



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y
OCEANOGRÁFICAS**



**“Enfoque de evaluación del stock de sardina austral
(*Sprattus fuegensis*) con modelos de producción
Bayesianos JABBA en el mar interior de la Región de
Aysén”**

Francisco Ignacio Álvarez Hidalgo

**Seminario de Título presentado al
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFÍA DE LA UNIVERSIDAD DE
CONCEPCIÓN**

Para optar al Título de BIÓLOGO MARINO

Concepción - Chile 2025.

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFÍA**

Este Seminario de Título ha sido realizado en el Departamento de Oceanografía de la Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas.

Profesor(a) Guía

Dr. en Oceanografía Luis Cubillos S.

**Ha sido aprobada por la
Siguiete Comisión Evaluadora**

M. Sc. María José Cuevas.

M. Sc. Elson Leal Faúndez.

Jefe de Carrera

Dr. Ariel Valenzuela.

Dedicatoria

**Dedicado a mi madre,
familia y amigos que
siempre han creído y
confiado en mí pese a toda
la adversidad.**

Agradecimientos.

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que han formado parte fundamental en mi formación académica y personal.

Agradezco a mi profesor guía, Dr. Luis Cubillos Santander, por su dedicación, paciencia y por todo el conocimiento que me ha transmitido a lo largo de este proceso. Su orientación constante y el apoyo de su parte ha sido una fuente de motivación e inspiración para mí.

Al Instituto de Investigación Pesquera (INPESCA) y el jefe del departamento de pesquería Sergio Núñez, por brindarme la oportunidad de adentrarme mucho más en el área de pesquerías, permitiéndome comprender en profundidad los modelos de evaluación, los parámetros biológicos y la integración de datos provenientes de índices acústicos.

A los académicos, docentes y auxiliares de la Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas, gracias por su compromiso con la enseñanza y por haber contribuido significativamente a mi formación como biólogo marino.

Y a todas las personas que me han acompañado en este camino, especialmente en los momentos más difíciles, gracias por su ayuda, por confiar en mis ideas y por creer en mí cada día.

Índice de contenidos.

Índice de figuras.....	6
Índice de tablas.....	7
Resumen.....	8
Abstract	9
1.- Introducción	10
1.1.- Exposición general del problema.....	10
1.2.- Antecedentes generales de la pesquería de sardina austral.....	12
1.3.- Aspectos biológicos de sardina austral.....	13
1.4.- Evaluación acústica de sardina austral.....	15
2. Hipótesis.....	17
3. Objetivos	17
3.1 General	17
3.2 Específicos	17
4.- Materiales y métodos	18
4.1.- Área de estudio	18
4.2.- Fuente de datos.....	18
4.3.- Modelo de evaluación de stock JABBA.....	19
4.4.- Procedimiento de evaluación de stock	22
5.- Resultados	24
6.- Discusión.....	30
7.- Conclusiones	33
8.- Anexo.....	35
9.- Referencias bibliográficas	36

Índice de figuras.

Figura N°1: Desembarque y cuota de captura anual (toneladas) de sardina austral (*Sprattus fuegensis*) en el mar interior de la Región de Aysén (2012–2024).

(Fuente: IFOP).

Figura N°2: Ejemplo de una de las rutas de muestreo acústico y lances de pesca de identificación realizados en la región de Aysén, en Abril-Mayo de 2022. Crucero PELAGUIN 2204 (Fuente: Castillo et al., 2022).

Figura N°3: Índice de biomasa de sardina austral en la Región de Aysén (2013-2024) (Fuente: elaboración propia en base a datos de IFOP).

Figura N°4: Área de distribución de la sardina austral y área estudio en la Región de Aysén, Chile.

Figura N°5: Diagrama de flujo del proceso de configuración y ejecución del modelo JABBA.

Figura N°6: Residuales del índice de biomasa acústico de sardina austral y RMSE del modelo M1 de Schaefer para la dinámica de la biomasa de la sardina austral.

Figura N°7: Residuales del índice de biomasa acústico de sardina austral y RMSE del modelo M4 de Schaefer para la dinámica de la biomasa de la sardina austral.

Figura N°8: Residuales del índice de biomasa acústico de sardina austral y RMSE del modelo M4 de Pella-Tomlinson (libre) para la dinámica de la biomasa de la sardina austral.

Figura N°9: Distribución marginal de los parámetros estimados que definen el excedente de producción del modelo M1 (K , r , $m=2$, ψ , q y σ^2) y la dinámica de biomasa de sardina austral. PPMR es la razón prior-posterior para la media del parámetro, mientras que PPVR es la razón prior-posterior para la varianza del parámetro.

Figura N°10: Biomasa, mortalidad por pesca, razón $B/BRMS$ y objetivo de manejo (línea horizontal segmentada), razón $F/FRMS$, razón B/B_0 y excedente de producción en función de la biomasa según el modelo M1 con $CV=0.15$ para el índice de biomasa acústico.

Figura N°11: Diagrama Kobe para la trayectoria de la biomasa y mortalidad por pesca entre el 2013 (cuadrado) y 2024 (triángulo). Se muestra la probabilidad de estar en los cuadrantes del diagrama.

Figura N°12: Análisis retrospectivo de la evaluación de sardina austral con el modelo seleccionado M1 de Schaefer con $CV=0.15$ para la importancia del índice de biomasa acústico.

Índice de tablas.

Tabla N°1: Capturas e índice de biomasa acústico de sardina austral (*Sprattus fuegensis*) en el mar interior de la Región de Aysén (2012–2024).

Tabla N°2: Modelos de excedentes de producción definidos por el parámetro m considerados en el enfoque de evaluación de stock para la sardina austral del mar interior de la Región de Aysén.

Tabla N°3: Comparación del criterio de información de devianza (DIC) entre modelos de producción JABBA y escenarios de coeficiente de variación (CV).

Tabla N°4: Parámetros estimados y parámetros dependientes de la evaluación de stock de sardina austral con el modelo JABBA M1, de Schaefer (CV=0,15). L_i y L_s son los intervalos de confiabilidad.

Tabla N°5: Parámetros estimados y parámetros dependientes de la evaluación de stock de sardina austral con el modelo JABBA M4, de Schaefer (CV=0,15). L_i y L_s son los intervalos de confiabilidad.

Resumen.

En el mar interior de la Región de Aysén, se encuentra la sardina austral (*Sprattus fuegensis*), la cual es una especie clave en el ecosistema marino de la región austral de Chile y es un recurso de importancia económica para las comunidades pesqueras artesanales de la Región de Aysén, a pesar de ser una especie de gran importancia comercial, aún se desconocen varios aspectos de su biología y aún más importante carece de un plan de manejo pesquero.

Los modelos tradicionales de evaluación de stocks que suelen depender exclusivamente de los datos de capturas han demostrado ser insuficientes para reflejar con precisión la dinámica poblacional de esta especie, especialmente en un entorno caracterizado por una alta variabilidad ambiental y limitaciones en la disponibilidad de datos.

En este contexto, el modelo de evaluación JABBA (Just Another Bayesian Biomass Assessment) surge como una herramienta innovadora que permite integrar diferentes fuentes de información, como el índice de biomasa acústico, para proporcionar estimaciones más robustas del estado del recurso. Este modelo bayesiano permite incorporar la incertidumbre inherente a los datos y mejorar la precisión de las proyecciones, contribuyendo así a la toma de decisiones informadas para la gestión de la pesquería.

Se evaluaron cuatro modelos de producción (Schaefer, Fox, Pella-Tomlinson con m fijo y m libre) bajo distintos valores del coeficiente de variabilidad ($CV = 0.1, 0.15$ y 0.2). El modelo Schaefer (M1) con $CV = 0.15$ fue seleccionado como modelo principal, al mostrar el mejor desempeño global y estabilidad retrospectiva. El modelo M4 Pella-Tomlinson con m libre se utilizó como modelo de contraste por su buena capacidad de ajuste y flexibilidad estructural.

Los resultados indican que la sardina austral se encuentra actualmente en un estado saludable, con niveles de biomasa superiores al punto de referencia objetivo y mortalidad por pesca por debajo del objetivo de manejo. Sin embargo, se detectaron importantes brechas en el monitoreo biológico, reproductivo y genético del recurso. En consecuencia, se propone implementar un plan de manejo pesquero específico, fortalecer el seguimiento mensual y avanzar hacia modelos estructurados por talla.

Este estudio entrega herramientas metodológicas sólidas y evidencia científica para apoyar la toma de decisiones y avanzar hacia una gestión adaptativa, sostenible y contextualizada del recurso en la Región de Aysén.

Abstract.

In the inland sea of the Aysén Region, the Southern Sardine (*Sprattus fuegensis*) is found, which is a key species in the marine ecosystem of the southern region of Chile and is an economically important resource for the artisanal fishing communities of the Aysén Region, despite being a species of great commercial importance, several aspects of its biology are still unknown and even more importantly it lacks a fishery management plan.

Traditional stock assessment models that tend to rely exclusively on catch data have proven to be insufficient to accurately reflect the population dynamics of this species, especially in an environment characterized by high environmental variability and data availability limitations.

In this context, the JABBA (Just Another Bayesian Biomass Assessment) model emerges as an innovative tool that allows the integration of different sources of information, such as the acoustic biomass index, to provide more robust estimates of the state of the resource. This Bayesian model allows incorporating the uncertainty inherent in the data and improving the accuracy of projections, thus contributing to informed decision making for fishery management.

Four production models (Schaefer, Fox, and Pella-Tomlinson with fixed and free m) were evaluated under different values of the coefficient of variability ($CV = 0.1, 0.15,$ and 0.2). The Schaefer model (M1) with $CV = 0.15$ was selected as the main model, as it showed the best overall performance and retrospective stability. The Pella-Tomlinson model with free m (M4) was used as a contrast model due to its good fit and structural flexibility

The results indicate that the southern sardine is currently in a healthy state, with biomass levels above the target reference point and fishing mortality below the target. However, important gaps were detected in the biological, reproductive and genetic monitoring of the resource. Consequently, it is proposed to implement a specific fishery management plan, strengthen monthly monitoring and move towards size-structured models.

This study provides solid methodological tools and scientific evidence to support decision-making and move towards an adaptive, sustainable and contextualized management of the resource in the Aysén Region.

1.- Introducción.

1.1.- Exposición general del problema.

A nivel global, la sobreexplotación de recursos pesqueros es una de las principales amenazas para la sostenibilidad de los ecosistemas marinos. Por lo mismo, la evaluación del estado de situación de las pesquerías es fundamental para mejorar el manejo pesquero y la sustentabilidad de estas mismas (Punt, 2023). La evaluación de stock es un proceso operacional y continuo que provee de información actualizada y oportuna sobre el estado de los recursos objetivos, considerando las fuentes de incertidumbre y niveles de riesgo necesarios para la toma de decisiones.

En Chile, pesquerías como la de la sardina austral (*Sprattus fuegensis*) del mar interior de la Región de Aysén enfrentan desafíos para la evaluación de stock debido a limitaciones relacionadas tanto con datos como con los parámetros de historia de vida. A su vez, la ausencia de planes de manejo específicos puede agravar el problema si no se toman las medidas preventivas correctas. En efecto, aun cuando se cuenta con datos de desembarque anuales e índices de biomasa estimados a partir de cruceros de evaluación acústica (Espíndola, 2024), la evaluación de stock se realiza con modelos de biomasa dinámica que se basan sólo en datos de desembarque, tales como los métodos Only-Catch Optimized Model (OCOM) de Zhou et al. (2017) y CMSY (Froese et al., 2017), respectivamente.

Esto contrasta notablemente con el stock de sardina austral del mar interior de la Región de Los Lagos, cuya productividad se evalúa con modelos de evaluación estructurados por edad, ya que se cuenta con datos de desembarques anuales, composición de tallas en las capturas y cruceros de evaluación, parámetros de crecimiento, mortalidad natural, madurez, peso medio a la talla, e índices de abundancia relativa como la captura por unidad de esfuerzo y de biomasa acústica (Leal et al., 2018).

