

COMISIÓN INTERAMERICANA DEL ATÚN TROPICAL

COMITÉ CIENTÍFICO ASESOR

15ª REUNIÓN

La Jolla, California (EE. UU.)

10 - 14 de junio de 2024

DOCUMENTO SAC-15 INF-L

TENDENCIAS DE LAS CAPTURAS DE ALETA AMARILLA Y BARRILETE EN RELACIÓN
CON LOS EVENTOS DE ENOS

Dan Crear, Dan Ovando, Carolina Minte-Vera y Jon Lopez

ÍNDICE

Resumen ejecutivo.....	1
1. Antecedentes.....	2
2. Métodos.....	3
3. Resultados.....	5
4. Discusión.....	7
5. Referencias.....	8
6. Tablas.....	9
7. Figuras.....	12
8. Anexo.....	18

RESUMEN EJECUTIVO

Las recientes capturas relativamente altas de atún aleta amarilla en 2022 y de atún barrilete en 2023 y 2024 en la pesquería cerquera sobre objetos flotantes (OBJ) impulsaron una solicitud del Comité Científico Asesor (CCA) ([SAC-14-16](#)) para que el personal de la CIAT investigara las causas potenciales de estas fluctuaciones, incluyendo los factores ambientales. En el presente documento, se evaluaron los cambios en las capturas de atún aleta amarilla y atún barrilete en la pesquería cerquera OBJ en relación con los eventos de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) para comprender mejor el efecto de los procesos ambientales a largo plazo sobre las capturas de atún. El análisis sugiere que es probable que los eventos de ENOS tengan cierto efecto retardado sobre las capturas (es decir, CPUE) de ambas especies. Específicamente, la CPUE del atún aleta amarilla 4-6 meses y 16 meses después de los eventos de La Niña es mayor en comparación con los eventos neutros y de El Niño, lo que sugiere el impacto positivo que los eventos de La Niña pueden tener en el reclutamiento de aleta amarilla en la pesquería. Además del aumento del esfuerzo, esta relación puede haberse atribuido al aumento de las capturas de aleta amarilla en la pesquería OBJ en 2022. En el caso del barrilete, la CPUE poco más de dos años después de eventos de El Niño es mayor en comparación con los eventos neutros y de La Niña. Dos años antes del aumento de la CPUE y las capturas de barrilete en 2023, un evento de La Niña se estaba debilitando hacia una fase neutra, lo que puede ser un factor que contribuyó al aumento de las capturas, a pesar de una ligera disminución del esfuerzo en 2023. Este trabajo se beneficiaría de análisis adicionales para investigar más a fondo estos impactos y podría utilizarse potencialmente para ayudar a predecir las fluctuaciones de las capturas en el futuro a partir de los valores de ENOS.

1. ANTECEDENTES

En los últimos dos años, las capturas de atunes aleta amarilla y barrilete en la pesquería cerquera sobre objetos flotantes (OBJ) han aumentado significativamente con respecto a las tendencias históricas recientes. Específicamente, a partir de principios de 2022, las capturas de atún aleta amarilla pequeño y mediano procedentes de lances OBJ de cerco aumentaron a más de 6,000 toneladas métricas (t) por mes y alcanzaron un máximo de casi 10,000 t por mes en octubre de 2022. Las capturas disminuyeron en los meses siguientes, pero se mantuvieron altas de forma consistente a lo largo de 2023. Sin embargo, una vez corregidas las capturas por el número de lances OBJ de cerco, la tendencia disminuyó sustancialmente, pero siguió siendo superior a las tendencias de CPUE observadas desde 2017. Por otro lado, las capturas de atún barrilete aumentaron recientemente a lo largo de 2023 y han seguido aumentando en 2024. Al igual que en el caso del aleta amarilla, una vez corregidas por el número de lances OBJ esta tendencia se redujo, pero la CPUE ha aumentado consistentemente desde principios de 2023. Con base en estos cambios en las tendencias, el Comité Científico Asesor (CCA) solicitó al personal de la CIAT investigar las causas potenciales de estas fluctuaciones, incluyendo los factores ambientales (ver recomendación 3.3 en el documento [SAC-14-16](#)).

El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) es un fenómeno climático a largo plazo que influye en las temperaturas del agua en el Océano Pacífico tropical central y oriental. El patrón irregular alterna entre las fases cálidas, o El Niño, y las frías, o La Niña, cada dos a siete años ([SAC-04-08](#), [SAC-06 INF-C](#)). Cuando no se produce una fase cálida o fría, se presenta una fase neutra. En condiciones neutras o promedio, los vientos alisios empujan las aguas superficiales hacia el oeste, lo que provoca un afloramiento de aguas más frías y un asomeramiento de la termoclina en el Océano Pacífico oriental (OPO). Durante un evento de La Niña, que suele durar de uno a tres años, las condiciones normales se intensifican, lo que significa que los vientos alisios hacia el oeste se fortalecen causando un afloramiento más fuerte, aguas más frías y mayor productividad. Durante un evento de El Niño, que puede durar de nueve a 12 meses, los vientos alisios hacia el oeste se debilitan o cambian de dirección, lo que provoca aguas más cálidas, una profundización de la termoclina y, a menudo, una disminución de la productividad en el OPO. Es importante mencionar que el efecto de un evento de El Niño o La Niña varía en intensidad, duración y extensión espacial (normalmente se extiende por el Pacífico oriental y central), por lo que cada evento es único. Existen múltiples métricas para cuantificar la magnitud de ENOS. El Índice de El Niño Oceánico (ONI) es un índice común elaborado por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) de Estados Unidos y se calcula como la media móvil de tres meses de las anomalías de la temperatura superficial del mar en la región Niño 3.4 (definida como el área comprendida entre 5°N y 5°S y 120° y 170°O). Los valores del índice iguales o superiores a 0.5 indican fases de El Niño, mientras que los valores iguales o inferiores a -0.5 indican fases de La Niña.

Dado que el ENOS tiene un impacto a gran escala en la variabilidad de la temperatura y la productividad del agua, se espera que influya en el hábitat, la distribución y la biomasa de los atunes (Domokos 2023). En general, se cree que durante las fases neutras y de La Niña, cuando la termoclina es somera, los atunes se retraen hacia la superficie y aumentan las capturas en la pesquería cerquera, mientras que durante las fases de El Niño, la termoclina se hace más profunda, lo que amplía el hábitat preferido de los atunes y reduce potencialmente las capturas ([SAC-14-11](#), [SAC-06 INF-C](#)). Además, se sabe que el esfuerzo de pesca responde a cambios en las condiciones oceanográficas ([SAC-06 INF-C](#)). Los Informes Anuales de la CIAT de 1983 y 1989 mostraron que las tasas de capturas de atunes en el OPO fueron bajas durante El Niño de 1982-1983. Esto causó un cambio en el esfuerzo de pesca del Pacífico oriental al occidental. Más tarde en la década, ocurrió un evento más fuerte de La Niña y las capturas de atunes fueron altas. También se informó que de 1983 a 1989 el reclutamiento de aleta amarilla fue el más alto registrado durante un periodo de siete años y que típicamente el efecto de eventos de El Niño no se observa en la pesquería

hasta unos dos años después del evento ([Informe Anual de la CIAT de 1989](#)). En la entrada del Golfo de California, la flota atunera de cerco mexicana experimentó picos en las capturas de atún aleta amarilla entre dos y cuatro meses después de los eventos fuertes de El Niño en 1991 y 1997. Estas tendencias fueron corroboradas en un análisis de correlación cruzada (Torres-Orozco *et al.* 2006), que sugirió que el reclutamiento fue la principal causa de las fluctuaciones de las capturas de atún aleta amarilla, produciéndose el pico de capturas entre 12 y 14 meses después de esos eventos de El Niño. Yen *et al.* (2017) descubrieron que, utilizando datos de buques cerqueros taiwaneses y de la Comunidad del Pacífico (SPC), los eventos de El Niño tenían un efecto variable pero negativo en la abundancia relativa del atún barrilete y en los índices de idoneidad de hábitat, y que normalmente los factores espaciales (El Niño del Pacífico central vs. del Pacífico oriental) influían más que los factores temporales en la abundancia relativa. Comprender las preferencias ambientales de los atunes y las limitaciones de las características oceanográficas a largo plazo, como ENOS, puede mejorar las medidas de conservación y ordenación de las especies objetivo ([SAC-06 INF-C](#)).

A partir de esta información, el objetivo de este estudio es determinar el efecto potencial de ENOS sobre las fluctuaciones históricas y recientes de la CPUE de los atunes aleta amarilla y barrilete en la pesquería cerquera sobre objetos flotantes.

2. MÉTODOS

Se utilizaron datos recolectados por observadores en buques cerqueros de clase 6 (>363 t) de 1995-2023 para investigar la posible influencia que los eventos de ENOS pueden haber tenido en las capturas de atunes aleta amarilla y barrilete en la pesquería OBJ. Para capturar los impactos más recientes, la serie de tiempo de 1995-2023 se complementó con los informes diarios de los observadores desde el mar (es decir, el informe diario de actividades) para enero-marzo de 2024. En el caso del atún aleta amarilla, solo se utilizaron los individuos pequeños (<2.5 kg) porque es la clase de talla de atún aleta amarilla más común en la pesquería cerquera OBJ. La captura por lance (CPUE) en la pesquería cerquera OBJ se calculó mensualmente para el aleta amarilla pequeño y para todas las tallas combinadas de atún barrilete.

