8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La Ciencia forestal y su contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible

8CFE - 676

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Cataluña | Catalunya · 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022
ISBN 978-84-941695-6-4
© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Organiza

Optimización de la gestión forestal como instrumento para mejorar la multifuncionalidad de los bosques

VERGARECHEA ALEGRÍA, MARTA.[1], FISCHER, CAROLIN.[1], ASTRUP, RASMUS.[1] y ANTÓN-FERNÁNDEZ, CLARA.[1],

[1] NIBIO (The Norwegian Institute of Bioeconomy Research).

Resumen

A medida que el concepto de multifuncionalidad de los bosques continúa ganando terreno en las políticas sobre la gestión forestal, se hace imperativo el desarrollo de instrumentos capaces de cuantificar los múltiples servicios que estos sistemas ofrecen. Como desafío, podemos destacar el ajuste de una demanda cada vez mayor de madera con la provisión de otros servicios ecosistémicos, como el aumento de la biodiversidad o la mitigación del cambio climático, objetivos a menudo contrapuestos. En el presente estudio, a través de 9371 parcelas permanentes procedentes del Inventario Forestal de Noruega, evaluamos la frontera de posibilidades entre diferentes servicios ecosistémicos (madera, biodiversidad, recreación, regulación climática, etc). Para ello, realizamos simulaciones para los próximos 100 años bajo 7 regímenes de gestión alternativos y definimos 3 escenarios, basándonos en las estrategias de gestión forestal. A continuación, optimizamos cada uno de los escenarios para minimizar el conflicto entre objetivos. Nuestros resultados mostraron una el compromiso entre los indicadores de producción maderera y de biodiversidad, y observamos beneficios asociados al secuestro de carbono cuando implementamos objetivos relacionado con el almacenamiento de CO2 en la optimización. También observamos que es necesaria una combinación de los diferentes regímenes de gestión para resolver los conflictos políticos a escala nacional.

Palabras clave

Multifuncionalidad, Biodiversidad, Optimización, Servicios Ecosistémicos.

1. Introducción

Durante décadas, los ecosistemas forestales han contribuido significativamente al bienestar humano, y a las economías nacionales (European Commission 2018), y hoy en día juegan un papel crucial en el desarrollo de una bioeconomía circular sostenible. Esta transición hacia una bioeconomía circular sostenible se considera esencial para mitigar los efectos del cambio climático y para conseguir los objetivos de desarrollo sostenible, y surge de la necesidad de abordar desafíos como la dependencia excesiva de los recursos naturales no renovables (Schulz et al. 2021). Los planes de acción para migrar hacia una bioeconomía circular sostenible varían significativamente entre los diferentes países (Patermann and Aguilar 2021), ya que hay una gran variedad de estrategias, planes de acción, hojas de ruta e iniciativas para apoyarlos. No obstante, en todos ellos, los bosques y el sector forestal son componentes esenciales, ya que será necesario aumentar la demanda de madera y biomasa para reemplazar así a las energías fósiles y otros productos no maderables y cumplir con los objetivos de mitigación climática de la UE (Hetemäki et al. 2017).

Sin embargo, el aumento de la demanda de madera y biomasa puede entrar en conflicto con la provisión de muchos otros servicios ecosistémicos (SE), como el secuestro de carbono, la regulación climática, el valor recreacional del bosque o incluso puede conducir a una pérdida de biodiversidad del ecosistema forestal (Morán-Ordóñez et al. 2020). Además, hay que tener en cuenta que las estrategias de bioeconomía no son las únicas estrategias o políticas que regulan los recursos forestales a nivel nacional. Existen, por ejemplo, en casi todos los países, diferentes estrategias de biodiversidad que se centran sobre todo en promover los SE relacionados directamente con la

conservación de la biodiversidad (BMU 2007; ME 2012). En el caso de Noruega, las tres estrategias forestales que regulan los servicios ecosistémicos a nivel nacional son; la estrategia forestal nacional (Skog 22) (INNR 2015), la estrategia de biodiversidad (Natur for livet) (MCE 2015), y la estrategia nacional para la industria forestal (Verdier i vekst) (NMAF 2016). Las tres evalúan y promueven diversas funciones de los SE, pero siguiendo diferentes hojas de ruta. Por ejemplo, mientras la estrategia de biodiversidad promueve la resiliencia de los ecosistemas y reconoce la importancia de la conservación de la biodiversidad, las estrategias forestales nacionales están más enfocadas en la cadena de valor y en los objetivos más productivos. Esto puede dar lugar a una falta de coherencia, a la hora de evaluar y gestionar los recursos forestales, conduciendo, a flujos divergentes en la provisión de SE (Nabuurs et al. 2019). Estos flujos divergentes ocurren cuando la provisión de un SE produce una disminución simultánea en la provisión de otro servicio ecosistémico (o viceversa), dificultando la implementación de alternativas de manejo "optimas" (Aggestam and Pülzl 2018; Schulz et al. 2021) y reduciendo la multifuncionalidad de los bosques. Que una gestión sea "optima" dependerá de las políticas consideradas, sus objetivos y SE específicos, así como la existencia de compensaciones y sinergias entre los SE (Schulz et al. 2021). En este contexto, hay una creciente evidencia de que los planes de manejos más diversos e integrativos pueden llegar a ser una alternativa de manejo adecuadas (Eyvindson et al. 2021; Messier et al. 2021).