La sardina austral es pez pelágico pequeño de gran valor económico, tanto para la Región de Aysén como para la Región de Los Lagos. En estas regiones, la pesquería de sardina austral tiene un rol destacado en la economía local, representando una fuente clave de ingresos para comunidades costeras, y aunque las capturas han mostrado variaciones y se observa una disminución en los años más recientes, sin lograr cubrir las cuotas de capturas (Figura 1). En parte, esta situación se podría deber a sobrepesca y sobreexplotación, de tal manera que evaluar el estatus de la pesquería en la Región de Aysén podría mejorar notablemente al incorporar el índice de biomasa acústica utilizando modelos de biomasa dinámicos, particularmente modelos en el espacio de los estados como el modelo Just Another Bayesian Biomass Assessment (JABBA) de Winker et al. (2018), que permite diferentes hipótesis estructurales para el excedente de producción diferentes al modelo logístico o de Schaefer, tales como tipo Fox y Pella-Tomlinson.

En este contexto, se desarrolla un enfoque de evaluación de stock para establecer un diagnóstico del estado de situación actual de la sardina austral en el mar interior de la Región de Aysén. El enfoque de evaluación considera, además de los desembarques, el índice de biomasa acústico con el modelo de evaluación JABBA (Just Another Bayesian Biomass Assessment) proporcionará estimaciones robustas del excedente de producción y del estado de situación del stock de sardina austral en el mar interior de la Región de Aysén.

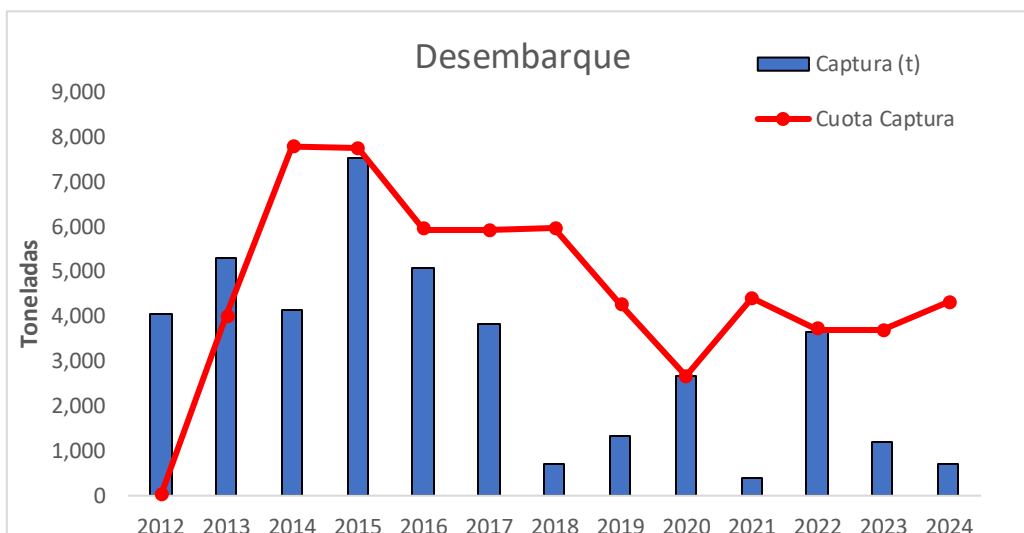


Figura 1. Desembarque y cuota de captura anual (toneladas) de sardina austral (*Sprattus fuegensis*) en el mar interior de la Región de Aysén (2012–2024). (Fuente: IFOP).

Los enfoques Bayesianos de evaluación de stock son más robustos al utilizar un enfoque en el espacio de los estados, en que la biomasa del stock se modela como una variable no observada con error de proceso, y que el índice de biomasa acústica se mide con error de observación. La estimación del error de proceso y de observación sólo es factible considerando información priors para los parámetros que determinan la dinámica de la biomasa utilizando una estimación Bayesiana con MCMC (Markov Chain Monte Carlo). El modelo JABBA se utiliza para evaluar por ejemplo stocks de atunes como el Atlántico bigeye tuna (*Thunnus obesus*), atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*), pez espada (*Xiphias gladius*), y tiburones como *Lamna nasus*, entre otros recursos por investigadores de la Comisión Internacional para la Conservación del Atún Atlántico (Ortiz et al., 2022; Sant’Ana et al., 2020; Tian et al., 2022; Winker et al., 2020). De igual manera Han et al. (2023) analizó tendencias de biomasa de *Larimichthys polyactis* utilizando JABBA.

Los enfoques de evaluación que consideran diferentes hipótesis estructurales se esperan puedan aportar al manejo de las pesquerías, ya que la función de producción puede ser más o menos resiliente para evitar la sobreexplotación de un

recurso. Para el caso de la sardina austral del mar interior de la Región de Aysén, es fundamental analizar el estado de situación respecto de puntos biológicos de referencia determinados con mayor certidumbre para avanzar hacia una pesca extractiva sustentable. Además, es importante promover la sustentabilidad a largo plazo y mejorar los métodos de evaluación de stock que sean robustos, de esta forma será posible aportar a la conservación de este recurso marino en esta importante área del sur de Chile.

La evaluación y manejo de los recursos pesqueros son fundamentales para garantizar la conservación y la sostenibilidad de las poblaciones marinas explotadas. Para hacer efectiva la evaluación de las poblaciones, es esencial contar con información actualizada sobre el estado en el que se encuentra una especie objetivo. De esta manera, la gestión de la pesca requiere asesoramiento técnico oportuno para la toma de decisiones, tomando en cuenta las fuentes de incertidumbre y los niveles de riesgo que se utilizan (Gebremedhin et al., 2021; Punt, 2023). Los modelos de evaluación de stocks varían según su complejidad, estos dependen de la disponibilidad y la calidad de los datos obtenidos. Estos modelos pueden ser modelos sencillos en los que se utilizan series de tiempo de capturas y/o muestras de frecuencia de tallas, mientras que otros modelos más complejos o integrados, ricos en datos, se basan en datos provenientes de la pesquería y también se incluyen estimaciones realizadas mediante cruceros de investigación (Ovando et al., 2022).

1.2.- Antecedentes generales de la pesquería de sardina austral.

La sardina austral (*Sprattus fuegensis*) es un recurso pesquero clave en la Patagonia chilena debido a su relevancia económica para la Región de Los Lagos y Región de Aysén, la sardina austral tiene una importancia crucial para la economía local ya que es un recurso explotado por pesquerías artesanales destinadas principalmente a la reducción de aceite y harina de pescado. Sin embargo, la actividad pesquera en Aysén ha mostrado fluctuaciones significativas en los últimos años, con desembarques promedio inferiores a 5 mil toneladas desde 2012. La falta de un plan de manejo efectivo y la ausencia de modelos de evaluación de stock basados en datos robustos han determinado que el estado de situación sea incierto debido al enfoque de evaluación basado sólo en datos de captura.

La flota pesquera artesanal se caracteriza por embarcaciones con tamaño máximo de 18 m de eslora y de hasta 100 m³ de capacidad de bodega. En la Región de Aysén, la pesquería de sardina austral muestra una actividad esporádica, en la cual entre 2 y 10 embarcaciones de cerco han declarado desembarque de sardina austral, desde el año 2012 estas embarcaciones operan en las proximidades de Puerto Chacabuco, ya que en este puerto se encuentra la empresa pesquera que compra la materia prima en su totalidad, la cual tiene como principal destino la reducción (aceite y harina de pescado).

La pesquería se encuentra bajo Régimen Artesanal de Extracción (RAE), sujeta al establecimiento de cuotas anuales de captura. De acuerdo con informes realizados por IFOP (Espíndola, 2024), el Comité Científico de Pelágicos Pequeños considera que el estatus del stock de la sardina austral es de explotación plena en la Región de Aysén. En términos metodológicos, los modelos tradicionales empleados en la Región de Aysén están basados principalmente en datos de captura, ya que la información del índice acústico se utiliza de manera separada, lo que genera incertidumbre en el estado del recurso. No obstante, la evaluación de stock 2024 (Espíndola, 2024), indica que la biomasa de sardina austral experimentó una reducción de hasta un 82% respecto de las condiciones iniciales, estimándose una mortalidad por pesca moderada sin síntomas de sobrepesca. Estas condiciones subrayan necesidad de implementar metodologías más robustas que permitan diagnosticar el estado actual del recurso, establecer puntos de referencia biológicos claros y diseñar estrategias de manejo adaptativas para evitar la sobreexplotación y posibles colapsos poblacionales.

1.3.- Aspectos biológicos de sardina austral.

La sardina austral (Clupeiformes: Clupeidae) presenta una coloración gris-azulado en el dorso, tornándose blanco hacia el vientre, sin manchas oscuras en los flancos, y al igual que otras especies de la misma familia, se podría confundir con la sardina común (*Strangomera bentincki*), pero se diferencia de esta por no tener dientes en la mandíbula superior y presentar unos pocos en posición anterior en la mandíbula inferior.

Es un pez pelágico pequeño, menor a 20 cm de longitud total, habita principalmente en áreas costeras, canales y fiordos, desde el mar interior de Chiloé hasta el extremo sur del continente y en la costa sur de Argentina incluyendo las islas Malvinas (Aranis et al., 2007; Madirolas et al., 2000; Niklitschek et al., 2009; Cubillos et al., 2011). La sardina común presenta un ciclo de vida es corto, rápido crecimiento y elevada mortalidad natural (Aranis et al., 2007; Cerna et al., 2014)

Ecológicamente, la sardina austral desempeña un papel fundamental en la red trófica de los fiordos del sur de Chile, ya que, al ser una especie de nivel trófico inferior, constituye una fuente alimenticia vital para mamíferos marinos, aves y peces depredadores como la merluza austral y el congrio dorado (Neira et al., 2014). Una disminución abrupta de la biomasa podría generar efectos en cascada en el ecosistema, alterando las dinámicas tróficas y poniendo en riesgo otros recursos pesqueros de la región. Además, su capacidad para formar grandes cardúmenes en áreas costeras la convierte en una especie clave para el monitoreo y manejo sostenible de las pesquerías.

Se alimenta principalmente de copépodos y eufáusidos a lo largo de todo su ciclo vital. Forma cardúmenes en áreas cercanas a la costa como también en mar abierto,

y habita especialmente en los primeros 50 m de la columna de agua (Madirolas et al., 2000; Sabatini et al., 2001; Aranís et al., 2007). La sardina austral es una especie de nivel trófico inferior (Sabatini et al., 2001), ciclo de vida corto con una edad máxima entre 5 y 6 años (Cerna et al., 2014), de rápido crecimiento corporal y tasa de mortalidad natural elevada.

Al ser una especie de forraje, es la base alimenticia de mamíferos, aves y diversos peces nativos e introducidos de mayor tamaño (Pikitch et al., 2012). Es presa además de otras especies de importancia comercial como la merluza austral (*Merluccius australis*), merluza de cola (*Patagonian grenadier*) y congrio dorado (*Genypterus blacodes*) (Neira et al., 2014). A pesar de tener una creciente importancia económica en la zona sur de Chile, aún no existen estudios formales sobre la biología de esta especie en la región de Aysén, desconociendo así algunos aspectos básicos de su ciclo de vida.

La sardina austral conforma un único stock genético con una importante cohesión reproductiva. Sin embargo, la morfología de otolitos, fauna parasitaria y tamaño de los individuos sugiere que existe una segregación espacial entre las poblaciones de individuos de la Región de Aysén y Los Lagos (Galleguillos et al., 2012). No obstante, los autores confirman antecedentes de flujo de individuos entre la Región de Los Lagos y Aysén (Galleguillos et al., 2012; Neira et al., 2014). Aunque durante los últimos años sólo se han reportado la presencia de individuos juveniles en la Región de Aysén. El área de crianza principal se encuentra en la costa este de canal de Moraleda y en los canales Errazuriz y canal Costa, de igual forma puede incluir fiordos de Aysén ya que esta zona concuerda con su área de alimentación.