Para representar los eventos de ENOS, se utilizaron los valores del ONI en el mismo periodo de tiempo. El ONI se extrajo mensualmente del Centro de Predicción Climática de la NOAA (https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php). Como se mencionó anteriormente, los valores del ONI iguales o superiores a 0.5 indican fases de El Niño, mientras que los valores iguales o inferiores a -0.5 indican fases de La Niña.

Los datos mensuales de CPUE de cada especie se descompusieron en tres componentes: tendencia, estacional y aleatorio (Kendall y Stuart 1983). Para capturar la tendencia potencialmente atribuida a eventos de ENOS, los componentes estacionales y aleatorios se eliminaron de los datos observados. Por lo tanto, para todos los análisis que se describen a continuación solo se utilizaron los datos de la serie de tiempo de tendencias. Como medida exploratoria inicial, se realizaron correlaciones cruzadas (Torres-Orozco *et al.* 2006) entre la serie de tiempo de tendencia de la CPUE y la serie de tiempo del ONI para determinar si varios retardos del ONI se correlacionaban mejor con la serie de tiempo de la CPUE. Por ejemplo, si la CPUE máxima se produjo 12 meses después de valores altos del ONI (es decir, evento de El Niño), esto puede implicar que ciertas condiciones durante ese evento de El Niño pueden haber mejorado los procesos biológicos o ecológicos de la especie, como el éxito del reclutamiento. Se examinaron retardos del ONI de 0 a 40 meses. Los retardos se limitaron a 40 meses porque probablemente sería difícil explicar biológicamente las relaciones más allá de ese periodo, aumentaría el ruido potencial y porque los individuos de la clase de talla pequeña del atún aleta amarilla tienen menos de dos años.

Una vez determinados los retardos más correlacionados, se desarrollaron una serie de modelos aditivos generalizados mixtos (GAMM, por sus siglas en inglés) en los que se ejecutó un modelo por separado para

cada retardo. Se seleccionaron los GAMM porque son lo suficientemente flexibles como para tratar relaciones no lineales utilizando funciones suavizadoras (Hastie y Tibshirani 1990, Wood 2017). Sobre la base del análisis de correlación cruzada, se ejecutó una serie de modelos con retardo para cada especie, desde ningún retardo hasta un retardo de aproximadamente dos años, asegurando al mismo tiempo la ampliación a retardos mayores si las correlaciones alcanzaban su punto máximo justo después de dos años. Se utilizaron retardos mayores para el barrilete de acuerdo con el análisis de correlación cruzada porque no había limitación de clase de edad en comparación con el aleta amarilla. Esto se hizo para examinar más a fondo la correlación entre la CPUE y el ONI porque, aunque el análisis de correlación cruzada puede mostrar una relación, ésta puede atribuirse a otras variables como el esfuerzo, los cambios en la estrategia de pesca u otros procesos ambientales a escala más fina y grande. Además, estábamos especialmente interesados en las tendencias recientes de ambas especies. La variable de respuesta para los GAMM fueron los datos de tendencia de la CPUE (Hastie y Tibshirani 1990, Wood 2017). Las covariables fueron la serie de tiempo del ONI en tiempo igual a 0 para representar la capturabilidad, la serie de tiempo del ONI retardado correspondiente al modelo con retardo adecuado (para el modelo sin retardo, no había ONI retardado que incluir), y los lances totales anuales para dar cuenta de los cambios en el esfuerzo a lo largo de la serie de tiempo. Se investigó el ONI retardado para determinar qué eventos de ENOS pueden influir en la tendencia de la CPUE. Se colocó una función suavizadora de *thin plate splines* de regresión alrededor de todas las covariables. Para tener en cuenta la no independencia de los datos (Gillies *et al.* 2006), se incluyó el año en cada modelo como efecto aleatorio. La ecuación de base para los modelos con retardo es la siguiente:

$$CPUE_{trend_{t=0}} \sim s(ONI_{t=0}) + s(ONI_{t-L}) + s(annual\ set\ \#) + random(Year)$$

donde L es el retardo de interés. Los diagnósticos de los modelos se realizaron mediante gráficas de residuales. Todos los modelos con retardo se compararon entre sí utilizando el criterio de información de Akaike (AIC) y los mejores modelos se examinaron más a fondo. Específicamente, se realizaron predicciones de CPUE sobre la serie de tiempo de ONI retardado utilizando medias marginales (Searle *et al.* 1980). Estas predicciones proporcionaron una relación entre la CPUE y el ONI retardado. Las estimaciones de la incertidumbre en torno a las predicciones se calcularon a partir de 500 muestras obtenidas mediante remuestreo tipo *bootstrap* (Efron y Tibshirani 1993).

Para examinar las fluctuaciones recientes en las capturas de ambas especies, se predijo la tendencia de la CPUE para los periodos recientes con aumentos en la CPUE: de enero a octubre de 2022 para el aleta amarilla y de julio a septiembre de 2023. Las predicciones se realizaron concretamente utilizando los mejores modelos con retardo y se manipularon los valores de ONI retardado. Todas las demás covariables (ONI en t=0, lances totales anuales) se promediaron a lo largo del periodo de tiempo de los cambios en la CPUE. Se calcularon predicciones de CPUE cuando los valores de ONI retardado eran su valor real, durante condiciones neutras (-0.2 a 0.2), condiciones regulares de El Niño (1.0 a 1.5), condiciones fuertes de El Niño (1.7 a 2.2) y condiciones fuertes de La Niña (-1.7 a -1.1). Las condiciones regulares de La Niña no se predijeron porque las condiciones retardadas reales para ambas especies se produjeron durante eventos promedio de La Niña. Se supondría que si las condiciones retardadas reales se produjeran durante La Niña y la CPUE estuviera positivamente correlacionada con los eventos retardados de La Niña, entonces la CPUE predicha sería mayor cuando las condiciones retardadas fueran de La Niña, en comparación con si fueran condiciones neutras o de El Niño.

Los análisis anteriores se complementaron con un análisis centrado en evaluar, de manera sencilla, qué proporción de los cambios anuales en las capturas pueden atribuirse a cambios en la CPUE frente a cambios en el esfuerzo. El supuesto es que el esfuerzo es exógeno al sistema y que la CPUE es donde puede intervenir el ambiente. En este caso, el ambiente engloba efectos que se confunden y que son difíciles de separar, como el reclutamiento (abundancia), la disponibilidad o la capturabilidad, y los

procesos y mecanismos que los impulsan. Si queremos comprender mejor el papel potencial del ambiente en la explicación de las tendencias recientes en las capturas de atunes aleta amarilla y barrilete, puede ser útil determinar qué proporción del cambio en las capturas de atunes procede del esfuerzo frente de la CPUE y, por extensión, qué proporción del cambio se explica posiblemente por el ambiente (es decir, la CPUE). Específicamente, los cambios interanuales en las capturas se descompusieron en partes constituyentes de CPUE y esfuerzo. Tomando la ecuación de captura de:

$$catch_t = cpue_t E_t$$

El cambio proporcional en las capturas se calculó como:

$$\frac{catch_t}{catch_{t-1}} = \frac{cpue_t E_t}{cpue_{t-1} E_{t-1}}$$

La transformación logarítmica da como resultado:

$$\log(catch_t) - \log(catch_{t-1}) = \log(cpue_t) + \log(E_t) - (\log(cpue_{t-1}) + \log(E_{t-1}))$$

La parte derecha de la ecuación puede reordenarse en:

$$\log(cpue_t) - \log(cpue_{t-1}) + \log(E_t) - \log(E_{t-1})$$

Y luego agruparse en:

$$\Delta_{cpue_t} = \log(cpue_t) - \log(cpue_{t-1})$$

y

$$\Delta_{E_t} = \log(E_t) - \log(E_{t-1})$$

Δ_{cpue} y Δ_E se graficaron juntos para el aleta amarilla y el barrilete para visualizar la contribución relativa del esfuerzo y la CPUE a los cambios en las capturas, particularmente durante los últimos años, cuando las capturas aumentaron.

3. RESULTADOS

3.1. Atún aleta amarilla

Una vez eliminados los componentes estacionales y aleatorios de los datos mensuales de CPUE OBJ de aleta amarilla pequeño (Fig. 1a), se hizo evidente una tendencia mucho más suave (Fig. 2a). La tendencia más alta de CPUE del atún aleta amarilla pequeño en la pesquería cerquera OBJ se produjo desde la segunda mitad de 1999 hasta la primera mitad de 2000. Se produjeron picos más pequeños en 2015-2016 y en 2022. La CPUE disminuyó tras el gran pico registrado en 2000, una vez en 2008-2009 y otra en 2012-2013. La correlación cruzada mostró que la tendencia del atún aleta amarilla pequeño tenía las correlaciones más fuertes durante el ONI actual y cuando el ONI estaba retardado de 23 a 26 meses. Específicamente, la CPUE baja del atún aleta amarilla pequeño se produjo cuando el ONI actual era comparable a El Niño, mientras que la CPUE alta se produjo aproximadamente entre 23 y 26 meses después de El Niño (Fig. 3a). La tendencia opuesta ocurre para la CPUE cuando se considera el ONI desde la perspectiva de La Niña.

