



Universidade de Vigo

Trabajo Fin de Máster

Estudio del funcionamiento de métodos de evaluación de poblaciones de peces pobres en datos

Helena Nina del Río Ares

Máster en Técnicas Estadísticas

Curso 2022-2023

Propuesta de Trabajo Fin de Máster

Título en galego: Estudo do funcionamento de métodos de avaliación de poboacións de peces pobres en datos
Título en español: Estudio del funcionamiento de métodos de evaluación de poblaciones de peces pobres en datos
English title: Study of the performance of data-poor fish stock assessment methods
Modalidad: Modalidad B
Autor/a: Helena Nina del Río Ares, Universidad de Santiago de Compostela
Director/a: Javier Roca Pardiñas, Universidad de Vigo
Tutor/a: Santiago Cerviño, Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC); Marta Cousido Rocha, Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC); M. Grazia Pennino, Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC)
<p>Breve resumen del trabajo:</p> <p>En la mayoría de las poblaciones de peces los datos disponibles son limitados, y consecuentemente, carecen de evaluaciones totalmente cuantitativas de su estado. Desde 2012, ICES (del inglés “International Council for the Exploration of the Sea”) ha aplicado un marco para proporcionar asesoramiento sobre capturas para las poblaciones europeas con datos limitados. Los métodos sofisticados desarrollados para la evaluación de poblaciones no suelen ser adecuadas cuando trabajamos con datos limitados. Consecuentemente, se han propuestos métodos de evaluación diseñados para poblaciones de datos limitados como son los indicadores basados en tallas (LBI del inglés “length-based indicator”; ICES, 2015), el potencial de desove basado en tallas (LBSPR del inglés “length-based spawning potential ratio”; Hordyk et al., 2015). Dichos métodos están siendo ampliamente empleados para la evaluación de numerosas poblaciones de peces clasificadas como pobres en datos (Cousido et al., 2022). La simplicidad de estos métodos viene acompañada por una serie de asunciones que han permitido dichas simplificaciones obteniendo formulaciones sencillas con baja demanda de datos. Nuestro objetivo es estudiar el funcionamiento de dichos métodos en un entorno simulado donde el estado real de la población es por lo tanto conocido. Esto nos permitirá explorar como de acertadas son las evaluaciones proporcionadas por dichos métodos en diferentes escenarios de interés y también ante el incumplimiento de uno o varias de sus asunciones. El conocimiento del efecto de cada una de sus asunciones sobre el resultado final de la evaluación es de crucial interés pues en la práctica nos encontramos que en muchos casos dichas asunciones son cuestionables pero los métodos se aplican de igual modo al carecer de alternativas más precisas. Para cumplir estos objetivos será necesario llevar a cabo la simulación de dichas poblaciones de peces, en concreto, de la información de entrada a dichos modelos que son las distribuciones de tallas a lo largo de los años. Dichas distribuciones nos proporcionan el número de peces en cada grupo de tallas a lo largo de los años. Una vez dispongamos del mecanismo de simulación de los datos de entrada, los métodos LBI y LBSPR se aplicarán a cada una de la N réplicas (siendo N un número suficientemente grande). Finalmente, será necesario la definición de medidas tanto cuantitativas como gráficas que nos permitan resumir los resultados de dichas simulaciones y así evaluar el desempeño de los métodos LBI y LBSPR proporcionando recomendaciones para su uso en la práctica.</p>
Recomendaciones: Interés por la validación de las metodologías en entornos simulados. Dominio de R

Don Javier Roca Pardiñas, Catedrático/a de la universidad de Vigo de la Universidad de Vigo, don Santiago Cerviño, Científico titular del Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC), doña Marta Cousido Rocha, Investigadora del Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC) y doña M. Grazia Pennino, Científica titular del Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC) informan que el Trabajo Fin de Máster titulado

Estudio del funcionamiento de métodos de evaluación de poblaciones de peces pobres en datos

fue realizado bajo su dirección por doña Helena Nina del Río Ares para el Máster en Técnicas Estadísticas. Estimando que el trabajo está terminado, dan su conformidad para su presentación y defensa ante un tribunal.

En Santiago de Compostela, a 14 de Julio de 2023.

El director:
Don Javier Roca Pardiñas

El tutor:
Don/doña Santiago Cerviño

La tutora:
Doña Marta Cousido Rocha

La tutora:
Doña M. Grazia Pennino

La autora:
Doña Helena Nina del Río Ares

Declaración responsable. Para dar cumplimiento a la Ley 3/2022, de 24 de febrero, de convivencia universitaria, referente al plagio en el Trabajo Fin de Máster (Artículo 11, [Disposición 2978 del BOE núm. 48 de 2022](#)), **el/la autor/a declara** que el Trabajo Fin de Máster presentado es un documento original en el que se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones relativas al uso de material de apoyo desarrollado por otros/as autores/as:

- Todas las fuentes usadas para la elaboración de este trabajo han sido citadas convenientemente (libros, artículos, apuntes de profesorado, páginas web, programas, . . .)
- Cualquier contenido copiado o traducido textualmente se ha puesto entre comillas, citando su procedencia.

- Se ha hecho constar explícitamente cuando un capítulo, sección, demostración, . . . sea una adaptación casi literal de alguna fuente existente.

Y, acepta que, si se demostrara lo contrario, se le apliquen las medidas disciplinarias que correspondan.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer, en primer lugar, al equipo del Instituto Español de Oceanografía por acompañarme y formarme durante este proyecto, dándome la oportunidad de adentrarme en el mundo de la investigación. En especial, a Marta Cousido por su paciencia y sus valiosas indicaciones que, sin duda, me ayudaron a llevar a cabo este trabajo. También me gustaría agradecer, en el aspecto académico, a Javier Roca Pardiña. Finalmente, agradecer a mi familia y amigos por el apoyo durante todos estos meses de trabajo.

Índice general

Resumen	XI
Prefacio	XIII
1. Introducción	1
1.1. Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC)	1
1.2. Motivación del problema	1
1.3. Stocks con datos limitados	2
1.4. Métodos de evaluación	2
1.5. Objetivo y métodos de resolución	3
2. Metodología	5
2.1. Length Based Indicators (LBI)	5
2.2. Length Based Spawning Potential Ratio (LBSPR)	8
2.3. Simulación estadística	12
2.3.1. Modelo Operativo	13
2.3.2. Escenarios para la simulación	16
2.3.3. Distribución de tallas	18
3. Resultados	23
3.1. LBI	23
3.1.1. Escenario 1: F_{MSY}	24
3.1.2. Escenario 2: $0.5F_{MSY}$	25
3.1.3. Escenario 3: $0.7F_{crash}$	26
3.1.4. Escenario 4: Diferentes Periodos de Explotación Pesquera a lo Largo del Tiempo	29
3.2. LBSPR	31
3.2.1. Escenario 1: F_{MSY}	32
3.2.2. Escenario 2: $0.5F_{MSY}$	32
3.2.3. Escenario 3: $0.7F_{crash}$	33
3.2.4. Escenario 4: Diferentes Periodos de Explotación Pesquera a lo Largo del Tiempo	34
4. Conclusiones	37
A. Gráficos complementarios	39
A.1. Escenario 1: F_{MSY}	39
A.2. Escenario 2: $0.5F_{MSY}$	40
A.3. Escenario 3: $0.7F_{crash}$	41
A.4. Escenario 4: Diferentes Periodos de Explotación Pesquera a lo Largo del Tiempo	42

B. Distribución de tallas	43
B.1. Escenario 1: F_{MSY}	43
B.2. Escenario 2: $0.5F_{MSY}$	46
B.3. Escenario 3: $0.7F_{crash}$	48
B.4. Escenario 4: Diferentes Periodos de Explotación Pesquera a lo Largo del Tiempo	50
Bibliografía	53

Resumen

Resumen en español

Los modelos de evaluación de poblaciones son técnicas matemáticas y estadísticas aplicadas para analizar y comprender los cambios de las poblaciones de peces a lo largo del tiempo. Sin embargo, muchos de estos modelos requieren mucha información que suele ser deficiente para la gran mayoría de las poblaciones de peces (*stock*). Por este motivo, en los últimos años ha habido un gran interés en el uso y desarrollo de nuevos métodos para poblaciones consideradas de datos limitados o pobres en datos. El presente estudio se centra en dos de los métodos basados en tallas más utilizados: (1) indicadores basados en tallas (LBI del inglés “length-based indicator”) y (2) el potencial de desove basado en tallas (LBSPR del inglés “length-based spawning potential ratio”). En concreto, nuestro objetivo es diseñar una simulación específica para replicar el comportamiento del lenguado común (*Solea solea*) con el objetivo de comprobar en el funcionamiento de estos modelos en este stock en particular. Para ello, se simula la dinámica de la población mediante un modelo operativo (MO) el cual modela los procesos clave de la población (crecimiento, reproducción y mortalidad), además tras el MO también se definen procedimientos de muestreo sobre los datos simulados, que intentar imitar la recolección de datos en la práctica, obteniendo así los datos que empleamos en los métodos de evaluación. Nuestro MO sigue las ideas de Fisher et al. (2020) adaptando la biología de la población y también los procesos de reclutamiento (peces que por vez primera son vulnerables a la pesquería cada año) y crecimiento, y aspectos de la pesquería (es decir, esfuerzo y selectividad) a nuestro caso de estudio. El rendimiento de los métodos LBI y SBSPR, en el estudio de simulación, ha permitido concluir si estos métodos simples son capaces de proporcionar una percepción del estado del stock *Solea solea* acorde a la realidad. Además, permitirá que a continuación el grupo de investigación trabaje en definir nuevas reglas de control de capturas incluyendo indicadores provenientes de estos métodos.

English abstract

Stock assessment models are mathematical and statistical techniques implemented to analyze and understand changes of fish populations. However, many of these models require a lot of information that is usually deficient for the vast majority of fish stocks. For this reason, in recent years there has been great interest in the use and development of new methods for data-poor stocks. This study focuses on two of the most used length-based methods: (1) Length Based Indicators (LBI), and (2) Length Based Spawning Potential Ratio (LBSPR). In particular, our aim is to design a specific case simulation study for the common Sole (*Solea solea*) in order to test in simulations the performance of these models for a simulation scenario designed to replicate their behavior. To carry out the analysis the stock dynamics is simulated through operating models (OMs) which fit all relevant aspects of the fisheries system as well as how the data is collected. Our OMs follow the ideas in Fisher et al. (2020) considering plausible hypotheses about the biology of the stock, such as recruitment and growth processes, and aspects of the fishery (i.e., effort and selectivity). The performance of the LBI and LBSPR methods, in the simulation study, has allowed us to conclude whether these simple methods are able to provide a perception of the state of the stock according to reality.

Prefacio

Este trabajo ha sido realizado bajo un convenio de prácticas en el Instituto Nacional de Oceanografía (IEO-CSIC). Esta institución es un organismo público de investigación dedicado a la ciencia del mar, especialmente en lo relacionado con el conocimiento de los océanos, la sostenibilidad de los recursos pesqueros y el medio ambiente marino, que depende del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

Una población de peces sufre cambios a lo largo del tiempo, provocados por factores naturales o antrópicos. Algunos hacen que el tamaño de la población aumente, mientras que otros provocan una disminución de la misma. Es por eso, que su tamaño y estructura dependerán del balance que exista entre estos factores. Sin embargo, diferentes especies no tienen por qué seguir los mismos patrones, por lo que no deberían de ser gestionadas por igual. En este contexto surgen los métodos de evaluación, que nos ayudan a determinar el estado de una población de peces específica, estableciendo elementos que permitan sugerir pautas de manejo pesquero para la conservación de la biodiversidad y del medio ambiente. Seleccionamos dos métodos de evaluación diseñados para poblaciones de datos limitados: los indicadores basados en tallas (LBI del inglés “length-based indicator”; ICES , 2015) y el potencial de desove basado en tallas (LBSPR del inglés “length-based spawning potential ratio”; Hordyk et al. , 2015a). Estos métodos han sido seleccionados como objeto de estudio debido a su actualidad y reciente desarrollo, ya que trabajan con datos pobres, una cuestión que comenzó a tener relevancia a principios del siglo XXI. A su vez, el hecho de que sean tan recientes está relacionado con la carencia de estudios acerca de estos métodos, por lo que urge analizarlos para obtener información acerca de su aplicación en casos particulares como es el de la *Solea solea*. Estos métodos además, poseen una serie de asunciones que han permitido simplificaciones obteniendo formulaciones sencillas con baja demanda de datos.

Nuestro objetivo es estudiar el funcionamiento de dichos métodos en un entorno simulado donde el estado real de la población es, por lo tanto, conocido. La población seleccionada en este trabajo es el lenguado común, *Solea solea* (Linnaeus, 1758). Para realizar esta simulación emplearemos el lenguaje de programación R junto con el proyecto FLR (<https://flr-project.org/>). Este proporciona a los científicos pesqueros una plataforma potente y flexible para la ciencia pesquera cuantitativa basada en el lenguaje estadístico R. Los principios rectores de FLR son la apertura, a través de la participación de la comunidad y la ética del código abierto, la flexibilidad, a través de un diseño que no limita al usuario a un paradigma determinado, y la extensibilidad, mediante la provisión de herramientas que están listas para ser personalizadas y adaptadas. Se define una serie de estructuras de datos que representan distintos elementos del sistema pesquero. Estas estructuras se definen utilizando el sistema de clases S4 de R, mientras que las funciones para operar sobre esas clases se definen como métodos (Kell et al. [2007]).

El primer capítulo lo dedicamos a definir que es un método de evaluación y de los diferentes tipos que se pueden emplear en base a los datos disponibles para realizar el estudio. El segundo capítulo contendrá la metodología del estudio y está dividido en tres secciones, en la primera describiremos el modelo LBI, en la segunda el SBSPR y finalmente, el procedimiento de simulación llevado a cabo para obtener datos para aplicar los modelos anteriormente mencionados. En el segundo capítulo expondremos los resultados y en el último capítulo se realizará una discusión y conclusión de resultados.

Para llevar a cabo este proyecto, ha sido necesaria una inversión de tiempo en familiarizarse con terminología de gestión y evaluación de recursos, lo que ha permitido una correcta interpretación y comprensión del objeto de estudio. Por otro lado, para un seguimiento adecuado se recomienda encarecidamente tener presentes conocimientos adquiridos en la materia Simulación Estadística del Máster en Técnicas Estadísticas y un manejo avanzado en el lenguaje de programación R.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC)

El presente trabajo ha sido realizado bajo la supervisión del Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC) mediante un convenio de prácticas. Este organismo es un Centro Nacional del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), que depende del Ministerio de Ciencia e Innovación, dedicado a las ciencias del mar. En especial, a lo relacionado con el conocimiento científico de los océanos, la sostenibilidad de los recursos pesqueros y el medio ambiente marino (https://www.ieo.es/es_ES/web/ieo/acerca-del-ieo). Sus funciones básicas son:

- Investigación científica en oceanografía y ciencias del mar y estudio multidisciplinar del mar.
- Asesoramiento a la Administración General del Estado en su política pesquera y marina en general.
- Representación de España en las organizaciones internacionales de pesquerías y ciencias marinas.
- Promoción de la cooperación en investigación marina a escala regional, nacional e internacional.
- Formar investigadores marinos y difundir los conocimientos oceanográficos.

El Instituto Español de Oceanografía (IEO) es pionero en España y uno de los primeros organismos del mundo que comenzó a dedicarse íntegramente a la investigación del mar y sus recursos. Fue creado por el nombrado Dr. Odón de Buen en 1914 (Real Decreto de 17 de abril), como resultado de la integración en un mismo organismo de los citados Laboratorios de Biología Marina de Santander, Mallorca y Málaga. Posteriormente se crearía la sede central del IEO en Madrid (calle Fomento nº 7) y se integrarían en el organigrama los Laboratorios de nueva creación previstos en su decreto fundacional: Vigo (1917) y Canarias (Las Palmas, 1927).

1.2. Motivación del problema

La pesca es una pilar clave económico, medioambiental y social. En los últimos años se ha hecho más evidente la necesidad de un plan que incluya objetivos estratégicos de protección de especies. Para ello, un punto importante es decidir si un determinado esfuerzo o nivel de capturas es sostenible en un futuro. Con el fin de proporcionar información sobre esta problemática, surgen los modelos de evaluación de poblaciones. Estos modelos se componen de técnicas matemáticas y estadísticas que se utilizan para analizar y comprender el impacto de la pesca y los factores medioambientales en las poblaciones de peces. En este contexto, se utiliza el término “stock” para referirse a una unidad biológica de una especie que presenta características ecológicas similares y es considerada como la unidad objeto de

evaluación y ordenación.

1.3. Stocks con datos limitados

Para gestionar eficazmente los stocks de peces explotados, se necesita información biológica y de capturas para evaluar la biomasa (o abundancia) de las poblaciones y las tasas de mortalidad por pesca (o tasas de explotación) y, por tanto, establecer niveles de explotación sostenibles. No obstante, este tipo de información suele ser deficiente o inadecuada. Los stocks se clasifican pobres en datos (o datos limitados) cuando el conocimiento de la biología es limitado o se carece de datos de explotación. La incertidumbre inherente a las evaluaciones de estos stocks podría comprometer la capacidad de informar a la administración, lo cual es preocupante si se tiene en cuenta que los stocks poco estudiados suelen estar en peores condiciones que los stocks ricos.

1.4. Métodos de evaluación

La selección del método de evaluación dependerá del tipo de datos disponibles. El “International Council for the Exploration of the Sea” (ICES) en el seminario sobre el “Desarrollo de metodologías de evaluación cuantitativa basadas en rasgos del ciclo biológico, características de explotación y otros parámetros relevantes para stocks con datos limitados” (WKLIFE V), [ICES \[2015\]](#), identificó y debatió tres categorías de enfoques con datos limitados: (1) métodos basados en la talla (2) métodos basados únicamente en las capturas, y (3) métodos basados en las capturas y la CPUE (captura por unidad de esfuerzo) u otros métodos basados en índices de biomasa independientes de la pesquería. Este último grupo de métodos está representado por los modelos de producción excedentaria ([Cousido-Rocha et al. , 2022](#)).

Los datos de la frecuencia de tallas (distribución de tallas) son relativamente baratos y fáciles de conseguir, es por esto que se ha invertido en desarrollar metodología basada en ellos. Este estudio se centra en dos de los métodos basados en la distribución de tallas más utilizados, considerados por el ICES, los más apropiados para evaluar stocks con datos limitados: los indicadores basados en la talla (Length Based Indicators, LBI; [Froese et al. , 2004](#); [ICES , 2015](#)) y el coeficiente de potencial de desove basado en la talla (Length Based Spawning Potential Ratio, LBSPR, [Hordyk et al. , 2015a](#)). Cuando hablamos de frecuencia de tallas nos referimos al número total de capturas en frecuencia relativa o absoluta para diferentes agrupaciones de tallas a lo largo del rango de tallas presentes en la capturas (Figura 1.1)

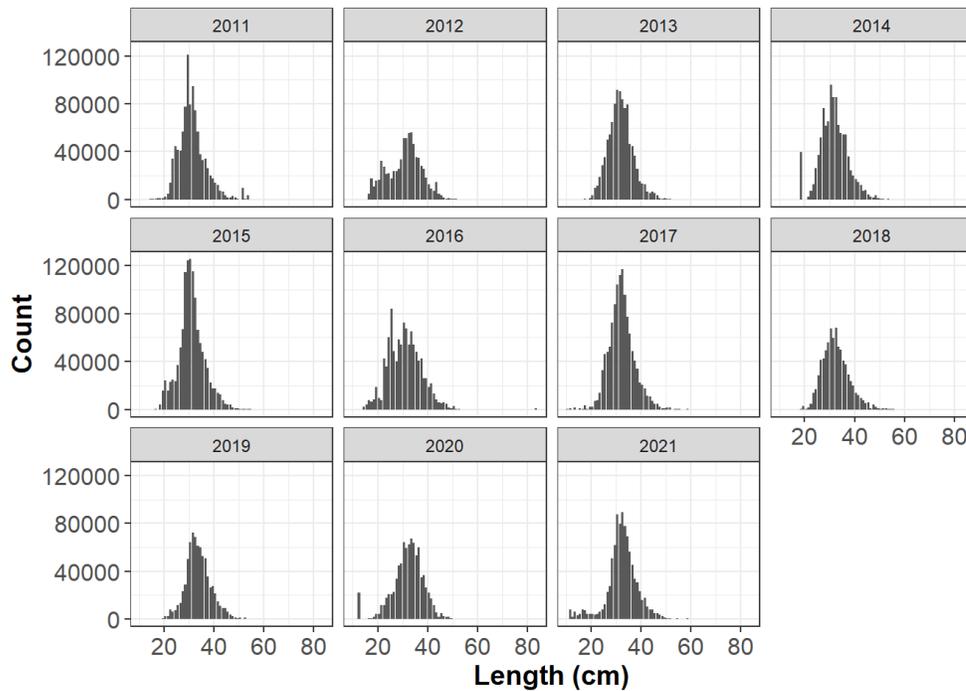


Figura 1.1: Distribución de frecuencias de talla de las capturas de lenguado común (*Solea solea*) de 2011 a 2021, recopiladas por el instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC) y el Instituto Portugués do Mar e da Atmosfera (IPMA), como parte de sus programas nacionales de muestreo pesquero dentro del Marco Europeo de Recogida de Datos (DCF) diseñado para proporcionar apoyo probatorio al Política Pesquera Común.

1.5. Objetivo y métodos de resolución

Consideramos relevante el hecho de que estos métodos, aparte de destacar por su simplicidad, son recientes. Surgen por la cumbre de Johannesbourg (<https://www.un.org/es/conferences/environment/johannesburg2002>) que nos requiere evaluar stocks que antes no se evaluaban y de los que disponemos de pocos datos, con estos modelos en ICES se han conseguido gestionar entorno a 100 nuevos stocks, WKLIFE (<https://www.ices.dk/community/groups/Pages/WKLIFEXI.aspx>) es el grupo de ICES centrado en estos modelos y se han realizado ya 11 encuentros.

Para realizar un estudio sobre el funcionamiento de los métodos de evaluación propuestos en este trabajo y poder aconsejar en la práctica, diseñaremos todo un escenario de simulación. Con esto estamos cubriendo la primera fase de lo que se conoce como ciclo de Evaluación de la Estrategias de Gestión (*Management Strategy Evaluation*, MSE) que describiremos más adelante, en la tercera sección del capítulo de Metodología. En esencia, el MSE consiste en replicar, sobre los datos obtenidos de una simulación, lo que se hace en la práctica en la evaluación y gestión de un stock. Esto permite valorar el funcionamiento de los métodos de evaluación en un entorno controlado y también las reglas de control de capturas que se aplican finalmente en la práctica.

El objetivo del equipo en el que se realiza ese trabajo, es completar este estudio finalizando el proceso MSE para el stock del lenguado común, evaluando reglas de control de capturas empleando indicadores derivados de los modelos estudiados en este trabajo (LBI y LBSPR). En base a las reglas de capturas propuestas se toman decisiones de gestión, y en base a esas decisiones se proyecta la po-

blación a lo largo de los años, pudiendo así comprobar si la decisión tomada ha sido la adecuada. Sin embargo, como hemos mencionado, este trabajo se centra en el procedimiento de simulación para la obtención de datos y la valoración de los modelos de evaluación propuestos (LBI y LBSPR) quedando como tarea futura el estudio de reglas de captura empleando información de LBI y LBSPR.

Como hemos mencionado nos centraremos exclusivamente en el lenguado común, *Solea solea* (Linnaeus, 1758). Esta especie ha sido tradicionalmente considerada de gran importancia debido a su elevado valor comercial (Teixeira et al. , 2009; Teixeira y Cabral , 2010). A pesar de que en el Mar del Norte el stock del lenguado común está históricamente evaluado y gestionado, en la región de la costa ibérica, ha tenido poca atención hasta recientemente (Tanner et al. , 2017). La unidad de gestión del stock de lenguado común en aguas del Atlántico ibérico comprende las flotas portuguesa y española que operan en las divisiones 8c y 9a del ICES (ver Figura 1.2). Por lo tanto a partir de ahora, nos referiremos a este stock como sol.8c.9a.

