

COMISIÓN INTERAMERICANA DEL ATÚN TROPICAL
GRUPO DE TRABAJO *AD HOC* PERMANENTE SOBRE PLANTADOS
7ª REUNIÓN

La Jolla, California (EE. UU.)
12-13 de mayo de 2023

DOCUMENTO FAD-07-03

INDICADORES DE BIOMASA DE ATUNES TROPICAL A PARTIR DE BOYAS CON ECOSONDA EN EL OCÉANO PACÍFICO ORIENTAL

Jon Uranga¹, Jon López², Maitane Grande¹, Cleridy E. Lennert-Cody², Iñaki Quincoces¹, Igor Granado¹, Mark N. Maunder², Dan Ovando², Alexandre Aires-da-Silva², Gorka Merino¹, Hilario Murua³, Josu Santiago¹

RESUMEN

La colaboración con algunas asociaciones de armadores de buques atuneros que operan en el Océano Pacífico oriental, así como con proveedores de boyas, nos ha permitido el acceso a la información recolectada por sus boyas satelitales con ecosonda rastreadas por GPS desde 2010. Estas boyas están equipadas con instrumentos que transmiten datos en tiempo real a los pescadores, incluyendo la geolocalización precisa de los dispositivos agregadores de peces (plantados) e información sobre la presencia y abundancia de peces debajo de ellos. Como resultado, las boyas con ecosonda sirven como plataformas de observación eficaces para proporcionar datos independientes de la captura y evaluar potencialmente la abundancia de atunes y especies acompañantes en los plantados. Las boyas con ecosonda actuales proporcionan un único valor de biomasa y no distinguen entre especies ni tienen en cuenta la composición por talla de los peces. Por lo tanto, para obtener indicadores por especie, los datos de las boyas con ecosonda deben combinarse con datos de pesca, incluyendo composición por especie y talla promedio. En este artículo se presenta una estimación preliminar actualizada de un índice de abundancia para el atún barrilete en el Océano Pacífico oriental utilizando boyas con ecosonda para el período 2012-2022. Este índice se utiliza en la evaluación provisional de la población.

1. INTRODUCCIÓN

Históricamente, las evaluaciones de poblaciones de especies de atunes tropicales se han basado casi exclusivamente en estimadores de abundancia que dependen de las capturas comerciales y el esfuerzo de pesca obtenido de las bitácoras de los capitanes o de los datos de los observadores (Maunder y Punt 2004). Estos datos se integran en los modelos de evaluación de poblaciones para evaluar la condición y la evolución de las poblaciones de peces, proporcionando información sobre tendencias relativas en la abundancia de peces (Quinn y Deriso 1999). Se utilizan índices de abundancia relativa basados en la Captura por Unidad de Esfuerzo (CPUE), que se relacionan con la abundancia a través del coeficiente de capturabilidad (q). Sin embargo, diversos factores, como las variaciones en la eficacia pesquera, la dinámica espacial de la flota o especies y las condiciones ambientales pueden afectar esta proporcionalidad (Maunder y Punt 2004; Maunder *et al.* 2006). Por

¹ AZTI, Marine Research, Basque Research and Technology Alliance (BRTA). Txatxarramendi ugarteia z/g, 48395. Sukarrieta - Bizkaia, España

² Comisión Interamericana del Atún Tropical, 8901 La Jolla Shores Drive, La Jolla CA 92037, USA

³ International Seafood Sustainability Foundation (ISSF), 3706 Butler Street Suite #316, 15201-1820 Pittsburgh, PA (USA). hmurua@issf-foundation.org

lo tanto, la estandarización de la CPUE se utiliza para eliminar estos efectos e identificar los cambios relacionados con la abundancia de la población.

La incorporación de nuevas tecnologías y el uso de dispositivos agregadores de peces (plantados) en la pesquería de cerco de atunes tropicales, han provocado un aumento significativo de la eficacia pesquera (López *et al.* 2014; Torres-Irineo *et al.* 2014; Gaertner *et al.* 2016). Sin embargo, los científicos han tenido dificultades para estandarizar la captura por unidad de esfuerzo (CPUE) de la pesquería sobre plantados debido a las dificultades de proporcionar nuevas covariables basadas en datos de escala fina para reflejar los cambios tecnológicos y la progresión del esfuerzo, así como la falta de un buen sustituto del esfuerzo cerquero, en particular de los plantados (Gaertner *et al.* 2016; Katara 2018; Wain 2021). Por consiguiente, la CPUE de la pesquería de cerco sobre plantados no se ha incluido en los modelos de evaluación de poblaciones de atunes tropicales. No obstante, los proyectos colaborativos exitosos entre la ciencia y la industria han comenzado a brindar información valiosa sobre la adopción de avances tecnológicos en esta flota para mejorar el proceso de estandarización de la CPUE (Wain 2021) y, en última instancia, las evaluaciones de los atunes tropicales.

La introducción de boyas satelitales con ecosonda sujetas a plantados (Scott 2014) ofrece un método alternativo para observar la dinámica de las agregaciones y estimar índices independientes de la captura. Estas boyas instrumentadas brindan información diaria sobre la posición de la boya y una estimación aproximada de la biomasa de peces debajo de los plantados, lo que las convierte en plataformas eficaces de observación para monitorear remotamente agregaciones de atunes y otras especies de forma sistemática y no invasiva. En los últimos años, las colaboraciones entre la industria y la investigación han permitido recolectar datos derivados de boyas y se han desarrollado marcos metodológicos científicos para extraer información fiable de estos datos (Orue *et al.*, 2019). Esta información ha demostrado ser útil para la ciencia al permitir la investigación del comportamiento y la ecología de los atunes alrededor de los plantados y proporcionar índices de abundancia derivados de boyas (López *et al.* 2014; Capello *et al.* 2016; Moreno 2016; Orue *et al.*, 2019; Santiago *et al.* 2019; Baidai 2020).

Recientemente, el Índice de Abundancia Derivado de las Boyas (IAB) se ha incorporado en las evaluaciones de poblaciones de patudo y aleta amarilla de la ICCAT como medida de la relación proporcional entre la estimación de la biomasa de las boyas con ecosonda y la abundancia total de atunes (CICAA 2019, 2021), con el apoyo de la International Seafood Sustainability Foundation (ISSF), entre la Comisión Interamericana del Atún Tropical (CIAT) y AZTI, en asociación con proveedores de boyas con ecosonda y algunas empresas pesqueras de buques cerqueros que pescan atunes tropicales en el Océano Pacífico oriental (es decir, empresas integradas en la asociación de buques pesqueros OPAGAC-AGAC y Cape Fisheries). El objetivo de esta colaboración es producir IAB que sean fiables para las especies de atunes tropicales en la región. Este artículo se centra en la aplicación de este método novedoso para generar un índice de abundancia para el atún barrilete en el OPO a partir de la información de las boyas con ecosonda entre 2012 y 2022. Este índice se ha incluido en la evaluación provisional del barrilete realizada por el personal de la CIAT en 2022 (SAC-13-07) y puede informar los futuros índices de abundancia para las tres principales especies de atunes tropicales (barrilete, aleta amarilla y patudo). Los resultados preliminares del proyecto colaborativo fueron presentados en la 5ª reunión del Grupo de Trabajo Permanente *Ad-hoc* sobre Plantados, junto con una lista de ideas y tareas para mejorar aún más estos indicadores. En este documento se presentan los resultados actualizados del índice anterior, incluyendo en la serie los datos de Cape Fisheries a partir de 2019, y destaca los avances realizados en aspectos específicos de la metodología durante el último año.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Prefiltrado de datos acústicos

Los principales datos utilizados en este análisis fueron recolectados por boyas satelitales con ecosonda sujetas a plantados utilizados por la pesquería de cerco de atunes tropicales del OPO.

Específicamente, solo se utilizaron los datos proporcionados por el fabricante de boyas Satlink en este análisis. Las especificaciones técnicas de cada modelo de boya se presentan en la Tabla 1. Las boyas registran información desde los 3 hasta los 115 m de profundidad, dividida en 10 estratos verticales uniformes, cada una con una resolución de 11.2 m. Cabe señalar que los primeros 3 m corresponden a la zona ciega y no proporcionan datos utilizables. Durante el período analizado, enero de 2012 a diciembre de 2021, se utilizaron cinco modelos diferentes de boyas: DS+, DSL, ISD, ISL y SLX (Tabla 1).

Los datos recolectados por las boyas con ecosonda fueron proporcionados por empresas pesqueras como Albacora, Calvo, Garavilla, Ugavi, y Cape Fisheries. Estas empresas operaron un total de 23 buques cerqueros de 5 pabellones diferentes (Panamá, España, Ecuador, El Salvador, EE. UU.) en el Área de la Convención de la CIAT.

La base de datos para este análisis incluía un total de 27.16 millones de registros acústicos de 43,891 boyas individuales. Se descartaron los datos de los años 2010 y 2011 debido al bajo número de registros disponibles (Figura 1). Además, los registros acústicos de áreas con un bajo número de observaciones (menos de 50 registros en rectángulos estadísticos de 5°x5°) y los que estaban al oeste de 150°O se excluyeron de este análisis.