En total, se ejecutaron 27 modelos para el atún aleta amarilla, incluido el modelo sin retardo y los modelos que representan retardos de uno a 26. Debido a las limitaciones de tiempo, en este análisis no se cumplieron plenamente los diagnósticos de autocorrelación de los modelos. Mediante la selección de modelos, se analizaron más a fondo siete de los 27 modelos. Las gráficas de medias marginales de todos los modelos con retardo figuran en el Apéndice. El mejor modelo se produjo con un retardo de 16 meses del ONI, seguido de los retardos de 5, 6, 4 y 11. La CPUE pareció ser máxima 16 meses después de valores

de ONI inferiores a -1.5 (La Niña fuerte) y entre 1 y 1.5 (El Niño moderado a fuerte) (Fig. 4). Mientras que se estimó que la CPUE era la más baja 16 meses después de valores de ONI entre 2 y 2.5 (El Niño fuerte). Según los demás mejores modelos, se estimó que la CPUE era mayor 4-6 meses después de valores de ONI inferiores a -0.5 (La Niña moderada).

Se realizaron predicciones de la CPUE del atún aleta amarilla pequeño para los dos mejores modelos con retardo, 16 y 5 meses. Para el modelo con retardo de 16 meses, las predicciones durante condiciones reales (La Niña moderada) y condiciones neutras fueron similares (1.28/1.29 captura/lance), mientras que durante condiciones moderadas de El Niño, las predicciones aumentaron a 1.44 (Tabla 1). Durante eventos fuertes de El Niño, las predicciones descienden a 1.22. Durante eventos fuertes de La Niña, las predicciones aumentan hasta 1.33. Para el modelo con retardo de 5 meses, las predicciones de captura por lance fueron altas (1.27) durante las condiciones reales (La Niña débil), en comparación con las condiciones moderadas y fuertes de El Niño (1.24/1.25) y las condiciones neutras (1.23) (Tabla 2). Sin embargo, las predicciones fueron máximas (1.35) 5 meses después de eventos fuertes de La Niña.

Por último, al examinar los cambios anuales en la CPUE, el esfuerzo y la captura de aleta amarilla, los tres aumentaron en 2022 (Fig. 6a). En 2022, la captura aumentó aproximadamente un 45% y esto se atribuyó a un aumento del 19% en la CPUE (es decir, el medio ambiente, confundido con otros efectos como la disponibilidad, la capturabilidad o el reclutamiento/abundancia) y a un aumento del 26% en el esfuerzo (Fig. 6b).

3.2. Atún barrilete

De manera similar al atún aleta amarilla, una vez eliminados los componentes estacionales y aleatorios (Fig. 1b), la tendencia de la CPUE mensual del atún barrilete se suavizó (Fig. 2b). La tendencia más alta de CPUE del barrilete se produjo entre 1999 y 2000, al igual que en el caso del aleta amarilla. De 2003 a 2007, la tendencia fluctuó en niveles superiores al promedio. Después de 2007, la tendencia se mantuvo baja y alcanzó su nivel más bajo en la serie de tiempo en 2018. A partir de 2023, la tendencia de la CPUE ha aumentado hasta alcanzar sus niveles más altos desde 2007. La correlación cruzada indicó que la tendencia de la CPUE y el ONI tenían las correlaciones más fuertes cuando el ONI estaba retardado entre 2 y 5 meses y 19 y 24 meses. Por lo tanto, una CPUE baja de barrilete se produjo entre 2 y 5 meses después de El Niño, mientras que una CPUE mayor se produjo entre 19 y 24 meses después de El Niño (Fig. 3b). La relación entre la CPUE y el ONI se invierte durante valores de ONI más bajos o eventos de La Niña.

Para el atún barrilete se ejecutaron 31 modelos, incluido el modelo sin retardo y los modelos que representan retardos de uno a 30. De los 31 modelos, los mejores tenían retardos de 27, 26, 28, 25, 29 y 30 meses. Las gráficas de medias marginales de todos los modelos con retardo figuran en el Apéndice. La CPUE pareció ser máxima 27 meses después de valores de ONI más altos (~ 2) (eventos fuertes de El Niño) (Fig. 5). Mientras que una CPUE baja está correlacionada con valores de ONI bajos (~ -1) 27 meses antes (eventos moderados de La Niña). Se dieron correlaciones similares para los otros modelos con retardo.

Las predicciones de la CPUE del barrilete se realizaron para el mejor modelo con retardo, de 27 meses. Para el modelo con retardo de 27 meses, las predicciones de captura por lance para las condiciones reales (La Niña débil) y fuertes de La Niña fueron menores (19.2) y luego aumentaron para condiciones neutrales (19.9), moderadas de El Niño (20.6), y fuertes de El Niño (21.6) (Tabla 3).

Los cambios anuales en la captura de barrilete y la CPUE aumentaron en 2023, mientras que el esfuerzo disminuyó (Fig. 7a). En 2023, la captura de barrilete aumentó aproximadamente un 17% y esto se atribuyó a un aumento del 23% en la CPUE (es decir, el medio ambiente) y una disminución del 6% en el esfuerzo (Fig. 6b).

4. DISCUSIÓN

Al combinar los resultados de todos los análisis, parece que existe cierto efecto del ambiente retardado (ENOS, medido por el índice ONI) en la CPUE tanto del atún aleta amarilla como del atún barrilete. En el caso del aleta amarilla, los efectos difieren en función del valor del ONI retardado, pero según los mejores modelos con retardo, la CPUE está positivamente correlacionada con eventos de La Niña (especialmente con eventos fuertes de La Niña), mientras que los valores más bajos de CPUE están más asociados con eventos neutros y de El Niño. Estas relaciones se produjeron especialmente cuando las capturas tuvieron lugar entre 4 y 6 meses después del evento de ENOS. Al centrarse en los recientes aumentos de la CPUE del aleta amarilla pequeño en 2022, parece que los recientes eventos débiles de La Niña que se produjeron 4-6 meses antes tuvieron un efecto positivo en la CPUE. Esto indica que es posible que los eventos de La Niña mejoren el éxito del reclutamiento de aleta amarilla pequeño en la pesquería cerquera sobre objetos flotantes, ya que la clase de talla pequeña del aleta amarilla representa a los individuos de menos de dos años. Aunque no se produjo un evento de El Niño en los últimos 40 meses desde 2022, es interesante destacar la mayor influencia que pueden tener los eventos moderados de El Niño en la CPUE positiva del aleta amarilla pequeño 16 meses después. Esta asociación sugiere que es posible que los individuos de más de un año prefieran condiciones más cálidas en comparación con los individuos de menos de un año, lo que puede aumentar la CPUE en la pesquería. La contribución equitativa del esfuerzo y la CPUE en las capturas también indica que, aunque el aumento del esfuerzo contribuyó al aumento de las capturas, la CPUE, que tiene en cuenta los cambios en el ambiente, también influyó en el aumento de las capturas. Sin embargo, es necesario comprender mejor los mecanismos específicos que relacionan el ONI y el reclutamiento, la disponibilidad o la capturabilidad del atún aleta amarilla.

De manera similar al aleta amarilla, el efecto del ONI retardado sobre la CPUE del barrilete varió en función del número de meses retardados. Los mejores modelos con retardo sugieren que la CPUE del barrilete (todas las clases de talla combinadas) está positivamente correlacionada con eventos de El Niño y negativamente correlacionada con eventos de La Niña. Estas relaciones se produjeron especialmente cuando las capturas tuvieron lugar entre 25 y 30 meses después del evento de ENOS. Al examinar la causa del reciente aumento de las capturas de barrilete y de la CPUE en 2023, es posible que la CPUE predicha haya aumentado en parte debido a que las condiciones de La Niña mejoraron hacia una fase neutra durante los dos años anteriores. El impacto del medio ambiente se ve respaldado por el hecho de que, aunque el esfuerzo disminuyó en 2023, la CPUE, que puede incluir el efecto del medio ambiente, aumentó y, por tanto, dio lugar a un aumento de las capturas de atún barrilete.

Este análisis respalda trabajos previos que indican que es probable que el medio ambiente afecte las capturas de atún aleta amarilla pequeño y de atún barrilete en la pesquería cerquera sobre objetos flotantes en el OPO ([Informe Anual de la CIAT 1983 y 1989, SAC-06 INF-C](#)). Este análisis se beneficiaría aún más de un análisis más profundo de los impactos de diversos cambios de comportamiento, estrategia y tecnología de pesca a lo largo del tiempo, así como de la evaluación de la duración, gravedad e impacto acumulativo de los eventos de ENOS sobre las capturas, la disponibilidad o capturabilidad, y la biología y ecología de las especies en general. Estas variables adicionales podrían explicar mejor las tendencias históricas y recientes observadas en las capturas a lo largo del tiempo. Por último, si la capacidad de predicción de estos modelos es elevada, las condiciones de ENOS podrían utilizarse para predecir las posibles fluctuaciones de las capturas y la CPUE en el futuro, lo que podría ayudar a los gestores a prepararse y anticipar los cambios en los recursos pesqueros.