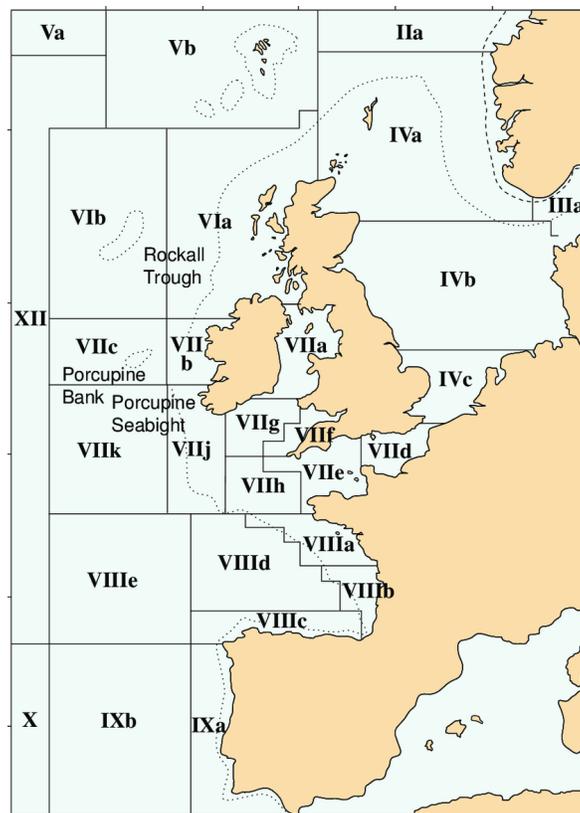


Figura 1.2: Mapa de las subzonas y divisiones del ICES, Atlántico Nordeste, en el que se muestra la zona de estudio; el Rockall Trough y las laderas de Porcupine Bank y Seabight.

Capítulo 2

Metodología

En este capítulo introduciremos, en primer lugar, una descripción de los métodos basados en tallas LBI y LBSPR. Estos métodos, como mencionamos anteriormente, son muy útiles, ya que nos proporcionan información sobre el estado de un stock a partir de su distribución de tallas. Sin embargo, también son métodos bastante restrictivos (debido a las asunciones necesarias para obtener una formulación simple) por lo que comprobar su buen funcionamiento en la práctica es necesario y crucial para asegurarnos de que su uso contribuirá a una buena conservación de los recursos pesqueros.

2.1. Length Based Indicators (LBI)

Los *Length Based Indicators* (LBI), traducido como indicadores basados en tallas, se calculan usando las distribuciones de frecuencias de tallas, obtenidas de las capturas o los desembarques, y se comparan con los niveles de referencia basados en los parámetros del ciclo vital (Froese et al. , 2004; ICES , 2015). Estos indicadores están relacionados con la conservación de los individuos (tanto conservación de individuos pequeños o inmaduros como grandes), el rendimiento óptimo y la distribución de tallas asociada al rendimiento máximo sostenible (*Maximum Sustainable Yield*, MSY) y pueden, por tanto, proporcionar descripciones del estado de la población. Aclaremos que, cuando hablamos de MSY, nos referimos a la media máxima de rendimiento (captura) que se puede extraer de forma sostenible y a largo plazo de un stock, que corresponde al rendimiento esperado de una pesca con F_{MSY} (tasa de mortalidad por pesca que, si se aplica de forma constante, produciría un Rendimiento Máximo Sostenible). La metodología fue desarrollada en el WKLIFE V (2015), aunque ya había sido introducida previamente por Froese et al. [2004]. Para la aplicación de este método en la práctica se necesita la siguiente información:

- Talla de 1^o madurez (L_{mat}). Corresponde a la talla en la que la probabilidad de haber alcanzado la madurez es del 50%. Nos referimos a la madurez como la talla a la cual el 50% de los peces de un sexo determinado se consideran maduros para la reproducción.
- Talla asintótica de Bertalanffy (L_{∞}). Es la talla máxima que los peces de una especie determinada población alcanzarían como promedio si viviesen eternamente.
- El ratio entre la mortalidad natural y la tasa de crecimiento de von Bertalanffy (M/k). La ecuación de crecimiento de von Bertalanffy es la siguiente:

$$L_t = L_{\infty}(1 - e^{-k(t-t_0)}) \quad (2.1)$$

donde t es la edad de los individuos, L_t es la talla asociada a t , k es un parámetro de la tasa de crecimiento y t_0 es la edad hipotética cuando la talla es cero. Esta ecuación de crecimiento lo que nos permite es ver que talla le corresponde a cada una de las edades de la población acorde

a k , L_∞ y t_0 . Posteriormente en la Sección 2.3, ilustraremos esta ecuación (Figura 2.5) con el caso particular del crecimiento empleado en nuestra simulación para sol.8c.9a

- Distribuciones de tallas de capturas/desembarques por año.
- Parámetros a y b de la relación talla-peso:

$$W = aL^b \quad (2.2)$$

donde W representa el peso del individuo asociado a la talla L .

Una vez introducidos los parámetros de entrada, los stocks son evaluados en base a los indicadores. En este estudio estamos considerando seis indicadores que se detallan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Conjunto de indicadores basados en las tallas, sus referencias, los ratios, y sus valores esperados agrupados en términos de conservación/sostenibilidad, rendimiento óptimo y MSY.

Indicador	Calcula	Punto de referencia	Ratio	Valor esperado	Propiedad
$L_{max5\%}$	Talla media del 5% más grande	L_∞	$L_{max5\%}/L_\infty$	> 0.8	Conservación de individuos grandes
P_{mega}	Proporción de individuos por encima de la talla óptima más el 10%	$0.3 - 0.4$	P_{mega}	> 0.3	Conservación de individuos grandes
$L_{25\%}$	Percentil 25 de la distribución de tallas	L_{mat}	$L_{25\%}/L_{mat}$	> 1	Conservación de inmaduros
L_c	Talla de la primera captura	L_{mat}	L_c/L_{mat}	> 1	Conservación de inmaduros
L_{mean}	Talla media de los individuos $> L_c$	$L_{opt} = \frac{3L_\infty}{3 + (M/k)}$	L_{mean}/L_{opt}	≈ 0.9	Rendimiento óptimo
L_{mean}	Talla media de los individuos $> L_c$	$L_{F=M} = \frac{(1-a)L_c + aL_\infty}{1/(2(M/k)+1)}$	$L_{mean}/L_{F=M}$	≥ 1	MSY

El indicador basado en la talla $L_{max5\%}$, caracteriza la parte superior de la distribución de frecuencia de tallas y analiza la conservación de los individuos grandes comparándose con el punto de referencia L_∞ . El ratio correspondiente $L_{max5\%}/L_\infty$ proporciona información sobre el grado de truncamiento de la estructura de tallas del stock que puede ser causada por la pesca, y según un estudio de simulación realizado por Miethe et al. [2015], debería de estar por encima de 0.8. El indicador P_{mega} se refiere a la proporción de mega-desovadores en el stock (peces mayores que la talla óptima $L_{opt} = 3L_\infty/(3+(M/k))$ más el 10%) y sigue la idea, resumida por Froese et al. [2004], de “dejar vivir al mega-desovador”. Froese et al. [2004] y el ICES [2015] han sugerido que los valores superiores a 0.3 corresponden a

poblaciones sanas. Sin embargo, en la literatura se ha discutido que este valor puede no ser adecuado, ya que nos lleva a conclusiones incorrectas sobre el estado del stock (Cousido-Rocha et al. , 2022). Además esto se confirma en nuestro estudio para el stock sol.8c.9a. Los indicadores de talla $L_{25\%}$ (percentil 25 de la distribución de tallas) y L_c (talla de la primera captura, la primera clase de talla que tiene, al menos, un 50% de la moda en la frecuencia de tallas de captura observada) hacen referencia a la conservación de los individuos inmaduros y siguen el principio de “dejarlos desovar” (Froese et al. , 2004). Se espera que la relación entre ambos indicadores y L_{mat} sea superior a 1. La relación L_{mean}/L_{opt} (siendo L_{mean} la talla media de los individuos por encima de L_c) se asocia con el rendimiento óptimo y sigue el principio de “dejarlos crecer” (Froese et al. , 2004). Se espera que el valor sea aproximadamente 0.9 para asegurarnos de que se está explotando acorde al rendimiento óptimo. Por último, si denotamos con F la mortalidad por pesca y con M la mortalidad natural, tenemos el indicador $L_{F=M}$, que es la talla de referencia o aproximación de la talla al MSY, bajo la asunción de que $F = M$. La talla de referencia se puede calcular como:

$$L_{F=M} = (1 - a)L_c + aL_\infty \quad (2.3)$$

donde $a = 1/(2(M/k) + 1)$. Se espera que $L_{mean}/L_{F=M}$ sea mayor o igual que 1.

Year	Conservation				Optimizing Yield	MSY
	L_c / L_{mat}	$L_{25\%} / L_{mat}$	L_{max5} / L_{inf}	P_{mega}	L_{mean} / L_{opt}	$L_{mean} / L_{F=M}$
2011	1.10	1.10	0.94	0.13	1.00	0.99
2012	0.83	1.02	0.90	0.17	0.96	1.12
2013	1.02	1.10	0.89	0.14	0.99	1.01
2014	1.02	1.10	0.91	0.15	0.99	1.02
2015	1.06	1.10	0.88	0.12	0.98	0.98
2016	0.87	0.98	0.93	0.17	0.95	1.08
2017	1.10	1.13	0.91	0.15	1.02	1.00
2018	1.02	1.10	0.93	0.18	1.00	1.03
2019	1.13	1.17	0.94	0.23	1.05	1.01
2020	1.06	1.10	0.89	0.20	1.03	1.03
2021	1.10	1.13	0.93	0.18	1.03	1.01

Figura 2.1: Ejemplo de salida del método LBI (tabla con semáforo del estado del stock en la serie histórica), aplicado a las capturas de lenguado común (*Solea solea*) de 2011 a 2021.

Para interpretar y discutir correctamente los resultados proporcionados por el método LBI, debemos tener en cuenta que este método asume ciertas condiciones que pueden no darse en un escenario real (ver Tabla 2.2). Se supone equilibrio, es decir, se supone que la mortalidad total y el reclutamiento han sido constantes durante un periodo tan largo como la vida de la serie temporal. Cuando hablamos del reclutamiento, nos referimos a el proceso por el cual, la cantidad de peces jóvenes que sobreviven a las etapas de huevo, larva y juveniles se incorporan por primera vez a la fase explotable de una población de peces, siendo susceptibles de ser capturados por un arte particular de pesca.

Los valores de referencia para cada indicador LBI son adecuados para una selectividad plana, no en forma de cúpula, se asume que la selectividad (vulnerabilidad relativa al arte de diferentes clases de edad o talla) está modelada con una curva de tipo logística. Existen diferentes parametrizaciones para esta función, por lo que en la sección donde describimos la simulación estadística de este trabajo, aportamos la ecuación matemática empleada (ver ecuación 2.12) junto a una representación de la misma (ver Figura 2.7). Por último el método asume que la estructura de la población está representada correctamente por la estructura de las capturas y que los parámetros de entrada son conocidos, cuando los parámetros de historia vital L_{mat} , L_{∞} son a menudo inciertos.

El método LBI se calculó utilizando el código utilities.R disponible en Github de ICES Tools (área de desarrollo) (https://raw.githubusercontent.com/ices-tools-dev/LBIndicator_shiny/master/utilities.R). Este código es una modificación del utilizado por el ICES [2015]. Nos aporta unas tablas denominadas “tablas semáforo”, donde marca con el color verde los indicadores que están por encima del nivel de referencia, y con rojo, los que están por debajo, lo cual nos aporta una impresión rápida del estado del stock (ver Figura 2.1). También existe una app de Shiny (https://scott.shinyapps.io/LBIndicator_shiny/).

2.2. Length Based Spawning Potential Ratio (LBSPR)

El *Length Based Spawning Potential Ratio* (LBSPR), traducido como potencial de desove basado en la talla, al igual que LBI, es un método de evaluación que se ha desarrollado recientemente como herramienta para evaluar y gestionar pesquerías con pocos datos (Hordyk et al., 2015b; Prince et al., 2015b). El método LBSPR utiliza estimaciones de la relación entre la mortalidad natural (M) y el parámetro k de la ecuación de crecimiento de von Bertalanffy (M/k) para estimar la proporción del potencial de desove (SPR) a partir de los datos de composición por tallas de una población explotada. Donde el Ratio Potencial de desove (*Spawning Potential Ratio*, SPR) se define como la proporción de biomasa reproductora por recluta (*Spawning Biomass Per Recruit*, SBPR) en una población explotada con respecto al SBPR en una población no explotada (virgen). A diferencia de los enfoques basados en la mortalidad por pesca, que se refieren directamente a parte de la población eliminada cada año por la pesca, el método LBSPR refleja el efecto acumulativo de la pesca e impactos ecológicos sobre el potencial de desove de stocks explotados. El SPR puede utilizarse para fijar objetivos y puntos de referencia límite para el seguimiento del estado de las poblaciones.

El método LBSPR tiene una estructura basada en la edad de los individuos. Es habitual suponer, en los métodos de evaluación, que la talla asociada a la edad sigue una distribución normal, y que la talla media (asociada a la edad) se describe mediante la ecuación de crecimiento de von Bertalanffy (ecuación 2.1). Sin embargo, al suponer que la selectividad depende de la edad, no se está teniendo en cuenta los distintos ritmos de crecimiento de las diferentes especies. Los peces de crecimiento más rápido alcanzarán la talla a la que son vulnerables a las artes de pesca antes que los individuos de crecimiento más lento, por lo que estarán más expuestos a la pesca a lo largo de su vida. Esto provoca que la talla asociada a la edad ya no se distribuya normalmente, ya que tenemos diferentes tasas de mortalidad por pesca entre peces de la misma edad. A este efecto se le conoce como “Fenómeno de Lee” (Lee, 1912). El método LBSPR estructurado por edades no tiene en cuenta este fenómeno, por lo que se espera que sobreestime la mortalidad por pesca. Aunque este efecto se suele ignorar en los modelos estructurados por edades, se han desarrollado varias técnicas para tenerlo en cuenta en las evaluaciones pesqueras dividiendo la población de peces en varias subpoblaciones y realizando un seguimiento de subcohortes (peces nacidos en el mismo período, normalmente dentro de un mismo año) a lo largo del tiempo. Este enfoque es el de *growth-type-group* (GTG) de Walters y Martell [2004]. En Hordyk et al. [2016] se considera una versión de LBSPR estructurado por tallas utilizando este enfoque. Este modelo es el que emplearemos en el presente trabajo para evaluar el estado del stock sol.8c.9a. Para aplicar este método en la práctica se necesita la siguiente información:

- Datos sobre la composición por tallas de la captura para estimar la SPR.
- El ratio M/k .
- La talla asintótica de Bertalanffy L_∞ .
- Parámetros a y b de la relación talla-peso.
- Tallas de madurez L_{mat} y L_{95} (talla a la que el 50 % y el 95 % de la población respectivamente es madura).

El método, esencialmente ajusta las distribuciones de tallas observadas proporcionando estimaciones de F/M , de los parámetros de selectividad (L_{sel50} y L_{sel95}) y de SPR mediante un enfoque de máxima verosimilitud que minimiza las diferencias entre las distribuciones de tallas observadas y estimadas (ver Figura 2.2).

- F/M .
- Parámetros de selectividad L_{sel50} y L_{sel95} (suponiendo una selectividad logística). Donde L_{sel50} es la talla al 50 % de selectividad y L_{sel95} es la talla asociada al 95 % de selectividad.
- SPR.

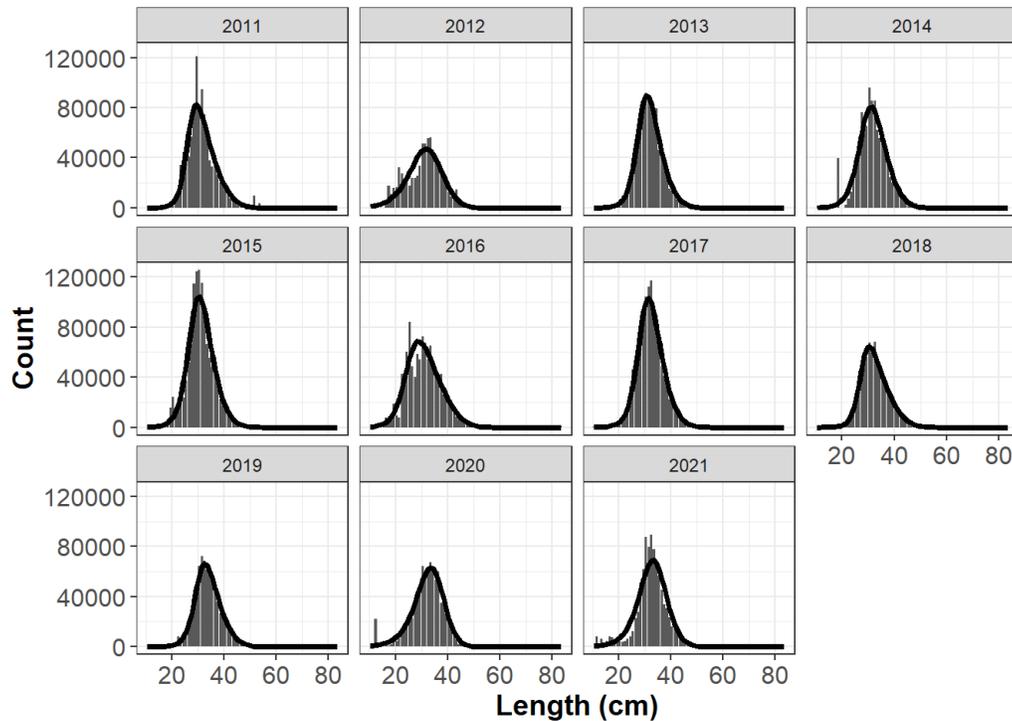


Figura 2.2: Ajuste de la distribución de tallas por el método LBSPR, del lenguado común (*Solea solea*) de 2011 a 2021.

Veamos a continuación como se calculan los pasos del algoritmo descrito en [Hordyk et al. \[2016\]](#). Podemos estimar F/M , $S_{L_{mat}}$ y $S_{L_{95}}$ a partir de una muestra representativa de la estructura de tallas de la captura, minimizando la siguiente función de verosimilitud multinomial negativa (*Negative Log-Likelihood* ; NLL):

$$NLL = \sum_i O_i \ln \left(\frac{P_i}{O_i^P} \right) \quad (2.4)$$

Donde O_i es el número observado de capturas para la clase de talla i , O_i^P es la proporción de capturas observadas en la clase de talla i y P_i es la proporción de capturas esperada para la clase de talla i , dados parámetros de historia de ciclo vital, selectividad y F/M .

El modelo *growth-type-group* (GTG) descrito en [Hordyk et al. \[2016\]](#) se utiliza para calcular el ratio potencial de desove (SPR). Para tener en cuenta las diferentes trayectorias de crecimiento, se supone que el tamaño relativo en la madurez es constante en todos los GTG, y que las cohortes (peces nacidos en el mismo período, normalmente dentro de un mismo año) con tamaños asintóticos menores y mayores alcanzan la madurez con tallas absolutas menores y mayores, respectivamente. La talla de madurez para cada grupo de crecimiento viene dado por:

$$L_{mat,g} = \frac{\bar{L}_{mat}}{L_\infty} L_{\infty,g} \quad (2.5)$$

$$L_{95,g} = \frac{\bar{L}_{95}}{L_\infty} L_{\infty,g} \quad (2.6)$$

donde \bar{L}_{mat} y \bar{L}_{95} son la talla media al 50 % y al 95 % de madurez respectivamente. Suponiendo que la producción de huevos es proporcional al tamaño de los peces maduros, la fecundidad relativa a la talla (número de huevos producido como media por una hembra de una determinada talla) viene dada por:

$$Fec_{L,g} = Mat_{L,g} L^\beta \quad (2.7)$$

Donde $Mat_{L,g}$ es la madurez en función de la talla, L , modelada mediante una curva logística, para cada *growth-type-group*, g . El valor de β puede variar para reflejar diferentes relaciones de talla-fecundidad. Por ejemplo, el ajuste a cero supone que el rendimiento reproductivo de los individuos maduros es constante e independiente del tamaño. Usando las dos ecuaciones anteriores y el modelo GTG se calcula el SPR de la siguiente manera:

$$SPR = \frac{\sum_g \sum_L \frac{1}{(M_{L,g} + F_L)} (\tilde{D}_{L,g} - \tilde{D}_{L+dL,g}) Fec_L}{\sum_g \sum_L \frac{1}{M_{L,g}}} \quad (2.8)$$

Donde F_L representa la mortalidad por pesca asociada a la talla L , calculada a partir de la función de selectividad logística por tallas (S_L):

$$F_L = F S_L. \quad (2.9)$$

$\tilde{D}_{L+dL,g}$ es la función de densidad acumulada estandarizada de individuos entre las clases L y $L+dL$ para cada grupo de crecimiento g , suponiendo que dL es lo suficientemente pequeño como para que la tasa de mortalidad sea constante dentro de cada grupo. $M_{L,g}$ la función de madurez en función de la talla para cada grupo y Fec_L la fecundidad relativa a la talla.

Para una correcta interpretación de los resultados, cabe destacar que las estimaciones de SPR que oscilan entre 0.35 y 0.4, se asocian generalmente con un stock a nivel MSY ([Legault y Brooks, 2013](#)), mientras que las estimaciones de SPR que se sitúan por debajo de 0.1 – 0.15, indican que el stock está próximo al colapso, dichos límites se han fijado sobre la base de [Goodyear \[1993\]](#), quien señaló que el riesgo de colapso aumenta considerablemente para valores de SPR inferiores a 0.2.

Además el método LBSPR, al igual que el LBI, asume ciertas condiciones que pueden no cumplirse en un escenario real (ver Tabla 2.2): se supone equilibrio, el método supone el reclutamiento y la

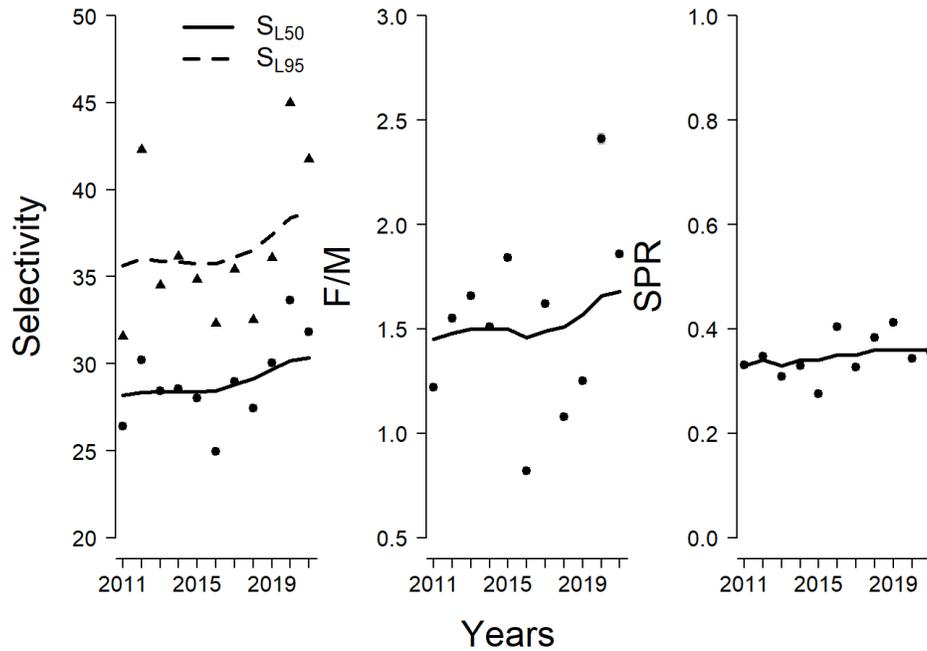


Figura 2.3: Ejemplo de salida del método LBSPR, aplicado a las capturas de lenguado común (*Solea solea*) de 2011 a 2021. Observamos que en este caso el SPR se encuentra entre los valores 0.2 – 0.4, valores asociados a un buen estado del stock.

presión pesquera son constantes, el crecimiento está descrito adecuadamente por la ecuación de von Bertalanffy (ecuación 2.1), los datos de composición por tallas son representativos del stock explotado en estado estacionario y no están sujetos a un muestreo sesgado, la selectividad sigue una curva logística y por último, el método presupone que se conocen los parámetros de historia de vida sin error.

El método LBSPR se ajustó utilizando el paquete LBSPR R de Hordyk [2019]. Este paquete contiene dos tipos de funcionalidades distintas:

1. Simulación de la composición de tallas esperada, la curva de crecimiento y las curvas SPR y de rendimiento utilizando el modelo LBSPR.
2. Ajuste a datos empíricos de tallas para proporcionar una estimación del SPR.