De esta manera, la toma de decisiones basadas en datos de los inventarios forestales nacionales puede ser particularmente relevante, ya que representan la totalidad del área forestal de un país y se encuentran, cuando están disponibles, entre los mejores conjuntos de datos para analizar la disponibilidad de madera forestal a escala nacional. Por otro lado, diferentes metodologías, como el análisis multicriterio (Schwenk et al. 2012), han sido ampliamente utilizadas para evaluar las compensaciones y sinergias entre los diferentes servicios ecosistémicos así como la multifuncionalidad de los ecosistemas forestales. La optimización multiobjetivo (Miettinen 1998), por ejemplo, nos permite no solo comparar el resultado de diferentes regímenes o escenarios de gestión, si no también identificar una combinación de regímenes de gestión optima que maximice todos los SE simultáneamente.

2. Objetivos

Por ello, el principal objetivo del presente trabajo es evaluar, a través de una herramienta de optimización multiobjetivo, la capacidad de Noruega de proveer diferentes servicios ecosistémicos, bajo un conjunto de posibles escenarios futuros a la vez que cumple con los objetivos de mitigación climática.

Específicamente, abordamos las siguientes preguntas:

1) ¿Puede Noruega alcanzar los objetivos de mitigación climática bajo las tres estrategias forestales que regulan la provisión de los servicios ecosistémicos?
2) ¿Existe una solución óptima (plan de manejo) que maximice todos los objetivos de manera simultánea?

3. Metodología

Para llevar a cabo el estudio usamos datos procedentes del último Inventario Nacional Forestal Noruego (INFN) (2015 -2019) el cual está constituido por un total de 9371 parcelas permanentes distribuidas a lo largo de una cuadricula rectangular de 3km. Este INFN se basa en un ciclo de repetición de cinco años, por lo que cada parcela se vuelve a muestrear cada 5 años con 1/5 de todas las parcelas NFI visitadas anualmente Estos bosques presentan edades diversas y están dominados principalmente por abeto (*Picea abies*), pino silvestre (*Pinus sylvestris*) y abedul (*Betula pendula*). Las parcelas que conforman el INFN son circulares, con un radio fijo de 8.92m (250m^2) y dentro de cada parcela se realizan mediciones a nivel de árbol individual (Diámetro a la altura de

pecho DBH, coordenadas de todos los árboles con un dbh > 5 cm, y alturas en una submuestra de aproximadamente 10 árboles por parcela) (Breidenbach et al. 2020).

Los datos del INFN fueron utilizados como datos de entradas en el simulador SITREE, el cual simula la dinámica de los bosques noruegos bajo diferentes regímenes de manejo (Tabla 1). El efecto del cambio climático se incluyó en la simulación a través de un modelo de índice de sitio sensible al clima ajustado a las condiciones noruegas (Antón-Fernández et al. 2016).

De esta manera simulamos 7 regímenes de gestión, los cuales representan diferentes niveles de intensidad de corta, tiempos de rotación, número de aclareos y tipo de regeneración. Cuatro de los regímenes de gestión se basaron en modificaciones del régimen de gestión más común en Noruega, el régimen extensivo uniforme (Extensivo, Extensivo-largo, Intensivo e Intensivo-corto). También incluimos el régimen Multiespecie, enfocado en promover la mezcla de especies en el rodal, y el régimen de cobertura continua (CCF), enfocado en diversificar la estructura forestal y conseguir una cobertura continua del dosel superior. Finalmente, incluimos un régimen sin actividad de gestión forestal (Tabla 1).

Tabla 1. Regímenes de manejo aplicados durante la simulación en SITREE.