5. REFERENCIAS

- Domokos, R. 2023. Influence of El Niño-Southern Oscillation on bigeye and yellowfin tuna longline catch per unit effort in the equatorial Pacific. *Fisheries Oceanography* **32**:527-540.
- Efron, B., and R. J. Tibshirani. 1993. *An introduction to the bootstrap*. CRC press, New York, NY.
- Gillies, C. S., M. Hebblewhite, S. E. Nielsen, M. A. Krawchuk, C. L. Aldridge, J. L. Frair, D. J. Saher, C. E. Stevens, and C. L. Jerde. 2006. Application of random effects to the study of resource selection by animals. *Journal of Animal Ecology* **75**:887-898.
- Hastie, T. J., and R. J. Tibshirani. 1990. *Generalized Additive Models*. CRC Press.
- Kendall, M., and A. Stuart. 1983. *The Advanced Theory of Statistics*, Vol.3, Griffin. pp. 410–414.
- Searle, S. R., F. M. Speed, and G. A. Milliken. 1980. Population marginal means in the linear model: an alternative to least squares means. *The American Statistician* **34**:216-221.
- Torres-Orozco, E., A. Muhlia-Melo, A. Trasviña, and S. Ortega-García. 2006. Variation in yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) catches related to El Niño-Southern Oscillation events at the entrance to the Gulf of California.
- Wood, S. N. 2017. *Generalized Additive Models: An Introduction with R*, Second Edition. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, FL.
- Yen, K.-W., G. Wang, and H.-J. Lu. 2017. Evaluating habitat suitability and relative abundance of skipjack (*Katsuwonus pelamis*) in the Western and Central Pacific during various El Niño events. *Ocean & coastal management* **139**:153-160.

6. TABLAS

TABLE 1. Predictions of CPUE for yellowfin tuna using the 16 month lagged model for actual and various hypothetical ONI conditions during the January to October 2022 period when CPUE increased. ONI values are provided for the 16 month lagged for each condition that were used in the predictions. The actual conditions at the 16 month lag was a moderate La Niña. The other covariates in the model were held constant for the predictions including the mean number of sets in the purse seine object fishery and the mean ONI value during the time period.

TABLA 1. Predicciones de CPUE para el atún aleta amarilla utilizando el modelo con retardo de 16 meses para condiciones de ONI reales y varias condiciones hipotéticas durante el periodo de enero a octubre de 2022, cuando aumentó la CPUE. Se proporcionan los valores del ONI para el retardo de 16 meses para cada condición que se utilizaron en las predicciones. Las condiciones reales en el retardo de 16 meses eran condiciones moderadas de La Niña. Las demás covariables del modelo se mantuvieron constantes para las predicciones, incluido el número promedio de lances en la pesquería cerquera sobre objetos flotantes y el valor promedio del ONI durante el periodo.

Condición	Retardo	Núm. promedio de lances	ONI t_0	ONI t_{16}	Predicciones de CPUE
Real	16	15918	-0.95	-1.3 to -0.7	1.28
Neutra	16	15918	-0.95	-0.2 to 0.2	1.29
El Niño moderado	16	15918	-0.95	1.0 to 1.5	1.44
El Niño fuerte	16	15918	-0.95	1.7 to 2.2	1.22
La Niña fuerte	16	15918	-0.95	-1.7 to -1.1	1.33

TABLE 2. Predictions of CPUE for yellowfin tuna using the 5 month lagged model for actual and various hypothetical ONI conditions during the January to October 2022 period when CPUE increased. ONI values are provided for the 5 month lagged for each condition that were used in the predictions. The actual conditions at the 5 month lag was a weak La Niña. The other covariates in the model were held constant for the predictions including the mean number of sets in the purse seine object fishery and the mean ONI value during the time period.

TABLA 2. Predicciones de CPUE para el atún aleta amarilla utilizando el modelo con retardo de cinco meses para condiciones de ONI reales y varias condiciones hipotéticas durante el periodo de enero a octubre de 2022, cuando aumentó la CPUE. Se proporcionan los valores del ONI para el retardo de cinco meses para cada condición que se utilizaron en las predicciones. Las condiciones reales en el retardo de cinco meses eran condiciones débiles de La Niña. Las demás covariables del modelo se mantuvieron constantes para las predicciones, incluido el número promedio de lances en la pesquería cerquera sobre objetos flotantes y el valor promedio del ONI durante el periodo.

Condición	Retardo	Núm. promedio de lances	ONI t_0	ONI t_5	Predicciones de CPUE
Real	5	15918	-0.95	-1.0 to -0.5	1.27
Neutra	5	15918	-0.95	-0.2 to 0.2	1.23
El Niño moderado	5	15918	-0.95	1.0 to 1.5	1.25
El Niño fuerte	5	15918	-0.95	1.7 to 2.2	1.24
La Niña fuerte	5	15918	-0.95	-1.7 to -1.1	1.35

TABLE 3. Predictions of CPUE for skipjack tuna using the 27 month lagged model for actual and various hypothetical ONI conditions during the July to September 2023 period when CPUE increased. ONI values are provided for the 27 month lagged for each condition that were used in the predictions. The actual conditions at the 27 month lag was a weak La Niña. The other covariates in the model were held constant for the predictions including the mean number of sets in the purse seine object fishery and the mean ONI value during the time period.

TABLA 3. Predicciones de CPUE para el atún barrilete utilizando el modelo con retardo de 27 meses para condiciones de ONI reales y varias condiciones hipotéticas durante el periodo de julio a septiembre de 2023, cuando aumentó la CPUE. Se proporcionan los valores del ONI para el retardo de 27 meses para cada condición que se utilizaron en las predicciones. Las condiciones reales en el retardo de 27 meses eran condiciones débiles de La Niña. Las demás covariables del modelo se mantuvieron constantes para las predicciones, incluido el número promedio de lances en la pesquería cerquera sobre objetos flotantes y el valor promedio del ONI durante el periodo.

Condición	Retardo	Núm. promedio de lances	ONI t_0	ONI t_{27}	Predicciones de CPUE
Real	27	14923	1.3	-0.4 to -0.7	19.2
Neutra	27	14923	1.3	-0.2 to 0.2	19.9
El Niño moderado	27	14923	1.3	1.0 to 1.5	20.6
El Niño fuerte	27	14923	1.3	1.7 to 2.2	21.6
La Niña fuerte	27	14923	1.3	-1.7 to -1.1	19.2