También existe un app de Shiny (<http://barefootecologist.com.au/lbspr>). En este trabajo nos limitamos a ajustar datos extraídos de nuestra simulación estadística (ver Sección 2.3) para proporcionar una estimación de SPR.

Tabla 2.2: Resumen de los métodos LBI y LBSPR.

Método	Input	Asunciones	Output
LBI	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Datos de la frecuencia de tallas ▪ Talla asintótica, L_∞ ▪ M/k ▪ Parámetros a y b de la relación talla-peso ▪ Talla de madurez, L_{mat} 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ El stock se encuentra en equilibrio ▪ Los parámetros de entrada son conocidos. ▪ La estructura de la población está representada correctamente por la estructura de las capturas. ▪ Selectividad logística 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ L_c/L_{mat} ▪ $L_{25\%}/L_{mat}$ ▪ $L_{max5\%}/L_\infty$ ▪ P_{mega} ▪ L_{mean}/L_{opt} ▪ $L_{mean}/L_{F=M}$
LBSPR	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Datos de la frecuencia de tallas ▪ Talla asintótica, L_∞ ▪ M/k ▪ Parámetros a y b de la relación talla-peso ▪ Talla de madurez, L_{mat} ▪ $L_{95\%}$ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Stock en equilibrio. ▪ Crecimiento descrito correctamente por la ecuación de von Bertalanffy. ▪ Datos de composición de tallas representativos del stock explotado. ▪ Selectividad logística. ▪ Parámetros de entrada conocidos. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ F/M ▪ La talla asociada al 50% de selectividad (L_{sel50}) ▪ La talla asociada al 95% de selectividad (L_{sel95}) ▪ SPR

2.3. Simulación estadística

En esta sección describiremos el procedimiento estadístico utilizado para simular la dinámica del recurso, stock sol.8c.9a, y muestrear datos a partir de la población creada. Es crucial evaluar el funcionamiento de los métodos en simulaciones, explícitamente diseñadas para el stock en cuestión, ya que así podemos conocer en profundidad el funcionamiento de los métodos y podemos obtener en la práctica conclusiones adecuados de su aplicación a datos reales. Estas simulaciones representan el comportamiento del stock teniendo en cuenta factores como la tasa de crecimiento, la mortalidad, la reproducción y el patrón de reclutamiento.

Este proceso de simulación forma parte de un esquema de simulación más complejo diseñado exclusivamente para su uso en la evaluación de recursos pesqueros: el ciclo de Evaluación de Estrategias de Gestión (*Management Strategy Evaluation*, MSE). El proceso de evaluación y gestión de un stock consta de diferentes fases: (1) muestreo de la población real recogiendo datos, mediante de barcos comerciales y también campañas oceanográficos, (2) una vez que tenemos nuestra muestra que nos proporciona información de la población de peces, aplicamos un método/modelo de evaluación para poder conocer el estado del stock en cuestión, (3) a partir de los resultados del modelos de evaluación y de la regla de control de pesca (*Harvest Control Rule*, HCR) que se haya considerado adecuada, se toma una decisión de gestión de la cual se deriva el TAC (*Total Allowable Catches*), que determina la cantidad que se puede pescar en el próximo año/años, (4) se vuelven a recibir datos y se repite el ciclo de evaluación.

Es muy importante comprobar el buen funcionamiento del método de evaluación diseñado, ya que en caso de que este falle, las consecuencias pueden ser muy duras para la población de peces, que puede tardar muchos años en recuperarse y en algunos casos no conseguir la recuperación, por lo que necesitamos evaluar nuestros métodos antes de aplicarlos a un recurso natural tan preciado. Por esta razón, antes de realizar una evaluación completa usando los datos empíricos, se necesitaría hacer un estudio sobre datos simulados y por eso se desarrolla el proceso MSE. El procedimiento es idéntico al descrito anteriormente, pero añadiendo un nuevo paso, que es simular la dinámica real de la población. Una vez implementado nuestro modelo de evaluación y decidida la regla de gestión que se va a aplicar, se deduce cuanto se va a poder pescar, es decir se Implementan Medidas de Gestión (*Management Implementation*). Asumiendo que a nuestros datos se le van a aplicar estas medidas de gestión, proyectamos la población de peces en el futuro para observar como evoluciona el stock a lo largo del tiempo en base a estas simulaciones (ver Figura 2.4).

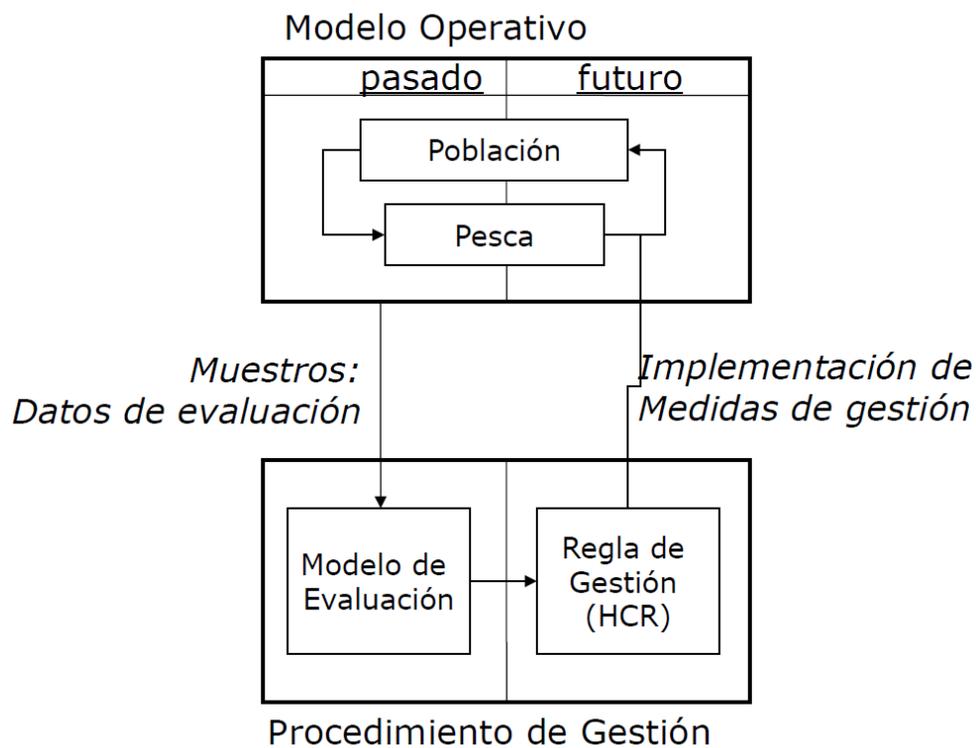


Figura 2.4: Evaluación de Estrategias de Gestión (*Management Strategy Evaluation, MSE*)

2.3.1. Modelo Operativo

El procedimiento de simulación de la población de peces, así como de las pesquerías que operan en ellas se denomina Modelo Operativo (MO). Aunque nuestro objetivo final sería completar todas las

fases del MSE para el stock del lenguado común, que nos permita valorar como funcionan los métodos LBI y LBSPR, y como funciona la regla de control de pesca que se está utilizando actualmente (ICES, 2020), este trabajo tan solo abarca el modelo operativo y la valoración del modelo de evaluación, dejando desarrollada la base para completar el estudio incorporando la evaluación de reglas de captura propuestas empleando indicadores derivados de LBI y LBSPR. Para modelar la dinámica de una población tenemos que abordar los siguientes procesos:

1. Reproducción: La entrada de nuevos individuos a la población (reclutamiento).
2. Crecimiento: cómo crecen los individuos ya en la población.
3. Mortalidad: cómo mueren los individuos, distinguiendo entre mortalidad natural y mortalidad por pesca (en el caso de la mortalidad por pesca además del esfuerzo de pesca juega un papel crucial la selectividad, probabilidad de pescar un individuo de la población dependiendo de su talla).

A continuación describimos el modelado de cada uno de estos procesos clave. EL MO que vamos a usar en nuestra simulación sigue las ideas descritas en Fischer et al. [2020]. En este caso, adaptamos la simulación al stock sol.8c.9a empleando para ello parámetros de su ciclo vital, cuyos valores podemos encontrar en la Tabla 2.5. A partir de estos datos, utilizando el paquete FLR (Kell et al. [2007]), y siguiendo de cerca el enfoque de Jardim et al. [2015] y Fischer et al. [2020], simulamos el comportamiento de la población, estructurando por edades. Este nos devuelve el número de individuos por edad en cada año, las capturas por edad, la mortalidad por pesca por edad, la selectividad por edad, etc., información fundamental para la creación de la distribución de tallas.

El crecimiento se modelizó con la ecuación de von Bertalanffy (ecuación 2.1), fijando $t_0 = -0.1$ y $1 \leq t \leq a_{max}$, donde a_{max} se define como la edad, redondeada hacia arriba, en la que el crecimiento alcanza el 95% de L_∞ . La fórmula para a_{max} se obtiene fijando $L = 0.95L_\infty$ en la ecuación de von Bertalanffy (ecuación 2.1) y despejando t :

$$a_{max} = t_0 - \frac{\ln(0.05)}{k} \quad (2.10)$$

Para modelar la mortalidad natural (M), se usa la función de Gislason (Gislason et al. , 2010). Se define de la siguiente manera:

$$M_L = e^{0.55} L^{-1.61} L_\infty^{1.44} k \quad (2.11)$$

donde M_L es la mortalidad natural asociada a la talla L , L_∞ es la talla asintótica y k es el parámetro de crecimiento de von Bertalanffy (ver Figura 2.6). Para obtener la mortalidad natural en función de la edad, se sustituye la ecuación de crecimiento de von Bertalanffy (2.1) en la ecuación 2.11.

La selectividad es la vulnerabilidad relativa al arte de diferentes clases de edad o talla (en este caso la selectividad viene asociada a la edad) . Se suelen emplear los términos selectividad y perfil de explotación indistintamente. El conocimiento de la curva de selectividad en nuestro modelo es de suma importancia. En este trabajo la modelaremos con una función logística (ver ecuación 2.12), que se encuentra en el paquete FLife (Kell et al. , 2007), ya que es la que se ajusta mejor al comportamiento de los artes de pesca que van al lenguado. La curva está definida de la siguiente manera:

$$s(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } t < (a_{50} - 5) \\ \frac{t_{SYM}}{1 + 19^{(a_{50}-t)/t_{95}}} & \text{si } (a_{50} - 5) \leq t \leq (a_{50} + 5) \\ t_{SYM} & \text{si } t > (a_{50} + 5) \end{cases} \quad (2.12)$$

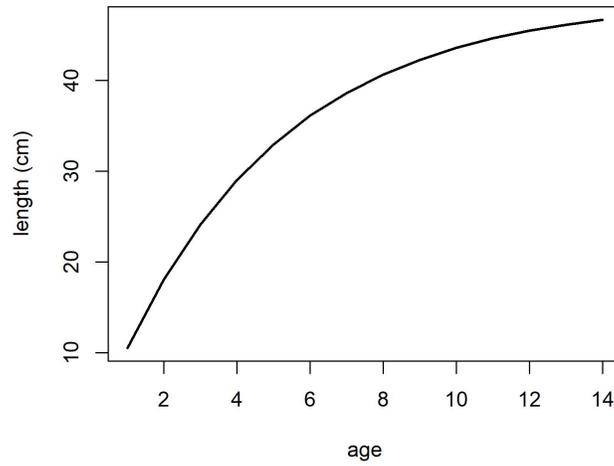


Figura 2.5: El crecimiento modelado con la función de von Bertalanffy. Se representa la talla, en centímetros, asociada a cada edad de la *Solea*

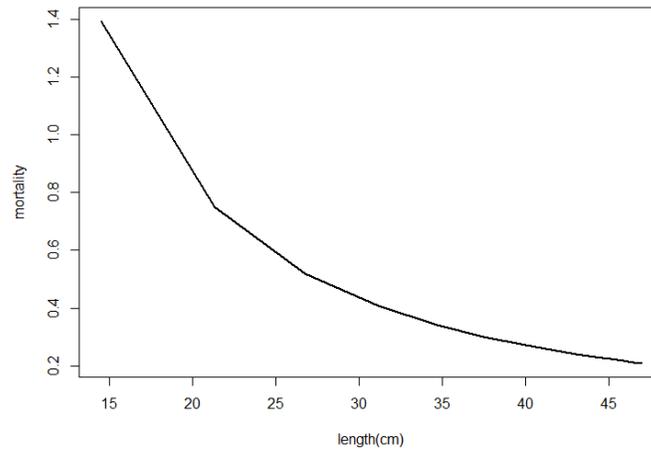


Figura 2.6: Mortalidad natural modelada con la función de Gislason. Observamos que, a medida que aumenta la talla, la mortalidad natural disminuye. Esto tiene sentido ya que los peces más pequeños son los más vulnerables a las artes de pesca.

con $t_{SYM} = 1$, que es el valor máximo de de la selectividad, y $t_{95} = 1$ es la amplitud de la función de selectividad, que representa el cambio e entre los valores límite superior e inferior t es la variable independiente, en este caso, la edad de los peces. (ver Figura 2.7).

Para el reclutamiento (R) se utiliza la función de stock reclutamiento de Beverton-Holt (se usa para definir la relación entre el número de individuos adultos reproductivamente maduros y el número de reclutas en un stock):

$$R = \frac{\alpha S}{\beta + S} \quad (2.13)$$

donde S es la biomasa reproductora (*Spawning Stock Biomass*; SSB) y α y β son parámetros

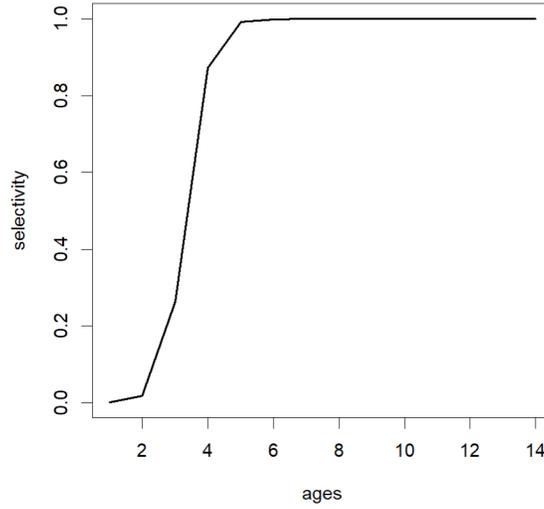


Figura 2.7: Ejemplo de una curva de selectividad logística, que toma valores para edades de 1 a 14. Observamos que los individuos de 6 años o más son igual de vulnerables a la pesca.

de la relación Beverton-Holt. Reformulado en términos de la inclinación (steepness) h (la proporción del reclutamiento esperado producido al 20% de biomasa reproductora virgen, S_0 , en relación con el reclutamiento virgen, R_0), esto da como resultado la ecuación:

$$R = \frac{0.8R_0hS}{0.2S_0(1-h) + (h-0.2)S} \quad (2.14)$$

En nuestra simulación establecemos $h = 0.75$ y la biomasa reproductora del stock (Spawning Stock Biomass, SSB) virgen en 1×10^6 gramos. Cabe mencionar que las unidades no van a tener impacto en los resultados. Lo importante es que tenga las mismas características, a nivel de procesos, que la real. El valor para la *steepness* es el mismo utilizando por Fischer et al. [2020], que se adoptó de un estudio anterior de Jardim et al. [2015] que basaron su decisión en Myers et al. [1999]. Este valor (0.75) es un valor medio del rango de estimaciones de Myers et al. [1999] y, por lo tanto, es adecuado en general.

Tabla 2.3: Modelo Operativo.

Crecimiento	von Bertalanffy	$L_t = L_\infty(1 - e^{-k(t-t_0)}); t_0 = -0.1$
Mortalidad natural	Gislason	$M_L = e^{0.55} L^{-1.61} L_\infty^{1.44} k$
Reclutamiento	Beverton-Holt	$R = \frac{0.8R_0hS}{0.2S_0(1-h) + (h-0.2)S}$
Selectividad	Curva logística	$s(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } t < (a_{50} - 5) \\ \frac{t_{SYM}}{1 + 19^{(a_{50}-t)/t_{95}}} & \text{si } (a_{50} - 5) \leq t \leq (a_{50} + 5) \\ t_{SYM} & \text{si } t > (a_{50} + 5) \end{cases}$

2.3.2. Escenarios para la simulación

Una vez determinados los modelos matemáticos que se van a utilizar para simular la dinámica de la población a lo largo de los años, cabe describir los diferentes escenarios de explotación pesquera

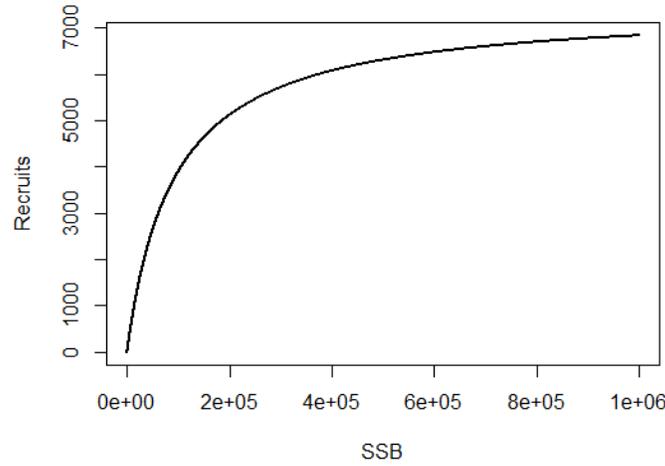


Figura 2.8: Función stock-reclutamiento de Beverton-Holt del stock simulado sol.8c.9a. Se comparan los reclutas con la biomasa reproductora del stock (Spawning Stock Biomass, SSB).

considerados (ver Tabla 2.4). Los escenarios de explotación pesquera se definen empleando los siguientes puntos de referencia para la mortalidad por pesca (estados de una pesquería y/o un recurso, que se considera deseable o estado del que se considera que el stock debe alejarse):

- F_{MSY} es la tasa de mortalidad por pesca que, si se aplica de forma constante, produciría un Rendimiento Máximo Sostenible (MSY).
- F_{crash} se trata de la tasa de mortalidad por pesca que llevará al stock a la extinción.

Los escenarios planteados en este trabajo serán los siguientes:

1. El primer lugar planteamos un escenario en el que la explotación pesquera es F_{MSY} durante 100 años, partiendo de un stock virgen. Por lo tanto, al utilizar este escenario y aplicar los modelos de evaluación, obtenemos información acerca de que valores nos esperamos de los indicadores expuestos en LBI y LBSPR para el stock sol.8c.9a en un escenario de MSY. Esto nos permite extraer conclusiones acerca de si los valores de referencia generales son o no adecuados también para el caso particular de nuestro stock.
2. El segundo escenario que se plantea en este trabajo es, pescar durante 100 años, partiendo de un stock virgen, a $0.5F_{MSY}$. En este caso esperaríamos que, al bajar la intensidad de pesca, el estado del stock sea óptimo y que algunos indicadores reporten unos valores más altos que en el escenario anterior.
3. El tercer escenario que incluiremos en este trabajo es considerar un nivel de explotación pesquera a $0.7F_{crash}$ durante 100 años, partiendo de un stock virgen. Este escenario nos permite concluir acerca de que valores de los indicadores tendríamos en un stock que, en la práctica, esté sometido a una explotación de este tipo. Los valores de que toman los indicadores relacionados con propiedades que se vean afectadas por esta explotación, deberían empeorar con respecto a los dos escenarios anteriores.
4. Finalmente, el cuarto escenario combina las situaciones anteriores permitiéndonos ver como LBI y LBSPR reaccionan a estos cambios en la explotación y ver el efecto de la asunción de equilibrio,

ya que cuando aplicamos los métodos, durante los primeros años, no se cumple dicha asunción (se tardan algunos años en alcanzar el equilibrio ya que partimos de un stock virgen). En primer lugar explotamos a $0.2F_{MSY}$ durante los 20 primeros años. Que es cuando observamos que nuestro stock se estabiliza (equilibrio). A partir de ahí, durante los siguientes 20 años realizamos una interpolación lineal para los puntos $0.2F_{MSY}$ y $0.9F_{crash}$, luego seguimos explotando a $0.9F_{crash}$ durante 20 años más. Después hacemos una interpolación lineal para los puntos $0.9F_{crash}$ y F_{MSY} durante 20 años (tenemos 20 puntos en nuestra interpolación) y, para terminar, explotamos a F_{MSY} los últimos 20 años. Para entender el escenario planteado ver Figura 2.9.

La idea de este escenario es reproducir lo que pasó con muchas pesquerías en la vida real. Se empieza pescando de manera muy moderada un determinado stock (a $0.2F_{MSY}$) y vamos paulatinamente aumentando la presión pesquera llegando a alcanzar un nivel de explotación muy fuerte $0.9F_{crash}$, que llevará al stock a una situación en la que está a punto de colapsar. A continuación, se toman medidas, entonces se toman medidas basadas en reducir ese nivel de intensidad de pesca hasta llevar al stock a MSY.

En resumen, escoger escenarios con diferentes niveles de intensidad de pesca, nos permitirá observar como esta afecta a la estructura del stock simulado durante un periodo de tiempo (100 años).

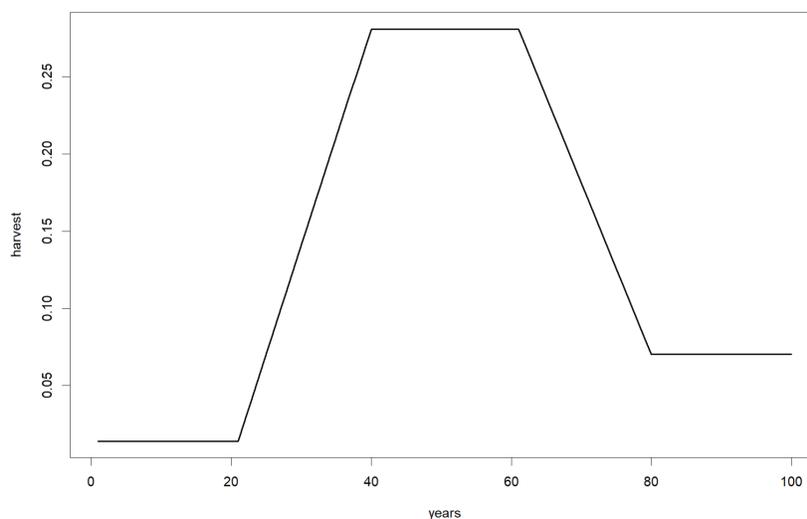


Figura 2.9: Explotamos a $0.2F_{MSY}$ durante los 20 primeros. Durante los siguientes 20 años realizamos una interpolación lineal para los puntos $0.2F_{MSY}$ y $0.9F_{crash}$, luego seguimos explotando a $0.9F_{crash}$ durante 20 años más. Después hacemos una interpolación lineal para los puntos $0.9F_{crash}$ y F_{MSY} durante 20 años y, para terminar, explotamos a F_{MSY} los últimos 20 años

2.3.3. Distribución de tallas

Una vez llegados a este punto, lo que tenemos es un modelo que describe la dinámica del stock sol.8c.9a y además, hemos seleccionado el nivel de explotación que vamos a ejercer sobre este durante 100 años (seleccionamos un escenario). Para aplicar los métodos de evaluación LBI y LBSPR necesitamos disponer de la distribución de tallas asociada. En esta sección abordamos el procedimiento seguido para su obtención a partir de los resultados proporcionados por el MO.

Tabla 2.4: Escenarios para la simulación.

Escenario 1	F_{MSY}	Explotación pesquera a F_{MSY} durante 100 años.
Escenario 2	$0.5F_{MSY}$	Explotación pesquera a $0.5F_{MSY}$ durante 100 años.
Escenario 3	$0.7F_{crash}$	Explotación pesquera a $0.7F_{MSY}$ durante 100 años.
Escenario 4	Diferentes Periodos de Explotación Pesquera a lo Largo del Tiempo	<ul style="list-style-type: none"> ■ Explotamos a $0.2F_{MSY}$ (20 años). ■ Interpolación lineal para los puntos $0.2F_{MSY}$ y $0.9F_{crash}$ (20 años). ■ Explotamos a $0.9F_{crash}$ (20 años). ■ Interpolación lineal para los puntos $0.9F_{crash}$ y F_{MSY} (20 años). ■ Explotamos a F_{MSY} (20 años).