Régimen de gestión	Descripción
Extensivo	Manejo extensivo uniforme (plantación, corta final)
Extensivo-largo	Manejo extensivo uniforme (plantación, corta final). Se aumenta el periodo de rotación al 140% de la edad de rotación.
Intensivo	Manejo intensivo uniforme (plantación, mayor densidad, fertilizaciones, clareos)
Intensivo-corto	Manejo intensivo uniforme (plantación, mayor densidad, fertilizaciones, clareos). Se disminuye el periodo de rotación al 80% de la edad de rotación.
Multiespecie	Manejo de múltiples especies de edad uniforme (renovación con una mezcla de especies de abeto/pino/abedul)
Cobertura continua	Silvicultura de cobertura continua (cada 15 años se extrae el crecimiento de 15 años)
Sin gestión	Silvicultura con objetivo protector

- 3.1. Servicios Ecosistémicos

Utilizando los resultados de las simulaciones, estimamos la provisión de diferentes servicios ecosistémicos SE: (i) producción de madera; (ii) Bioenergía; (iii) conservación de la biodiversidad; (iv) erosión y agua; (v) regulación climática; y (vi) recreación. Debido a la complejidad que conlleva la evaluación de estos SE, esta estimación se realizó a través del cálculo de diferentes indicadores (Tabla 2). Así la producción de madera (i), que es el recurso de mayor importancia, se calculó como la cantidad total de madera comercial extraída. La producción de bioenergía (ii) se estimó a través de la producción de tocones y ramas. La biodiversidad (iii) se evaluó a través de diferentes variables estructurales; el área clasificada como "área MIS", la cual evalúa la abundancia de árboles viejos y de mayor tamaño, la producción de arándanos, que se estimó utilizando un modelo de regresión y el volumen de madera muerta (m^3). El total del área protegida se utilizó para medir la protección frente a la erosión causada por los cursos de agua (iv), en este caso el indicador fue el volumen de cosecha que se produce en áreas protegidas o áreas con pendiente pronunciada. La cantidad de carbono almacenado se calculó (v) a través del carbono fijado en la madera viva, la madera muerta y el suelo. Para calcular el carbono fijado en el bosque, utilizamos ecuaciones de biomasa de árboles individuales y usamos un factor de conversión de 0.5 para transformar la biomasa en CO2. Para estimar el carbono del suelo utilizamos el modelo Yasso 07 (Liski et al. 2005). También evaluamos el almacenamiento de carbono en productos madereros, diferenciando entre dos productos, madera

aserrada y paneles con vidas medias de 35 y 25 años, respectivamente. Finalmente, para evaluar el valor recreacional de los bosques noruegos, estimamos el valor del índice de Shannon para cada una de las parcelas de acuerdo a la composición de la parcela y la edad y tamaño de los individuos. Y clasificamos estas parcelas como parcelas con alto valor recreativo (índice de Shannon por encima de 3) y parcelas con menos valor recreativo (índice de Shannon por debajo de 3).

- 3.2. Escenarios socioeconómicos

Definimos tres escenarios socioeconómicos diferentes, considerando las políticas más relevantes en Noruega. Estos escenarios representan diferentes demandas futuras de productos derivados de la gestión forestal y por lo tanto diferentes intensidades de aprovechamientos. **1) Estrategia Forestal Nacional (EFN):** El EFN (Verdier i vekst) tiene como objetivo elevar el valor de la industria forestal y maderera, aumentando la producción y extracción sostenible de materia prima, así como la producción rentable de bioenergía y biocombustibles (NMAF 2016). También establece objetivos relacionados con la conservación de biodiversidad, mediante restricciones que evitan una disminución del área MIS desde el estado inicial del mismo . **2) Biodiversidad (BIO) :** centrado principalmente en la promoción y conservación de la biodiversidad, se basa en la estrategia de Biodiversidad nacional (Natur for livet) (MCE 2015). Por lo tanto, existe una promoción de la biodiversidad al enfocarse en la abundancia del área de MIS, la cantidad de madera muerta y el aumento de la cobertura de arándanos, mediante restricciones para evitar una disminución desde los estados iniciales de estos indicadores. Al mismo tiempo, la política reconoce el papel que juegan los bosques regulando servicios, como el control de la erosión. Por ello, incluimos un objetivo minimizando el área de corta en terrenos protegidos así como en terrenos de altas pendientes. Finalmente, al maximizar el número de parcelas con alto valor recreativo, este escenario pretende estimular una mayor creación de valor en la silvicultura. **3) Bioeconomía (BIE)** este escenario asume una selvicultura más intensa, con especial foco en la producción de madera, pero otorgando un papel importante también al resto de los servicios ecosistémicos, como el aumento de la biodiversidad o aspectos recreativos. Al igual que el escenario BAU, los objetivos relacionados con la producción de madera y bioenergía se maximizaron. Los objetivos de biodiversidad también se incluyeron como restricciones, evitando una disminución desde el estado inicial. El resto de los objetivos aparecen indicados en la tabla2. De los tres escenarios definidos, este sería el escenario con mayor número de indicadores definidos y se apoya en la estrategia noruega de bioeconomía (Skog 22) (INNR 2015) (Tabla 2).

Tabla 2. Objetivos y restricciones definidos en cada uno de los escenarios políticos, EFN, BIO y BIE.