De cada registro individual de datos, transmitido vía satélite, se extrajo la siguiente información: "Name", número de identificación único de la boya, dado por el código del modelo (DS+, DSL, ISL, ISD, SLX) seguido por 5-6 dígitos, "OwnerName", nombre del dueño de la boya asignada a un buque cerquero único, "MD", descriptor del mensaje (160, 161 y 162 para datos de posición, sin datos de ecosonda, y 163, 168, 169 y 174 para datos de ecosonda), "StoredTime", fecha (día/mes/año) y hora (HH:MM) de la posición y los registros de la ecosonda; "Latitude, Longitude", información de latitud y longitud del GPS asociada al registro (en decimales), "Bat", nivel de carga de la batería de la boya, en porcentaje (no se proporciona, excepto los modelos D+ y DS+, en voltaje); "Speed", velocidad estimada de la boya en nudos, "Layer1-Layer10", toneladas estimadas de atún por estrato (los valores se estiman mediante un método del fabricante que convierte la retrodispersión acústica sin procesar en biomasa en toneladas, utilizando un procedimiento de ecointegración de estrato por profundidad basado exclusivamente en un algoritmo que utiliza la fuerza de blanco (TS, de Target Strength) y peso del atún barrilete), "Sum", suma de la biomasa estimada para todos los estratos "Max", biomasa máxima estimada en cualquier estrato y "Mag1, Mag3, Mag5 y Mag7", magnitudes correspondientes a los conteos de objetivos detectados según la TS del pico de detección.

Se aplicó un conjunto de cinco filtros a los datos originales para eliminar artefactos. Estos filtros fueron diseñados para eliminar: 1) filas aisladas, duplicadas y ubicuas, que a menudo son causadas por incidentes de comunicación satelital; 2) boyas ubicadas a 1 km o más cerca de tierra o ubicadas en la plataforma continental (es decir, una profundidad de fondo inferior a 200 m), que fueron detectadas y eliminadas usando datos de la costa de la base de datos GSHHG (Wessel 1996) y una información batimétrica global (Amante and Eakins 2009); y 3) posiciones "a bordo" o "en el mar", que fueron identificadas mediante un algoritmo de Bosques Aleatorios (Orue et al. 2019; Santiago et al. 2020). Estos casos suelen producirse cuando se activa una boya a bordo de un buque antes de la siembra y posterior a la recuperación.

Además de los filtros de limpieza de datos mencionados anteriormente, se utilizaron los siguientes criterios de selección (Santiago et al. 2020) a fin de elaborar el conjunto final de datos para el análisis de estandarización. En primer lugar, se excluyeron los estratos menos profundos (<25m) porque se considera que reflejan potencialmente especies que no son atunes (por ejemplo, Orue et al. 2019). En segundo lugar, solo se consideraron para el análisis los datos registrados alrededor de la salida del sol, entre las 4 a.m. y las 8 a.m. hora local, porque se cree que capturan mejor la biomasa que está debajo de los plantados (por ejemplo, Moreno et al. 2007 y FAD-06-01; las horas cercanas a la salida del sol son las preferidas por los pescadores para los lances sobre plantados). Finalmente, se seleccionaron datos acústicos pertenecientes a "segmentos vírgenes" para utilizar el segmento de

trayectoria de una boya cuyo plantado asociado probablemente represente una nueva siembra que ha sido potencialmente colonizado por atunes y aún no ha sido pescado. Para calcular los segmentos vírgenes, la información de una sola boya se dividió en segmentos más pequeños en los que la diferencia entre dos observaciones consecutivas de la misma boya superaba los 30 días. Aunque esto puede representar boyas que se han resembrado a un ritmo razonable, parece poco probable. Sin embargo, se eliminaron los segmentos con menos de 30 observaciones y los que tenían una diferencia de tiempo entre cualquiera de las observaciones consecutivas mayor de 4 días durante los primeros 35 días. Finalmente, a partir de los datos restantes, se utilizó información correspondiente a 20-35 días en el mar, ya que este es el tiempo durante el cual los plantados parecen ser colonizados (Orue *et al.* 2019). La [Figura 2](#) muestra un diagrama con un ejemplo de segmentos “vírgenes” utilizados para calcular el índice IAB.

2.2 De datos acústicos a un indicador de abundancia por especie

A fin de calcular la biomasa agregada bajo un plantado a partir de la señal acústica, Satlink utiliza la fuerza de blanco (TS) de una especie, el barrilete, para proporcionar la biomasa en toneladas y, por lo tanto, los datos de biomasa de Satlink deben convertirse a decibeles (información acústica) invirtiendo su fórmula para el cálculo de la biomasa. Una vez que se dispone de la información acústica sin procesar, se puede volver a calcular en biomasa por especie utilizando ecuaciones estándar de estimación de abundancia acústica (Simmons y MacLennan 2005):

$$Biomasa_i = \frac{s_v \cdot Vol \cdot p_i}{\sum_i \sigma_i \cdot p_i}$$

donde s_v es la fuerza de retrodispersión del volumen, Vol es el volumen muestreado del haz y p_i y σ_i son la proporción y la fuerza de blanco linealizada de cada especie i respectivamente.

Las proporciones de las especies en peso en resolución de $1^\circ \times 1^\circ$ y mensual se extrajeron de bitácoras (para los buques de clases 1-5, ≤ 363 t) y de datos de observadores (para los buques de clase 6, >363 t) para 14 pabellones. Las tallas promedio de los peces (L_i), para una resolución de $5^\circ \times 5^\circ$ de área-mes, se obtuvieron a partir de datos de muestreo en puerto de la CIAT para el barrilete (SKJ), el patudo (BET) y el aleta amarilla (YFT), que se extrapolaron a la captura en las bodegas muestreadas. Los pesos se estimaron utilizando los factores de conversión peso-talla de la CIAT. Luego, se usaron las siguientes relaciones de fuerza de blanco-talla para obtener la TS linealizada por kilogramo:

$$\sigma_i = \frac{10^{(TS)/10}}{w_i}$$

donde w_i es el peso promedio de cada especie y TS es la sección transversal de retrodispersión de cada especie de pez individual. Se supone que el valor lineal de TS es proporcional al cuadrado de la talla del pez (Simmons y MacLennan 2005).

$$TS = 20 \log(L_i) + b20$$

Dado que cada marca usa diferentes frecuencias de operación, utilizamos diferentes valores de $b20$ para cada especie ($b20$ es la llamada fuerza de blanco reducida). Para Satlink, los valores de $b20$ se obtuvieron de Boyra *et al.* (2018) para SKJ, de Bertrand y Josse (2000) y Oshima (2008) para YFT y de Boyra *et al.* (2018) para BET.

Para obtener información sobre la composición de la captura para los estratos de área-tiempo correspondientes de los registros acústicos, seguimos un proceso jerárquico de tres pasos. Primero, utilizamos los datos de distribución de especies de la misma cuadrícula de $5^\circ \times 5^\circ$, año y mes. Si no se disponía de esos datos, se procedía al segundo paso, que consistía en utilizar el mismo trimestre y la misma cuadrícula de $5^\circ \times 5^\circ$. Finalmente, si las opciones anteriores no eran factibles, utilizamos los valores promedio de los datos de distribución de especies a una resolución trimestral y regional, como

se muestra en la [Figura 3](#).

Los resultados presentados en este documento se refieren específicamente a la fracción de la señal acústica que se estima es informativa para la biomasa del atún barrilete.

2.3 Índice IAB: Índice de Abundancia Derivado de las Boyas

El estimador de abundancia, IAB, se determinó como el cuantil 0.9 de las observaciones de energía acústica integrada en cada una de las secuencias “vírgenes”. Se eligió un cuantil alto porque es probable que los valores grandes sean producidos por atunes, al contrario de otras especies. Este supuesto también la usan todos los fabricantes de boyas del mercado, que utilizan el valor máximo como resumen de biomasa para cada intervalo de tiempo. En este estudio, se seleccionó un cuantil alto en lugar del máximo para proporcionar un estimador más sólido al evitar valores atípicos. El número total de secuencias “vírgenes” analizadas, y por tanto el número de observaciones incluidas en el modelo, fue de 8,559, de las cuales 8,424 (98.42%) tuvieron valores positivos.

2.4 Modelo

Con base en la información proporcionada, las covariables utilizadas en el proceso de estandarización y ajustadas como variables categóricas fueron año-trimestre, área de 5°x5° y modelo de boya. Además, se incluyeron como variables continuas en el modelo un sustituto de 1°x1° y densidades mensuales de plantados y las siguientes variables ambientales: espesor de la capa de mezcla oceánica, clorofila, temperatura superficial del mar (TSM) y frentes de TSM y clorofila. El modelo supone que la señal de la ecosonda es proporcional a la abundancia de peces debajo del plantado, lo que es similar a la relación fundamental entre la CPUE y la abundancia ampliamente utilizada en el análisis cuantitativo de las pesquerías.

$$IAB_t = \phi \cdot B_t$$

donde IAB_t es el Índice de Abundancia Derivado de las Boyas y B_t es la abundancia en el tiempo t (Santiago *et al.*, 2016).

