



UniversidadeVigo

Trabajo Fin de máster

Evaluación y Diagnóstico de los Modelos de Stock-Reclutamiento en un entorno simulado

Alberto Couce Rodríguez

Máster en Técnicas Estadísticas e Investigación Operativa

Curso 2023-2024

Propuesta de Trabajo Fin de máster

Título en galego: Avaliación e diagnose dos modelos de Stock-Recrutamento nun entorno simulado
Título en español: Evaluación y diagnosis de los modelos de Stock-Reclutamiento en un entorno simulado
English title: Evaluation and diagnosis of Stock-Recruitment models in a simulated framework
Modalidad: Modalidad B
Autor: Alberto Couce Rodríguez, Universidade de A Coruña
Director: Javier Roca Pardiñas, Universidade de Vigo;
Tutores: Marta Cousido Rocha, Instituto Español de Oceanografía (IEO, CSIC); Santiago Cerviño López, Instituto Español de Oceanografía (IEO, CSIC)
Breve resumen del trabajo: Este estudio se centra en revisar el comportamiento de la relación Stock-Reclutamiento en un entorno controlado de simulación, así como el impacto o efecto que dicho comportamiento tiene sobre los puntos de referencia empleados para establecer un juicio sobre el estado de conservación de un stock.
Recomendaciones: (i) Interés en aprender sobre la aplicación de la estadística en la conservación de recursos naturales. (ii) Dominio de R. (iii) Materias recomendadas: Simulación estadística; Técnicas de remuestreo

Don Javier Roca Pardiñas, catedrático de la Universidade de Vigo, doña , de la , doña Marta Cousido Rocha, M3 de Instituto Español de Oceanografía (IEO, CSIC), y don Santiago Cerviño López, científico titular de Instituto Español de Oceanografía (IEO, CSIC), informan que el Trabajo Fin de máster titulado

Evaluación y Diagnosis de los Modelos de Stock-Reclutamiento en un entorno simulado

fue realizado bajo su dirección por don Alberto Couce Rodríguez para el máster en Técnicas Estadísticas. Estimando que el trabajo está terminado, dan su conformidad para su presentación y defensa ante un tribunal.

En A Coruña, a 22 de Julio de 2024.

El director:
Don Javier Roca Pardiñas

La tutora:
Doña Marta Cousido Rocha

El tutor:
Don Santiago Cerviño López

El autor:
Don Alberto Couce Rodríguez



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

Quiero agradecer a Marta y a Santiago, por la voluntad que han mostrado al enseñarme, todo el esfuerzo que han dedicado a guiarme, y sobretodo la infinita paciencia que han tenido conmigo. También a mi familia, pareja y amigos que siempre han estado ahí para apoyarme a lo largo de todo el desarrollo de este TFM. ¡Gracias a todos!

Resumen

Resumen en español

En los últimos años, ha quedado cada vez más en evidencia la importancia de una correcta gestión de los recursos marinos y del impacto que dicha gestión tiene sobre las poblaciones de peces. Es de vital importancia pues conocer el estado de una población para poder llevar a cabo estrategias de gestión que nos permitan una correcta explotación del recurso. Para conocer el estado de una población se recurre al análisis de la cantidad y estructura de una población de peces. Se utilizan modelos matemáticos para captar la dinámica poblacional, integrando datos de captura, esfuerzo de pesca y estudios biológicos. Algunos procesos biológicos clave incluyen el reclutamiento, crecimiento, mortalidad natural y por pesca. La relación stock-reclutamiento es fundamental, ya que determina la capacidad de la población para regenerarse. Esto es esencial para una gestión pesquera sostenible. Se tienen en cuenta diversos parámetros que caracterizan las poblaciones que lo componen, así como las relaciones existentes entre dichos parámetros. Una de las relaciones más estudiadas tradicionalmente, es la relación entre la biomasa de dicha población y su capacidad de reclutamiento. Esta relación describe cómo la cantidad de adultos reproductores (stock) influye en la cantidad de nuevos individuos (reclutas) que se incorporan a la población. Los puntos de referencia ayudan a garantizar que esta relación se mantenga en un estado saludable y sostenible. Estos puntos de referencia son valores o umbrales cuantitativos utilizados en la gestión pesquera para evaluar el estado de una población de peces y guiar las decisiones de manejo empleados para establecer un juicio sobre el estado de conservación de un stock. Este estudio se centra en revisar el comportamiento de esta relación en un entorno controlado de simulación, así como el impacto o efecto que dicho comportamiento tiene sobre los puntos de referencia.

English abstract

In recent years, the importance of proper management of marine resources and the impact that such management has on fish populations has become increasingly evident. It is vital to know the state of a population in order to implement management strategies that allow for the proper exploitation of the resource. To understand the state of a population, an analysis of the quantity and structure of a fish population is conducted. Mathematical models are used to capture population dynamics, integrating catch data, fishing effort, and biological studies. Key biological processes include recruitment, growth, natural mortality, and fishing mortality. The stock-recruitment relationship is fundamental as it determines the population's capacity to regenerate. This is essential for sustainable fisheries management. Various parameters that characterize the populations are taken into account, as well as the relationships between these parameters. One of the most traditionally studied relationships is between the biomass of the population and its recruitment capacity. This relationship describes how the number of spawning adults (stock) influences the number of new individuals (recruits) that join the population. Reference points help ensure that this relationship remains healthy and sustainable. These reference points are quantitative thresholds used in fisheries management to assess the state of a fish population and guide management decisions used to make a judgment about the conservation status of a stock. This study focuses on reviewing the behavior of this relationship in a controlled simulation environment, as well as the impact or effect that this behavior has on the reference points.

Índice general

Agradecimientos	7
Resumen	8
Índice general	11
Índice de cuadros	13
Índice de figuras	14
1. Introducción	17
1.1. Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC)	17
1.2. Marco y contexto del proyecto	19
1.3. Objetivos del proyecto	23
2. Metodología	24
2.1. Modelo Stock-Reclutamiento	25
2.2. Parametrizaciones de los modelos de Ricker y Beverton-Holt	26
2.2.1. Reclutamiento de Beverton-Holt	26
2.2.2. Reclutamiento de Ricker	27
2.2.3. Estudio del comportamiento de las curvas de stock-reclutamiento	29
2.3. Puntos de referencia biológicos	32
2.3.1. El concepto ecológico de equilibrio	32
2.3.2. Biomasa y los cálculos de los puntos de rendimiento por recluta	34
2.3.3. Rendimiento, reclutamiento y biomasa en equilibrio	37
2.3.4. Cálculo de los puntos de referencia biológicos	38
2.4. Simulaciones y puntos de referencia	40
2.4.1. Metodologías para la simulación	40
2.4.2. Metodologías para la evaluación de la convergencia	45
2.4.3. Software empleado	45

3. Resultados	49
3.1. Comprensión de la relación entre la curva SR y los puntos de referencia	49
3.1.1. Ajuste mediante el modelo de Beverton-Holt	50
3.1.2. Ajuste mediante el modelo de Ricker	52
3.2. Impacto de la variabilidad en la SR sobre los puntos de referencia . .	55
3.2.1. Análisis de convergencia	55
3.3. Análisis de los puntos de referencia bajo variabilidad en las series temporales	57
3.3.1. Modelo de Beverton-Holt	57
3.3.2. Modelo de Ricker	59
3.4. Efecto de los diferentes cv y el tamaño de las series temporales, sobre la estimación de los puntos de referencia	60
4. Discusión y conclusiones	64
A. Apéndice A	71
A.1. Convergencia de los puntos de referencia. Modelo de Beverton - Holt.	71
B. Apéndice B	84
B.1. Convergencia de los puntos de referencia. Modelo de Ricker.	84

Índice de cuadros

2.1. Tabla resumen de los puntos de referencia empleados en este trabajo .	39
3.1. Escenarios seleccionados de simulación	57
3.2. Resultados de los modelos Ricker y Beverton-Holt para diferentes coeficientes de variación (cv).	61
3.3. Resultados de los modelos Ricker y Beverton-Holt para diferentes coeficientes de variación (cv).	62
3.4. Divisiones de los valores de los cv de la serie larga entre los de la serie corta para comparar el efecto de la reducción de la serie temporal en los parámetros y puntos de referencia.	63

Índice de figuras

1.1. Centros del Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC) en territorio Español	18
2.1. Relación de Stock Reclutamiento de Beverton Holt y Ricker para los datos de stock de merluza sur.	28
2.2. Análisis del efecto de a en la relación de stock-reclutamiento de Beverton-Holt	29
2.3. Análisis del efecto de b en la relación de stock-reclutamiento de Beverton-Holt	30
2.4. Análisis del efecto de a en la relación de stock-reclutamiento de Ricker	31
2.5. Análisis del efecto de b en la relación de stock-reclutamiento de Ricker	32
2.6. Esquema de la relación entre los ajustes SR y los valores de rendimiento por recluta	35
2.7. Mapa de las zonas ICES en las que se evaluó el estado del stock de merluza sur. Obtenido de Comisión Europea	40
2.8. Distribución log-normal	44
3.1. Comportamiento de los puntos de referencia al modificar los valores del parámetro a . Ajuste mediante Beverton-Holt	51
3.2. Comportamiento de los puntos de referencia al modificar los valores del parámetro b . Ajuste mediante Beverton-Holt	52
3.3. Comportamiento de los puntos de referencia al modificar los valores del parámetro a . Ajuste mediante Ricker	53
3.4. Comportamiento de los puntos de referencia al modificar los valores del parámetro b . Ajuste mediante Ricker	54
3.5. Series de Reclutamiento con el modelo de Beverton-Holt	57
3.6. Series de SSB con el modelo de Beverton-Holt	58
3.7. Series de Reclutamiento con el modelo de Ricker	59
3.8. Series de SSB con el modelo de Ricker	59

A.1. Convergencia de SSB_{msy} ajustados con el modelo de Beverton - Holt, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones	71
A.2. Convergencia de F_{msy} ajustados con el modelo de Beverton - Holt, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones	72
A.3. Convergencia de F_{crash} ajustados con el modelo de Beverton - Holt, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones	73
A.4. Convergencia de SSB_{virgen} ajustados con el modelo de Beverton - Holt, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones	74
A.5. Convergencia de MSY ajustados con el modelo de Beverton - Holt, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones	75
A.6. Convergencia de SSB_{msy} ajustados con el modelo de Beverton - Holt, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones. Serie Corta: 1994-2022	76
A.7. Convergencia de F_{msy} ajustados con el modelo de Beverton - Holt, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones. Serie Corta: 1994-2022	77
A.8. Convergencia de F_{crash} ajustados con el modelo de Beverton - Holt, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones. Serie Corta: 1994-2022	78
A.9. Convergencia de SSB_{virgen} ajustados con el modelo de Beverton - Holt, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones. Serie Corta: 1994-2022	79
A.10. Convergencia de MSY ajustados con el modelo de Beverton - Holt, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones. Serie Corta: 1994-2022	80
A.11. Resumen serie corta SSB y REC. $CV = 0,2$	81
A.12. Resumen serie corta SSB y REC. $CV = 0,4$	82
A.13. Resumen serie corta SSB y REC. $CV = 0,6$	83
B.1. Convergencia de SSB_{msy} ajustados con el modelo de Ricker, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones	84
B.2. Convergencia de F_{msy} ajustados con el modelo de Ricker, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones	85
B.3. Convergencia de F_{crash} ajustados con el modelo de Ricker, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones	86
B.4. Convergencia de SSB_{virgen} ajustados con el modelo de Ricker, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones	87
B.5. Convergencia de MSY ajustados con el modelo de Ricker, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones	88
B.6. Convergencia de SSB_{msy} ajustados con el modelo de Ricker, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones. Serie Corta: 1994-2022	89
B.7. Convergencia de F_{msy} ajustados con el modelo de Ricker, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones. Serie Corta: 1994-2022	90

B.8. Convergencia de F_{crash} ajustados con el modelo de Ricker, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones. Serie Corta: 1994-2022	91
B.9. Convergencia de SSB_{virgen} ajustados con el modelo de Ricker, $CV =$ $0,6$ y 2500 iteraciones. Serie Corta: 1994-2022	92
B.10. Convergencia de MSY ajustados con el modelo de Ricker, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones. Serie Corta: 1994-2022	93
B.11. Resumen serie corta SSB y REC. $CV = 0,2$	94
B.12. Resumen serie corta SSB y REC. $CV = 0,4$	95
B.13. Resumen serie corta SSB y REC. $CV = 0,6$	96

1. Introducción

En esta sección se explican los detalles referentes al centro donde se realizaron las prácticas que permitieron la realización de este trabajo así como una contextualización del marco de trabajo, una breve introducción a la evaluación pesquera y una referencia a los diferentes objetivos que se pretenden alcanzar con el mismo.

1.1. Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC)

El presente trabajo ha sido realizado bajo la supervisión del personal del Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC) mediante un convenio de prácticas. El Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC), es una institución de investigación marina con una destacada trayectoria en el estudio de los ecosistemas marinos en todo el área de interés de la flota pesquera española. Esta institución se ha convertido en un pilar fundamental para la comprensión de los procesos oceanográficos y la gestión de los recursos pesqueros en el panorama nacional e internacional.

El trabajo realizado en el Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC), está dividido en diferentes áreas de interés, destacando entre ellas: Área de acuicultura, área de medio marino y protección ambiental y por último el área de pesquería. Esta última, se ocupa de labores como la evaluación de recursos pesqueros en el área del ICES (del inglés “International Council for the Exploration of the Sea”), la evaluación de recursos pesqueros en el Mediterráneo, la evaluación de recursos pesqueros del Atlántico centro-oriental, la evaluación de pesquerías de túnidos y afines y la prospección y evaluación de recursos pesqueros en aguas lejanas.

De los diferentes centros pertenecientes al Instituto Español de Oceanografía repartidos por todo el territorio nacional (véase figura 1.1), las prácticas asociadas a este trabajo de fin de máster fueron realizadas en el Centro Oceanográfico de Vigo. Este centro se encuentra ubicado estratégicamente en la costa noroeste de España, una región rica en biodiversidad marina y con una fuerte tradición pesquera. La proximidad del Centro Oceanográfico de Vigo a importantes áreas de pesca y a la plataforma continental lo convierte en un centro de investigación clave para el

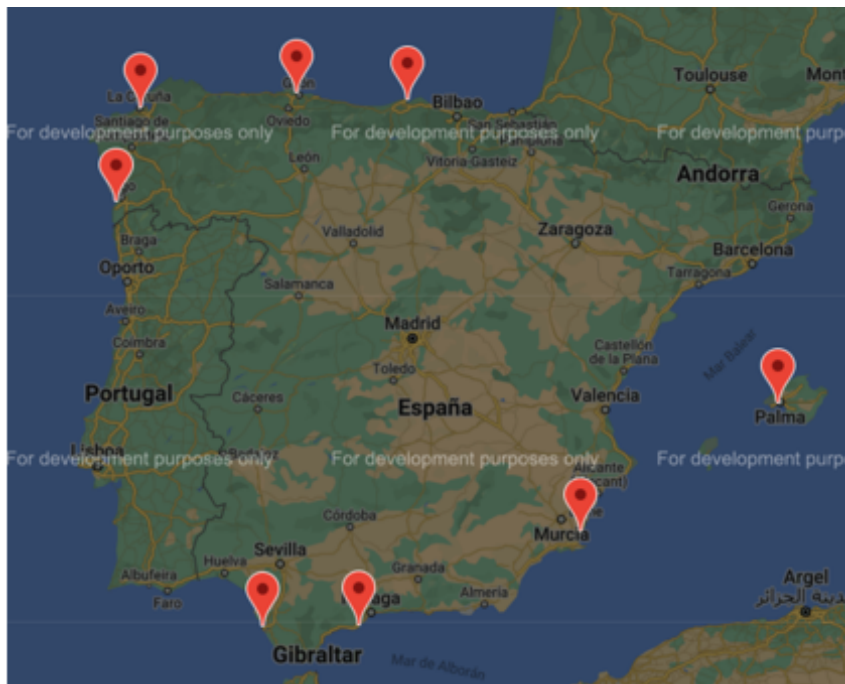


Figura 1.1: Centros del Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC) en territorio Español

estudio de la ecología de las poblaciones de peces explotadas en aguas atlánticas europeas (zona ICES) y su impacto en la economía, tanto a nivel regional como estatal.

A lo largo de su historia, el Centro Oceanográfico de Vigo ha llevado a cabo investigaciones en diversas áreas, incluyendo oceanografía física, biología marina, acuicultura, ecología y la evaluación de recursos pesqueros. Estas investigaciones han proporcionado datos valiosos para la toma de decisiones en la gestión pesquera y la conservación de los ecosistemas marinos.

El centro participa activamente en proyectos de investigación nacionales e internacionales, colaborando con otras instituciones científicas y organismos gubernamentales para abordar cuestiones cruciales relacionadas con la sostenibilidad de las pesquerías y la preservación del medio marino.

El Centro Oceanográfico de Vigo se convierte en un aliado esencial para la obtención de datos y la comprensión de los sistemas de evaluación de la explotación pesquera. Su experiencia y compromiso en la investigación marina son fundamentales para la implementación de las diferentes medidas de gestión pesquera a emplear y de la correcta evaluación de la situación actual de este ámbito. Este trabajo de fin de máster se desarrolla en el marco de la labor del Centro Oceanográfico de Vigo y de los integrantes del grupo de investigación METMAR (Métodos en Ecología y Evaluación de Recursos Marinos Vivos) en su búsqueda de soluciones para una

gestión sostenible de los recursos pesqueros.

1.2. Marco y contexto del proyecto

La gestión sostenible de los recursos pesqueros es un desafío fundamental en la preservación de los ecosistemas marinos y en la garantía de la seguridad alimentaria a nivel global. La explotación de poblaciones de peces es una práctica que requiere una evaluación rigurosa y continua para asegurar que las tasas de pesca sean sostenibles a largo plazo, es decir, que se pueda continuar la pesca sin diezmar a las diferentes poblaciones de interés, de tal forma que todo el proceso sea lo más sostenible en el tiempo posible. En lo referente a la tarea de evaluación en este contexto, es importante destacar que por evaluación entendemos la ciencia de la recolección de datos, su análisis y su modelado que proporciona la base para la gestión prudente y sostenible de los recursos pesqueros. Para esta labor, se emplean de manera habitual los modelos de evaluación pesquera. Estos modelos, son modelos matemáticos que se utilizan para explicar las dinámicas poblacionales de las especies de interés y su comportamiento bajo presión pesquera. Para referirse a la parte de la población objeto de la presión pesquera, recurrimos al concepto de “stock”. Un stock pesquero se refiere a una población de peces de una especie o grupo de especies que habita una área geográfica específica y se gestiona como una unidad única para propósitos de conservación y explotación. Este concepto incluye la idea de que el stock es una subpoblación distinta con características biológicas, ecológicas y geográficas particulares que lo diferencian de otros stocks de la misma especie (Beverton, 1957). Dependiendo tanto de las características de los datos utilizados como de la disponibilidad de los mismos podemos diferenciar estos modelos en tres categorías principales que veremos a continuación.

Cuando los datos son escasos, los modelos denominados *data poor* (pobres en datos) entran en juego. Se basan en información limitada, como registros históricos de capturas y datos básicos sobre la población de peces. Son más simples y menos precisos que los modelos que tienen más datos disponibles, a menudo dependiendo de supuestos simplificados sobre el comportamiento de las poblaciones de peces y otras variables relacionadas. Dentro de esta categoría podemos mencionar los métodos basados en información de tallas de la captura, métodos basados sólo en datos de capturas y métodos basados serie temporal de capturas y una serie temporal que proporcione información de biomasa relativa, como por ejemplo, las capturas por unidad de esfuerzo (CPUE) (ICES,2015). Se entiende por esfuerzo pesquero a la cantidad de recursos destinados a la obtención de un rendimiento a través de la

actividad pesquera. Acorde a ello el Taller del Consejo Internacional para la Exploración del Mar (ICES) sobre “Desarrollo de Metodologías de Evaluación Cuantitativa basadas en Características de Historia de Vida, Características de Explotación y otros Parámetros Relevantes para Poblaciones con Datos Limitados” (WKLIFE V), ICES (2015), identificó y discutió tres categorías de enfoques para datos limitados: (i) métodos basados en longitud del pez, (ii) métodos basados solo en datos de capturas y (iii) capturas y CPUE, u otros métodos basados en índices de biomasa independientes de la pesquería. (Cousido-Rocha et al., 2022). Esta última categoría se conoce como modelos de producción excedentaria y en algunos casos se clasifican como modelos de datos moderados en lugar de modelos pobres en datos. Pueden integrar una variedad más amplia de información, como datos de captura, características biológicas de la población de peces y factores ambientales. Son más complejos que las categorías anteriores de modelos *data poor* y tienden a proporcionar estimaciones más precisas sobre la salud de las poblaciones de peces y las tendencias de captura. Requieren métodos estadísticos más sofisticados para manejar la diversidad de datos y estimar parámetros desconocidos. Los modelos más representativos de este grupo son los modelos de producción excedentaria (SPMs), que emplean dos fuentes de información, las capturas y un índice de biomasa relativa. Por último, los modelos conocidos como *data rich* se emplean cuando disponemos de más información como por ejemplo la estructura de edad, el tamaño de la población de peces y datos ambientales detallados. Estos modelos son los más complejos, ya que utilizan una gran cantidad de información permitiéndoles describir la dinámica poblacional con menos asunciones estrictas que en los modelos más simples. Estos modelos requieren de un análisis estadístico aún más avanzado, y a menudo, tienen asociado el uso de software específico con metodologías más complejas a su disposición, y por lo general, una alta demanda computacional.

Los modelos de evaluación *data rich* integran una serie de procesos biológicos fundamentales para comprender el comportamiento de las poblaciones de peces. Entre estos procesos se encuentran la mortalidad natural, la mortalidad por pesca, la selectividad, el crecimiento y el reclutamiento. La mortalidad natural y por pesca son clave para estimar la supervivencia de los peces en su entorno natural y el impacto de la actividad pesquera.

La mortalidad indica el ratio o tasa en la que el número de individuos disminuye en una población debido a la muerte de estos, pudiendo esta ser debida a diferentes efectos. La mortalidad natural engloba aquellos procesos en los que fallecen los individuos por causas naturales como por ejemplo la edad, la predación o la escasez de recursos debida a la competencia intra e interespecífica. Por otro lado, la mortalidad

ligada a la pesca, recoge todos aquellos eventos en los que un individuo muere debido al efecto de la actividad pesquera propiamente dicha (Beverton y Holt, 1959).

La selectividad en la pesca se refiere a la probabilidad con la que se capturan peces de diferentes tamaños o características y nos permite comprender cómo ciertos artes de pesca afectan a la estructura de las poblaciones de peces y a la sostenibilidad de estas poblaciones (W. E. Ricker, 1940).

El crecimiento de los peces, se refiere al aumento del tamaño de los individuos del stock a lo largo del tiempo y contribuye al aumento de la biomasa de la población.

El reclutamiento en el contexto de recursos marinos se refiere al proceso mediante el cual los individuos jóvenes o larvas de una especie marina ingresan a una población adulta, contribuyendo así al tamaño y la estructura de la población (Hilborn R., 1992). El reclutamiento es uno de los procesos principales que define el futuro tamaño de las poblaciones y depende de factores ambientales y de la biomasa de individuos reproductores que normalmente se llama cómo SSB (SSB, por sus siglas en inglés "Spawning Stock Biomass"), definida como la cantidad total de peces adultos en una población que están en edad de reproducirse. La relación stock-reclutamiento (SR) es el proceso fundamental para explicar la capacidad reproductiva de una población y su resistencia a la explotación, y dada la gran incertidumbre asociada a este proceso, ha sido uno de los principales objetos de investigación en la ciencia pesquera. El concepto de la relación SR es esencial para prever la cantidad futura de individuos adultos y evaluar su capacidad reproductiva.

Este conjunto de procesos seleccionados, brinda una base sólida para los modelos de evaluación de pesquerías, permitiendo así tomar decisiones informadas sobre la gestión y conservación de los recursos pesqueros.

Como evaluar directamente la biomasa de una población es sumamente complicado debido a que es imposible "observar" directamente la cantidad de individuos real de una población en el medio natural, los modelos de evaluación más complejos nos permiten estimar la biomasa del stock así como la relación entre esta y los reclutas generados por dicha biomasa.

Dada la significativa influencia del reclutamiento en las dinámicas poblacionales de los peces, hay diferentes modelos matemáticos que relacionan la biomasa reproductora y el reclutamiento. La SSB proporciona una medida clave para comprender la salud reproductiva de una población de peces y su capacidad para sostener futuras generaciones.

Los modelos de evaluación de pesquerías, nos brindan estimaciones esenciales como la tasa de mortalidad por pesca (F) y la biomasa reproductora (SSB), aspectos fundamentales para comprender la salud de una población de peces y orientar las

decisiones de gestión. Cuando la tasa de mortalidad por pesca provoca una pérdida paulatina de la SSB se da una situación de “sobrepesca”. El término “sobrepesca” se aborda comúnmente en dos contextos: la sobrepesca por crecimiento y la sobrepesca por reclutamiento. La sobrepesca por crecimiento ocurre cuando un stock se pesca tan intensamente que la mayoría de los individuos son capturados a un tamaño relativamente pequeño, lo que plantea un problema en términos de rendimiento. Se centra en equilibrar las pérdidas de stock debido a la mortalidad total con las ganancias derivadas del crecimiento individual, con el fin de determinar el tamaño y la edad óptimos para iniciar la explotación de la especie. La sobrepesca por crecimiento ocurre cuando los peces son capturados antes de alcanzar este tamaño óptimo. Este tipo de sobrepesca no es la más grave de las dos, pero si sucede de manera sostenida en el tiempo puede dar lugar a la sobrepesca por reclutamiento. Este segundo tipo, ocurre cuando un stock se pesca tan intensamente que el tamaño del stock reproductor se reduce por debajo del nivel en el cual la población no puede producir suficientes nuevos reclutas para reemplazar a aquellos que mueren, ya sea de forma natural u otra. Esto suele ser precursor del colapso pesquero. Uno de los objetivos de la ciencia pesquera, consiste en detectar a tiempo la sobrepesca por reclutamiento antes de que esta suceda.