El Modelo Operativo nos da información, además del número de capturas asociado a cada edad (C_t), de los pesos asociados a las edades de los individuos de la población (W_t). Por lo tanto, podemos usar la ecuación 2.2 para obtener las tallas asociadas a las edades (L_t):

$$L_t = \left(\frac{W_t}{a} \right)^{1/b} \quad t = 1, \dots, n \quad (2.15)$$

donde a y b son los parámetros de la relación talla-peso y n la edad máxima. Estas tallas son representativas de cada edad, sin embargo, no todos los individuos de la misma edad tienen exactamente la misma talla, por lo que vamos a generar un grupo de tallas asociadas a t , cada una con su probabilidad de ser observada en esa edad. De esta manera, el valor de capturas que tenemos asociado a esa talla representativa (C_{L_t}) lo podemos dividir acorde a esas probabilidades (ver Figura 2.10).

Esto lo haremos basándonos en la idea de intervalo de confianza al 95% para una media, de una distribución normal de media $\mu = L_t$ y desviación típica $\sigma = 2$. Las nuevas tallas se calcularon generando una secuencia de números desde $L_t - 2\sigma$ a $L_t + 2\sigma$ redondeando al centímetro más cercano (se redondea al número entero más cercano):

$$\{ \lfloor L_t - 2\sigma \rfloor, \dots, \lfloor L_t \rfloor, \dots, \lfloor L_t + 2\sigma \rfloor \} = \{ S_j^t; \quad j = 1, \dots, m; \quad m = 2\sigma + 1 \} \quad (2.16)$$

Además nos aseguramos que ninguna de las nuevas tallas (S_j^t) supere L_∞ y sea mayor que cero, es decir:

$$(\mu - 2\sigma) \leq S_j^t \leq (\mu + 2\sigma) \quad (2.17)$$

$$0 < S_j^t \leq L_\infty \quad (2.18)$$

A continuación, para cada S_j^t , calculamos la probabilidad de ser observadas en esa edad (P_j^t), suponiendo una normal de media L_t y $\sigma = 2$. Estas probabilidades se estandarizan para ajustar la distribución de probabilidad y de esta forma nos aseguramos de que la suma total de las probabilidades sea igual a 1. En otras palabras, de esta manera aseguramos que las probabilidades estén en una escala adecuada y cumplan con las propiedades fundamentales de una distribución de probabilidad válida. El número de capturas para las agrupaciones de tallas finales se obtiene multiplicando el número de capturas originales (información que nos aporta el MO) por las probabilidades asociadas a cada una de las tallas. De esta manera repartimos el número de capturas entre las tallas generadas teniendo en

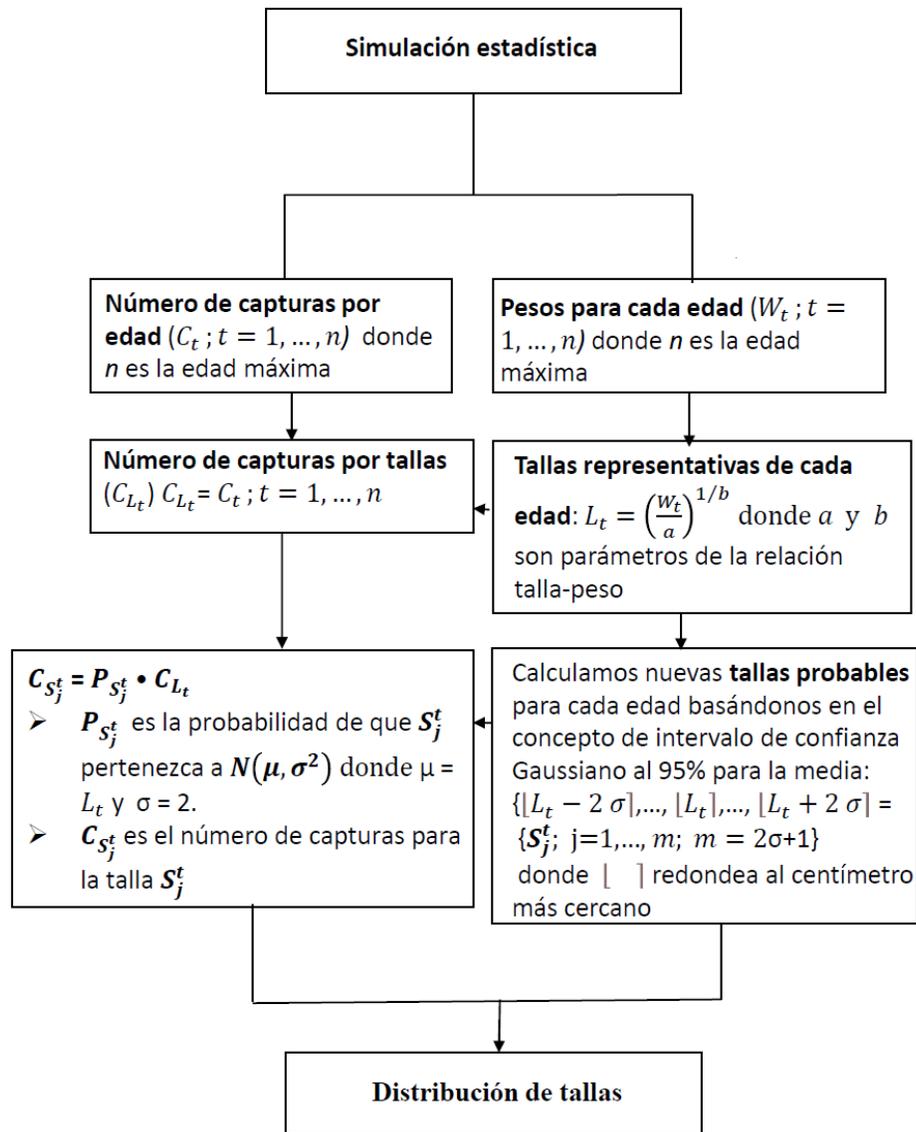


Figura 2.10: Esquema sobre la obtención de la distribución de tallas para nuestro stock, a partir de los datos que nos proporciona la simulación llevada a cabo.

cuenta la probabilidad (ver Figura 2.10).

Finalmente conseguimos que la estructura distribución de tallas obtenida sea similar a la distribución que disponemos calculada a partir de datos empíricos (ver Figura 1.1). Es decir, que el mayor número de capturas se concentre en los individuos de entre 25 y 35 centímetros, las colas de las distribuciones corresponden a las tallas más pequeñas y más grandes, que no haya prácticamente capturas registradas para individuos con una talla inferior a 20 centímetros y, de la misma manera, que también ocurra esto con tallas superiores a L_∞ (ver Figura 3.3).

Una vez disponemos del mecanismo de simulación de los datos de entrada, los métodos LBI y LBSPR se aplicarán a cada una de la N réplicas, siendo N un número suficientemente grande. En este

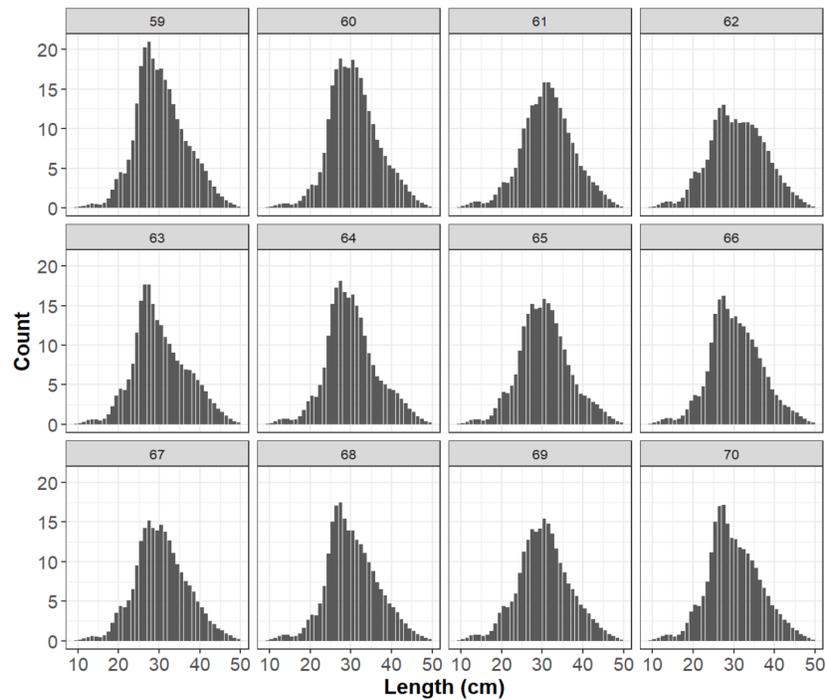


Figura 2.11: Distribuciones de tallas para los años de 59 a 70 (los años están numerados de 1 a 100) de la simulación con el escenario F_{MSY} .

estudio hemos utilizado $N = 1000$. Finalmente, antes de pasar a la sección de resultados, aportamos una tabla con los valores de los parámetros del ciclo vital para el stock sol.8c.9a que precisamos para hacer la simulación y aplicar los métodos de evaluación. También especificamos la fuente de información correspondiente a cada valor (ver Tabla 2.5).

Para llevar a cabo la simulación estadística descrita en esta sección nos hemos basado en el código de Fischer et al. [2020] (<https://github.com/shfischer/wklifeVII.git>) y lo hemos adaptado a nuestro estudio. Sin embargo, por razones de propiedad intelectual no podemos compartir dicho código.

Tabla 2.5: Parámetros del ciclo vital para el stock sol.8c.9a y la fuente de información correspondiente. Para cada uno de los métodos basados en la talla (LBI y LBSPR) y el MO, especificamos qué parámetros del ciclo vital son necesarios.

Parámetros	Valor	Fuente	Métodos	MO
L_{∞}	48.9 cm	ICES stock annex S. solea divisions 8c9a	LBI y LBSPR	✓
L_{50}	26 cm	Jardim et al. [2011]	LBI y LBSPR	
L_{95}	27.5 cm	ICES stock annex S. solea divisions 8 ab	LBSPR	✓
M/K	1.41	Cerim et al. [2020]	LBI y LBSPR	
K	0.22	Teixeira y Cabral [2010]		✓
a y b	$a = 0.009476898; b = 3.018329$	Alonso-Fernández et al. [2021]	LBI y LBSPR	✓
h	0.75	Myers et al. [1999]		✓

Capítulo 3

Resultados

En el capítulo anterior aportamos una descripción de los dos métodos de evaluación que se van a revisar en este trabajo y de la simulación llevada a cabo para imitar la dinámica del stock en cuestión. Recordamos que nuestro objetivo es aportar información sobre el funcionamiento de LBI y LBSPR en el caso del stock sol.8c.9a y así poder aconsejar en la práctica. Para ello propusimos cuatro escenarios con diferentes niveles de explotación pesquera. Esto nos permitirá observar como afectan estas situaciones a el estado del stock y a su posible recuperación, además de comprobar el buen funcionamiento de los métodos y deducir posibles valores de referencia para los diferentes indicadores de los métodos que pueden ser más adecuados para este stock en particular. Será necesario la definición de medidas tanto cuantitativas como gráficas que nos permitan resumir los resultados de dichas simulaciones y así evaluar el desempeño de los métodos LBI y LBSPR. El código desarrollado para aplicar estos métodos, una vez obtenidas las distribuciones de tallas, se puede consultar en el siguiente enlace de GitHub: <https://github.com/helena-nina/TFM-IEO.git>

Dividiremos este capítulo en dos secciones, y cada una de estas tendrá cuatro partes, que corresponderán a los resultados obtenidos para cada uno de los escenarios propuestos. En la primera sección, presentamos los resultados obtenidos tras aplicar método LBI a cada una de las réplicas ($N = 1000$). Para facilitar la interpretación de estos, para cada uno de los escenarios, hemos calculado la mediana y los cuantiles (5% y 95%) de los seis indicadores y los hemos representado en una gráfica a lo largo de 100 años de simulación. En el segundo capítulo expondremos, los resultados obtenidos aplicando el método LBSPR. En este caso representamos, para cada uno de los escenarios, la mediana y los cuantiles (5% y 95%) de las estimaciones de SPR y del ratio F/M , durante los 100 años de la simulación.

3.1. LBI

En esta sección aportaremos las gráficas y una interpretación de los resultados obtenidos. Como comentamos anteriormente, este método consiste en el cálculo de indicadores que pueden proporcionar descripciones del estado de la población. En este estudio estamos considerando seis indicadores, relacionados con la conservación (de los individuos maduros e inmaduros), máximo rendimiento sostenible (MSY) y el rendimiento óptimo. Comenzaremos discutiendo los valores de los indicadores para el primer escenario planteado, en el que impusimos una explotación pesquera a F_{MSY} .

3.1.1. Escenario 1: F_{MSY}

En este escenario propuesto, pescamos a F_{MSY} durante 100 años partiendo de un stock virgen. Para facilitar la lectura y la comprensión de los resultados iremos comentando cada uno de los indicadores individualmente. Cabe mencionar que, en la práctica, aunque se imponga un nivel de explotación pesquera a F_{MSY} , esto no va a implicar que la conservación de stock sea óptima necesariamente, ya que hay muchos factores de incertidumbre que pueden hacer que altere los valores de los indicadores en cuestión.

- Comenzamos hablando de los indicadores relacionados con la conservación de individuos inmaduros, L_c (talla de la primera captura) y L_{25} (percentil 25 de la distribución de tallas). Ambos indicadores se comparan con el punto de referencia L_{mat} , definiendo los ratios $L_{25\%}/L_{mat}$ y L_c/L_{mat} . Se espera, según el valor de referencia extraído de la literatura [Froese et al. \[2004\]](#), que ambos ratios tomen valores superiores a 1 para considerar que el stock se encuentra en un estado saludable con respecto a la conservación de los ejemplares de menor talla (marcamos con una línea roja discontinua el valor de referencia en las gráficas). Además, este estudio nos aporta valores de referencia más precisos (calculamos la mediana de los valores obtenidos para cada indicador en las 1000 réplicas) para el stock sol.8c.9a.. Estos son muy similares a lo esperado según la referencia general de LBI lo cual indica un buen comportamiento del método. Si prestamos atención a la Figura 3.1, observamos que, al calcular la mediana de los valores obtenidos para L_c/L_{mat} en cada una de las 1000 réplicas, esta toma valores constantes iguales a 0.94. Por otro lado, para L_{25}/L_{mat} , los valores se estabilizan en 1.02. Esta información nos lleva a pensar que en el caso de L_c/L_{mat} el valor de referencia (1) es un poco optimista y que en el caso de L_{25}/L_{mat} , es ligeramente pesimista para nuestro stock, sin embargo, recalamos que la diferencia es mínima. Por otro lado, nos encontramos en estos dos indicadores, que al calcular los cuantiles, estos toman unos valores atípicos generando dientes de sierra. Esto se debe a que la distribución de tallas de cada iteración generan pequeños cambios en L_c o en L_{25} . Esto ocurre para todos los escenarios propuestos.
- Los indicadores relacionados con la conservación de individuos maduros son $L_{max5\%}$ (recordamos que se refiere a la talla media del 5% de los peces más grandes) y P_{mega} (proporción de individuos por encima de la talla óptima más el 10%). $L_{max5\%}$ se compara con el punto de referencia L_∞ dando lugar así al ratio $L_{max5\%}/L_\infty$, que se espera que tome un valor superior a 0.8 [Miethe et al. \[2015\]](#), para poder afirmar que indican que el estado de conservación de los ejemplares de mayor talla es bueno. Si observamos de nuevo la Figura 3.1, la mediana de los valores que toma este ratio se estabiliza en 0.9, por lo que podemos sugerir que el valor de referencia sacado de la literatura (0.8) es, en este caso, un poco pesimista para nuestro stock, ya que tanto la mediana como los dos cuantiles toman siempre valores superiores. Por otra lado discutiremos los valores que toma el indicador P_{mega} . [Froese et al. \[2004\]](#) y el [ICES \[2015\]](#) han sugerido que valores superiores a 0.3 corresponden a stocks sanos (con respecto a la conservación de individuos maduros). Sin, embargo, en [Cousido-Rocha et al. \[2022\]](#) se plantea que el valor de 0.3 como referencia para P_{mega} , no es un valor adecuado para todo tipo de stocks, por lo que las conclusiones extraídas de comparar los valores de este indicador con su valor de referencia deben tomarse con precaución. Una evidencia de esto es que, en nuestro caso, explotando el stock a F_{MSY} , los valores de la mediana y de los cuantiles (5% y 95%) calculados están muy por debajo de 0.3. Esta diferencia entre la referencia y los valores obtenidos no debería ocurrir con este nivel de explotación pesquera. Acorde a los valores obtenidos en nuestra simulación, un valor de 0.15 parece un valor adecuado para un stock explotado a F_{MSY} .
- Por último, el método LBI considera el indicador L_{mean} (talla media de individuos por encima de L_c) y lo compara con los puntos de referencia L_{opt} , que representa la talla a la que la biomasa y la producción de huevos es máxima en una población no explotada y es la talla a la cual la captura es máxima para una determinada F , y $L_{F=M} = (1-a)L_c + aL_\infty$, donde $a = 1/(2(M/K)+1)$ (proxy

de la talla asociado con MSY). Se definen los ratios L_{mean}/L_{opt} y $L_{mean}/L_{F=M}$, relacionados con rendimiento óptimo y el MSY, respectivamente. El punto de referencia para L_{mean}/L_{opt} es aproximadamente 0.9 y para conseguir la explotación MSY , se espera que $L_{mean}/L_{F=M}$ sea mayor que o igual que 1. Como era de esperar, observamos que al calcular la mediana y los cuantiles de los valores obtenidos para ambos ratios para cada una de las 1000 réplicas, en ambos casos nos encontramos que los puntos de referencia calculados de los parámetros del ciclo vital, teoría ecológica o de la observación empírica son adecuados por lo que el funcionamiento del método es correcto.

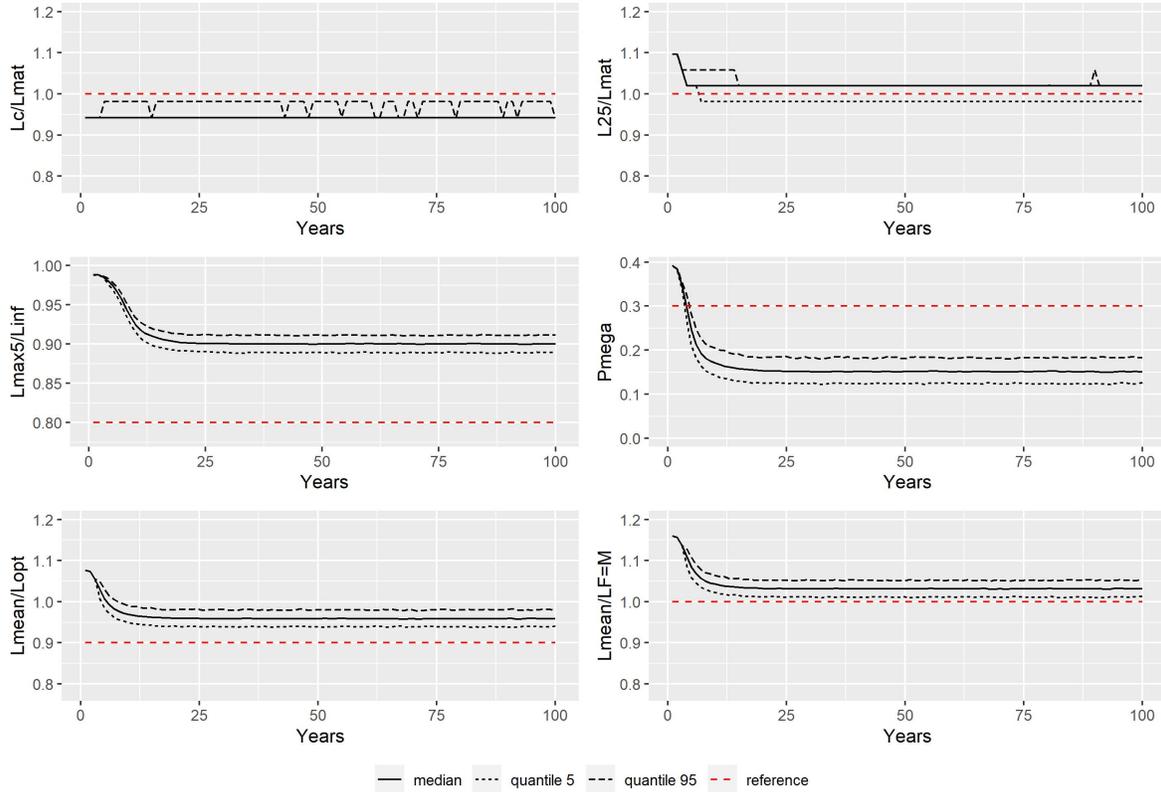


Figura 3.1: Tendencias temporales de la mediana y los cuantiles (5% y 95%) de las estimaciones de los coeficientes indicadores de LBI y el valor de referencia sugerido por la literatura para cada uno de ellos. El stock está siendo explotado a F_{MSY} .

3.1.2. Escenario 2: $0.5F_{MSY}$

En el segundo escenario propuesto en este trabajo se explota durante 100 años a $0.5F_{MSY}$, partiendo de un stock virgen. Es decir, estamos bajando el nivel de intensidad de pesca con respecto a la situación anterior. En este caso, además de marcar los valores de referencia sacados de la literatura con una línea roja discontinua, hemos indicado los valores sugeridos en la sección anterior con una línea azul discontinua, ya que consideramos que nos puede aportar una mejora en la interpretación de los resultados para el caso particular de la *Solea* y ayudarnos a entender el buen funcionamiento del método.

- En primer lugar, consideremos $L_{25\%}/L_{mat}$ y L_c/L_{mat} . Se espera, según el valor de referencia

extraído de la literatura Froese et al. [2004], que ambos ratios tomen valores superiores a 1. Si nos fijamos en los valores que toma la mediana de los indicadores relacionados con la conservación de individuos inmaduros, observamos en la Figura 3.2 que $L_{25\%}/L_{mat}$ apenas varían con respecto a la gráfica anterior y que L_c/L_{mat} mejora ligeramente. El hecho de que los indicadores relacionados con la conservación de individuos inmaduros no se vean afectados (o muy poco afectados) por la explotación, se debe esencialmente a la relación de stock-reclutamiento y a como está definida la curva de selectividad en nuestro escenario de simulación. En el siguiente escenario explicaremos con más detalle este suceso. Veremos que, aún subiendo considerablemente la intensidad de explotación, estos indicadores siguen tomando valores muy parecidos.

- El cociente indicador relacionado con la conservación de individuos maduros $L_{max5\%}/L_{\infty}$ se espera que tome un valor superior a 0.8 Miethe et al. [2015]. En la sección anterior propusimos el valor de 0.9 como una mejor referencia para un stock explotado a F_{MSY} . Si observamos de nuevo la Figura 3.2, los valores de la mediana se estabilizan en 0.95, por lo que está por encima del nuevo valor de referencia propuestos, esto nos confirma un buen funcionamiento del método. Con respecto al valor de referencia para P_{mega} proporcionado por la literatura (0.3), nos puede llevar a conclusiones sesgadas del estado del stock como hemos comentado anteriormente. Observamos que, incluso con un nivel de explotación tan reducido como este, el indicador sigue estando por debajo de 0.3 (tiende a tomar el valor de 0.25). Sin embargo, el valor de referencia propuesto en el escenario F_{MSY} para P_{mega} (0, 15), parece que sí es adecuado para la obtención de conclusiones acerca del grado de explotación impuesto a los megaspawners.
- Por último, consideremos L_{mean}/L_{opt} y $L_{mean}/L_{F=M}$, que están relacionados con el rendimiento óptimo y el MSY, respectivamente. Observemos que, en la Figura 3.2, la mediana y los dos cuantiles calculados toman siempre valores por encima de la explotación MSY, por lo tanto podemos confirmar un buen funcionamiento del método ante el cambio de explotación.

Llegados a este punto, nos planteamos que pasaría si aumentamos el nivel de explotación. Por como hemos configurado la explotación pesquera llevada a cabo en esta simulación (está dirigida a individuos grandes) deberíamos obtener valores de los indicadores relacionados con la conservación de individuos maduros, MSY y rendimiento óptimo, por debajo de los puntos de referencia para un buen funcionamiento del método. En el siguiente escenario vamos a explotar a $0.7F_{crash}$.