		ENF	BIO	BIE
Servicio ecosistémico	**Indicador**	**Objetivo/restricción**	**Objetivo/restricción**	**Objetivo/restricción**
Producción de madera	Valor neto productos derivados de corta	maximizar		maximizar
Bioenergía	Biomasa	maximizar		maximizar
Biodiversidad	MIS área	restricción (no disminuir)	maximizar	restricción (no disminuir)
	Madera muerta		maximizar	restricción (no disminuir)
	Cobertura Arándanos		maximizar	restricción (no disminuir)
	MIS área		restricción (no disminuir)	
	Madera muerta		restricción (no disminuir)	
	Cobertura Arándanos		restricción (no disminuir)	
Erosión y protección Hidrológica			Restricción (no aumentar)	
Regulación climática	CO_2 en productos Forestales	maximizar		maximizar
	CO_2 almacenado en bosque			maximizar
Recreación			maximizar	maximizar

- 3.3. Objetivos de mitigación climática

Los objetivos de mitigación climática se expresaron como demandas de madera. Estas demandas, se calcularon a través del modelo GLOBIOM (Modelo de gestión global de la biosfera de IIASA) que es un modelo económico que cubre de manera conjunta el sector forestal, agrícola, ganadero y bioenergético, y que permite considerar un abanico de causas directas e indirectas del uso de biomasa (Lauri et al. 2021). Mediante este modelo, las demandas de madera proyectadas para uso de materiales y bioenergía hasta el 2100 se especificaron a nivel nacional para cinco productos: troncos para aserrar, madera para pulpa, otra madera industrial en rollo, leña y residuos de la tala. En este estudio, agrupamos los productos en una clase, productos cosechados, y trabajamos con esta única variable.

- 3.4. Optimización de los indicadores bajo diferentes escenarios

A través de una herramienta de optimización multiobjetivo, analizamos la capacidad de noruega de cumplir con los objetivos de mitigación climática (demandas GLOBIOM) y de proveer los diferentes servicios ecosistémicos definidos por las políticas nacionales. De esta forma, una vez que cumplimos con las demandas de madera provistas por GLOBIOM, este marco de optimización intenta encontrar una solución eficiente para cada rodal. El objetivo de esta metodología es encontrar un plan de gestión, que maximice el vector de resultados, compuesto por los diferentes objetivos y restricciones. En este punto, es poco probable que exista una solución que maximice todos los objetivos simultáneamente. Es decir, si un plan de manejo da como resultado el mejor valor posible para un objetivo determinado, es probable que este plan no coincida con la solución óptima para el resto de los objetivos dentro de cada escenario de optimización. Para ello, utilizamos la formulación de problemas únicos de optimización multiobjetivo para encontrar una solución específica para cada escenario de política (Miettinen 1998) con base en las preferencias definidas previamente (Ecuación 1). Esta solución puede describirse como un "acuerdo" entre los valores de los diferentes objetivos.

$$\begin{gathered} minimize\ x\ \{f_1(x), \dots, f_n(x)\} \\ subject\ x\ \in S \end{gathered}$$

De esta manera, $f_1(x)$ define las funciones para cada uno de los objetivos, x es el vector de regímenes de manejo y S es el conjunto de regímenes de gestión determinados por las restricciones. [Ecuación 1]

Así, para optimizar nuestros escenarios BAU, BIO y BIE seguimos el siguiente procedimiento. 1) Igualamos exactamente nuestros valores de cosecha de madera nacionales con las demandas de mitigación climática (GLOBIOM) en la optimización, haciendo 0 la diferencia entre estas dos variables. 2) optimizamos los escenarios para el resto de los objetivos definidos en las estrategias forestales. Es decir, optimizamos para cada uno de los indicadores que aparecen en la tabla 2.

En este estudio, la optimización se llevó a cabo mediante una herramienta desarrollada en Python mientras que todas las simulaciones fueron llevadas a cabo en R.

4. Resultados

La figura 1 muestra que Noruega será capaz de cumplir con los objetivos de mitigación climática definidos por la UE, es decir podrá satisfacer las demandas de madera y bioenergía definidas por GLOBIOM, independientemente del escenario político. En la figura 3 observamos que tanto estas demandas de madera y bioenergía como nuestros valores simulados de cosecha coinciden exactamente en la misma línea, en los tres escenarios, EFN, BIO y BIE. Esta tendencia muestra un incremento significativo y lineal durante los primeros 50 años de las simulaciones, donde

el volumen de cosecha aumenta de 11 millones de m³ en 2018 a 16,8 millones de m³ en 2073. Tras este incremento inicial, el volumen de cosecha muestra un crecimiento más suave hasta alcanzar los 17 millones m³ hacia el final de la simulación, en el año 2093.