Para determinar si una tasa de mortalidad por pesca es alta o baja, o si una biomasa reproductora es saludable o no, necesitamos un serie de indicadores también conocidos como puntos de referencia (BRP, del inglés “Biological Reference Points”) que se definen como parámetros utilizados para comparar el estado actual de una población pesquera con un estado deseable (o no deseable). En base a ello tenemos dos categorías principales: los puntos de referencia objetivo y los puntos de referencia límite o umbral. Los puntos objetivo representan metas que deseamos alcanzar, como el Rendimiento Máximo Sostenible (*MSY*, por sus siglas en inglés “Maximum sustainable yield”), que es el nivel de captura que maximiza la producción sostenible de una población. Por otro lado, los puntos de referencia límite, son umbrales críticos que, si se superan, indican un riesgo inminente para la salud del stock y la necesidad de tomar medidas de conservación. Para evitar que la probabilidad de alcanzar dichos límites sea baja, se recurre a los puntos de referencia precautorios, los cuáles actúan como amortiguadores que nos permiten tomar medidas a tiempo cuando nos acercamos a los puntos de referencia límite. A medida que este trabajo avance, iremos mencionando y explicando algunos puntos de referencia que nos aportan información de interés acerca de los resultados obtenidos mediante los modelos de evaluación pesquera.

1.3. Objetivos del proyecto

El objetivo principal de este trabajo es examinar el impacto de la incertidumbre en la relación entre la biomasa reproductora (SSB) y el reclutamiento, y como la incertidumbre en esta relación afecta a la determinación de los puntos de referencia en la gestión pesquera. Para ello, se presentarán diferentes modelos de la relación stock-reclutamiento (SR) y se analizarán sus parámetros, así como su influencia en la definición de diversos puntos de referencia de interés. Es decir, se llevará a cabo un análisis en el cual se mostrará el impacto de la variabilidad de los parámetros de la relación stock-reclutamiento, y por ende en la curva SR, sobre la estimación de los puntos de referencia. Para realizar dicho análisis simularemos series de SSB y reclutamiento, controlando el grado de variabilidad de este último los parámetros de la simulación, y a continuación ajustaremos distintos modelos o relaciones SR con el objetivo de mostrar como el ruido/incertidumbre en dichas series se traslada a la estimación de la curva SR y como finalmente la incertidumbre mencionada impacta en los puntos de referencia.

La contribución clave de este estudio es la utilización de simulaciones como medio para diagnosticar y poner a prueba estos modelos en escenarios de incertidumbre. Las simulaciones brindan la oportunidad de evaluar el rendimiento de los modelos en condiciones variables controladas, lo que resulta esencial para tomar decisiones informadas en la gestión de recursos pesqueros y la conservación de los ecosistemas marinos.

En los siguientes capítulos, se abordarán en detalle los aspectos técnicos y metodológicos de esta investigación, profundizando en la implementación de simulaciones y la comparación entre las distintas parametrizaciones clásicas de las relaciones SR. Además, se presentarán los resultados obtenidos y se discutirán sus implicaciones en la gestión sostenible de recursos pesqueros.

2. Metodología

En este capítulo comenzaremos profundizando en el modelado de la relación entre reclutas y biomasa reproductora exponiendo las formulaciones matemáticas más empleadas para este objetivo, Ricker (W. E. Ricker, 1975) y Beverton y Holt (Beverton y Holt, 1959). Además de presentar dichas formulaciones proporcionaremos una explicación intuitiva del papel de cada uno de los parámetros de las mismas. Tras ello, ahondaremos en el concepto de puntos de referencia, definiendo en concreto aquellos que se abordarán en este trabajo, y como la buena estimación de los mismos depende de la calidad del ajuste de la relación stock-reclutamiento. Finalmente, expondremos, desde el marco de trabajo de la simulación, las metodologías empleadas para introducir variabilidad en forma de ruido en los valores de reclutamiento, con la intención de analizar como la incertidumbre en estas cantidades impacta en el ajuste de la relación SR y en que medida esto se traslada a los puntos de referencia.

Para el mencionado estudio, se realizaron los ajustes empleando las herramientas del proyecto FLRuniverse que se describirán en posteriores apartados. Además para los ejercicios recogidos en este trabajo, se emplearon los datos de el stock de merluza sur, “The European hake (*Merluccius merluccius*) stock in the International Council 100 for the Exploration of the Sea (ICES) divisions 27.8.c and 27.9.a.”. La información de reclutamiento y SSB para este stock viene de Stock Synthesis (SS) assessment model (Methot Jr y Wetzel, 2013). SS es un modelo *data rich* de los más complejos, es decir, aquellos que como se mencionó en apartados anteriores de este trabajo, integran varias fuentes de datos al mismo tiempo, capturas, índices de biomasa relativa, distribuciones de tallas, etc.

Como se ha mencionado en el capítulo anterior, definimos reclutamiento como la capacidad que tiene una población para producir nuevos individuos que se incorporen a la población y la hagan sostenible. Para entender correctamente esta definición es preciso tener en cuenta, que en lo que se refiere a las poblaciones de peces una cohorte hace referencia al conjunto de individuos de una misma especie y aproximadamente la misma edad que forman parte de una misma población. Es importante mencionar la importancia que supone que dicha cohorte debe alcanzar el primer año

de edad siendo individuos viables, debido a que en las etapas más tempranas del desarrollo de los peces (huevos, larvas y juveniles) es cuando nos encontramos las etapas más susceptibles de incurrir en un evento de mortalidad natural. Este fenómeno ha sido ampliamente estudiado a lo largo del siglo XX y existen publicaciones que ya lo mencionan desde principios del siglo pasado, como por ejemplo Hjort, 1914. Si tenemos en cuenta, como ya se ha mencionado, que el stock hace referencia a la biomasa de una población susceptible de ser capturada mientras tiene lugar la actividad pesquera el siguiente paso lógico es estudiar que clase de relación existe entre la cantidad de individuos con capacidad de reproducción (individuos reproductores) pertenecientes a una misma especie de producir individuos viables que alcancen una edad viable y por lo tanto se incorporen a la población, formando en un futuro, con mayor o menor probabilidad parte de la cantidad de individuos reproductores de una población que perpetúen la existencia de la misma. Esta relación se conoce como la ya mencionada relación stock-reclutamiento (SR), y a día de hoy ha sido ampliamente estudiada por un considerable número de autores.

2.1. Modelo Stock-Reclutamiento

Previamente se menciona la casuística sobre las altas tasas de mortalidad incurridas durante las fases más tempranas del desarrollo de los peces.

Cushing, 1988 ofrece una amplia visión de las fuentes de mortalidad de huevos y larvas, junto con ejemplos ilustrativos y una bibliografía sobre los procesos biológicos relacionados con las relaciones de reclutamiento de stock. Al igual que con otros procesos fundamentales de producción, existe una extensa literatura que explora la biología de las relaciones de stock reclutamiento y sus modificadores.

Se han identificado una variedad de influencias, tanto biológicas como físicas, que afectan el resultado del reclutamiento. Aunque no se abordan detalles biológicos de especies reales, es importante destacar que la relación entre el tamaño del stock y el reclutamiento resultante es no determinista, y puede involucrar diversas formas de retroalimentación. Se han propuesto diversas descripciones matemáticas de las relaciones de reclutamiento de stock, pero nos enfocaremos en las formuladas por Beverton y Holt, y Ricker, aunque otras, como la de Deriso-Schnute (Deriso, 1980), también son relevantes.

Ricker (W. E. Ricker, 1975) identificó cuatro propiedades deseables de las relaciones de reclutamiento de stock que debemos tener en cuenta a la hora de validar la relación de stock-reclutamiento en cualquier caso de estudio:

- La curva de reclutamiento de stock debe pasar por el origen, lo que implica

que cuando el tamaño del stock es cero, no debería haber reclutamiento. Esto asume que las observaciones se relacionan con el stock total y que no hay un “reclutamiento” compuesto por inmigrantes.

- El reclutamiento no debería disminuir a cero en densidades de stock altas. Es decir el reclutamiento debería ser lo suficientemente alto como para reemplazar las pérdidas provocadas por mortalidad natural.
- La tasa de reclutamiento (reclutas por progenitor) debería disminuir continuamente con aumentos en el stock parental.
- El reclutamiento debería superar al stock parental en algún punto del rango de tamaños de stock parental posibles.

Hilborn R., 1992 sugirieron otras dos propiedades generales asociadas con buenas relaciones de reclutamiento de stock:

- La curva de stock-reclutamiento debería ser continua, sin cambios bruscos ante pequeños cambios en el tamaño del stock. Se refieren a la continuidad, de manera que el reclutamiento promedio debería variar de forma suave con el tamaño del stock, haciendo alusión a la tercera condición mencionada en W. E. Ricker, 1975.
- La curva de stock-reclutamiento debería ser constante a lo largo del tiempo. Esta es una suposición de estacionariedad, donde la relación no cambia significativamente a lo largo del tiempo. Aunque esta suposición parece probable que falle en sistemas donde el ecosistema, del cual la población explotada es parte, cambia notablemente, puede manejarse dentro de modelos utilizando bloques de tiempo de parámetros Wayte, 2013.

2.2. Parametrizaciones de los modelos de Ricker y Beverton-Holt

2.2.1. Reclutamiento de Beverton-Holt

La curva de stock-reclutamiento propuesta por (Beverton y Holt, 1959) ha sido históricamente valiosa debido a su interpretación simple y la posibilidad de derivarla a partir de primeros principios. También fue importante que fuera matemáticamente manejable, ya que en ese momento solo se utilizaban métodos analíticos. Aunque su uso continuado parece deberse en gran medida a la inercia y la tradición, es

importante tener en cuenta que tratando la curva de Beverton-Holt simplemente como una descripción matemática, cualquier curva con las propiedades mencionadas anteriormente podría ser utilizada. A menudo se habla del “modelo de reclutamiento de stock Beverton-Holt”, y aunque existe más de una formulación matemática para este modelo, en este proyecto se emplea la expuesta a continuación:

$$R_y = \frac{aB_y}{b + B_y}$$

donde R_y es el reclutamiento en el año y , B_y es la biomasa reproductora en el año y , y donde a y b son los parámetros del modelo de Beverton-Holt, siendo a el que representa el reclutamiento máximo asintótico y b es el valor del stock al cuál se alcanza la mitad de valor de reclutamiento asintótico a .

2.2.2. Reclutamiento de Ricker

Una alternativa a la curva de Beverton-Holt fue sugerida por Ricker en W. E. Ricker, 1954 y W. Ricker, 1958, y aunque esta también tiene más de una parametrización, la utilizada en este proyecto es:

$$R_y = aB_y e^{-bB_y}$$

donde R_y es el reclutamiento a partir de B_y , el stock reproductor, en el año y . Es importante destacar que los parámetros a y b son muy diferentes de los de la ecuación de Beverton-Holt. El parámetro a representa la tasa máxima de reproducción de la población. Es un factor de escalamiento que determina el valor máximo que puede alcanzar R_y cuando la biomasa B_y es baja. En otras palabras, a indica cuántos descendientes por unidad de biomasa pueden producirse en ausencia de efectos de densidad dependientes. Por otro lado, el parámetro b representa la tasa a la que la reproducción disminuye con el aumento de la biomasa B_y . El término e^{-bB_y} refleja una disminución exponencial en la reproducción debido a la competencia intraespecífica o a otros factores densodependientes. En términos simples, b controla como de rápido disminuye la reproducción a medida que aumenta la biomasa de la población. La comparación gráfica entre ambas explicaciones de la relación stock-reclutamiento puede verse en la figura propuesta más adelante (véase Figura 2.1). En esta gráfica pueden verse los ajustes de las relaciones de stock-reclutamiento para los datos del stock de merluza sur (mencionados al comienzo de este capítulo) y observar de manera intuitiva una diferencia clave: La diferencia existente en como la curva SR del modelo de Ricker cae tras alcanzar su punto máximo en comparación con el modelo de Beverton-Holt. Esta última diferencia es debida a que el modelo de

Ricker tiene un efecto densodependiente sobrecompensatorio a diferencia del modelo de Beverton-Holt (Aalto y Baskett, 2016).



Figura 2.1: Relación de Stock Reclutamiento de Beverton Holt y Ricker para los datos de stock de merluza sur.

2.2.3. Estudio del comportamiento de las curvas de stock-reclutamiento

La influencia de los parámetros a y b en las parametrizaciones de Beverton Holt y Ricker desempeñan un papel crucial en el comportamiento de estas curvas de stock-reclutamiento. Tanto a como b son determinantes para la precisión y la capacidad predictiva de los modelos de dinámica de poblaciones, ya que afectan directamente al crecimiento y la reproducción de las poblaciones bajo estudio.

Se llevó a cabo un análisis del comportamiento de estas curvas para evaluar cómo varían las funciones de reclutamiento de Beverton Holt y Ricker ante cambios en los valores de a y b . Este análisis se realizó aumentando y reduciendo cada parámetro hasta un 30 %, en intervalos del 10 %, con respecto a los valores base obtenidos ajustando los datos de merluza sur descritos previamente.

Como podemos observar en la Figura 2.2 al modificar el parámetro a , observamos que tiene un efecto directo sobre el punto en el que se encuentra la asíntota a la que tiende la función reclutamiento.

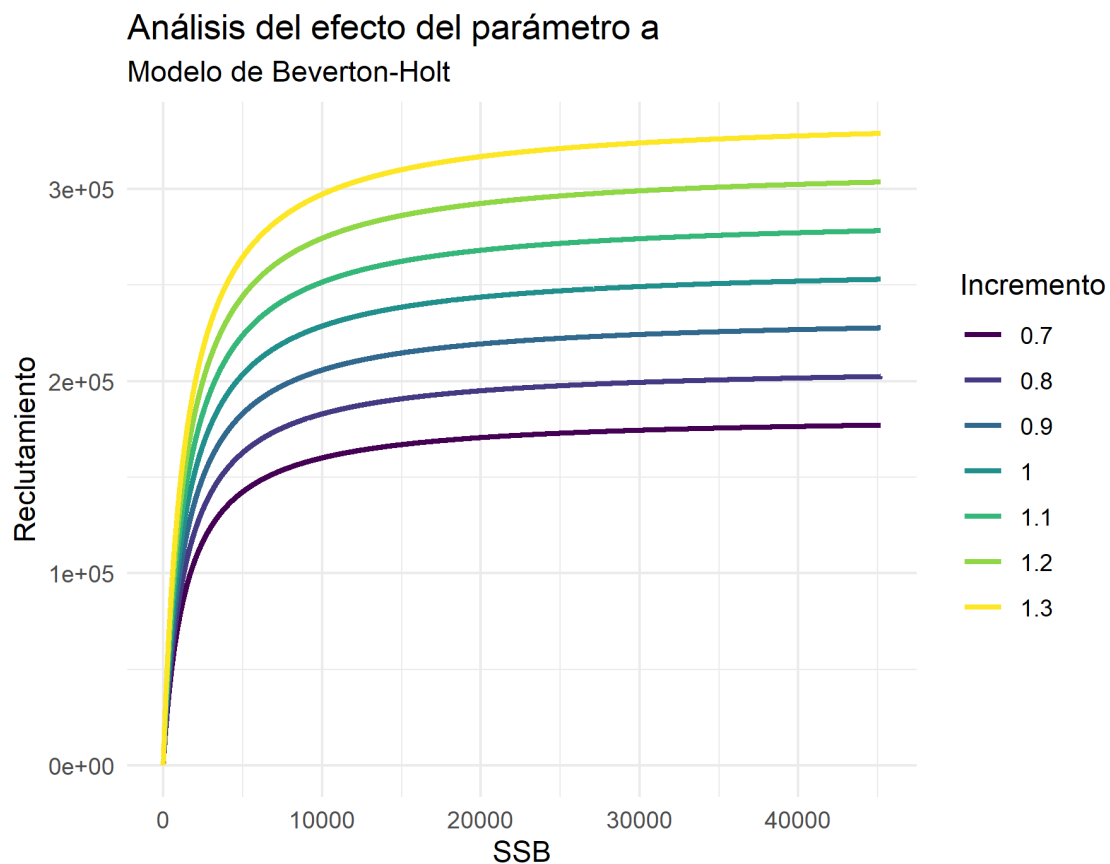


Figura 2.2: Análisis del efecto de a en la relación de stock-reclutamiento de Beverton-Holt

Sin embargo al modificar el parámetro b modifica el comportamiento de la pendiente en el origen como se puede observar en la Figura 2.3 mientras que apenas se observa una modificación sobre el valor en el que se alcanza la asíntota del reclutamiento.

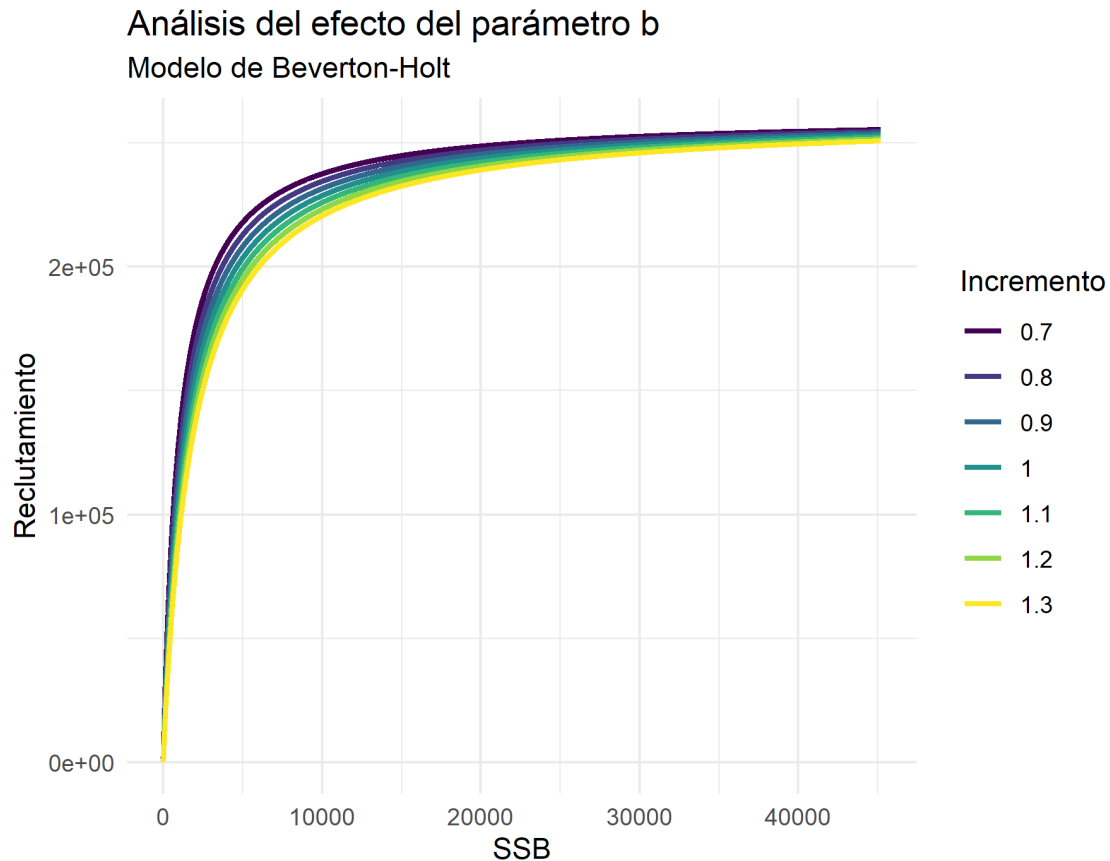


Figura 2.3: Análisis del efecto de b en la relación de stock-reclutamiento de Beverton-Holt

Por otro lado, si observamos los resultados obtenidos a partir del análisis de comportamiento de las curvas de reclutamiento obtenido mediante el modelo de Ricker, lo primero que llama la atención al observar los resultados es que a diferencia del modelo de Beverton - Holt, la función de stock-reclutamiento, no alcanza una asíntota. Lo que se observa es que la función alcanza un punto de reclutamiento máximo, tras el cuál, la función comienza a decrecer paulatinamente.

Si observamos el efecto del parámetro a (véase Figura 2.4 observamos que ahora el parámetro a si afecta a la pendiente en el origen, de manera similar a lo que sucedía con b en el modelo de Beverton-Holt. Además se puede llegar a suponer que si prolongáramos el tamaño del stock, todas las funciones observadas en la Figura 2.4 tenderían a 0 en el reclutamiento. Además el valor para la biomasa del stock en

el que se alcanza el máximo reclutamiento no se ve afectado por la modificación del parámetro a .

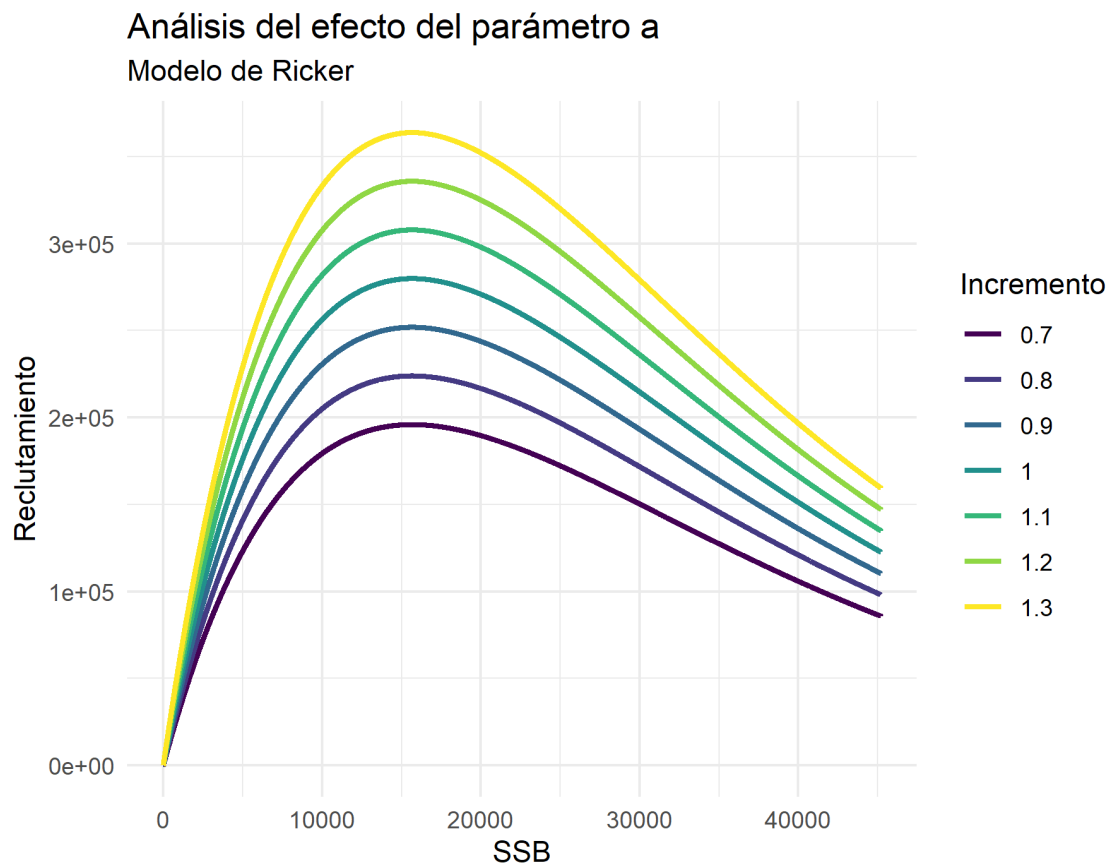


Figura 2.4: Análisis del efecto de a en la relación de stock-reclutamiento de Ricker

Por otro lado, al analizar los resultados obtenidos por el análisis del efecto del parámetro b lo que se observa es que varía es la amplitud de las funciones representadas alcanzando el reclutamiento valores mayores a medida que b disminuye. Esto parece modificar el valor de la SSB en el que se alcanza el reclutamiento máximo, así como el valor para la biomasa en el que (si prolongáramos los tamaños de stock) el reclutamiento tiende a cero (véase Figura 2.5).

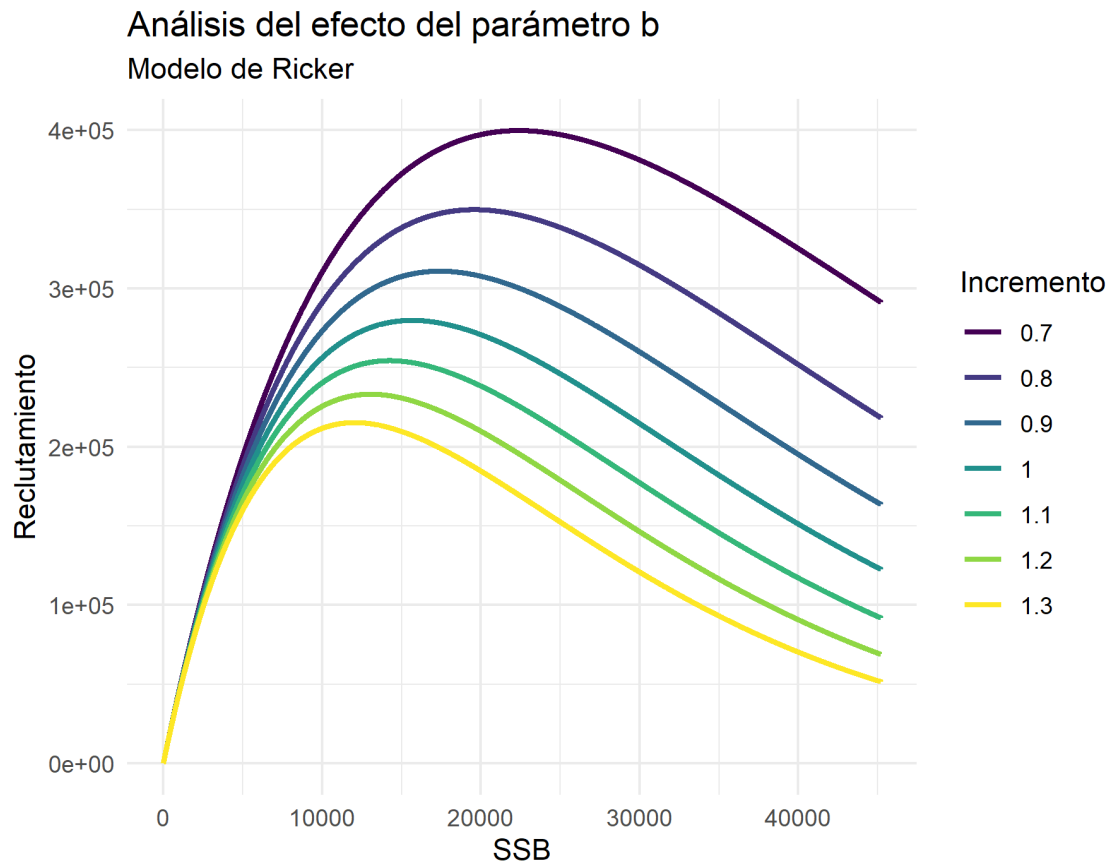


Figura 2.5: Análisis del efecto de b en la relación de stock-reclutamiento de Ricker

2.3. Puntos de referencia biológicos

En esta sección se trata una introducción al concepto de equilibrio en una población explotada desde un punto de vista biológico y como se puede expresar de manera matemática. Se trata también la relación entre la biomasa de un stock y los rendimientos obtenidos por recluta, así como su importancia a la hora de determinar el reclutamiento en las diversas clases de edad. Por último se introducen los puntos de referencia y se facilita una explicación de como obtener los valores asociados a los mismos.