3.1.3. Escenario 3: $0.7F_{crash}$

Aumentando el nivel de explotación, con respecto a los escenarios anteriores y estudiamos que ocurre con los indicadores que nos proporciona el método.

- Si nos fijamos en los indicadores asociados con la conservación de inmaduros, sus valores no han sufrido apenas cambios a pesar del incremento en la mortalidad por pesca, esto se debe a dos motivos:

1. Relación stock-reclutamiento: recordamos que estamos modelando la relación stock-reclutamiento con la función de Beverton-Holt (ver Figura 2.8). Al explotar el stock a $0.7F_{crash}$ estamos produciendo una bajada de SSB, sin embargo, por la forma de la curva, observamos que aunque se reduzca considerablemente la SSB, nos seguimos encontrando en la zona plana de la curva, es decir, esta biomasa sigue siendo capaz de producir casi el mismo número de reclutas que la biomasa que tenemos en los otros escenarios. Nos encontramos, por lo tanto, en la asíntota de la relación stock-reclutamiento. Para observar un efecto sobre la conservación de individuos inmaduros sería necesario alcanzar una biomasa más reducida cuyo valor de reclutamiento se encuentra en lugar de en la asíntota en la subida inicial de la curva, para cual sería necesario continuar incrementando la mortalidad por pesca. Se verá un efecto en los pequeños cuando no estamos en la asíntota, la biomasa tiene que caer mucho para que esto suceda. Esto sucede al aumentar más el nivel de explotación.

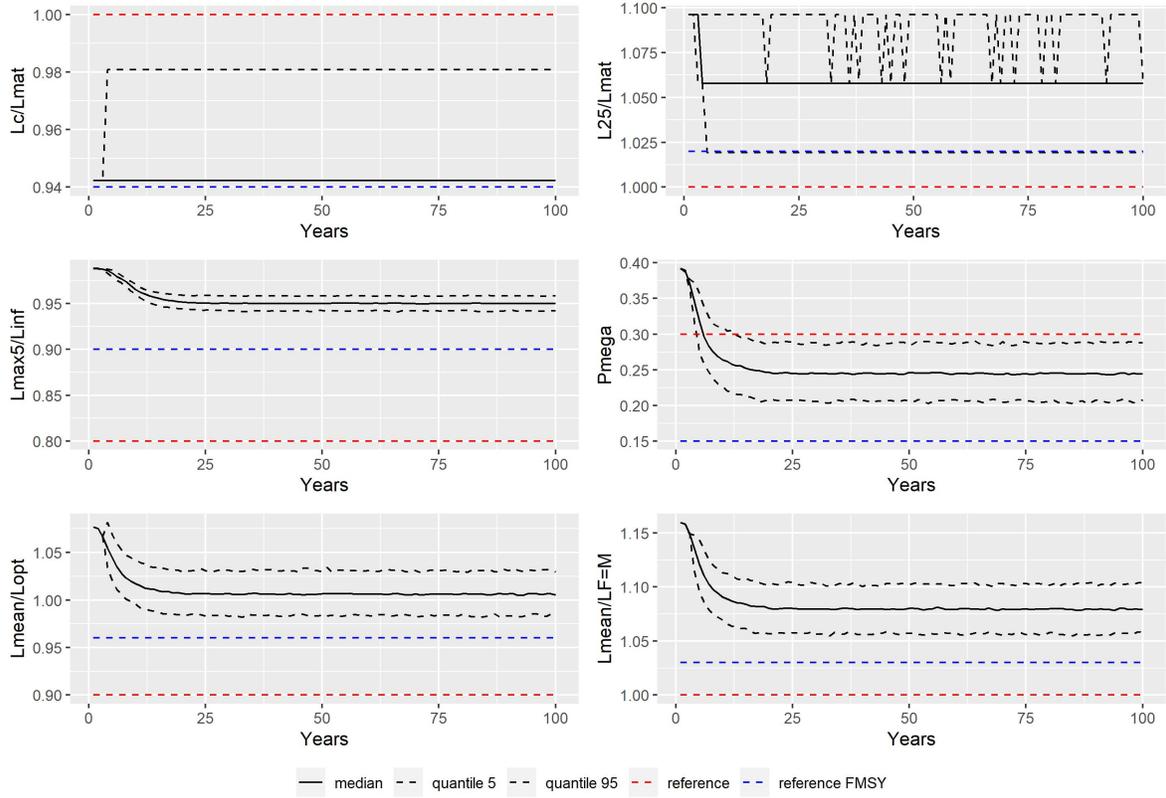


Figura 3.2: Tendencias temporales de la mediana y los cuantiles (5% y 95%) de las estimaciones de los coeficientes indicadores de LBI y el valor de referencia sugerido por la literatura para cada uno de ellos. El stock está siendo explotado a $0.5F_{MSY}$.

2. Selectividad: modelamos la selectividad con una curva logística (ver Figura 2.7). Observamos que en nuestro modelo no se pesca a los peces pequeños (la curva de selectividad alcanza su máximo para los individuos de edad 6). Por lo tanto, aunque aumentemos la fuerza de presión pesquera, esto no va a afectar a los peces más pequeños del stock porque no los estamos pescando.
- Veamos ahora que ocurre con los coeficientes indicadores asociados a la conservación de individuos maduros. En la Figura 3.5 observamos que, tanto la media, como los dos cuantiles calculados de $L_{max5\%}/L_{\infty}$, toman valores por debajo de los dos puntos de referencia. Sin embargo, toman valores muy próximos a la línea discontinua roja y bastante más alejados de la línea azul que marca el punto de referencia sugerido en el primer escenario. Es decir, en este caso si se nota el aumento de la presión pesquera en el stock y así lo indica el método. Si nos fijamos en P_{mega} , la mediana y los cuantiles se van a cero. Esto es debido a que este indicador es extremadamente sensible y, con sobreexplotación, desaparecen los peces grandes. En ambos casos el método nos sugiere que en este escenario la conservación de maduros no se encuentra en un estado deseable. Es decir se están pescando más peces grandes de lo aconsejado para conservar a la población madura.
 - Por último vemos en la Figura 3.5 que, al calcular la mediana y los cuantiles de L_{mean}/L_{opt} y $L_{mean}/L_{F=M}$, estos toman valores por debajo de los puntos de referencia, lo que confirma un buen funcionamiento del método ya que el nivel de explotación es superior a F_{MSY} . Además las líneas de referencia tampoco están dentro del intervalo de confianza.

En resumen, al calcular las medias y los cuantiles de los valores obtenidos en las 1000 réplicas, para cada uno de los cocientes indicadores, obtenemos valores inferiores a los puntos de referencia que nos marcan un estado deseable del stock, con excepción de los indicadores relacionados con la conservación de inmaduros. Estos resultados son coherentes, ya que estamos explotando por encima de F_{MSY} y además es lo esperado teniendo en cuenta el tipo explotación llevada a cabo en el estudio (la explotación tiene un efecto en los individuos grandes). Podemos observar las Figuras 3.3 y 3.4 como han desaparecido el número de individuos grandes en la distribución de tallas del escenario $0.7F_{crash}$ con respecto al escenario F_{MSY} .

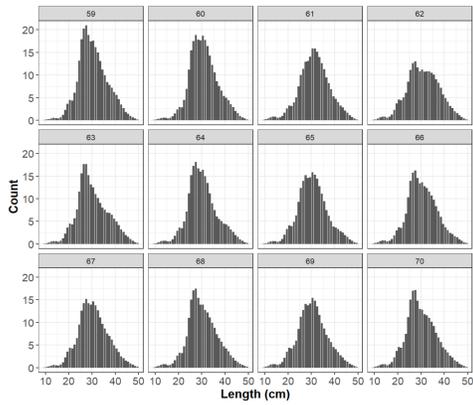


Figura 3.3: Distribución de tallas F_{MSY}

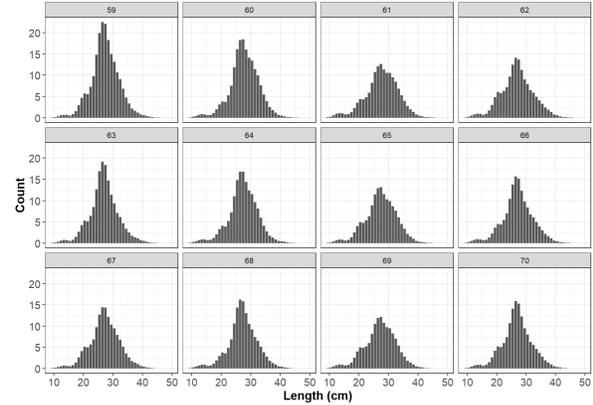


Figura 3.4: Distribución de tallas $0.7F_{crash}$

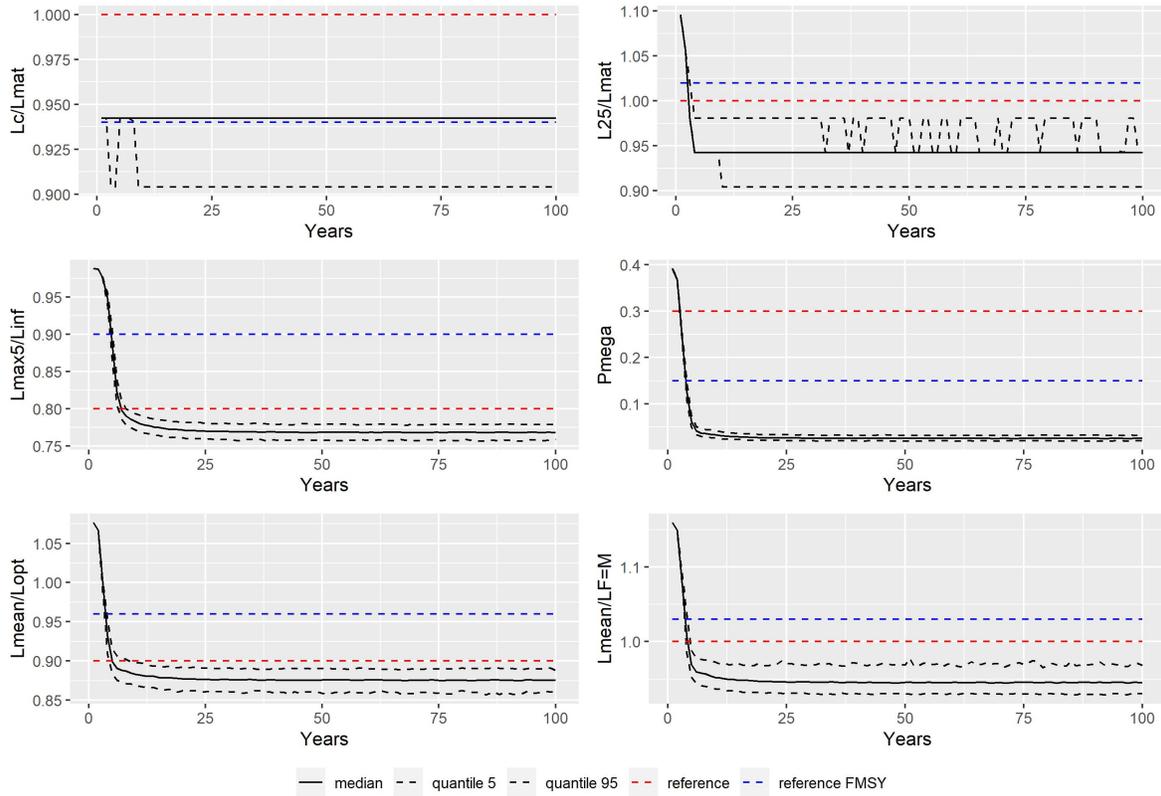


Figura 3.5: Tendencias temporales de la mediana y los cuantiles (5% y 95%) de las estimaciones de los coeficientes indicadores de LBI y el valor de referencia sugerido por la literatura para cada uno de ellos. El stock está siendo explotado a $0.7F_{crash}$.

3.1.4. Escenario 4: Diferentes Periodos de Explotación Pesquera a lo Largo del Tiempo

Este escenario combina las situaciones anteriores. Si observamos las gráficas presentadas en los escenarios anteriores, al cabo de 20 años de la simulación el stock parece encontrarse en un estado de equilibrio (se estabiliza). Por lo tanto, en este escenario planteamos un cambio de presión de fuerza pesquera cada 20 años para ver como reacciona el método ante estas variaciones (ver Figura 2.9), qué ocurre cuando el stock está siendo infraexplotado, sobreexplotado, explotado a F_{MSY} y sobre todo que ocurre al inicio de cada periodo de cambio, donde la asunción de equilibrio no es cierta.

La idea es empezar con una explotación muy baja, prácticamente no estamos pescando ($0.2F_{MSY}$) y lo dejamos que alcance el equilibrio. A partir de 20 años subimos el nivel de explotación paulatinamente (mediante un interpolación lineal) hasta alcanzar el nivel $0.9F_{crash}$ y luego la bajamos a F_{MSY} gradualmente (ver Figura 2.9). Estos cambios en el nivel de explotación, intentan reproducir situaciones que ocurren en la práctica. Se descubre la pesquería y se comienza a explotar a un nivel muy bajo, se comprueba que es rentable y se va incrementando el ritmo de explotación, hasta que se encuentran con que se está sobreexplotando al stock, por lo que se toma medidas y se baja la presión pesquera a niveles sostenibles. Esta situación descrita ha sucedido repetidamente a lo largo de la historia. En la actualidad no se suele llegar a sobreexplotar el stock a niveles tan altos debido a las medidas de gestión.

Procedemos entonces al análisis de los indicadores.

- Al calcular la mediana de los valores obtenidos de L_c/L_{mat} , observamos que se mantiene constante al igual que pasa en los escenarios anteriores, pues L_c no se ve afectado por los cambios de intensidad de pesca debido a la relación de stock-reclutamiento y a la selectividad empleadas en esta simulación (como explicamos en el apartado anterior). Por otro lado si observamos los valores que toma la mediana correspondiente a L_{25}/L_{mat} (para las 1000 réplicas) en la Figura 3.6, esta sí parece verse afectada por estos cambios nivel de explotación. No obstante, las subidas y bajadas en este indicador no suceden de manera lineal, si no que consta de segmentos rectos horizontales o verticales, es decir está escalonada. Al principio, los 20 primeros años en los que apenas se está pescando, observamos que este indicador se mantiene por encima de las líneas de referencia. Sin embargo, cuando empezamos a aumentar el ritmo de explotación comienza a bajar para situarse por debajo del nivel de referencia, hasta estabilizarse en 0.95. A continuación al implantar medidas de recuperación este sube de manera escalonada hasta estar a MSY (se termina estabilizando en 1.02, valor obtenido para sol.8c.9a a F_{MSY}). Por otro lado, estamos haciendo cambios (graduales) en nuestra explotación (Figura 2.9) cada 20 años y observamos en las gráficas, que los indicadores tardan entorno a 5 años en reaccionar a ese cambio. Finalmente podemos decir que estas subidas y bajadas son coherente con la F establecida y que por lo tanto, parece que el método funciona correctamente.
- Veamos ahora en la Figura 3.6, como responde $L_{max5\%}/L_{\infty}$ a los diferentes niveles de explotación. Durante los primeros 20 años el stock está siendo infraexplotado, por lo que este indicador debería tomar valores por encima de MSY (por encima de 0.9). Efectivamente, observamos que la mediana se mantiene estable en 1 hasta el año 25 de la simulación (5 años después del cambio en la explotación) que comienza a descender paulatinamente hasta estabilizarse por debajo de 0.8. Esta bajada se corresponde con el aumento del nivel de explotación (a $0.9F_{crash}$). A continuación, los valores se estabilizan por debajo de las referencias de acuerdo con la explotación en este periodo, y finalmente, como era de esperar al tomar medidas y bajar la intensidad de pesca a F_{MSY} , el indicador vuelve a subir hasta alcanzar el valor de referencia cuando la explotación se corresponde con F_{MSY} , derivado de nuestro primer escenario de simulación. Este cambio se comienza a percibir entorno al año 63, es decir, tardó en reaccionar aproximadamente 3 años al cambio en la explotación. Todo esto nos indica que el método nos está informando correctamente sobre el estado del stock, ya que el indicador está reaccionando de manera coherente, aunque con pequeños desajustes temporales, frente a los diferentes ritmos de pesca. Si nos fijamos ahora en P_{mega} , comienza en 0.4 cuando el stock está siendo infraexplotado. Si tomásemos el valor de referencia sacado de la literatura (0.3), este valor es sólo ligeramente superior, cuando lo coherente es que, al tratarse de un stock virgen, este tomase valores significativamente superiores. Por lo que, de nuevo podemos concluir que el valor de referencia proporcionado por la literatura para este indicador no es adecuado para la *Solea*. Cuando se empieza a pescar con más intensidad este disminuye hasta alcanzar el 0. Es decir, se colapsa el stock, de nuevo se confirma la sensibilidad extrema de este indicador. A partir del año 75 de la simulación la población comienza a recuperarse y el valor del indicador sube hasta alcanzar MSY (se estabiliza en 0.15).
- Los indicadores L_{mean}/L_{opt} y $L_{mean}/L_{F=M}$ también se comportan correctamente. L_{mean}/L_{opt} comienza estable en aproximadamente 1.09 cuando el stock no está siendo apenas explotado y comienza a descender a partir del año 25, hasta alcanzar niveles por debajo de 0.9. Al igual que en los indicadores anteriores, observamos que tarda 5 años en reaccionar a los cambios de explotación. A continuación, vemos que se empieza a recuperar, a partir del año 63 (aproximadamente), y finalmente se estabiliza en MSY (0.96). Ocurre parecido con $L_{mean}/L_{F=M}$. Comienza en 1.1 cuando el stock está siendo infraexplotado y a partir del año 25 de la simulación decrece hasta situarse por debajo de 1. Finalmente, a partir del año 75 el stock se recupera hasta alcanzar su valor de referencia a explotación MSY.

Para terminar la discusión sobre los indicadores proporcionados por el método, mencionamos que durante los años en los que los valores de los indicador no se estabiliza, la asunción de equilibrio no se

está cumpliendo. Recordamos que cuando hablamos de equilibrio se supone que la mortalidad total y el reclutamiento han sido constantes durante un periodo tan largo como la vida de la serie temporal. De todas formas, en esos años en los que no hay equilibrio, el indicador cambia progresivamente igual con la F . Por último, observamos que los indicadores no responden inmediatamente al cambio en la explotación, sino que se tarda entre 3 y 5 años en percibir el efecto del incremento o disminución en la presión pesquera.

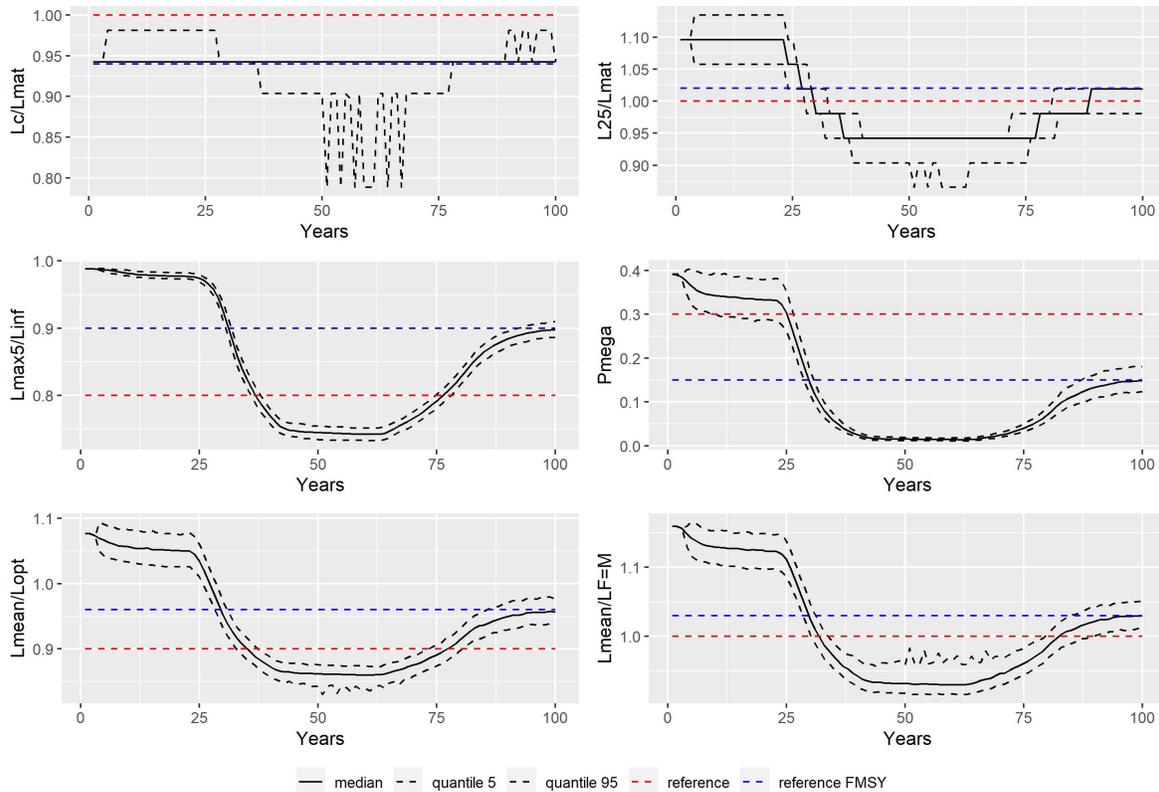


Figura 3.6: Tendencias temporales de la mediana y los cuantiles (5% y 95%) de las estimaciones de los coeficientes indicadores de LBI y el valor de referencia sugerido por la literatura para cada uno de ellos. Se empieza con un nivel de explotación del stock muy bajo, prácticamente no estamos pescando ($0.2F_{MSY}$) y lo dejamos que alcance el equilibrio. A partir de 20 años subimos el nivel de explotación paulatinamente (mediante un interpolación lineal) hasta alcanzar el nivel $0.9F_{crash}$ y luego la bajamos a F_{MSY} gradualmente.

3.2. LBSPR

En esta sección abordamos los resultados obtenidos tras aplicar el método LBSPR descrito en la Sección 2.2. Al igual que para el método LBI, aportamos las gráficas para cada uno de los escenarios y una interpretación de los resultados. Calculamos las medianas y los cuantiles (5% y 95%) para las 1000 repeticiones de los valores estimados de SPR y del ratio F/M . Comenzaremos comprobando el buen funcionamiento de método cuando estamos ejerciendo una presión pesquera a F_{MSY} durante 100 años partiendo de una población sin explotar.

3.2.1. Escenario 1: F_{MSY}

En este apartado vamos a comentar los resultados obtenidos en las gráficas de la Figura 3.7. Estamos explotando a F_{MSY} durante 100 años, partiendo del stock virgen. Como comentamos anteriormente, SPR toma valores que oscilan entre 0 y 1. El primer valor corresponde a un stock colapsado y el segundo a uno que está sin explotar (virgen). Si observamos el SPR en la Figura 3.7, parte de 1, lo que tiene sentido ya que el primero año de la simulación, no estamos ejerciendo ninguna presión pesquera sobre nuestro stock. A medida que avanzan los años, este valor cae hasta que, sobre el año 25, se estabiliza tomando un valor dentro del rango asociado con una población explotada a MSY. Se suele suponer que las poblaciones con un SPR entre 0.35 y 0.4 podrían considerarse explotadas al nivel del MSY (Legault y Brooks, 2013). Esto confirma un buen funcionamiento y una adecuación de los valores de referencia que se están empleando para este indicador.

Por otro lado, veamos como se comporta el ratio F/M . Cuando se pesca a MSY se tiende a suponer que los valores de mortalidad por pesca y mortalidad natural son iguales $F = M$. Sin embargo, en este caso calculamos el ratio real $F = F_{MSY}/M$ para compararlo con la estimación obtenida por el método. Este es 0.23, sin embargo, la estimación se estabiliza en valores ligeramente por encima de 1, esto es un claro indicador de que el indicador de F/M falla en situaciones donde M es claramente mayor que F_{MSY} , como en esta. No es de extraña ya que son métodos de datos limitados. Además parece que la F se estima con mayor incertidumbre. Veamos como se comportan estos indicadores en los siguientes escenarios propuestos.