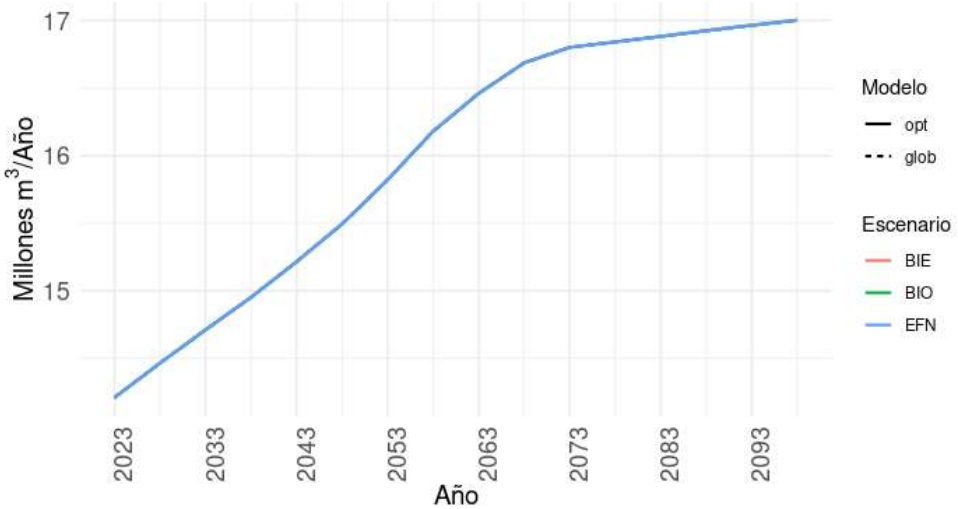

Figura 1. Demandas de madera y bioenergía definidas por el modelo GLOBIOM y valores simulados de cosecha de madera a nivel nacional (Noruega).

La figura 2 muestra la distribución de los regímenes de manejo para cada uno de los escenarios políticos, una vez alcanzada la solución óptima en cada uno de ellos. De esta manera, el régimen extensivo, fue el régimen predominante dentro del escenario EFN, ya que se aplicó en un 38.3% por ciento del área total. Este porcentaje disminuyo significativamente, hasta un 20%, en BIO. Los dos regímenes intensivos, especialmente el de rotación corta, también tuvieron una participación significativa dentro de este escenario EFN. Sin embargo, la proporción de estos regímenes de gestión disminuyo notablemente en el escenario BIO, donde los objetivos están dirigidos principalmente a maximizar los indicadores de biodiversidad (madera muerta, superficie con árboles viejos y grandes y cobertura de arándanos) y recreación. Bajo este último escenario hay una disminución, de alrededor de 2,7 millones de ha, en el área asignada al régimen extensivo mientras que el área asignada a régimen sin manejo y régimen de cobertura continua (CCF) aumenta respectivamente en 1,2 millones de ha (desde 15 % hasta 25,5%) y 0,5 millones de ha (desde 1.2 % hasta 5,5 %). Finalmente observamos que el escenario BIE presenta una distribución de los regímenes de manejo similar a aquella observada en el escenario EFN aunque en este caso, se observa un aumento de los regímenes de gestión más intensivos.

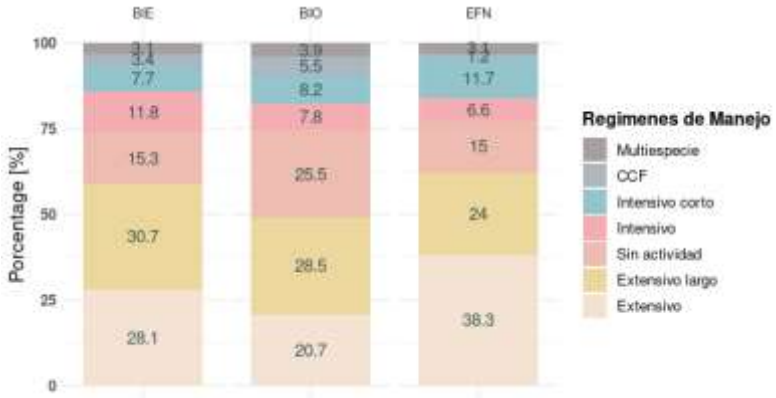

Figura 2: Distribución de los regímenes de manejo bajo la solución óptima en los tres escenarios políticos, EFN, BIO y BIE. Los regímenes de manejo aparecen descritos en la tabla 1.