2.3.1. El concepto ecológico de equilibrio

El equilibrio en una población, por definición, se da cuando la tasa de cambio del tamaño de población con respecto al tiempo es cero. Es decir, siendo N el número de individuos de una población y t el tiempo, se cumple que $dN/dt = 0$. Esto puede alcanzarse en dos situaciones. El caso trivial es cuando $N = 0$, es decir, la población está extinta (ya que, sin inmigración, en todos los momentos subsiguientes N será

igual a 0). El caso biológicamente más interesante es cuando la tasa de natalidad es exactamente igual a la tasa de mortalidad y ambas son positivas. Este concepto es de especial interés en el ámbito de la gestión pesquera debido a que si tenemos en cuenta el segundo caso, es decir una población no extinta con natalidad y mortalidad positivas, el hecho de que la población esté en equilibrio asegura en mayor medida un estado de buena salud ecológica para dicha población (Kilduff et al., 2009).

Si las tasas de natalidad y mortalidad permanecen constantes pero hay una perturbación en el tamaño de la población (posiblemente inmigración o emigración), se producirá un nuevo tamaño de población en equilibrio. El punto clave es que la población no regresa a su equilibrio anterior. En equilibrio, $N_{t+1} = N_t$, por lo que no puede haber cambio en el número de individuos desde el tiempo t hasta el tiempo $t+1$. Por otro lado, queda claro que puede haber un equilibrio inestable en cualquier tamaño de población siempre y cuando los nacimientos sean iguales a las muertes. Cuando no están en equilibrio, las poblaciones aumentarán hasta el infinito o se contraerán hacia la extinción a una velocidad que depende de cuán diferentes sean los nacimientos de las muertes (Haddon, 2011).

En contraposición debemos tener en cuenta los diferentes parámetros que implican una pérdida de stock. Factores como la emigración de individuos y la mortalidad total (Z) son los más importantes, pudiéndose dividir este último en dos subtipos, la mortalidad natural (M) y la mortalidad asociada a la presión pesquera (F). Entendemos por mortalidad natural el conjunto de todas aquellas causas que provocan la muerte de los individuos debido a causas biológicas o ecosistémicas (muerte natural por edad, efectos de depredación, escasez de recursos, enfermedad, etc), excluyendo aquellas causas ligadas a la acción pesquera sobre la población de estudio F .

El efecto de la presión pesquera sobre un stock es de especial interés ya que es el único de los factores implicados en el equilibrio general de una población que podemos ajustar mediante la toma de decisiones relacionadas con dicha gestión. Mediante políticas de gestión, instauración de cupos y gestión de tallas y cohortes entre otros, podemos seleccionar en que medida se ejerce presión ligada a la actividad pesquera sobre un stock determinado. Si consideramos de nuevo una población en estado de equilibrio y se ejerce una determinada presión pesquera, la población de estudio de la que se deriva el stock objetivo no sólo estará sometida a un evento de mortalidad natural M , si no también al efecto de una mortalidad ligada a dicha acción F , por lo que el tamaño de dicha población tenderá a descender o no, dependiendo de si el conjunto de ambas mortalidades Z se compensa o no con el crecimiento. En una situación donde una población se encuentra en un estado ecosistémico favorable y sin limitaciones tanto espaciales como de recursos, se puede deducir que la ten-

dencia predominante en dicha población será la de crecimiento. Si se introduce un cierto nivel de presión pesquera sobre dicha población, se supone de manera lógica que existe la posibilidad de ejercer de manera controlada un determinado nivel de presión que permita a dicha población alcanzar un equilibrio al mismo tiempo que obtenemos un rendimiento obtenido de la propia actividad sin provocar el declive de dicha población. Esta situación en la que se obtiene un rendimiento sin provocar una tendencia de declive en la población se conoce como explotación sostenible.

Como se mencionó brevemente en la introducción de este proyecto, para evaluar esta clase de situaciones se recurre en términos de gestión, a una serie de puntos de referencia que nos permiten evaluar el estado de una población bajo unas determinadas condiciones de presión o esfuerzo pesquero. Los previamente mencionados puntos de referencia biológicos (BRP, del inglés *biological reference points*) cuando tenemos en cuenta el concepto de equilibrio y queremos evaluar el estado de un stock se define por la "Food and Agriculture Organization of the United Nations" (FAO, 1997) como:

Un punto de referencia es un valor estimado derivado de un procedimiento científico acordado y/o de un modelo acordado que corresponde a un estado del recurso y/o de la pesquería y que puede ser utilizado como guía para la gestión pesquera. Algunos puntos de referencia son generales y aplicables a muchos stocks pesqueros, mientras que otros deben ser específicos para cada stock. Se debe hacer una distinción entre los puntos de referencia objetivo y los puntos de referencia límite, o umbrales, siendo estos últimos los que representan estados bajos del stock que deben ser evitados (FAO, 1997).

2.3.2. Biomasa y los cálculos de los puntos de rendimiento por recluta

Para comprender e interpretar la información que nos proporcionan los puntos de referencia, es importante comprender como se calculan los mismos. Hart et al., 2002 remarca la importancia de tener estimaciones de alta calidad de las nuevas clases de edad que se incorporan como edades de reclutamiento.

Como ya se ha abordado en apartados anteriores, ya sabemos como se ajusta la relación SR permitiéndonos (siempre y cuando tengamos en cuenta algunas consideraciones sobre las simplificaciones que conlleva este ajuste) obtener los reclutas obtenidos para la primera clase de edad (reclutamiento). Sin embargo, es difícil conocer esta relación en sentido inverso, es decir, que capacidad tienen estos nuevos



Figura 2.6: Esquema de la relación entre los ajustes SR y los valores de rendimiento por recluta

reclutas (sujetos a efectos de competencia intra e interespecífica, presión pesquera, etc.) para producir individuos adultos, maduros y sexualmente viables y por tanto evaluar la continuidad de la población (véase Figura 2.6).

Para obtener este valor, se recurre los cálculos del tipo rendimiento por recluta YPR y BPR (YPR, del inglés *Yield-Per-Recruit*. BPR, del inglés *Biomass-Per-Recruit*). El método propuesto tradicionalmente para calcular estos valores computaba un rendimiento en las capturas y biomasa a largo plazo mediante la introducción de un valor constante de reclutamiento en una de las proyecciones a corto plazo (por ejemplo la proyección del reclutamiento del primer o segundo año) y proyectándola hasta que los resultados se estabilizan alcanzando como ya se mencionó antes un punto de equilibrio dinámico. Este método, aunque simple, resulta bastante útil cuando están presentes efectos denso-dependientes como las relaciones SR o cuando el crecimiento denso-dependiente está implicado. La principal desventaja de esta aproximación es la dificultad práctica de organizar y mostrar los resultados para un amplio rango de mortalidades por pesca y por lo tanto actualmente se recurre a menudo a software especializado para alcanzar dicho fin. Este software a día de hoy emplea el método de suma de productos discreta ya tratado por varios autores como Hilborn R., 1992, W. E. Ricker, 1975 entre otros.

El método considera las contribuciones al rendimiento de las capturas y la biomasa para cada grupo de edad y cada año a medida que pasan en la pesquería. De esta manera, podemos estudiar la relación entre cada recluta que entra en la población y biomasa (B en este caso) o capturas ($Yield$) que genera a largo plazo (en equilibrio). Por tanto el YPR cuantificaría el rendimiento en equilibrio (a largo plazo) para cada F , y BPR cuantifica la biomasa en equilibrio para cada F . El pseudocódigo que ejemplificaría el algoritmo para realizar los cálculos de YPR y BPR consiste en:

```

Para cada F (desde 0 hasta F alta)
-Inicializar: (N = 1, YPR= 0, BPR= 0)
-Para cada edad (a)
•Z(a) = F(a) + M(a)
•BPR = BPR + N(a)*peso(a)*madurez(a)
•YPR = YPR + N(a) *F(a)*peso(a)*promedio[Z(a)]
•N = N*exp[-Z(a)]
-Próxima edad (a)
•Next F
•End

```

En primer lugar se inicializa el algoritmo creando los huecos para rellenar partiendo de un individuo del que no tenemos YPR ni BPR. Para cada edad se calcula la mortalidad total, basándonos en la suma de la mortalidad por pesca y la mortalidad natural para la edad correspondiente. Calculamos la biomasa por recluta a partir de la BPR de la edad anterior (en la primera iteración es 0) y mediante el producto del número de individuos por su peso y la madurez, obteniendo entonces la BPR para esta clase de edad. A continuación se calcula el rendimiento por recluta. Partiendo del valor YPR de la edad anterior se calcula sumando este al producto del número de individuos por la mortalidad por pesca F el peso para esta clase de edad y el promedio de la mortalidad total para esta clase de edad. Se almacenan los valores de BPR e YPR y se itera a la siguiente edad y al nuevo valor de F . Esto se repite hasta completar las iteraciones para todos los valores de F asociados y todas las edades.

Estos cálculos son relativamente sencillos, pues requieren de una estimación de la mortalidad natural M para la obtención de Z y de una curva de crecimiento. A partir de estos resultados y considerando que ya hemos obtenido los valores por recluta, si tenemos en cuenta N podemos hacernos una idea de cuál será el reclutamiento de la población y la composición de la población adulta para esa clase de edad y año, cerrando así el ciclo de cálculos por recluta.

2.3.3. Rendimiento, reclutamiento y biomasa en equilibrio

El conocimiento del reclutamiento nos permite conocer pues las condiciones absolutas de equilibrio, en lugar de las condiciones relativas (por recluta). Es decir, en primer lugar se calcula el reclutamiento en equilibrio para cada relación SR, y posteriormente se combinan con los cálculos de YPR y BPR.

Para calcular el reclutamiento en equilibrio para una determinada F con la relación de Beverton-Holt se usa:

1. Ecuaciones:

$$R = a * B / (b + B)$$

$$BPR = B / R ;$$

2. Sustituimos B en ecuación 1

$$B = BPR * R$$

$$R = a * BPR * R / (b + (BPR * R))$$

3. Se elimina R a ambos lados

$$1 = a * BPR / (b + (BPR * R))$$

4. Despejamos la R que queda:

$$b + (BPR * R) = a * BPR$$

$$BPR * R = (a * BPR) - b$$

$$Req = a - (b / BPR)$$

Y para calcular el reclutamiento en equilibrio para una determinada F con la relación de Ricker se usa:

1. Ecuaciones:

$$R = a * B * \exp(-b * B)$$

$$BPR = B / R ; \quad B = SPR * R$$

2. Sustituimos B en ecuación 1

$$R = a * BPR * R * \exp(-b * BPR * R)$$

Se elimina R a ambos lados

$$1 = a * BPR * \exp(-b * BPR * R)$$

4. Despejamos la R que queda:

$$b * BPR * R = \ln (a * BPR)$$

$$Req = \ln (a * BPR) / (b * BPR)$$

De esta manera, y para cerrar el ciclo lo que se hace para cada valor de F es:

Para cada valor de F

1. Calcular YPR y BPR

2. Calcular R

$$\text{Si Ricker: } R = \ln(a * SPR) / (b * SPR)$$

$$\text{Si Bev-Holt: } R = a - (b / SPR)$$

3. Calcular $B = R * BPR$

4. Calcular $Y = R * YPR$

Siguiente F

Y obteniendo así reclutamiento, el rendimiento en equilibrio y la biomasa en equilibrio.

2.3.4. Cálculo de los puntos de referencia biológicos

Si se busca el valor máximo para el valor de rendimiento, se obtiene entonces el Rendimiento Máximo Sostenible (MSY). El MSY , o Rendimiento Máximo Sostenible, representa el nivel óptimo de captura que maximiza el rendimiento pesquero sin poner en riesgo la capacidad de regeneración de la población, es decir, sin provocar una tendencia de crecimiento negativo en la misma que la lleve al declive. En teoría, el MSY logra un equilibrio entre la producción de rendimiento y la preservación a largo plazo de la población, teniendo en cuenta las variaciones naturales en la misma. La SSB o B (en equilibrio) en el punto de Rendimiento Máximo Sostenible da lugar B_{MSY} (o SSB_{MSY}) y la Tasa de Explotación en el punto de Rendimiento Máximo Sostenible (F_{MSY}).

Los puntos de Crash y Virgen, están vinculados a la F y a la SSB respectivamente, siendo F_{crash} la tasa de explotación pesquera en la que se produce el colapso de la población, y SSB_{virgen} la biomasa del stock existente si no existiese ningún efecto antropogénico de presión pesquera sobre la misma. Esto es lógico ya que no tiene sentido buscar la F que hay si el stock es virgen ya que por definición que el stock sea virgen implica que no está bajo ninguna presión pesquera. Por otro lado no tiene sentido buscar la biomasa en el colapso ya que esta lógicamente es 0.

Así pues, los puntos de referencia BRP se utilizan en gestión pesquera para evaluar el estado de un stock y establecer los límites para una explotación sostenible.

Los puntos de referencia aquí mencionados son fundamentales en términos de gestión, ya que proporcionan una base científica para establecer políticas de manejo que promuevan la conservación de los recursos marinos y la sostenibilidad de las actividades pesqueras. A continuación se resume en una tabla los distintos puntos de referencia de interés que son empleados en este trabajo. (véase Cuadro 2.1).

Terminología	Descripción
B_{MSY}	La biomasa promedio a largo plazo que se lograría si se pesca a una tasa constante de mortalidad por pesca igual a F_{MSY} .
F_{MSY}	La tasa de mortalidad por pesca que resultará en que la biomasa de la población produzca el máximo rendimiento a lo largo del tiempo o el peso de la cosecha dentro de un año.
F_{crash}	Indica el punto del estado en el que una población pesquera sufre un colapso repentino debido a la sobreexplotación.
SSB_{virgen}	Indica el punto del estado de una población antes de cualquier impacto humano, sirviendo como referencia de su salud y productividad potencial.
MSY	Indica el nivel óptimo de captura que maximiza el rendimiento pesquero sin poner en riesgo la capacidad de regeneración de la población, es decir, sin provocar una tendencia de crecimiento negativo en la misma que la lleve al declive.

Cuadro 2.1: Tabla resumen de los puntos de referencia empleados en este trabajo

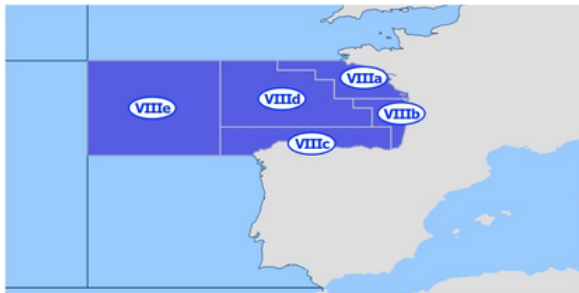
2.4. Simulaciones y puntos de referencia

2.4.1. Metodologías para la simulación

Para la realización de los ejercicios de simulación realizados en este trabajo y como ya se mencionó al inicio de este capítulo, el caso de estudio es el del stock de merluza sur, ubicado en la divisiones 27.8.c y 27.9.a de ICES (véase Figura 2.7).

Subzona 27.8

Golfo de Vizcaya (Subzona VIII)



División 27.8.a

Golfo de Vizcaya norte (División VIII a)

División 27.8.b

Golfo de Vizcaya centro (División VIII b)

División 27.8.c

Golfo de Vizcaya sur (División VIII c)

División 27.8.d

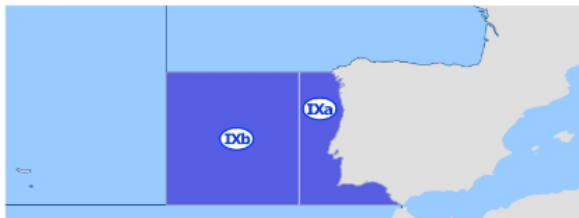
Golfo de Vizcaya - mar adentro (División VIII d)

División 27.8.e

Oeste del golfo de Vizcaya (División VIII e)

Subzona 27.9

Aguas portuguesas (Subzona IX)



División 27.9.a

Aguas portuguesas - este (División IX a)

División 27.9.b

Aguas portuguesas - oeste (División IX b)

Figura 2.7: Mapa de las zonas ICES en las que se evaluó el estado del stock de merluza sur. Obtenido de [Comisión Europea](#)

Las estimaciones de reclutamiento y SSB para este stock se derivan del modelo de evaluación de Stock Synthesis (SS) (Methot Jr y Wetzel, 2013) que es el que se emplea en ICES en la gestión de la merluza en las divisiones 8.c y 9.a. SS es un modelo complejo de datos ricos, es decir, aquellos que como se mencionó en apartados anteriores de este trabajo, integran varias fuentes de datos al mismo tiempo, capturas, índices de biomasa relativa, distribuciones de tallas, etc. Estos datos están disponibles en una estructura de tipo stock proporcionada por las herramientas de software y librerías (como las de FLRuniverse) que serán explicadas en posteriores secciones de este capítulo. Esta estructura de tipo stock, permite disponer de los datos de manera ordenada en forma de objeto con diferentes dimensiones o slots. Este objeto (y como su propio nombre indica) almacena la información pertinente y necesaria sobre las características y variables referentes al stock. La información recogida en las dimensiones de las que disponemos son los años, la edad, la unidad, el área, y la iteración. Estas dimensiones permiten estructurar los datos referentes a este stock como son: Las capturas, los descartes pesqueros, las capturas descargadas en puerto, la biomasa (SSB), la madurez y la mortalidad por pesca F entre algunas otras derivadas de estas. Uno de los principales objetivos de la simulación es crear series temporales de reclutamiento con variabilidad controlada para así ajustar sobre ellas las relaciones SR, mediante los modelos de Beverton-Holt y Ricker, y ver como este ruido que tienen las series impacta en los BRP. Para alcanzar este objetivo, se parte de los datos mencionados y se simulan valores de SSB y reclutamiento R para cada iteración que utilicemos (cuyo número óptimo será determinado en secciones posteriores). Para conseguirlo, partimos de los valores referentes a la dinámica poblacional del primer año del que tenemos estimas para el stock de merluza (1982): N individuos por edad del año 1, madurez, crecimiento, mortalidad natural, etc. Para construir la población hacia adelante, población que antes ya teníamos disponible, pero que decidimos reconstruir para en dicha reconstrucción introducir ruido en el reclutamiento y que esto nos permita obtener las iteraciones que deseamos de las series de SSB y R . Se almacenan los valores de F de todo el conjunto de años del stock, y a continuación se proyectan los datos de SSB y reclutamiento R introduciendo una variabilidad en forma de residuos en los valores de reclutamiento, los cuales son errores multiplicativos de media 1. Esta característica cobrará importancia más adelante y sentará las bases para seleccionar una distribución adecuada para simular dichos errores.

El primer paso es construir la matriz de número de individuos por edad y año que tenemos a continuación (donde las filas denotan las edades y las columnas los años).

$$\begin{pmatrix} N_{01} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & N_{1Y} \\ \cdots & N_{12} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & N_{23} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \cdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \ddots & \cdots & \vdots \\ N_{A1} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & N_{A,Y} \end{pmatrix}$$

La primera columna de dicha matriz se establece igual a la información derivada del modelo SS, y a partir de esa columna se crean las siguientes introduciendo variabilidad en el reclutamiento. La segunda columna se crea a partir de la primera empleando la relación (Ecuación 2.1) donde la mortalidad por pesca será igual a la mortalidad por pesca estimada por el modelo de evaluación SS con el objetivo de replicar la misma presión pesquera que se a estimado en el modelo de evaluación para la merluza.

$$N_{ij} = N_{i-1,j-1}e^{-Z_{i-1,j-1}} \quad (2.1)$$

Siendo N el número de individuos, i las diferentes edades siendo A la edad máxima, y j los diferentes años para los que tenemos datos del stock siendo Y el número total de años. Recordamos que Z es la mortalidad total y que está compuesta por la suma de M mortalidad natural (obtenida del primer año) y F mortalidad por pesca que toma los valores estimados por el modelo de evaluación SS.

Con esta ecuación cubrimos el vector de número de individuos por edad para todas las edades menos para la edad 0, la cual se obtiene del siguiente modo. Multiplicando el número de individuos desde la edad 1 en adelante por su peso y madurez obtenemos la biomasa reproductora, es decir, la SSB (la madurez de la edad 0 es 0 por eso no influye en la obtención de la SSB). Una vez que tenemos la SSB, la SR nos determina el reclutamiento asociado a dicha SSB, es decir, obtenemos el número de individuos en la edad 0. Posteriormente, como se detalla más adelante incluimos ruido en el reclutamiento a través de errores log-normales con media 1. Para los siguientes años la forma de proceder para seguir completando la matriz de número de individuos por edad, por consiguiente generando las series de reclutamiento y

SSB, es análoga a la descrita para el año 2.

Como mencionamos, ya que el reclutamiento puede variar de un año a otro debido a factores ambientales, genéticos y otros, es útil introducir variabilidad en el reclutamiento a través de errores o residuos asociados. Esto significa que el reclutamiento no será un valor fijo, sino que tendrá una distribución de probabilidad que refleje la incertidumbre y la variabilidad observada en la naturaleza.

Para introducir la variabilidad mencionada en los residuos se recurre al uso de la distribución log-normal (véase Ecuación 2.2).

$$f(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln(x) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.2)$$

Para calcular la varianza (ecuación 2.3), μ (ecuación 2.4), σ (ecuación 2.5) a partir del coeficiente de variación seleccionado se emplean los siguientes cálculos:

$$v = (cv \cdot m)^2 \quad (2.3)$$

$$\mu = \log\left(\frac{m^2}{\sqrt{m^2 + v}}\right) \quad (2.4)$$

$$\sigma = \sqrt{\log\left(\frac{v}{m^2} + 1\right)} \quad (2.5)$$

De esta manera podemos conectar los parámetros de una variable normal con una que siga una distribución log-normal que es la que tiene el comportamiento que nos interesa. Se realizan transformaciones log-normales debido a que los datos biológicos y pesqueros suelen exhibir una distribución asimétrica positiva, donde los valores extremadamente grandes son menos probables que los valores más pequeños. Esto se debe a limitaciones físicas y biológicas en el crecimiento y reproducción de las poblaciones. Muchos modelos y relaciones en la biología pesquera se expresan naturalmente en escala logarítmica. Por ejemplo, el crecimiento exponencial de una población puede ser más fácil de manejar y modelar cuando se transforma a escala logarítmica (Prince et al., 2015). La distribución log-normal emerge frecuentemente como adecuada cuando los errores de medición o las variaciones naturales se distribuyen de manera logarítmica, además resulta extremadamente conveniente cuando se trata de errores multiplicativos centrados en 1 como este caso (y como ya se mencionó en la sección anterior). Esto puede ser especialmente cierto en estudios de ecología y biología pesquera donde las relaciones entre variables (como el tamaño del stock y el reclutamiento) pueden estar influidas por múltiples factores de manera no lineal. Si lo vemos de otro modo, tiene sentido, ya que aunque los valores de reclu-

tamiento pueden variar de manera muy agresiva de un año para otro, por lo general lo habitual es observar una mayor cantidad de resultados pequeños, que ver grandes saltos a valores grandes, por lo que la distribución log-normal se presenta como una distribución adecuada para modelar el error asociado a los valores de reclutamiento (véase Figura 2.8).