7. FIGURAS

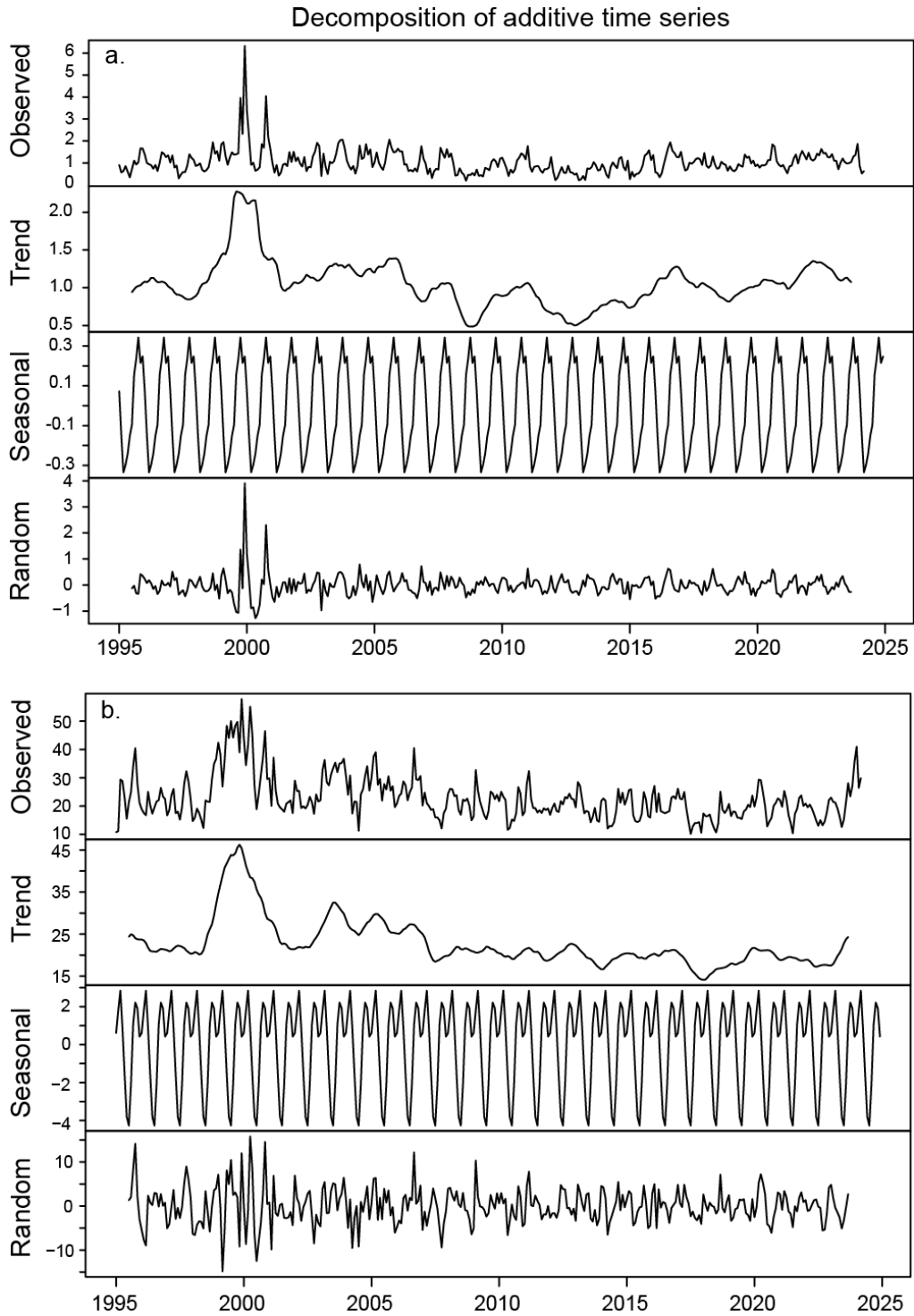


FIGURE 1. Decomposed CPUE timeseries data into trend, seasonal, and random components for small yellowfin tuna (a) and skipjack tuna (b).

FIGURA 1. Descomposición de los datos de la serie de tiempo de la CPUE en componentes de tendencia, estacionales y aleatorios para el atún aleta amarilla pequeño (a) y el atún barrilete (b).

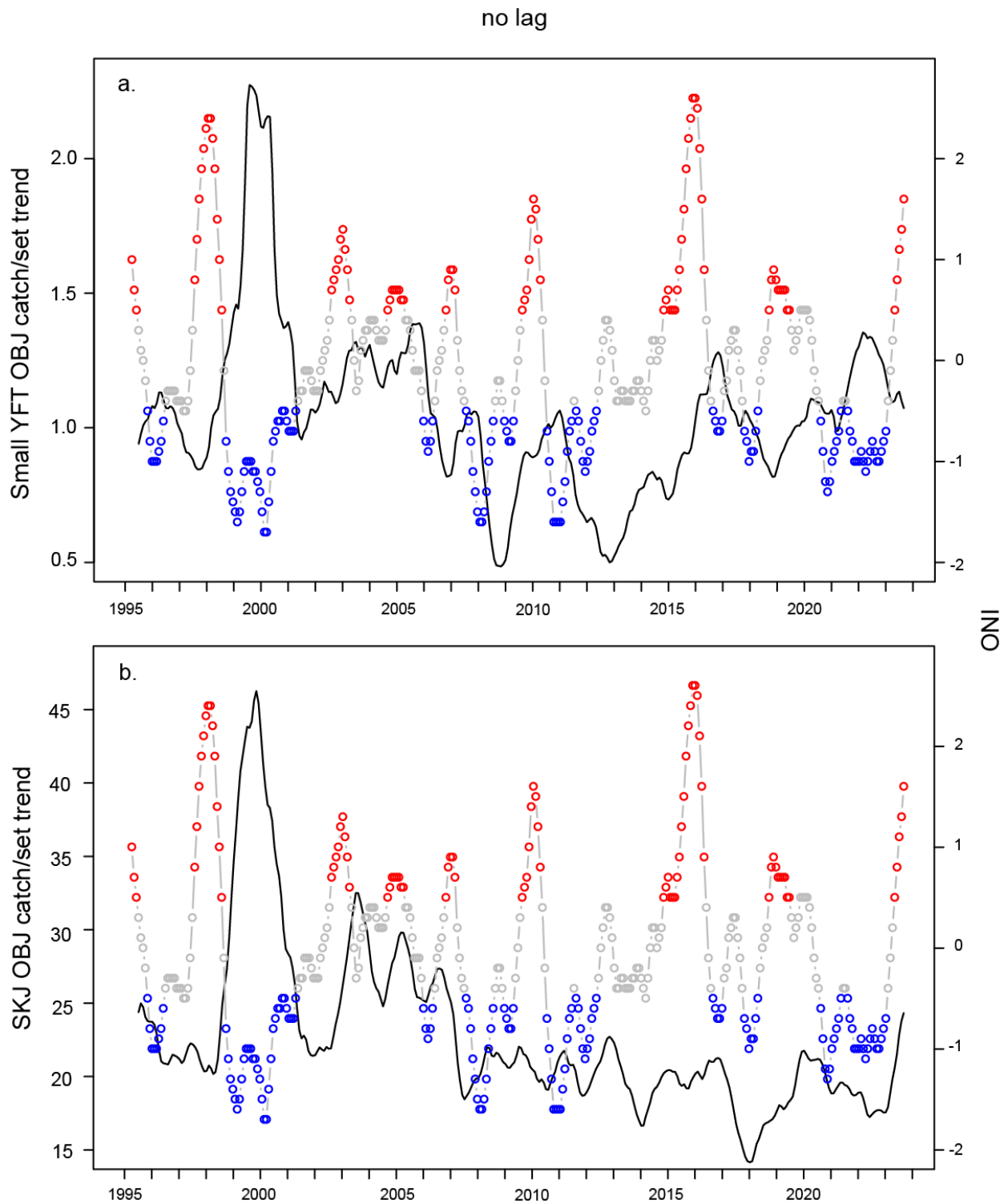


FIGURE 2. Small yellowfin tuna (a) and skipjack tuna (b) CPUE trend data overlaid with ONI. The colors of the points of ONI correspond to the El Niño (red), La Niña (blue), or Neutral (grey) phase.

FIGURA 2. Datos de tendencia de la CPUE del atún aleta amarilla pequeño (a) y del atún barrilete (b) superpuestos con el índice ONI. Los colores de los puntos del ONI corresponden a las fases de El Niño (rojo), La Niña (azul) o neutras (gris).

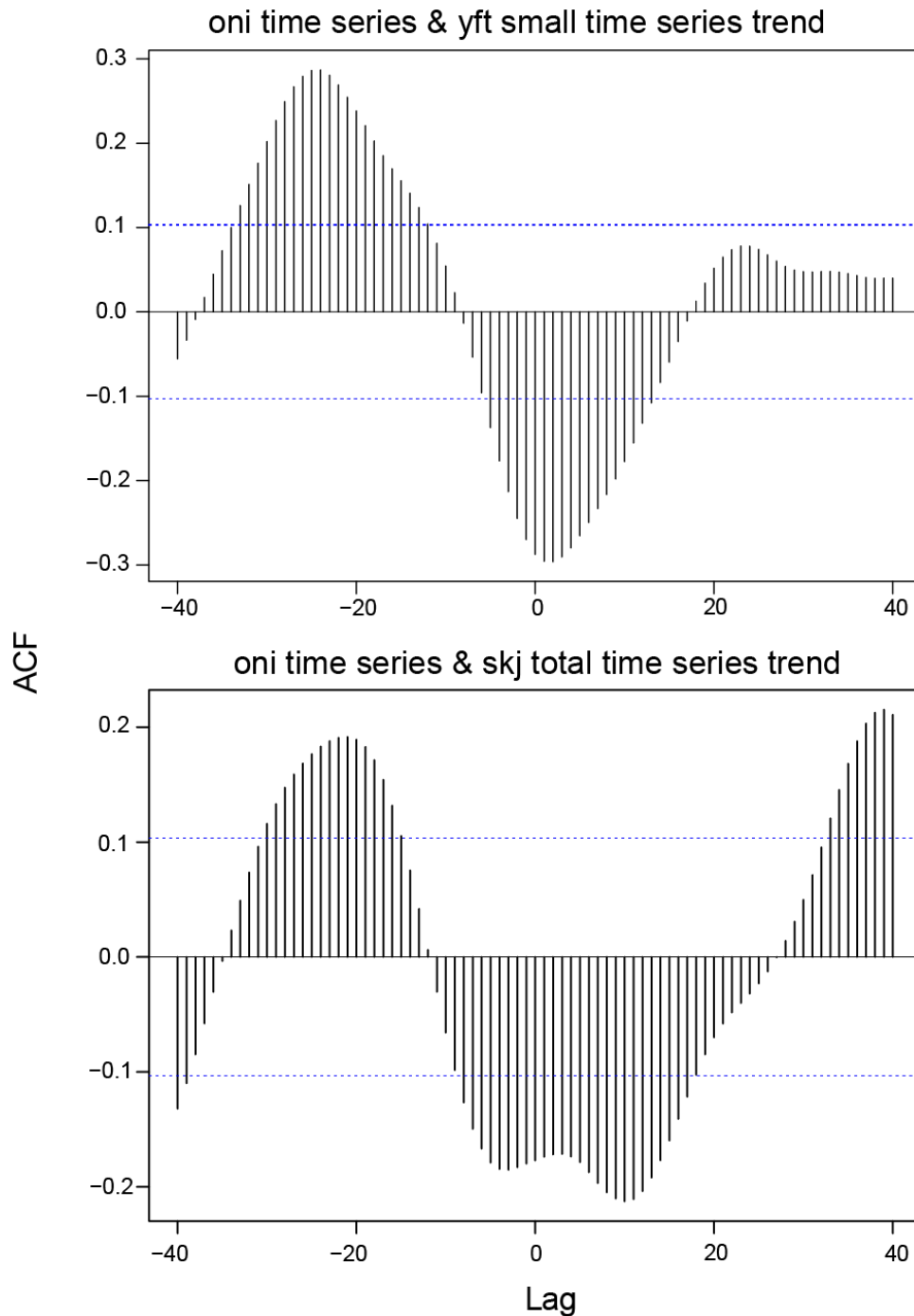


FIGURE 3. Cross-correlations between small yellowfin (a) and skipjack (b) trended CPUE data against the ONI timeseries from -40 to 40 month lags. Lags less than 0 indicate that catches correlate with prior ONI values. If the correlations extend beyond the blue dashed line the correlations are significantly different from 0.