Aunque parezca obvio, no hay mucha literatura disponible sobre la relación entre los indicadores acústicos y el rendimiento de la pesca. En general, se supone que la ecointegración acústica es un proceso lineal, es decir, proporcional al número de objetivos (Simmons y MacLennan 2005) y se ha demostrado experimentalmente que es correcto con algunas limitaciones (Foote, 1983; Røttingen, 1976). Por lo tanto, los datos acústicos (ecointegración) se toman comúnmente como un sustituto de la abundancia y se utilizan para obtener estimaciones acústicas de la abundancia de muchas especies pelágicas (Hampton 1996; ICES 2015; Masse *et al.* 2018).

Al igual que con la capturabilidad, el coeficiente de proporcionalidad ϕ no es constante por muchas razones. Para asegurar que se pueda suponer que ϕ sea constante (es decir, para controlar los efectos distintos a los causados por cambios en la abundancia de la población) se debe realizar un análisis de estandarización con el objetivo de eliminar factores distintos a los cambios en la abundancia de la población. Esto se puede realizar estandarizando las mediciones nominales de la ecosonda utilizando un enfoque de Modelado Lineal Generalizado Mixto (MLGM).

Debido a la baja proporción de ceros en el conjunto de datos (1.58 %), se excluyeron del análisis y, por lo tanto, no se consideró el enfoque lognormal delta (Lo *et al.* 1992). Se aplicó un MLGM con un modelo estructurado con un componente de error lognormal para estandarizar las observaciones acústicas distintas de cero. Se utilizó un procedimiento escalonado para ajustar el modelo con todas las variables e interacciones explicativas con el fin de determinar las que contribuyeron significativamente a explicar la variabilidad de los datos. Para esto, se crearon análisis de desviación y tablas de resumen, y la selección final de las variables explicativas se realizó utilizando: a) el aumento

porcentual relativo de la desviación explicada cuando la variable se incluyó en el modelo (se seleccionaron variables que explicaban más del 5%) y b) la prueba de chi-cuadrado (χ^2).

También se evaluaron las interacciones del componente temporal (año-trimestre) con el resto de las variables. Si una interacción era estadísticamente significativa, entonces se consideraba como una interacción aleatoria dentro del modelo final (Maunder y Punt 2004).

La selección del modelo final se basó en el Criterio de Información de Akaike (AIC, de *Akaike's Information Criterion*), el Criterio de Información Bayesiano (BIC, de *Bayesian Information Criterion*) y una prueba de chi-cuadrado (χ^2) de la diferencia entre la estadística de log-verosimilitud de diferentes formulaciones de modelo. Los promedios de mínimos cuadrados del efecto año-trimestre (LSmeans) se corrigieron por sesgo para los algoritmos de transformación de logaritmos utilizando el enfoque descrito en Lo *et al.* 1992. Todos los análisis se realizaron utilizando el paquete lme4 en R (Bates *et al.* 2014).

3. RESULTADOS

Se evaluaron en total 27.16 millones de registros acústicos de 43,891 boyas que abarcan desde 2012 hasta 2022, lo que resultó en 8,559 observaciones para el análisis MLGM. Cada observación se calculó como el percentil de 90% de un segmento "virgen" de trayectorias de boyas. Un segmento virgen representa una siembra de un plantado que tiene el potencial de ser colonizado por atunes pero que aún no ha sido pescado.

La [Figura 4](#) muestra los histogramas de los valores nominales del IAB y el IAB transformado logarítmicamente. La transformación logarítmica se aplicó para hacer que los datos sigan una distribución normal, como se muestra en el panel izquierdo de la [Figura 4](#). La [Figura 5](#) muestra la distribución espacial del número de segmentos "vírgenes" de trayectorias de boyas que fueron utilizados en el análisis MLGM en una cuadrícula de 5°x5°. La evolución trimestral del número de observaciones en una cuadrícula de 5°x5° se muestra en la [Figura 6](#).

La [Figura 7](#) ilustra la evolución trimestral del índice logaritmo IAB nominal por cuadrados de 5x5 grados desde 2012 a 2022.

Los resultados del análisis de desviación se presentan en la [Tabla 2](#). El modelo explicó el 44% de la desviación total y las variables explicativas más significativas fueron año-trimestre, área de 5°x5° y la interacción entre año-trimestre y área, que se consideró un efecto aleatorio. No se observaron patrones residuales significativos ([Figura 8](#)).

Las series trimestrales del índice IAB estandarizado se presentan en la [Tabla 2](#) y en la [Figura 9](#). Tres periodos mostraron valores más altos: a) el inicio de la serie en 2012, con intervalos de confianza más amplios debido al número relativamente bajo de observaciones; b) los años 2015 y 2016; y c) los años 2019 y 2020. Aparte de los primeros dos trimestres de 2012, los coeficientes de variación se mantuvieron relativamente estables a lo largo de la serie de tiempo en niveles de 16-23%.

4. CONCLUSIONES

Este artículo presenta resultados preliminares sobre el índice de abundancia independiente de la pesca para el atún barrilete en el OPO, basado en datos de boyas con ecosonda sujetas a plantados. La serie ha sido actualizada con datos hasta 2022, y gracias a la colaboración de Cape Fisheries, los datos históricos correspondientes de 2019 a 2022 han sido recuperados e integrados en la serie. Para este estudio se siguió la metodología presentada previamente para poblaciones de atunes tropicales tanto en el Pacífico como en otros océanos (Santiago, Uranga *et al.* 2019, Santiago, Uranga *et al.* 2020a, Santiago, Uranga *et al.* 2020b, Uranga 2021, [FAD-06-03](#)), y se identificaron áreas de mejora. Para utilizar eficazmente esta información en las evaluaciones de poblaciones de las especies de

atunes tropicales, es esencial seguir explorando las áreas que se mencionan a continuación y adaptar la metodología en la medida de lo posible a las necesidades específicas de las pesquerías atuneras del OPO.

Recolección de datos

Para examinar la coherencia de los índices de abundancia generados hasta ahora, sería beneficioso obtener nuevos datos acústicos históricos de nuevas empresas o asociaciones e integrarlos en los índices presentados para años anteriores. También sería interesante determinar si la aportación de nuevos datos de nuevas áreas, como los proporcionados por TUNACONS para 2022, puede producir un índice que cubra la misma área o si genera dos índices diferentes: uno basado en datos de alta mar y otro en datos costeros. Esto revelará si estos índices son independientes del esfuerzo de pesca y de las áreas exploradas por la flota o si se necesitan dos índices distintos para cada región. Por ejemplo, en la evaluación del barrilete del año pasado, se identificaron nuevas áreas para la pesquería sobre objetos flotantes, lo que hizo necesaria una readaptación de toda la serie a estas nuevas áreas.

Además de utilizar datos actualizados de la mayor parte posible de la flota, para representar la mayor parte del área de distribución de cada especie, hasta la fecha solo se ha utilizado una de las principales marcas de boyas del mercado. Por lo tanto, es crucial integrar datos de diferentes marcas para determinar si los datos acústicos pueden estandarizarse y si es necesario crear índices basados en marcas o si todos los datos pueden integrarse en un índice único estandarizado.

Además, es muy probable que pronto se hagan nuevas propuestas de modificación a nivel de áreas de interés en cada océano, como se hizo en la última evaluación de la población de barrilete en el OPO en 2022, así como nuevas variaciones en la metodología. Por lo tanto, es necesario hacer el análisis lo más adaptable posible y tener la capacidad de analizar toda la serie al mismo tiempo que se tienen en cuenta las diferencias que puedan surgir debido a las remisiones de datos anuales.

Actualización de la metodología

El primer paso debería ser revisar los filtros utilizados para limpiar la base de datos de artefactos y evaluar si son adecuados para las trayectorias generadas por los diferentes modelos. Es importante aplicar estos filtros en función de las características específicas de cada modelo para priorizar un determinado conjunto de modelos, si es necesario.

A fin de estimar con precisión las biomásas relativas de las distintas poblaciones de atunes tropicales, es fundamental estandarizar y documentar el método de selección de los datos específicos de composición y talla de las capturas, que desempeñan un papel clave en la caracterización de los datos acústicos. En los próximos años, tenemos previsto revisar y actualizar el proceso de asignación de porcentajes de especies y mediciones de talla a la totalidad de los datos acústicos.

Se debe explorar el potencial de diferentes modelos para proporcionar una mayor robustez en la estimación de composiciones específicas en el tiempo y el espacio. Se podrían probar modelos geoespaciales o de aprendizaje automático para mejorar la representatividad del porcentaje por especie a lo largo del año y de diferentes áreas del Océano Pacífico oriental. Además, se podría investigar si la composición por especie se correlaciona con el proceso de colonización y proponer estudios en los que se considere el comportamiento vertical de diferentes especies para ponderar las medidas utilizadas en áreas y estaciones específicas. Los estudios de marcado electrónico podrían utilizarse para definir la profundidad a la que suelen habitar diversas especies e individuos de distintas tallas.