La sardina austral posee un desarrollo de ovario asincrónico, con un prolongado período de actividad reproductiva, la cual ocurre durante el segundo semestre de cada año e incrementa durante los meses de primavera. La sardina austral es un desovante parcial, con una estación de desove concentrada entre septiembre y diciembre en la zona del mar interior de Chiloé (Leal et al., 2011; Shirakova, 1978). Para la Región de Aysén, las hembras presentan un reposo reproductivo durante el primer semestre, y la máxima actividad reproductiva en el último trimestre del año (Aranís et al., 2019).

Los parámetros de crecimiento para la sardina austral fueron reportados por Cerna et al., (2005), con una talla asintótica de 17,7 cm y coeficiente de crecimiento de 0,78 por año, una edad máxima observada de 6 años, y talla de madurez L_{50} de 13,5 cm para el stock de la Región de Los Lagos. La talla de madures difiere de la talla de madurez en la costa argentina, y que se reporta entre 11 y 12 cm (Feodorov & Baranov, 1976; Hansen, 1999). Para la Región de Aysén se desconocen parámetros de historia de vida, aunque podrían ser similares a los previamente reportados.

1.4.- Evaluación acústica de sardina austral.

La sardina austral se evalúa anualmente mediante la ejecución de un crucero de evaluación acústica en el mar interior de la Región de Los Lagos y de la Región de Aysén. La evaluación acústica de biomasa la lideran investigadores del Instituto de Fomento Pesquero (Castillo et al., 2022), y se realiza mediante un diseño de muestreo que cubre las zonas más costeras y algunos canales y fiordos de la Patagonia. Se utiliza ecosonda científico Simrad EK-80 con transductores de 38 y 120 kHz, acoplados a sistemas de navegación GPS. En los sectores que lo permitieron se realizan transectas en el sentido este-oeste, de 5 millas náuticas (mi.n) de extensión, separadas por 5 mi.n y en los fiordos mayores se navega en zigzag para cubrir la extensión de la distribución de los recursos (sardina austral, sardina común y anchoveta). A su vez, para la validación de los ecotrazos y estimación de la densidad acústica se realiza un número de lances con embarcaciones artesanales de cerco (Figura 2).

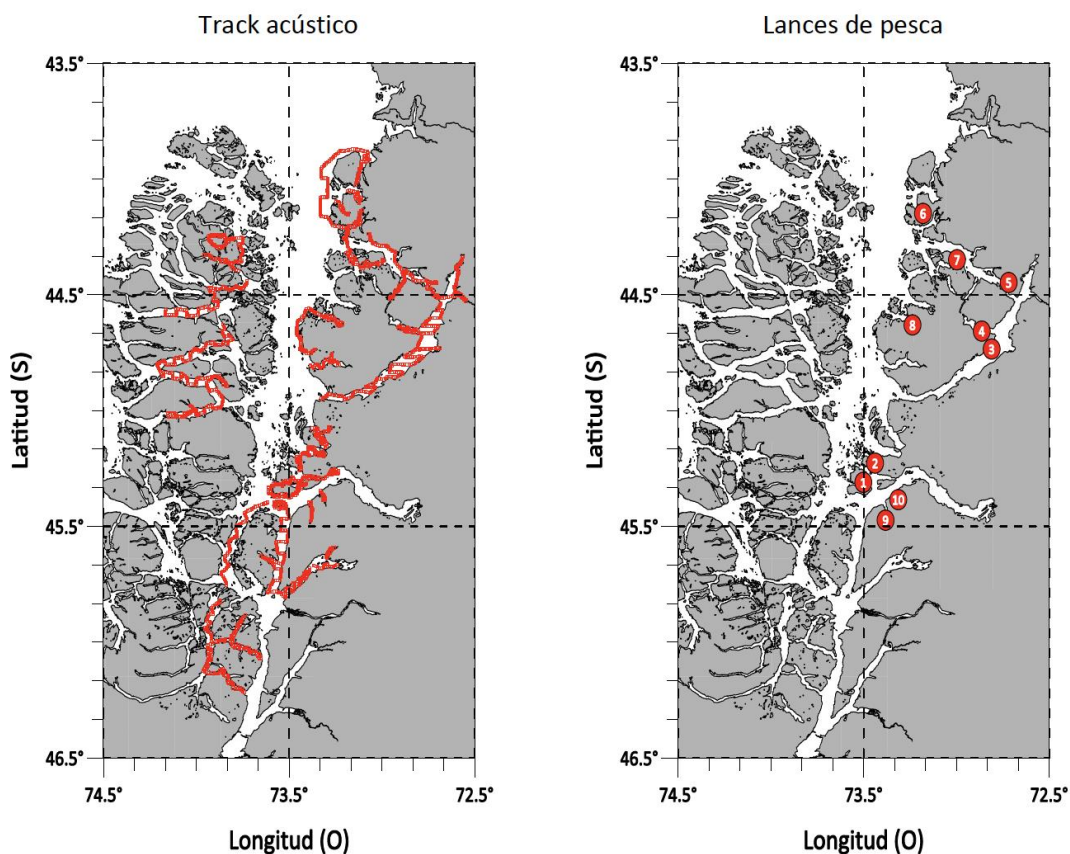


Figura 2. Ejemplo de una de las rutas de muestreo acústico y lances de pesca de identificación realizados en la región de Aysén, en Abril-Mayo de 2022. Crucero PELAGUIN 2204 (Fuente: Castillo et al., 2022)

La biomasa del crucero acústico muestra una reducción importante de la biomasa total desde 106,7 mil toneladas (2013) hasta 6,6 mil toneladas el 2019. El año 2020 no se realizó el crucero en la Región de Aysén, observándose al año siguiente una notable recuperación (58,6 mil toneladas) asociada a la contribución de juveniles. Posteriormente, en el año 2023, la biomasa total fue de 126,3 mil toneladas, volviendo a niveles de 50,1 mil toneladas en año 2024 (Figura 3).

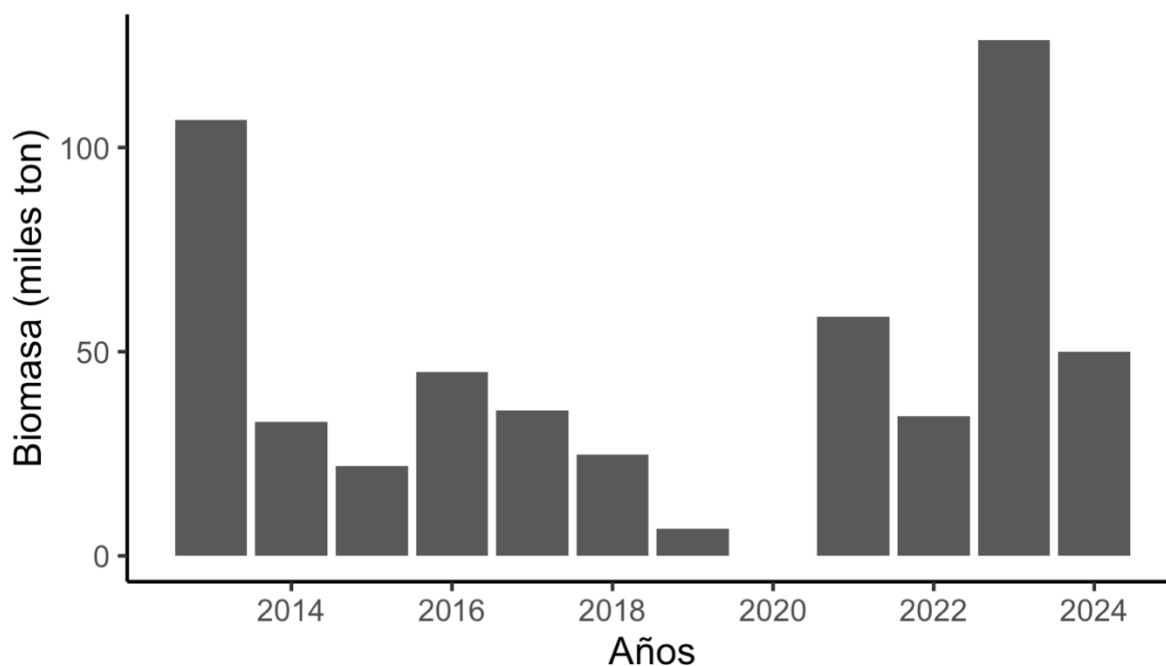


Figura 3. Índice de biomasa de sardina austral en la Región de Aysén (2013-2024) (Fuente: elaboración propia en base a datos de IFOP).

2.- Hipótesis:

Ho: El enfoque de evaluación de stock con el modelo JABBA no proporciona estimaciones del excedente de producción y del estado de situación de sardina austral (*Sprattus fuegensis*) en el mar interior de la Región de Aysén al incorporar el índice de biomasa acústico.

Ha: El enfoque de evaluación de stock con el modelo JABBA (Just Another Bayesian Biomass Assessment) proporciona estimaciones robustas del excedente de producción y del estado de situación del stock de sardina austral (*Sprattus fuegensis*) en el mar interior de la Región de Aysén al incorporar el índice de biomasa acústico.

3.- Objetivos:

3.1.- Objetivo general.

- Desarrollar un enfoque Bayesiano de evaluación de sardina austral (*Sprattus fuegensis*) en el mar interior de la región de Aysén mediante un modelo de producción que incorpore el índice de biomasa acústico.

3.2.- Objetivos específicos:

- Modelar el excedente de producción del stock de sardina austral mediante el modelo JABBA y sensibilizando la importancia del índice de biomasa acústica a través del coeficiente de variación.
- Comparar modelos de producción alternativos, seleccionar el mejor modelo para la evaluación del stock de sardina austral y analizar la robustez mediante el comportamiento retrospectivo.
- Determinar el estatus mediante la comparación con las estimaciones de puntos biológicos de referencia asociados al rendimiento máximo sostenido.

4.- Materiales y métodos.

4.1.- Área de estudio.

En el presente estudio se enfocó en el mar interior de la Región de Aysén (Figura 4), el cual está ubicado en la zona austral de Chile, donde se desarrolla la actividad pesquera artesanal activa de la sardina austral y además se realiza anualmente la evaluación acústica. Esta zona de la región se caracteriza por su alta productividad biológica, ya que esta zona es esencial ecológicamente para la reproducción y el reclutamiento de la Sardina austral.

El área tiene una gran relevancia para las comunidades pesqueras locales, la actividad pesquería de Sardina austral representa una importante fuente de ingresos para las comunidades costeras.

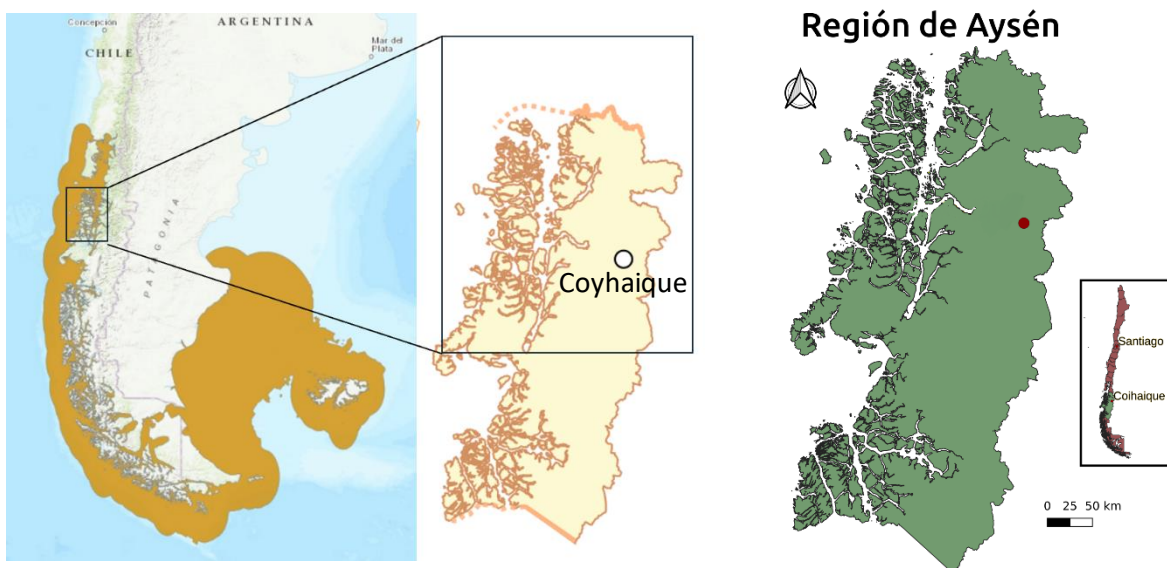


Figura 4: Área de distribución de la sardina austral y área estudio en la Región de Aysén, Chile.