FIGURA 3. Correlaciones cruzadas entre los datos de tendencia de la CPUE del atún aleta amarilla pequeño (a) y del atún barrilete (b) y la serie de tiempo del ONI con retardos de -40 a 40 meses. Los retardos inferiores a 0 indican que las capturas están correlacionadas con valores anteriores del ONI. Si las correlaciones se extienden más allá de la línea discontinua azul, las correlaciones son significativamente diferentes de 0.

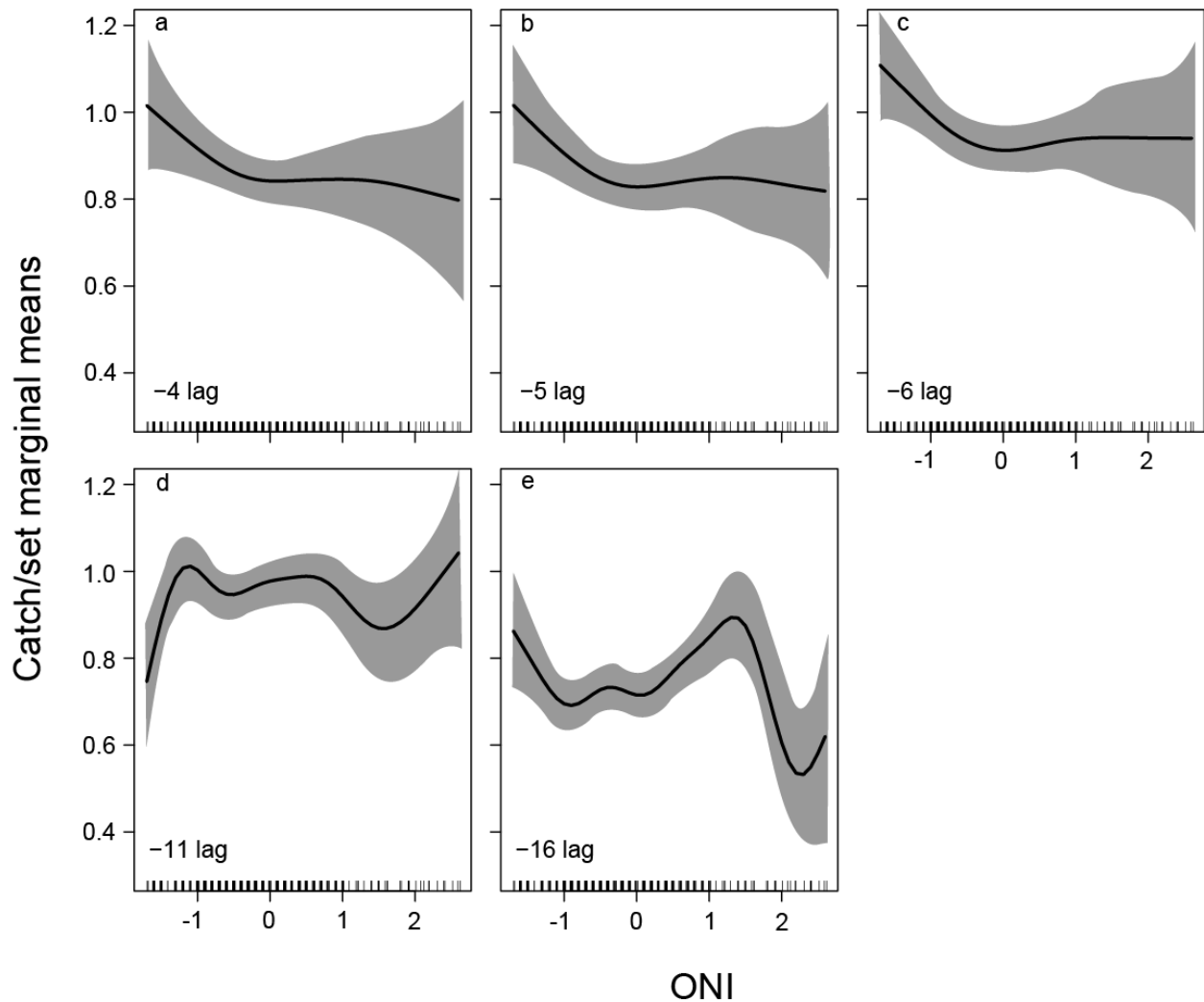


FIGURE 4. Marginal mean predictions of small yellowfin CPUE in the purse seine object fishery for ONI for the top lagged models (-4, -5, -6, -11, -16). The black line shows the actual marginal mean for ONI for each lagged model, while the grey area indicates the confidence intervals generated through bootstrapping. The black tick marks on the bottom of the plots show the monthly ONI values under which sets occurred.

FIGURA 4. Predicciones de medias marginales de la CPUE del atún aleta amarilla pequeño en la pesquería cercoera sobre objetos flotantes para el ONI para los mejores modelos con retardo (-4, -5, -6, -11, -16). La línea negra muestra la media marginal real del ONI para cada modelo con retardo, mientras que el área gris indica los intervalos de confianza generados mediante *bootstrapping*. Las marcas negras de la parte inferior de las gráficas muestran los valores mensuales del ONI bajo los que se produjeron los lances.

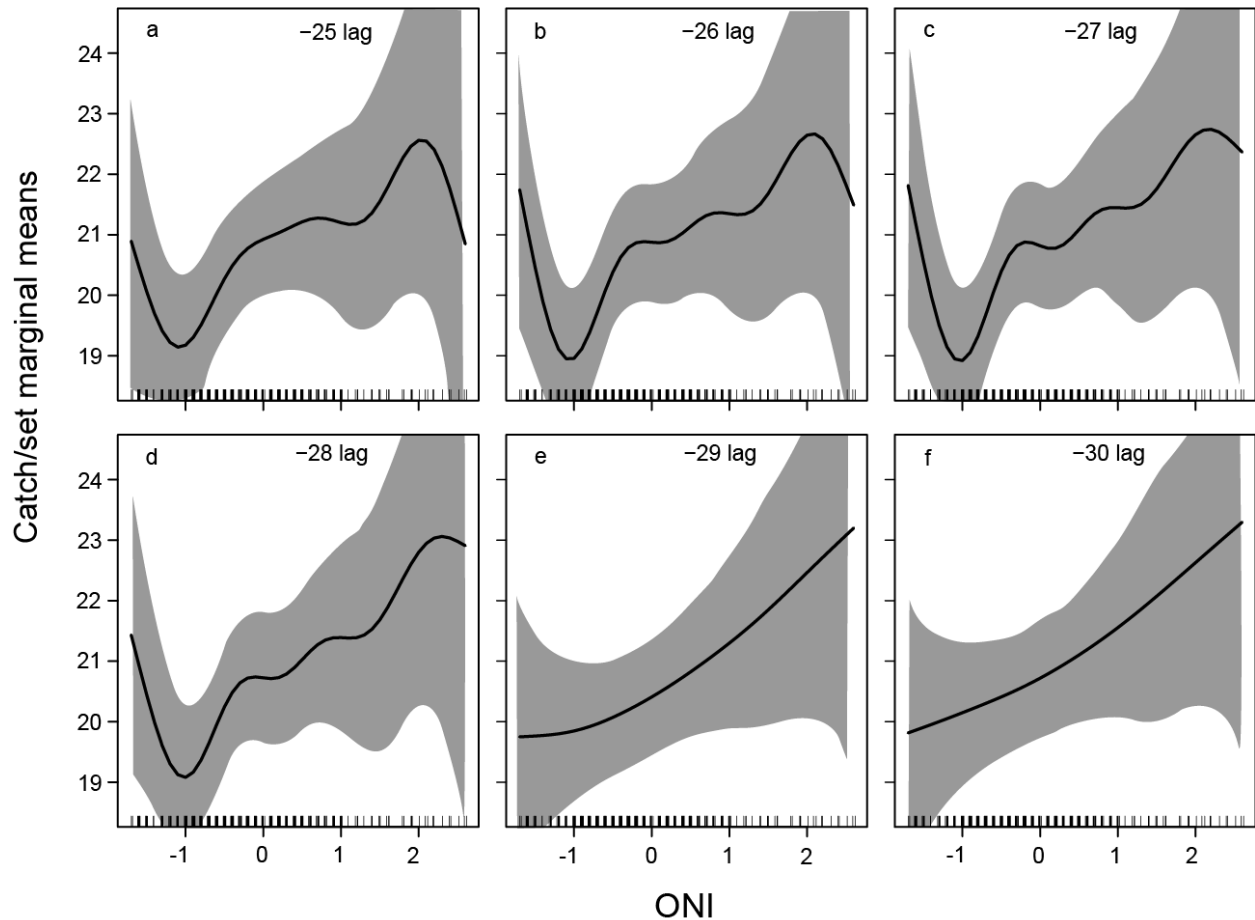


FIGURE 5. Marginal mean predictions of skipjack CPUE in the purse seine object fishery for ONI for the top lagged models (-25, -26, -27, -28, -29, -30). The black line shows the actual marginal mean for ONI for each lagged model, while the grey area indicates the confidence intervals generated through bootstrapping. The black tick marks on the bottom of the plots show the monthly ONI values under which sets occurred.