A través de estos análisis, se podría desarrollar un protocolo para asignar jerárquicamente estos valores en función de su resolución o detalle (por ejemplo, observadores por lance, registros de pesca,

1x1-mes).

Cuando se trata de modelos de colonización, es necesario reconsiderar el supuesto de que los días 20-35 después de las nuevas siembras (basado en Orue *et al.* 2019) son la mejor medida. Lo ideal sería encontrar una solución adaptativa que se ajuste a las diferentes regiones y estaciones del Océano Pacífico oriental.

Con respecto a las estimaciones de biomasa, es necesario actualizar los valores de la fuerza de blanco b20 relacionados con la talla de peces individuales, utilizando los valores más recientes publicados en revistas/campañas científicas. Por ejemplo, el nuevo valor de b20 para YFT juvenil, presentado en la 7ª Reunión del Grupo de Trabajo *ad hoc* sobre Plantados, requiere un reanálisis de las series con los nuevos valores. También es necesario estar atentos a los nuevos modelos de boyas o a cualquier cambio de procesamiento debido a colaboraciones con proveedores de boyas. La prioridad principal es integrar en el estudio tanto las boyas de MarineInstruments como las de Zunibal. Sin embargo, esto debe hacerse con cuidado, y habría que discutir si se debe generar un índice independiente para cada proveedor o estandarizar los datos de todas las empresas y modelos para crear un índice general.

En cuanto al modelo utilizado para estandarizar los valores nominales de biomasa para cada trimestre de la serie, se deben realizar varias pruebas de sensibilidad para examinar el efecto de utilizar distintos tipos de medidas (promedio, mediana, percentil de 90%, etc.). Se podrían probar diferentes medidas acústicas calculadas en el segmento virgen y evaluar diferentes tallas y composiciones específicas de varias resoluciones. Además de las variables señaladas en este documento, se debería seguir explorando en el futuro para determinar si algún conjunto de variables ambientales de distinta naturaleza puede explicar mejor la varianza del modelo. Por último, sería interesante considerar la posibilidad de encontrar datos sin presencia de atunes para observar cómo se comporta otro modelo con presencia de ceros.

Avances en acústica y líneas futuras

Además de mejorar la metodología para estimar la biomasa, es crucial seguir explorando la idea de realizar referencias cruzadas entre los datos acústicos o la biomasa estimada y los datos de captura vinculados a la boya correspondiente. Este ejercicio es esencial para dar robustez a los datos originales utilizados en esta propuesta como fuente de información. También creemos que cambiar de mediciones específicas, extraídas del segmento virgen utilizando los pasos y supuestos explicados en este documento, a ecogramas completos del segmento virgen como entrada para nuevos modelos puede conducir a un avance cualitativo significativo. Para conseguirlo, es necesario considerar formas de aumentar el número de muestras para comparar los ecogramas con sus capturas asociadas, ya que este tipo de modelos que utilizan imágenes para encontrar patrones requieren un gran número de muestras. Además, habría que realizar experimentos para determinar si se pueden extraer datos multifrecuencia de la información recolectada para mejorar la discriminación de especies interpretando los resultados a nivel de respuesta de frecuencia. Un avance significativo sería la capacidad de distinguir el barrilete (especie sin vejiga natatoria) de las especies con vejiga natatoria (patudo y aleta amarilla).

Todos los puntos específicos de mejora identificados en este estudio apuntan hacia la necesidad de seguir realizando investigaciones sobre la generación de índices de abundancia relativa basados en la acústica de boyas. Esto se debe a que la acústica de boyas es una plataforma de monitoreo global que proporciona información significativa sobre las tres principales especies de atunes tropicales. La clave del éxito de este análisis radica en saber cómo tratar la naturaleza variable de los datos, lo que requiere encontrar soluciones para descartar todos los datos acústicos que no sean relevantes para la presencia significativa de atunes, y explorar la mejor manera de explotar esta fuente privilegiada

de información hasta lograr un avance significativo.

Con miras hacia el futuro, también sería beneficioso promover proyectos de colaboración con la flota para recolectar datos de los dispositivos acústicos de los buques (tanto ecosondas como sonares). Se supone que estos dispositivos tienen una mayor resolución espacial y, con un uso adecuado, podrían proporcionar información complementaria que podría ofrecer múltiples respuestas sobre la morfología de los cardúmenes asociados a los plantados. Este paso transformaría los buques pesqueros en plataformas de investigación, permitiendo la obtención de datos valiosos.

AGRADECIMIENTOS

Deseamos expresar nuestro agradecimiento a las siguientes empresas pesqueras que han facilitado información acústica de sus boyas con ecosonda: Albacora, Calvo, Garavilla, Ugavi y Cape Fisheries, así como al Gobierno Vasco y a ISSF por financiar este trabajo.

REFERENCIAS

Amante, C. and B. Eakins (2009). "ETOPO1 1 arc-minute global relief model: procedures, data sources and analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24." National Geophysical Data Center, NOAA 10: V5C8276M.

Baidai, Y. D. A. (2020). Derivation of a direct abundance index for tropical tunas based on their associative behavior with floating objects, Université Montpellier.

Bates, D., M. Mächler, et al. (2014). "Fitting linear mixed-effects models using lme4." arXiv preprint arXiv:1406.5823.

Belkin, I. M. and J. E. O'Reilly (2009). "An algorithm for oceanic front detection in chlorophyll and SST satellite imagery." Journal of Marine Systems 78(3): 319-326.

Bertrand, A. and E. Josse (2000). "Tuna target-strength related to fish length and swimbladder volume." ICES Journal of Marine Science 57(4): 1143-1146.

Boyra, G., G. Moreno, et al. (2018). "Target strength of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) associated with fish aggregating devices (FADs)." ICES Journal of Marine Science 75(5): 1790-1802.

Capello, M., J. L. Deneubourg, et al. (2016). "Population assessment of tropical tuna based on their associative behavior around floating objects." Scientific Reports 6(1): 36415.

Gaertner, D., J. Ariz, et al. (2016). "Objectives and first results of the CECOFAD project." Collective Volume of Scientific Papers 72(2): 391-405.

Gaertner, D., S. Clermidy, et al. (2016). "Results achieved within the framework of the EU research project: Catch, Effort, and eCOsystem impacts of FAD-fishing (CECOFAD)." Acta Agriculturae Slovenica.

Hampton, I. (1996). "Acoustic and egg-production estimates of South African anchovy biomass over a decade: comparisons, accuracy, and utility." ICES Journal of Marine Science 53(2): 493-500.

ICCAT (2019). Report of the 2019 ICCAT yellowfin tuna stock assessment meeting., (Grand-Bassam, Cote d'Ivoire, 8-16 July 2019).

ICCAT (2021). Report of the 2021 ICCAT bigeye tuna stock assessment meeting., (Online, 19- 29 July 2021)

ICES (2015). Manual for International Pelagic Surveys (IPS). Series of ICES Survey Protocols. SISP 9 - IPS. 92 pp.

Katara, I., Gaertner, D., Marsac, F., Grande, M., Kaplan, D., Urtizberea, A., Abascal, F. (2018). Standardisation of yellowfin tuna CPUE for the EU purse seine fleet operating in the Indian Ocean. 20th session of the Working Party on Tropical Tuna.

Lo, N. C.-h., L. D. Jacobson, et al. (1992). "Indices of relative abundance from fish spotter data based on delta-lognormal models." Canadian journal of fisheries and aquatic sciences 49(12): 2515- 2526.