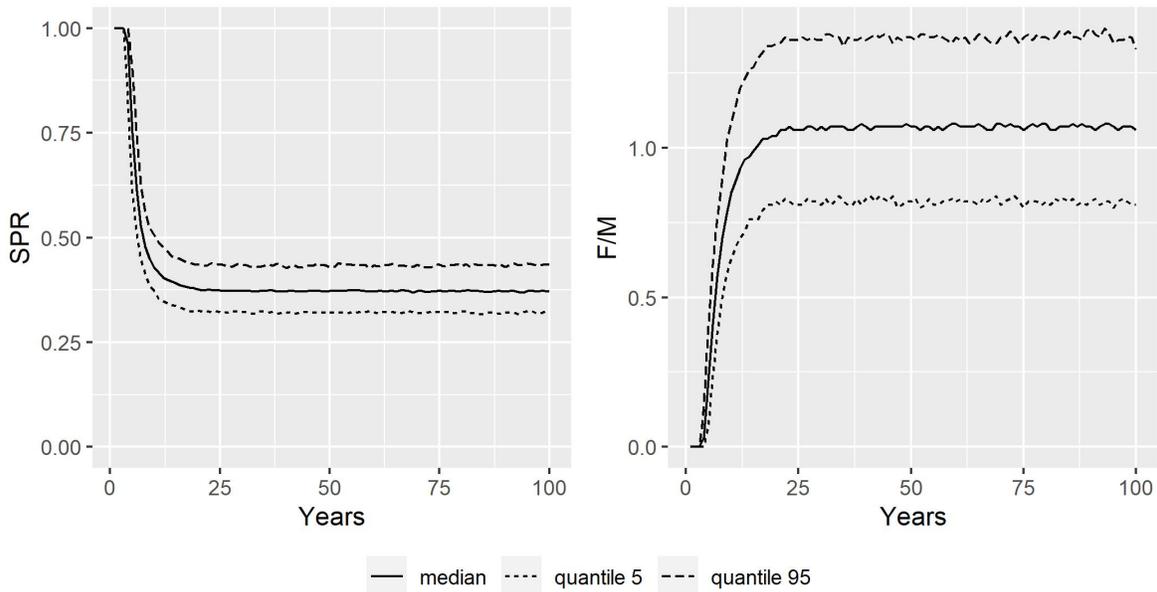


Figura 3.7: Tendencias temporales de la mediana y los cuantiles (5% y 95%) de los indicadores SPR y el ratio F/M proporcionados por el método LBSPR. El stock está siendo explotado a F_{MSY} .

3.2.2. Escenario 2: $0.5F_{MSY}$

Veamos como se comporta el método cuando infraexplotamos nuestro stock (estamos explotando a $0.5F_{MSY}$). Mencionamos anteriormente que las poblaciones con un SPR entre 0.35 y 0.4 podrían considerarse explotadas al nivel del MSY. En este caso, si prestamos atención a la Figura 3.8, a partir del año 25, los valores de SPR se estabilizan en 0.625, que está por encima de ese rango relacionado

con MSY , lo que es consistente ya que estamos explotando por debajo de MSY .

A continuación, nos fijamos en los valores que toma el ratio F/M . Cuando el stock no está siendo explotado este ratio parte del valor 0 y va aumentando hasta que alcanza el equilibrio (en torno al año 23 de la simulación) por encima del valor 0.4. En este caso el ratio real cuando $F = 0.5F_{MSY}$ es 0.12, está por debajo del ratio anterior ya que estamos disminuyendo la F y la M es constante para todos los escenarios. Por lo tanto, por un lado, teniendo en cuenta los valores que toma SPR bajo este nivel de explotación impuesto, podemos afirmar que este indicador es muy adecuado, sin embargo parece que cuando M es mayor que F , el indicador falla. Por último, podríamos comentar que en el caso de F/M observamos unos picos pequeños (en los otros escenarios son menos llamativos) aunque estos no afectan significativamente la tendencia general de los valores. Podríamos aumentar el número de iteraciones para comprobar si de esta manera converge hacia un valor más estable, sin embargo, el tiempo de computación es considerablemente alto, por lo que al aumentar el número de iteraciones podría ralentizar considerablemente la obtención de resultados. Esto también ocurre para el SPR en menor medida. Además, si nos fijamos en los intervalos de confianza, la F la estima con bastante incertidumbre

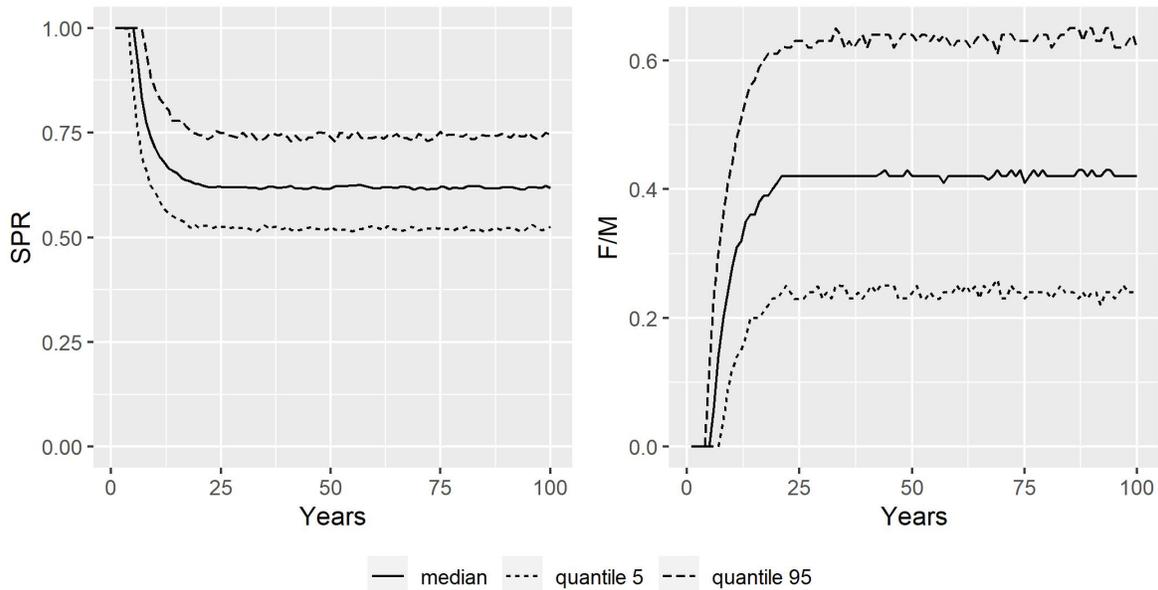


Figura 3.8: Tendencias temporales de la mediana y los cuantiles (5% y 95%) de los indicadores SPR y el ratio F/M proporcionados por el método LBSPR. El stock está siendo explotado a $0.5F_{MSY}$.

3.2.3. Escenario 3: $0.7F_{crash}$

Continuamos estudiando los valores de los indicadores del método LBSPR cuando estamos sobreexplotando el stock. Para ello imponemos una presión pesquera a $0.7F_{crash}$, partiendo de una población virgen. Recordamos que las poblaciones con un SPR inferior a $0.1 - 0.15$ se consideran cercanas al colapso (dichos límites se han fijado sobre la base de [Goodyear \[1993\]](#), quien señaló que para valores de SPR inferiores a 0.2 el riesgo de colapso aumenta considerablemente). En este caso observamos que, los valores que toma SPR descienden rápidamente en los primeros años de simulación, alcanzando un valor estable de 0.125 . Aunque este valor se considera bajo y se asocia con el riesgo del colapso, el stock no llega a colapsar completamente, dejando lugar a una posible recuperación del mismo. Esto se debe

a que estamos explotando tan solo a $0.7F_{crash}$, que es un nivel de pesca por encima de MSY pero por debajo de F_{crash} . Además se puede añadir que, en este caso, hay estabilidad en el valor alcanzado (no hay picos), por lo tanto el método parece haber alcanzado un punto en el que las iteraciones adicionales no producen cambios significativos en el resultado.

Por otro lado, F/M alcanza valores estables a partir del año 25 de la simulación, por encima de 3. Esto quiere decir que los valores de mortalidad por pesca F son bastante superiores a los de mortalidad natural M (lo triplica). Sin embargo cuando calculamos el ratio real obtenemos un valor de 0.70. Por lo tanto, de nuevo, SPR toma valores coherentes con el nivel de explotación impuesto pero el indicador F/M no funciona correctamente.

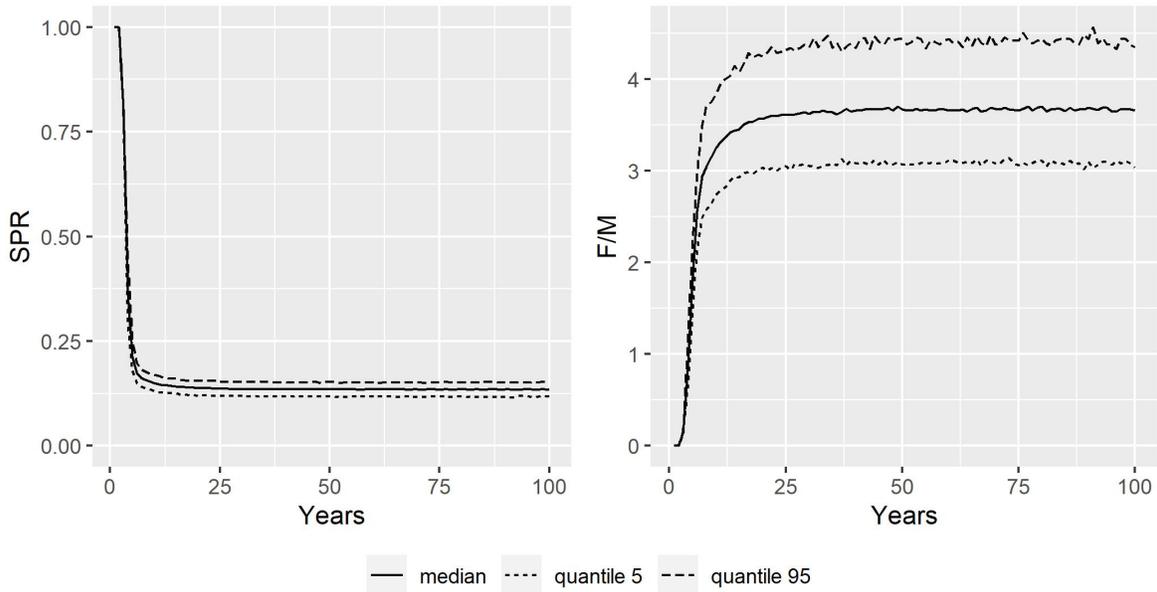


Figura 3.9: Tendencias temporales de la mediana y los cuantiles (5% y 95%) de los indicadores SPR y el ratio F/M proporcionados por el método LBSPR. El stock está siendo explotado a $0.7F_{crash}$.

3.2.4. Escenario 4: Diferentes Periodos de Explotación Pesquera a lo Largo del Tiempo

Para finalizar, analizamos los resultados del cuarto escenario propuesto en este estudio (Figura 3.10). Esta situación nos va a permitir observar como se comporta el método cuando estamos infraexplotando, sobreexplotando, explotando a MSY y qué ocurre en los cambios de presión pesquera cuando se quebranta la asunción de equilibrio.

Al comenzar con una explotación apenas relevante sobre nuestro stock, SPR toma el valor 1 durante 20 años. En este caso parece que el indicador reacciona acorde con este cambio ya que vemos que, sobre el año 20 de la simulación, la curva toma valores más bajos hasta que a partir de, aproximadamente el año 40, se estabiliza en el valor asociado a $0.9F_{crash}$, tomando así un valor de 0,12 (ver Figura A.4). Se mantiene en equilibrio hasta que, entorno al año 63 (tarda sobre 3 años en reaccionar el indicador) los valores de SPR comienzan a aumentar hasta alcanzar un valor estable asociado a MSY. En definitiva, los valores de los indicadores cambian acorde con la fuerza pesquera y parece que tardan un poco menos en reaccionar a estos cambios con respecto a los indicadores proporcionados por el método LBI.

Se puede confirmar un buen funcionamiento y una adecuación de los valores de referencia que se están empleando para este indicador. Sin embargo, observamos que el intervalo de confianza creado con los cuantiles del 5% y 95%, adquiere una forma poco regular. Esto se puede deber a la acumulación de valores en 1 durante los primeros años de la simulación, consecuencia de que el SPR está acotado superiormente por este valor.

Para terminar, el ratio F/M toma el valor 0 cuando el stock no está siendo prácticamente explotado, y a partir del año 25 (tarda 5 años en reaccionar) el ratio comienza a tomar valores más grandes, hasta que se sitúa la curva por encima de 4. Al tomar medidas las medidas de recuperación del stock explotado, estos valores bajan hasta alcanzar $F/M = 1$. Si calculamos el ratio real tenemos que, el valor que toma el ratio para los distintos valores de F tenemos que $F = 0.2F_{MSY}/M = 0.045$, $F = 0.9F_{crash}/M = 0.9$ y vimos anteriormente que cuando $F = F_{MSY}$ el ratio F/M es 0.23. Estos valores no concuerdan con los valores en los que el indicador del método se estabiliza en la Figura 3.10. Por lo tanto este indicador no parece funcionar cuando M es notablemente mayor que F .

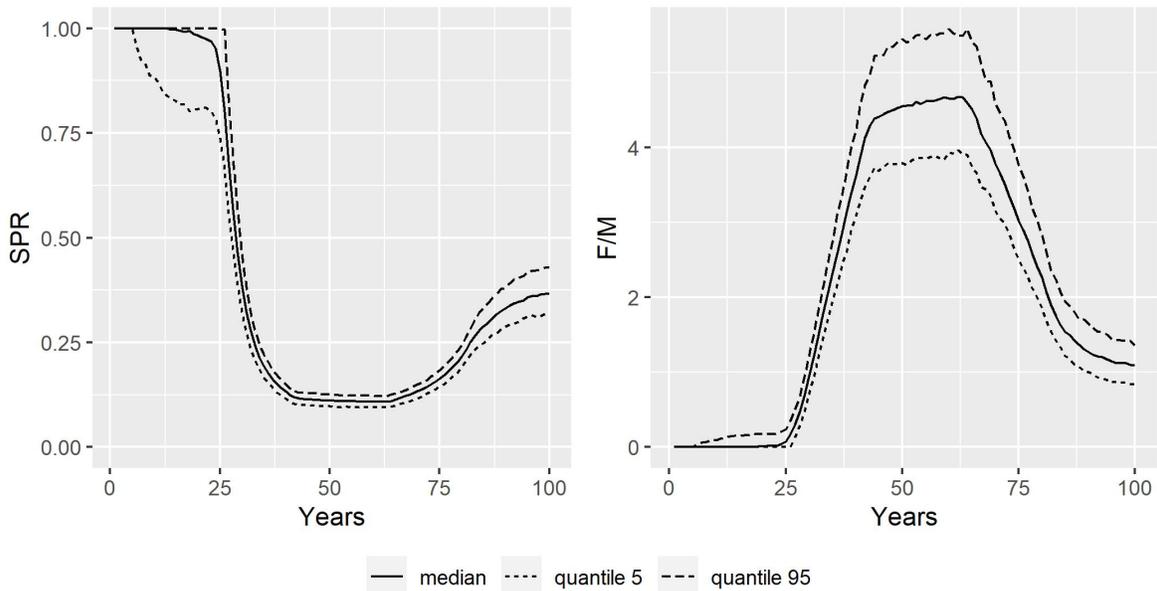


Figura 3.10: Tendencias temporales de la mediana y los cuantiles (5% y 95%) de los indicadores SPR y el ratio F/M proporcionados por el método LBSPR. Se empieza con un nivel de explotación del stock muy bajo, prácticamente no estamos pescando ($0.2F_{MSY}$) y lo dejamos que alcance el equilibrio. A partir de 20 años subimos el nivel de explotación paulatinamente (mediante una interpolación lineal) hasta alcanzar el nivel $0.9F_{crash}$ y luego la bajamos a F_{MSY} gradualmente.

Capítulo 4

Conclusiones

El objetivo principal de este estudio es analizar el funcionamiento de los métodos de evaluación, LBI y LBSPR, diseñados para poblaciones de datos limitados en un entorno simulado, en el caso particular de la *Solea solea*. Para ello, en primer lugar, se llevó a cabo una presentación detallada de ambos métodos, proporcionando al lector una idea general sobre su funcionamiento, y así poder comprender el análisis de los mismos. Además, a lo largo del capítulo de metodología se introducen conceptos relacionados con dinámica de poblaciones y modelos matemáticos para la ciencia pesquera.

En la Sección 2.3 se presenta el procedimiento estadístico utilizado para simular la dinámica del recurso, stock sol.8c.9. Este estudio implicó, consecuentemente, objetivos secundarios como: 1) proporcionar unos valores de referencia que se adecuan mejor a nuestro stock, en el caso de algunos indicadores proporcionados por los métodos de estudio y 2) asentar las bases para, a continuación, proponer una nueva regla de control de pesca para la *Solea solea*. Primeramente, este stock se evalúa en *International Council for the Exploration of the Sea* (ICES). Esta es una organización intergubernamental de ciencias marinas que responde a las necesidades de la sociedad de disponer de datos imparciales sobre el estado y el uso sostenible de nuestros mares y océanos. Su objetivo es avanzar y compartir los conocimientos científicos sobre los ecosistemas marinos y los servicios que prestan, y utilizar estos conocimientos para generar asesoramiento de vanguardia, que permita alcanzar los objetivos de conservación, gestión y sostenibilidad.

La definición y consecución de objetivos de gestión puede resultar difícil en el caso de poblaciones con datos limitados como es este, no obstante, el ICES ha elaborado reglas de capturas sencillas para estas poblaciones. Con respecto a la regla que se ha estado utilizando los últimos años, han surgido problemas en su uso en la práctica, debido a su rendimiento extremadamente conservador. En particular, la aplicación de esta regla para el lenguado común (*Solea solea*) en la región de la costa ibérica condujo a una reducción de las capturas del 36 % en 2021 y de un 35 % adicional en 2023, a pesar de que los métodos para datos limitados basados en la talla, LBI y LBSPR dieron una visión general de una población bien explotada. Por lo tanto, estudiar el funcionamiento de estos métodos, para determinar si es preciso elaborar una nueva regla de captura para nuestro stock es de suma importancia, ya que una mala gestión de los recursos tendrá fuertes consecuencias económicas y sociales.

En la Sección 3.1 analizamos el funcionamiento de los seis indicadores proporcionados por el método LBI y discutimos si los valores de referencia son los adecuados para evaluar el estado de nuestro stock.

Prácticamente para todos los indicadores, aportamos una nueva propuesta de punto de referencia en base a nuestra simulación para la *Solea solea*. Sin embargo, los puntos de referencia generales proporcionados por la bibliografía, en la mayoría de los casos, son adecuados para casos menos específicos, con la excepción del valor de referencia para P_{mega} (0.3). Para este indicador, los valores de referencia proporcionados por la literatura son altos con respecto a lo que observamos en nuestro stock, por lo

que al emplearlos, estaríamos siendo pesimistas con respecto al estado de la conservación de individuos grandes de la población. Por eso proponemos nuevas referencias que serían adecuadas en el caso del lenguado común (0.15).

En la Sección 3.2 analizamos los valores que toman los indicadores LBSPR y el ratio F/M . Se supone que los valores de SPR para una población explotada a MSY deberían oscilar entre 0.35 y 0.4, mientras que en una población virgen, los valores esperados se situarían normalmente en torno a 1. Nuestro estudio confirma estos valores de referencia generales son apropiados para la *Solea solea*. Por otro lado, estudiamos la relación entre los valores de mortalidad por pesca y mortalidad natural. Cuando se explota a MSY, se tiende a suponer que $F/M = 1$, observamos que en este estudio, este indicador falla en situaciones donde M es claramente mayor que F , como es esta. No es de extraña ya que son métodos de datos limitados. En conclusión, confirmamos una adecuación de los valores de referencia, en el caso del indicador SPR y observamos que el método falla al estimar el ratio F/M .

Como sugerimos anteriormente, este estudio sienta las bases para proponer una nueva regla de control de pesca para la *Solea solea* en la costa ibérica, que se adapte mejor a las necesidades socio-económicas y que proteja, a su vez, los recursos. En base a lo que hemos observado en este estudio, indicadores relacionados con el SPR serán, por lo tanto, muy adecuados para cumplir este objetivo ya que se ha comprobado que funcionan muy bien las referencias de las que disponemos.

Apéndice A

Gráficos complementarios

En este apéndice proporcionamos las gráficas, para los cuatros escenarios planteados en la simulación, del número de reclutas, biomasa reproductora del stock (SSB), capturas y la F . Para la obtención de estas gráficas se ha empleado la herramienta FLR de R.