4.2.- Fuente de datos.

Se utilizaron los datos de capturas y de biomasa acústica para el área de estudio entre 2012 y 2024 (Tabla 1). Las capturas fueron obtenidas considerando que el desembarque es un proxy de las capturas a partir de los registros oficiales publicados por el Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura en sus Anuarios Estadísticos (WWW.SERNAPESCA.CL).

Como se expuso en los antecedentes, el índice acústico empleado en este estudio representa una estimación de la biomasa total en el área de estudio. Las estimaciones de biomasa se obtienen mediante cruceros acústicos realizados en el mar interior de Aysén (Castillo et al., 2022), y fueron publicados por IFOP en el informe final de evaluación del stock de sardina austral (Espíndola, 2024).

Tabla 1. Capturas e índice de biomasa acústico de sardina austral en el mar interior de la Región de Aysén.

Años	Capturas (ton)	Índice de Biomasa (ton)
2013	5318	106684
2014	4163	32841
2015	7547	21973
2016	5097	44923
2017	3853	35493
2018	653	24805
2019	1352	6568
2020	1839	NA
2021	3611	58553
2022	3645	34156
2023	1209	126298
2024	4354	50075

4.3.- Modelo de evaluación de stock JABBA

Se utilizó el modelo **JABBA** (Just Another Bayesian Biomass Assessment) para desarrollar un enfoque de evaluación del stock robusto para la sardina austral en el área de estudio. El modelo JABBA es un modelo en el espacio de los estados para estimar parámetros que determinan la biomasa y la tasa de mortalidad por pesca de un stock mediante estadística bayesiana con MCMC, a partir de datos de captura e índices de abundancia. Este modelo ha ganado reconocimiento en la evaluación de recursos pesqueros, particularmente en situaciones donde los datos son limitados o inciertos.

El modelo JABBA considerar una función general del tipo Pella-Tomlinson para modelar el excedente de producción y puntos biológicos de referencia asociado al rendimiento máximo sostenido (RMS). En este contexto, al ser un modelo en el espacio de los estados el enfoque de estimación se centra en la incertidumbre de los datos y priorizar la estimación probabilística de parámetros claves. En efecto, a diferencia de los modelos tradicionales que suelen depender exclusivamente de capturas, JABBA tiene la capacidad de incluir índices de biomasa acústica como datos de entrada, mejorando significativamente la precisión y robustez de las estimaciones. Esta ventaja es particularmente relevante para la evaluación de recursos como la sardina austral (*Sprattus fuegensis*), cuya dinámica poblacional puede ser más compleja que sólo una función determinista de los cambios de biomasa. La falta de conocimiento biológico y dinámica de la especie queda reflejada en el error de proceso, donde otras causas desconocidas que afectan la dinámica podrían ser relevantes tales como migraciones, variabilidad ambiental y la dependencia de su pesquería de pequeña escala son algunos factores que influyen.

Las principales características del modelo JABBA son:

- a) Es una herramienta de integración automática de múltiples series temporales de CPUE, esto permite ajustar y promediar automáticamente múltiples series temporales de captura por unidad de esfuerzo (CPUE), lo que permite una mejora en la calidad del índice de abundancia.
- b) Lograr una ponderación flexible de los datos, se logra mediante una estimación de la varianza de observación adicional para cada serie CPUE (individuales o agrupadas), facilitando la calidad de los datos.
- c) Permite la selección entre funciones de producción de Fox, Schaefero Pella-Tomlinson, con la posibilidad de estimar resultados como lo sería la función de BMSY/K.
- d) Posee opciones para fijar o estimar los componentes de la varianza del proceso como la varianza de observación, esto permite modelar la incertidumbre estructural y de medición.

- e) Tiene herramientas de diagnóstico del modelo, entre las que se incluye el análisis retrospectivo, evaluaciones residuales, análisis de sensibilidad, los cuales son fundamentales para validar el ajuste del modelo.
- f) Permite simulación de proyecciones futuras para regímenes de capturas alternativos, esto facilita la evaluación de posibles escenarios alternativos de captura o manejo pesquero, permitiendo estimar el estado futuro del stock bajo distintas estrategias.
- g) Del modelo JABBA se obtiene un conjunto de gráficos visuales que generan ajustes y diagnósticos del modelo, además de gráficos sobre las trayectorias históricas de biomasa, las estimaciones de la producción de excedentes, el gráfico tipo Kobe y las proyecciones futuras bajo diferentes escenarios de captura.

Además, el modelo JABBA presenta diversas ventajas en comparación con los enfoques tradicionales de evaluación de stocks pesqueros, lo que justifica su elección en este estudio. Algunas de estas ventajas son el tratamiento explícito de la incertidumbre a través de su enfoque bayesiano de espacio de estados, donde JABBA permite distinguir entre errores de proceso y errores de observación (asociados a los datos), de manera que es posible mejorar la calidad de las estimaciones (Winker et al., 2020). También permite la incorporación de información previa, facilitando la inclusión de conocimiento experto o estudios previos mediante priors, lo cual es especialmente útil en pesquerías con datos limitados o alta variabilidad.

Otra ventaja es la Integración de múltiples índices, que permite el uso simultáneo de diferentes series de abundancia (por ejemplo, CPUE y biomasa acústica), ajustándolas con diferentes niveles de varianza observacional.

JABBA es un modelo que posee flexibilidad en la función de producción, lo que ofrece distintas formas funcionales (Schaefer, Fox, Pella-Tomlinson), adaptándose a distintos tipos de dinámica poblacional. Además de incluir herramientas de diagnóstico integradas, entre las que se incluye los análisis retrospectivos, gráficos de ajuste, residuales, curvas de producción y diagramas de Kobe, lo que facilita la interpretación y comunicación de los resultados.

Por lo tanto, JABBA permite realizar proyecciones de manejo, lo cual brinda explorar escenarios de captura futuros bajo distintas reglas de explotación, apoyando la toma de decisiones basadas en evidencia.

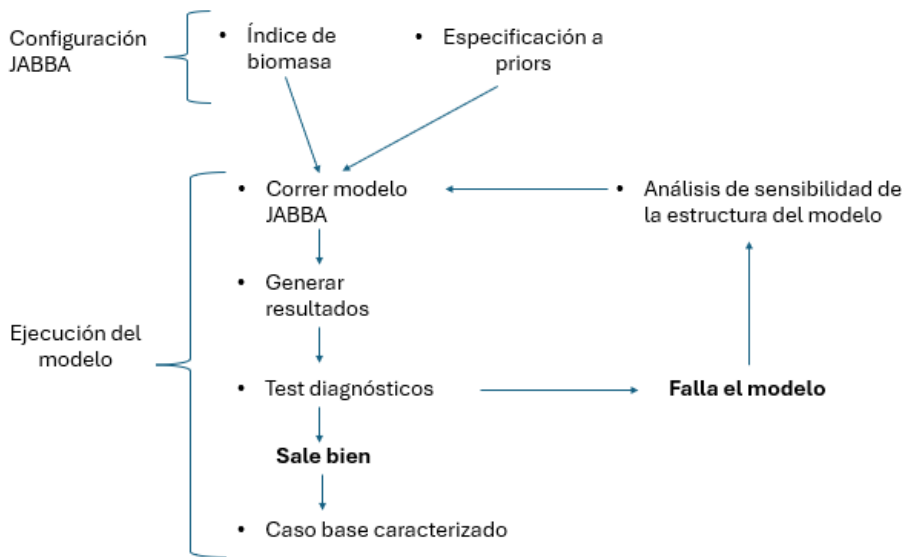


Figura 5: Diagrama de flujo del proceso de configuración y ejecución del modelo JABBA.

4.4.- Procedimiento de evaluación de stock

El enfoque de evaluación con JABBA permite modelar excedentes de producción que modulan cambios de biomasa que pueden ser consistentes con los datos observados y el Rendimiento Máximo Sostenible (RMS). El modelo de excedente de producción Pella-Tomlinson es un modelo general que tiene como casos específicos a los modelos de Fox y de Schaefer, diferenciándose en un parámetro de forma (m), la tasa intrínseca de crecimiento (r) y la capacidad de carga (K), i.e.,

$$SP_t = \frac{r}{m-1} B_t \left(1 - \left(\frac{B_t}{K} \right)^{m-1} \right)$$

donde SP_t es el excedente de producción, B_t es la biomasa del stock, en tanto que r , K y m fueron definidos previamente. De esta manera, los modelos de excedente de producción requieren la estimación de a lo menos 3 parámetros, considerando series de tiempo de captura y de a lo menos un índice de abundancia (Winker et al., 2018).

El valor para el parámetro m se puede dejar fijo en $m=2$ para considerar el modelo de excedente de producción logístico de Schaefer (Schaefer, 1954) en que el rendimiento máximo sostenible (RMS) ocurre en $B/K = 0,5$. Por otro lado, cuando $m=1,01$ se logra el modelo de producción de Fox (Fox, 1971) y en este caso el RMS se encuentra en $B/K = 0,37$. Además, al considerar $m=1,188$ el RMS ocurre cuando

el objetivo de manejo es $B/K=0,4$. En cambio, al estimar m otros modelos y objetivos de manejo son posibles (Tabla 2).

Tabla 2. Modelos de excedentes de producción definidos por el parámetro m considerados en el enfoque de evaluación de stock para la sardina austral del mar interior de la Región de Aysén.

Modelo	Función de producción	Parámetro de forma (m)	Punto Biológico de Referencia
M1	Schaefer	$m=2$	$RMS= 0,5*K$
M2	Fox	$m=1,01$	$RMS= 0,37*K$
M3	Pella-Tomlinson	$m=1,188$	$RMS = 0,4*K$
M4	Pella-Tomlinson	$m = \text{libre}$	$RMS = m^{(-1/(m-1))*K}$

Cada modelo fue ajustado bajo tres escenarios de importancia del índice de biomasa acústico en la evaluación de stock, asumiendo tres valores para el coeficiente de variación (CV); a saber: 0,1; 0,15 y 0,2.

Se utilizó el Criterio de Información de la Devianza (DIC para seleccionar el mejor modelo en competencia, y que será utilizado para determinar el estado de situación de la sardina austral, a través de un diagrama de Kobe. Asimismo, el diagnóstico del ajuste consideró el error cuadrático medio (RMSE), y para evaluar la robustez y consistencia del modelo se realizó un análisis retrospectivo.

Para utilizar el modelo JABBA se utilizó el paquete para el lenguaje R disponible en el repositorio (<https://github.com/jabbamodel/JABBA>). Se utilizó la R v.4.3.2 y la interfaz gráfica RStudio v.2023.12.0.369. De esta manera los cálculos y resultados fueron ejecutados en un dispositivo doméstico con un procesador AMD Ryzen 5 2500U, con 8 Gb de RAM, logrando resultados en tiempo de cómputo razonables, sin requerir a una infraestructura computacional avanzada.