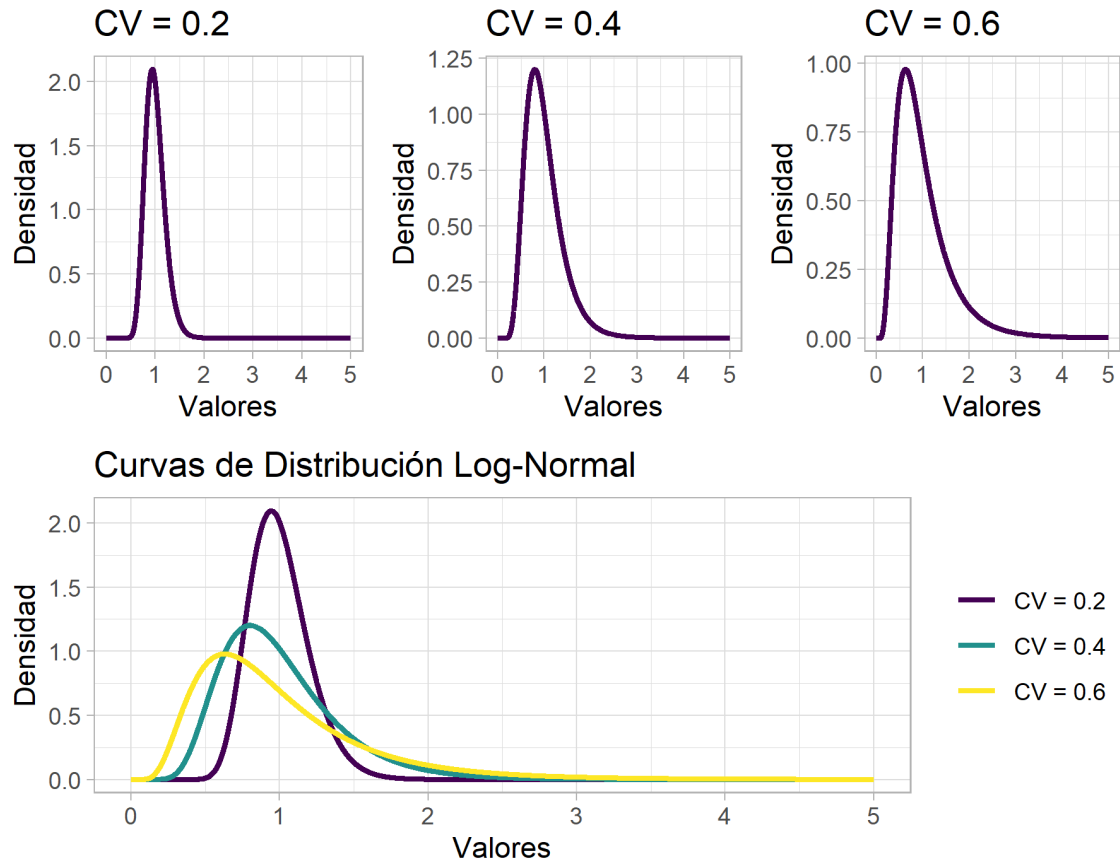


Figura 2.8: Distribución log-normal

2.4.2. Metodologías para la evaluación de la convergencia

Como uno de los objetivos de estas simulaciones es ver el impacto que las relaciones SR tienen sobre los puntos de referencia, es de vital importancia determinar el número de iteraciones óptimo, que nos permita alcanzar la convergencia para cada uno de los valores descriptivos propuestos en cada uno de los puntos de referencia utilizados. Las medidas descriptivas empleadas en el análisis de convergencia son: La media, la mediana, los cuantiles 0,95 y 0,05, la desviación típica sd y el coeficiente de variación empleado cv . Estas medidas se calculan desde la primera iteración hasta la última para cada agrupación del total de iteraciones correspondiente dependiendo de las iteraciones disponibles para el número de iteración en el que se encuentre el algoritmo en un momento concreto. En base a ello se observa en que momento los valores de la medida se estabilizan dentro del IC de la medida en el número máximo de iteraciones. Tenemos en cuenta a efectos de analizar los resultados que se alcanza la convergencia cuando los valores obtenidos están dentro de los intervalos de confianza (IC) del 5% para el último valor obtenido de los puntos de referencia. También se presenta en los resultados un IC para el 1%, aunque más como referencia visual que como objetivo de la discusión.

Se seleccionaron simulaciones con un cv límite de 0,6 como caso más demandante en lo que a variabilidad se refiere y se comprobó el número de iteraciones óptimas a partir de ensayos realizados con 2500 iteraciones asumiendo preventivamente que se alcanzaría la convergencia con anterioridad. Los resultados obtenidos para estos ensayos pueden verse en el capítulo 3 de este mismo trabajo.

2.4.3. Software empleado

El proyecto FLR consiste en una serie de librerías y publicaciones especializadas en el desarrollo de paquetes para obtener resultados cuantitativos en el ámbito de la gestión pesquera basada en el lenguaje de programación R. Los creadores de contenido se refieren a su labor como:

“The FLR project has been developing and providing fishery scientists with a powerful and flexible platform for quantitative fisheries science based on the R statistical language. The guiding principles of FLR are openness, through community involvement and the open source ethos, flexibility, through a design that does not constraint the user to a given paradigm, and extendibility, by the provision of tools that are ready to be personalized and adapted. The main aim is to generalize the use of

good quality, open source, flexible software in all areas of quantitative fisheries research and management advice” <https://flr-project.org>

De los paquetes empleados de este conjunto destacan los siguientes: *FLCore*, *FLBRP*, *FLasher*, *ggplotFL* y *FLSRTMB*. No todas las funciones proporcionadas por estos paquetes fueron empleadas, pero las que sí lo fueron resultaron de especial importancia y fueron de gran ayuda durante la realización de este proyecto. *FLCore* proporciona las herramientas necesarias para trabajar con objetos de tipo S4 que almacenen los datos que caracterizan un stock y sus series temporales. El paquete *FLBRP* permite el cálculo de manera simplificada de los puntos de referencia. *FLasher* resultó de vital importancia para controlar los parámetros de la simulación y el error residual y la librería *ggplotFL* permite visualizaciones adecuadas para los objetos empleados por los paquetes del proyecto FLRuniverse.

Como se menciona en la subsección anterior la librería *FLCore* permite mediante una serie de simplificaciones trabajar con los datos que caracterizan al stock de manera simplificada de tal modo que los agrupa en un objeto del tipo S4 con varias dimensiones. La primera hace referencia a los datos referentes a los años y las edades disponibles y lo almacena a su vez dentro de un tipo de objeto especial *FLQuant* de 6 “slots” o huecos en los que se almacena la información para la edad, los años, unidad, temporada o cohorte, el área, y las iteraciones. Otra dimensión contiene el rango referente a los años de la dimensión anterior y por último está el modelo junto con los parámetros pertinentes: a , b , SSB y reclutamiento (R). Este modelo a su vez es almacenado en un objeto propio del tipo denominado *FLPar*. Todo esto se queda agrupado finalmente en un objeto *FLStock* en el que se almacenaría pues toda la información de importancia para caracterizar el stock.

En lo que a la configuración de la simulación y la introducción de la variabilidad se refiere desde un punto de vista informático, en primer lugar se fija la semilla para que el generador de números aleatorios no varíe entre ejercicios y casos de simulación. A continuación se fija la media y se crea la variabilidad a partir de coeficiente de variación (el cuál modificaremos en casos futuros para observar su efecto) y se proporciona un valor para σ a partir de una distribución log-normal. Este último valor, se emplea para mediante la función *rlnoise* del paquete *FLCore* introducir “ruido” en los residuos del modelo. Una vez decidido el número de iteraciones necesarias (cuyo óptimo se seleccionará más adelante tras la evaluación de la convergencia), y seleccionada la $Fbar$, se emplea la función *fwdControl* del paquete *FLasher* para establecer los parámetros de control de la simulación. La función *propagate* permite atribuir al stock el número de iteraciones necesario y ampliarlo para contener los resultados del ajuste. Esto se consigue al quedarnos con los valores para el año 1 del

stock y su F observada e fijando el error multiplicativo con media 1, a continuación se realiza como se mencionó una transformación log-normal mediante las operaciones mostradas en el código a través del cuál se realizan estas operaciones, disponible en el [Repositorio del TFM](#).

3. Resultados

En este capítulo se recogen y comentan los resultados obtenidos para los diversos ejercicios propuestos a lo largo de este trabajo. En primer lugar se explican los resultados obtenidos a través del ejercicio sobre la comprensión de la relación entre la curva SR y los puntos de referencia, comentando el impacto que tienen las curvas, cuyo recorrido ha sido modificado, mediante la manipulación de los parámetros a y b , y como esto afecta a los puntos de referencia. En segundo lugar se muestran los resultados obtenidos para el análisis de convergencia y el número óptimo de iteraciones así como de la comparación del efecto de los diferentes cv y el tamaño de las series temporales, sobre la estimación de los puntos de referencia. En tercer lugar se muestran los análisis de los BRP bajo variabilidad en las series temporales. Todos los escenarios de las simulaciones empleadas para el análisis de convergencia y el análisis de variabilidad sobre las series temporales pueden verse resumidos en el Cuadro 3.1.

3.1. Comprensión de la relación entre la curva SR y los puntos de referencia

Se presenta a continuación un ejercicio en el que se recogen los resultados obtenidos al calcular los puntos de referencia de interés sobre las relaciones de stock reclutamiento realizadas durante la ejecución del ejercicio expuesto en la sección 2.2.3. El objetivo del mencionado ejercicio va estrechamente ligado a los resultados mostrados en la sección 2.2.3 en el sentido de que el objetivo de este nuevo ejercicio consiste en evaluar como se modifican los resultados obtenidos durante los cálculos de los puntos de referencia a medida que se modifican los parámetros a y b de la misma manera a como se ha mostrado en el ejercicio expuesto en la sección 2.2.3. Los resultados que se presentan a continuación hacen referencia a las variaciones de comportamientos obtenidos al modificar los parámetros a y b en las parametrizaciones de Beverton-Holt y Ricker, generando incrementos y disminuciones del 10 % de

dichos valores hasta alcanzar máximos y mínimos de hasta un 30%. Para mostrar estos resultados se recurre a varios paneles en los que se muestran cuatro gráficos en conjunto. En dichos paneles se muestran varias combinaciones de ejes en los que se valoran varios indicadores estrechamente ligados a la evaluación de poblaciones pesqueras. Los indicadores mencionados son: F haciendo referencia a la mortalidad por pesca, el rendimiento o *yield*, que hace referencia a las capturas y los ya mencionados SSB y reclutamiento.

Los paneles que se muestran a continuación están diseñados de manera que se muestran cuatro gráficos siguiendo un esquema de 2 filas por dos columnas en las que se representan: (i) SSB vs F , (ii) *yield* vs F , (iii) *yield* vs SSB y (iv) reclutamiento (*Recruitment*) vs SSB. Sobre las curvas mostradas en estos gráficos se representan los puntos de referencia de SSB_{virgen} , F_{crash} y MSY de esta manera se pretende reforzar las ideas establecidas durante la realización del ejercicio anterior y comprobar como afectan las modificaciones de los parámetros a y b al comportamiento de dichos puntos de referencia.

Los dos primeros paneles hacen referencia al ajuste de Beverton-Holt y a las modificaciones en el comportamiento de las curvas mediante las modificaciones de los parámetros a y b sólo en los casos más extremos de modificación mostrados en la sección 2.2.3, es decir incremento del 30% y disminución del 30%. De manera similar a continuación se muestran dos paneles más con sus respectivos gráficos, esta vez haciendo referencia a las curvas obtenidas mediante el ajuste realizado con el modelo de Ricker.

3.1.1. Ajuste mediante el modelo de Beverton-Holt

En la Figura 3.1 observamos que el punto de referencia SSB_{virgen} está en un punto mayor a medida que aumentamos el valor del parámetro a del mismo modo el punto de F_{crash} también se alcanza a F más altos. Las diferencias en el valor de rendimiento máximo sostenible también crecen de manera directamente proporcional a como lo hace el parámetro a siendo el MSY mayor a medida que aumenta dicho parámetro. Podemos razonar que a mayor valor de a tenemos un mayor valor del punto de referencia SSB_{virgen} , lo cual va acorde al papel del parámetro a el cual controla el reclutamiento máximo asintótico (como vimos en la Figura 2.2). Consecuentemente a mayor reclutamiento máximo asintótico (es decir mayor a) mayor es la biomasa virgen del stock. Del mismo modo, el hecho de que un mayor valor de a de lugar a stock más productivos también se ve reflejado en los demás puntos de referencia, en concreto vemos como SSB_{msy} y MSY toman valores mayores cuanto mayor es el valor de a . Con respecto a F_{crash} podemos observar como cuanto mayor

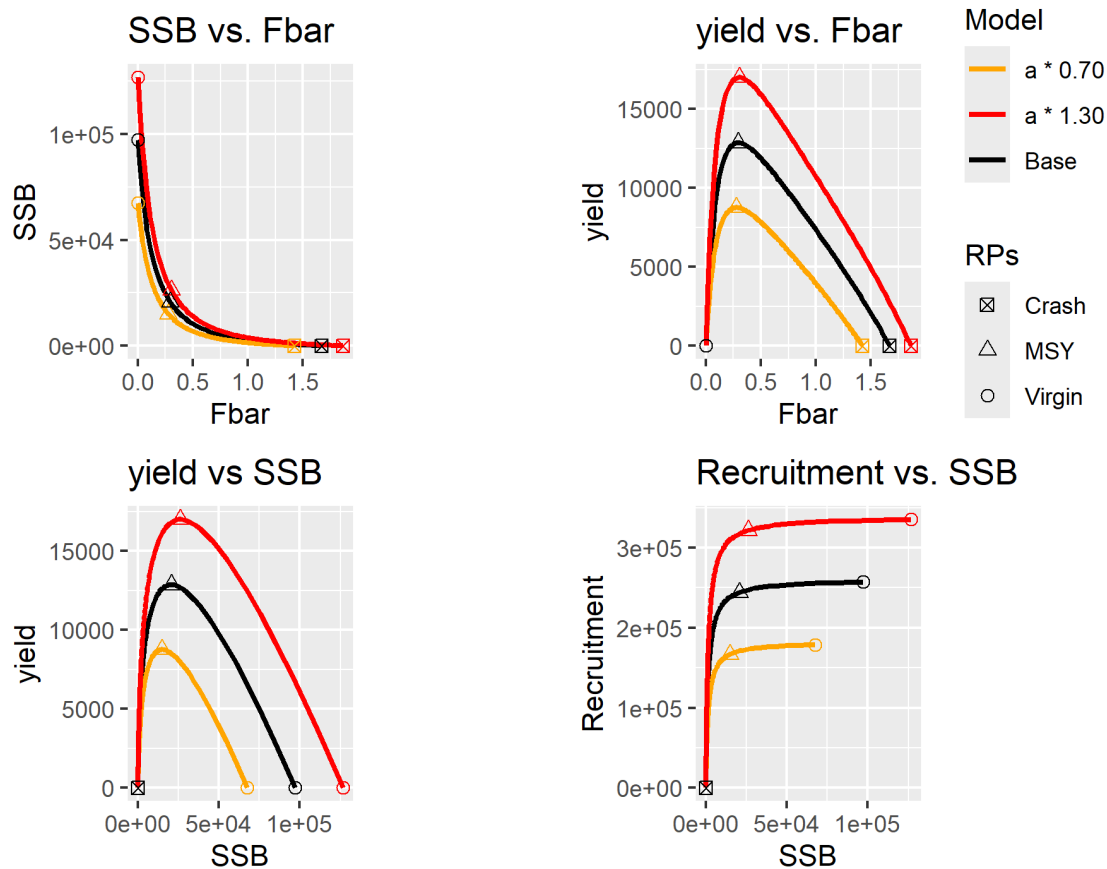


Figura 3.1: Comportamiento de los puntos de referencia al modificar los valores del parámetro a . Ajuste mediante Beverton-Holt

es a mayor es F_{crash} , lo cual significa que al tener un mayor reclutamiento máximo asintótico el stock puede soportar una mayor presión pesquera antes de colapsar. Es decir, cuantos más reclutas conseguimos con la misma SSB más presión pesquera soporta el stock antes del colapso.

En lo que respecta a los comportamientos observados al modificar el parámetro b para las curvas obtenidas con el modelo de Beverton-Holt, los resultados pueden observarse en el panel de gráficos mostrado en la Figura 3.2.

En el caso del parámetro b se observa que influye sobre la tasa de aumento del reclutamiento influyendo sobre la pendiente en el origen y el punto en el que se alcanza la mitad del reclutamiento asintótico, de tal forma que la pendiente en el origen es menor cuanto mayor es el valor de dicho parámetro. Esto da lugar valores de F_{crash} más elevados, ya que el reclutamiento se estabilizará a un nivel más bajo debido posiblemente a que la tasa de aumento del reclutamiento es menor. Vemos que se observan ligeras diferencias en los valores de MSY y SSB_{msy} (posiblemente a la poca diferencia entre las curvas observada ya en la Figura 2.3) alcanzándose cotas más elevadas a medida que disminuye el parámetro b . De modo similar el

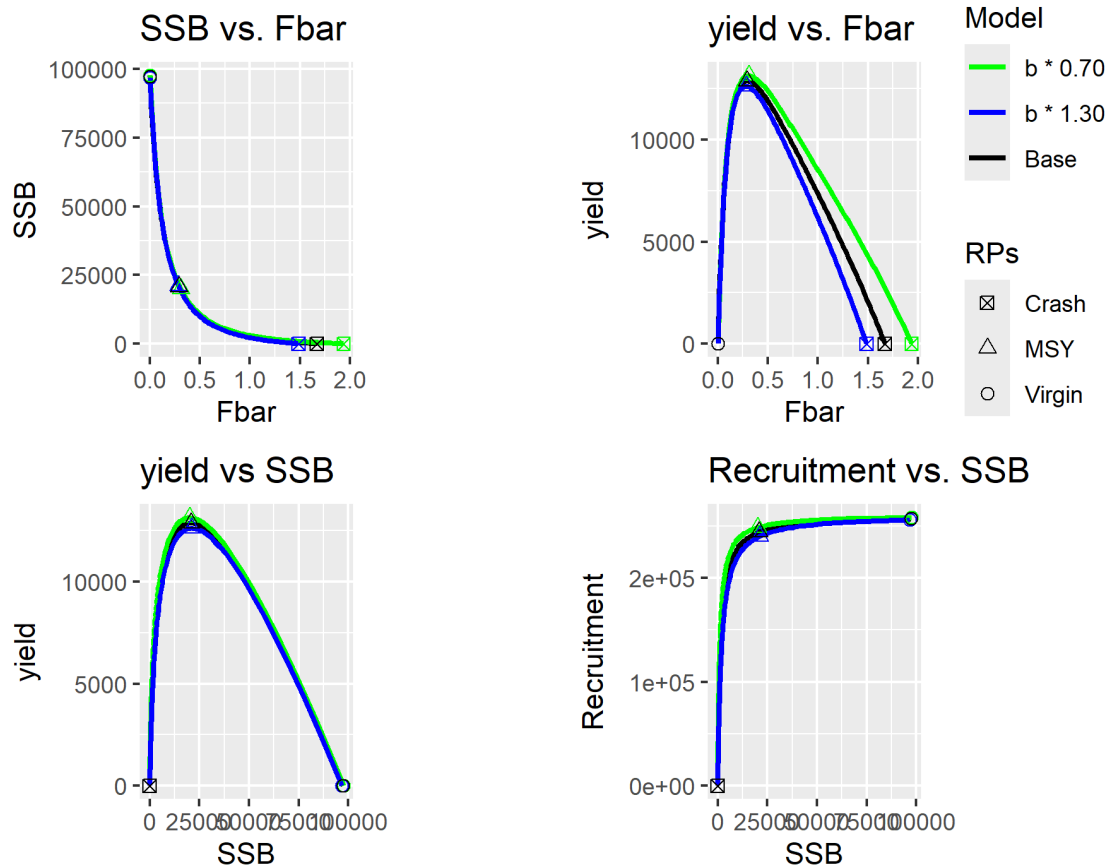


Figura 3.2: Comportamiento de los puntos de referencia al modificar los valores del parámetro b . Ajuste mediante Beverton-Holt

valor de F_{msy} será también más elevado a medida que disminuya b , ya que si la tasa de reclutamiento es menor a medida que aumenta este, tiene sentido que la presión pesquera en el punto de rendimiento máximo sostenible pueda ser más elevada. Como ya se mencionó dicho resultado puede ir ligado a que se alcancen cotas mayores de reclutamiento, lo que a su vez implica el comportamiento previamente mencionado sobre F_{crash} . No se observan diferencias sobre SSB_{virgen} ya que si el parámetro b tiene efecto sobre la pendiente en el origen, y este punto de referencia se refiere a la biomasa del stock en una situación sin presión pesquera de ningún tipo este no tendría porqué verse afectado.

3.1.2. Ajuste mediante el modelo de Ricker

En lo que respecta a los resultados obtenidos para los puntos de referencia relacionados con las curvas obtenidas al utilizar el modelo de Ricker. Aparte de las diferencias relacionadas con el comportamiento de las curvas que se mencionaron en el ejercicio anterior, los resultados para las diferencias observadas en los puntos de

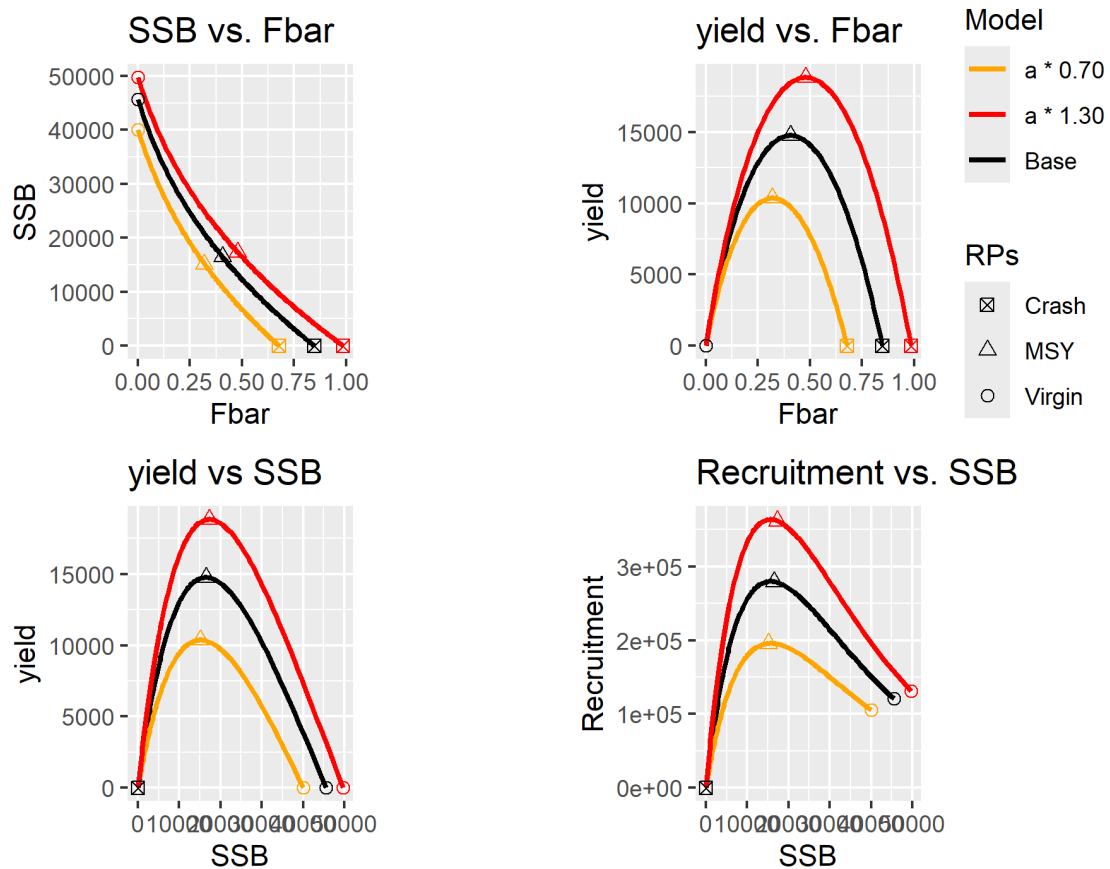


Figura 3.3: Comportamiento de los puntos de referencia al modificar los valores del parámetro a . Ajuste mediante Ricker

referencia obtenidas al modificar el valor a pueden verse en la Figura 3.3.

En base a los resultados mostrados en la Figura 3.3 y al igual que ocurría en el modelo de Beverton-Holt el parámetro a controla como de productiva es la relación SR. Si nos fijamos en F_{crash} vemos un mayor valor de F_{crash} cuanto mayor es a , la razón se debe a que a controla la productividad, y por lo tanto, un mayor valor de a lleva a SRs más productivas y por ende a stocks que pueden soportar más presión pesquera antes del colapso. SSB_{msy} y MSY son más altos para valores altos de a . También observamos por el mismo razonamiento que el reclutamiento asociado a SSB_{msy} y SSB_{virgen} es mayor cuanto mayor es a , y finalmente con respecto F_{msy} observamos que toma valores menores para valores más pequeños de a lo cual va acorde al comportamiento explicado para SSB_{msy} . Como se ha mencionado en el capítulo 2 de este trabajo, el modelo de Ricker presenta un efecto densodependiente sobrecompensatorio, posiblemente debido a que es más sensible a la competencia intraespecífica que el modelo de Beverton-Holt (Aalto y Baskett, 2016), lo cual se traslada al comportamiento observado de los puntos de referencia de interés al modificar el parámetro a .



Figura 3.4: Comportamiento de los puntos de referencia al modificar los valores del parámetro b . Ajuste mediante Ricker

En el caso de los valores observados al modificar el parámetro b con las curvas obtenidas con el modelo de Ricker, obtenemos los siguientes resultados para los puntos de referencia tal y como se muestra en la Figura 3.4.

Como ya se había mostrado en la Figura 2.5 y mencionado previamente en este documento, el modelo de Ricker presenta un efecto sobrecompensatorio densodependiente que lo hace más sensible a la hora de "capturar" los eventos de competencia intraespecífica. Es decir aquellos eventos en los que individuos de una misma especie compiten por los recursos de un mismo hábitat (territorio, alimento etc.). Dicho efecto se puede observar al compararlo con el modelo de Beverton-Holt si observamos como las curvas presentan una pronunciada pendiente descendiente tras alcanzar el punto máximo de reclutamiento. Al igual que en el modelo de Beverton-Holt el parámetro a controla la productividad de la relación SR mientras que el parámetro b en el modelo de Ricker controla el efecto densodependiente previamente discutido. En base a los resultados mostrados en la Figura 3.4 observamos que SSB_{msy} alcanza valores mayores a medida que disminuye el parámetro b . Si por efecto densodependiente entendemos la competencia que aumenta de manera directamente proporcional al

número de individuos (en este caso el número de reclutas) tiene sentido suponer que se alcancen valores más elevados de SSB_{msy} a medida que disminuye b . Dicho esto, es lógico suponer que se alcancen también valores más elevados para F_{msy} a medida que disminuye este parámetro, ya que si el efecto mencionado es menor más resiliente será la población a los efectos de la presión pesquera. Por otro lado si dicha población es más resiliente, no es descabellado suponer que el valor de SSB_{virgen} también alcanzará valores más elevados cuanto menor sea el efecto densodependiente.

3.2. Impacto de la variabilidad en la SR sobre los puntos de referencia

3.2.1. Análisis de convergencia

Para la evaluación del número óptimo de iteraciones necesarias para determinar de manera precisa los medidas descriptivas de los puntos de referencia biológicos, se llevo a cabo un análisis de convergencia para los valores de media, mediana, cuantiles 5 % y 95 %, la desviación típica sd y el coeficiente de variación cv .

Este estudio de la convergencia ayuda a determinar el número mínimo de iteraciones necesarias para que los valores obtenidos para las diferentes medidas descriptivas relacionadas con cada punto de referencia son lo suficientemente fiables como para estar dentro del rango de significación de entre el 5 y el 1 %.