- Lopez, J., G. Moreno, et al. (2014). "Evolution and current state of the technology of echo-sounder buoys used by Spanish tropical tuna purse seiners in the Atlantic, Indian and Pacific Oceans." Fisheries Research 155: 127-137.
- Masse, J., A. Uriarte, et al. (2018). "Pelagic survey series for sardine and anchovy in ICES subareas 8 and 9—Towards an ecosystem approach." ICES cooperative research report(332).
- Maunder, M. N. and A. E. Punt (2004). "Standardizing catch and effort data: a review of recent approaches." Fisheries Research 70(2-3): 141-159.
- Maunder, M. N., J. R. Sibert, et al. (2006). "Interpreting catch per unit effort data to assess the status of individual stocks and communities." ICES Journal of Marine Science 63(8): 1373-1385.
- Moreno, G., L. Dagorn, et al. (2007). "Fish behaviour from fishers' knowledge: the case study of tropical tuna around drifting fish aggregating devices (DFADs)." Canadian journal of fisheries and aquatic sciences 64(11): 1517-1528.
- Moreno, G., Dagorn, L., Capello, M., Lopez, J., Filmalter, J., Forget, F., Sancristobal, I., . and Holland, K. (2016). "Fish aggregating devices (FADs) as scientific platforms." Fisheries Research 178: 122- 129.
- Orue, B., J. Lopez, et al. (2019). "From fisheries to scientific data: A protocol to process information from fishers' echo-sounder buoys." Fisheries Research 215: 38-43.
- Orue, B., J. Lopez, et al. (2019). "Aggregation process of drifting fish aggregating devices (DFADs) in the Western Indian Ocean: Who arrives first, tuna or non-tuna species?" PloS one 14(1): e0210435.
- Orúe Montaner, B. (2019). "Ecology and behavior of tuna and non-tuna species at drifting fish aggregating devices (DFADs) in the Indian Ocean using fishers' echo-sounder buoys."
- Oshima, T. (2008). "Target strength of Bigeye, Yellowfin and Skipjack measured by split beam echo sounder in a cage." IOTC, WPTT-22 4.
- Quinn, T. J. and R. B. Deriso (1999). Quantitative fish dynamics, oxford university Press.
- Santiago, J., J. Uranga, et al. (2019). A Novel Index of Abundance of Juvenile Yellowfin Tuna in the Indian Ocean Derived from Echosounder Buoys, IOTC–2019–WPTT21–47.
- Santiago, J., J. Uranga, et al. (2020a). A novel index of abundance of skipjack in the Indian ocean derived from echosounder buoys, IOTC-2020-WPTT22(DP)-14.
- Santiago, J., J. Uranga, et al. (2020b). "A novel index of abundance of juvenile yellowfin tuna in the Atlantic Ocean derived from echosounder buoys." Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT 76(6): 321-343.
- Santiago, J., J. Uranga, et al. (2021). " Index of abundance of juvenile bigeye tuna in the Atlantic Ocean derived from echosounder buoys (2010-2020)." Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT, 78(2): 231-252.
- Scott, G. P., & Lopez, J. (2014). The use of FADs in Tuna Fisheries. European Parliament. Policy Department B: Structural and Cohesion Policies: Fisheries. IP/B/PECH/IC/2013.
- Simmons, E. and D. MacLennan (2005). "Fisheries acoustics." Theory and Practice. Second edition published by Blackwell Science.
- Team, R. C. (2013). R: A language and environment for statistical computing.
- Torres-Irineo, E., D. Gaertner, et al. (2014). "Changes in fishing power and fishing strategies driven by new technologies: The case of tropical tuna purse seiners in the eastern Atlantic Ocean." Fisheries Research 155: 10-19.
- Wain, G., Guéry, L., Kaplan, D. M., & Gaertner, D. (2021). "Quantifying the increase in fishing efficiency due to the use of drifting FADs equipped with echosounders in tropical tuna purse seine fisheries." ICES Journal of Marine Science 78(1), 235-245.
- Wessel, P., and W. H. F. Smith (1996). " A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database." J. Geophys. Res 101(B4), 8741-8743.

TABLE 1. Technical specifications of different buoy models and observed values over analysis data.
TABLA 1. Especificaciones técnicas de diferentes modelos de boyas y valores observados sobre datos de análisis.

Modelo	Configuración típica						Valores promedio observados sobre datos de análisis	
	Ángulo de haz	Frecuencia de sonda	Potencia	Frecuencia de muestreo acústico (<i>ping rate</i>)	Datos acústicos diarios registrados	Frecuencia de transmisión	Número de boyas	Frecuencia de muestreo
DS+	32°	190.5 kHz	100 W	3	3	24h	1428	1.36
DSL+	32°	190.5 kHz	100 W	3	3	24h	12462	2.82
ISL+	32°	190.5 kHz	100 W	15 min	variable (reinicio al anochecer)	24h	23	1.67
ISD+	32°	200/38 kHz (38 kHz no se brinda)	100 W	15 min	variable (reinicio al anochecer)	24h	6214	1.21
SLX+	32°	200	100 W	5 min	variable (basado en alarmas o en el amanecer)	24h	785	1.98

TABLE 2. Deviance table for the GLM lognormal model of the 2012-2022 period.

TABLA 2. Tabla de desviación del modelo lognormal MLG del período 2012-2022.

Variable	Df	Deviance	Resid..Df	Resid..Dev	F	Pr..F.	Dev..Exp
NULL	NA	NA	7074	10472	NA	NA	NA
yyqq	43	706	7031	9766	17	0.0000	6.74 %
area	36	965	6995	8801	27	0.0000	9.21 %
model	2	43	6993	8758	22	0.0000	0.41 %
den	1	22	6992	8736	23	0.0000	0.21 %
chlfront	1	38	6991	8698	39	0.0000	0.36 %
sst	1	2	6990	8696	2	0.1997	0.02 %
sstfront	1	9	6989	8687	9	0.0022	0.09 %
yyqq:area	1050	2867	5939	5820	3	0.0000	27.38 %

TABLE 3. Nominal and standardized Buoy-derived Abundance Index for the period 2012-2022. Standard errors and coefficient of variations of the standardized series are also included.

TABLA 3. Índice de Abundancia Derivado de las Boyas nominal y estandarizado para el período 2012-2022. También se incluyen los errores estándar y el coeficiente de variación de la serie estandarizada.

Quarter	Index nominal	BAI Index	BAI se	BAI cv
12Q1	3.412	7.072	3.858	0.546
12Q2	6.750	5.484	1.325	0.242
12Q3	4.071	3.153	0.710	0.225
12Q4	1.675	1.301	0.292	0.224
13Q1	5.581	3.582	0.705	0.197
13Q2	2.943	2.072	0.421	0.203
13Q3	1.650	1.523	0.331	0.217
13Q4	2.196	1.570	0.306	0.195
14Q1	2.556	1.955	0.419	0.215
14Q2	2.024	1.860	0.405	0.218
14Q3	1.537	1.416	0.316	0.223
14Q4	1.392	1.162	0.229	0.197
15Q1	3.231	2.890	0.602	0.208
15Q2	2.392	2.141	0.464	0.217
15Q3	1.786	1.809	0.291	0.161
15Q4	1.580	1.614	0.352	0.218
16Q1	2.329	2.091	0.452	0.216
16Q2	1.414	1.450	0.342	0.236
16Q3	2.557	2.187	0.513	0.235
16Q4	2.046	1.690	0.394	0.233
16Q4	2.046	1.690	0.394	0.233
17Q1	1.771	1.470	0.320	0.218
17Q2	1.726	1.345	0.269	0.200
17Q3	2.172	1.613	0.351	0.218
17Q4	2.107	1.560	0.349	0.223
18Q1	1.867	1.476	0.313	0.212
18Q2	1.671	1.233	0.247	0.200
18Q3	0.832	0.735	0.162	0.220
18Q4	2.513	1.806	0.393	0.218
19Q1	1.874	1.862	0.392	0.211
19Q2	2.851	1.864	0.406	0.218
19Q3	1.597	1.570	0.367	0.234
19Q4	2.510	2.248	0.527	0.234
20Q1	4.220	3.537	0.778	0.220
20Q2	2.862	2.310	0.468	0.203
20Q3	2.445	2.082	0.443	0.213
20Q4	2.867	2.373	0.490	0.206
21Q1	1.488	1.044	0.235	0.225
21Q2	1.281	0.956	0.200	0.209
21Q3	1.851	1.197	0.237	0.198
21Q4	1.323	1.089	0.246	0.226
22Q1	1.876	1.258	0.263	0.209
22Q2	1.699	1.723	0.389	0.226
22Q3	1.179	1.050	0.241	0.229
22Q4	1.420	1.459	0.341	0.234

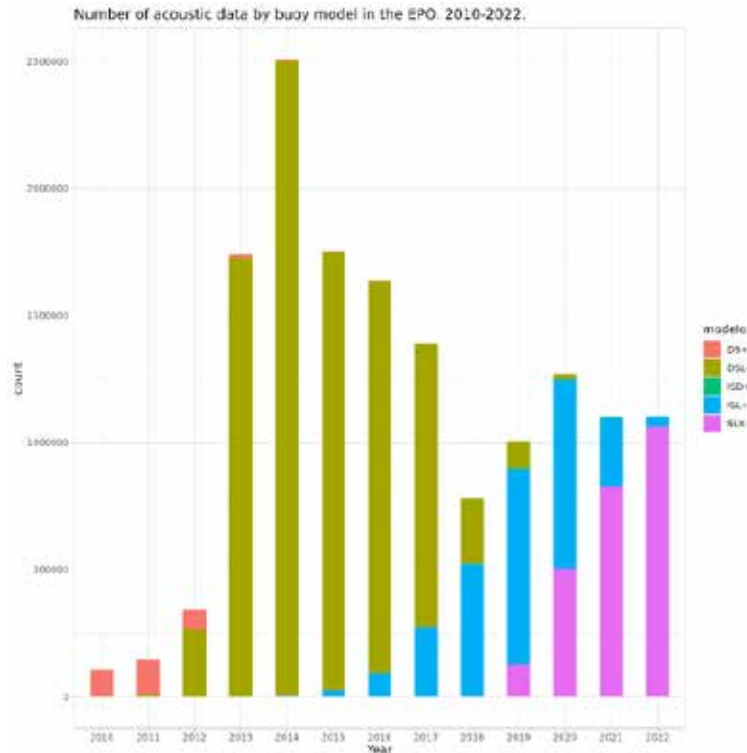


FIGURE 1. Buoy data distribution per model in the Pacific Ocean (2010-2022).