5.- Resultados

El Criterio de Información de la Devianza (DIC) se resumen en la Tabla 3, lo que permite seleccionar al mejor modelo en competencia en términos del modelo de excedente de producción y de la importancia del índice de biomasa acústico para explicar los cambios de biomasa y de las capturas de sardina austral. Al respecto, el modelo con mejor desempeño es el modelo M1 de Schaefer con CV= 0.2, con DIC=196.1 (Tabla 3). Sin embargo, el ajuste de este modelo al índice de biomasa acústica logra un RMSE de 65% (Figura 6), al igual que el modelo M4 con CV = 0.2, el cual presentó un RMSE mayor de 65.9% (Figura 7), lo que indica un ajuste menos preciso a los datos observados. En comparación al modelo M1 con CV=0.15 que obtuvo parámetros estimados similares, y el RMSE fue de 50% (Figura 8).

Tabla 3. Criterio de información de la Devianza (DIC) para los modelos de producción alternativos y escenarios de importancia del índice de biomasa acústico a través del coeficiente de variación (CV).

Modelo	Excedente de producción	Coeficiente de Variación para el índice de biomasa		
		CV=0.1	CV=0.15	CV= 0.2
M1	Schaefer (M1)	204.3	201.4	196.1
M2	Fox (M2)	206.2	206.8	204.5
M3	Pella-Tomlinson (M3)	206.3	204.4	203.2
M4	Pella-Tomlinson (M4)	207.3	204.8	198.8

Al considerar el ajuste del Modelo M1, utilizando CV=0.15 para el índice de biomasa, la distribución marginal de los parámetros estimados se muestra en la Figura 9, observándose que la razón posterior-prior para la media (PPRM) y de la varianza (PPRV) no muestra cambio para el parámetro K y psi (fracción de la biomasa del primer año respecto de K, i.e., B_{2012}/K), pero el posterior fue menor a 1 para el caso del parámetro r. El coeficiente de capturabilidad muestra una media cercana a 0,3, y la estimación del error de proceso (σ^2) fue mayor que el prior tanto en la media como en su varianza (PPRM=12,9, PPRV=0,009).

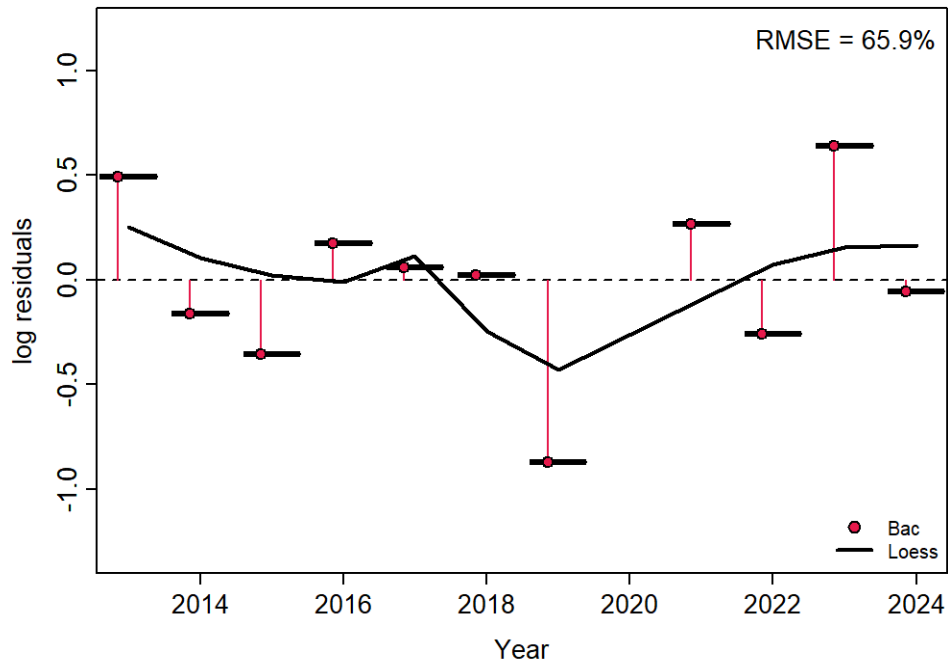


Figura 6: Residuales del índice de biomasa acústico de sardina austral y RMSE del modelo M4 de Pella-Tomlinson (libre) para la dinámica de la biomasa de la sardina austral.

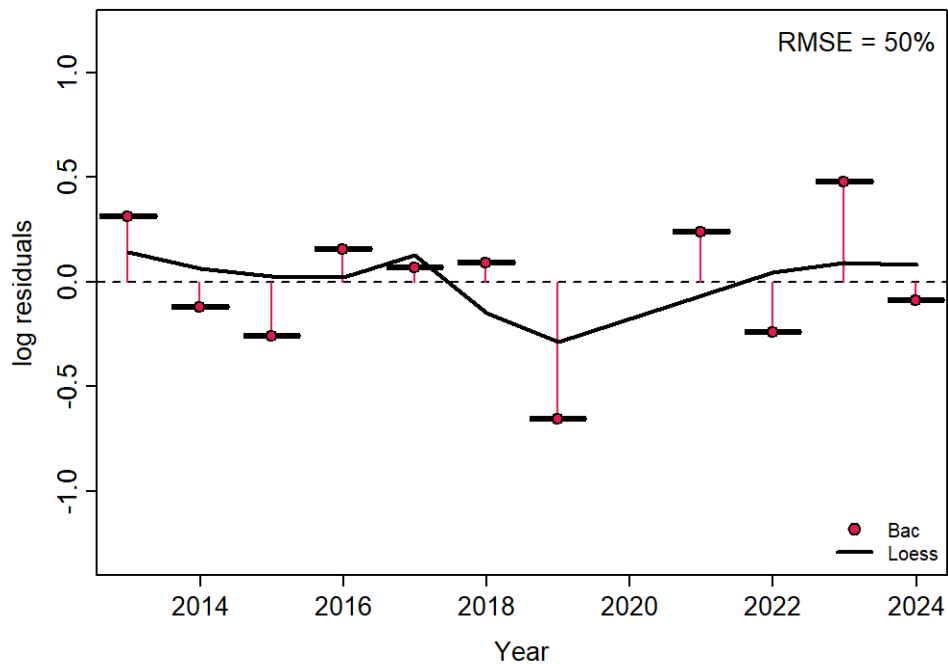


Figura 7: Residuales del índice de biomasa acústico de sardina austral y RMSE del modelo M4 de Schaefer para la dinámica de la biomasa de la sardina austral.

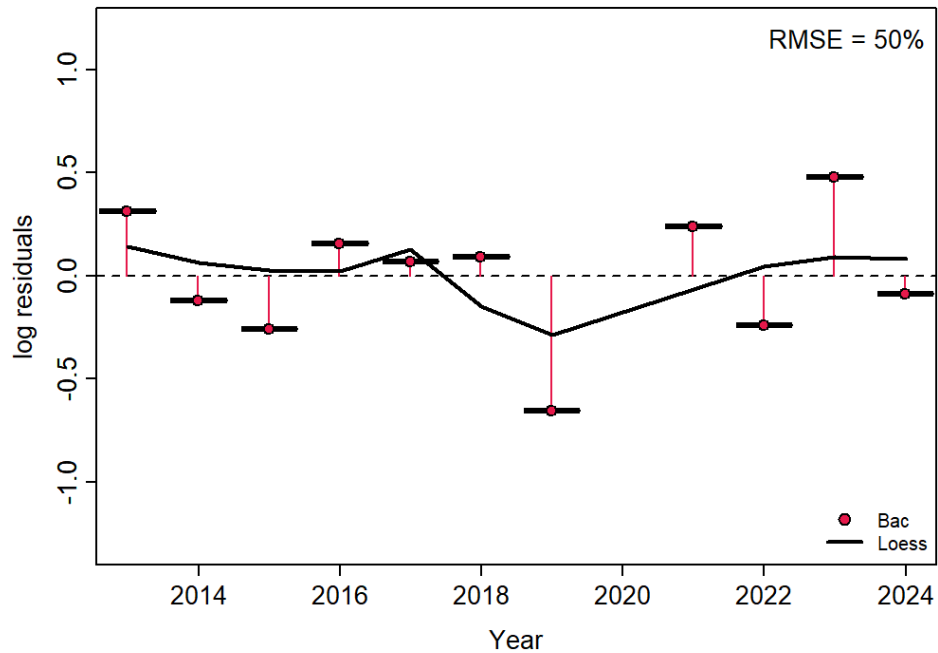


Figura 8: Residuales del índice de biomasa acústico de sardina austral y RMSE del modelo M1 de Schaefer para la dinámica de la biomasa de la sardina austral.

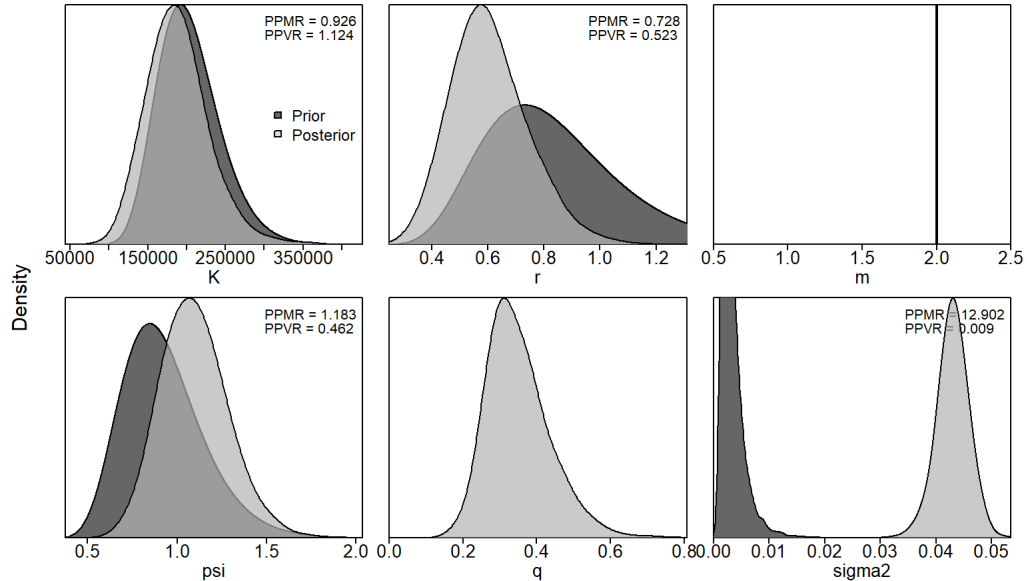


Figura 9: Distribución marginal de los parámetros estimados que definen el excedente de producción del modelo M1 (K , r , $m=2$, ψ , q y σ^2) y la dinámica de biomasa de sardina austral. PPMR es la razón prior-posterior para la media del parámetro, mientras que PPVR es la razón prior-posterior para la varianza del parámetro.

Los parámetros que definen los cambios de biomasa y mortalidad por pesca muestran que la biomasa al año 2024 es 1,75 veces la biomasa del rendimiento máximo sostenido (RMS), con intervalos entre 1,32 y 2,3 para el año más reciente. Asimismo, la mortalidad por pesca actual es muy baja respecto de la mortalidad por pesca del RMS (Tabla 4). A su vez, al comparar con las estimaciones del modelo Pella-Tomlinson con m libre (modelo M4, $cv=0.15$), se observa que los intervalos de confiabilidad fluctúan entre 0,831 y 3.574 y contiene $m=2$, por lo que el modelo M1 es una realización que se podría considerar más parsimonioso del modelo general.

Tabla 4. Parámetros estimados y parámetros dependientes de la evaluación de stock de sardina austral con el modelo JABBA M1, de Schaefer ($CV=0,15$). Li y Ls son los intervalos de confiabilidad.