En primer lugar se seleccionó un cv de 0,6, con 2500 iteraciones para la serie corta, (los escenarios para las simulaciones y el análisis de convergencia pueden verse resumidos en el Cuadro 3.1) como ejemplo de caso extremo con valores elevados para poder así evaluar y determinar el caso donde las iteraciones que se necesitarán serán máximas y así a posteriori poder estudiar el efecto de los cv de 0,2, 0,4 y 0,6 con el número óptimo de iteraciones y una semilla fijada. Este análisis ha sido llevado a cabo empleando los ajustes de ambos modelos, tanto Beverton-Holt como Ricker.

Modelo de Beverton-Holt

Como se puede observar en las figuras del apéndice A.1, la convergencia se alcanza en un número aproximado de 500 iteraciones para la media y la mediana. En el caso de los cuantiles la convergencia se alcanza entre las 500 y las 600 iteraciones (teniendo en cuenta los límites para el 5 %) y siendo recomendables 1500 para converger dentro del margen del 1 %. Para el caso de la sd y el coeficiente de variación la convergencia se alcanza aproximadamente a partir de las 1000 iteraciones para el margen del 5 % y por lo menos 1500 iteraciones para entrar en los límites del 1 %, siendo estos

últimos las medidas más inestables a la hora de converger. Los únicos puntos de referencia en los que aparentemente se necesita un mayor número de iteraciones para converger son F_{crash} y MSY que precisan aproximadamente un mínimo 2000 iteraciones a diferencia de los valores previamente mencionados, para entrar dentro de los márgenes del 1 %.

Modelo de Ricker

En las figuras presentadas en el apéndice B.1, se puede observar las iteraciones necesarias para alcanzar la convergencia para los diferentes puntos de referencia presentados sobre las curvas SR ajustadas mediante el modelo de Ricker. En este caso se observa que para las medidas de media y mediana son necesarias por lo menos 1000 iteraciones para asegurarnos con un nivel de confianza del 5 % y por lo menos 1500 para el nivel de confianza del 1 %. Para el caso de los cuantiles se aprecian casi los mismos resultados que para las medidas de media y mediana, siendo recomendables al menos 1500 iteraciones si se quiere permanecer dentro de los márgenes del 1 %. Para los casos de la sd y cv son recomendables al menos 2000 iteraciones para el margen del 5 % y se recomendaría usar las 2500 iteraciones en caso del 1 % haciéndose esto especialmente evidente para el caso de la sd y cv de F_{crash}

Conclusiones

En el caso de ambos modelos los estimadores descriptivos que más número de iteraciones requieren para alcanzar la convergencia son la sd y el coeficiente de variación (cv). Todos los resultados de este análisis para el modelo de Beverton - Holt pueden verse en el apéndice A.1 y para el modelo de Ricker en el apéndice B.1 de este trabajo incluyendo entonces el análisis de convergencia realizado sobre la serie temporal que incluye los datos para todos los años del stock (Serie Larga 1982-2022, véase tabla 3.1). Se observaron una serie de problemas para obtener buenas estimaciones de los parámetros del modelo de Beverton-Holt puede ser responsable de las diferencias en la variabilidad del ajuste, sobre todo si tenemos en cuenta que para algunos casos con cv elevados el número de iteraciones necesarias para realizar el ajuste, con un número correspondiente a las empleadas por el modelo de Ricker fué sustancialmente superior. Durante el ajuste se observó que el modelo de Beverton-Holt generaba valores no válidos (índices negativos y NAs) debido a las funciones utilizadas. Se recomienda realizar estudios a posteriori que permitan identificar las debilidades de esta aproximación y que permitan determinar métodos de cálculo que permitan resolver dichas debilidades. Esto fué motivo de sospecha, y se supuso pues,

que el modelo de Beverton-Holt presentaría un ajuste de sus parámetros con mayor variabilidad que los obtenidos mediante el modelo de Ricker. Finalmente se decidió quedarse con el número de 2500 iteraciones ya que permitía alcanzar la convergencia con cierto grado de margen para el error.

3.3. Análisis de los puntos de referencia bajo variabilidad en las series temporales

En esta sección se presentan de manera ordenada las diferentes series de reclutamiento y SSB obtenidas para los diferentes cv para ambas series temporales.

Serie Temporal	1994-2022		1982-2022	
Modelo	Beverton-Holt	Ricker	Beverton-Holt	Ricker
cv	0,2 0,4 0,6		0,2 0,4 0,6	

Cuadro 3.1: Escenarios seleccionados de simulación

3.3.1. Modelo de Beverton-Holt

Como se puede observar en la Figura 3.5 los puntos donde se observó una ligera caída en los valores de la serie de reclutamiento son aquellos correspondientes a los datos que se corresponden con el primer lustro de la década de los 2000 independientemente del cv utilizado.

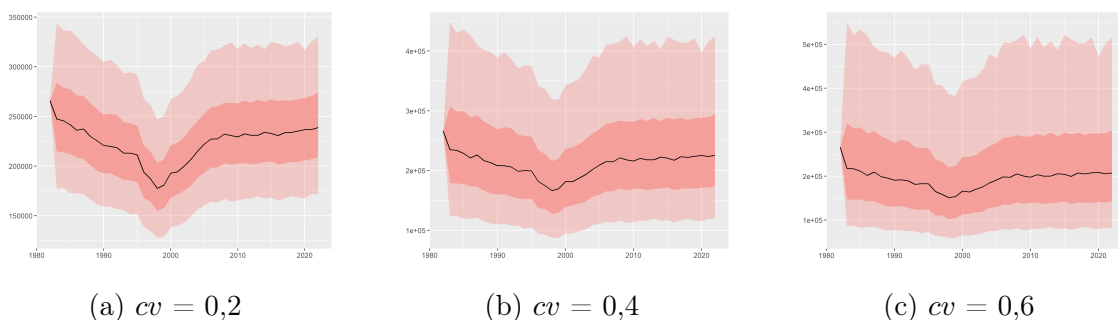


Figura 3.5: Series de Reclutamiento con el modelo de Beverton-Holt

En el caso de los valores obtenidos para las series de SSB obtenidas mediante el modelo de Beverton-Holt (véase Figura 3.6) se observa que la variabilidad obtenida es mucho menor que la observada en las series de reclutamiento. Esto era de

esperar, ya que esta se introdujo de manera deliberada y controlada sobre las series de reclutamiento en base a los distintos cv y la variabilidad se traslada a la SSB de una manera más suave, debido a la dinámica poblacional, tal y como se mencionó en el capítulo de metodología. Cabe destacar la importancia de comprobar en cada caso la escala presentada en el eje y, de forma tal, que sea plausible valorar verdaderamente la variabilidad observada y como esta incrementa de verdad a medida que se aumenta el cv . Para un cv de 0,2 el eje y tiene un límite superior de $3,5 \cdot 10^5$ mientras que en el extremo contrario ($cv = 0,6$) se contempla un límite de hasta $6 \cdot 10^5$.

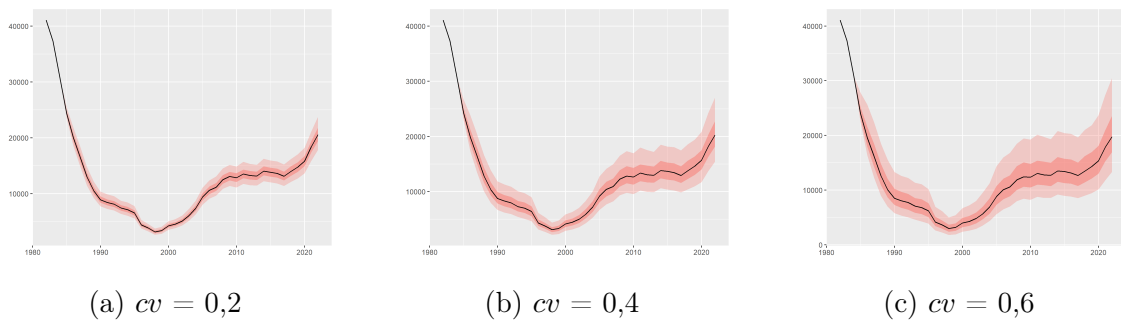


Figura 3.6: Series de SSB con el modelo de Beverton-Holt

3.3.2. Modelo de Ricker

Al igual que para el caso de Beverton-Holt podemos observar un efecto similar de los años en las series de reclutamiento obtenidas con el modelo de Ricker (véase Figura 3.7).

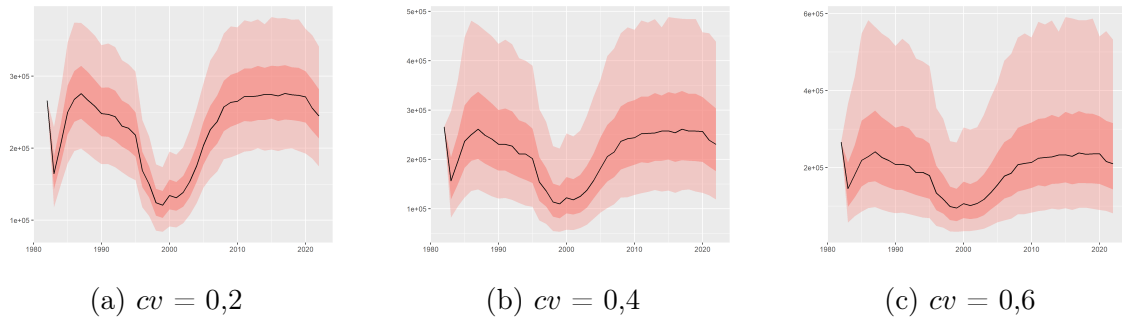


Figura 3.7: Series de Reclutamiento con el modelo de Ricker

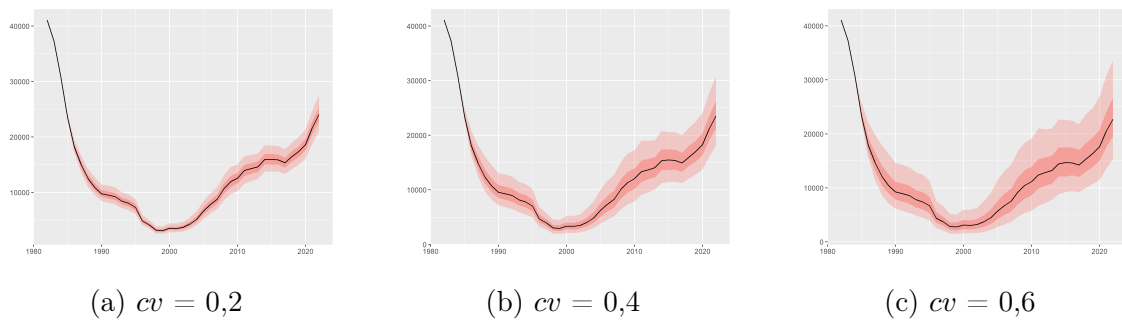


Figura 3.8: Series de SSB con el modelo de Ricker

Si comparamos la variabilidad en las series de SSB obtenida con ambos modelos (véase Figura 3.8 y Figura 3.6, podríamos destacar que aparentemente (y mediante una comparación gráfica) parece no haber grandes diferencias en la variabilidad obtenida entre ambos modelos, para los casos con diferentes cv . Si comparamos los resultados obtenidos para el caso con $cv = 0,6$ con los mostrados en las figuras resumen de la serie corta, A.13 y B.13, se observa que entre estas tampoco parece haber diferencias.

3.4. Efecto de los diferentes cv y el tamaño de las series temporales, sobre la estimación de los puntos de referencia

En esta sección se presentan varios escenarios para ver el impacto de la variabilidad en las series de reclutamiento y SSB sobre los puntos de referencia biológicos de interés. Estos escenarios están constituidos por dos series temporales diferentes: una corta de 28 años (1994-2022) y una serie larga correspondiente al total de 41 años de datos disponibles para el stock (1982-2022). Al jugar con la longitud de la series, se consigue un escenario más complejo para la estimación de la relación SR y consecuentemente los puntos de referencia. Como ya se ha mencionado todos los escenarios mencionados pueden consultarse de manera resumida en el Cuadro 3.1.

A continuación se muestran los resultados obtenidos al calcular los cv , a lo largo de todas las iteraciones, para los diferentes puntos de referencia utilizados, así como para los parámetros a y b . Los cv calculados se han obtenido mediante la división de la desviación típica (sd) obtenida para cada valor dividida entre su media (μ). De esta manera se puede consultar rápidamente como se traslada la variabilidad a los puntos de referencia y a los parámetros a y b . Los resultados para dicho análisis pueden consultarse en los cuadros 3.2 y 3.3.

En el caso de la serie larga (véase Cuadro 3.2), si valoramos los resultados obtenidos para los puntos de referencia, se observa que para el modelo de Beverton-Holt, los puntos de referencia más sensibles al impacto de la variabilidad, son SSB_{msy} y F_{crash} distinguiéndose de los demás puntos de referencia para el mismo modelo no sólo en los valores, si no también en la escala y su comportamiento a medida que aumenta el cv , siendo esto último especialmente evidente para el punto F_{crash} .

Por otro lado, al analizar lo sucedido con el modelo de Ricker, observamos que aparentemente, los resultados para todos los puntos de referencia aumentan de manera proporcional, moviéndose en el mismo rango y manteniendo una relación aparentemente lineal entre el cv y la variabilidad. Esto no sucede, como ya se mencionó, con F_{crash} para el modelo de Beverton-Holt.

En cuanto al impacto de la variabilidad sobre los parámetros a y b , aparentemente los resultados obtenidos para el modelo de Ricker son iguales en escala y valor. Además también son similares los valores obtenidos para el parámetro a entre ambos modelos. Donde se encuentra en este caso la mayor diferencia, es en el cv calculado para el parámetro b de Beverton-Holt, donde se obtienen valores muy superiores a aquellos obtenidos con el modelo de Ricker para el mismo parámetro. Recordamos

que durante el análisis de comportamiento de las curvas, el parámetro b en el modelo de Beverton-Holt afectaba a la tasa de crecimiento de la “pendiente” hacia la asíntota.

Serie Larga 1982-2022						
	Ricker			Beverton-Holt		
	$cv=0.2$	$cv=0.4$	$cv=0.6$	$cv=0.2$	$cv=0.4$	$cv=0.6$
a	0.050	0.098	0.142	0.064	0.124	0.177
b	0.050	0.096	0.135	0.434	0.851	1.216
SSB_{msy}	0.042	0.080	0.114	0.094	0.159	0.209
F_{msy}	0.033	0.064	0.093	0.056	0.088	0.106
F_{crash}	0.030	0.059	0.087	0.248	0.390	0.411
SSB_{virgen}	0.037	0.071	0.102	0.059	0.105	0.145
MSY	0.029	0.057	0.084	0.044	0.083	0.118

Cuadro 3.2: Resultados de los modelos Ricker y Beverton-Holt para diferentes coeficientes de variación (cv).

Al evaluar de manera general los resultados obtenidos para la serie corta, se observa que no hay diferencia aparentemente con respecto a los resultados comentados para el caso anterior (Serie larga). Es decir, se sigue viendo un crecimiento proporcional y una relación lineal para todos los casos a excepción de SSB_{msy} y F_{crash} en Beverton-Holt. Siendo F_{crash} el caso más sensible. Al igual que antes el parámetro b de Beverton-Holt es el que difiere con respecto a los demás parámetros a y b tanto en escala como en valor (véase Cuadro 3.3).

Serie Corta 1994-2022						
	Ricker			Beverton-Holt		
	$cv=0.2$	$cv=0.4$	$cv=0.6$	$cv=0.2$	$cv=0.4$	$cv=0.6$
a	0.082	0.163	0.236	0.082	0.160	0.235
b	0.071	0.134	0.186	0.500	1.028	1.695
SSB_{msy}	0.059	0.112	0.158	0.113	0.189	0.256
F_{msy}	0.050	0.098	0.140	0.059	0.090	0.110
F_{crash}	0.044	0.086	0.123	0.262	0.411	0.463
SSB_{virgin}	0.050	0.094	0.133	0.075	0.132	0.186
MSY	0.033	0.066	0.098	0.058	0.107	0.154

Cuadro 3.3: Resultados de los modelos Ricker y Beverton-Holt para diferentes coeficientes de variación (cv).

Una opción para comparar cuales son los efectos del acortamiento de la serie temporal sobre los parámetros a y b de los modelos y sobre los puntos de referencia se presenta en el Cuadro 3.4 donde se puede ver el resultado del cociente entre los cv de la serie larga y los de la corta. Por lo general y como es lógico, la serie corta presenta una mayor variabilidad debido a la menor cantidad de datos disponibles a la hora de ajustar el modelo y realizar las simulaciones.

Al comparar los resultados del Cuadro 3.4 se valora la distancia del cv con respecto a 1. Indicando un valor de 1 que no hay absolutamente ninguna diferencia al acortar la serie. A medida que este resultado decrece y se distancia de 1, implica un mayor efecto del acortamiento de la serie sobre la variabilidad de los puntos de referencia. Un resultado que llama especialmente la atención es que los puntos más sensibles al acortamiento de la serie para el caso de Ricker son F_{crash} y F_{msy} , mientras que son precisamente estos valores los más robustos ante el acortamiento de la serie en el caso de Beverton-Holt.

Comparación Serie Larga / Serie Corta						
	Ricker			Beverton-Holt		
	$cv=0.2$	$cv=0.4$	$cv=0.6$	$cv=0.2$	$cv=0.4$	$cv=0.6$
a	0.61	0.60	0.60	0.78	0.78	0.75
b	0.70	0.72	0.73	0.87	0.83	0.72
SSB_{msy}	0.71	0.71	0.72	0.83	0.84	0.82
F_{msy}	0.66	0.65	0.66	0.95	0.98	0.96
F_{crash}	0.68	0.69	0.71	0.95	0.95	0.89
SSB_{virgen}	0.74	0.76	0.77	0.79	0.80	0.78
MSY	0.88	0.86	0.86	0.76	0.78	0.77

Cuadro 3.4: Divisiones de los valores de los cv de la serie larga entre los de la serie corta para comparar el efecto de la reducción de la serie temporal en los parámetros y puntos de referencia.

4. Discusión y conclusiones

El apoyo científico a la gestión de recursos pesqueros está caracterizado por la incertidumbre (Patterson et al., 2001) que afecta a nuestra capacidad de determinar el tamaño de las poblaciones o stocks gestionadas, su proyección en el futuro y su estado (e.g. infraexplotado, saludable o sobreexplotado). Para caracterizar este estado se usan puntos de referencia y el principal proceso que aporta incertidumbre a los puntos de referencia es la relación stock-reclutamiento (Needle, 2001). Este trabajo aporta un enfoque de simulación estadística de cara a evaluar el impacto que tiene la incertidumbre en la relación SR, así como el efecto que dicha incertidumbre tiene sobre la determinación de los puntos de referencia, que tan esenciales son para las labores de gestión pesquera.

Para ello a lo largo de este trabajo se desarrolló e implementó un sistema de simulación que, partiendo de un modelo dinámico estructurado por edades permitiese obtener series de SSB y reclutamiento, con diferentes grados de variabilidad, donde a continuación se ajustaron distintos modelos o relaciones SR con el objetivo de mostrar como el ruido o incertidumbre en dichas series se traslada a la estimación de la curva SR, y como finalmente la incertidumbre mencionada impacta en los puntos de referencia.

Además se diagnosticaron los diferentes efectos que los parámetros a y b de los modelos de Beverton-Holt y Ricker tienen sobre las curvas SR y como esto afectaba a los valores obtenidos para los puntos de referencia principales. Este análisis sirvió para familiarizarse con el significado de estos parámetros y ver como su variación afecta a la curva del modelo SR (seleccionado para cada caso) y a la curva de producción que define los puntos de referencia.

También se estudió como el tamaño de las series temporales y los distintos niveles de variabilidad afectan a los resultados obtenidos por los puntos de referencia y se evaluó el número óptimo de iteraciones necesarias para que las medidas descriptivas que se seleccionaron convergieran hasta tener un nivel de significación de al menos el 5%. Esto es importante para optimizar el uso de los recursos de computación de tal manera que no se haga un número insuficiente de iteraciones que nos conduzca

a conclusiones falsas, ni se haga un número demasiado grande que ocupe el tiempo del uso del ordenador en tareas innecesarias.

Al abordar estos objetivos de esta manera se pudo evaluar cuales son los efectos derivados de la selección de cada uno de los dos modelos evaluados, así como la importancia del tamaño de la serie temporal seleccionada. Por otro lado se comprobó, que el cv empleado para la simulación tuvo un efecto de proporcionalmente lineal con respecto a los cv obtenidos para los puntos de referencia en la mayoría de los casos (con la excepción de F_{crash} y SSB_{msy} en el modelo de Beverton-Holt y de los que se hablará más adelante). Esto es importante, ya que en la práctica el único de estos tres elementos que podemos controlar es la selección del modelo, ya que la serie temporal viene dada por la serie de datos existente para el stock y la variabilidad en la realidad no se controla o manipula.

Esto puede impactar en futuras decisiones a la hora de diagnosticar las relaciones SR de un stock así como sus puntos de referencia de tal manera que preste una mayor atención a la selección del modelo y se tome en consideración el tamaño de la serie a la hora de evaluar los resultados, teniendo siempre en cuenta los posibles efectos evaluados durante este TFM.

Las simulaciones mostraron que con el tamaño corto de la serie temporal, tanto la variabilidad en la relación SR y como la variabilidad de los puntos de referencia aumentan. Hay que tener en cuenta que los modelos de evaluación requieren series temporales largas de datos, pero estas no están siempre disponibles. Estas series proporcionan sólo una pareja de datos (SSB y reclutas) cada año, condicionando la calidad del modelo. Además, los datos mas antiguos se corresponderían a períodos de mas baja explotación y, por lo tanto, de mayor tamaño de la población, cubriendo un mayor rango de la curva SR, y mejorando su ajuste.

Otro resultado que considero importante destacar es que durante la evaluación del efecto de los diferentes cv y el tamaño de las series temporales, sobre la estimación de los puntos de referencia se observó que el tamaño de la serie temporal afectaba a F_{msy} y F_{crash} de manera totalmente opuesta en función del modelo seleccionado (como ya se mencionó en párrafos anteriores). Estos puntos de referencia son los más robustos frente al acortamiento de la serie temporal si se utiliza el modelo de Beverton-Holt mientras que son los más sensibles al acortamiento si se empleaba el modelo de Ricker.

Este detalle desvela una vez más la vital importancia que tiene la selección del modelo y tomar en consideración el tamaño de la serie a la hora de realizar tareas de evaluación pesquera. Es además importante destacar que el efecto mencionado sucede sobre uno de los puntos de referencia que nos aportan información acerca de

uno de los pocos elementos sobre los que se tiene control durante la evaluación de la gestión pesquera como es el efecto de la mortalidad por pesca, asociándose esta al esfuerzo pesquero. Si en este caso se destaca el efecto sobre F_{msy} es porque este punto de referencia objetivo, (que a resumidas cuentas, indica la tasa de presión pesquera óptima que podemos ejercer sobre el stock) es de vital importancia a la hora de adaptar los futuros planes de explotación si se pretende mantener el stock en las mejores condiciones de supervivencia y explotación posibles. Conocer como F_{msy} depende del modelo empleado y de la disponibilidad de información nos permite entender que el nivel objetivo puede no estar bien definido y que rangos, en lugar de valores fijos podrían ser más útiles. Rangos que rinden al menos un 95 % del máximo rendimiento sostenible ya fueron propuestos en (Rindorf et al., 2017) y este resultado respalda la idea.

Es importante también tener en cuenta este efecto sobre el punto de referencia límite de F_{crash} , ya que va a indicar la F límite con la que la población llega a colapso y que debe evitarse con alta probabilidad, y que como se ha visto, es especialmente susceptible al acortamiento de las series temporales si se emplea el modelo de Ricker; lo que puede dar lugar a evaluaciones erróneas si se aplica un mismo método pero con series temporales de tamaños diferentes. Es por esto que, conocer los factores que afectan a su variabilidad nos permite definir mejor los límites precautorios de la explotación.

En cuanto a la selección del modelo, se comprobó que supone una gran diferencia de cara a la sensibilidad que presentan algunos parámetros y puntos de referencia frente a los efectos de la variabilidad. El resultado más claro de este comportamiento obtenido durante este trabajo, es el efecto que tiene la variabilidad sobre los puntos de referencia de SSB_{msy} y F_{crash} cuando se selecciona el modelo de Beverton-Holt. Para este caso se observó que el cv seleccionado no solo no tenía una relación proporcional y lineal con respecto a estos puntos de referencia si no que los valores y la escala de los mismos diferían bastante de el resto de los casos presentados durante el análisis de los efectos de la variabilidad sobre los puntos de referencia. Esto tiene implicaciones durante las tareas de gestión pesquera (recordamos que SSB_{msy} indica la biomasa en equilibrio) ya que supone un indicador principal de la salud y estado actual de la cantidad de individuos presentes en un estado de madurez adecuado para la reproducción, en una población en la que se supone que se está ejerciendo la presión pesquera adecuada para que se esté obteniendo el rendimiento máximo sostenible. Esto denota la importancia de una buena estimación de este indicador así como de tener que considerar con cuidado las implicaciones posibles del efecto que la selección del modelo tiene sobre los impactos que la variabilidad ejerce sobre

la estimación de dicho punto de referencia. Para el caso de F_{crash} , la selección del modelo es igualmente importante, ya que tratándose de un punto umbral sensible a dicha selección, puede llegar a generar errores a la hora de asesorar sobre cuál es la presión pesquera necesaria para llevar una población al colapso, con los riesgos e implicaciones que esto conlleva.

En general el modelo de Beverton-Holt tiene mayor variabilidad que el modelo de Ricker, tanto con la serie corta como con la larga y tanto para los parámetros de los modelos como para los puntos de referencia estimados. Este resultado es diferente al encontrado por (Albertsen y Trijoulet, 2020), que encontraron mayores errores en los puntos de referencia estimados con el modelo de Ricker trabajando con datos de un stock de bacalao. Esta diferencia nos permite concluir que nuestro resultado no es generalizable y que posiblemente depende de los datos disponibles para la estimación del modelo.