FIGURA 5. Predicciones de medias marginales de la CPUE del atún barrilete en la pesquería cerquera sobre objetos flotantes para el ONI para los mejores modelos con retardo (-25, -26, -27, -28, -29, -30). La línea negra muestra la media marginal real del ONI para cada modelo con retardo, mientras que el área gris indica los intervalos de confianza generados mediante *bootstrapping*. Las marcas negras de la parte inferior de las gráficas muestran los valores mensuales del ONI bajo los que se produjeron los lances.

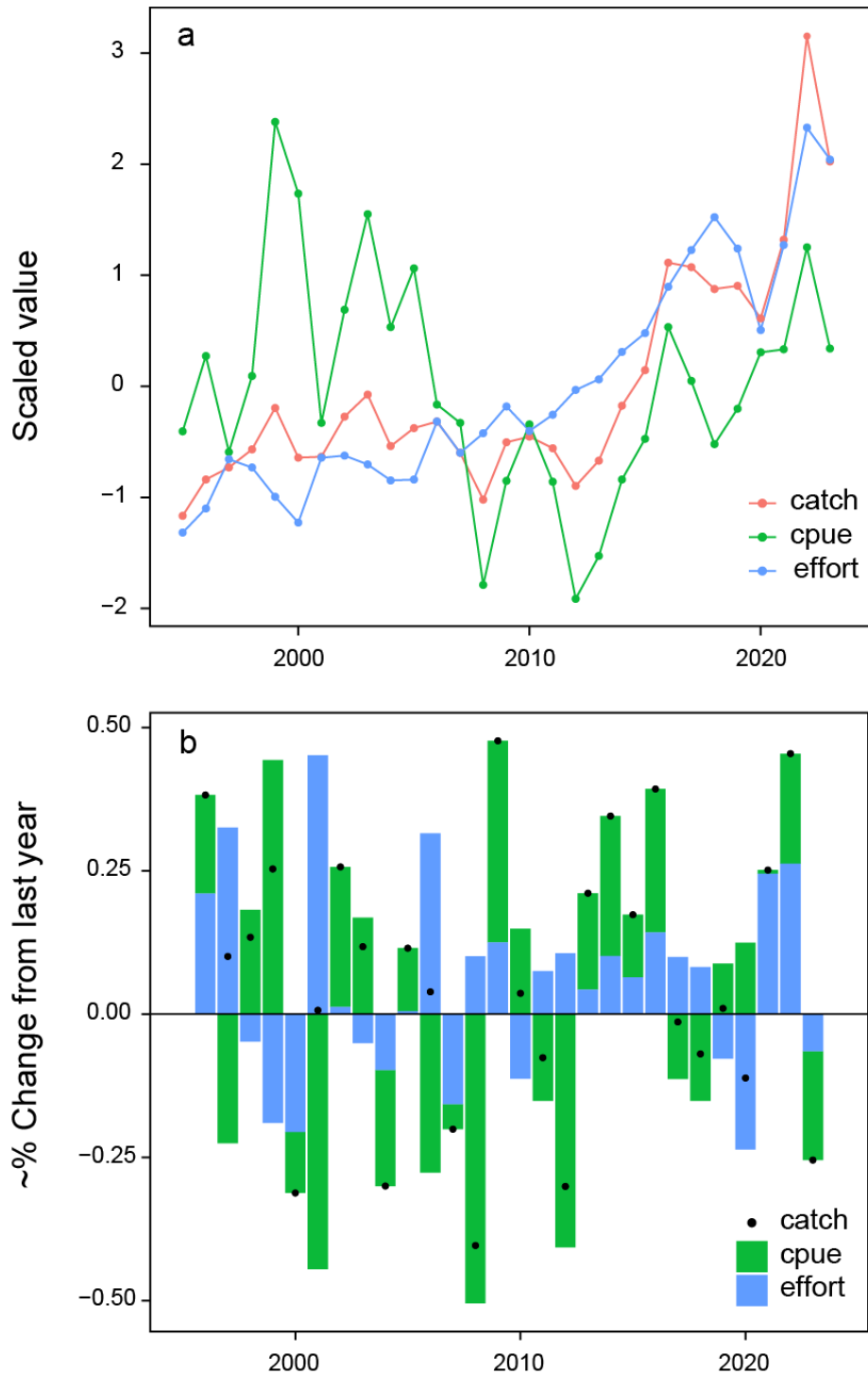


FIGURE 6. Centered and scaled trends in catch, effort, and CPUE for small yellowfin tuna in the purse seine object fishery (a). Decomposition of changes in catch into contributions of CPUE and effort. Values are roughly analogous to percent effects (b).

FIGURA 6. Tendencias centradas y escaladas de captura, esfuerzo y CPUE para el atún aleta amarilla pequeño en la pesquería cerquera sobre objetos flotantes (a). Descomposición de los cambios en las capturas en contribuciones de CPUE y esfuerzo. Los valores son más o menos análogos a los efectos porcentuales (b).

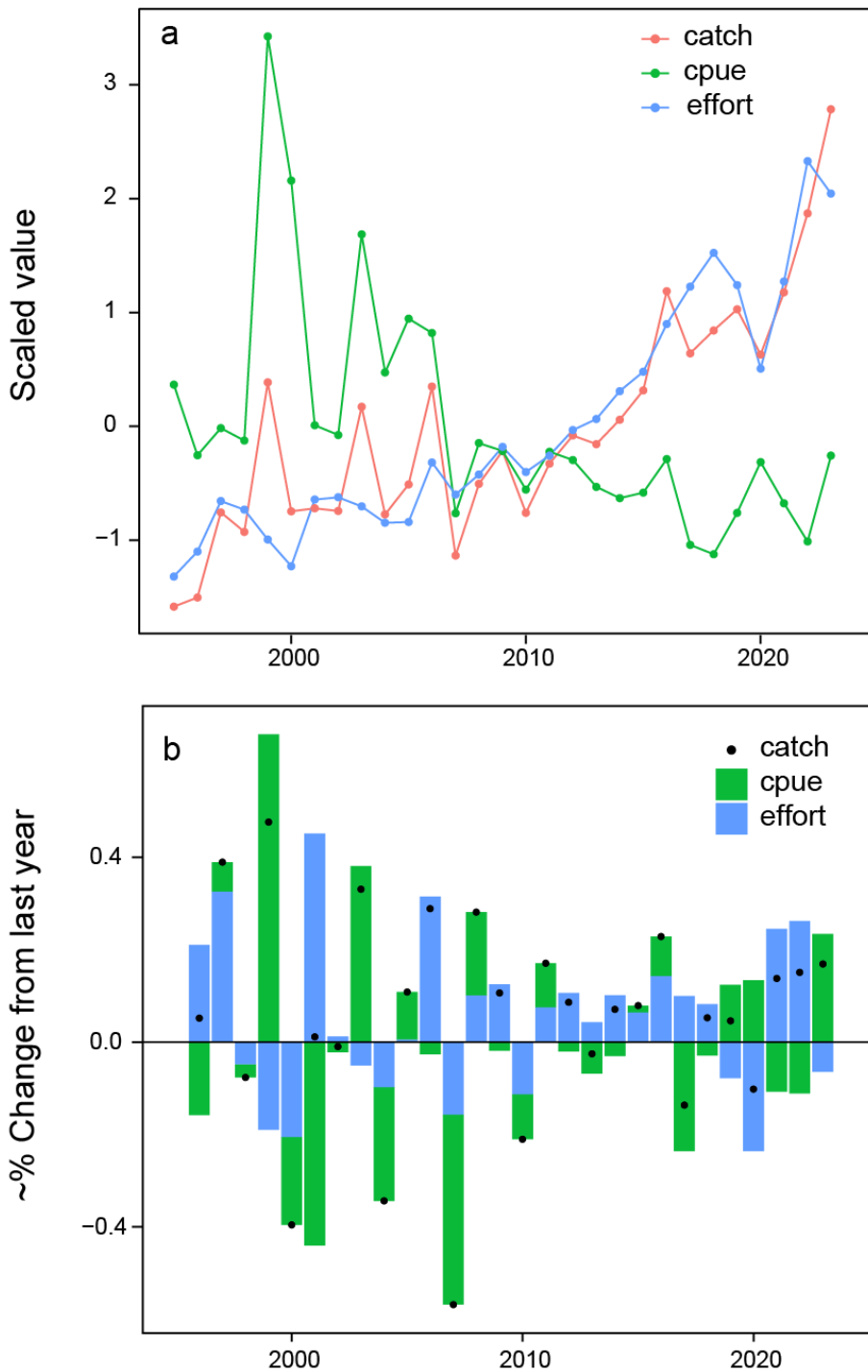


FIGURE 7. Centered and scaled trends in catch, effort, and CPUE for skipjack tuna in the purse seine object fishery (a). Decomposition of changes in catch into contributions of CPUE and effort. Values are roughly analogous to percent effects (b).