A.1. Escenario 1: F_{MSY}

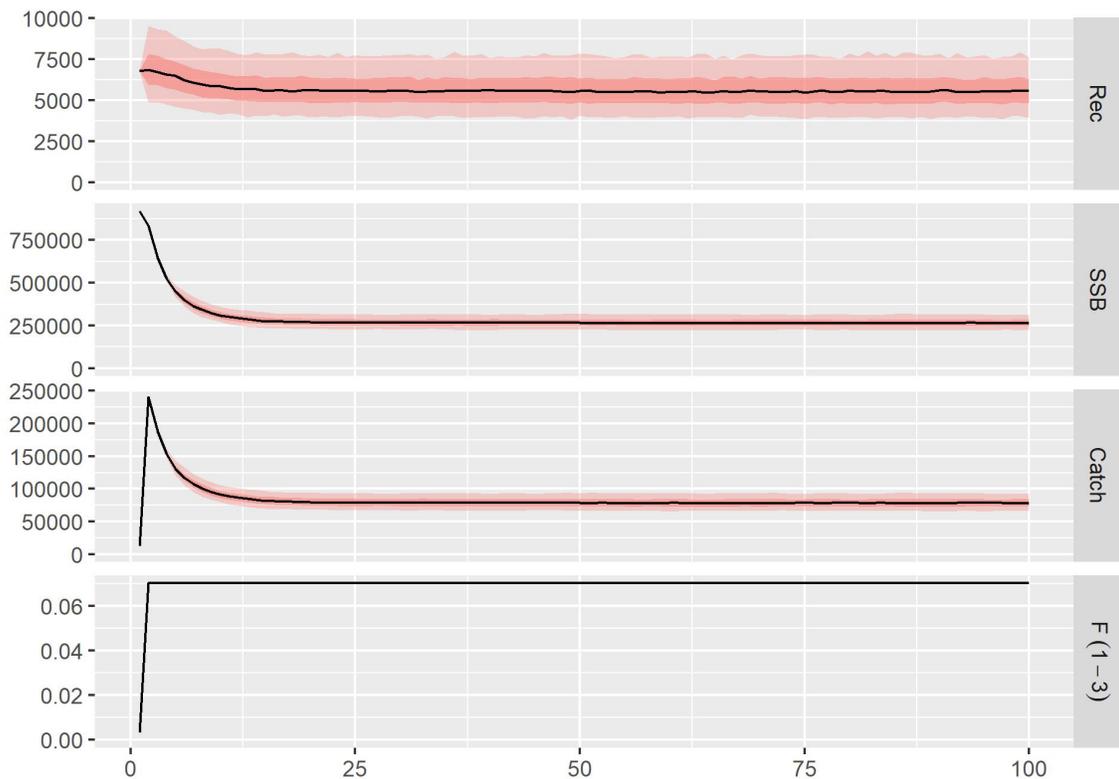
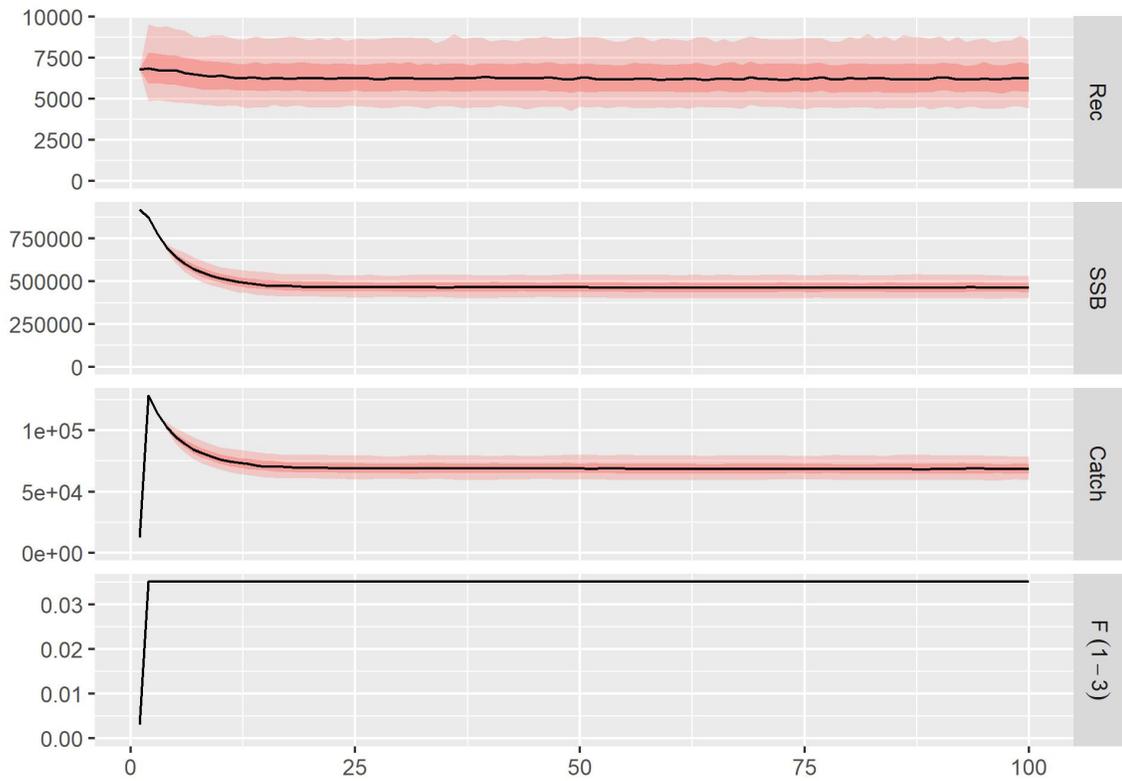
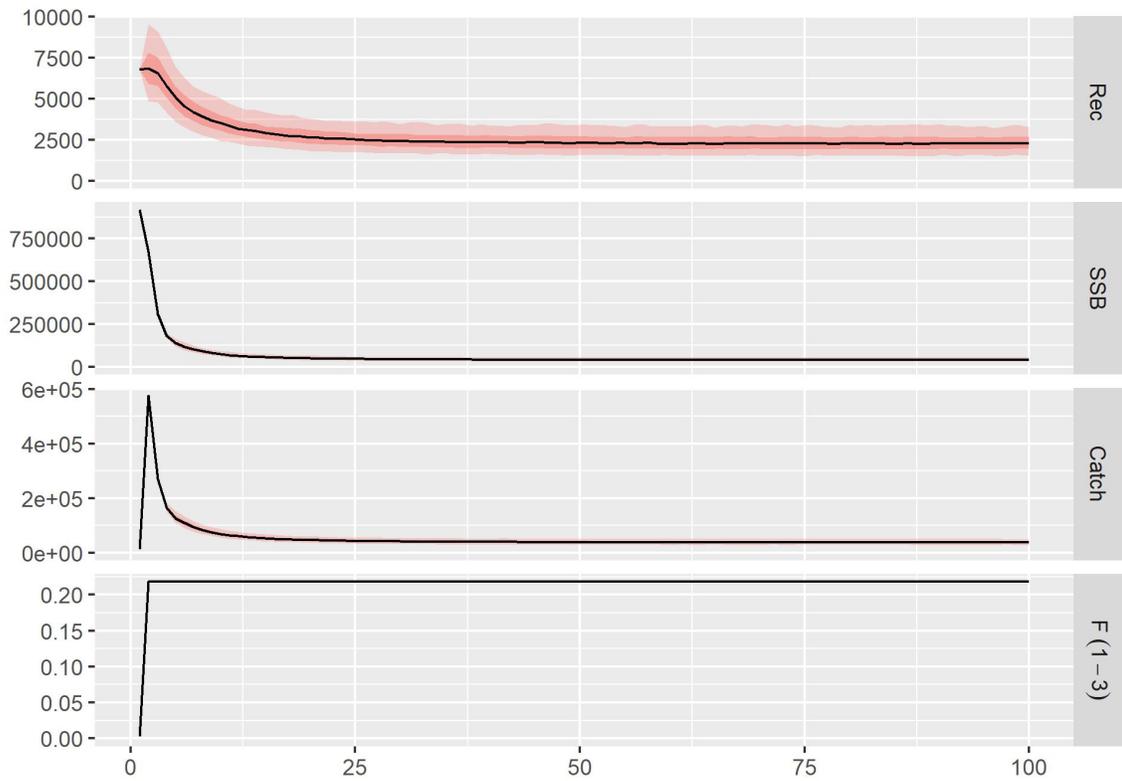


Figura A.1: Reclutamiento, SSB, capturas y la F durante los 100 años de nuestra simulación en el escenario 1

A.2. Escenario 2: $0.5F_{MSY}$ Figura A.2: Reclutamiento, SSB, capturas y la F durante los 100 años de nuestra simulación en el escenario 2

A.3. Escenario 3: $0.7F_{crash}$ Figura A.3: Reclutamiento, SSB, capturas y la F durante los 100 años de nuestra simulación en el escenario 3

A.4. Escenario 4: Diferentes Periodos de Explotación Pesquera a lo Largo del Tiempo

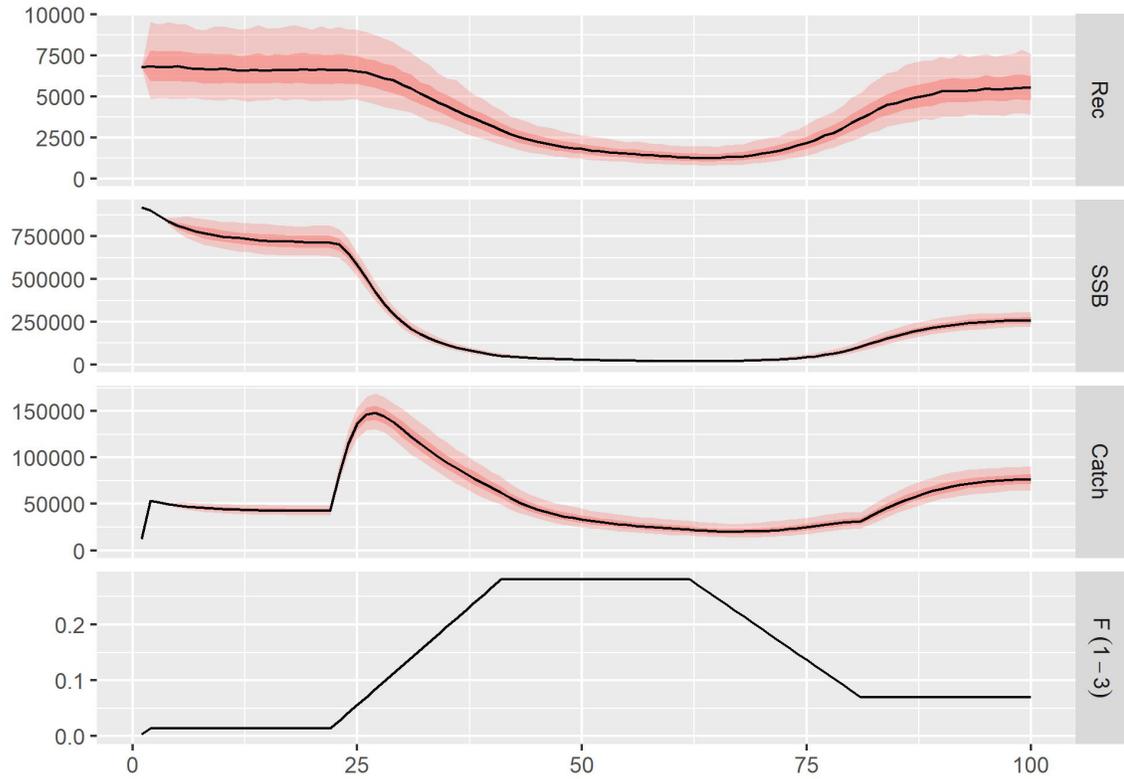


Figura A.4: Reclutamiento, SSB, capturas y la F durante los 100 años de nuestra simulación en el escenario 4

Apéndice B

Distribución de tallas

En este apéndice proporcionamos las distribuciones de tallas obtenidas en la Sección 2.3.3 , para los cuatro escenarios propuestos en la simulación. Son un parte fundamental del trabajo, ya que nuestros métodos están basados en las tallas y es importante conocer, en todos los casos, la estructura de las mismas para una correcta interpretación de los resultados.