Definición	Símbolo	Parámetro	Li	Ls
Capacidad de carga (toneladas)	$K=B_0$	189.859	129.087	275.759
tasa intrínseca de crecimiento	r	0.599	0.379	0.904
Fracción de biomasa primer año (B_1/K)	psi	1.083	0.775	1.502
Desviación estándar error de proceso	sigma.proc	0.207	0.192	0.22
Parámetro de forma (fijo)	m	2	2	2
Rendimiento máximo sostenido	RMS	28.152	15.892	49.229
Mortalidad por pesca del RMS	F_{RMS}	0.299	0.189	0.452
Biomasa del RMS	B_{RMS}	94.929	64.543	137.879
Razón $BRMS/K$, $K=B_0$	B_{RMS}/B_0	0.5	0.5	0.5
Razón B del año más reciente a B_{RMS}	B_{2024}/B_{RMS}	1.752	1.324	2.301
Razón F del año más reciente a $FRMS$	F_{2024}/F_{RMS}	0.089	0.045	0.175

Tabla 5. Parámetros estimados y parámetros dependientes de la evaluación de stock de sardina austral con el modelo JABBA M4, de Schaefer ($CV=0,15$). Li y Ls son los intervalos de confiabilidad.

Definición	Símbolo	Parámetro	Li	Ls
Capacidad de carga (toneladas)	$K=B_0$	188.106	126.321	274.854
tasa intrínseca de crecimiento	r	0.560	0.338	0.977
Fracción de biomasa primer año (B_1/K)	psi	1.081	0.771	1.498
Desviación estándar error de proceso	sigma.proc	0.208	0.192	0.221
Parámetro de forma (fijo)	m	1.606	0.831	3.574
Rendimiento máximo sostenido	RMS	29.544	16.113	53.764
Mortalidad por pesca del RMS	F_{RMS}	0.458	0.334	0.610
Biomasa del RMS	B_{RMS}	86.152	42.191	167.661
Razón $BRMS/K$, $K=B_0$	B_{RMS}/B_0	0.5	0.5	0.5
Razón B del año más reciente a B_{RMS}	B_{2024}/B_{RMS}	1.927	1.188	3.011
Razón F del año más reciente a $FRMS$	F_{2024}/F_{RMS}	0.012	0.005	0.029

En base al modelo M1, los indicadores de la trayectoria de la biomasa, mortalidad por pesca, indicadores de explotación en el periodo de evaluación, y la curva de producción equilibrada se muestran en la Figura 10. Se observa una recuperación de biomasa desde el 2019 al 2024, en concomitancia con valores bajos de mortalidad por pesca. Los indicadores de biomasa y mortalidad por pesca, razones B/B_{MSY} y F/F_{MSY} , muestran un stock subexplotado sin síntomas de sobrepesca (Figura 11, Tabla 4).

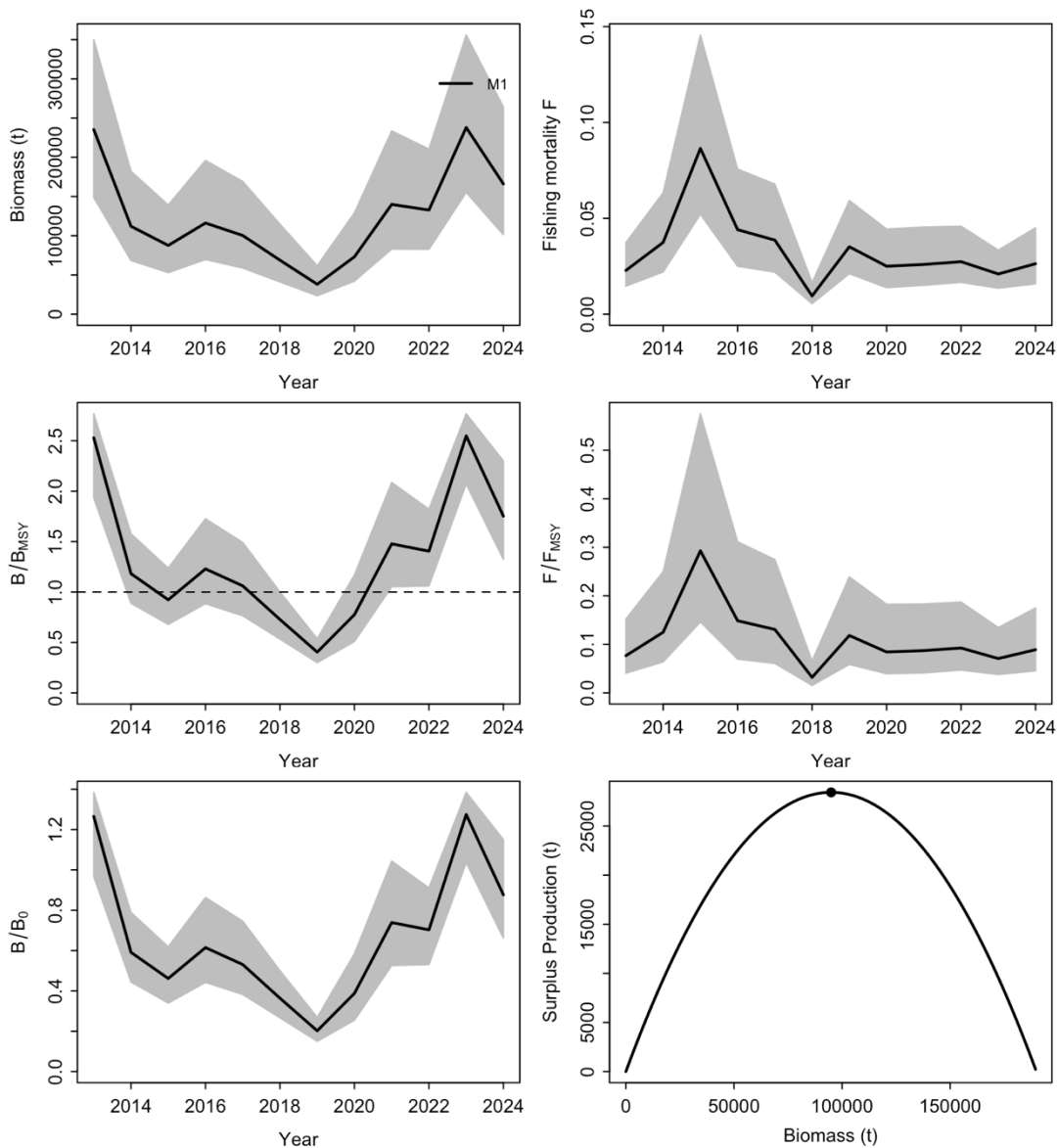


Figura 10: Biomasa, mortalidad por pesca, razón B/B_{MSY} y objetivo de manejo (línea horizontal segmentada), razón F/F_{MSY} , razón B/B_0 y excedente de producción en función de la biomasa según el modelo M1 con $CV=0.15$ para el índice de biomasa acústico.

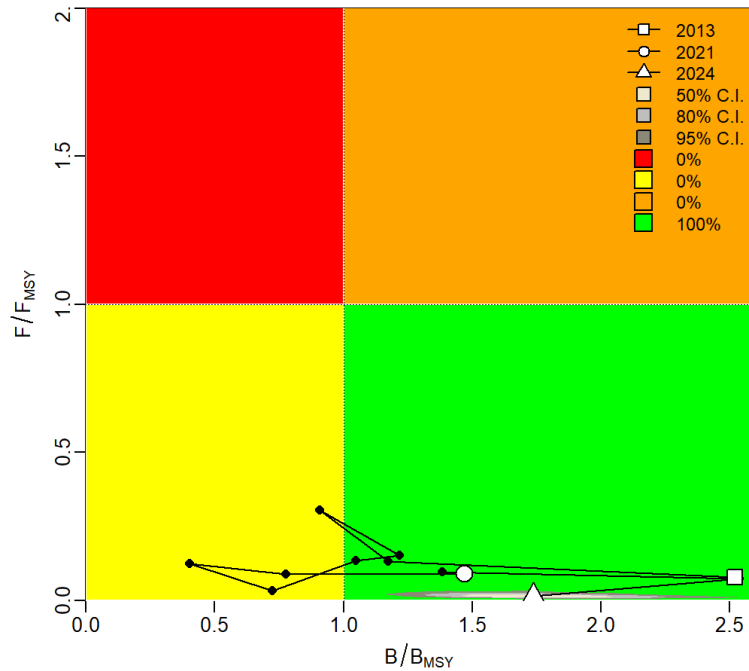


Figura 11: Diagrama Kobe para la trayectoria de la biomasa y mortalidad por pesca entre el 2013 (cuadrado) y 2024 (triángulo). Se muestra la probabilidad de estar en los cuadrantes del diagrama.

Por último, en análisis retrospectivo muestra la consistencia de la evaluación al remover un año a la vez hacia el pasado, excepto cuando la evaluación cubre el periodo 2013-2018 en que la biomasa es sobreestimada, y el periodo 2013-2020 en que la biomasa tiende a ser subestimada. No obstante, los casos previos, el patrón retrospectivo es satisfactorio con valores entre -0.01 y 0.19 del índice rho de Mohn (Figura 12).

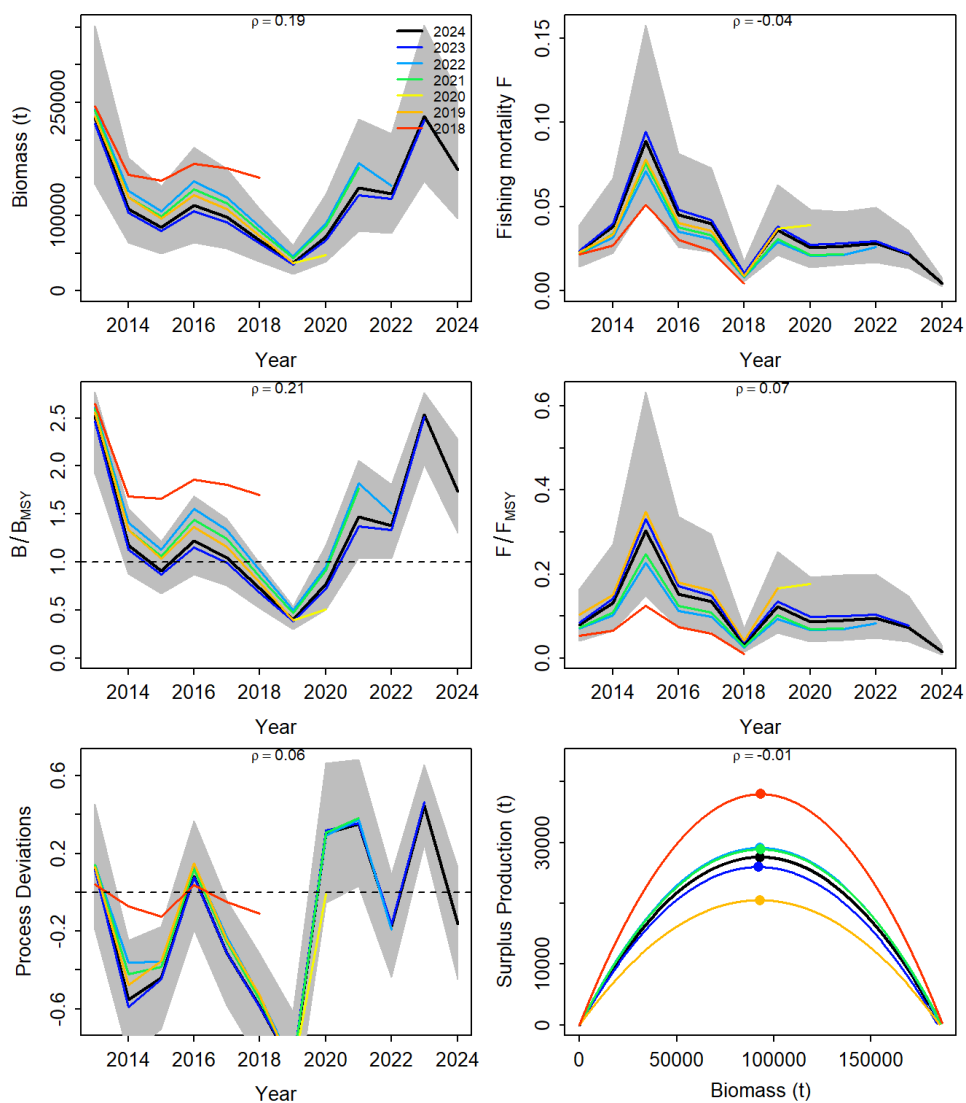


Figura 12: Análisis retrospectivo de la evaluación de sardina austral con el modelo seleccionado M1 de Schaefer con $CV=0.15$ para la importancia del índice de biomasa acústico.