FIGURA 1. Distribución de datos de boyas por modelo en el Océano Pacífico (2010-2022).

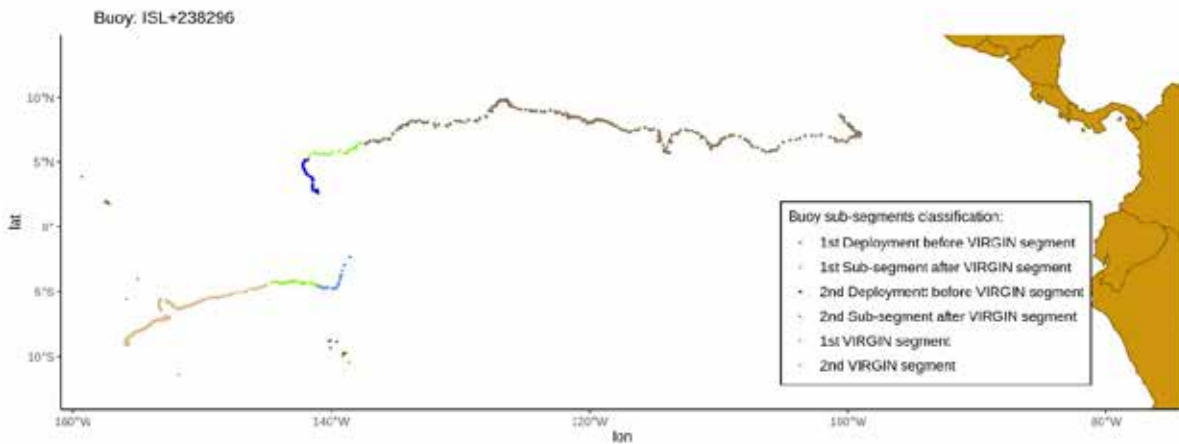


FIGURE 2. Example of “virgin” segments used for the calculation of the BAI index. Trajectories correspond to buoy ISL+284966 with two different paths representing drifts of different FADs. A virgin segment is defined as the segment of a buoy trajectory whose associated FAD likely represents a new deployment, which has been potentially colonized by tuna and not already fished. We consider as virgin segments (i.e. when tuna has aggregated to FAD) those segments of trajectories from 20-35 days at sea. “Virgin” segments are shown in green.

FIGURA 2. Ejemplo de segmentos “vírgenes” utilizados para el cálculo del índice IAB. Las trayectorias corresponden a la boya ISL+284966 con dos rutas distintas que representan derivas de diferentes plantados. Un segmento virgen se define como el segmento de la trayectoria de una boya cuyo plantado asociado probablemente representa una nueva siembra, que ha sido potencialmente colonizado por atunes y que aún no se ha pescado. Consideramos como segmentos vírgenes (es decir, cuando el atún se ha agregado a un plantado) aquellos segmentos de trayectorias de 20 a 35 días en el mar. Los segmentos “vírgenes” se muestran en verde.

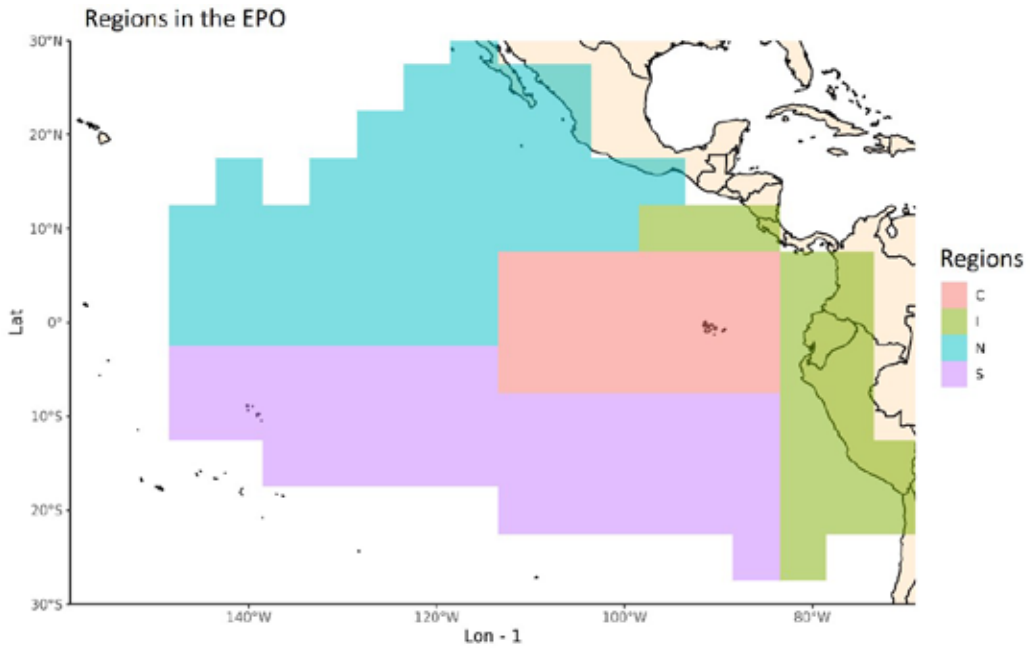


FIGURE 3. Length-frequency sampling areas defined by the IATTC staff for analyses of tropical tuna catches associated with floating objects.

FIGURA 3. Áreas de muestreo de frecuencia de tallas definidas por el personal de la CIAT para análisis de capturas de atunes tropicales asociadas con objetos flotantes.

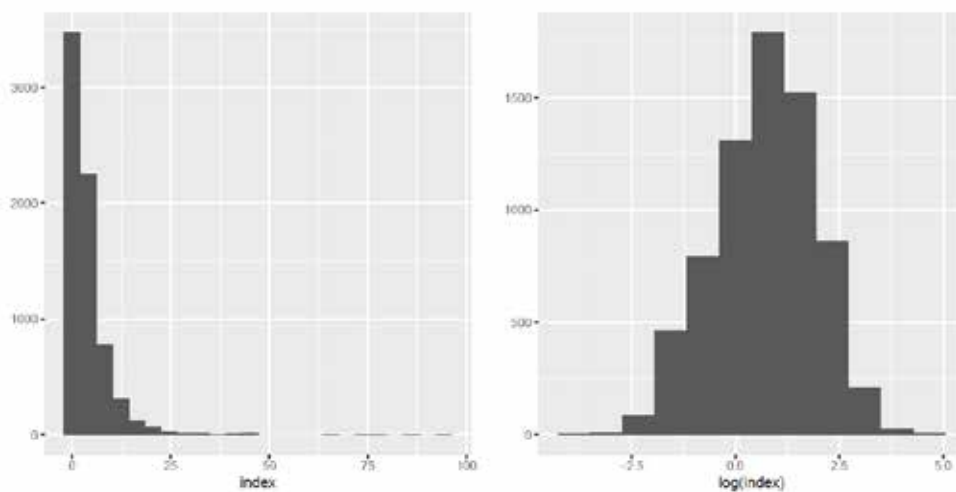


FIGURE 4. Histograms of the nominal values (left) and the log transformed nominal values (right) of the Buoy-derived Abundance Index (0.9 quantile of the integrated acoustic energy observations in "virgin" sequences).

FIGURA 4. Histogramas de los valores nominales (izquierda) y los valores nominales transformados logarítmicamente (derecha) del Índice de Abundancia Derivado de las Boyas (cuantil de 0.9 de las observaciones de energía acústica integrada en secuencias "vírgenes").

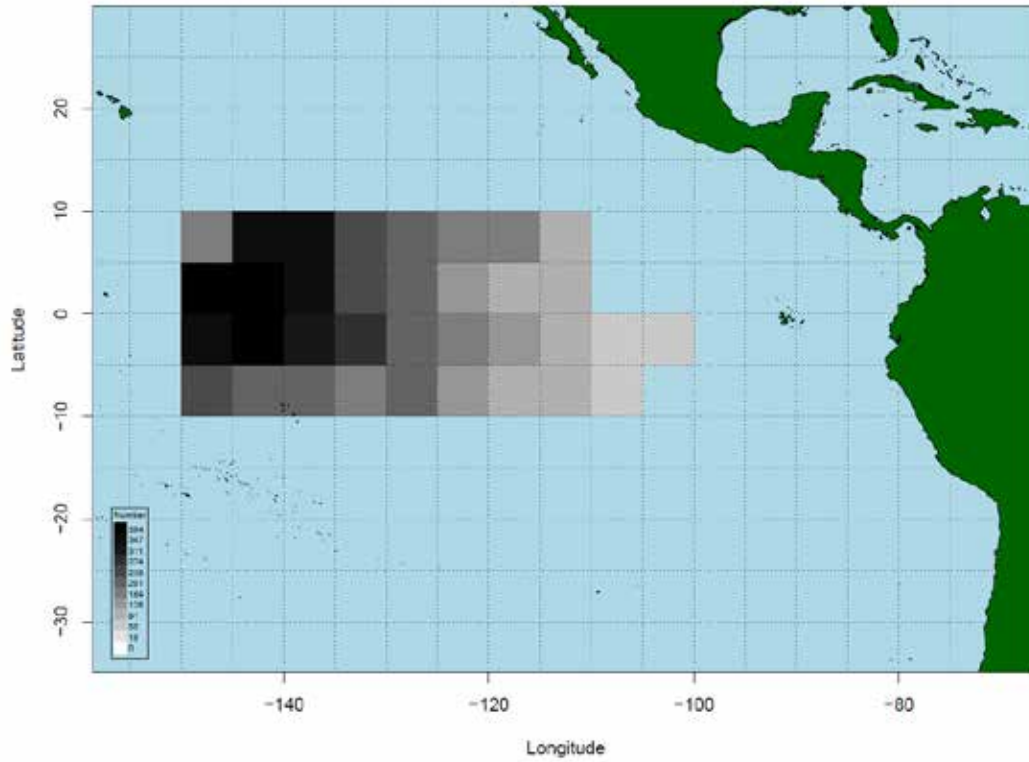


FIGURE 5. Spatial distribution [5°x5°] of the “virgin” sequences of buoy trajectories that have been used in the GLM analysis.