Una vez alcanzada la solución óptima se evaluó la futura prestación de los servicios ecosistémicos a través de sus indicadores (sección 3.1). De esta manera, se observó que la diferencia entre los escenarios políticos fue especialmente marcada hacía el final de la simulación. Los efectos de las restricciones en el problema de optimización se observan principalmente en los indicadores de biodiversidad; la cobertura de arándano, el área MIS y el volumen de madera muerta. Así, el área MIS mostró una tendencia creciente bajo los tres escenarios políticos, especialmente en los escenarios BIO, donde el indicador fue definido como un objetivo a maximizar y no solamente como una restricción (evitar una disminución desde el estado inicial). Los resultados mostraron también los efectos de las restricciones la cobertura de arándano en este escenario, ya que se observa una cobertura constante a lo largo de la simulación, impidiendo una disminución de dicho indicador. Este comportamiento no se observó en los otros dos escenarios, EFN y BIE, donde la cobertura de arándano disminuye durante los primeros años. Tras esta disminución inicial, el escenario BIE mostró una tendencia creciente que fue estabilizada hacia 2073. Por el contrario, EFN necesitó un periodo más largo para que la provisión de este indicador mostrará una ligera tendencia creciente. Por otro lado, los tres escenarios mostraron un aumento constante del volumen de madera muerta (Fig 3).

Los resultados mostraron también un incremento significativo del intercambio de CO_2 intercambiada en productos madereros, especialmente durante los primeros años. Este indicador llegó a tener un valor máximo de 82 millones de toneladas de CO_2 en el año 2038. En este caso, los tres escenarios políticos mostraron tendencias bastante similares, aunque el escenario BIO mostró valores más bajos durante la primera mitad de las simulaciones. La cantidad de CO_2 intercambiada por el bosque, por el contrario, mostró una tendencia diferente. Este indicador muestra también una tendencia ligeramente creciente, con unos valores que oscilan entre 10-20 millones de kilotoneladas durante casi todo el periodo estudiado. Sin embargo, el escenario BIE, al maximizar este indicador, hace que los valores del CO_2 almacenado en el bosque alcance valores de casi 50 millones de kilotoneladas en el año 2093.

Finalmente, observamos que el escenario BIO fue el escenario que presentó mayor cantidad de parcelas con alto valor recreativo (índice de Shannon por encima de 3) durante casi todo el periodo estudiado. Sin embargo, el escenario BIE, a pesar del decaimiento inicial, muestra una tendencia significativamente creciente a partir del año 2033, que se va estabilizando a lo largo del periodo estudiado.

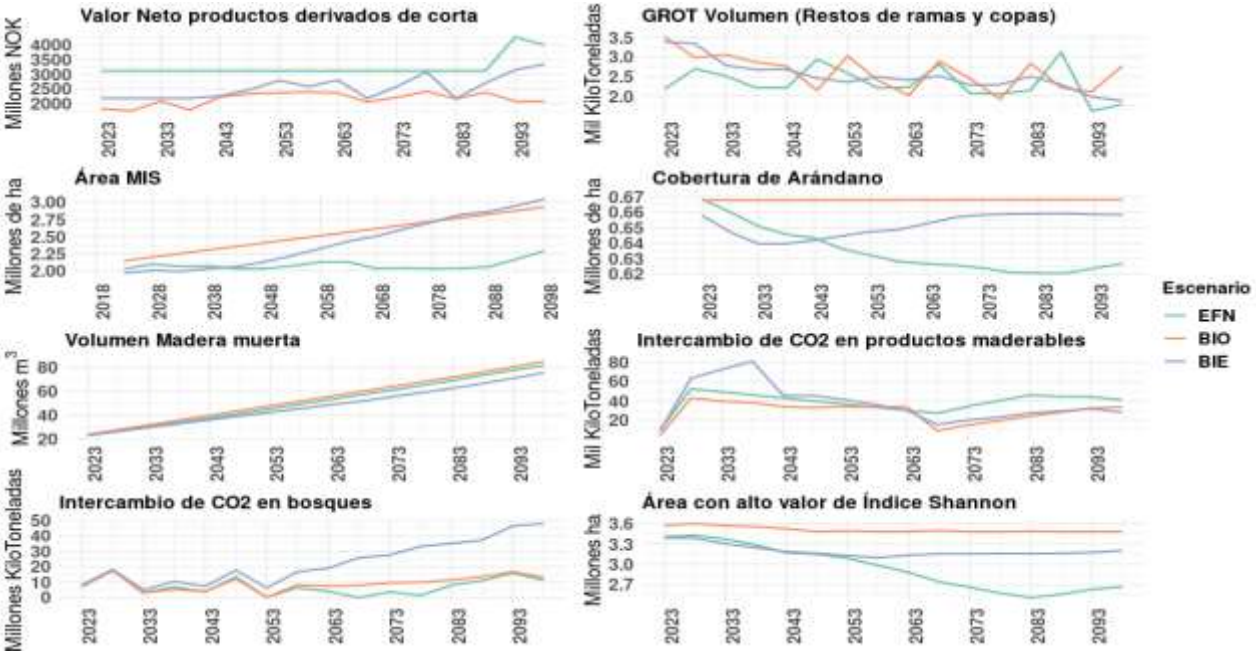

Figura 3. Futura prestación de los diferentes indicadores utilizados en la optimización. Dentro de cada gráfica se compara el desarrollo del indicador bajo los diferentes escenarios políticos.

5. Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio revelan la capacidad de Noruega para satisfacer las demandas establecidas por la UE para cumplir con los objetivos de mitigación climática, expresadas como demandas de GLOBIOM para madera y bioenergía (Fig 1). Estas demandas alcanzan los 17 millones de m^3 hacía el final del periodo estudiado 2093 y coinciden con los resultados mostrados por Solberg et al. (2021), quienes mostraron un aumento de la cosecha de madera para el año 2050 de 15.6 millones de m^3 en Noruega.

No obstante, las futuras consecuencias para los ecosistemas forestales vendrán determinadas por las políticas forestales establecidas y cómo estás definen los objetivos de gestión. Así, por ejemplo, la disminución en la cobertura de arándano, en los dos escenarios EFN y BIE (Fig. 3), podría explicarse por la falta de restricciones relacionadas con este indicador en el problema de optimización (Tabla 2) y revela el compromiso entre la producción maderera y el mantenimiento de otros servicios ecosistémicos (Gamborg and Larsen 2003; Duncker et al. 2012). La inclusión de los indicadores de biodiversidad como objetivos a maximizar (BIO), produce un aumento significativo en el área MIS, aunque en todos los escenarios se consiguió un incremento de este indicador a lo largo del periodo estudiado. Noruega posee una extensa superficie de bosque donde la dificultad de acceso hace inviable la producción maderera y a menudo el objetivo protector es el objetivo de gestión más importante (Sundnes et al. 2020). Bajo este contexto, parece bastante factible aumentar el área con abundancia de árboles viejos y de mayor tamaño (área MIS).
Debido a una plantación masiva y a una gestión forestal activa, las existencias de madera en pie han aumentado alrededor del 30% desde 1990. Como consecuencia, casi el 43% de la superficie forestal productiva consiste en bosques maduros (Norwegian Ministries. 2018). Este hecho, y el incremento inicial de extracción para cumplir con los objetivos de mitigación climática (Fig.1) explicaría el rápido incremento de CO2 intercambiado en productos madereros durante los primeros años de la simulación, los cuales, ayudarán a lograr la neutralidad climática al almacenar carbono y sustituir material de origen fósil. Al mismo tiempo, los resultados revelaron que al implementar un objetivo relacionado con el almacenamiento de CO2 en los bosques (Tabla 2, escenario BIE), los beneficios asociados con el secuestro de carbono aumentan significativamente (Fig. 3). Estos resultados refuerzan los obtenidos por (Søgaard et al. 2020) que demostraron que los bosques noruegos continuaran siendo un importante sumidero de carbono en el futuro, incluso llevando a cabo un mayor nivel de aprovechamiento. Por último, observamos que la inclusión del índice de Shannon como objetivo produce un aumento significativo de parcelas con alto valor recreativo (índice de Shannon > de 3). Disfrutar al aire libre tiene una larga tradición en Noruega, sin embargo, los valores recreativos del bosque se mencionan ligeramente en las políticas forestales, sin objetivos ni rutas de gestión bien definidas. Antes estos escenarios de falta de "gestión recreativa", la inclusión de objetivos no comerciales en los planes de gestión forestal puede incorporar diferentes preferencias de valor de manera efectiva en el proceso de toma de decisiones y ayudar a diseñar nuevas alternativas forestales.

- <u>Implicaciones para la gestión forestal</u>

La definición del plan de gestión, a través de los objetivos y restricciones establecidas por las tres estrategias forestales, conducirá a diferentes alternativas de gestión forestal (Fig. 2). Así si comparamos los tres escenarios políticos, observamos un aumento significativo del área sin actividad forestal en el escenario BIO frente al EFN, así como del régimen de cobertura continua. Sin embargo, para satisfacer las demandas de madera y bioenergía e incrementar el área sin una gestión forestal activa, la extracción de madera deberá aumentar en otras localizaciones (Duncker et al. 2012). De acuerdo con nuestros resultados, observamos un ligero aumento del área dedicada al régimen intensivo (7.8% en BIO frente a 6.6% en EFN) en este escenario BIO, que podría compensar la falta de madera producida al aumentar el área sin actividad forestal. En el caso del

escenario BIE, observamos un patrón similar, donde los regímenes más intensivos (como el intensivo corto) se ven también reducidos. Una gestión forestal más diversa es equivalente a un sistema compatible con una mayor provisión de servicios ecosistémicos. Si comparamos los tres escenarios políticos, observamos que ninguna de las estrategias de gestión, aplicada de manera uniforme, sería apropiada para maximizar la provisión de los servicios ecosistémicos al mismo tiempo. Para aliviar el efecto negativo que tendría el aumento de los niveles de explotación, necesarios para cumplir con los objetivos de mitigación climática, será necesario llevar a cabo una gestión forestal integradora, que combine diferentes regímenes de gestión y que ayude a diferenciar las zonas con alto valor productivo, así como las zonas de alto valor protector (Schulz et al. 2021).