B.1. Escenario 1: F_{MSY}

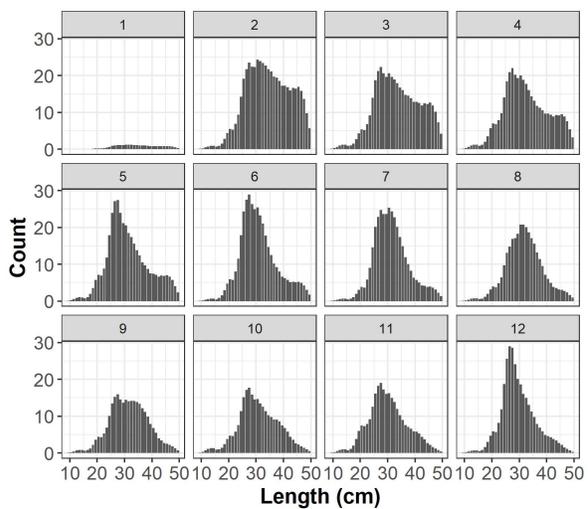


Figura B.1: *

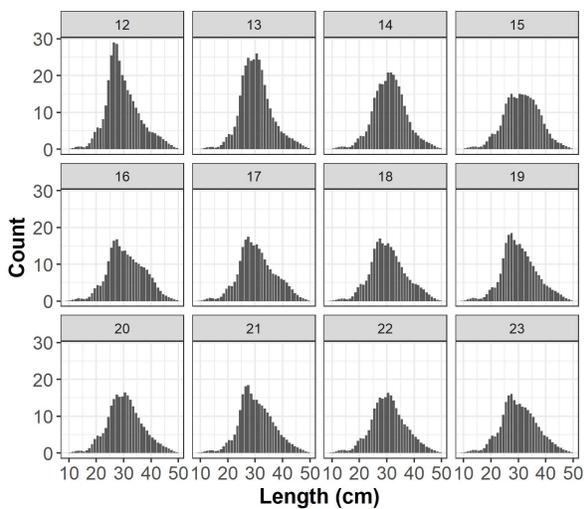


Figura B.2: *

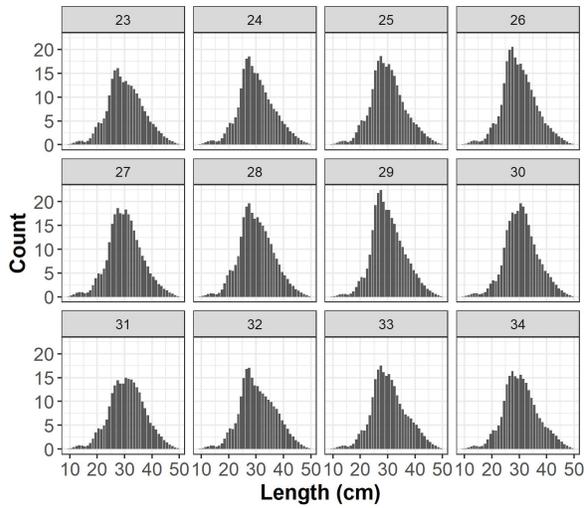


Figura B.3: *

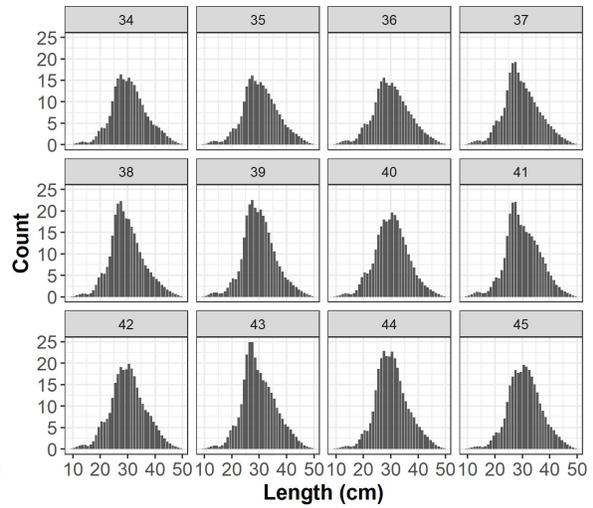


Figura B.4: *

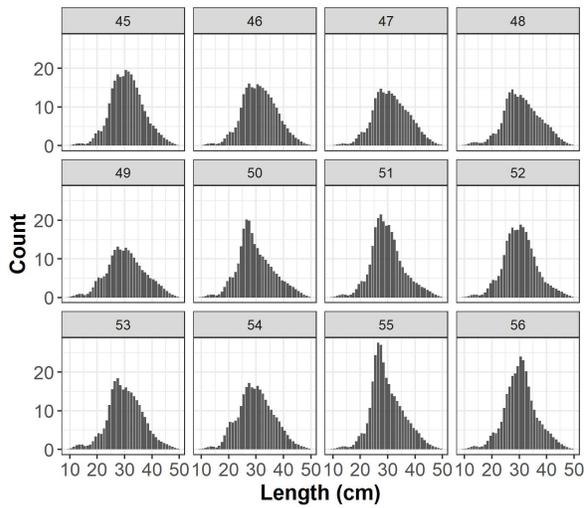


Figura B.5: *

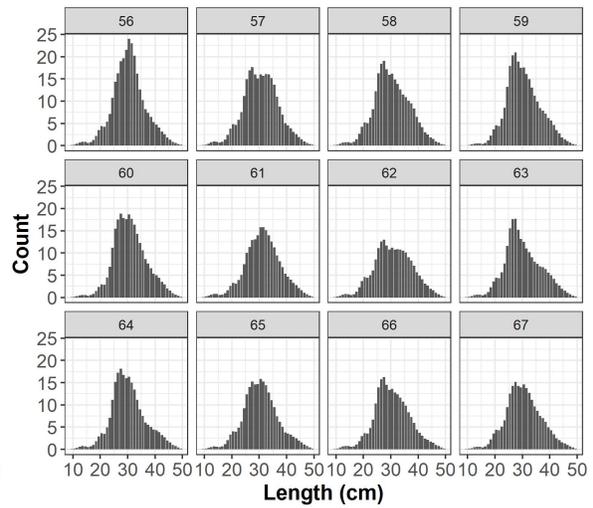


Figura B.6: *

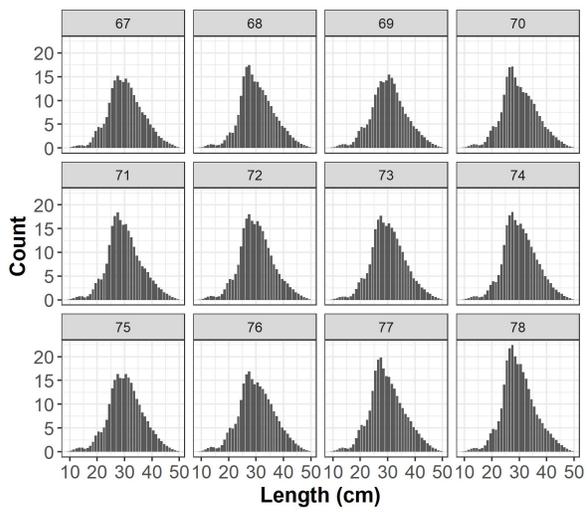


Figura B.7: *

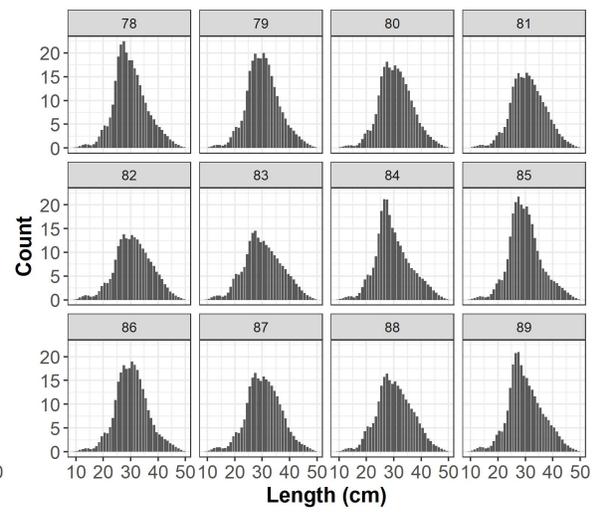


Figura B.8: *

B.2. Escenario 2: $0.5F_{MSY}$

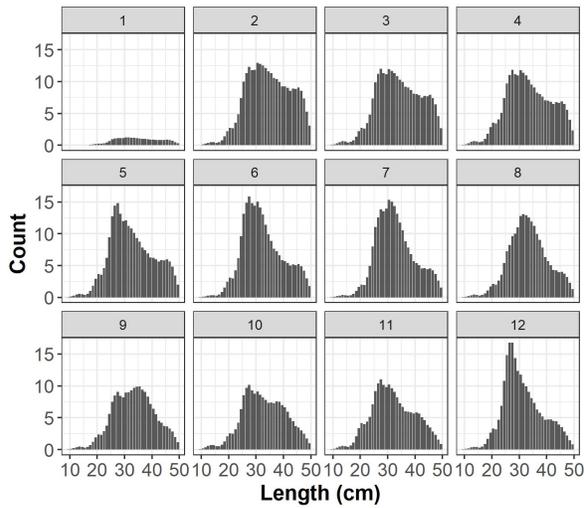


Figura B.9: *

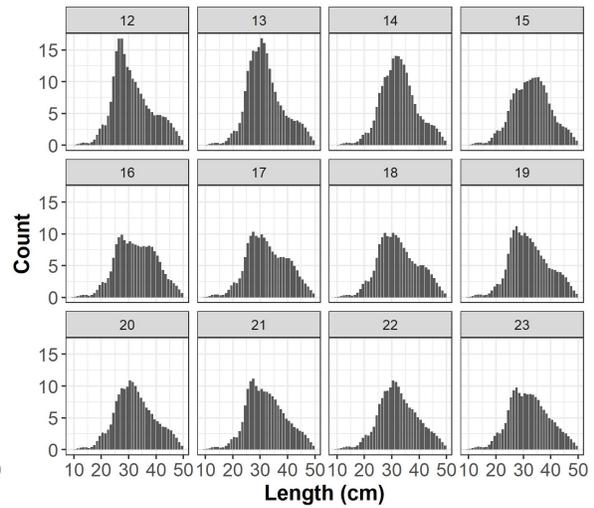


Figura B.10: *

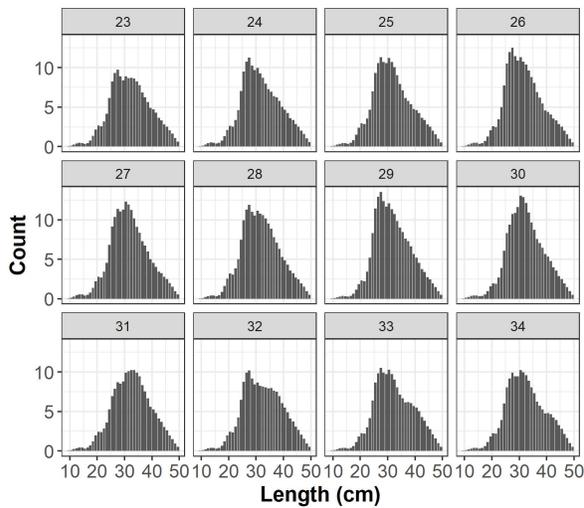


Figura B.11: *

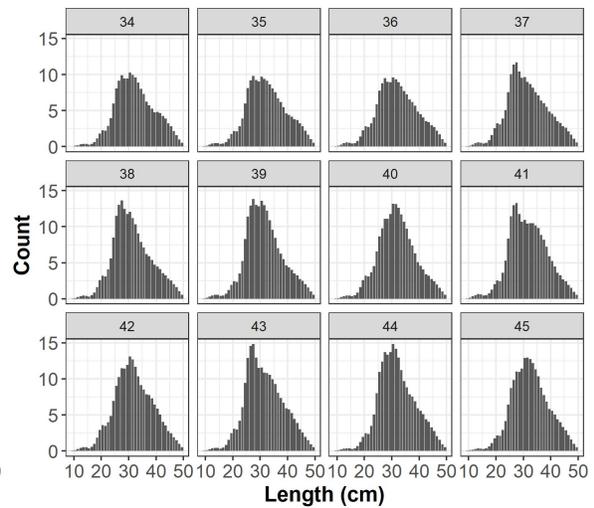


Figura B.12: *

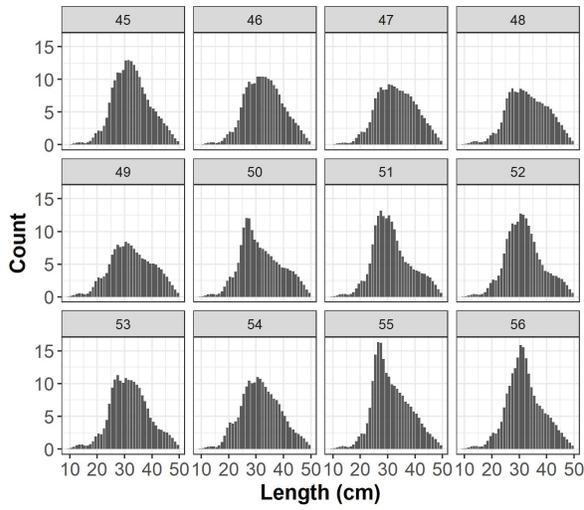


Figura B.13: *

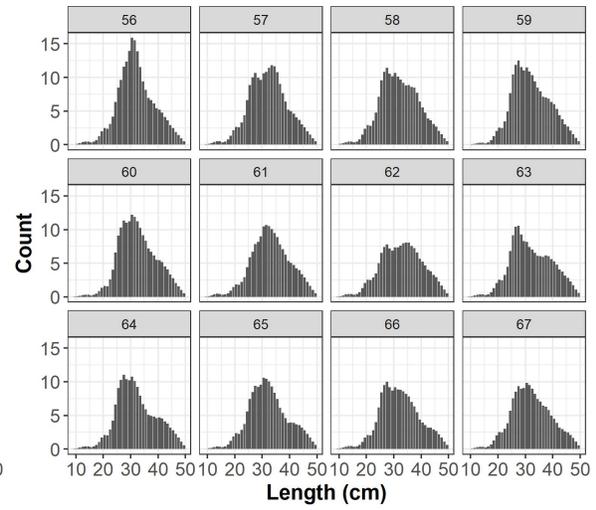


Figura B.14: *

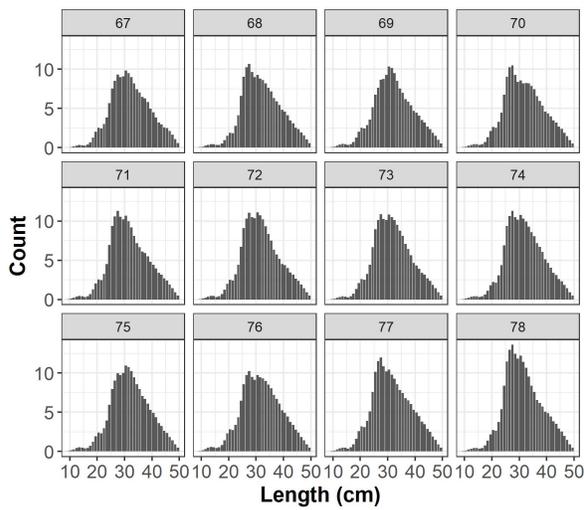


Figura B.15: *

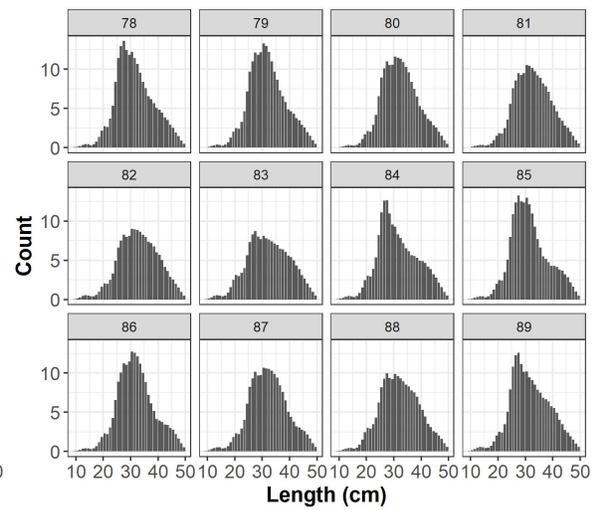


Figura B.16: *

B.3. Escenario 3: $0.7F_{crash}$

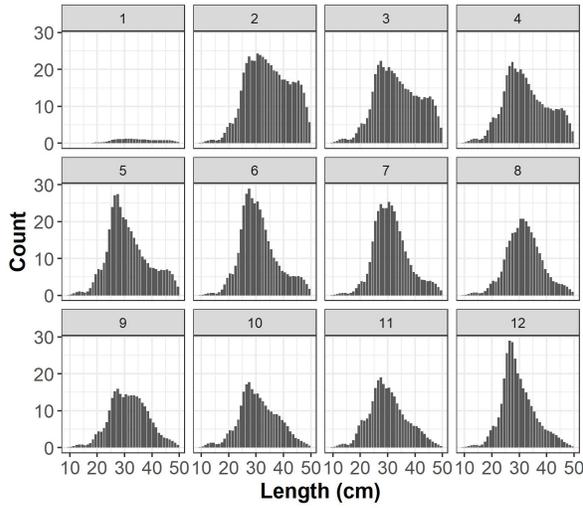


Figura B.17: *

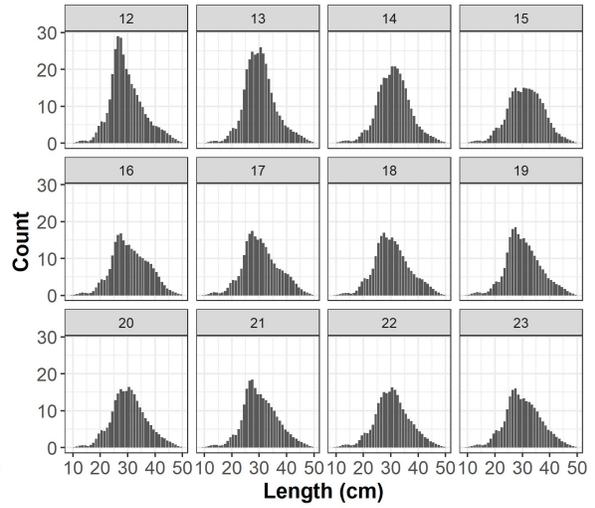


Figura B.18: *

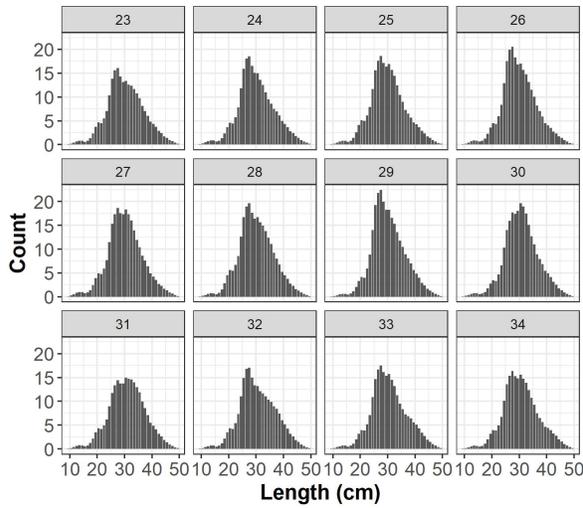


Figura B.19: *

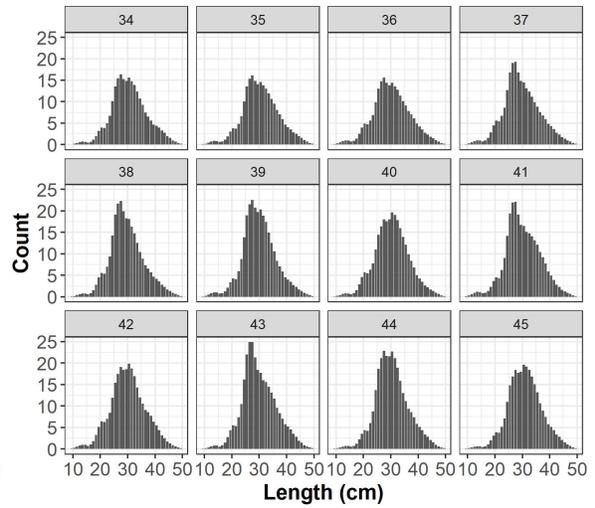


Figura B.20: *

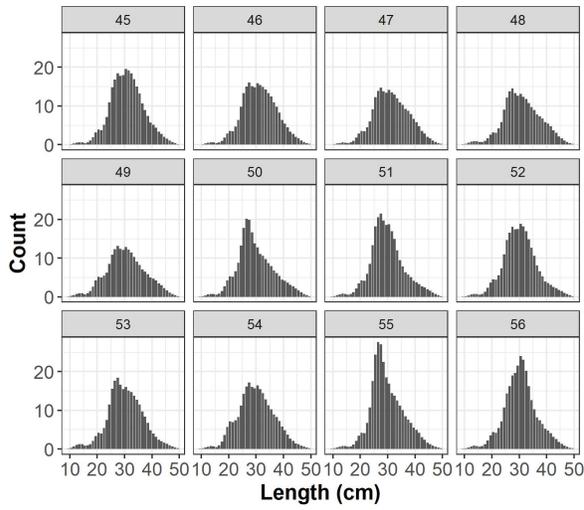


Figura B.21: *

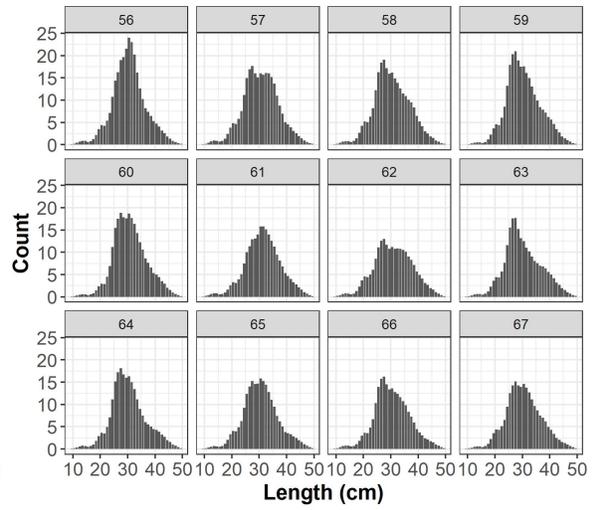


Figura B.22: *

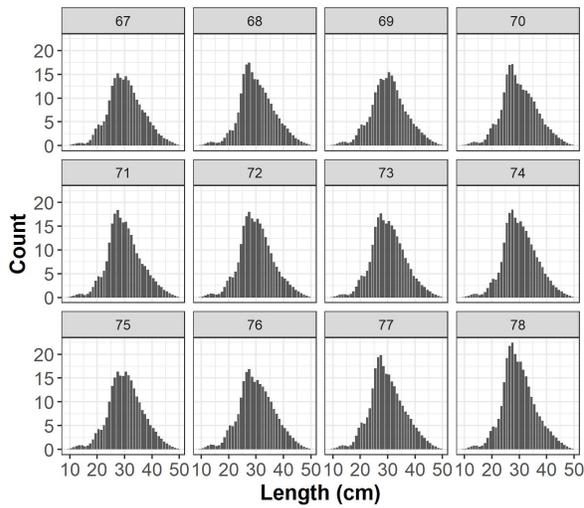


Figura B.23: *

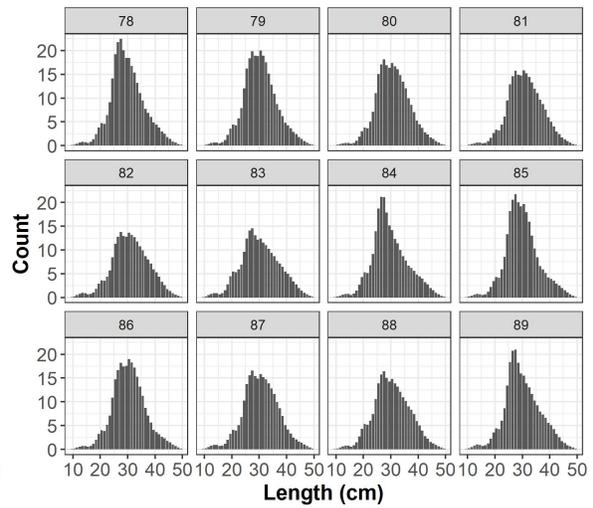


Figura B.24: *

B.4. Escenario 4: Diferentes Periodos de Explotación Pesquera a lo Largo del Tiempo

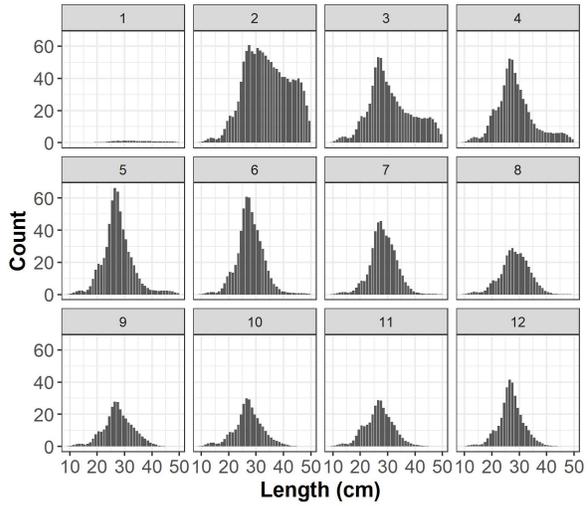


Figura B.25: *

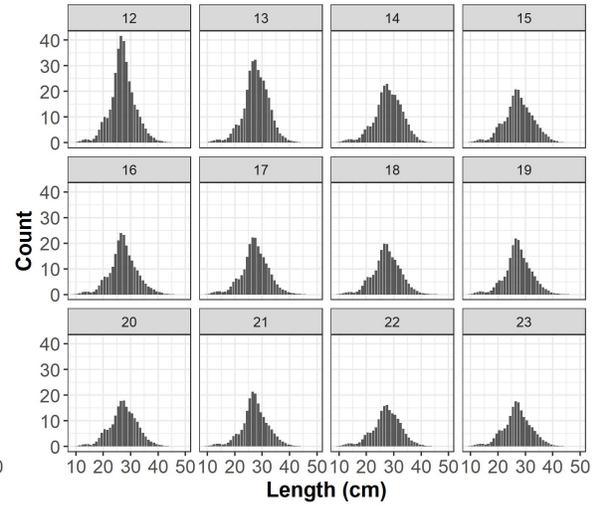


Figura B.26: *

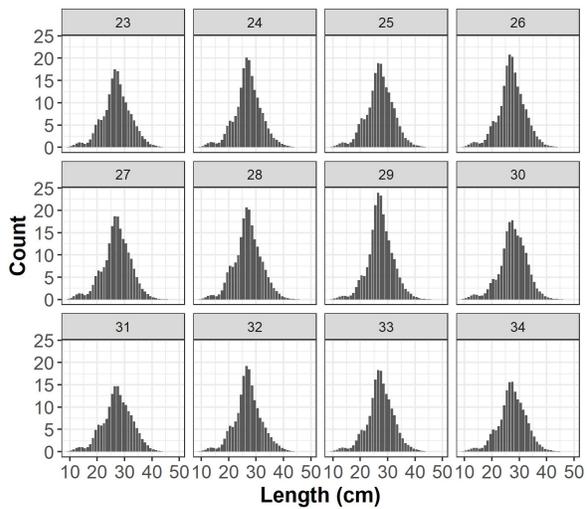


Figura B.27: *

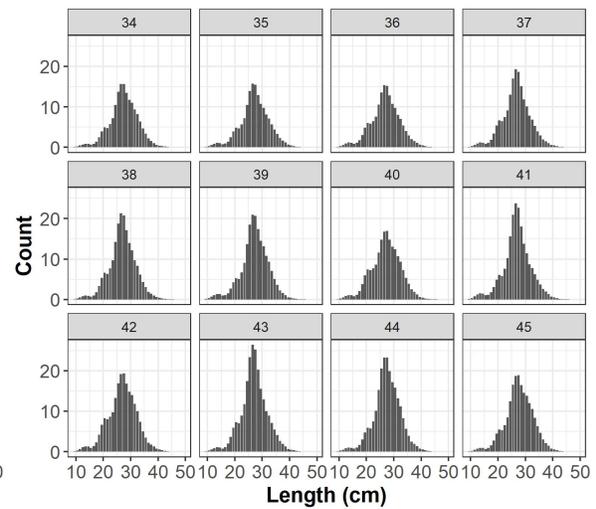


Figura B.28: *

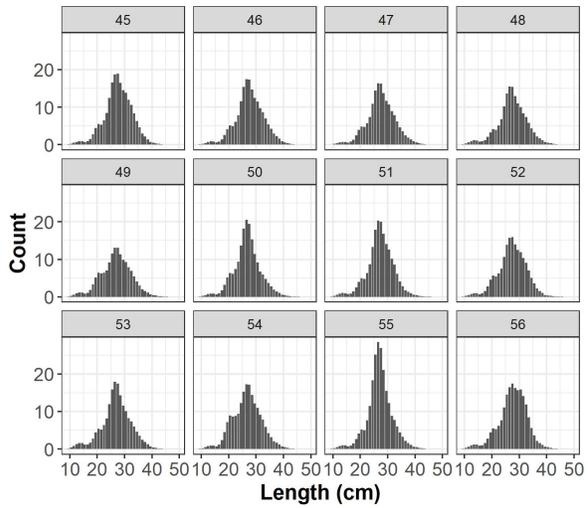


Figura B.29: *

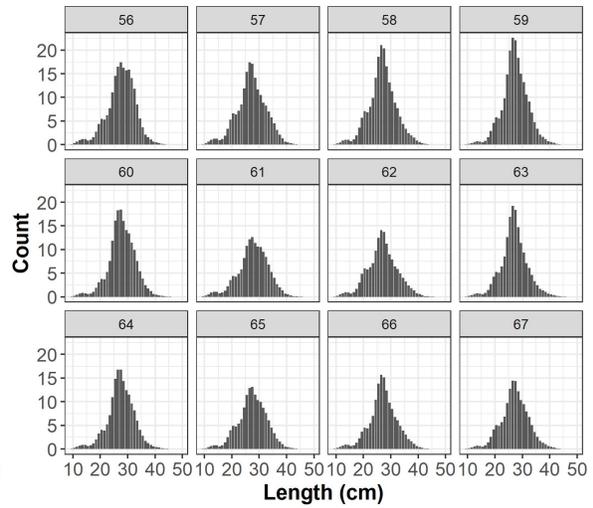


Figura B.30: *

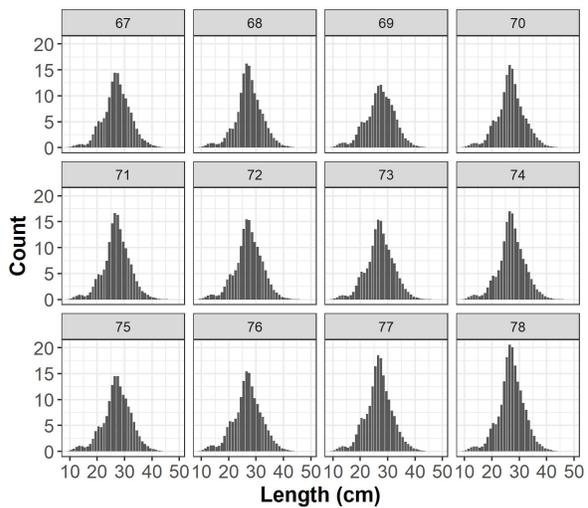


Figura B.31: *

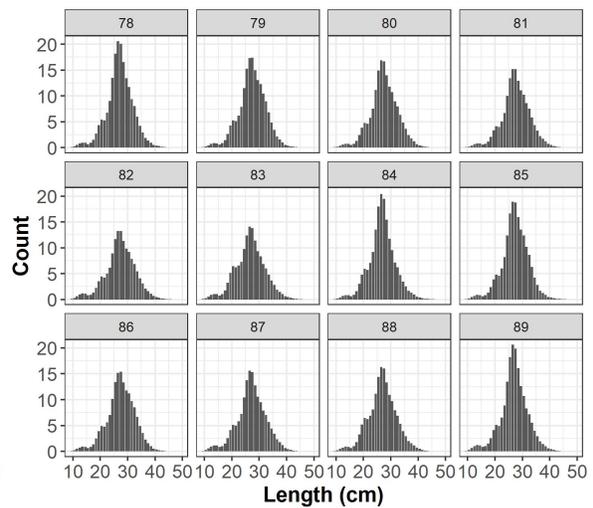


Figura B.32: *

Bibliografía

- Alonso-Fernández, A., Otero, J., Bañón, R. (2021). Indicators of body size variability in a highly developed small-scale fishery: ecological and management implications. *Ecol. Indic.* 121, 107141. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107141>.
- Cerim, H., Ates, C., (2020). Age, growth and length-weight relations of common sole (*Solea solea* Linnaeus, 1758) from Southern Aegean Sea. *Aquatic Sci. Eng.* 35 (2), 36–42. <https://doi.org/10.26650/ASE2020596672>.
- Cousido-Rocha, M., Pennino, M.G., Izquierdo, F., Paz, A., Lojo, D., Tifoura, A., Zanni, M.Y., Cerviño, S. (2022). Surplus production models: a practical review of recent approaches. *Rev Fish Biol Fisheries* 32, 1085–1102. <https://doi.org/10.1007/s11160-022-09731-w>
- Cousido-Rocha, M., Cerviño, S., Alonso-Fernández, A., Gil, J., González Herraiz, I., Rincón, M.M., Ramos, F., Rodríguez-Cabello, C., Sampedro, P., Vila, Y., Pennino, M.G. (2022). Applying length-based assessment methods to fishery resources in the Bay of Biscay and Iberian Coast ecoregion: Stock status and parameter sensitivity. *Fisheries Research*, 248. 106197. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2021.106197>
- Fischer, S.H., De Oliveira, J.A.A., T.Kell, L. (2020). Linking the performance of a data-limited empirical catch rule to life-history traits. *ICES Journal of Marine Science*, 77(5), 1914-1926. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsaa054>.
- Froese, R. (2004). Keep it simple: three indicators to deal with overfishing. *Fish Fish.* 5 (1), 86–91. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2979.2004.00144.x>.
- Gislason, H., Daan, N., Rice, J. C., and Pope, J. G. 2010. Size, growth, temperature and the natural mortality of marine fish. *Fish and Fisheries*, 11: 149–158.
- Goodyear, C.P. (1993). Spawning stock biomass per recruit in fisheries management: foundation and current use S.J. Smith J.J. Hunt D. Rivard Risk Eval. Biol. Ref. Points Fish. Manag. Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci.120, 67–82 .
- Hordyk, A., Ono, K., Valencia, S., Loneragan, N., Prince, J. (2015a). A novel length-based empirical estimation method of spawning potential ratio (SPR), and tests of its performance, for small-scale, data-poor fisheries. *ICES (Int. Counc. Explor. Sea) J. Mar. Sci.* 72 (1), 217–231. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsu004>.
- Hordyk, A., Ono, K., Valencia, S., Loneragan, N., Prince, J. (2015b). A novel length-based empirical estimation method of spawning potential ratio (SPR), and tests of its performance, for small-scale, data-poor fisheries. *ICES J. Mar. Sci.* 72 (1), 217–231. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsu004>.
- Hordyk, A.R., Ono, K., Prince, J.D., Walters, C.J. (2016). A simple length-structured model based on life history ratios and incorporating size-dependent selectivity: application to spawning potential ratios for data-poor stocks. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 73 (12), 1787–1799. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2015-0422>.

- Hordyk, A., 2019. LBSPR: an R package for simulation and estimation using life-history ratios and length composition data. URL. <https://github.com/AdrianHordyk/LBSPR>. <https://github.com/AdrianHordyk/LBSPR>, 2019.
- ICES (2015). Report of the fifth Workshop on the development of quantitative assessment methodologies based on life-history traits, exploitation characteristics and other relevant parameters for data-limited stocks (WKLIFE V). Lisbon, Portugal. http://ices.dk/sites/pub/Publication%20Reports/Expert%20Group%20Report/acom/2015/WKLIFEV/ExSumm_wklifeV_2015.pdf.
- ICES. 2020. Tenth Workshop on the Development of Quantitative Assessment Methodologies based on LIFE-history traits, exploitation characteristics, and other relevant parameters for data-limited stocks (WKLIFE X). ICES Scientific Reports. 2:98. 72 pp. <http://doi.org/10.17895/ices.pub.5985>
- Jardim, E., Alpoim, R., Silva, C., Fernandes, A.C., Chaves, C., Dias, M., Prista, N., Costa, A.M., (2011). Portuguese Data provided to WGHMM for Stock Assessment in 2011. Working Document Presented at the ICES Working Group on the Assessment of Southern Shelf Stocks of Hake, vol. 11. ICES CM 2011/ACOM, Denmark, p. 625. Monk and Megrim (WGHMM), 5-11 May 2011, ICES Headquarters, Copenhagen.
- Jardim, E., Azevedo, M., and Brites, N. M. (2015). Harvest control rules for data limited stocks using length-based reference points and survey biomass indices. *Fisheries Research*, 171: 12–19.
- Kell, L. T., I. Mosqueira, P. Grosjean, J-M. Fromentin, D. Garcia, R. Hillary, E. Jardim, S. Mardle, M. A. Pastoors, J. J. Poos, F. Scott, R. D. Scott. 2007. FLR: an open-source framework for the evaluation and development of management strategies. *ICES J Mar Sci*, 64 (4): 640-646. doi: 10.1093/icesjms/fsm012
- Lee, R.M. (1912). An investigation into the methods of growth determination in fishes by means of scales. *ICES J. Mar. Sci.* 1 (63), 3–34.
- Legault, C., Brooks, E.N. (2013). Can stock–recruitment points determine which spawning potential ratio is the best proxy for maximum sustainable yield reference points? *ICES J. Mar. Sci.* 703 (6), 1075–1080. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fst105>.
- Myers, R. A., Bowen, K. G., and Barrowman, N. J. (1999). Maximum reproductive rate of fish at low population sizes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 56: 2404–2419.
- Miethe, T., Dobby, H. (2015). Selection of length-based indicators for shellfish stocks and fisheries. Work. Doc. (WD) WKLIFE V, 5–9 Oct, Lisbon 17.
- Pennino, M.G., Cousido, M., Maia, C., Rocha, A., Figueiredo, I., Alonso-Fernández, A., Silva, C., Izquierdo, F., Castro, J., Teruel Gomez, J., Rodriguez, J., Cerviño, S., (2022). Identifying persistent biomass areas: This is what we know: Assessing the stock status of the data-poor common sole on the Iberian coast. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 266, 107747. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.107747>
- Prince, J.D., Hordyk, A.R., Valencia, S.R., Loneragan, N.R., and Sainsbury, K.J. (2015b). Revisiting the concept of Beverton–Holt life-history invariants with the aim of informing data-poor fisheries assessment. *ICES J. Mar. Sci.* 72: 194–203.
- Tanner, S.E., Teles-Machado, A., Martinho, F., Peliz, A., Cabral, H.N., 2017. Modelling larval dispersal dynamics of common sole (*Solea solea*) along the western Iberian coast. *Prog. Oceanogr.* 156, 78–90. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2017.06.005>

- Teixeira, C.M., Pinheiro, A., Cabral, H.N. (2009). Feeding ecology, growth and sexual cycle of the sand sole, *Solea lascaris*, along the Portuguese coast. *J. Mar. Biol. Assoc. U. K.* 89 (3), 621–627. <https://doi.org/10.1017/S0025315409002562>.
- Teixeira, C.M., Cabral, H.N. (2010). Comparative analysis of the diet, growth and reproduction of the soles, *Solea solea* and *Solea senegalensis*, occurring in sympatry along the Portuguese coast. *J. Mar. Biol. Assoc. U. K.* 90 (5), 995–1003. <https://doi.org/10.1017/S0025315410000238>.
- Von Bertalanffy, L. (1950). An outline of general system theory. *The British Journal for the Philosophy of Science*, I: 134–165.
- Walters, C.J., and Martell, S.J.D. (2004). *Fisheries ecology and management*. Princeton University Press, Princeton, USA.