FIGURA 7. Tendencias centradas y escaladas de captura, esfuerzo y CPUE para el atún barrilete en la pesquería cercoera sobre objetos flotantes (a). Descomposición de los cambios en las capturas en contribuciones de CPUE y esfuerzo. Los valores son más o menos análogos a los efectos porcentuales (b).

8. ANEXO

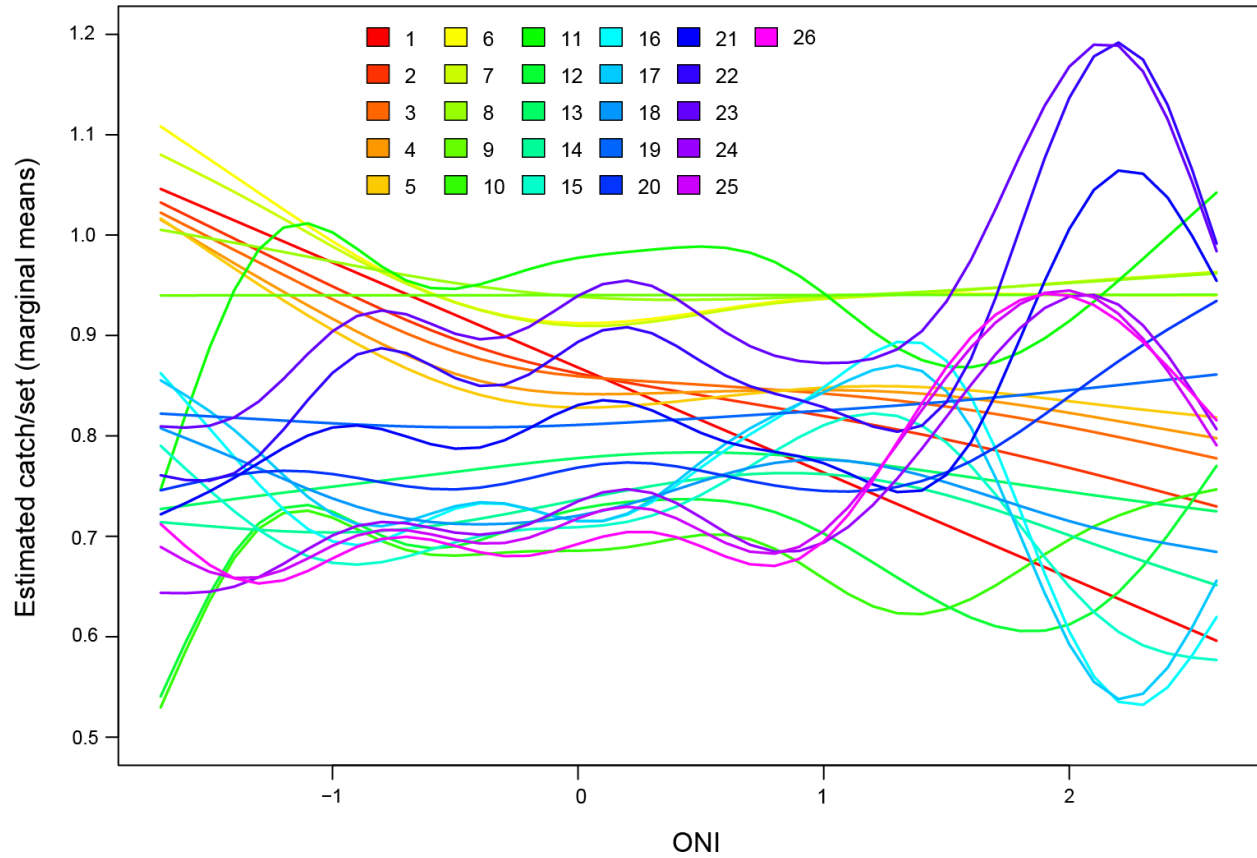


FIGURE A1. Marginal mean predictions of small yellowfin CPUE in the purse seine object fishery for ONI for all lagged models.

FIGURA A1. Predicciones de medias marginales de la CPUE del atún aleta amarilla pequeño en la pesquería cerquera sobre objetos flotantes para el ONI, para todos los modelos con retardo.

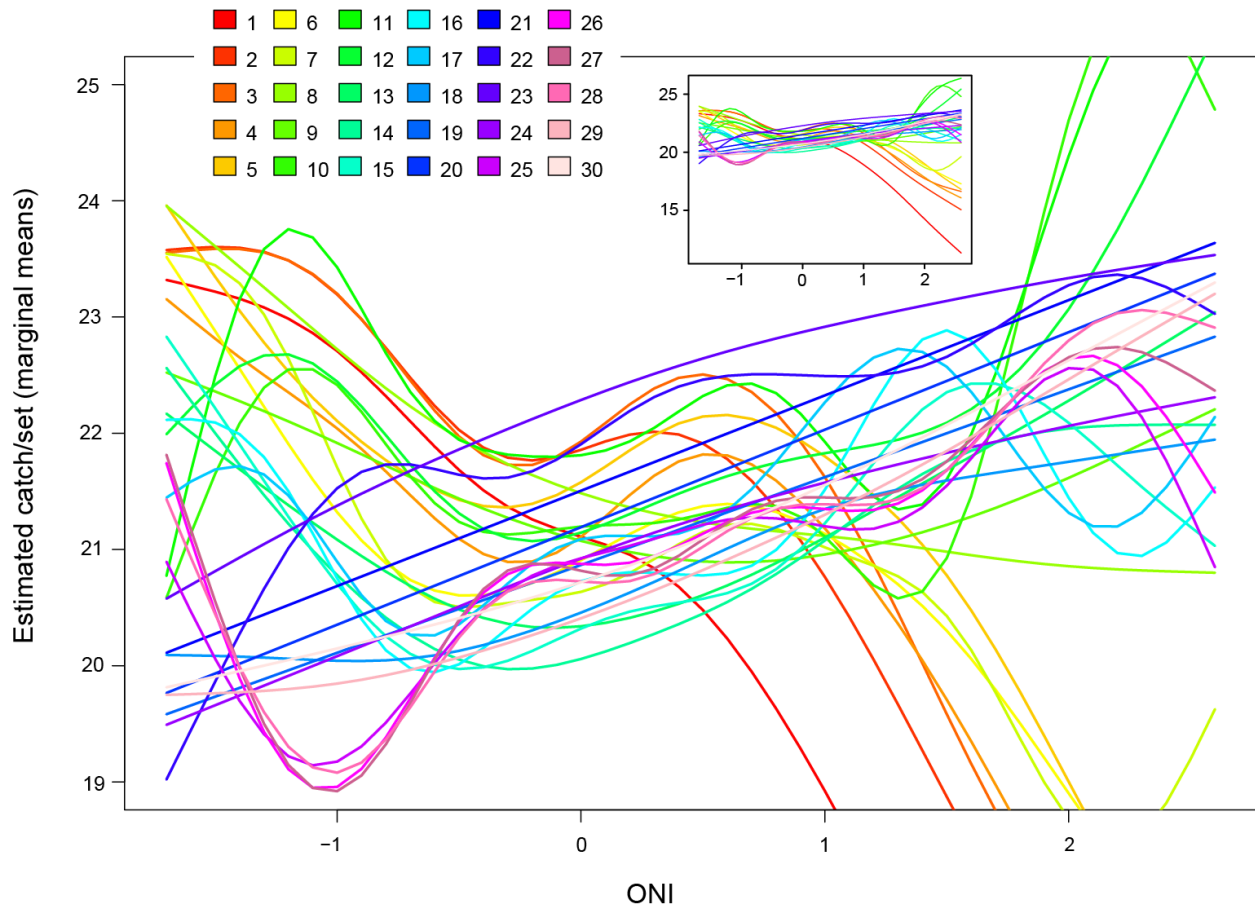


FIGURE A2. Marginal mean predictions of skipjack tuna CPUE in the purse seine object fishery for ONI for all lagged models. The inset map shows the entire extent of all marginal mean predictions.

FIGURA A2. Predicciones de medias marginales de la CPUE del atún barrilete en la pesquería cerquera sobre objetos flotantes para el ONI, para todos los modelos con retardo. El mapa del recuadro muestra la extensión completa de todas las predicciones de medias marginales.