6. Bibliografía

Aggestam F, Pülzl H (2018) Coordinating the Uncoordinated: The EU Forest Strategy. For 2018, Vol 9, Page 125 9:125. https://doi.org/10.3390/F9030125

BMU (2007) National Strategy on Biological Diversity. Berlin

Breidenbach J, Granhus A, Hylen G, et al (2020) A century of National Forest Inventory in Norway – informing past, present, and future decisions. For Ecosyst 7:. https://doi.org/10.1186/s40663-020-00261-0

Duncker PS, Raulund-Rasmussen K, Gundersen P, et al (2012) How forest management affects ecosystem services, including timber production and economic return: Synergies and trade-offs. Ecol Soc 17:. https://doi.org/10.5751/ES-05066-170450

European Commission (2018) A Clean Planet for all. A European strategic long-term vi- sion for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy. Brussel

Eyvindson K, Duflot R, Triviño M, et al (2021) High boreal forest multifunctionality requires continuous cover forestry as a dominant management. Land use policy 100:104918. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104918

Gamborg C, Larsen JB (2003) 'Back to nature'—a sustainable future for forestry? For Ecol Manage 179:559–571. https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00553-4

Hetemäki L, Hanewinkel M, Muys B, et al (2017) Leading the way to a European circular bioeconomy strategy. From Science to Policy 5

INNR (2015) SKOG22 Nasjonal Strategi for Skog- og Trenaeringen. Oslo

Lauri P, Forsell N, Di Fulvio F, et al (2021) Material substitution between coniferous, non-coniferous and recycled biomass – Impacts on forest industry raw material use and regional competitiveness. For Policy Econ 132:102588. https://doi.org/10.1016/J.FORPOL.2021.102588

Liski J, Palosuo T, Peltoniemi M, Sievänen R (2005) Carbon and decomposition model Yasso for forest soils. Ecol Modell 189:168–182. https://doi.org/10.1016/J.ECOLMODEL.2005.03.005

MCE (2015) Natur for livet. Norsk handlingsplan for naturmangfold. Oslo

ME (2012) Saving Nature for People - National action plan for the conservation and sustainable use of biodiversity in Finland 2013-2020. Finland

Messier C, Bauhus J, Sousa-Silva R, et al (2021) For the sake of resilience and multifunctionality, let's diversify planted forests! Conserv Lett. https://doi.org/10.1111/CONL.12829

Miettinen K (1998) Nonlinear Multiobjective Optimization, 1st edn. Springer US

Morán-Ordóñez A, Ameztegui A, De Cáceres M, et al (2020) Future trade-offs and synergies among ecosystem services in Mediterranean forests under global change scenarios. Ecosyst Serv 45:101174. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101174

Nabuurs G-J, Verweij P, Van Eupen M, et al (2019) Next-generation information to support a sustainable course for European forests. Nat Sustain 2019 29 2:815–818. https://doi.org/10.1038/s41893-019-0374-3

NMAF (2016) Verdier i vekst. Konkurransedyktig skog- og trenæring. Oslo

Norwegian Ministries. (2018) Familiar resources – undreamt possibilities. The Government's Bioeconomy Strategy.

Patermann C, Aguilar A (2021) A bioeconomy for the next decade. EFB Bioeconomy J 1:100005. https://doi.org/10.1016/J.BIOECO.2021.100005

Schulz T, Lieberherr E, Zabel A (2021) How national bioeconomy strategies address governance challenges arising from forest-related trade-offs. J Environ Policy Plan. https://doi.org/10.1080/1523908X.2021.1967731

Schwenk WS, Donovan TM, Keeton WS, Nunery JS (2012) Carbon storage, timber production, and biodiversity: comparing ecosystem services with multi-criteria decision analysis. Ecol Appl 22:1612–1627. https://doi.org/10.1890/11-0864.1

Søgaard G, Fernández A, Holt K, et al (2020) Klimakur 2030 – beskrivelse av utvalgte klimatiltak knyttet til skog. Supplement

Solberg B, Moiseyev A, Hansen JØ, et al (2021) Wood for food: Economic impacts of sustainable use of forest biomass for salmon feed production in Norway. For Policy Econ 122:102337. https://doi.org/10.1016/J.FORPOL.2020.102337

Sundnes F, Karlsson M, Platjouw FM, et al (2020) Climate mitigation and intensified forest management in Norway: To what extent are surface waters safeguarded? Ambio 49:1736–1746. https://doi.org/10.1007/s13280-020-01357-1