FIGURA 5. Distribución espacial [5°x5°] de las secuencias “vírgenes” de trayectorias de boyas que se han utilizado en el análisis MLG.

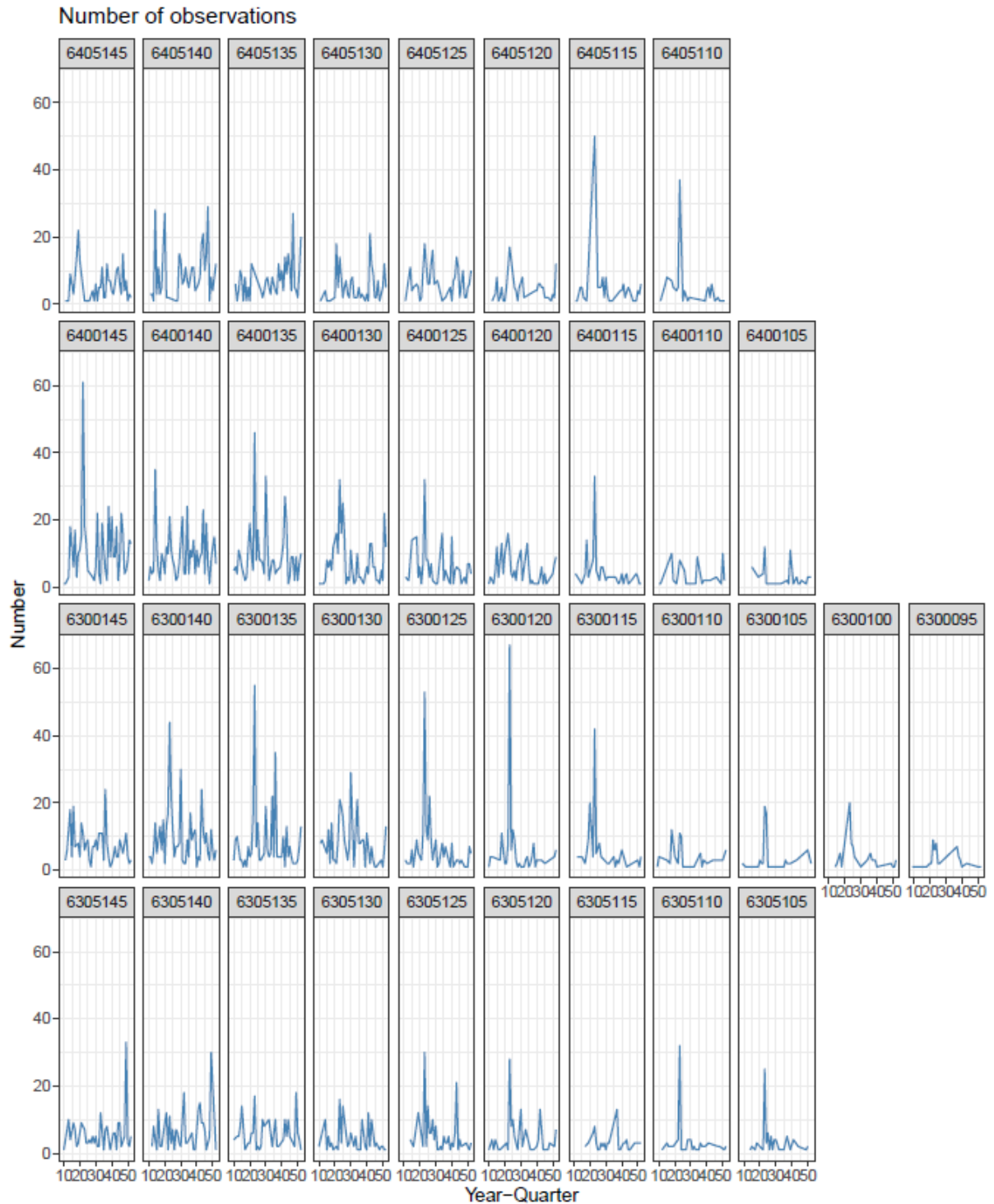


FIGURE 6. Quarterly evolution of the number of observations (“virgin” sequences of buoy trajectories) on a $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ grid from 2012 to 2022.

FIGURA 6. Evolución trimestral del número de observaciones (secuencias “vírgenes” de trayectorias de boyas) en una cuadrícula de $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ de 2012 a 2022.

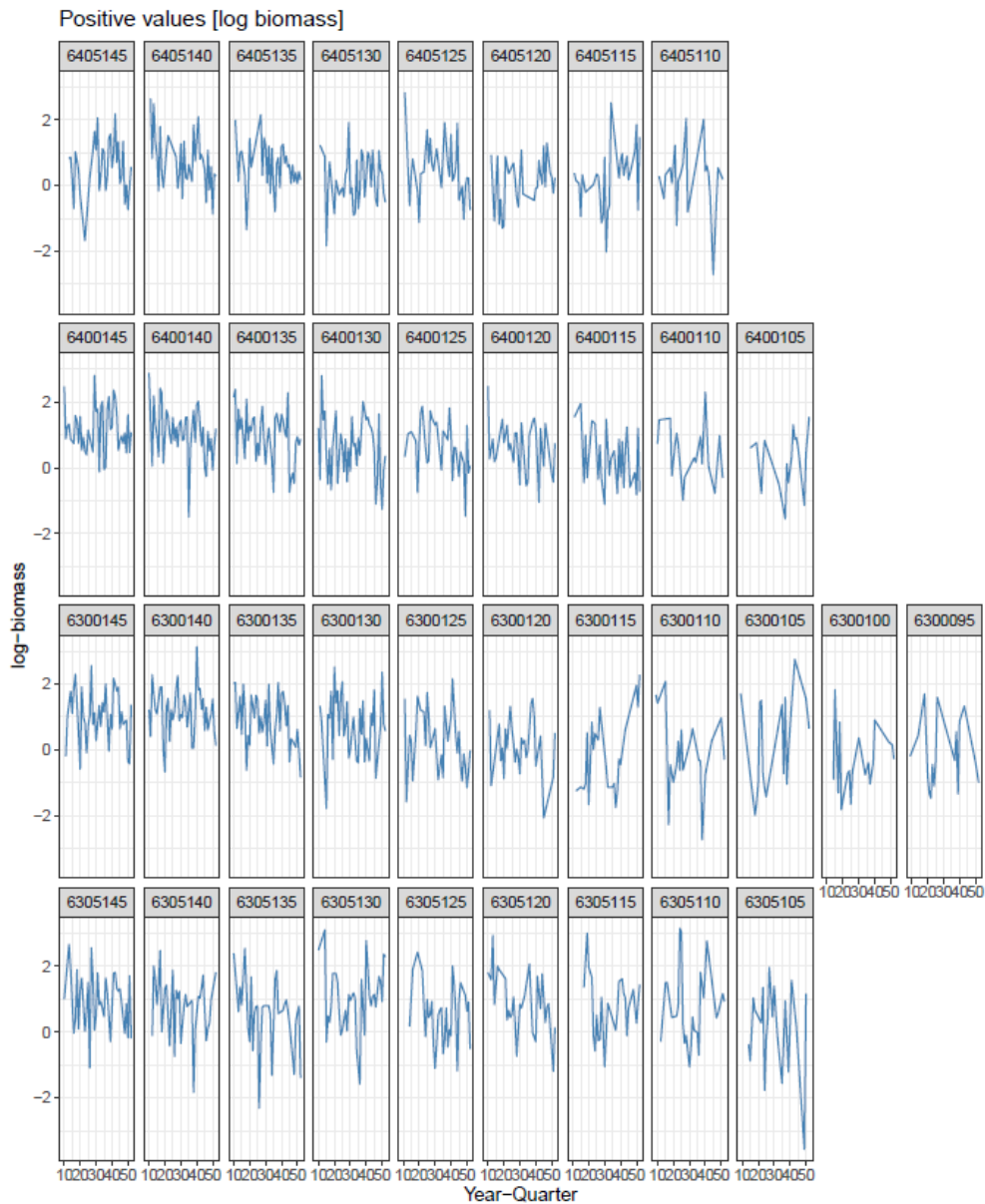


FIGURE 7. Quarterly evolution of the nominal log BAI index in the Atlantic Ocean by squares of 5x5 degrees from 2012 to 2022.