Todos los valores obtenidos de ρ (Rho de Mohn) se encuentran por debajo del umbral de 0.2, el cual es considerado como un límite aceptable para inferir ausencia de sesgo sistemático (Hurtado-Ferro et al., 2015). De esta manera las estimaciones del modelo no se ven distorsionadas por la inclusión o exclusión de años más recientes. Este comportamiento, junto con el Error cuadrático medio (RMSE), además de la forma estable del Kobe plots y la coherencia biológica de los parámetros estimados, justifica plenamente la elección del modelo Schaefer (M1) con $CV = 0.15$ como la herramienta principal para asesoría en el manejo sustentable del recurso.

El conjunto de análisis realizados, indica que el modelo Schaefer (M1) con un coeficiente de variación $CV = 0.15$ es el más parsimonioso que el modelo M4 para describir la dinámica del excedente de producción de sardina austral en el mar interior de la región de Aysén. Este modelo presenta un buen desempeño estadístico y estabilidad retrospectiva.

6.- Discusión.

El enfoque de evaluación del stock para la sardina austral (*Sprattus fuegensis*) del mar interior de la Región de Aysén, mediante modelos de excedente de producción en el marco Bayesiano del modelo JABBA, representa un importante avance para establecer el diagnóstico del estado de situación de la pesquería. El modelo JABBA al poseer una naturaleza flexible permitió integrar adecuadamente las series históricas de capturas y los índices de biomasa acústicos obtenidos a través de cruceros científicos, superando así las limitaciones de modelos deterministas tradicionales y permitiendo una caracterización probabilística del estado del recurso.

Si bien la elección de un modelo de evaluación adecuado es una decisión crítica, ya que condiciona directamente la calidad de las estimaciones biológicas y, en consecuencia, las recomendaciones de manejo. En este estudio se compararon cuatro variantes para el modelo estructural JABBA (M1, M2, M3 y M4), correspondientes a las formulaciones de Schaefer, Fox y Pella-Tomlinson (fijo y libre), sensibilizando con distintos niveles de influencia del índice de biomasa acústico a través del coeficiente de variación ($CV = 0.1, 0.15$ y 0.2). A partir del análisis comparativo, se descartó el valor con $CV = 0.2$ ya que aumenta la incertidumbre en los estimados, pero no la tendencia central. Así, por ejemplo, el RMSE que mide el grado de ajuste a los datos de biomasa acústica, se encontró valores de 65%. En cambio, el segundo modelo con mejor desempeño ya que la diferencia con el DIC es de 5 puntos, y ofrece un mejor compromiso entre sensibilidad y estabilidad de las estimaciones, razón por la cual se seleccionó como el modelo final del excedente de producción.

El modelo M1, Schaefer ($m=2$) con $CV = 0.15$, mostró un RMSE de 50%, haciéndose cargo de explicar mejor los valores más altos y más bajos del índice de biomasa acústico. La estabilidad del modelo seleccionado se comprueba mediante el análisis retrospectivo, donde los valores del estadístico de Rho de Mohn (ρ) fueron bajos. Ya que se obtuvo un valor $\rho = 0.21$ para B/B_{MSY} y un valor $\rho = 0.07$ para la F/F_{MSY} , además de obtener un $\rho = 0.06$ para las desviaciones del proceso, lo que sugiere ausencia de sesgos sistemáticos y otorga mayor confiabilidad a las proyecciones futuras. Estas métricas confirman que el modelo responde de manera estable ante la exclusión secuencial de los años más recientes, fortaleciendo su capacidad predictiva.

En términos biológicos, el modelo M1 (Schaefer), es particularmente adecuado para especies como la sardina austral, ya que esta especie se caracteriza por tener un ciclo de vida corto, alta variabilidad poblacional y sensibilidad a factores ambientales como los eventos Niño/Niña. La forma simétrica de la curva de producción (con RMS en $B/K = 0.5$) es coherente con la biología de pequeños peces pelágicos de rápido crecimiento. Además, el modelo M1 fue capaz de reflejar correctamente la tendencia de recuperación del stock a partir de 2020, sin generar sobreestimaciones artificiales de la biomasa o subestimaciones de la presión pesquera.

El ajuste con un coeficiente de variación $CV = 0.15$ mostro un desempeño estadístico adecuado y estabilidad en los parámetros de la dinámica poblacional. De esta manera, el modelo Schaefer (M1) ofrece resultados sólidos y coherentes en todas las dimensiones del diagnóstico, como un DIC bajo (201.4) además de un error cuadrático medio controlado ($RMSE=50\%$), las trayectorias históricas fueron estables y las estimaciones de los gráficos Kobe fueron consistentes y posicionaron al stock en un estado de subexplotación y una curva de excedente de producción excedente estable.

En efecto, a través de los análisis retrospectivos y aplicando el estadístico p de Mohn, se obtuvo valores de $p=0.21$ para la B/B_{MSY} y de $p=0.07$ para F/F_{MSY} , ambos valores cercanos cero, lo que indica una ausencia de sesgo sistemático y proyecciones estables en el tiempo. Esto es especialmente relevante para la toma de decisiones en el área del manejo pesquero, ya que se asegura que la eliminación de años recientes no distorsiona las conclusiones sobre el estado del stock sometido a evaluación.

Por otro lado, el modelo M4 Pella-Tomlinson (con m libre) también posicionó al recurso en la zona verde del gráfico Kobe, con un comportamiento estable y trayectorias similares. También obtuvo un RMSE similar, lo que confirma su capacidad de ajuste, aunque el DIC obtenido fue levemente mayor, lo que ubica a este modelo como más general y al modelo M1 seleccionado como una realización más parsimoniosa de este modelo general. El modelo M4 confirma que el recurso no se encuentra sobreexplotado y que la mortalidad por pesca está por debajo de los niveles de referencia, y de esta manera permite validar al modelo M1. Por lo tanto, este enfoque comparativo entre un modelo general y otro específico del modelo JABBA, permite señalar que el enfoque de evaluación constituye una herramienta robusta para analizar la dinámica y estimar el estado actual del stock de la pesquería de sardina austral en el mar interior de Aysén.

Asimismo, el enfoque de evaluación permitió descartar a los modelos M2 Fox y M3 Pella Pella-Tomlinson (con m fijo) para explicar los cambios de biomasa. En ambos casos, se observó un peor desempeño en DIC (206,8 y 204,4 respectivamente).

Se debe mantener en consideración que, si bien los resultados obtenidos son robustos, se debe reconocer que el modelo opera sobre una serie de tiempo relativamente corta (2012–2024), lo cual limita en cierta medida la resolución

histórica del comportamiento del stock. Asimismo, la calidad y frecuencia de los datos acústicos puede verse afectada por eventos climáticos extremos que pueden generar cambios en la distribución espacial de los cardúmenes, afectando directamente la detectabilidad y estimación de la biomasa.

A esto se suma la falta de una normativa pesquera específica para regular la explotación de la sardina austral en región de Aysén, lo que hace aún más urgente contar con diagnósticos sólidos y propuestas de manejo basadas en evidencia. En este sentido, se proponen las siguientes acciones:

- Implementar un seguimiento biológico mensual de la pesquería de sardina austral en la región de Aysén, que incluya variables como talla, peso, madurez sexual y condición reproductiva.
- Incorporar un modelo estructurado por tallas, lo cual permitiría capturar con mayor detalle la dinámica poblacional y las fluctuaciones interanuales en la estructura del stock, ya que actualmente existe escasa información de investigación pesquera para la región.
- Desarrollar una nueva normativa de manejo, en el que se incluya un plan de manejo específico para la sardina austral.

Es fundamental asegurar que el crucero acústico se realice anualmente, ya que representa la principal fuente de datos para calibrar los modelos y establecer con precisión el estado del recurso. La continuidad de este monitoreo es clave para mantener y realizar evaluaciones confiables, especialmente en un contexto de cambio climático que afecta de forma creciente la distribución, abundancia y productividad de las especies pelágicas.

7.- Conclusiones.

La presente evaluación permitió demostrar que es posible aplicar enfoques bayesianos robustos como el modelo JABBA para la estimación del estado de un stock pelágico en un contexto de datos limitados, como es el caso de la sardina austral (*Sprattus fuegensis*) en el mar interior de Aysén.

A través de la comparación de distintos modelos de producción excedente, se logró identificar una estructura de modelación coherente con la biología de la especie, la dinámica pesquera observada y los patrones históricos de abundancia.

Por lo tanto, se concluye que el modelo Schaefer (M1) con un coeficiente de variación $CV = 0.15$ es el modelo más apropiado para la evaluación de este recurso y su selección se justifica por:

- Ser el mejor desempeño estadístico con un valor DIC = 201.4 y un RMSE del 50%.
- La estabilidad en el análisis retrospectivo, con valores bajos de en el estadístico de Rho de Mohn ($\rho_B = 0.21$, $\rho_F = 0.07$, $\rho_{Dev} = 0.06$)
- La coherencia biológica con la historia de vida de la sardina austral, que presenta un crecimiento rápido y elevada resiliencia.
- La capacidad para representar adecuadamente la trayectoria de recuperación poblacional observada desde 2020.

Uno de los principales aportes metodológicos de este trabajo fue la incorporación sistemática de múltiples criterios de validación estadísticos, lo cual permitió asegurar que la selección del modelo no fuera arbitraria, sino justificada en función de evidencia cuantitativa y cualitativa. Esta rigurosidad eleva la confiabilidad de las proyecciones obtenidas y refuerza su valor para la toma de decisiones en el manejo pesquero.

La sardina austral mostro una alta variabilidad interanual en los índices de biomasa, pero con signos claros de recuperación del stock tras el año 2020, lo que reflejo posiblemente una menor presión pesquera y de condiciones ambientales favorables. No obstante, esta recuperación aún es frágil frente a los efectos acumulativos del cambio climático, la variabilidad oceanográfica y la falta de una política de manejo adaptativo.

Tras el análisis e interpretación de gráficos podemos concluir que el estado del recurso se encuentra en plena explotación, y si bien el stock no se encuentra sobreexplotado, la calidad de los datos y la ausencia de normativa pesquera específica en la región de Aysén representan riesgos importantes para la sostenibilidad del recurso. Se destaca que actualmente no existe un plan de manejo formal para la pesquería de sardina austral en la región de Aysén, lo cual representa una debilidad estructural que deber ser corregida con urgencia.

Este estudio también reveló algunas brechas significativas en los datos disponibles, especialmente en los aspectos biológicos y reproductivos del recurso, lo cual limita el desarrollo de modelos estructurados más complejos. Sin embargo, se identificaron oportunidades claras para avanzar hacia una mayor integración de conocimiento, a través de estrategias de seguimiento de monitoreos biológicos continuos para fortalecer la información para próximos estudios.

Finalmente, en esta tesis se confirma que una evaluación robusta no depende únicamente del modelo seleccionado, sino de un proceso metodológico bien diseñado, también de un análisis crítico de los resultados y la experiencia adquirida puede servir como base para futuras evaluaciones de otros recursos pesqueros en condiciones similares, además de un importante punto de partida para el diseño de un sistema de manejo sostenible y científicamente respaldado para la sardina austral en la región de Aysén.

