardini A (2004) Brazil Malvinas Frontal System as seen from 9 years of advanced very high resolution radiometer data. *Journal of Geophysical Research* Vol 109:1–14

- Satoh K & Matsumoto T (2017) Japanese longline CPUE for yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the Atlantic Ocean standardized using GLM up to 2014. Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT, 73: 270-289
- Schaefer KM, Fuller DW, Block BA (2011) Movements, behavior, and habitat utilization of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the Pacific Ocean off Baja California, Mexico, determined from archival tag data analyses, including unscented Kalman filtering. Fisheries Research 112:22–37
- Segura AM, Carranza A, Rubio LE, Ortega L, García M (2009) *Stellifer rastrifer* (Pisces: Sciaenidae): first Uruguayan records and a 1200 km range extension. Marine Biodiversity Records Vol 2, E67. doi:10.1017/S1755267209000852
- Setiawati MD, Sambah AB, Miura F, Tanaka T, As-syakur AR (2015) Characterization of bigeye tuna habitat in the Southern Waters off Java–Bali using remote sensing data. Advances in Space Research 55:732–746
- Sharp GD (2001) Tuna oceanography—an applied science. In: Fish Physiology. Academic Press, p 345–389
- Stramma L, England M (1999) On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. Journal of Geophysical Research: Oceans 104:20863–20883
- Sumaila UR, Cheung WWL, Lam VWY, Pauly D, Herrick S (2011) Climate change impacts on the biophysics and economics of world fisheries. Nature Climate Change 1:449–456
- Sunday JM, Bates AE, Dulvy NK (2012) Thermal tolerance and the global redistribution of animals. Nature Climate Change 2:686–690
- Tomczak M, Stuart Godfrey JS (2003) Regional Oceanography: an Introduction 2nd edn, xi+390p
- Torrence C, Compo GP (1998) A Practical Guide to Wavelet Analysis. Bulletin of the American Meteorological Society 79:61–78
- Torrence C, Webster PJ (1999) Interdecadal Changes in the ENSO–Monsoon System. Journal of Climate 12:2679–2690
- Tuck GN, Polacheck T, Bulman CM (2003) Spatio-temporal trends of longline fishing effort in the Southern Ocean and implications for seabird bycatch. Biological Conservation 114:1–27
- Walter J. 2017. Standardized catch rate in number and weight of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) from the United States pelagic longline fishery 1987-2015. Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT, 73:323–368

- Waluda CM, Rodhouse PG, Trathan PN, Pierce GJ (2001) Remotely sensed mesoscale oceanography and the distribution of *Illex argentinus* in the South Atlantic. *Fisheries Oceanography* 10:207–216
- Weatherall P, Marks KM, Jakobsson M, Schmitt T, Tani S, Arndt JE, Rovere M, Chayes D, Ferrini V, Wigley R (2015) A new digital bathymetric model of the world's oceans: New digital bathymetric model. *Earth and Space Science* 2:331–345
- Wickham H (2016) *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York.
- Wood SN (2017) *Generalized Additive Models: An Introduction with R*, 2nd edn. Chapman and Hall/CRC
- Yáñez E, Barbieri MA, Santillán L (1992) Long-term environmental variability and pelagic fisheries in Talcahuano, Chile. *South African Journal of Marine Science* 12:175–188
- Yang H, Lohmann G, Wei W, Dima M, Ionita M, Liu J (2016) Intensification and poleward shift of subtropical western boundary currents in a warming climate: Intensification and poleward shift of WBCs. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 121:4928–4945
- Yen K-W, Lu H-J, Chang Y, Lee M-A (2012) Using remote-sensing data to detect habitat suitability for yellowfin tuna in the Western and Central Pacific Ocean. *International Journal of Remote Sensing* 33:7507–7522
- Yoder JA, Ackleson SG, Barber RT, Flament P, Balch WM (1994) A line in the sea. *Nature* 371:689
- Zagaglia CR, Lorenzetti JA, Stech JL (2004) Remote sensing data and longline catches of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the equatorial Atlantic. *Remote Sensing of Environment* 93:267–281
- Zainuddin M, Saitoh K, Saitoh S-I (2008) Albacore (*Thunnus alalunga*) fishing ground in relation to oceanographic conditions in the western North Pacific Ocean using remotely sensed satellite data. *Fisheries Oceanography* 17:61–73
- Zavala-Camin LA (1978) Algunos aspectos sobre la estructura populacional de rabil (*Thunnus albacares*) en el sudeste y sur del Brasil (1969-1977), com presentacion de la hipotesis de la migracion semestral. *Boletim do Instituto de Pesca, S. Paulo*, v.5, n.1, p.1-25.

ANEXO I. Matriz de dispersión de datos para todas las variables seleccionadas para la utilización en los modelos GAM y la CPUE. Se presenta a un lado de la matriz el valor de correlación para cada una de las variables pareadas.