Con todo, la realización de este trabajo queda sujeta a la consecución del objetivo principal del mismo, abordándolo de la mejor manera que se ha podido y empleando diferentes herramientas estadísticas que nos han permitido evaluar los efectos de la incertidumbre, en un entorno controlado por simulación, en la relación entre la biomasa reproductora SSB y el reclutamiento R (principal causa de incertidumbre en la definición del estado de un stock y en su predicción futura), así como en que grado dicha incertidumbre en la relación stock-reclutamiento afecta a la determinación de los puntos de referencia biológicos que tan fundamentales son durante los trabajos de gestión pesquera, tanto para definir objetivos como para evitar sobrepasar los límites adecuados para la correcta gestión de los recursos pesqueros.

Bibliografía

- Aalto, E. A., & Baskett, M. L. (2016). Appendix A. Comparison of the Ricker growth model with the Beverton-Holt model. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.3518528.v1>
- Albertsen, C. M., & Trijoulet, V. (2020). Model-based estimates of reference points in an age-based state-space stock assessment model. *Fisheries Research*, *230*, 105618.
- Beverton, R. (1957). On the dynamics of exploited fish population. *Fish. Invest. IV*.
- Beverton, R., & Holt, S. (1959). A review of the lifespans and mortality rates of fish in nature, and their relation to growth and other physiological characteristics. *Ciba foundation symposium-the lifespan of animals (colloquia on ageing)*, *5*, 142-180.
- Cousido-Rocha, M., Pennino, M. G., Izquierdo, F., Paz, A., Lojo, D., Tifoura, A., & Cerviño, S. (2022). Surplus production models: a practical review of recent approaches. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, *17*(10), 1085-110. <https://doi.org/10.1002/andp.19053221004>
- Cushing, D. (1988). *The provident sea*. Cambridge University.
- Deriso, R. B. (1980). Harvesting strategies and parameter estimation for an age-structured model. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, *37*(2), 268-282.
- FAO. (1997). *FAO Technical Guidelines for Responsible Fisheries. No. 4, Fisheries Management*.
- Haddon, M. (2011). *Modelling and quantitative methods in fisheries*. Chapman; Hall CRC.
- Hart, P. J., Reynolds, J. D., Hart, P. J., & Reynolds, J. D. (2002). *Handbook of fish biology and fisheries* (Vol. 1). Wiley Online Library.
- Hilborn R., W. C. (1992). Quantitative Fisheries Stock Assessment: Choice, Dynamics, and Uncertainty. Springer Science & Business Media., *Springer Science & Business Media*,

- Hjort, J. (1914). Fluctuations in the great fisheries of northern Europe viewed in the light of biological research.
- Kilduff, P., Carmichael, J., & Latour, R. (2009). Guide to fisheries science and stock assessments., *Atlantic States Marine Fisheries Commission*.
- Methot Jr, R. D., & Wetzel, C. R. (2013). Stock synthesis: a biological and statistical framework for fish stock assessment and fishery management. *Fisheries Research*, 142, 86-99.
- Needle, C. L. (2001). Recruitment models: diagnosis and prognosis. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 11, 95-111.
- Patterson, K., Cook, R., Darby, C., Gavaris, S., Kell, L., Lewy, P., Mesnil, B., Punt, A., Restrepo, V., Skagen, D. W., et al. (2001). Estimating uncertainty in fish stock assessment and forecasting. *Fish and fisheries*, 2(2), 125-157.
- Prince, J., Hordyk, A., Valencia, S. R., Loneragan, N., & Sainsbury, K. (2015). Revisiting the concept of Beverton–Holt life-history invariants with the aim of informing data-poor fisheries assessment. *ICES Journal of Marine Science*, 72(1), 194-203.
- Ricker, W. E. (1975). Computation and interpretation of biological statistics of fish populations. *Fish. Res. Board Can. Bull.*
- Ricker, W. (1958). Maximum sustained yields from fluctuating environments and mixed stocks. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 15(5), 991-1006.
- Ricker, W. E. (1940). Relation of catch per unit effort to abundance and rate of exploitation. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 5(1), 43-70.
- Ricker, W. E. (1954). Stock and recruitment. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 11(5), 559-623.
- Rindorf, A., Cardinale, M., Shephard, S., De Oliveira, J. A., Hjørleifsson, E., Kempf, A., Luzencyk, A., Millar, C., Miller, D. C., Needle, C. L., et al. (2017). Fishing for MSY: using “pretty good yield” ranges without impairing recruitment. *ICES Journal of Marine Science*, 74(2), 525-534.
- Wayte, S. E. (2013). Management implications of including a climate-induced recruitment shift in the stock assessment for jackass morwong (*Nemadactylus macropterus*) in south-eastern Australia. *Fisheries Research*, 142, 47-55.

A. Apéndice A

A.1. Convergencia de los puntos de referencia. Modelo de Beverton - Holt.

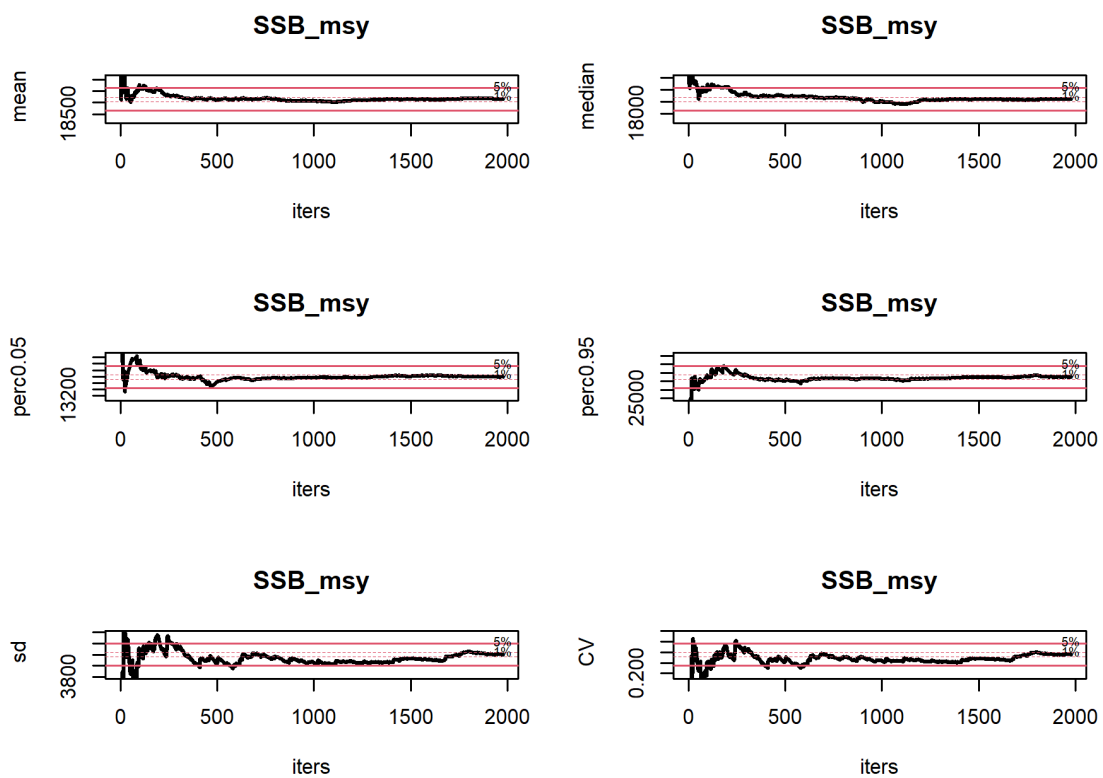


Figura A.1: Convergencia de SSB_{msy} ajustados con el modelo de Beverton - Holt, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones

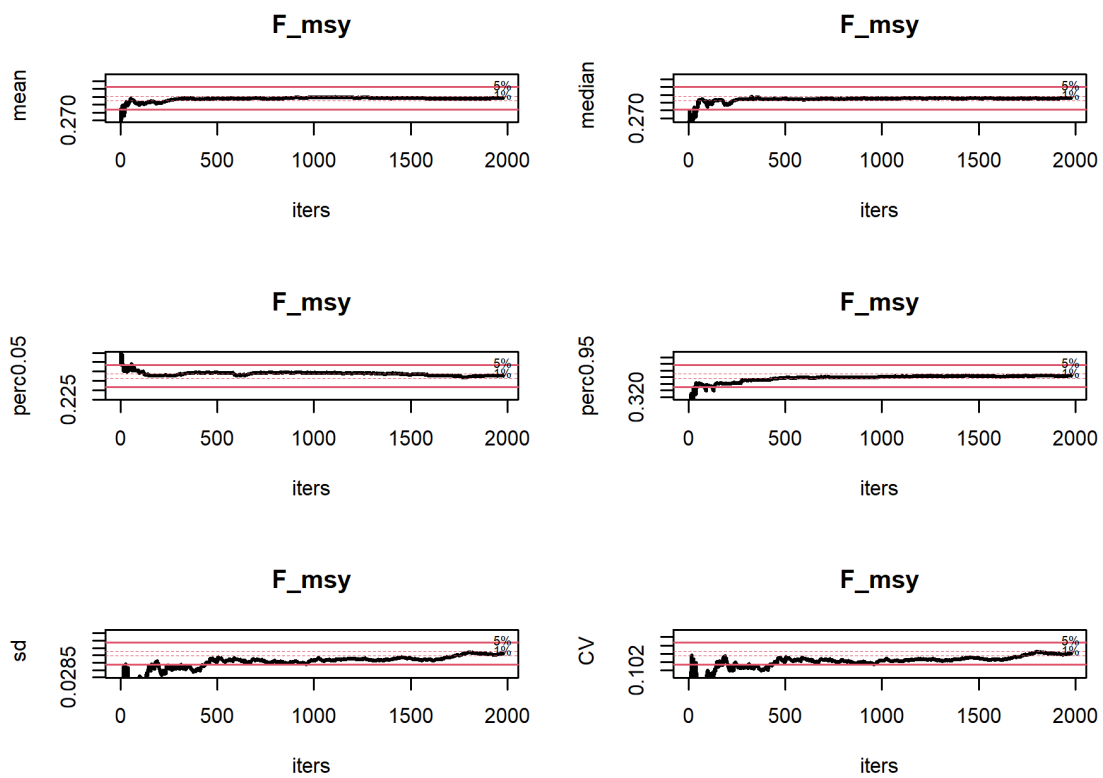


Figura A.2: Convergencia de F_{msy} ajustados con el modelo de Beverton - Holt, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones

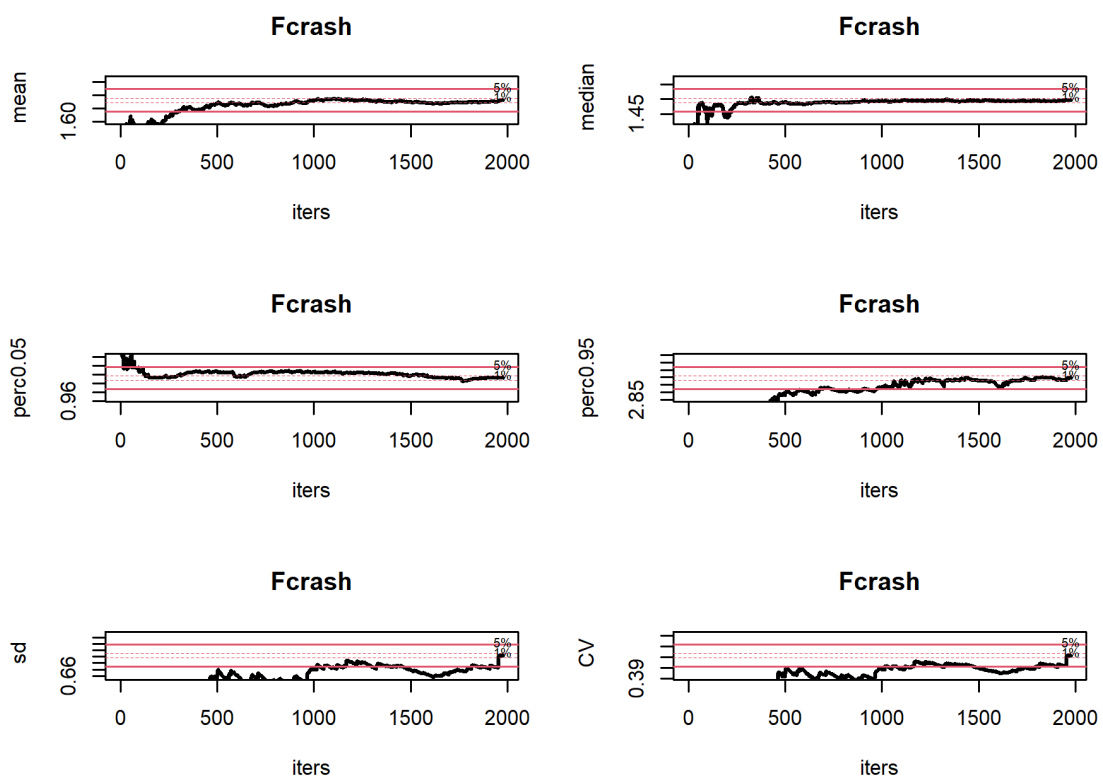


Figura A.3: Convergencia de F_{crash} ajustados con el modelo de Beverton - Holt, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones

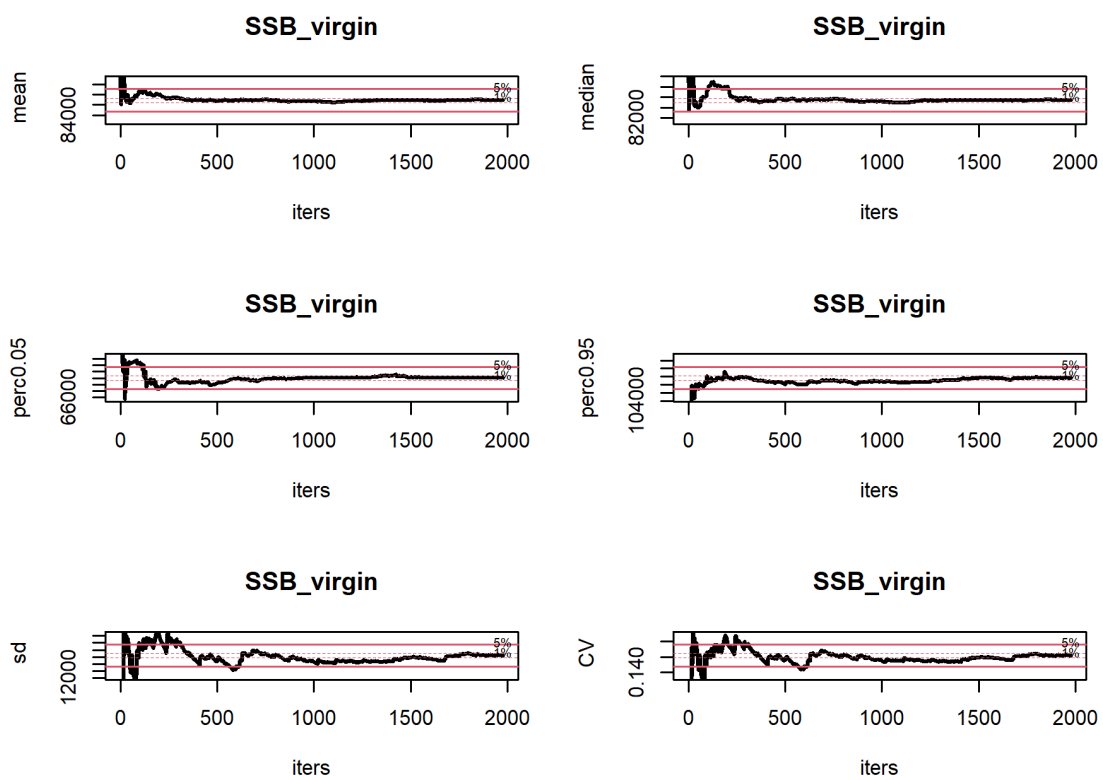


Figura A.4: Convergencia de SSB_{virgin} ajustados con el modelo de Beverton - Holt, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones

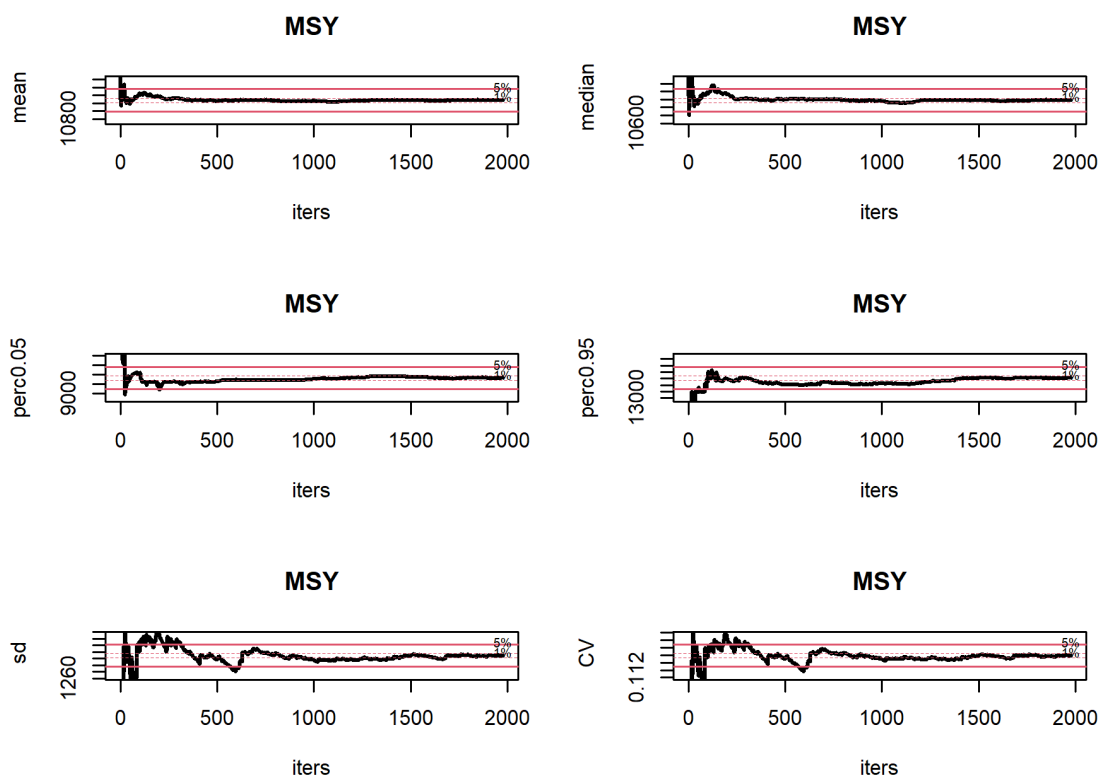


Figura A.5: Convergencia de MSY ajustados con el modelo de Beverton - Holt, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones

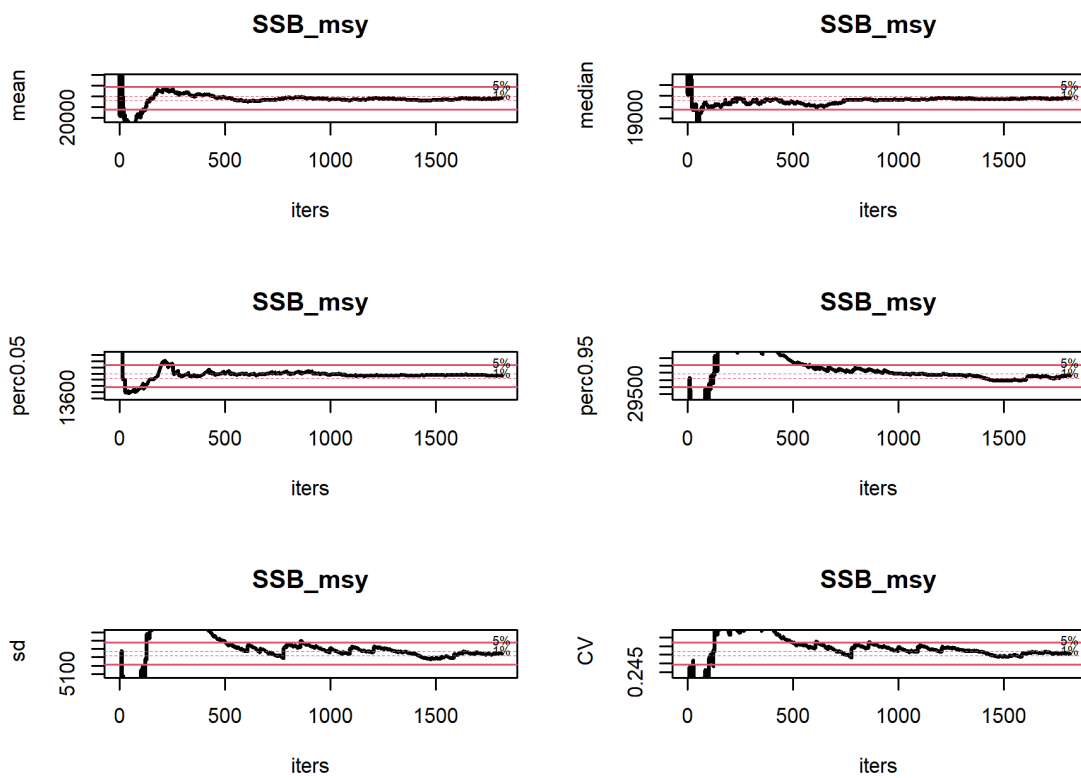


Figura A.6: Convergencia de SSB_{msy} ajustados con el modelo de Beverton - Holt, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones. Serie Corta: 1994-2022

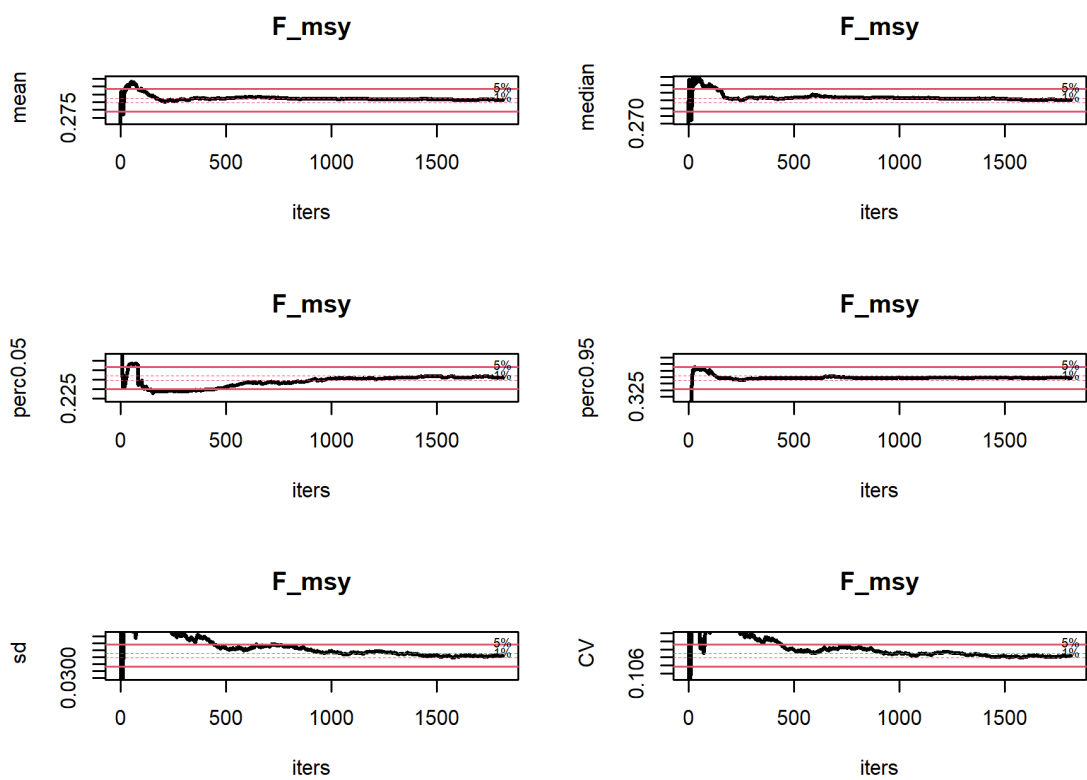


Figura A.7: Convergencia de F_{msy} ajustados con el modelo de Beverton - Holt, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones. Serie Corta: 1994-2022

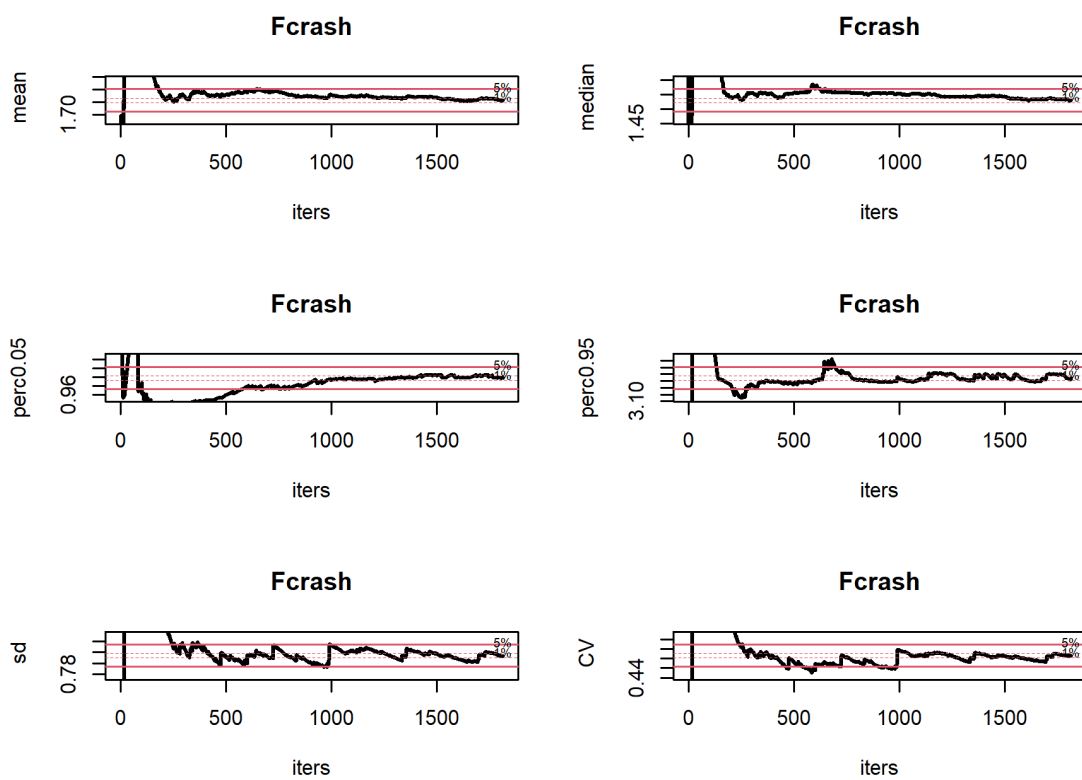


Figura A.8: Convergencia de F_{crash} ajustados con el modelo de Beverton - Holt, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones. Serie Corta: 1994-2022