8.- Anexo.

Anexo 1: Captura anual (toneladas), índice acústico de biomasa y cuota de captura de sardina austral (*Sprattus fuegensis*) en el mar interior de la Región de Aysén (2012–2024).

Año	Captura (t)	Índice acústico	Cuota Captura
2012	4,033	-	-
2013	5,318	106,685	4000
2014	4,163	32,841	7790
2015	7,547	21,973	7740
2016	5,097	44,923	5940
2017	3,853	35,346	5910
2018	693	24,805	5970
2019	1,325	6,568	4265
2020	2,675	-	2666
2021	3,850	58,922	4409
2022	3,645	34,156	3700
2023	1.210	126,298	3687
2024	687	50,075	4319

9.- Referencias bibliograficas:

- Aranis, A., Gómez, A., Caballero, L., Walker, K., Ramírez, M., Eisele, G., Cerna, F., Valero, C., López, A., Machuca, C., Muñoz, L., Letelier, J., Toledo, C., Valdebenito, V., & Albornoz, M. (2019). Informe final, programa de seguimiento de las principales pesquerías pelágicas de la zona centro-sur de Chile, 2018. Subsecretaría de Economía y EMT, Instituto de Fomento Pesquero.
- Aranis, A., Meléndez, R., Pequeño, G., & Cerna, F. (2007). *Sprattus fuegensis* en aguas interiores de Chiloé, Chile (Osteichthyes: Clupeiformes: Clupeidae). *Gayana (Concepción)*, 71(1), 102-113.
- Aranis, A., Muñoz, G., Quiroz, J. C., Wiff, R., Gómez, A., & Barrientos, M. A. (2014). Identificación de rasgos morfológicos para una rápida diferenciación de sardina austral (*Sprattus fuegensis*) y sardina común (*Strangomera bentincki*). *Latin american journal of aquatic research*, 42(5), 1063-1071.
- Cerna, F., Leal, E., López, A., & Plaza, G. (2014). Age, growth and natural mortality of the Patagonian sprat *Sprattus fuegensis* (Jenyns, 1842) in Chiloé inland sea, southern Chile. *Latin american journal of aquatic research*, 42(3), 580-587.
- Cubillos, L., Paramo, J., Castro, L., Sobarzo, M., Peña, H., Soto, A., Rodríguez, S., Pedraza-García, M., Rebolledo, H., & Castillo-Jordan, C. (2011). Estimación de abundancia, biomasa y distribución espacial de pequeños pelágicos en aguas interiores de la X y XI regiones y su relación con algunas variables ambientales, año 2010. Universidad de Concepción. Informe de Investigación, Noviembre 2011.
- Cubillos, L., Pedraza, M., Gutierrez, M., Rebolledo, H., Parra, C., Curin-Osorio, S. & Alarcón, C. (2015). Acoustic assessment of the austral sardine, *Sprattus fuegensis*, in the inner sea of the Chilean Patagonia. 2015 *IEEE/OES Acoustics in Underwater Geosciences Symposium (RIO Acoustics)* (pp. 1-8). IEEE.
- Espíndola, F. (2024). *Estatus y posibilidades de explotación biológicamente sustentable de sardina austral, Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo, año 2024* (Segundo informe: Convenio de Desempeño 2023). Instituto de Fomento Pesquero, IFOP.
- Feodorov, S., & Baranov, A. (1976). Algunos datos nuevos acerca la biología de sardina fueguina. *Hoz-va I Okeanografii Kaliningrad*, 65, 135-142.
- Fox, W. W. (1971). Random variability and parameter estimation for the generalized production model. *Fish. Bull*, 69(3), 569-580.

- Froese, R., Demirel, N., Coro, G., Kleisner, K. M., & Winker, H. (2017). Estimating fisheries reference points from catch and resilience. *Fish and Fisheries*, 18(3), 506-526.
- Galleguillos, R., Ferrada, S., Canales, C., Hernández, C., Oliva, M., González, M. T., & Toledo, P. (2012). Determinación de unidades poblacionales de sardina austral entre la X y XII regiones de Chile. *Informe Final, Proyecto FIP*, 17, 221.
- Gebremedhin, S., Bruneel, S., Getahun, A., Anteneh, W., & Goethals, P. (2021). Scientific methods to understand fish population dynamics and support sustainable fisheries management. *Water*, 13(4), 574.
- Han, Qingpeng & Shan, Xiujuan & Jin, Xianshi & Gorfine, Harry. (2023). Contrasting stock status trends obtained from survey and fishery CPUE, taking *Larimichthys polyactis* in Yellow Sea Large Marine Ecosystem as an example. *Ecological Indicators*. 147. 110032. 10.1016/j.ecolind.2023.110032.
- Hilborn, R., Amoroso, R. O., Anderson, C. M., Baum, J. K., Branch, T. A., Costello, C., De Moor, C. L., Faraj, A., Hively, D., & Jensen, O. P. (2020). Effective fisheries management instrumental in improving fish stock status. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(4), 2218-2224.
- Leal, E., Canales, T. M., Aranís, A., & Gonzáles, M. (2011). Actividad reproductiva y longitud de madurez de sardina austral *Sprattus fuegensis* en el mar interior de Chiloé, Chile. *Revista de biología marina y oceanografía*, 46(1), 43-51.
- Leal, E., Canales, C., Zuñiga-Basualto, Ma.J. (2013). Segundo Informe. Convenio II: Estatus y posibilidades de explotación biológicamente sustentables de los principales recursos pesqueros nacionales 2014. Proyecto 2.3: Investigación del estatus y posibilidades de explotación biológicamente sustentables en sardina común zona centro-sur y sardina austral año 2014. Sardina austral 2014, Subsecretaría de Economía, Septiembre de 2013. 51 pp.
- Leal, E., Zúñiga, M.J., Bucarey, D., Espíndola, F. (2018). Estatus y posibilidades de explotación biológicamente sustentables de los principales recursos pesqueros nacionales, 2018: Sardina austral X Región, 2018. (Segundo Informe. Subsecretaría de Economía Y EMT). Instituto de Fomento Pesquero.
- Madirolas, A., Sánchez, R., Hansen, J., Alvarez Colombo, G., & Reta, R. (2000). Distribución, abundancia, biología y hábitat de la sardina fueguina *Sprattus fuegensis*. *Inf Tec INIDEP*, 46.
- Neira, S., Arancibia, H., Barros, M., Castro, L., Cubillos, L., Niklitschek, E., & Alarcón, R. (2014). Rol ecosistémico de sardina austral e impacto de su

- explotación en la sustentabilidad de otras especies de interés comercial. *Pre-Informe Final Proyecto FIP, 15*. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Neira S., R. Alarcón, A. Arriagada, L. Cubillos, H. Arancibia & M. Barros. (2022). Informe Final Proyecto FIPA 2019-17. Asesoría para la revisión de PBRs y consideraciones ecosistémicas asociados a pesquerías pelágicas. Universidad de Concepción, 378 pp. + Anexos.
- Niklitschek, E. J., Toledo, P., Hernández, E., Nelson, J., Soule, M., Herranz, C., Murillo, C., & Valenzuela, X. (2009). *Identificación y evaluación hidroacústica de pequeños pelágicos en aguas interiores de la X y XI regiones, año 2007*. Informe Final Proyecto FIP 2007-05, Universidad Austral de Chile, Centro Trapananda, Coyhaique, Chile.
- Ovando, D., Free, C. M., Jensen, O. P., & Hilborn, R. (2022). A history and evaluation of catch-only stock assessment models. *Fish and Fisheries*, 23(3), 616-630.
- Ortiz, Mauricio & Taylor, Nathan & Kimoto, Ai & Forselledo, Rodrigo. (2022). Preliminary stock assessment of northeastern atlantic porbeagle (*Lamna nasus*) using the bayesian state-space surplus production model JABBA. 144-166.
- Pella, J. J., & Tomlinson, P. K. (1969). A generalized stock production model.
- Pikitch, E., Boersma, P., Boyd, I., Conover, O., Cury, P., Essington, T., Heppell, S., Houde, E., Mangel, M., Pauly, D., Plagányi, E., Sainsbury, K., & Steneck, R. (2012). *Little fish, big impact: Managing a crucial link in ocean food webs*. Lenfest Ocean Program.
- Punt, A. E. (2023). Those who fail to learn from history are condemned to repeat it: a perspective on current stock assessment good practices and the consequences of not following them. *Fisheries Research*, 261, 106642.
- Sant'Ana, Rodrigo & Mourato, Bruno & Kimoto, Ai & Walter, John & Winker, Henning. (2020). Atlantic yellowfin tuna stock assessment: An implementation of bayesian state-space surplus production model using JABBA.
- Sabatini, M. E., Giménez, J., & Rocco, V. (2001). Características del zooplancton del área costera de la plataforma patagónica austral (Argentina).
- Schaefer, M. B. (1991). Some aspects of the dynamics of populations important to the management of the commercial marine fisheries. *Bulletin of Mathematical Biology*, 53(1-2), 253-279.
- Shirokova, E. N. (1978). Contribution to biology of Tierra-del-Fuego-sprat-Sprattus fuegensis (Jenyns, 1842). *Biologiya Morya - Marine Biology*, (3), 78-84.

- SERNAPESCA. (2024). Anuario de Pesca y Acuicultura 2023. <http://www.sernapesca.cl/informacion-utilidad/anuarios-estadisticos-de-pesca-y-acuicultura>
- SERNAPESCA. (2024). Anuario de Pesca y Acuicultura 2022. <http://www.sernapesca.cl/informacion-utilidad/anuarios-estadisticos-de-pesca-y-acuicultura>
- SERNAPESCA. (2024). Anuario de Pesca y Acuicultura 2021. <http://www.sernapesca.cl/informacion-utilidad/anuarios-estadisticos-de-pesca-y-acuicultura>
- SERNAPESCA. (2024). Anuario de Pesca y Acuicultura 2020. <http://www.sernapesca.cl/informacion-utilidad/anuarios-estadisticos-de-pesca-y-acuicultura>
- SERNAPESCA. (2024). Anuario de Pesca y Acuicultura 2019. <http://www.sernapesca.cl/informacion-utilidad/anuarios-estadisticos-de-pesca-y-acuicultura>
- SERNAPESCA. (2024). Anuario de Pesca y Acuicultura 2018. <http://www.sernapesca.cl/informacion-utilidad/anuarios-estadisticos-de-pesca-y-acuicultura>
- SUBPESCA. (2012). Cuota Anual de Captura de Sardina Austral (*Sprattus fuegensis*), Aguas Interiores X-XI regiones, 2013 Inf. Tec. (R.Pesq) N°225-2012, Subsecretaría de Pesca y Acuicultura. Valparaíso. 19pp + Anexo.
- SUBPESCA. (2023). Estado de la situación de las principales pesquerías chilenas, 2022. Santiago: Subsecretaría de Pesca y Acuicultura, Departamento de Pesquerías.
- Tian, Z., Wang, F., Tian, S. *et al.* Stock assessment for Atlantic yellowfin tuna based on extended surplus production model considering life history. *Acta Oceanol. Sin.* 41, 41–51 (2022). <https://doi.org/10.1007/s13131-021-1924-x>
- Winker, H., Carvalho, F., & Kapur, M. (2018). JABBA: just another Bayesian biomass assessment. *Fisheries Research*, 204, 275-288.
- Winker, H., Carvalho, F., Thorson, J. T., Kell, L. T., Parker, D., Kapur, M., & Kerwath, S. E. (2020). JABBA-Select: Incorporating life history and fisheries' selectivity into surplus production models. *Fisheries Research*, 222, 105355.
- Zhou, S., Pascoe, S., Dowling, N., Haddon, M., Klaer, N., Larcombe, J., Smith, T., Thebaud, O., Vieira, S., & Wayte, S. (2010). Quantitatively defining biological

and economic reference points in data poor fisheries. *Final Report on FRDC Project, 44.*