FIGURA 7. Evolución trimestral del índice IAB logarítmico nominal en el Océano Atlántico por cuadrados de 5x5 grados de 2012 a 2022.

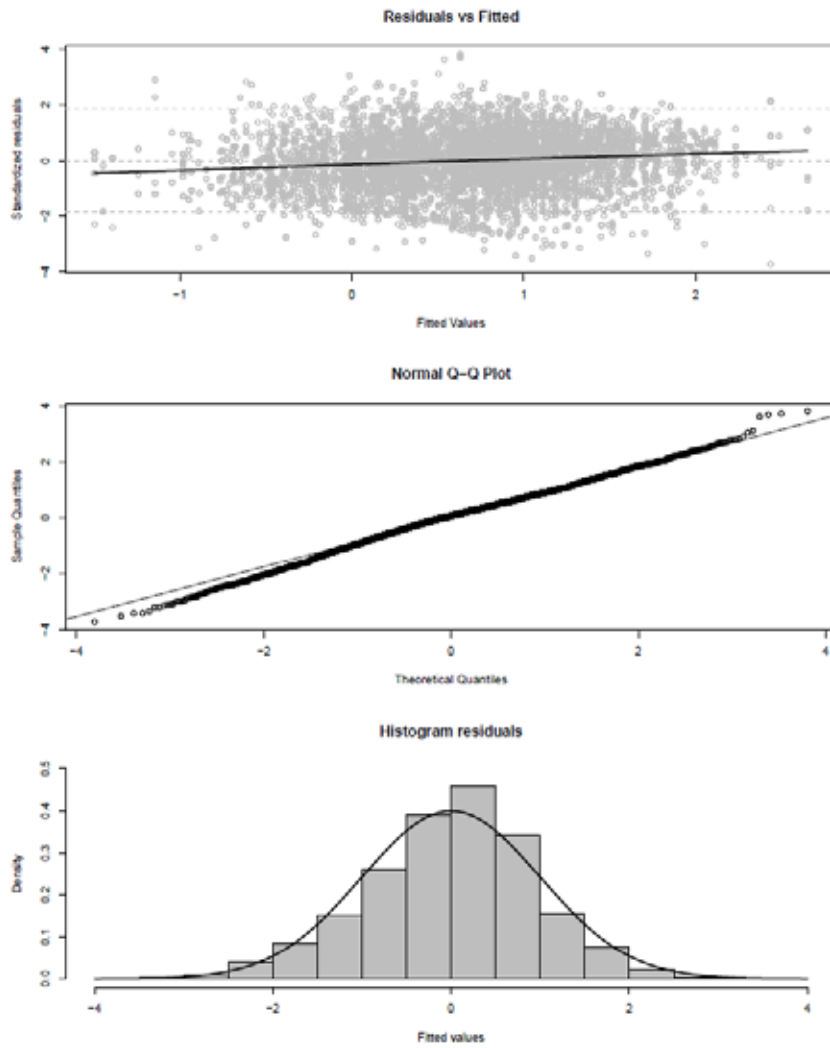


FIGURE 8. Diagnostics of the lognormal model selected for the period 2012-2022: residuals vs fitted, Normal Q-Q plot and frequency distributions of the residuals.

FIGURA 8. Diagnóstico del modelo lognormal seleccionado para el periodo 2012-2022: residuales vs. ajustados, gráfico Q-Q normal y distribuciones de frecuencia de los residuales.

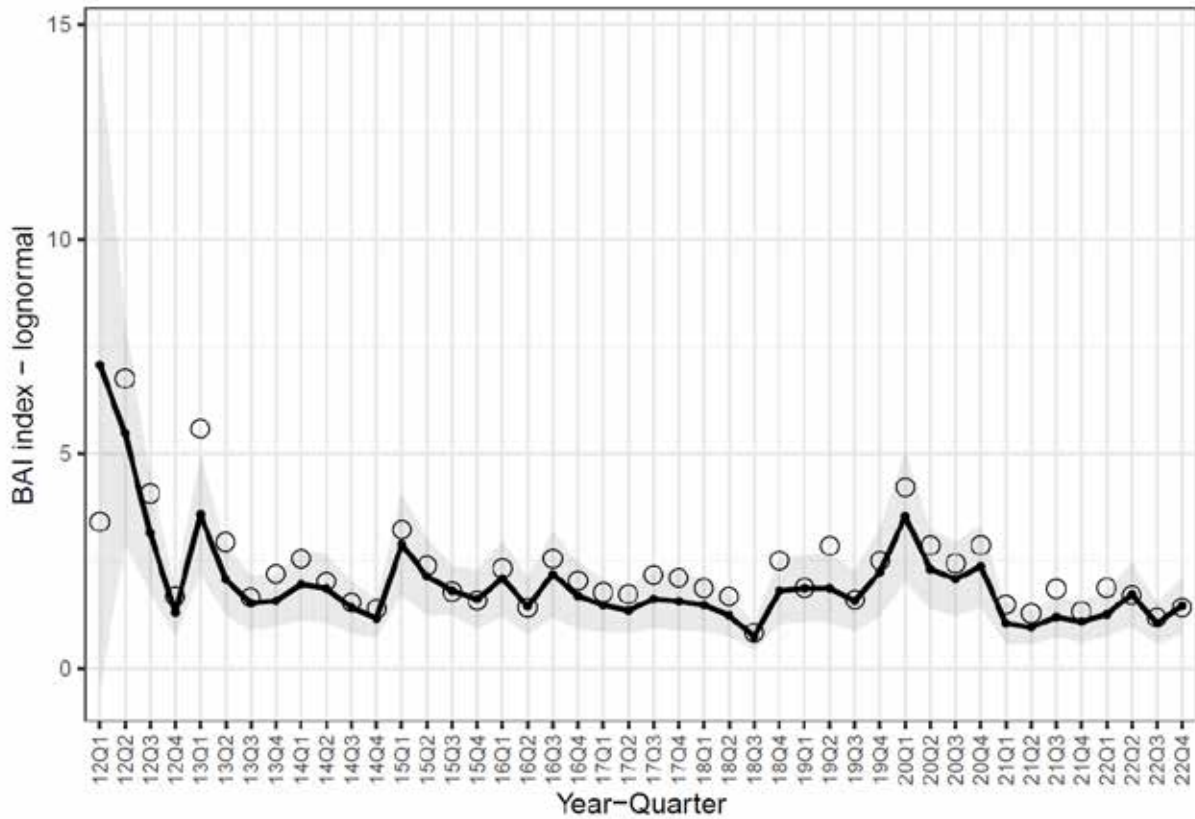


FIGURE 9. Time series of nominal (circles) and standardized (continuous line) Buoy-derived Abundance Index for the period 2012-2022. The 95% upper and lower confidence intervals of the standardized BAI index are shown by the grey shaded area.

FIGURA 9. Serie de tiempo del Índice de Abundancia Derivado de Boyas nominal (círculos) y estandarizado (línea continua) para el período 2012-2022. Los intervalos de confianza superior e inferior del 95% del índice IAB estandarizado se muestran en el área sombreada en gris.

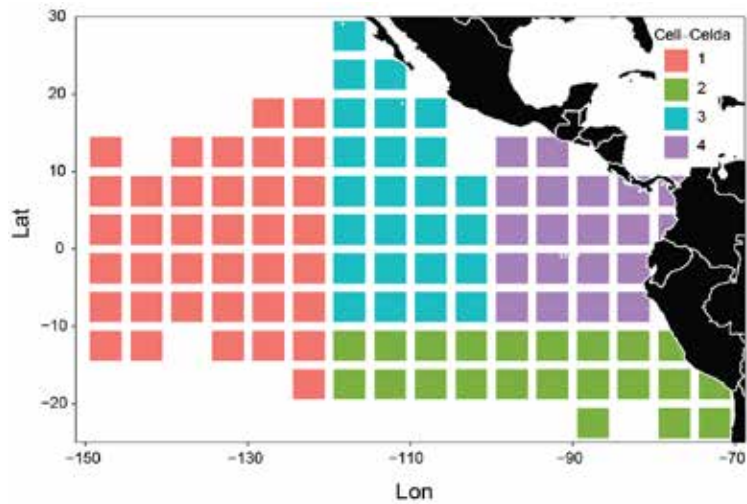


FIGURE 10. Areas corresponding to the floating-object fishery definitions used in the stock assessment of skipjack tuna in the EPO in 2022.

FIGURA 10. Áreas correspondientes a las definiciones de la pesquería sobre objetos flotantes utilizadas en la evaluación de la población de atún barrilete en el OPO en 2022.