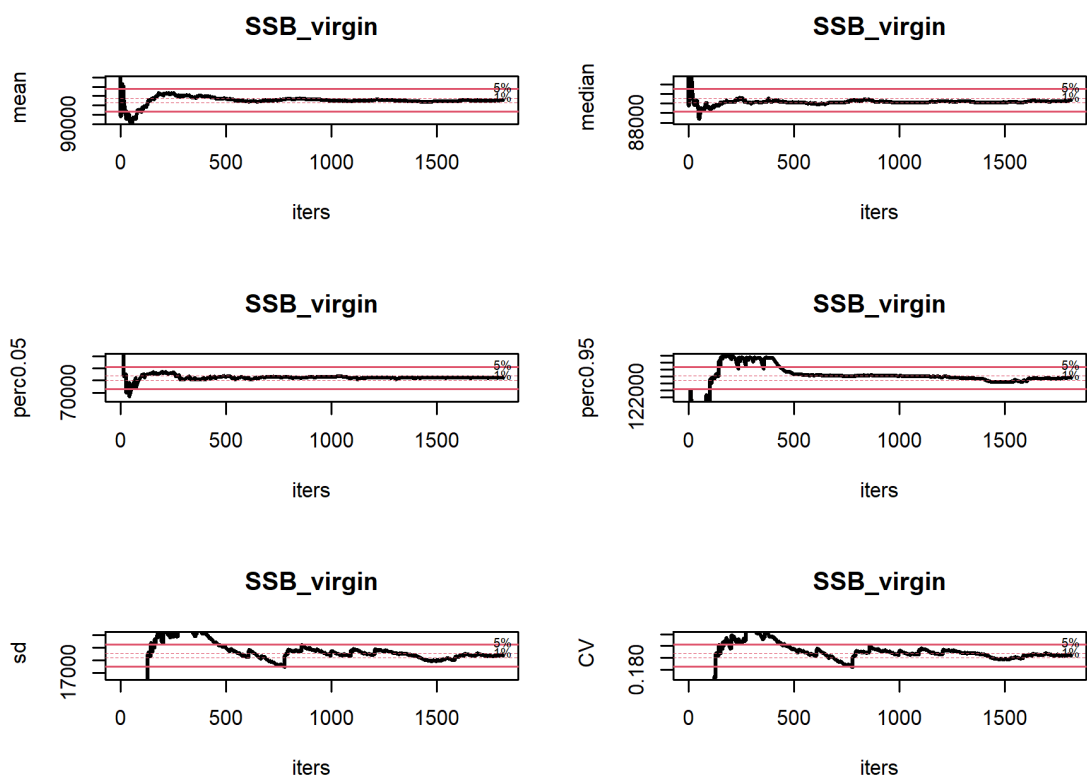


Figura A.9: Convergencia de SSB_{virgen} ajustados con el modelo de Beverton - Holt, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones. Serie Corta: 1994-2022

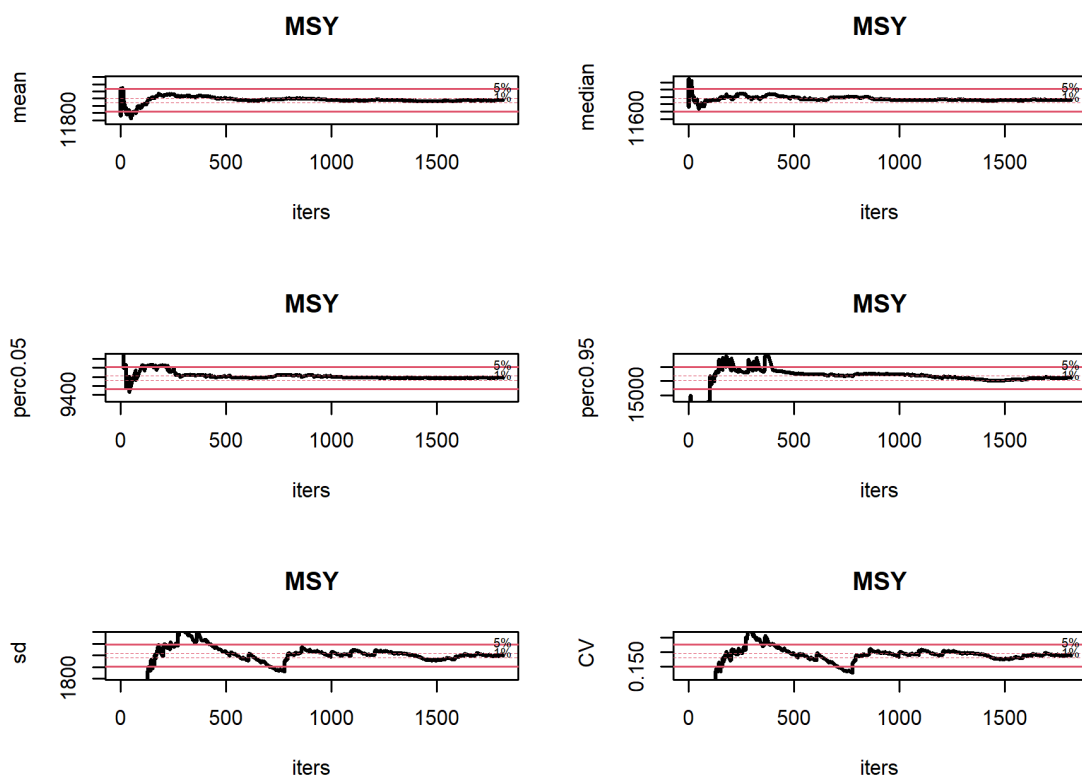


Figura A.10: Convergencia de MSY ajustados con el modelo de Beverton - Holt, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones. Serie Corta: 1994-2022

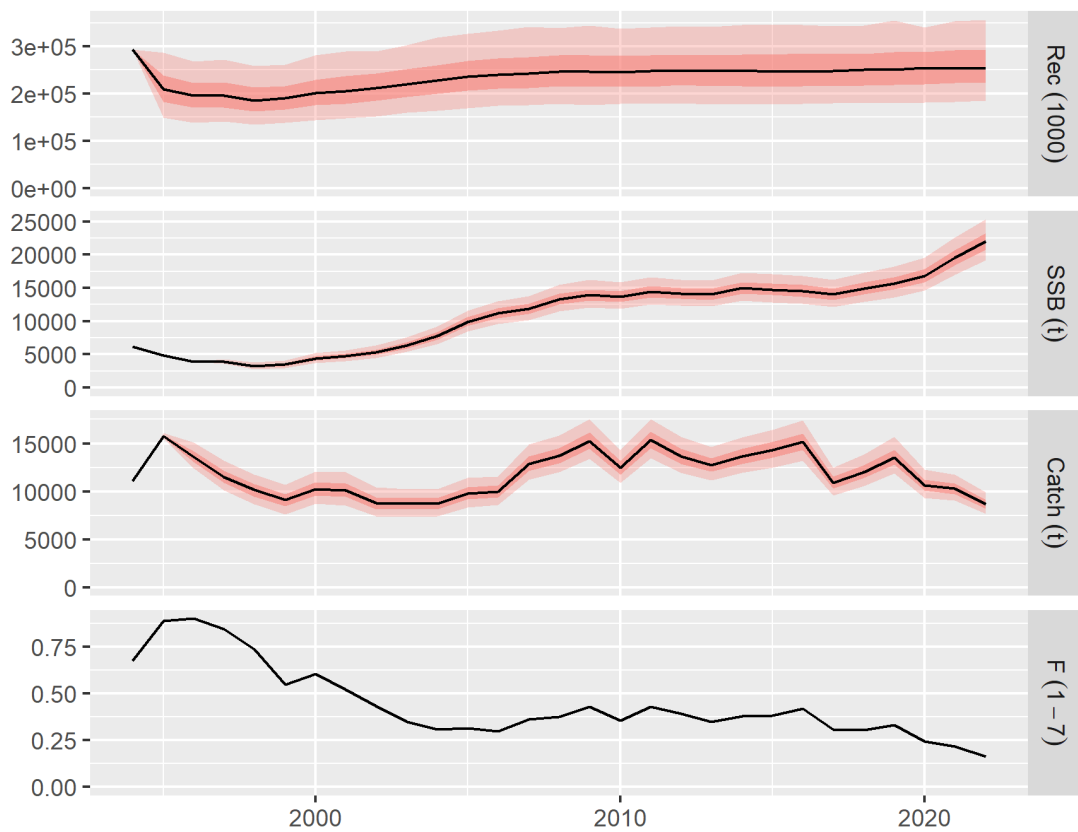


Figura A.11: Resumen serie corta SSB y REC. CV = 0,2

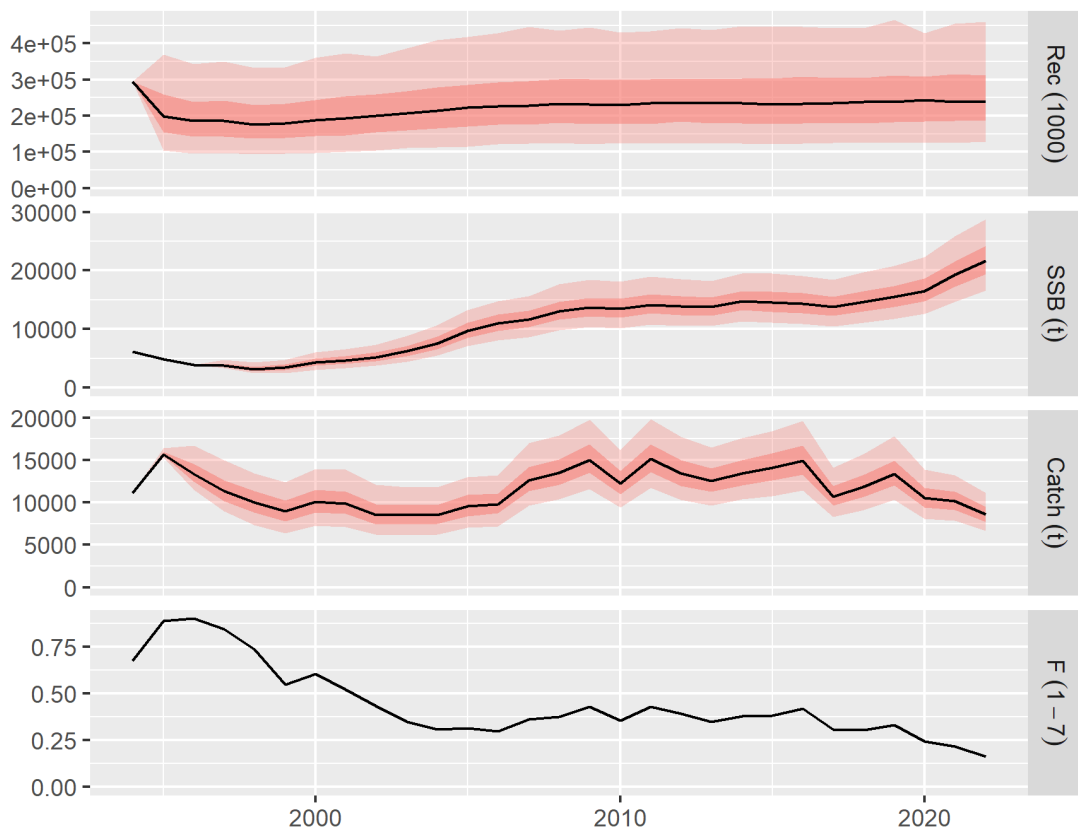


Figura A.12: Resumen serie corta SSB y REC. CV = 0,4

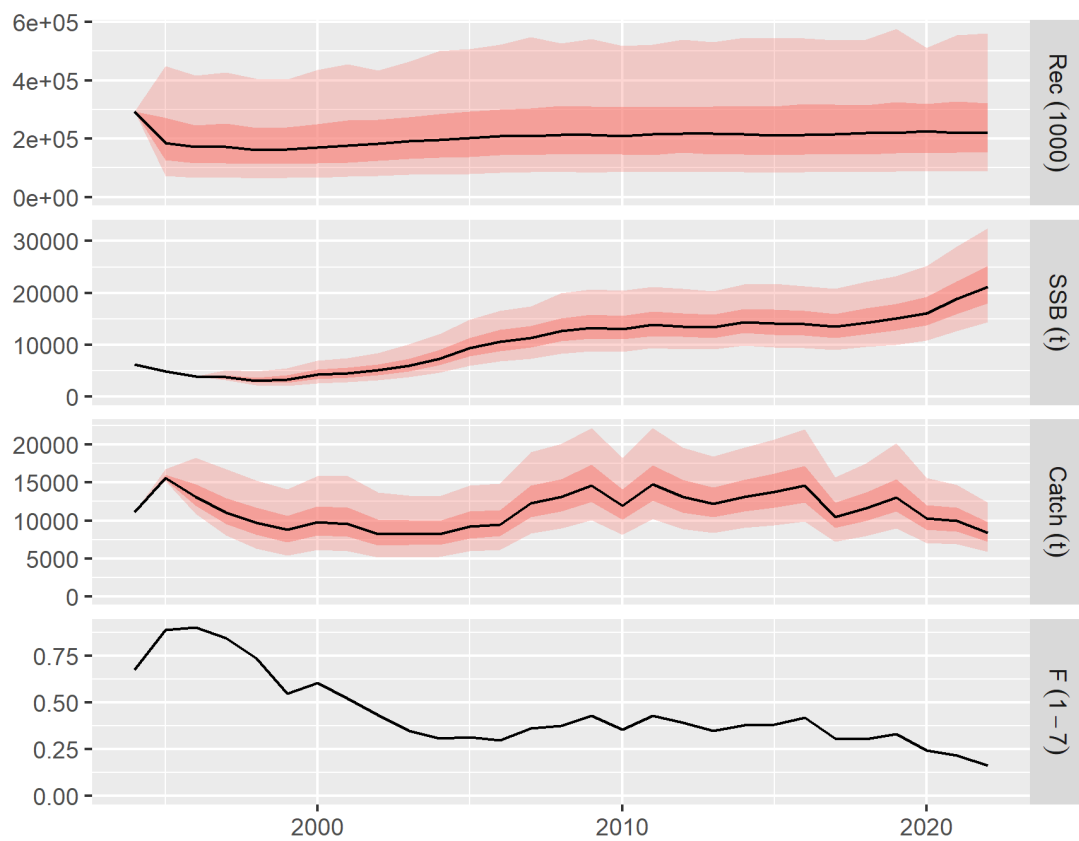


Figura A.13: Resumen serie corta SSB y REC. CV = 0,6

B. Apéndice B

B.1. Convergencia de los puntos de referencia. Modelo de Ricker.

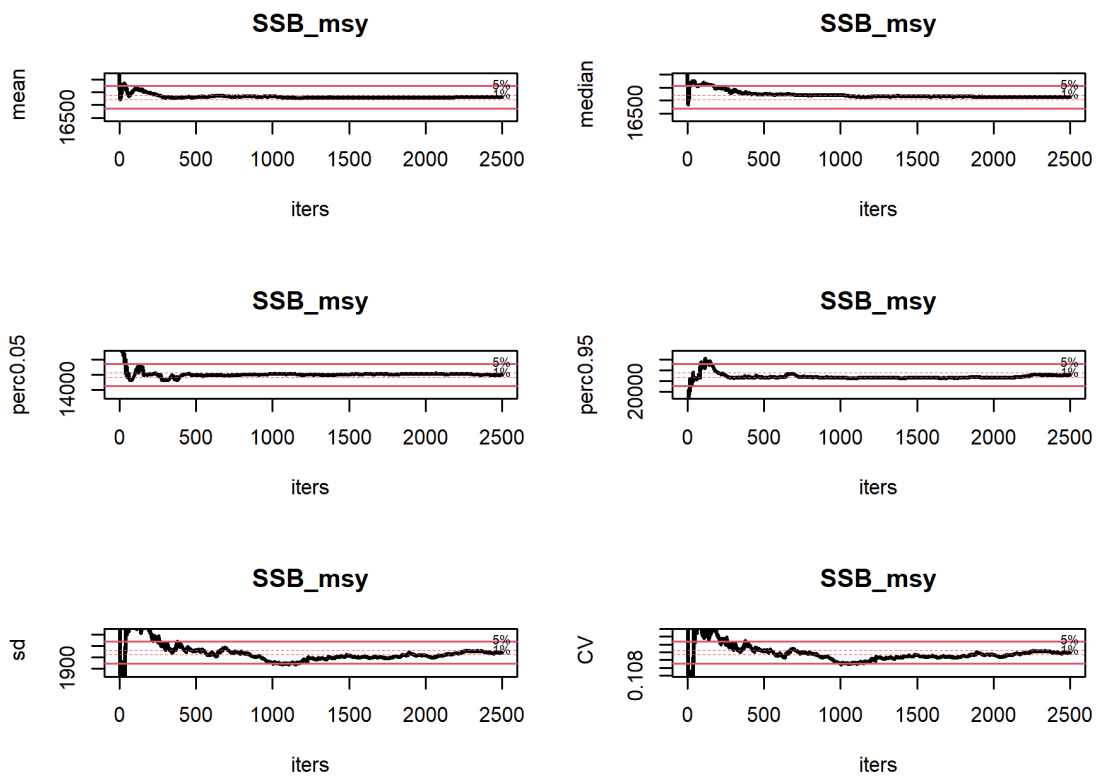


Figura B.1: Convergencia de SSB_{msy} ajustados con el modelo de Ricker, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones

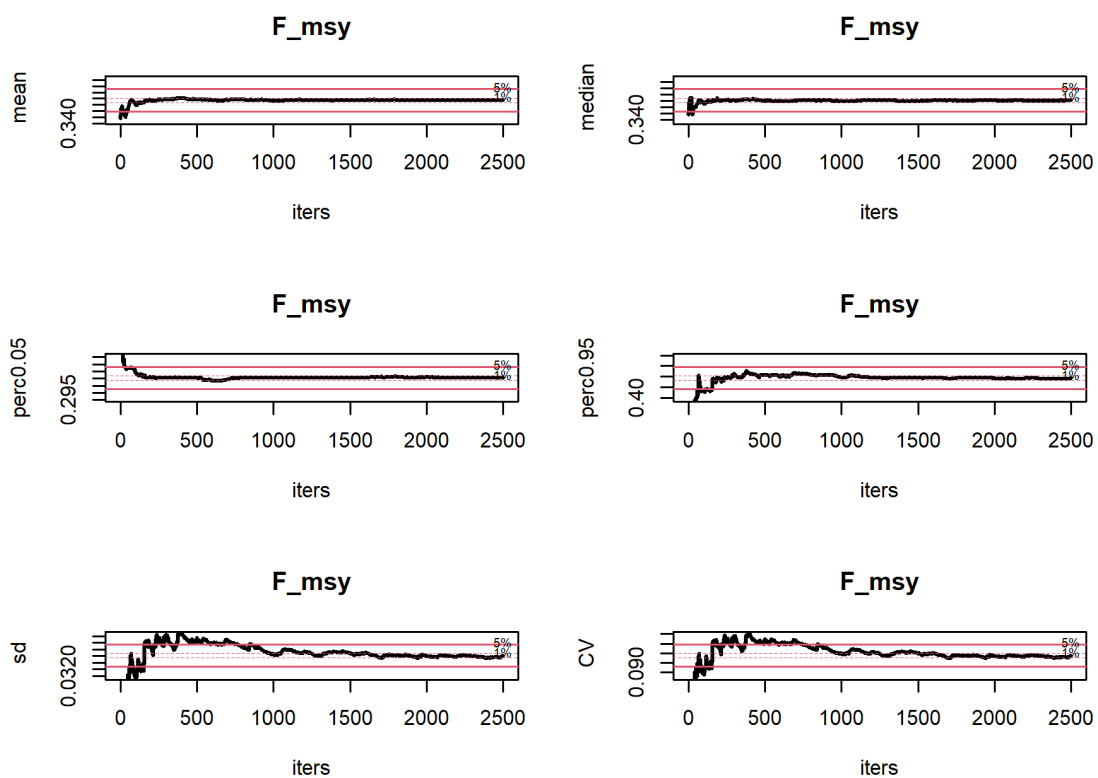


Figura B.2: Convergencia de F_{msy} ajustados con el modelo de Ricker, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones

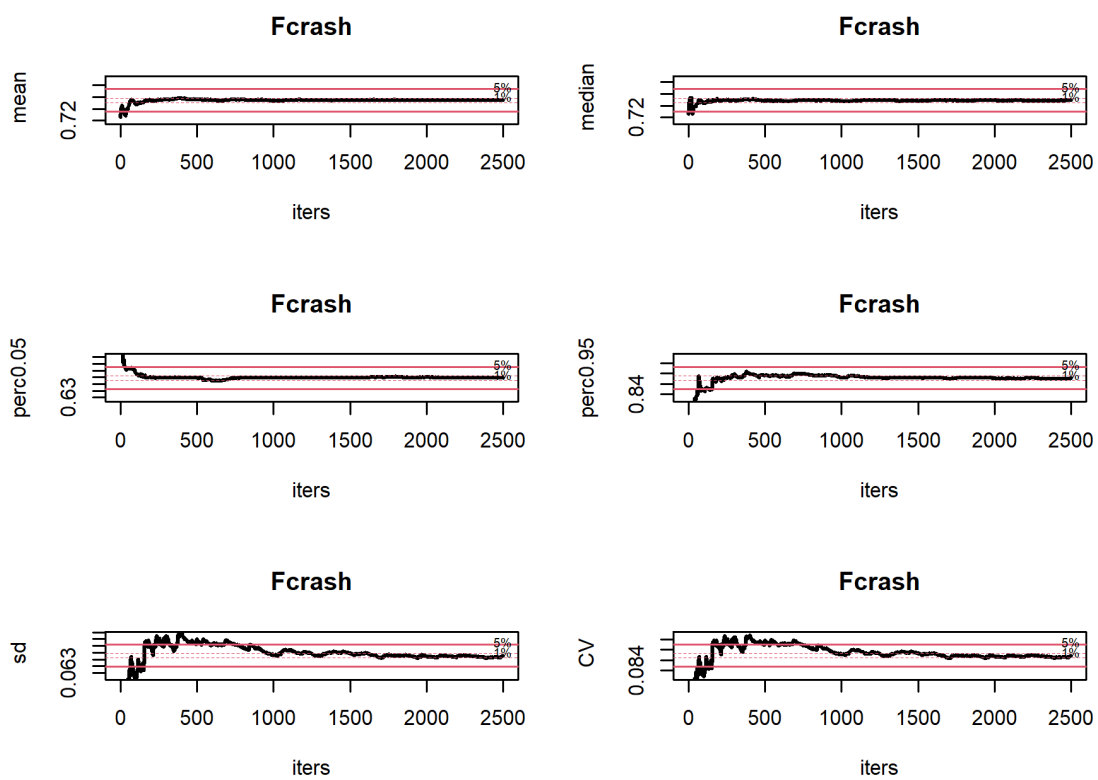


Figura B.3: Convergencia de F_{crash} ajustados con el modelo de Ricker, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones

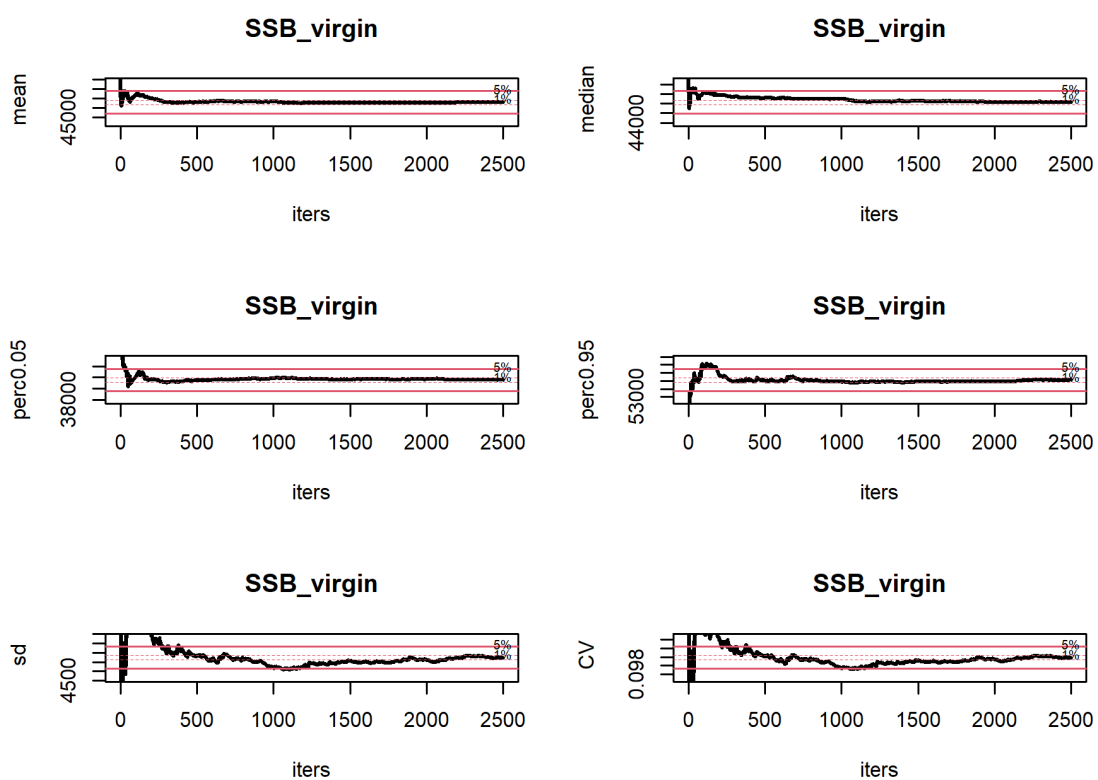


Figura B.4: Convergencia de SSB_{virgen} ajustados con el modelo de Ricker, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones

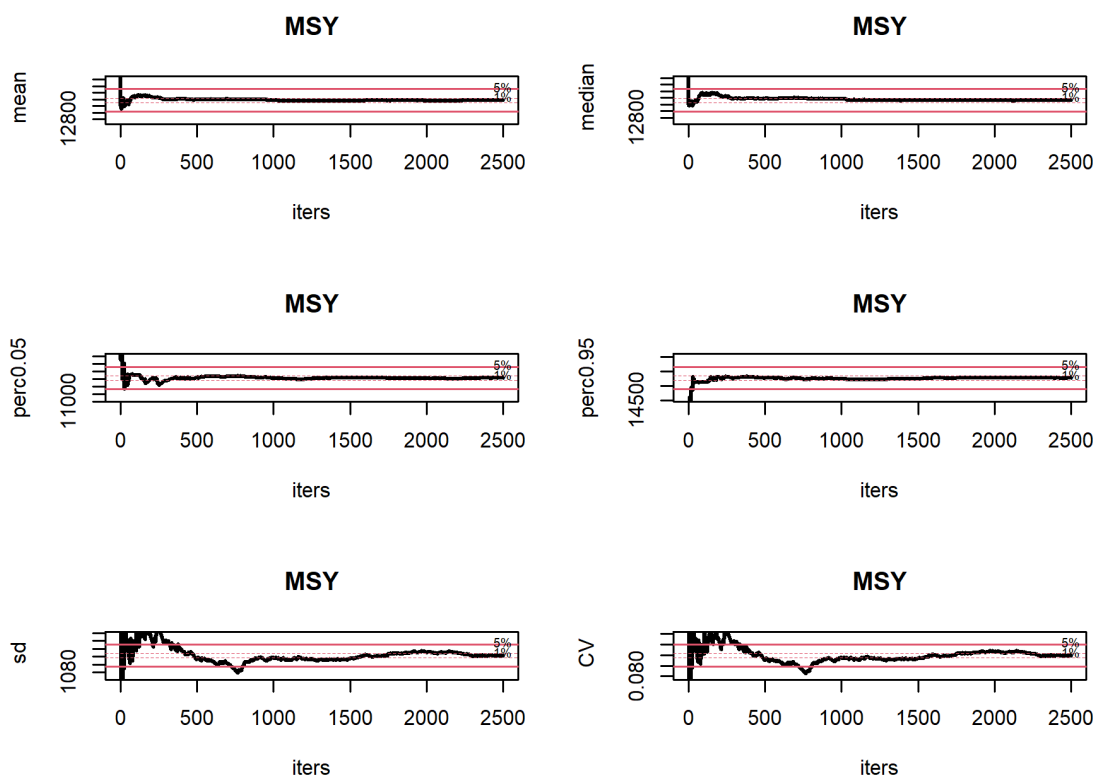


Figura B.5: Convergencia de MSY ajustados con el modelo de Ricker, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones

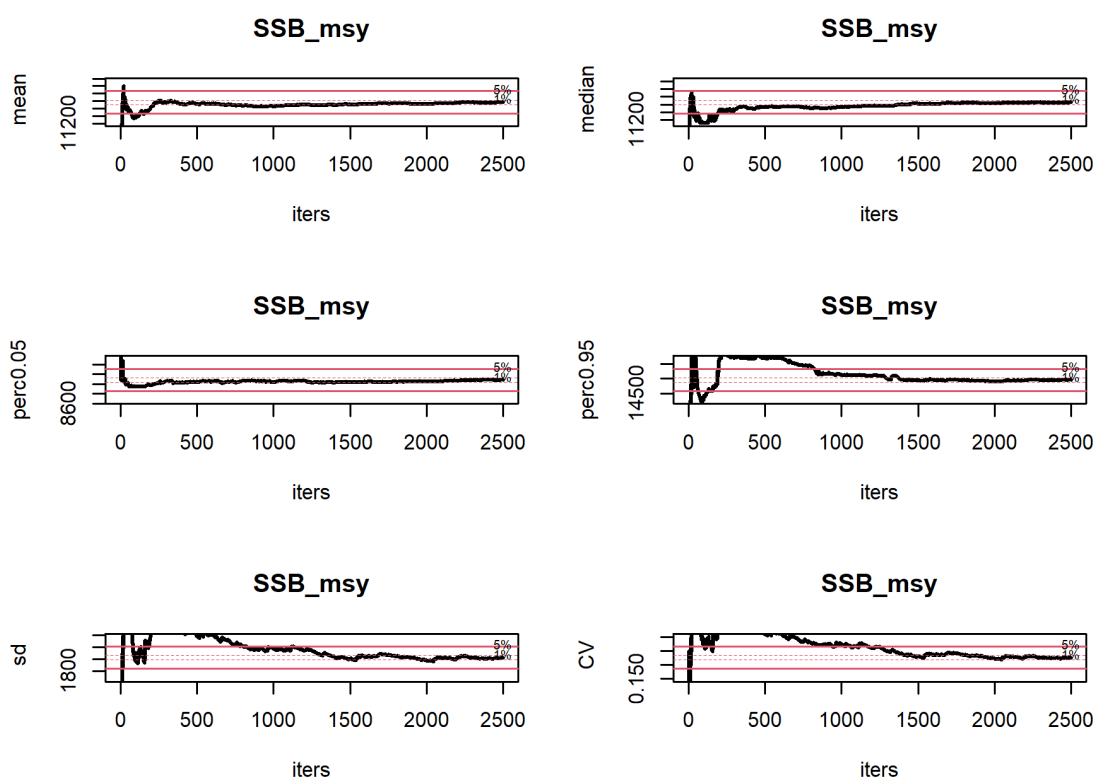


Figura B.6: Convergencia de SSB_{msy} ajustados con el modelo de Ricker, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones. Serie Corta: 1994-2022

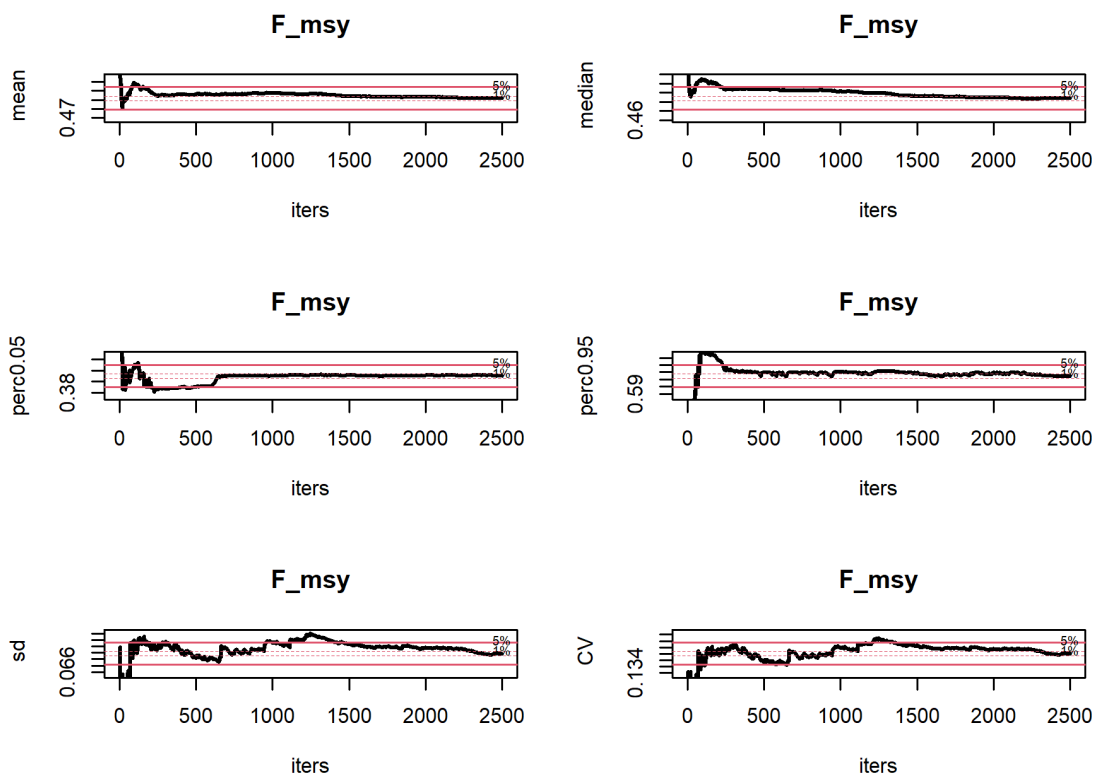


Figura B.7: Convergencia de F_{msy} ajustados con el modelo de Ricker, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones. Serie Corta: 1994-2022

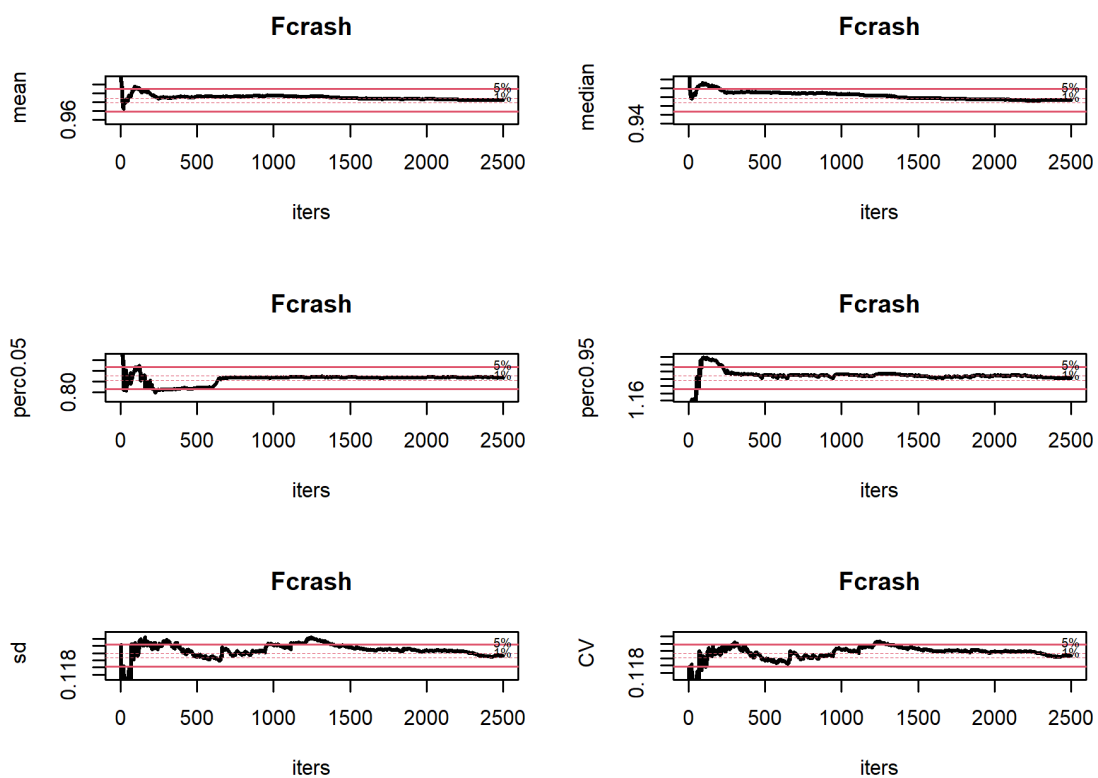


Figura B.8: Convergencia de F_{crash} ajustados con el modelo de Ricker, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones. Serie Corta: 1994-2022

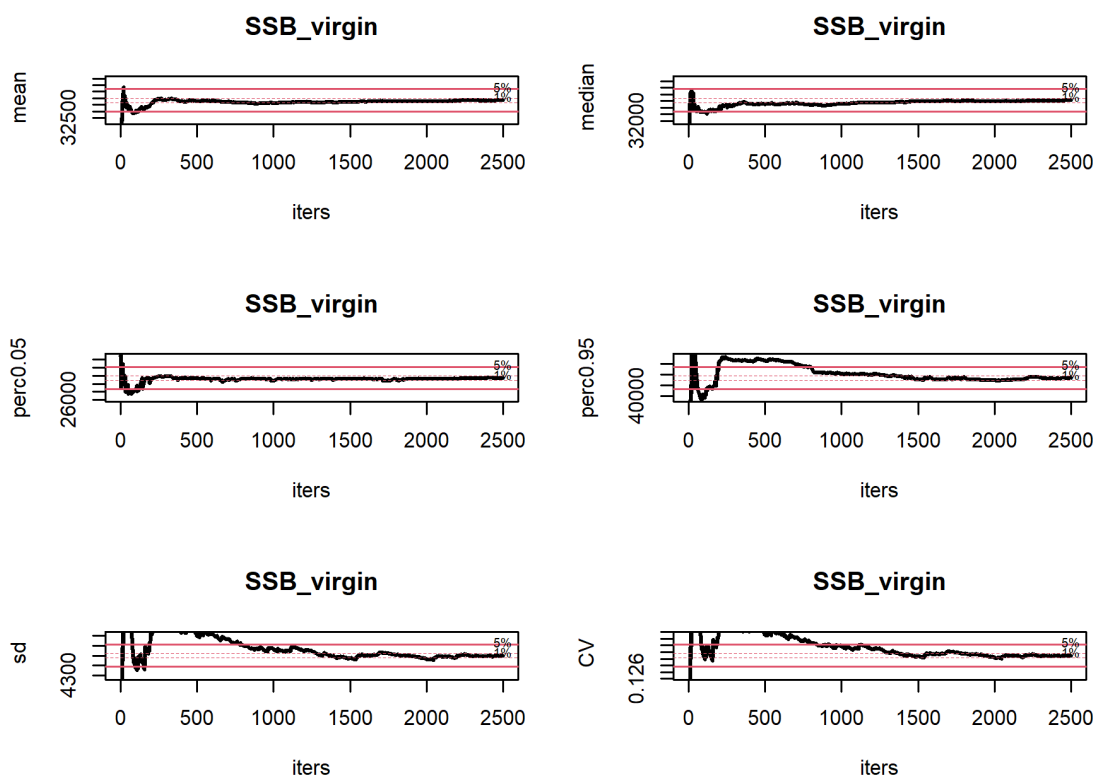


Figura B.9: Convergencia de SSB_{virgen} ajustados con el modelo de Ricker, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones. Serie Corta: 1994-2022

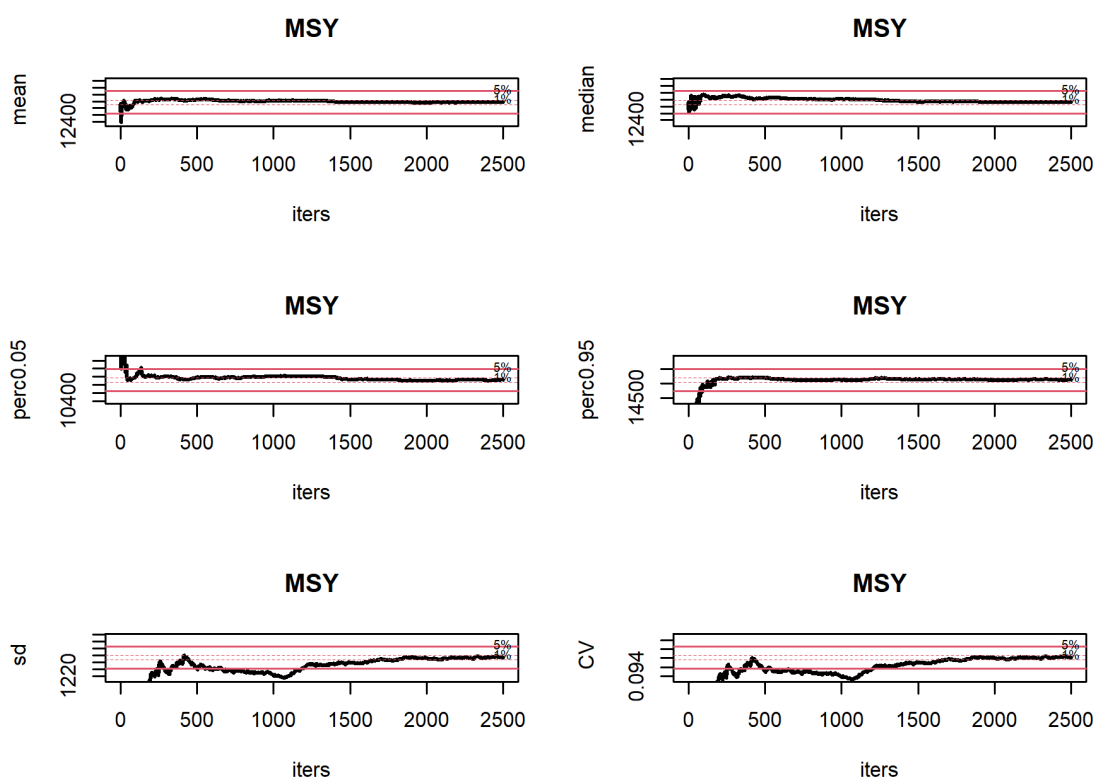


Figura B.10: Convergencia de MSY ajustados con el modelo de Ricker, $CV = 0,6$ y 2500 iteraciones. Serie Corta: 1994-2022

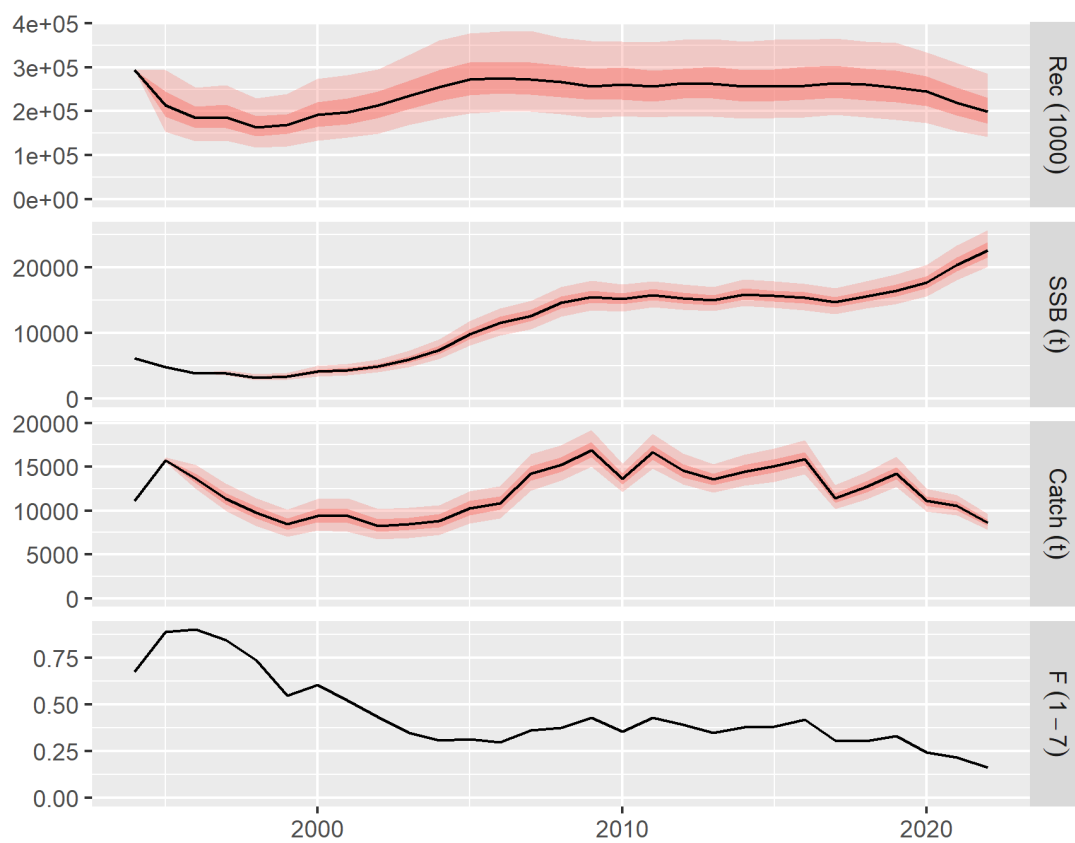


Figura B.11: Resumen serie corta SSB y REC. $CV = 0,2$

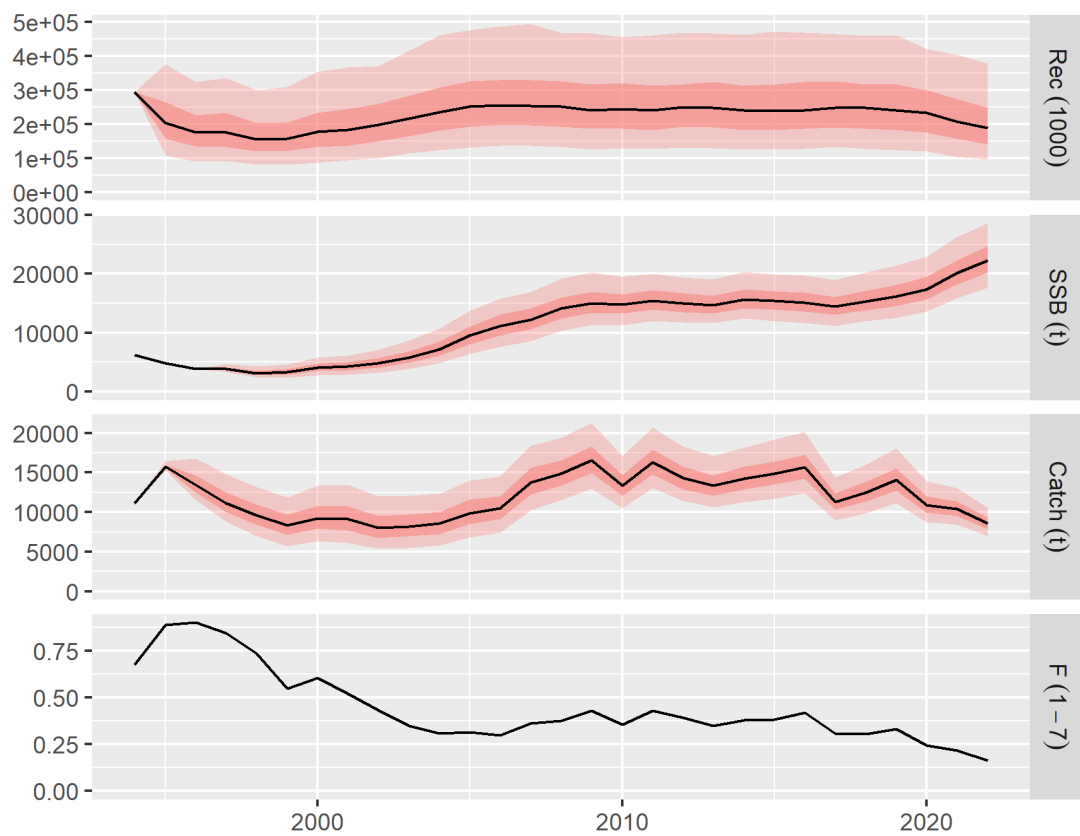


Figura B.12: Resumen serie corta SSB y REC. CV = 0,4

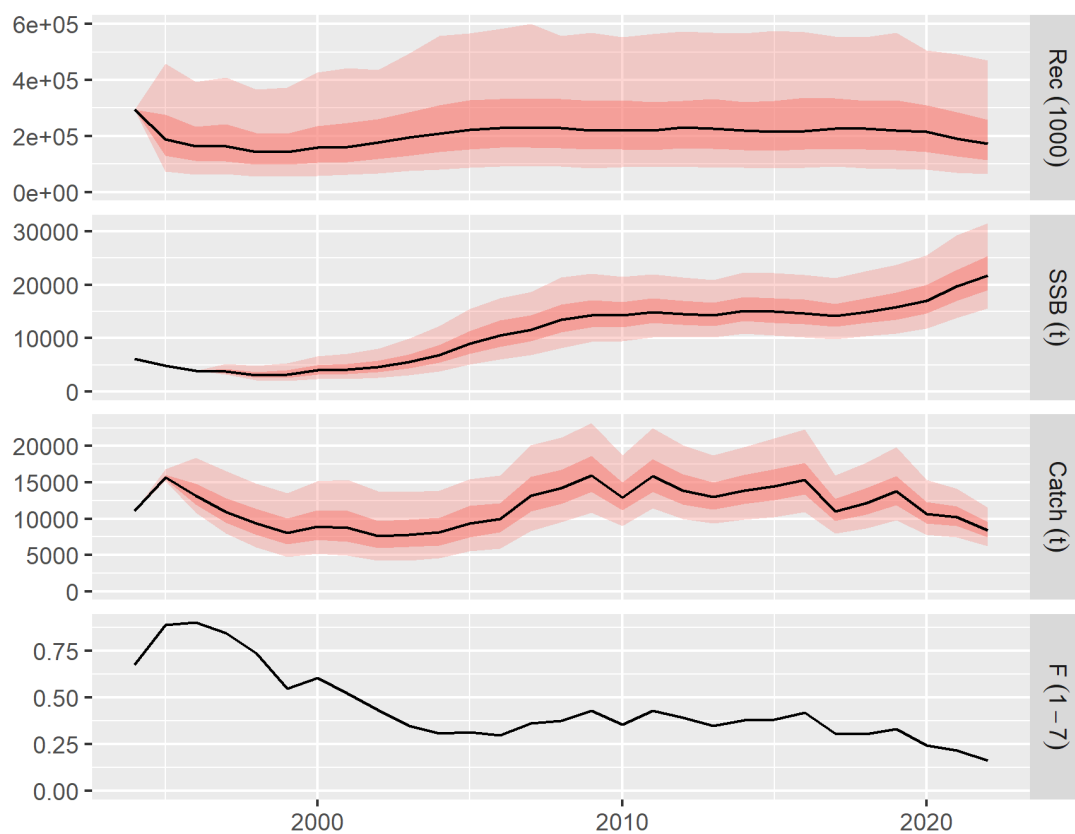


Figura B.13: Resumen serie corta SSB y REC. CV = 0,6